

MASTERARBEIT

**TRAGVERHALTEN VON FACHWERKSDIAGONALEN AUS
I-PROFILIEN MIT BEIDSEITS EINGESCHLITZTEN
KNOTENBLECHEN**

von

Andreas Kampleitner

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 Oktober 2013

Betreuer:

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

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, 23. Oktober 2013



Andreas Kamplleitner

Englische Fassung:

Statutory Declaration

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

Graz, 23rd of October, 2013



Andreas Kamplleitner

Danksagung

Ich danke ganz besonders meinen Eltern Bernadette und Helmut, meinen Großeltern Gertrud und Helmuth Kamplleitner sowie Johanna und Josef Niedermajr als auch meinem Bruder Christoph für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen während der gesamten Studienzzeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Harald Unterweger dafür, dass ich das Thema der vorliegenden Masterarbeit am Institut für Stahlbau bearbeiten konnte. Durch die laufenden Besprechungstermine zur Unterstützung und seine große Erfahrung konnten ständig Fortschritte während der Ausarbeitungszeit verzeichnet werden.

Meinem Betreuer Dr.techn. Dipl.-Ing. Markus Kettler danke ich für seinen ausdauernden und permanenten Beistand und seine hilfreichen Ratschläge.

In guter Erinnerung behalte ich die im Zuge des Studiums entstandene Freundschaft zu meinem Kommilitonen Johannes Oppeneder. Möge diese auch weiterhin von Bestand bleiben.

An meine Wohnungsgemeinschaftspartnerinnen Katharina Winkler und Denise Wieser herzlichen Dank für die schöne gemeinsame Zeit während unseres Zusammenlebens als eingeschworenes Team in allen Lebenslagen.

Danke auch an die Fa. Haslinger Stahlbau aus A - 9560 Feldkirchen / Kärnten für den Anstoß zum behandelten Thema und der Zurverfügungstellung von Konstruktionsplänen.



Tragverhalten von Fachwerksdiagonalen aus I-Profilen mit beidseits eingeschlitzten Knotenblechen

Kurzfassung

Bedingt durch den fehlenden Diagonalstabanschluss an Ober- und Untergurt liegt für das Knicken aus der Fachwerkebene ein sehr komplexes Tragverhalten vor. Kernthema der vorliegenden Masterarbeit ist eine auf der Finite Elemente-Methode basierende, computerunterstützte Tragfähigkeitsermittlung von Fachwerksdiagonalen aus I-Profilen und beidseits eingeschlitzten Knotenblechen. Es erfolgte eine Gegenüberstellung von FE-Grenztraglasten und jenen Ergebnissen, welche mit in der Praxis üblichen Verfahren berechnet wurden. Primär wurden Stabilitätseffekte der Druckdiagonale in Wechselwirkung mit dem Knotenblech behandelt. Als konventionelle, näherungsweise Handrechnung diente unter anderen die Knickspannungstragfähigkeit nach Eurocode 3. Des Weiteren erfolgte ein Vergleich mit einem aus der Literatur entnommen Bemessungsvorschlag für Hohlprofile mit beidseits zentrisch eingeschlitzten Knotenblechen. Aus den von der Fa. Haslinger Stahlbau zur Verfügung gestellten Konstruktionsplänen wurden fünf repräsentative Fachwerkknoten ausgewählt, welche die Basis einer Parameterstudie bildeten. Zusätzlich wurde eine sechste Gruppe aus der Literatur hinzugezogen. Variiert wurden wesentliche Einflussparameter auf die Knotentragfähigkeit, wie die im Untergurt des Fachwerkes vorherrschende Belastungssituation, die Breite der Untergurtflansche zur Erhöhung der Gurtstabilität (um den Einfluss der Untergurtverdrehung feststellen zu können) und die Dicke des Knotenbleches. Zur Plausibilitätskontrolle der Spannungswerte des modellierten FE-Modells, stand am Beginn der Arbeit die Modellierung von zwei Fachwerkknoten aus der Literatur. Durch einen Vergleich der eigenen Spannungsverläufe entlang mehrerer Pfade mit jenen aus der Literatur, konnte die Qualität des entwickelten FE-Modells bestätigt werden.

Ziel ist es einerseits festzustellen, welche Versagensformen und Versagensarten bei derartigen Fachwerkknotenausführungen auftreten können und andererseits aufzuzeigen, ob die in der Praxis mittels vereinfachten Handrechnungsmethoden ermittelten zulässigen Traglasten ausreichend genaue Ergebnisse liefern, um sicher und dennoch wirtschaftlich dimensionieren zu können.

Load carrying behaviour of truss members made of I-sections with slotted gusset plates on both ends

Abstract

Due to the missing connection of the diagonal member with upper and lower chord a very complex stability behaviour out of plane of the diagonals is observed. The main topic of the following master thesis is a computer-assisted load carrying capacity calculation based on the finite element method of diagonal members using I-sections as members with gusset plates that are slotted on both ends. The resulting compression member capacities are compared with the simple design models for flexural buckling as they are commonly employed in practice. Primary stability effects of the compression member in interaction with the gusset plate were handled. The load carrying capacity of buckling stress according to Eurocode 3 served as a conventional calculation by hand. Furthermore a comparison with a recommended design model for hollow sections with centrally slotted gusset plates on both ends, which was taken from literature, was made. The company Haslinger Stahlbau provided constructions plans, from which five typical truss joints were chosen as the basement for a parameter study. A sixth group taken from literature was added in the study. The essential influence parameters on the joint load bearing capacity, like the load situation at the bottom chord member of the truss, the width of the bottom chord member flange to raise the stability (to determine the influence of the bottom chord member twist) and the thickness of the gusset plate, were varied. At the beginning the modelling and finite element calculation of two truss joints taken from literature, was used as a plausibility check of the own developed FE-model. Due to a comparison of the own strain curves along several paths from literature, the quality of the developed FE-model could be confirmed.

On the one hand the objective is to assert the mode of failure causes and failure types that can occur in such diagonal members and on the other hand to identify if in practice used well-known methods of hand calculations for load capacities provide sufficiently exact results. Based on that it is possible to design reliably and also economically members.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Wichtige Einflussgrößen auf das Tragverhalten	3
2	Untersuchte Knotenausführungen	4
2.1	Allgemeines	4
3	FE-Modellierung und Berechnung	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	Modellierung der Knoten	6
3.3	Imperfektionen bei der Traglastberechnung	7
3.4	Durchführung der Traglastberechnungen	7
4	Abschätzung der Knoten Tragfähigkeit mittels einfachen Handrechnungsmethoden	8
4.1	Allgemeines	8
4.2	Ergebnisse der Handrechnungen	8
5	Tragfähigkeit aus FE-Berechnung und Vergleich mit den Handrechnungs-Ergebnissen	11
5.1	Allgemeines	11
5.2	Tragfähigkeitsvergleich der repräsentativen Gruppe 5	12
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen	15
6	Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente	16
6.1	Allgemeines	16
6.2	Tragfähigkeitsvergleich ohne Zugkraftkomponente der repräsentativen Gruppe 5	17
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen	19
7	Parameterstudie	20
7.1	Variation der Untergurtbreite	20
7.1.1	Allgemeines	20
7.1.2	Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Untergurtbreite der repräsentativen Gruppe 5	21
7.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen	23
7.2	Variation der Knotenblechdicke	24
7.2.1	Allgemeines	24
7.2.2	Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Knotenblechdicke der repräsentativen Gruppe 5	25
7.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen	26
7.3	Variation der Belastungssituation im Untergurtstab	27
7.3.1	Allgemeines	27
7.3.2	Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Belastungssituation im Untergurtstab der repräsentativen Gruppe 5	29
7.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen	33

Anhang A	Vergleich der Ergebnisse von Knoten-ausführungen aus der Literatur	35
A - 1	Allgemeines	35
A - 2	Modellierung der Knoten mittels der Finite Elemente -Software „Abaqus“	36
A - 2.1	Allgemeines	36
A - 2.2	Randbedingungen und Belastung	39
A - 3	Ständerfachwerkanschluss nach [1]	40
A - 3.1	Geometrie und Abmessungen	40
A - 3.2	Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe	41
A - 3.3	FE-Ergebnisse im Belastungszustand.....	42
A - 3.4	Ausgewertete Pfade	44
A - 3.4.1	Spannungsverlauf im Pfad 1	45
A - 3.4.2	Spannungsverlauf im Pfad 2	46
A - 3.4.3	Spannungsverlauf im Pfad 3	47
A - 3.4.4	Spannungsverlauf im Pfad 4	48
A - 3.4.5	Spannungsverlauf im Pfad 5	49
A - 3.4.6	Spannungsverlauf im Pfad 6	50
A - 3.4.7	Zusammenfassende Beurteilung des Vergleichs der ausgewerteten Pfade	51
A - 4	Strebenfachwerkanschluss nach [2]	52
A - 4.1	Geometrie und Abmessungen	52
A - 4.2	Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe	53
A - 4.3	FE-Ergebnisse im Belastungszustand.....	54
A - 4.4	Ausgewertete Pfade	56
A - 4.4.1	Normalspannungsverlauf im Pfad 1.....	57
A - 4.4.2	Normalspannungsverlauf im Pfad 2.....	58
A - 4.4.3	Normalspannungsverlauf im Pfad 3.....	59
A - 4.4.4	Normalspannungsverlauf im Pfad 4.....	60
A - 4.4.5	Normalspannungsverlauf im Pfad 5.....	61
A - 4.4.6	Normalspannungsverlauf im Pfad 6.....	62
A - 4.4.7	Schubspannungsverlauf im Pfad 6.....	63
A - 4.4.8	Vergleich der Pfade 1, 3 und 5.....	64
Anhang B	Parameterstudie basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau.....	65
B - 1	Aufnahme der Daten und Abmessungen	65
B - 1.1	Zusammenfassung der ausgewählten Gruppen	71
B - 1.1.1	Gruppe 1.....	72
B - 1.1.2	Gruppe 2.....	74
B - 1.1.3	Gruppe 3.....	76
B - 1.1.4	Gruppe 4.....	78
B - 1.1.5	Gruppe 5.....	80
B - 1.1.6	Gruppe 6.....	81
B - 2	Modellierung der Knoten mittels der Finite Elemente -Software „Abaqus“	82
B - 2.1	Allgemeines.....	82
B - 2.2	Randbedingungen zur Ermittlung der System-Eigenformen.....	86
B - 3	Tragfähigkeit mit Handrechnung.....	89
B - 3.1	Allgemeines	89
B - 3.2	Gruppe 1.....	89
B - 3.2.1	Knicktragfähigkeit.....	89
B - 3.2.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	92
B - 3.3	Gruppe 2.....	95
B - 3.3.1	Knicktragfähigkeit.....	95
B - 3.3.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	96
B - 3.4	Gruppe 3.....	99
B - 3.4.1	Knicktragfähigkeit.....	99
B - 3.4.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	100
B - 3.5	Gruppe 4.....	103
B - 3.5.1	Knicktragfähigkeit.....	103
B - 3.5.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	104

B - 3.6	Gruppe 5	107
B - 3.6.1	Knicktragfähigkeit	107
B - 3.6.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	108
B - 3.7	Gruppe 6a	111
B - 3.7.1	Knicktragfähigkeit	111
B - 3.7.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	112
B - 3.8	Gruppe 6b	115
B - 3.8.1	Knicktragfähigkeit	115
B - 3.8.2	Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]	116
B - 3.9	Zusammenfassung	119
B - 4	Tragfähigkeit mit FE-Berechnung	121
B - 4.1	Allgemeines	121
B - 4.1.1	Imperfektionen für die GMNIA-Berechnungen	121
B - 4.1.2	Zusammenfassung der Vorgehensweise der FE-Berechnung	124
B - 4.1.3	Zusätzliche Druckstreben-Stabrechnung mit der Länge L^* als Vergleich	124
B - 4.1.4	Dargestellte Traglastzustände	125
B - 4.2	Gruppe 1	126
B - 4.2.1	Imperfektionen	126
B - 4.2.2	Ergebnisse im Traglastzustand	128
B - 4.2.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	128
B - 4.2.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	130
B - 4.2.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	132
B - 4.2.2.4	Stabrechnung	134
B - 4.3	Gruppe 2	135
B - 4.3.1	Imperfektionen	135
B - 4.3.2	Ergebnisse im Traglastzustand	137
B - 4.3.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	137
B - 4.3.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	139
B - 4.3.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	141
B - 4.3.2.4	Stabrechnung	143
B - 4.4	Gruppe 3	144
B - 4.4.1	Imperfektionen	144
B - 4.4.2	Ergebnisse im Traglastzustand	146
B - 4.4.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	146
B - 4.4.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	148
B - 4.4.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	150
B - 4.4.2.4	Stabrechnung	152
B - 4.5	Gruppe 4	153
B - 4.5.1	Imperfektionen	153
B - 4.5.2	Ergebnisse im Traglastzustand	155
B - 4.5.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	155
B - 4.5.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	157
B - 4.5.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	159
B - 4.5.2.4	Stabrechnung	161
B - 4.6	Gruppe 5	162
B - 4.6.1	Imperfektionen	162
B - 4.6.2	Ergebnisse im Traglastzustand	164
B - 4.6.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	164
B - 4.6.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	166
B - 4.6.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	168
B - 4.6.2.4	Stabrechnung	170
B - 4.7	Gruppe 6a	171
B - 4.7.1	Imperfektionen	171
B - 4.7.2	Ergebnisse im Traglastzustand	173
B - 4.7.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	173
B - 4.7.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	175
B - 4.7.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	177
B - 4.7.2.4	Stabrechnung	179

B - 4.8	Gruppe 6b	180
B - 4.8.1	Imperfektionen	180
B - 4.8.2	Ergebnisse im Traglastzustand	182
B - 4.8.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform	182
B - 4.8.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform	184
B - 4.8.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung	186
B - 4.8.2.4	Stabrechnung.....	188
B - 5	Vergleich der Traglastberechnungen – Handrechnung versus FE-Rechnung	189
B - 5.1	Allgemeines	189
B - 5.2	Zusätzlich berechnete Werte für den Ergebnisvergleich Hand-FE	189
B - 5.2.1	Gruppe 1.....	190
B - 5.2.2	Gruppe 2.....	192
B - 5.2.3	Gruppe 3.....	193
B - 5.2.4	Gruppe 4.....	195
B - 5.2.5	Gruppe 5.....	197
B - 5.2.6	Gruppe 6a	199
B - 5.2.7	Gruppe 6b	200
B - 5.3	Gruppe 1.....	201
B - 5.4	Gruppe 2.....	203
B - 5.5	Gruppe 3.....	205
B - 5.6	Gruppe 4.....	207
B - 5.7	Gruppe 5.....	209
B - 5.8	Gruppe 6a	211
B - 5.9	Gruppe 6b	213
B - 6	Berechnung ohne Zugkraftkomponente.....	215
B - 6.1	Allgemeines	215
B - 6.2	Gruppe 1.....	217
B - 6.2.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	217
B - 6.2.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung.....	220
B - 6.2.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	221
B - 6.2.3.1	Randbedingung RBa.....	221
B - 6.2.3.2	Randbedingung RBb	223
B - 6.2.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	225
B - 6.3	Gruppe 2.....	227
B - 6.3.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	227
B - 6.3.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung.....	229
B - 6.3.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	230
B - 6.3.3.1	Randbedingung RBa.....	230
B - 6.3.3.2	Randbedingung RBb	232
B - 6.3.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	234
B - 6.4	Gruppe 3.....	236
B - 6.4.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	236
B - 6.4.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung.....	238
B - 6.4.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	239
B - 6.4.3.1	Randbedingung RBa.....	239
B - 6.4.3.2	Randbedingung RBb	241
B - 6.4.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	243
B - 6.5	Gruppe 4.....	245
B - 6.5.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	245
B - 6.5.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung.....	247
B - 6.5.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	248
B - 6.5.3.1	Randbedingung RBa.....	248
B - 6.5.3.2	Randbedingung RBb	250
B - 6.5.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	252
B - 6.6	Gruppe 5.....	254
B - 6.6.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	254
B - 6.6.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung.....	256
B - 6.6.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	257
B - 6.6.3.1	Randbedingung RBa.....	257
B - 6.6.3.2	Randbedingung RBb	259
B - 6.6.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	261

B - 6.7	Gruppe 6a	263
B - 6.7.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	263
B - 6.7.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung	265
B - 6.7.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	266
B - 6.7.3.1	Randbedingung RBa.....	266
B - 6.7.3.2	Randbedingung RBb.....	268
B - 6.7.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	270
B - 6.8	Gruppe 6b	272
B - 6.8.1	Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken	272
B - 6.8.2	Imperfektionen für die FE-Rechnung	274
B - 6.8.3	FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform	275
B - 6.8.3.1	Randbedingung RBa.....	275
B - 6.8.3.2	Randbedingung RBb.....	277
B - 6.8.4	Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente.....	279
B - 7	Variation der Untergurtbreite	281
B - 7.1	Allgemeines	281
B - 7.2	Gruppe 1	282
B - 7.2.1	Imperfektionen für die FE-Rechnung	282
B - 7.2.2	FE-Ergebnisse im Traglastzustand	285
B - 7.2.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	285
B - 7.2.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	287
B - 7.2.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	289
B - 7.2.2.4	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	291
B - 7.2.2.5	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	293
B - 7.2.2.6	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	295
B - 7.2.2.7	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	297
B - 7.2.2.8	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	299
B - 7.2.2.9	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	301
B - 7.2.3	Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite.....	303
B - 7.3	Gruppe 5	305
B - 7.3.1	Imperfektionen für die FE-Rechnung	305
B - 7.3.2	FE-Ergebnisse im Traglastzustand	308
B - 7.3.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$	308
B - 7.3.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$	310
B - 7.3.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$	312
B - 7.3.2.4	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$	314
B - 7.3.2.5	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$	316
B - 7.3.2.6	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$	318
B - 7.3.2.7	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$	320
B - 7.3.2.8	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$	322
B - 7.3.2.9	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$	324
B - 7.3.3	Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite.....	326
B - 7.4	Gruppe 6b	328
B - 7.4.1	Imperfektionen für die FE-Rechnung	328
B - 7.4.2	FE-Ergebnisse im Traglastzustand	331
B - 7.4.2.1	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	331
B - 7.4.2.2	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	333
B - 7.4.2.3	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$	335
B - 7.4.2.4	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	337
B - 7.4.2.5	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	339
B - 7.4.2.6	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$	341
B - 7.4.2.7	Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	343
B - 7.4.2.8	Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	345
B - 7.4.2.9	Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$	347
B - 7.4.3	Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite.....	349

B - 8 Variation der Knotenblechdicke..... 351

B - 8.1 Allgemeines 351

B - 8.2 Gruppe 1..... 352

 B - 8.2.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 352

 B - 8.2.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand 354

 B - 8.2.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$ 354

 B - 8.2.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$ 356

 B - 8.2.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$ 358

 B - 8.2.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke..... 360

B - 8.3 Gruppe 5..... 362

 B - 8.3.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 362

 B - 8.3.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand 364

 B - 8.3.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$ 364

 B - 8.3.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$ 366

 B - 8.3.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$ 368

 B - 8.3.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke..... 370

B - 8.4 Gruppe 6b..... 372

 B - 8.4.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 372

 B - 8.4.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand 374

 B - 8.4.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$ 374

 B - 8.4.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$ 376

 B - 8.4.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$ 378

 B - 8.4.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke..... 380

B - 9 Variation der Belastungssituation im Untergurt..... 382

B - 9.1 Allgemeines 382

 B - 9.1.1 Imperfektion für die FE-Rechnung 385

B - 9.2 Gruppe 1..... 386

 B - 9.2.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 391

 B - 9.2.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$ 392

 B - 9.2.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl} 392

 B - 9.2.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref} 394

 B - 9.2.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt 396

B - 9.3 Gruppe 2..... 399

B - 9.4 Gruppe 3..... 403

B - 9.5 Gruppe 4..... 407

B - 9.6 Gruppe 5..... 411

 B - 9.6.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 415

 B - 9.6.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$ 416

 B - 9.6.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl} 416

 B - 9.6.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref} 418

 B - 9.6.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt 420

B - 9.7 Gruppe 6a 424

B - 9.8 Gruppe 6b 428

 B - 9.8.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung..... 432

 B - 9.8.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$ 433

 B - 9.8.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl} 433

 B - 9.8.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref} 435

 B - 9.8.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt 437

8 Quellenverzeichnis..... i

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Literaturhinweise in diesem Abschnitt: [1] [2] [3] [5] [6] [7] [8] [9]

In heutigen Stahlbauausführungen haben ausgeschnittene Knotenbleche für die Fertigung von wirtschaftlichen Fachwerkstrukturen eine wesentliche Bedeutung, da dann einfache rechtwinklige Trennschnitte an den Diagonalstäben ausreichen, wie Abbildung 1 zeigt. Aber auch in Dach- oder Wandverbänden finden diese Lösungen Anwendung. Sehr häufig werden mit Knotenblechen die aus Profilen gefertigten Diagonalen und Pfosten (auch oft als Füllstäbe bezeichnet) mit den Gurten verbunden. In der Stahlbaupraxis weisen diese Knotenbleche für die Herstellung eines zentrischen Anschlusses einen verlaschten Schraubenstoß oder eine Schweißnahtverbindung zur weiterführenden Fachwerkstruktur auf. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Fall, in welchem die Flansche der I-Profile mittels Kehlnähten mit dem Knotenblech verbunden sind. Eine Schweißnaht zwischen dem Steg und dem Knotenblech besteht nicht. An dieser Stelle verbleibt in der Regel ein Spalt von 10 bis etwa 50mm, sodass eine preiswerte Fertigung, da aufwendige Einpassarbeiten entfallen können, ermöglicht wird (siehe Abbildung 1).

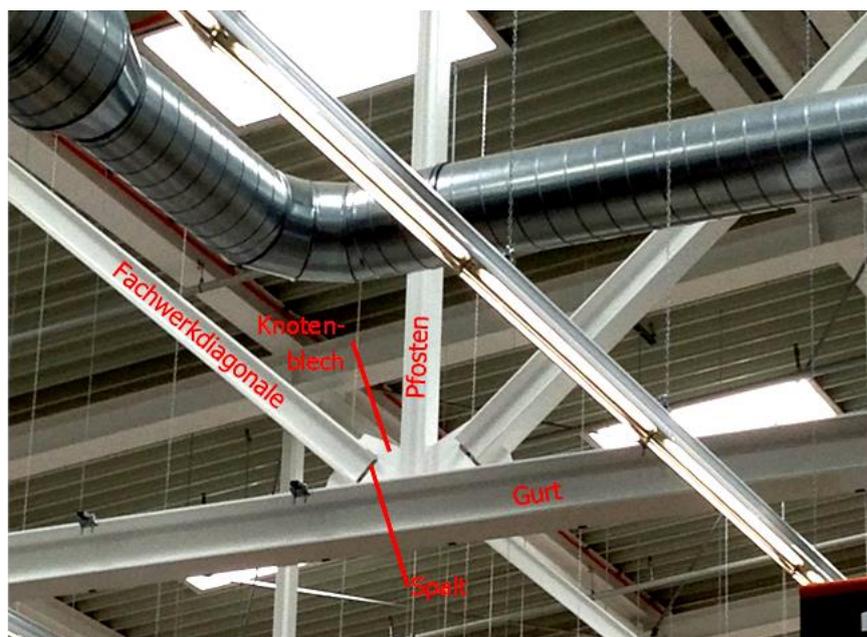


Abbildung 1 – Bezeichnung der Bauteile eines Fachwerkknotens mit beidseits in das Knotenblech eingeschlitzten Diagonalen aus I-Profilen, Verkaufshalle des OBI Bau- und Heimwerkermarktes in 8051 Graz Nord

Der simple Zusammenbau in Verbindung mit einem sparsamen Materialverbrauch ohne Laschen oder Kopfplatten und die geringe Bearbeitungsintensität der Füllstäbe (Ablängen der Diagonalen und/oder des Pfostens) und des Knotenbleches (Brennschneiden) führen zu einer wirtschaftlichen Herstellungsmethode von geschweißten Fachwerken. Derart ausgeführte Fachwerkknoten werden bereits längere Zeit produziert und gehören zum Standard. Obwohl die statischen Anforderungen an die eingesetzten Knotenbleche geläufig sind, verzichtet man in der Regel auf eine genauere Analyse des komplexen Stabilitätsverhaltens der Druckdiagonalen (Knicken aus der Fachwerkebene). Knotenbleche werden häufig nach Erfahrungswerten überdimensioniert, was unter Umständen zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann ([2]).

Der Anstoß zu einer Berechnungsstudie über die reale Drucktragfähigkeit von Diagonalstreben mit einer derartigen Knotenausführung ist, dass im Gegensatz zu traditionellen Stahlbauausführungen, die Knotenbleche heutzutage des Öfteren große freie Längen L_1 aufweisen (vgl. Abbildung 3), sodass demzufolge die Drucktraglast des Gesamtstabes gemindert werden könnte. Die Steifigkeitsschwächung durch das Knotenblech könnte daher zu einer erheblichen Erhöhung der Knicklänge des Diagonalstabes führen, wobei Biegeknicken aus der Ebene um die schwache Achse maßgebend wird, unter Umständen mit überlagertem Drillknicken (unterschiedlich steife Abstützung beider Gurte, vgl. Abbildung 3). Andererseits stellt sich die Frage, ob ein üblicher Knicknachweis mit Vernachlässigung dieser Steifigkeitsreduktion im Bereich der Verbindung an den Stabenden ausreicht, um hinreichende Tragsicherheiten zu gewährleisten (vgl. [3] für in Hohlprofile eingeschlitzte Knotenbleche).



Abbildung 2 – Fachwerkknoten mit beidseits in das Knotenblech eingeschlitzten Diagonalen aus I-Profilen, Verkaufshalle des OBI Bau- und Heimwerkermarktes in 8051 Graz Nord

Die Parametervielfalt ausgeführter Fachwerkknoten war ausschlaggebend, dass nicht nur das Tragverhalten an einem einzigen Beispiel geprüft wurde, sondern im Zuge einer Parameterstudie die Untersuchung von Geometrieverhältnissen anhand von der Fa. Haslinger Stahlbau zur Verfügung gestellter Konstruktionspläne erfolgte und anhand dieser fünf repräsentative Gruppen definiert wurden. In der vorliegenden Arbeit wird nachfolgend das Tragverhalten derartiger Fachwerkdagonalstäbe unter Druckbelastung, basierend auf numerischen Traglastberechnungen, untersucht und ein Vergleich der Tragfähigkeiten mit den bewährten Berechnungsmethoden des konstruktiven Ingenieurbaus – dem Knicknachweis am Ersatzstab – aufgestellt.

Im Unterschied zu den Fachwerkknoten aus den Abbildungen 1 und 2 erfolgte in der vorliegenden Arbeit die Untersuchung von Knoten ohne Pfosten. Ein Beispiel mit den in dieser Arbeit verwendeten Symbolen und Bezeichnungen ist skizzenhaft in Abbildung 3 dargestellt.

Ergänzend zu den Traglastberechnungen wurden lineare Beulanalysen (LBA) durchgeführt, um einerseits die ideal kritischen Knicklasten mit jenen der Stabtheorie zu vergleichen und andererseits um die erste und zweite Knickeigenform durch entsprechend festgelegte Randbedingungen zu erzwingen und als geometrische Ersatzimperfection für die Traglastermittlungen festzulegen.

1.2 Wichtige Einflussgrößen auf das Tragverhalten

Vorweg seien die wichtigsten geometrischen Einflussgrößen auf das Tragverhalten von Diagonalstäben mit derartigen Knotenverbindungen genannt. Im Kontext mit [3] wird für Abmessungen und Querschnittswerte des Knotenbleches der Index 1 verwendet, während sich der Index 0 auf die Diagonalstäbe mit I-Profilen bezieht.

Aufgrund des Knotenblecheinflusses auf das Biegeknicken des Diagonalstabes spielen das Steifigkeitsverhältnis von Knotenblech zu I-Profil I_1/I_0 , sowie das Längenverhältnis L_1/L_0 (freie Länge zu Profillänge) eine bedeutende Rolle. Aber auch die Einbindelänge l_d des Profils in das Knotenblech ist bei vereinfachter Annahme eines Lastausbreitungswinkels von 30° sehr wesentlich. Wegen der Schlitze am Ende der Diagonalstäbe wird dabei für das Knotenblech nur von der reduzierten Breite b_{eff} nach Abbildung 3 ausgegangen.

2 Untersuchte Knotenausführungen

2.1 Allgemeines

Aus den von der Fa. Haslinger Stahlbau aus A - 9560 Feldkirchen / Kärnten zur Verfügung gestellten Konstruktionsplänen wurden fünf Diagonalstäbe mit zugehörigen Fachwerkknoten ausgewählt (aufgrund bestehender Ähnlichkeiten zu mehreren anderen in den Plänen vorkommenden Knotenausführungen als repräsentative Gruppen definiert), welche die Basis einer Parameterstudie bildeten. Die Auswahl erfolgte in Hinblick des – in dieser Arbeit im Detail untersuchte – Knickens des Diagonalstabes aus der Ebene, wobei dabei vereinfacht die Ergebnisse aus [3] als Basis dienten. Zusätzlich wurde eine sechste Gruppe aus der Literatur [2] hinzugezogen, welche in Hinblick der Schlankheit der Diagonalstäbe in die Untergruppen 6a mit $\bar{\lambda}_{z,0} = 1,0$ und 6b mit $\bar{\lambda}_{z,0} = 0,7$ (Schlankheit, gerechnet mit $I_{z,0}$ des Profils und Knicklänge L_{ges}) differenziert. Eine kurze Zusammenfassung aller Gruppen findet sich in der nachfolgenden Tabelle 1. Für diese Gruppen wurden in der vorliegenden Arbeit genauere Untersuchungen der Tragfähigkeit mittels Hand- bzw. FE-Rechnungen durchgeführt.

Ausgewählte Gruppen basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau													
Gruppe	Profil Druckstrebe	Material	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	$J_{z,0}$ (ohne R) [cm ⁴]	A [cm ²]	A (ohne R) [cm ²]	L_0 [mm]	L_{ges} [mm]	$\bar{\lambda}_{z,Lges}$ [/]	L^* [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	L_1 / L_0 ¹⁾ [/]	
Gruppe 1	HEB 340	S355	9690	9679,3	171,0	164,6	3049	3648	0,623	4303	0,735	0,082	
Gruppe 2	HEA 140	S355	389	388,9	31,4	30,2	4008	4320	1,575	4581	1,670	0,036	
Gruppe 3	HEA 200	S355	1340	1333,7	53,8	51,1	3772	4159	1,065	4454	1,141	0,047	
Gruppe 4	HEB 320	S355	9240	9228,5	161,0	155,1	3298	3872	0,657	4372	0,742	0,074	
Gruppe 5	HEB 240	S355	3920	3918,5	106,0	102,2	3647	4085	0,864	4423	0,935	0,054	

Ausgewählte Gruppen basierend auf [2]													
Gruppe	Profil Druckstrebe	Material	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	$J_{z,0}$ (ohne R) [cm ⁴]	A [cm ²]	A (ohne R) [cm ²]	L_0 [mm]	L_{ges} [mm]	$\bar{\lambda}_{z,Lges}$ [/]	L^* [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	L_1 / L_0 ¹⁾ [/]	
Gruppe 6a	HEA 220	S355	1955	1952,7	64,3	61,6	3463	4208	1,000	4618	1,073	0,088	
Gruppe 6b	HEA 220	S355	1955	1952,7	64,3	61,6	2201	2945	0,700	3356	0,780	0,126	

¹⁾ Die freie Länge L_1 entspricht dem Mittelwert von $L_{1,unten}$ und $L_{1,oben}$

Tabelle 1 – Ausgewählte Gruppen, basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau und der Literatur [2]

Hinweis zur Tabelle 1:

Da die FE-Modellierung der Profile ohne Ausrundungsradius zwischen Flansch und Steg erfolgte (siehe Kapitel B - 2: Modellierung des Knotens), sind neben den Werten der Profilfläche und dem Flächenträgheitsmoment 2. Grades aus den Profiltabellen nach [4] auch die Berechnungswerte der idealisierten Profile – ohne Ausrundungsradius R – angegeben. Die angeführten Schlankheiten wurden mit diesen idealisierten Werten berechnet, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der FE- und der Handrechnungen zu erhalten. Sämtliche Handrechnungen wurden ebenfalls mit den idealisierten Werten durchgeführt.

Die genauen Daten der Diagonalstäbe mit den zugehörigen Fachwerkknoten können dem Kapitel B - 1 des Anhangs entnommen werden. Die dort zu findenden Tabellen B.1 bis B.5 zeigen alle Parameter der aufgenommenen Stäbe bzw. Knoten, sowohl für jene der Fa. Haslinger Stahlbau als auch jenen aus [2].

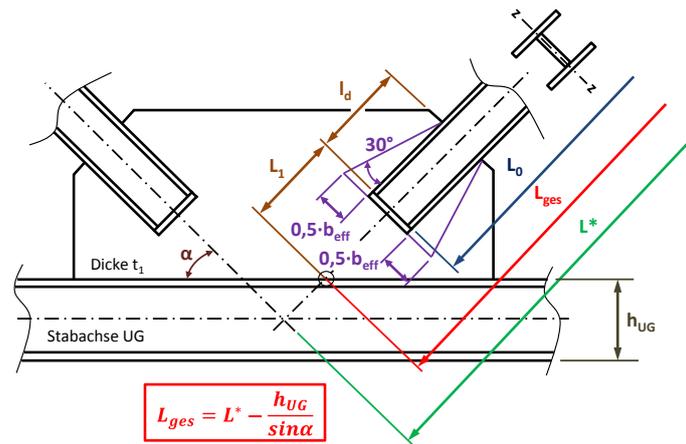


Abbildung 3 – Definition der Bezeichnungen

Wichtige Parameter sind vor allem die maßgebenden Längen, wie die Systemlänge L^* (Basis der vereinfachten Knickbemessung), die Länge L_{ges} (Länge bis zur Gurtoberkante), die freie Knotenblechlänge L_1 , die Diagonalenlänge L_0 und die Einbindelänge l_d . Weiters der Diagonalenwinkel α , die Knotenblechdicke t_1 und die Profildimensionen (ausgeführt wurden IPE, HEA und HEB – Profile) von Druck- und Zugstrebe bzw. des Untergurtes, die besonders kennzeichnend für den jeweiligen Knoten sind. Die Definition dieser Längen zeigt die obige Abbildung 3.

3 FE-Modellierung und Berechnung

3.1 Allgemeines

Zur Modellierung und Berechnung der diversen Diagonalstäbe mit den anschließenden Fachwerkknoten wurde das FE-Programm Abaqus [14], Version 6.11 pr3, eingesetzt. Da für das reale Knicktragverhalten der Diagonalstäbe aus der Fachwerkebene die Nachgiebigkeit der anschließenden Fachwerkknoten sehr bedeutsam ist, wurden diese zur Gänze mitabgebildet. Durch das Ausnutzen von Symmetrie- und Antimetrierandbedingungen in Stabmitte wird immer nur ein Fachwerkknoten modelliert.

3.2 Modellierung der Knoten

Grundlage zur Bewertung der Tragfähigkeit der Diagonalstäbe bilden neben einfachen Handrechnungen umfangreiche Finite Elemente-Analysen. Die Modellierung der Knoten ist dabei ganz wesentlich und daher nachfolgend kurz zusammenfassend erläutert. Die genaue Beschreibung findet sich im Kapitel des Anhangs unter Abschnitt B - 2.

Materialeigenschaften:

Der Einfachheit halber wurden alle Bestandteile des Knotens, bestehend aus den Diagonalen (Druck- und Zugstrebe), dem Untergurt und dem Knotenblech, mit der gleichen Stahlgüte modelliert und berechnet:

- S355**
- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
 - Fließgrenze $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
 - Poissonzahl $\nu = 0,3$
 - der Werkstoff ist homogen und isotrop
 - der Werkstoff verhält sich linear elastisch – ideal plastisch
 - Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt

Da die vorliegende Arbeit die Drucktragfähigkeit des Diagonalstabes untersucht, wurden bei bestimmten Rechnungen, bei denen die Plastizierung des Untergurtes oder der Zugstrebe die Tragfähigkeit des Systems begrenzen würde, rein elastische Materialeigenschaften der beiden vorher genannten Knotenbestandteilen modelliert. Die jeweils entsprechende Materialmodellierung (linear elastisch – ideal plastisch / rein elastisch) wird bei den folgenden Kapiteln jeweils angeführt. Die Mitabbildung der Zugdiagonale im Knoten ist sehr wesentlich, da sie eine gewisse Stützwirkung für das Knotenblech aus der Fachwerkebene bewirkt.

Für die Modellierung des Fachwerkausschnittes wurde ein Ersatzsystem entwickelt: Während das Knotenblech und die Druckstrebe (durch das Ausnutzen von symmetrischen bzw. antimetrischen Lagerungsbedingungen in Stabmitte war nur die Modellierung der halben Druckstrebe erforderlich, siehe Kapitel B - 2.2) zur Gänze aus Schalenelementen modelliert wurden, erfolgte bei der Zugstrebe sowie beim Untergurt eine Modellierung mit Schalen- und Stabelementen, um den Rechenaufwand zu minimieren. Eine genaue Beschreibung des Ersatzsystems, mit welchem die FE-Simulationen durchgeführt wurden, findet sich im Kapitel B - 2.1 des Anhangs.

Zur Plausibilitätskontrolle der errechneten Spannungswerte des FE-Modells, stand am Beginn der Arbeit die Modellierung von zwei Diagonalstäben mit anschließendem Fachwerkknoten aus der Literatur (aus [1] und [2]). Durch einen Vergleich der eigenen Spannungsverläufe entlang mehrerer Pfade mit jenen aus der Literatur, konnte die Qualität des entwickelten FE-Modells bestätigt werden.

3.3 Imperfektionen bei der Traglastberechnung

Es wurden geometrische Imperfektionen bzw. geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten vorgeschalteten Eigenformanalyse gewählt. Hierbei wurden den beiden eigenständigen Traglastberechnungen die Imperfektionsfiguren der ersten bzw. der zweiten Knickeigenform zugrunde gelegt und deren Maximalwert mit $L^*/750$ skaliert. Entsprechend EN 1090-2 [12] wurde sowohl für die erste, als auch für die zweite Eigenform dieser Wert festgelegt. L^* entspricht der Systemlänge (siehe Abbildung 3).

Neben diesen beiden genannten Imperfektionsverläufen, affin zur ersten und zweiten Knickeigenform, wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt nur im Knotenblech vorgenommen. Hierbei wurde das Knotenblech um den Winkel von $1/100$ aus der Fachwerkebene schiefgestellt. Damit weist auch der Diagonalstab eine Ausmitte auf – zentrische Lage zum Knotenblech in der Mitte der Ausschnittslänge.

Die Auswirkungen von strukturellen Imperfektionen auf die maximale Traglast der betrachteten Fachwerkknoten, vor allem die von Eigenspannungen, wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

3.4 Durchführung der Traglastberechnungen

Um die Tragfähigkeit des modellierten Diagonalstabes zu erhalten, wurden Druck- und Zugstrebe mit einer Referenznormalkraft N_{ref} belastet. Diese Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen, obwohl die Ausrundungen selbst nicht im Modell abgebildet wurden:

$$N_{ref} = A \cdot f_y$$

Mit der Streckgrenze $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$ für die Stahlgüte S355 und den Profilquerschnittsflächen $A \text{ [cm}^2\text{]}$ nach [4] bzw. Tabelle 1 ergeben sich für die sechs behandelten Gruppen die plastischen Normalkräfte als Referenzkräfte für die FE-Rechnungen.

Das Ergebnis der Analyse bildet ein Lastfaktor (LF). Dieser gibt an, wie weit das Programm Abaqus [14] die aufgebrachte Kraft N_{ref} steigern konnte, bis die Traglast des Systems erreicht wurde. Durch Multiplikation dieses Lastfaktors mit der Referenznormalkraft wurde die Tragfähigkeit bestimmt.

$$N_{Rd} = LF \cdot N_{ref}$$

Zusätzlich zur Berechnung an der Druckdiagonale mit anschließendem Knoten wurde auch eine reine „Stabberechnung“ der alleinigen Druckstrebe, ohne Knotenbleche an den beiden Stabenden, vorgenommen. Ziel ist ein objektiver Vergleich zwischen den erhaltenen FE-Ergebnissen des isolierten Stabes, der Handrechnungen und der Systemtragfähigkeiten.

Den Berechnungen am isolierten Druckstab wurden zwei Imperfektionsgrößen zugrunde gelegt:

- $L^*/200$
- $L^*/750$

Die geometrische Ersatzimperfektion $L^*/200$ deckt auch vorhandene Eigenspannungen (z.B. durch Schweißen) des Profils mit ab. Sie rührt aus der zutreffenden Zuordnung des Stabquerschnittes zu den europäischen Knickspannungslinien her (Knicken um die z-Achse – Linie c).

4 Abschätzung der Knoten Tragfähigkeit mittels einfachen Handrechnungsmethoden

4.1 Allgemeines

Wie in der Praxis üblich, wurde auch in der vorliegenden Arbeit die Tragfähigkeit der Druckstreben mit bekannten und bewährten „Hand“-Rechnungsmethoden abgeschätzt, bevor aufwendige Finite Elemente – Simulationen herangezogen wurden. Hierbei wurde über die Profilschlankheit $\bar{\lambda}_z$ nach EN 1993-1-1 [10] der Abminderungsfaktor χ für das Biegeknicken um die z-Achse (europäische Knickspannungslinien), einerseits als Referenz für die Systemlänge L^* und andererseits für die Länge L_{ges} , welche der Länge von der Unterkante des Fachwerkobergurtes bis zur Oberkante des Fachwerkuntergurtes entspricht (siehe Abbildung 3), ermittelt und die zugehörige Tragfähigkeit bestimmt. Für die untersuchten Diagonalstäbe war dabei Linie c maßgebend.

Des Weiteren wurde ein Bemessungsvorschlag nach [3] für Hohlprofile mit beidseits zentrisch eingeschlitzten Knotenblechen auf die vorliegende Problemstellung mit I-Profilen und beidseits eingeschlitzten Knotenblechen näherungsweise angewandt. Dieser Bemessungsvorschlag unterscheidet zwischen der Tragfähigkeit der Strebe (Ersatzstabverfahren) und der des Knotenbleches, die dann zur gesuchten Drucktragfähigkeit des Diagonalstabes führten (Minimalwert).

4.2 Ergebnisse der Handrechnungen

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Knicktragfähigkeit der Druckdiagonalen für die Knicklänge $L_K = L^*$ und $L_K = L_{ges}$ mit angenommener beidseits gelenkiger Lagerung ($\beta = 1,0$). Tabelle 3 fasst die an I-Profilen adaptierten Ergebnisse des Bemessungsvorschlags nach [3] für Hohlprofile, getrennt nach der Tragfähigkeit des Ersatzstabes und des Knotenbleches, zusammen. Die Berechnung der angeführten Tragfähigkeiten ist im Kapitel B - 3 für jede der untersuchten Gruppen ausführlich beschrieben und durchexerziert. In Tabelle 3 ist die resultierende Tragfähigkeit jeweils hervorgehoben (Minimum aus Stabnachweis und Knotenblechnachweis).

Knicktragfähigkeit nach EN 1993-1-1 [10]									
Gruppe	Profil Druckstrebe	Stabknicken mit $L_K = L^*$				Stabknicken mit $L_K = L_{ges}$			
		$L_K = L^*$ [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	χ [/]	N_{Rd,L^*} [kN]	$L_K = L_{ges}$ [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L_{ges}}$ [/]	χ [/]	$N_{Rd,L_{ges}}$ [kN]
Gruppe 1	HEB 340	4303	0,735	0,703	4108,8	3648	0,623	0,772	4512,1
Gruppe 2	HEA 140	4581	1,670	0,265	283,9	4320	1,575	0,291	311,8
Gruppe 3	HEA 200	4454	1,141	0,463	839,1	4159	1,065	0,503	911,6
Gruppe 4	HEB 320	4372	0,742	0,699	3848,3	3872	0,657	0,751	4134,6
Gruppe 5	HEB 240	4423	0,935	0,579	2100,7	4085	0,864	0,622	2256,7
Gruppe 6a	HEA 220	4618	1,073	0,499	1090,5	4802	1,000	0,540	1180,1
Gruppe 6b	HEA 220	3355	0,780	0,675	1475,1	2945	0,700	0,725	1584,4

Tabelle 2 – Tragfähigkeitsvergleich der ausgewählten Gruppen – Knicktragfähigkeit nach EN 1993-1-1 [10]; Knickspannungslinie c maßgebend

Abschätzung – Bemessungsvorschlag für Hohlprofile nach [3]								
Gruppe	Profil Druckstrebe	Ersatzstabverfahren					Knotenblech	
		β_1 [/]	$\bar{\lambda}_z$ [/]	$L_K = \beta_1 \cdot L_{ges}$ [mm]	χ [/]	$N_{Rd,0}$ [kN]	t_1 [mm]	$N_{Rd,1}$ [kN]
Gruppe 1	HEB 340	1,171	0,729	4272	0,707	4132,2	45	3692,1
Gruppe 2	HEA 140	1,123	1,769	4851	0,241	258,2	12	181,7
Gruppe 3	HEA 200	1,033	1,100	4296	0,484	877,2	25	923,2
Gruppe 4	HEB 320	1,086	0,714	4205	0,716	3941,9	50	3837,1
Gruppe 5	HEB 240	1,106	0,955	4518	0,566	2053,5	30	1706,3
Gruppe 6a	HEA 220	1,051	1,028	4423	0,524	1145,1	40	1434,0
Gruppe 6b	HEA 220	1,157	0,792	3407	0,667	1457,7	40	1879,1

Tabelle 3 – Tragfähigkeitsvergleich der ausgewählten Gruppen – Bemessungsvorschlag nach [3]

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden diese in Abbildung 4 grafisch aufgetragen. Jede Gruppe hat vier Traglastergebnisse, dargestellt durch vier Balken:

- N_{Rd,L^*} Stabknicken mit L^* nach [10]
- $N_{Rd,L_{ges}}$ Stabknicken mit L_{ges} nach [10]
- $N_{Rd,0}$ Bemessungsvorschlag für eingeschlitzte Hohlprofile – Stabknicken Ersatzstabverfahren nach [3]
- $N_{Rd,1}$ Bemessungsvorschlag für eingeschlitzte Hohlprofile – Knotenblech nach [3]

In all jenen Fällen wo $N_{Rd,1} < N_{Rd,0}$ ist, ist die Nachgiebigkeit des Knotenblechs aus der Fachwerkebene signifikant und die Querschnittstragfähigkeit bestimmt die Drucktragfähigkeit des Diagonalstabes.

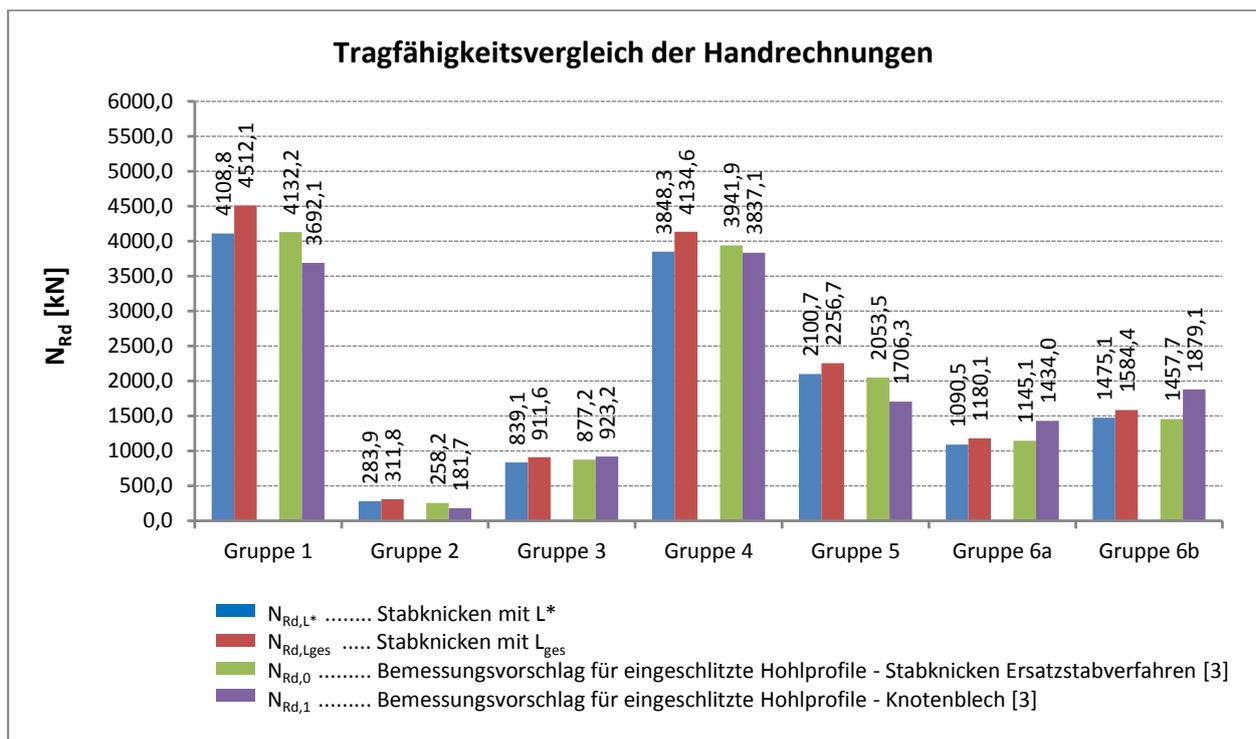


Abbildung 4 – Tragfähigkeitsvergleich der untersuchten Gruppen – Diagrammform

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Abbildung 4 fällt auf, dass die Tragfähigkeit des Knickspannungsnachweises berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ (beidseits gelenkige Lagerung) und der Systemlänge L^* für alle Gruppen nahezu der Tragfähigkeit $N_{Rd,0}$ des Ersatzstabverfahrens unter Berücksichtigung der geringeren Knotenblechsteifigkeit ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] entspricht.

Die höchste Tragfähigkeit zeigt selbstverständlich jener Fall mit der Ermittlung der Traglast mit $\beta = 1,0$ und der Länge L_{ges} . Die Höhe des Unterschiedes der Knicktragfähigkeit zwischen L^* und L_{ges} , jeweils mit $\beta = 1,0$ berechnet, hängt vom Verhältnis dieser beiden Längen ab. Als einzige Parameter haben die Höhe des Untergurtprofils h_{UG} und der Diagonalenwinkel α Einfluss auf dieses (siehe Abbildung 3).

Die Tragfähigkeit des Knotenblechs nach [3] hängt entscheidend von dessen Dicke t_1 und der Breite b_{eff} ab. Die erhöhte rechnerische Tragfähigkeit des Knotenblechs der Gruppe 6 kann dadurch erklärt werden, dass die wichtige Eingangsgröße, die Diagonaleinbindelänge l_d ($b_{eff} = 2 \cdot l_d \cdot \tan 30^\circ$), bei Gruppe 6 rund $1,5 \cdot h_{Strebe}$ beträgt, während bei den Gruppen 1 bis 5 diese lediglich rund $1,0 \cdot h_{Strebe}$ beträgt.

5 Tragfähigkeit aus FE-Berechnung und Vergleich mit den Handrechnungs-Ergebnissen

5.1 Allgemeines

Bei der Traglastberechnung wurden drei Arten von Imperfektionsformen unterschieden. Dabei wurde jeweils eine Imperfektionsart einer geometrischen und materiell nicht linearen Analyse mit Imperfektionen (GMNIA) zugrunde gelegt. Somit gibt es pro untersuchtem Diagonalstab mit anschließendem Knoten drei Traglastzustände, von denen es jenen mit der minimalen Tragfähigkeit zu finden gilt. Als Imperfektionen wurden folgende Formen unterschieden:

- Imperfektion in der Druckdiagonale ($L^*/750$) – Fall Symmetrie; erste Knickeigenform
- Imperfektion in der Druckdiagonale ($L^*/750$) – Fall Antimetrie; zweite Knickeigenform
- Imperfektion im Knotenblech – Schiefstellung des Knotenbleches ($1/100$, entspricht $0,57^\circ$)

Der erste Fall stellt das Ausknicken des Diagonalstabes mit maximaler Amplitude in Stabmitte dar. Der zweite Fall deckt das antimetrische Knicken aus der Fachwerkebene ab (keine Verformung in Stabmitte). Der dritte Fall stellt die alleinige Schiefstellung des Knotenblechs dar, womit eine Exzentrizität des Diagonalstabes einhergeht, da in der Mitte der Einschlitzlänge die zentrische Lage des Knotenblechs vorausgesetzt ist. Hervorzuheben ist, dass diese Imperfektionen nur eine rein geometrische Imperfektion darstellen. Der (negative) Einfluss von strukturellen Imperfektionen – insbesondere Eigenspannungen – ist hier nicht erfasst. Dies ist bei der endgültigen Beurteilung entsprechend zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Tragfähigkeiten der FE-Analysen sind im Kapitel B - 4 für jede der untersuchten Gruppen detailliert angeführt. Für jeden der oben genannten Imperfektionsfälle gibt es vier FE-Grafiken zum Traglastzustand, welche jeweils folgende Beanspruchungen zeigen:

- Normalspannung σ_{11}
- Schubspannung σ_{12} im Knotenblech
- Mises-Vergleichsspannung
- Verformung

5.2 Tragfähigkeitsvergleich der repräsentativen Gruppe 5

Als repräsentative Gruppe ist an dieser Stelle exemplarisch der Tragfähigkeitsvergleich der Gruppe 5 angeführt. Für die restlichen untersuchten Gruppen finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen der ermittelten Traglasten im Kapitel B - 5.

Die nachfolgende Tabelle 4 stellt die Ergebnisse der mittels FE- bzw. Handrechnungen ermittelten Tragfähigkeiten der Gruppe 5 gegenüber:

- a) FE-Traglast mit Imperfektion in der Druckdiagonale – affin zur ersten Knickeigenform
- b) FE-Traglast mit Imperfektion in der Druckdiagonale – affin zur zweiten Knickeigenform
- c) FE-Traglast mit Imperfektion im Knotenblech – Schiefstellung des Knotenbleches
- d) FE-Traglast der Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$
- e) FE-Traglast der Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$
- f) Traglast der Handrechnung, ermittelt mit L^* bzw. L_{ges}
- g) Traglast des Bemessungsvorschlages für Hohlprofile nach [3]: Ersatzstabverfahren bzw. Knotenblechtragfähigkeit

Beim Vergleich ist zu beachten, dass nur bei den Ergebnissen d), f) und g) auch die Eigenspannungen bzw. strukturellen Imperfektionen miterfasst sind.

Zuletzt erfolgt auch ein Vergleich der Ergebnisse der idealen Knicklast der Druckdiagonale von Handrechnung und FE-Rechnung. Der entsprechende Laststeigerungsfaktor der FE-Rechnung stammt aus der Beulanalyse des Stabes (siehe Tabelle 4 rechts unten).

Gruppe 5						
Profil der Druckstrebe:	HEB 240		Systemlänge $L^* =$	4423mm		
Material	S355		$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	0,935		
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²		$L_{ges} =$	4085mm		
$t_{\text{Knotenblech}} =$	30mm		(OK Untergurt - UK Obergurt)			
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	0,864		
Profil des Untergurtes:	HEB 200		Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm		
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag [3]
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,4813 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1811,1 kN	LF = 0,4803 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,4 kN	LF = 0,5100 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1919,1 kN	LF = 0,6950 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2615,3 kN	$L^*:$ LF = 0,579 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2100,7 kN	<i>Stabknicken:</i> LF = 0,566 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2053,5 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					$L_{ges}:$	<i>Knotenblech:</i>
LF = 0,7705 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2899,4 kN	LF = 0,8230 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3096,9 kN	LF = 0,8193 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3083,0 kN			LF = 0,622 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2256,7 kN	1706,3 kN
N _{pl} - Druckstrebe = 3628,1 kN					N _{cr} aus Hand- rechnung	N _{cr} aus FE-Rechnung
N _{pl} - Zugstrebe = 1812,3 kN					<i>mit</i> L* = 442,3 cm	LF = 1,0953
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1897,8 kN					I _z = 3918,5 cm ⁴	LF · N _{ref} =
N _{ref} = 3763,0 kN					4151,5 kN	4121,6 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>						

Tabelle 4 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 5

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden diese in Abbildung 5 grafisch aufgetragen. Der Balken der linear elastischen – ideal plastischen FE-Traglast mit Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform ist im Diagramm hellrot, die Balken der FE-Traglast mit Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform bzw. mit Imperfektion im Knotenblech sind hellblau dargestellt. Jene Balken, die Ergebnisse mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt darstellen, sind dunkelrot bzw. deren Minimum dunkelblau abgebildet.

Die ergänzenden Berechnungen mit elastisch bleibendem Untergurt bzw. Zugdiagonale sind hier sehr wichtig, da sonst ein falsches Bild von der Tragfähigkeit der Druckdiagonale erhalten wird – die geringen Tragfähigkeiten von etwa 1800kN stellen die Querschnittstragfähigkeit der Zugstrebe bzw. des Untergurtes dar.

Abbildung 5 zeigt, dass sich die Traglast des Systems (Druckstrebe mit Fachwerkknoten) durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes um rund 38% im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten auf 2899kN steigern lässt (bezogen auf den Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform). Das heißt deutlich vor der Druckstrebe versagt das System im Untergurt oder in der Zugstrebe. Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben (N_{pl} der Zugstrebe limitiert die Traglast des Knotens auf 1812kN), sowie jene Diagonalkraft, deren Horizontalkomponente zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist (begrenzt auf 1898kN), ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Die elastische Modellierung der Zugstrebe und des Untergurtes kann dadurch gerechtfertigt werden, da das Druckverhalten des Fachwerkknotens in Hinblick auf die Druckstrebe und das Knotenblech untersucht werden soll.

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt weiter auf, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen (entscheidend sind jene FE-Rechnungen mit Fokus auf die Tragfähigkeit der Druckdiagonale, das heißt jene Ergebnisse mit rein elastischer Zugstrebe und Untergurt) liegen. Ein Mitausknicken des Knotenblechs mindert demzufolge nicht die Tragfähigkeit der Druckstrebe im System im Vergleich zu den reinen Stabrechnungen.

In den Ergebnissen der Systemberechnung ist der Einfluss von Eigenspannungen mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Auch diese Stabtraglast ist geringer als die maßgebende Systemtragfähigkeit. Der Einfluss von Eigenspannungen kann näherungsweise am Verhältnis zur Traglast mit Imperfektion $L^*/200$ abgelesen werden (1919kN statt 2615kN).

Die „Knickspannungstraglast“ berechnet mit den Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ (beidseits gelenkige Lagerung) und der Systemlänge L^* entspricht nahezu der Tragfähigkeit des Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3].

Für die Gruppe 5 bildet die Knotenblechtragfähigkeit nach [3] das Minimum, gefolgt von dem Ergebnis der FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$.

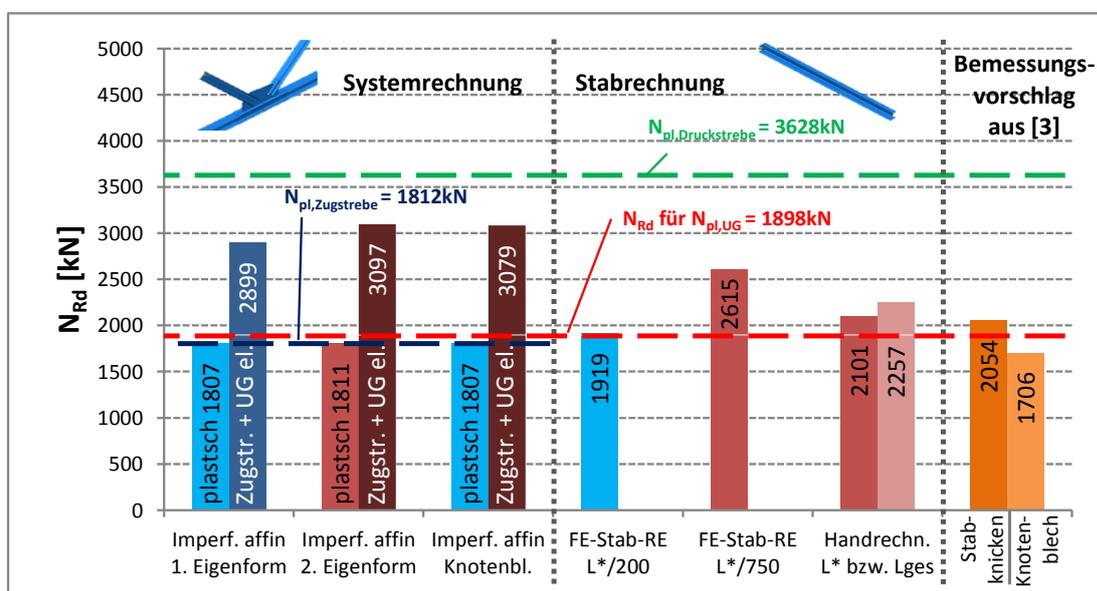


Abbildung 5 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 5

Die Druckdiagonale kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 50% (bei elastisch-plastischer Modellierung, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform bzw. Imperfektion im Knotenblech) bzw. ca. 80% (bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden. Der Ausnutzungsgrad der isolierten FE-Stabrechnung mit konstantem Querschnitt ohne Knotenbleche mit Imperfektion $L^*/750$ beträgt rund 72%.

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen

Grundsätzlich gelten für die restlichen Gruppen 1 bis 4 bzw. 6a und 6b (Ergebnisse dieser Gruppen im Abschnitt B - 5) sehr ähnliche Schlussfolgerungen.

Für alle Gruppen gilt, dass die Traglast mit der geometrischen Ersatzimperfektion affin zur ersten Knickeigenform immer maßgebend wird und dass die reine Stabrechnung mit der Systemlänge L^* und der Imperfektion $L^*/750$ nie eine höhere Traglast als die maßgebende Systemrechnung aufweist (betrachtet wird die Drucktragfähigkeit mit elastisch berechneter Zugstrebe und elastisch berechnetem Untergurt). Unterschiedlich ist zwischen den Gruppen, ob bzw. um wie viel sich die Tragfähigkeit durch eine elastisch modellierte Zugstrebe bzw. Untergurt steigern lässt, das heißt, ob das System zuerst in der Zugstrebe bzw. im Untergurt versagt.

Auffällig ist, dass die System-Drucktragfähigkeiten der Gruppen mit schlankeren Profilen (Gruppe 2, 3 und 6a) eine größere Steigerung gegenüber der Tragfähigkeit der Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$ aufweisen, als Gruppen mit Druckstreben niedrigerer Schlankheiten (siehe Tabelle 5).

Gruppe	Profil Druckstrebe	L_{ges} [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L_{ges}}$ [/]	L^* [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	t_1 [mm]	N_{Rd} - System-RE [kN]	N_{Rd} - Stab-RE [kN]	Steigerung [%]
Gruppe 1	HEB 340	3648	0,623	4303	0,735	45	5427,6	4942,6	8,9%
Gruppe 2	HEA 140	4320	1,575	4581	1,670	12	418,5	331,7	20,7%
Gruppe 3	HEA 200	4159	1,065	4454	1,141	25	1248,9	1038,0	16,9%
Gruppe 4	HEB 320	3872	0,657	4372	0,742	50	5050,8	4638,7	8,2%
Gruppe 5	HEB 240	4085	0,864	4423	0,935	30	2899,4	2615,3	9,8%
Gruppe 6a	HEA 220	4208	1,000	4618	1,073	40	1776,6	1355,5	23,7%
Gruppe 6b	HEA 220	2945	0,700	3356	0,780	40	2028,9	1792,6	11,6%

Tabelle 5 – Steigerung der Drucktragfähigkeit Systemrechnung-Stabrechnung

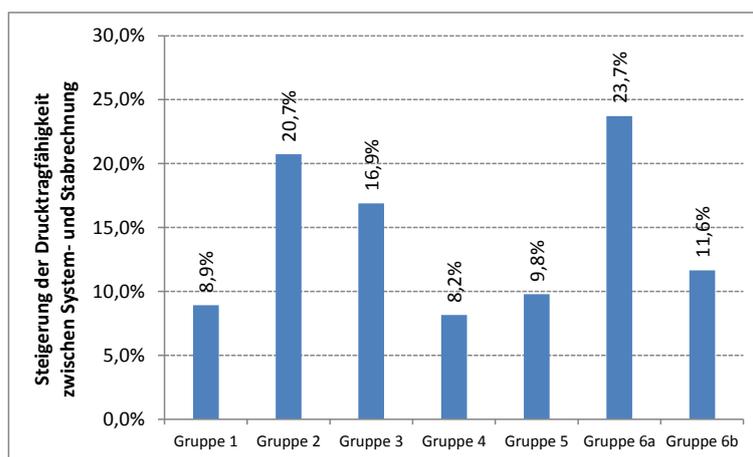


Abbildung 6 – Steigerung der Drucktragfähigkeit: Systemrechnung gegenüber Stabrechnung

Es zeigt sich, dass sich durch die relativ dicken Knotenbleche eine gewisse Endeinspannung der Druckstreben ergibt, welche die Tragfähigkeit zwischen Systemrechnung und Stabrechnung (beidseits gelenkig gelagert) teilweise erheblich erhöht, wie die Abbildung 6 erkennen lässt. Es sind Tragfähigkeitssteigerungsraten von bis zu 23,7% (Gruppe 6a) im Vergleich von Systemrechnung und FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$ möglich.

6 Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente

6.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den Berechnungen mit Druck- und Zugdiagonale am Knoten, wurden die sechs Gruppen auch einer Tragfähigkeitsberechnung ohne der jeweiligen Zugkraftkomponente unterworfen.

Hierbei wurde zwischen zwei verschiedenen Randbedingungen (siehe Abbildung B.162 in Kapitel B - 6.1) unterschieden:

- RBa die „Standard“-Lagerungsbedingungen nach Abschnitt B - 2.2
- RBb zusätzlich zur Lagerungsbedingung RBa sind die Verschiebungen der Untergurtachse in vertikaler Richtung gehalten

Zu beachten ist, dass bei der „Standard“-Lagerungsbedingung der Untergurtstab eine sehr große Zusatzbiegebeanspruchung erhält (Querlast am Knoten infolge der Vertikalkomponente aus der Diagonalkraft) – dies limitiert die Tragfähigkeit der Druckdiagonale signifikant. Daher wurde die Lagerungsbedingung RBb zusätzlich mituntersucht, da für die Lagerung RBa keine Aussage zur Drucktragfähigkeit der Diagonale erfolgen kann.

Betrachtet wurde ausschließlich der Fall mit Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform, da dieser Fall immer maßgebend wird, wie die Berechnungen mit Druck- und Zugdiagonale zeigten.

Gegenübergestellt werden die Ergebnisse der maximalen Traglast mit Zugdiagonale (Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform, RBa) jenen Ergebnissen der Berechnung ohne Zugkraftkomponente, dafür mit zusätzlicher Stützung des Untergurtes (Randbedingung RBb).

Da die Verformungsfiguren in den Kapiteln B - 6.2 bis B - 6.8 aller Gruppen für die Randbedingung RBa deutlich zeigen, dass im Fall ohne Zugkraft ein Biegedrillknickversagen des Untergurtes eintritt, wurde die entsprechende Tragfähigkeit des Untergurtstabes für Biegedrillknicken – mit der großen zusätzlichen Biegebeanspruchung – nach EN 1993-1-1 [10] ermittelt. Über die Momententragfähigkeit M_{Rd} des Untergurtstabes kann auf die maximal aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} in der Druckstrebe geschlossen werden.

Diese über die Biegedrillknicktragfähigkeit errechnete Normalkraft dient als Vergleichswert für die FE-Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente und der Randbedingung RBa.

Die stabilisierend wirkende Zugkraft im Untergurt (in der linken Systemhälfte, siehe Abbildung B.163 in Kapitel B - 6.1) wurde in der Handrechnung vernachlässigt. Demzufolge liegen die ermittelten Tragfähigkeiten der Handrechnung auf der sicheren Seite.

6.2 Tragfähigkeitsvergleich ohne Zugkraftkomponente der repräsentativen Gruppe 5

Als repräsentative Gruppe ist an dieser Stelle auch hier der Tragfähigkeitsvergleich der Gruppe 5 angeführt. Für die restlichen untersuchten Gruppen finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen der ermittelten Traglasten im Kapitel B - 6.

Die nachfolgende Tabelle 6 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugdiagonale bzw. Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 5			
FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand- rechnung: ohne Zugkraft
"Standard"- Lagerungs- bedinungen nach B-2.2 RBa	"Standard"- Lagerungs- bedinungen nach B-2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel- lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,0749 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 281,8 kN	LF = 0,6898 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2595,7 kN	LF = 0,052 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 151,9 kN
<i>Zugstr. u. UG elastisch</i>			
LF = 0,7705 2899,4 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 3628,1 kN N _{pl} - Zugstrebe = 1812,3 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1897,8 kN N _{ult} = 2899,4 kN N _{ref} = 3763,0 kN (N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			

Tabelle 6 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 5

Der Vergleich der Traglasten in Abbildung 7 zeigt, dass die maximale Traglast mit Zugdiagonale bzw. Zugkraftkomponente bei der Gruppe 5 wesentlich geringer ist als jene Tragfähigkeit, welche ohne Zugkraftkomponente, jedoch mit den Lagerungsbedingungen RBb (mit gesperrter Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen in Abschnitt B - 2.2) ermittelt wurde (bezogen auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert). Dies rührt aus der unverhältnismäßig großen Biegebeanspruchung im Untergurt, sodass dieser Stab die Tragfähigkeit limitiert. Die Tragfähigkeit ohne Zugkraft mit den Randbedingungen RBb (2596N) ist um rund 30% höher als die Traglast mit Zugkraft und den Randbedingungen RBa (1807kN). Die Traglast mit der Randbedingung RBb kommt bis zu etwa 90% an das Niveau der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt (2899kN) heran. Der große Unterschied zwischen den beiden Berechnungen mit und ohne Zugkraft (in Bezug auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert) ist dadurch zu erklären, dass der Untergurtstab durch die vertikale Stützung (Randbedingung RBb) nicht mehr plastiziert und somit die Traglast entscheidend steigt (von 1807kN auf 2596kN).

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraftkomponente, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 282kN auf 2596kN), wenn durch Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wird und kein Biegedrillknicken mehr auftreten kann.

Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.208) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 152kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 282kN und liegt somit auf der sicheren Seite.

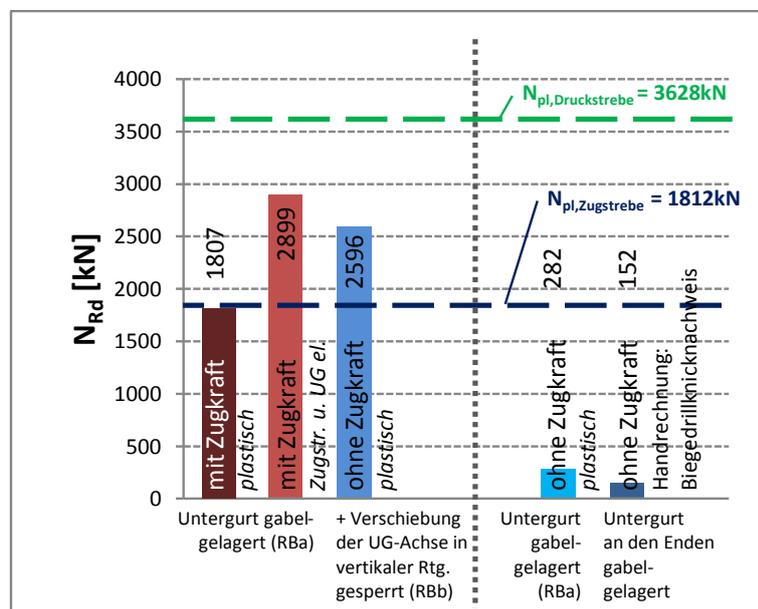


Abbildung 7 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 5

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen

Alle Gruppen 1 bis 6 (Ergebnisse dieser Gruppen im Abschnitt B - 6) zeigen für das Verhalten ohne Zugkraft nahezu gleiche Ergebnisse.

Die einzige Ausnahme bildet die Gruppe 6b, bei welcher die Traglast mit Zugkraft und Lagerungsbedingung RBa (2017kN bzw. 2029kN, je nach Materialmodellierung) um rund 8% niedriger als jene Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente (2181kN), dafür mit zusätzlicher Stützung der Untergurtachse (Lagerungsbedingung RBb) liegt, wie in der Abbildung B.240 im Kapitel B - 6.8.4 zu erkennen ist. Bei allen anderen Gruppen ist diese Tragfähigkeit höher. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Untergurt durch die Sperrung der vertikalen Verschiebung bei RBb von der großen zusätzlichen Biegebeanspruchung befreit wird und nicht mehr plastiziert. Somit kann die Traglast gegenüber den Lagerungsbedingungen RBa gesteigert werden.

7 Parameterstudie

Variiert wurden wesentliche Einflussparameter auf die Tragfähigkeit der Druckdiagonale, wie die Breite der Untergurtflansche zur Erhöhung der Gurtstabilität (um den Einfluss der Untergurtverdrehung am Fachwerkknoten feststellen zu können), die Dicke des Knotenbleches und die im Untergurt des Fachwerkes vorherrschende Belastungssituation.

7.1 Variation der Untergurtbreite

7.1.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Verdrehung des Untergurtstabes an der Tragfähigkeit der Druckdiagonale bestimmen zu können, wurde im Zuge der Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

eine Variation der Breite der Untergurtflansche durchgeführt. Einerseits wurde die Untergurtbreite verdoppelt ($2,0 \cdot b_{UG}$), um die Verdrehsteifigkeit des Untergurtstabes zu erhöhen (dann annähernd keine Verdrehung der Fachwerkknoten aus der Fachwerkebene), andererseits auch halbiert ($0,5 \cdot b_{UG}$), um die Torsionssteifigkeit zu verringern. Es wurden wieder drei Fälle untersucht: Zwei mit Imperfektion in der Druckdiagonale (affin zur ersten und zweiten Knickeigenform), sowie einer mit der Imperfektion im Knotenblech (Knotenblechschiefstellung).

Um keinen die Traglast der Druckdiagonale mindernden Steifigkeitsverlust des Untergurtstabs durch lokales oder globales Plastizieren zu erhalten, wurde in den Rechnungen in den Kapiteln B - 7.2 bis B - 7.4 ein rein elastisches Materialverhalten des Untergurtstabs modelliert. Des Weiteren gilt dies auch für die Zugstrebe, um die Traglast für das System Druckstrebe in Interaktion mit dem Knotenblech herausarbeiten zu können.

7.1.2 Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Untergurtbreite der repräsentativen Gruppe 5

Als repräsentative Gruppe ist an dieser Stelle auch hier der Tragfähigkeitsvergleich der Gruppe 5 angeführt. Für die restlichen untersuchten Gruppen finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen der ermittelten Traglasten im Kapitel B - 7.

Die Tabelle 7 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen der Druckdiagonale mit anschließendem Fachwerkknoten der Gruppe 5 mit verschiedenen Untergurtbreiten, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. mit der Imperfektion als Knotenblechschiefe gegenüber:

- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 200\text{mm}$ mit linear elastisch – ideal plastischer Materialmodellierung des gesamten Systems
- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 200\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Doppelte Untergurtbreite $b_{UG} = 400\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Halbe Untergurtbreite $b_{UG} = 100\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes

Gruppe 5		
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 200mm		
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,4813 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1811,1 kN	LF = 0,4803 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,4 kN
UG: Breite 200mm (Zugstr. und UG elastisch)		
LF = 0,7705 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2899,4 kN	LF = 0,8230 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3096,9 kN	LF = 0,8193 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3083,0 kN
UG: Breite 400mm (Zugst. und UG elastisch)		
LF = 0,7911 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2976,9 kN	LF = 0,8241 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3101,1 kN	LF = 0,8270 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3112,0 kN
UG: Breite 100mm (Zugst. und UG elastisch)		
LF = 0,7182 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2702,6 kN	LF = 0,7854 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2955,5 kN	LF = 0,8040 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3025,5 kN
		N _{pl} - Druckstrebe = 3628,1 kN
		N _{pl} - Zugstrebe = 1812,3 kN
		N _{ref} = 3763,0 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>		

Tabelle 7 – Ergebnisse Gruppe 5 – Variation der Untergurtbreite

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt, dass durch eine rein elastische Materialmodellierung von Zugstrebe und Untergurtstab die Tragfähigkeit gegenüber der linear elastisch – ideal plastischen Modellierung des gesamten Systems deutlich gesteigert werden kann. Diese Modellierungsannahme kann getroffen werden, da primär die Drucktragfähigkeit der Fachwerkdigonale inklusive Knotenblech untersucht werden soll.

Eine Verbreiterung der Untergurtflansche zur Steigerung der Verdrehsteifigkeit des Untergurtes hat nahezu keinen Einfluss auf die Drucktragfähigkeit der Fachwerkdigonale. Am sensibelsten auf eine Verringerung der Breite des Untergurtes reagiert der Fall mit Imperfektion affin zur ersten Eigenform. Bei einer Halbierung der Untergurtbreite laut Profiltabelle von 200mm auf 100mm sinkt die Tragfähigkeit um rund 7%. Es ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeitsdifferenz zwischen $b_{UG} = 100\text{mm}$ und $b_{UG} = 400\text{mm}$ von etwa 10% (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) sehr gering ist, wenn man bedenkt, dass sich die Untergurtflanschbreite um den Faktor 4 ändert. Daraus folgt, dass die große Breite der Untergurtflansche in erster Linie nicht für die Drucktragfähigkeit der Fachwerkdigonale in Hinblick auf eine hohe Verdrehsteifigkeit des Gurtes benötigt wird, sondern als Fläche, um der durch die Zugnormalkraft im Untergurtstab (aufgrund der Horizontalkomponenten der Diagonalkräfte) hervorgerufenen Plastizierung entgegenzuwirken und demzufolge die Kraft N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ von 1898kN (berechnet für die reguläre Untergurtflanschbreite von 200mm) anzuheben.

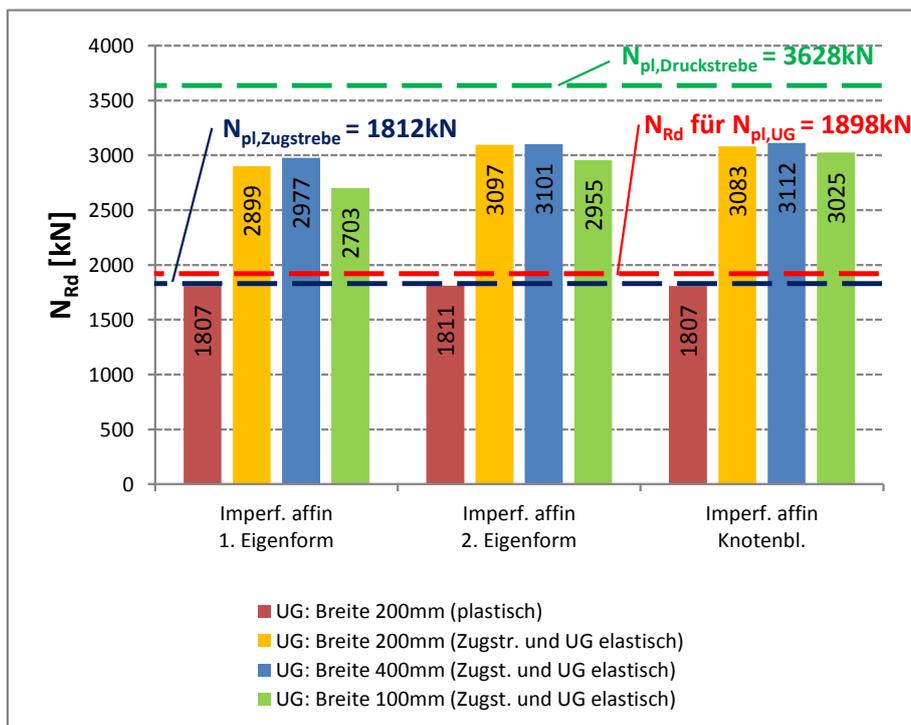


Abbildung 8 – Ergebnisse Gruppe 5 – Variation der Untergurtbreite

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben, sowie die Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft (für die reguläre Untergurtflanschbreite von 200mm) notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

7.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen

Die untersuchten Gruppen 1 und 5 (Ergebnisse der Gruppe 1 im Abschnitt B - 7.2.3) zeigen für das Verhalten mit variierten Untergurtbreiten nahezu gleiche Ergebnisse.

Die Ausnahme bildet erneut die Gruppe 6b (Ergebnisse siehe Abschnitt B - 7.4.3), bei welcher die untersuchten Untergurtflanschbreiten ($2,0 \cdot b_{UG}$ und $0,5 \cdot b_{UG}$) nahezu keinen Einfluss auf die maximale Traglast der Fachwerkdiagonale haben. Die Tragfähigkeitsdifferenz zwischen $b_{UG} = 150\text{mm}$ und $b_{UG} = 600\text{mm}$ ist verschwindend klein, obwohl sich die Untergurtflanschbreite auch hier um den Faktor 4 ändert. Es ist also ausreichend Steifigkeit um die schwache Achse, auch bereits bei 150mm Flanschbreite, vorhanden. Lediglich die verminderte Fläche bei 150mm Untergurtflanschbreite würde zu wenig plastische Normalkraft bieten, um die Tragfähigkeit hoch zu halten: N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ bei 150mm würde bei linear elastisch – ideal plastischer Modellierung des Untergurtstabes die Traglast limitieren.

7.2 Variation der Knotenblechdicke

7.2.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Knotenblechdicke (beeinflusst Biegesteifigkeit aus der Fachwerkebene) an der Tragfähigkeit der Fachwerkdruckdiagonale bestimmen zu können, wurden im Zuge der Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

zusätzliche Traglastberechnungen mit der halben Knotenblechdicke durchgeführt. Um den Effekt der Untergurtverdrehung möglichst gering zu halten, erfolgten die Berechnungen mit der doppelten Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG}$). Es wurden drei Fälle untersucht: Zwei mit Imperfektion in der Druckdiagonale (affin zur ersten und zweiten Knickeigenform), sowie einer mit der Imperfektion im Knotenblech (Knotenblechschiefstellung).

Um keinen, die Traglast der Fachwerkdruckdiagonale mindernden Steifigkeitsverlust des Untergurtstabes durch Plastizierungseffekte zu erhalten, wurde in den Rechnungen der Variation der Knotenblechdicke in den Abschnitten B - 8.2 bis B - 8.4, ein rein elastisches Materialverhalten des Untergurtstabes modelliert. Des Weiteren gilt dies auch für die Zugstrebe, um die Traglast für das System Druckstrebe-Knotenblech herausarbeiten zu können. Auch wurde, um dem Steifigkeitsverlust des Knotenblechs durch Plastizieren entgegenzuwirken, eine weitere Traglastrechnung mit elastischem Materialverhalten im Knotenblech durchgeführt (Untergurtstab und Zugstrebe sind auch weiterhin elastisch).

7.2.2 Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Knotenblechdicke der repräsentativen Gruppe 5

Als repräsentative Gruppe ist an dieser Stelle auch hier der Tragfähigkeitsvergleich der Gruppe 5 angeführt. Für die restlichen untersuchten Gruppen finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen der ermittelten Traglasten im Kapitel B - 8.

Die Tabelle 8 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen für die Fachwerkdruckdiagonale der Gruppe 5 mit halber Knotenblechdicke und doppelter Untergurtbreite, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung gegenüber:

- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes
- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe, des Untergurtstabes sowie des Knotenbleches

Am Beginn werden zum Vergleich die Ergebnisse aus Kapitel 7.1.2 für die

- reguläre Knotenblechdicke ($t_{KB} = 30\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes

wiederholt.

Gruppe 5 - $0,5 \cdot t_{KB}$		
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 400mm (Zugstr. und UG el.)		
LF = 0,7911 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2976,9 kN	LF = 0,8241 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3101,1 kN	LF = 0,8270 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3112,0 kN
UG: Breite 400mm (Zugstr. und UG el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,4201 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1580,8 kN	LF = 0,4190 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1576,7 kN	LF = 0,4264 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1604,5 kN
UG: Breite 400mm (Zugstr., UG und KB el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,7657 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2881,3 kN	LF = 0,8408 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3163,9 kN	LF = 0,8455 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3181,6 kN
N _{pl} - Druckstrebe =		3628,1 kN
N _{pl} - Zugstrebe =		1812,3 kN
N _{ref} =		3763,0 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>		

Tabelle 8 – Ergebnisse Gruppe 5 – mit Variation der Knotenblechdicke

Der Ergebnisvergleich der Systemberechnungen in Abbildung 9 von Gruppe 5 zeigt, dass zwischen regulärer ($t_{KB} = 30\text{mm}$) und halber ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) Knotenblechdicke die Tragfähigkeit um etwa 47% abfällt, da – zufolge der geringeren Fläche – das Knotenblech bereits bei geringem Lastniveau zu Plastizieren beginnt und deutlich an Steifigkeit verliert (bezogen auf Berechnung mit Zugstrebe und Untergurt rein elastisch berechnet).

Die Berechnung, in welcher neben dem Untergurt- und dem Zugstrebenmaterial auch der Knotenblechwerkstoff rein elastisch modelliert wurde, liefert wieder nahezu gleiche Traglastergebnisse wie die ursprüngliche Rechnung mit Nennknotenblechdicke und elastisch-plastischem Knotenblechverhalten, da kein Steifigkeitsverlust des Knotenbleches aufgrund Plastizierung auftritt. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeit der Druckdiagonale bei halber Dicke des Knotenblechs ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) durch die Querschnittstragfähigkeit des Knotenblechs beschränkt ist. Für die erste Knickeigenform nimmt die Tragfähigkeit um etwa 3% ab (Zugstrebe und Untergurt zu Zugstrebe, Untergurt und Knotenblech elastisch), da das Knotenblech weniger Endeinspannung bietet.

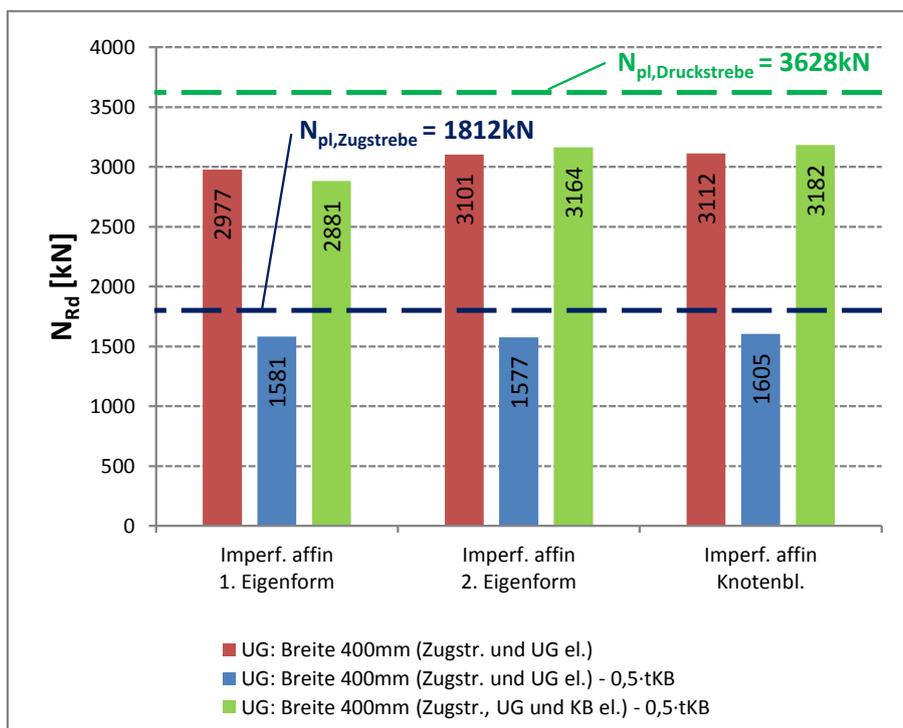


Abbildung 9 – Ergebnisse Gruppe 5 – mit Variation der Knotenblechdicke

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

7.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen

Die untersuchten Gruppen 1 und 5 (Ergebnisse der Gruppe 1 im Abschnitt B - 7.2.3) lassen für das Verhalten mit variierten Untergurtbreiten nahezu die gleichen Schlussfolgerungen zu.

Eine kleine Ausnahme ist auch hier wieder die Gruppe 6b. Der Traglastabfall ist nicht derartig gravierend. Zwischen regulärer ($t_{KB} = 40\text{mm}$) und halber ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) Knotenblechdicke fällt die Tragfähigkeit um etwa 25% ab (Ergebnisse im Kapitel B - 8.4.3). Der Abfall ist im Gegensatz zu den Gruppen 1 und 5 geringer, da das Knotenblechmaterial im Traglastzustand noch nicht voll durchplastiziert ist. Das Knotenblech ist bei der Gruppe 6b verhältnismäßig dick dimensioniert.

7.3 Variation der Belastungssituation im Untergurtstab

7.3.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Normkraftverhältnisse im Untergurtstab an der Tragfähigkeit der Fachwerkdruckdiagonale bestimmen zu können, wurden im Zuge einer Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

Traglastberechnungen mit verschiedenen großen externen Kräften N_{appl} durchgeführt (siehe Abbildung 10). Neben dem bisher betrachteten Fall ohne externer Untergurtkraft wurde nun am verschieblichen Auflager eine Kraft N_{appl} aufgebracht. Bislang existierte nur die Normkraft N_H als horizontale Komponente der Diagonalkräfte N_{Rd} in der gezogenen (linken) Untergurthälfte. Nun können drei weitere Normkraftsituationen im Untergurt auftreten:

- a) $N_{appl} < N_H$: der Untergurtstab erfährt nur rechts vom Knoten Druck
- b) $N_{appl} = N_H$: der Untergurtstab erfährt nur rechts vom Knoten Druck; links ist er nahezu spannungslos
- c) $N_{appl} > N_H$: der Untergurtstab erfährt über die volle Länge Druck

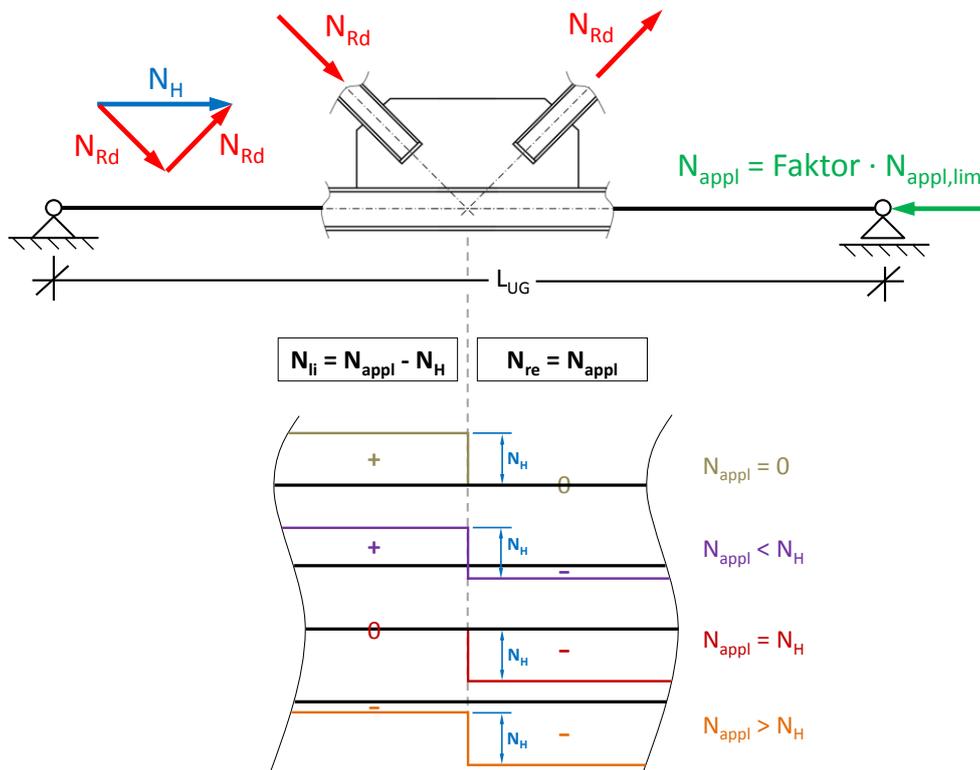


Abbildung 10 – Normkraftverlauf im Untergurt in Abhängigkeit von N_{appl}

Für die Wahl der Größe von N_{appl} wurde zuerst die rechnerisch maximal mögliche Kraft $N_{appl,lim}$ des Untergurtstabes bestimmt. Sie entspricht der Knicktragfähigkeit des Untergurtstabes bei Berücksichtigung des günstigen Normkraftverlaufes am Untergurt (vgl. Kapitel B - 9). Ihre Ermittlung ist in den Kapiteln B - 9.2 bis B - 9.8 für die untersuchten Gruppen beschrieben.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG}$$

Der Kraft $N_{appl,lim}$, auf welcher die FE-Parameterstudie der Belastungssituation im Untergurt basiert, wurde ein Multiplikationsfaktor (z.B. 0,25; 0,5; 1,0, usw.) vorgesetzt, um verschiedene Normalkraftverläufe im Untergurtstab zu simulieren.

$$N_{appl} = Faktor \cdot N_{appl,lim}$$

Bei den Berechnungen mit Variation der Belastungssituation (N_{appl}) erfolgte die Annahme eines rein elastischen Materialverhaltens der Zugstrebe, um die Systemtragfähigkeit durch Kombination eines Untergurt-Druckstreben-Knotenblech-Versagens zu erhalten.

Für die Traglastberechnung der Druckdiagonalen im Fachwerk mit der externen Kraft N_{appl} wurde zwischen zwei Imperfektionsauftritten unterschieden:

- Imperfektion im Untergurtstab mit $L_{UG}/750$ (siehe Tabelle B.59)
- Imperfektion in der Druckdiagonalen mit $L^*/750$ (siehe Tabelle B.60)

Daher gibt es für jede gewählte Kraft N_{appl} zwei FE-Ergebnisse für die Tragfähigkeit der Druckdiagonale als Teil des untersuchten Systems.

7.3.2 Tragfähigkeitsvergleich mit Variation der Belastungssituation im Untergurtstab der repräsentativen Gruppe 5

Als repräsentative Gruppe ist an dieser Stelle auch hier wieder der Tragfähigkeitsvergleich der Gruppe 5 angeführt. Für die restlichen untersuchten Gruppen finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen der ermittelten Traglasten im Kapitel B - 9.

Die Tabelle 9 zeigt für die beiden Imperfektionsarten (einerseits in der Druckdiagonale und andererseits im Untergurtstab) die Traglastergebnisse der Druckdiagonale des Fachwerks der Gruppe 5, mit einer pro Rechnung wertmäßig ansteigenden externen Untergurtkraft N_{appl} , in Kombination mit den bis zur Traglastgrenze zu steigernden Diagonalkräften N_{ref} .

Ausgewertet wurden die folgenden ansteigenden Laststufen für die Untergurtkraft N_{appl} :

- 0% $N_{appl,lim}$ mit Material der Zugstrebe bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch modelliert
- 25% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 50% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 75% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 100% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 120% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 130% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 135% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 145% $N_{appl,lim}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch (nur möglich für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale, beim Fall mit Imperfektion im Untergurt ist das Tragfähigkeitslimit bei 135% $N_{appl,lim}$ erreicht)

Eine höhere Belastung als 145% $N_{appl,lim}$ war auch für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale nicht mehr möglich. Eine Steigerung über den theoretisch maximalen Wert von $N_{appl,lim}$ war möglich, da bei der Systemrechnung eine gewisse Stützung aus der Fachwerkebene durch die Diagonalen bzw. durch das Knotenblech erfolgt. Diese stabilisierenden Effekte wurden bei der Ermittlung von $N_{appl,lim}$ nicht berücksichtigt.

Gruppe 5											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$N_{appl,lim} =$</td> <td style="padding: 2px;">0,607</td> <td style="padding: 2px;">· $N_{pl,UG}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$N_{pl,UG} =$</td> <td style="padding: 2px;">2673,2</td> <td style="padding: 2px;">kN</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$N_{appl,lim} =$</td> <td style="padding: 2px;">1622,6</td> <td style="padding: 2px;">kN</td> </tr> </table>		$N_{appl,lim} =$	0,607	· $N_{pl,UG}$	$N_{pl,UG} =$	2673,2	kN	$N_{appl,lim} =$	1622,6	kN	
$N_{appl,lim} =$	0,607	· $N_{pl,UG}$									
$N_{pl,UG} =$	2673,2	kN									
$N_{appl,lim} =$	1622,6	kN									
Imperfektion:											
in den Diagonalen ($L^*/750 = 5,9\text{mm}$) (erste Knickeigenform)	im Untergurt ($L_{UG}/750 = 8,3\text{mm}$) (erste Knickeigenform)										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)										
1897,3 kN	1863,8 kN										
Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)										
2899,4 kN	3109,0 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 406\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 406\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)										
2184,8 kN	2136,6 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 811\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 811\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)										
2472,3 kN	2471,5 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1217\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1217\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)										
2721,0 kN	2757,2 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1623\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1623\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)										
2712,4 kN	2836,2 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1947\text{kN}$ (120% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1947\text{kN}$ (120% $N_{appl,lim}$)										
2701,1 kN	2840,3 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2109\text{kN}$ (130% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2109\text{kN}$ (130% $N_{appl,lim}$)										
2681,5 kN	2831,3 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2191\text{kN}$ (135% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2191\text{kN}$ (135% $N_{appl,lim}$)										
2661,9 kN	2816,2 kN										
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2353\text{kN}$ (145% $N_{appl,lim}$)											
2474,5 kN											
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">N_{pl} - Druckstrebe =</td> <td style="padding: 2px;">3628,1 kN</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">N_{pl} - Zugstrebe =</td> <td style="padding: 2px;">1812,3 kN</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">N_{ult} =</td> <td style="padding: 2px;">2899,4 kN</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">N_{ref} =</td> <td style="padding: 2px;">3763,0 kN</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px; font-size: small;">(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</td> </tr> </table>		N_{pl} - Druckstrebe =	3628,1 kN	N_{pl} - Zugstrebe =	1812,3 kN	N_{ult} =	2899,4 kN	N_{ref} =	3763,0 kN	(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)	
N_{pl} - Druckstrebe =	3628,1 kN										
N_{pl} - Zugstrebe =	1812,3 kN										
N_{ult} =	2899,4 kN										
N_{ref} =	3763,0 kN										
(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)											

Tabelle 9 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 5

Hinweis zur Tabelle 9:

Die Ermittlung des Abminderungsbeiwertes zufolge Biegeknickens ($\chi_{z,UG} = 0,607$) des Untergurtstabes, unter Berücksichtigung des zutreffenden Normalkraftverlaufes am Untergurt, ist im Kapitel B - 9.6 beschrieben.

In der grafischen Gegenüberstellung in Abbildung 12 der Tragfähigkeiten (oben) ist klar erkennbar, wie sich die maximale Traglast der Druckdiagonale im Fachwerk durch die schrittweise gesteigerte Untergurtkraft N_{appl} gegenüber der Traglast der Berechnung mit $N_{appl} = 0\text{kN}$ erhöht (mit Zugstrebe rein elastisch modelliert):

- für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale von 1897kN auf maximal 2721kN bei 75% $N_{appl,lim}$
- für den Fall mit Imperfektion im Untergurtstab von 1864kN auf maximal 2840kN bei 120% $N_{appl,lim}$

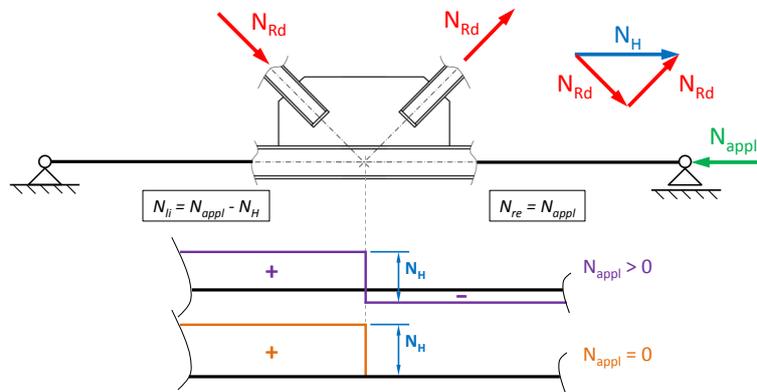


Abbildung 11 – mögliche Belastungssituation im Untergurt mit N_{appl}

Dieser Traglasterhöhungseffekt ist dadurch zu erklären, dass die externe Druckkraft N_{appl} die hohe Zugnormalkraft im Untergurt links des Knotens reduziert (siehe Abbildung 11). Zurückzuführen auf plastifizierende Zonen im Untergurt kann jedoch bei keiner Laststufe für N_{appl} jene Traglast, die bei der Berechnung mit einer rein elastischen Werkstoffmodellierung des Untergurtes die obere Grenze bildet (2899kN für Imperfektion in der Druckdiagonale bzw. 3109kN für Imperfektion im Untergurtstab, jeweils mit $N_{appl} = 0\text{kN}$), erreicht werden.

Bis zur theoretischen Grenze von $N_{appl,lim}$ ist kein Abfall der Tragfähigkeit erkennbar. Erst bei großen Untergurtkräften N_{appl} ist ein Abfall der Tragfähigkeit zu erkennen (am deutlichsten im Diagramm oben in Abbildung 12 für 145% $N_{appl,lim}$ beim Fall mit der Imperfektion in der Druckdiagonale).

Zusätzlich zu den Traglasten N_{Rd} in der Druckdiagonalen werden die zugehörigen Kräfte N_i des Untergurtes links des Knotens in einem eigenen Diagramm (Abbildung 12 unten) abgebildet. Es stellt sich heraus, dass die Normalkräfte N_i der Laststufen von 25% bis 75% $N_{appl,lim}$ nahezu der plastischen Normalkraft des Untergurtes entsprechen. Das heißt, dass hier ein Versagen in Form von Plastizieren durch N_i im gezogenen (linken) Bereich des Untergurtstabes auftritt. Vor allem an diesen drei Balken sieht man, wie N_{Rd} mit N_{appl} zunimmt (siehe Abbildung 12 oben).

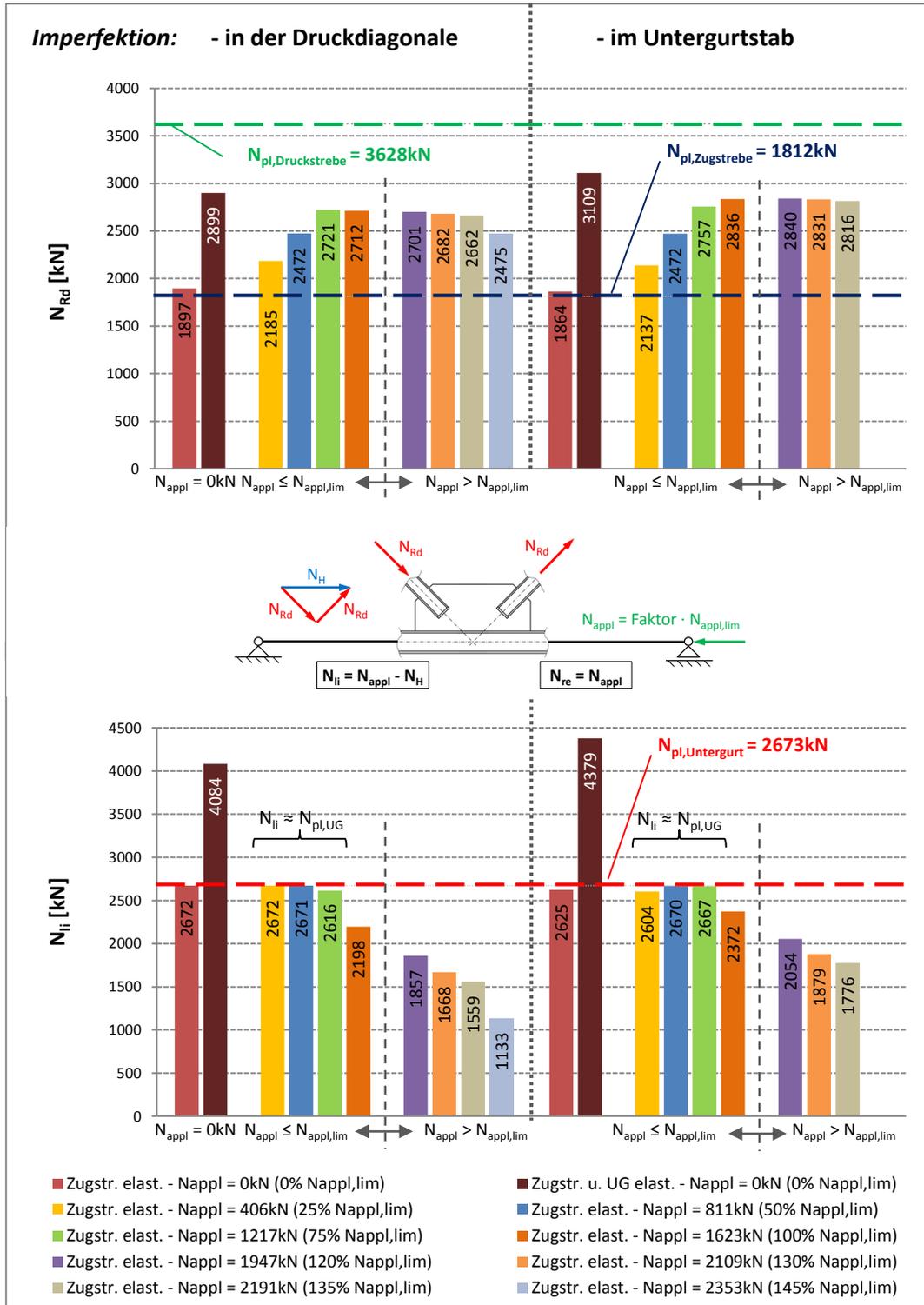


Abbildung 12 – oben: Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt und unten: die Zugkraft N_{ii} im Untergurt links des Knotens in Abhängigkeit der aufgebracht Kraft N_{app1} – Gruppe 5

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben oben bzw. des Untergurtes unten eingetragen.

7.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der restlichen Gruppen

Die weiteren untersuchten Gruppen 1 und 6b (Ergebnisse der Gruppe 1 im Abschnitt B - 9.2.3, für 6b in Abschnitt B - 9.8.3) zeigen im Gegensatz zur Gruppe 5 keine Tragfähigkeitssteigerung bei zunehmender Kraft N_{appl} . Bis zur theoretischen Grenze von $N_{\text{appl,lim}}$ ist aber auch kein Abfall der Tragfähigkeiten erkennbar. Erst bei einer sehr großen Untergurtkräften N_{appl} ist ein deutlicher Rückgang der Tragfähigkeiten zu sehen.

Anhang A Vergleich der Ergebnisse von Knotenausführungen aus der Literatur

A - 1 Allgemeines

Zur Plausibilitätskontrolle der mit Hilfe der Finite Elemente-Software „Abaqus“ [14] ermittelten Spannungswerte, stand am Beginn der Arbeit die Modellierung von zwei Fachwerkknoten mit Diagonalen aus I-Profilen und eingeschlitzten Knotenblechen aus der Literatur. Durch einen Vergleich der eigenen Spannungsverläufe entlang mehrerer Pfade mit jenen aus der Literatur, konnte die Knotenmodellierung kalibriert und die Qualität des entwickelten FE-Modells abschließend bestätigt werden.

Als Vergleichsobjekte dienten ein Strebenfachwerkanschluss nach [2] und ein Ständerfachwerkanschluss nach [1], wie sie die Abbildungen A.1. und A.2 zeigen.

- Strebenfachwerkanschluss nach [2]

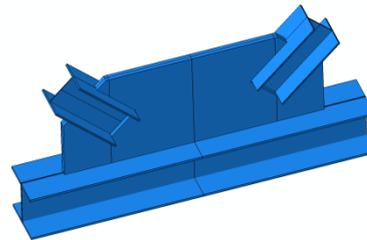


Abbildung A.1 – Strebenfachwerkanschluss nach [2]

- Ständerfachwerkanschluss nach [1]

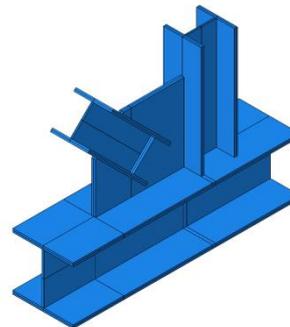


Abbildung A.2 – Ständerfachwerkanschluss nach [1]

Anhand eines Vergleiches der Spannungsverteilungen entlang verschiedener Pfade innerhalb der belasteten Fachwerkknoten erfolgte eine Bewertung des eigenen FE-Modells. Mit der überprüften und kalibrierten FE-Modellierung wurde im Anschluss eine Parameterstudie von Fachwerkknoten basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau durchgeführt. Aufgrund geometrischer Ähnlichkeiten zwischen den untersuchten Knoten der Fa. Haslinger und jenem aus [2], wurde letzterer zusätzlich in die Berechnungsstudie mitaufgenommen.

A - 2 Modellierung der Knoten mittels der Finite Elemente - Software „Abaqus“

A - 2.1 Allgemeines

FE-Programm:

Zur Modellierung und Spannungsberechnung der Knotensysteme nach [1] und [2] wurde das FE-Programm Abaqus [14], Version 6.11 pr3, eingesetzt.

Materialeigenschaften:

Entsprechend der jeweiligen Literatur wurden die Materialgesetze für die Vergleichsknoten gewählt. Während der Knoten nach [2] einem rein elastischen Materialverhalten unterworfen ist, verhält sich der Knoten nach [1] nach Erreichen der Streckgrenze ideal plastisch.

- Werkstoff für [1]**
- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
 - Poissonzahl $\nu = 0,3$
 - St37 (S235) - Fließgrenze $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
 - der Werkstoff ist homogen und isotrop
 - der Werkstoff verhält sich linear elastisch – ideal plastisch
 - Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt

- Werkstoff für [2]**
- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
 - Poissonzahl $\nu = 0,3$
 - der Werkstoff ist homogen und isotrop
 - der Werkstoff verhält sich linear elastisch
 - Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt

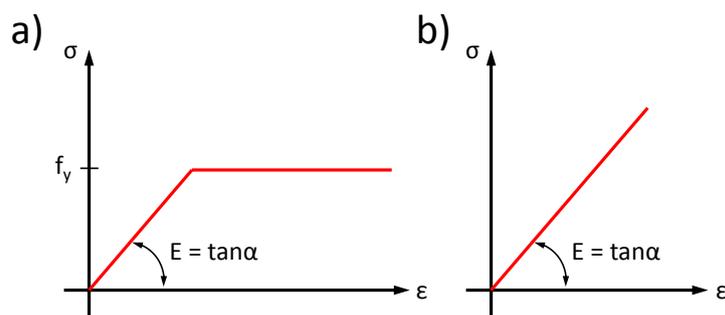


Abbildung A.3 – Materialarbeitslinien für Stahl: a) linear elastisch – ideal plastisch und b) rein elastisch

Die Abbildung A.3 a) und b) zeigt die Arbeitslinien für die modellierten Knoten mit linear elastischem - ideal plastischem und rein elastischem Materialverhalten des Werkstoffes Stahl.

Elemente und FE-Netze:

Sowohl die Profile als auch das Knotenblech wurden aus zusammengesetzten Schalenelementen modelliert. Als Elementtyp wurden sogenannte „S4R“ und „S8R“-Elemente verwendet. Hierbei handelt es sich um Elemente mit linearem bzw. quadratischem FE-Lösungsansatz. Jedes Element besitzt vier (S4R) bzw. acht Knoten (S8R) und einen Integrationspunkt. Damit können dicke und dünne Schalen sehr gut modelliert werden. Das „R“ im Elementnamen deutet auf die reduzierte Integration der Steifigkeitsmatrix hin. Jeder Knoten des Elements besitzt sechs Freiheitsgrade (drei der Rotation und drei der Translation), wodurch Normal- und Schubkräfte, als auch Momente sehr gut abgebildet werden können.

Es erfolgte je eine eigene Berechnung der Fachwerkknoten aus Elementen mit linearer bzw. quadratischer Lösungsfunktion. Die beiden gelieferten Ergebnisse wurden bei den Auswertungen der Spannungsverläufe entlang der betrachteten Pfade jeweils gegenübergestellt und bewertet.

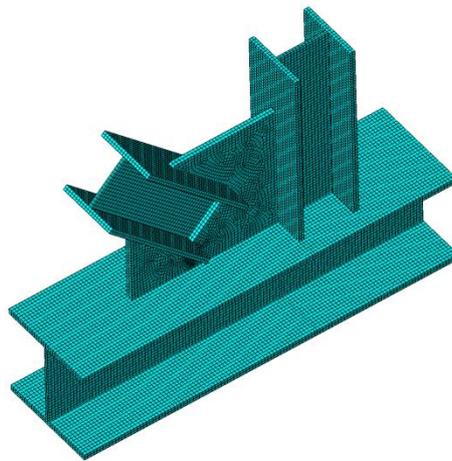


Abbildung A.4 – FE-Netz mit Maschenweite 5mm - Ständerfachwerkanschluss nach [1]

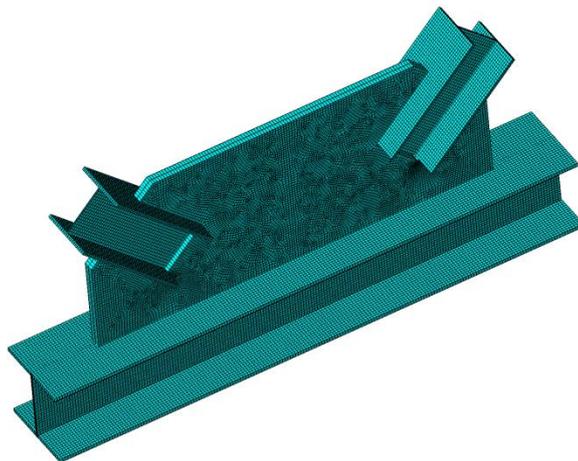


Abbildung A.5 – FE-Netz mit Maschenweite 10mm - Strebenfachwerkanschluss nach [2]

Die Netzgenerierung erfolgte mit Elementgrößen von 5mm für den Ständerfachwerkknoten nach [1] (siehe Abbildung A.4) und 10mm für den Strebenfachwerkanschluss nach [2] (siehe Abbildung A.5).

Materialorientierung:

Da für jedes Schalenelement ein eigenes lokales Koordinatensystem von Nöten ist, besitzt ein Profil (z.B. der Gurt), welches aus drei modellierten Einzelschalen (Untergurt, Steg und Obergurt) zusammengesetzt ist, drei lokale Koordinatensysteme. Die entsprechenden Achsen sind in der Abbildung A.6 bzw. in A.7 dargestellt.

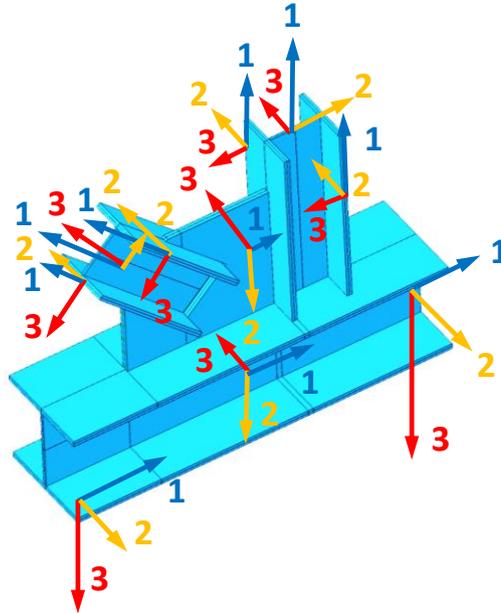


Abbildung A.6 – Materialorientierung der Knotenmodellierung nach [1]

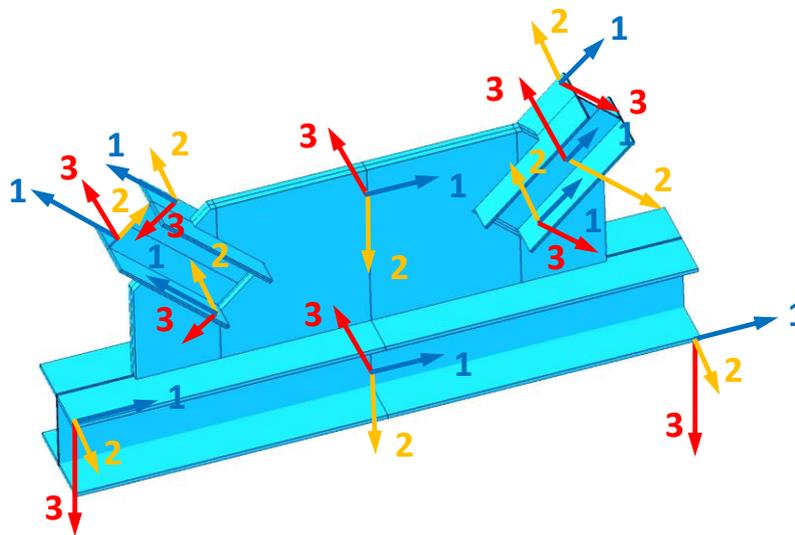


Abbildung A.7 – Materialorientierung der Knotenmodellierung nach [2]

Bei den lokalen Koordinatensystemen handelt es sich um Rechtssysteme, bei welchem einerseits die "1"-Richtung als Längskoordinate jedes Bauteiles definiert ist und andererseits die "3"-Richtung die Flächennormale des jeweiligen Schalenelementes darstellt.

A - 2.2 Randbedingungen und Belastung

Wie die Abbildungen A.8 und A.9 zeigen, sind die Untergurte, in einer Länge von jeweils einer Untergurtprofilhöhe über das Knotenblech hinausragend, starr eingespannt.

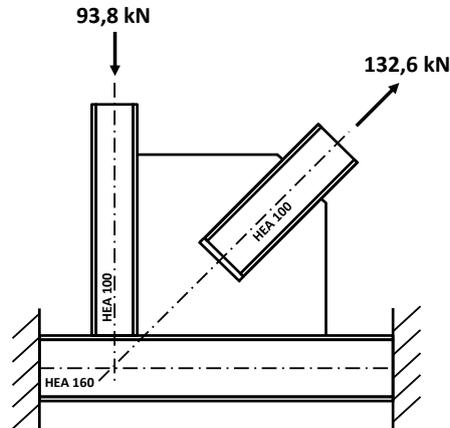


Abbildung A.8 – Lagerungsbedingungen - Ständerfachwerkanschluss nach [1]

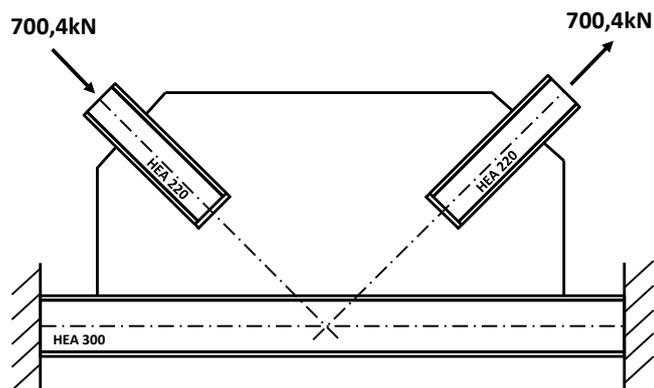


Abbildung A.9 – Lagerungsbedingungen - Strebenfachwerkanschluss nach [2]

Die Kräfteinleitung in den Knoten erfolgt über externe Kräfte in die freien Enden der Streben bzw. des Pfostens. Die Größe der Kräfte ist ebenfalls den Abbildungen A.8 und A.9 zu entnehmen.

A - 3 Ständerfachwerkanschluss nach [1]

Hierbei wurden die Spannungsverläufe entlang mehrerer Pfade einer FE-Berechnung eines Ständerfachwerkanschluss nach [1], siehe Abbildung A.10, mit jenen einer eigenen FE-Berechnung verglichen.

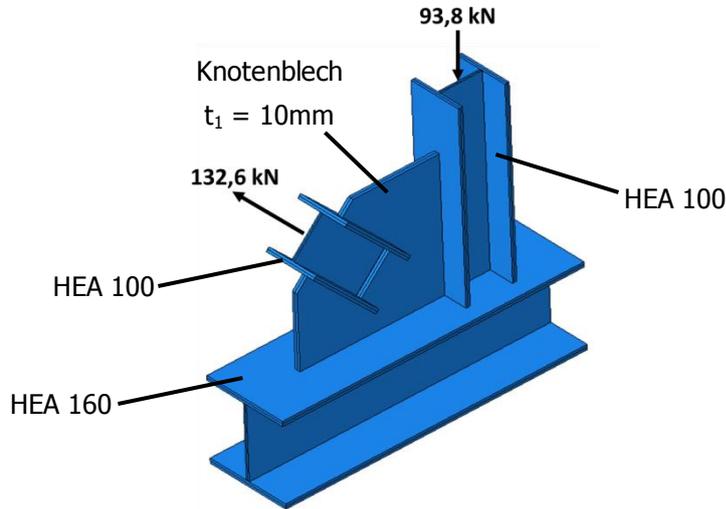


Abbildung A.10 – Ständerfachwerkanschluss nach [1]

A - 3.1 Geometrie und Abmessungen

Geometrie und Abmessungen sowie die Belastung des Strebenfachwerkanschlusses nach [1] können skizzenhaft der Abbildung A.11 entnommen werden.

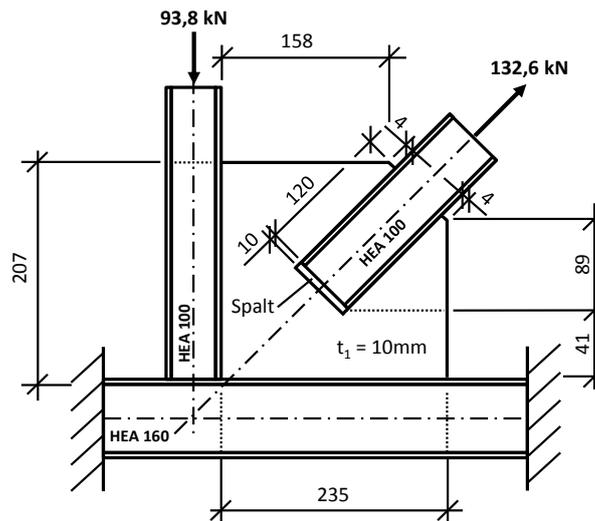


Abbildung A.11 – Maße des Ständerfachwerkanschlusses nach [1]

Für den Untergurt wurde der Profiltyp HEA 160, für die fallende Strebe HEA 100 eingesetzt. Das Knotenblech ist 10mm stark. Der Untergurt ist in einer Länge von jeweils einer Untergurtprofilhöhe über das Knotenblech hinausragend starr eingespannt. Die Krafteinleitung in den Knoten erfolgt über externe Kräfte in das freie Ende der Strebe bzw. des Pfostens.

A - 3.2 Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe

Die nachfolgende Abbildung A.12 zeigt, differenziert nach den Fasern Oberkante, Unterkante und Mittelfläche der Flansche, bzw. Mitte- und Außenkante des Steges, den Verlauf der Normalspannung über den Querschnitt der Strebe (HEA 100 ohne Ausrundungsradius zwischen Steg und Flansch) am Krafteinleitungsquerschnitt. Zu erkennen ist, dass sich aufgrund eines gewissen unvermeidbaren Biegeeinflusses die Spannungen an den Außenkanten der Flansche am Steganschluss etwas höher einstellen, anstatt wie erwartet konstant über den gesamten Querschnitt zu verlaufen.

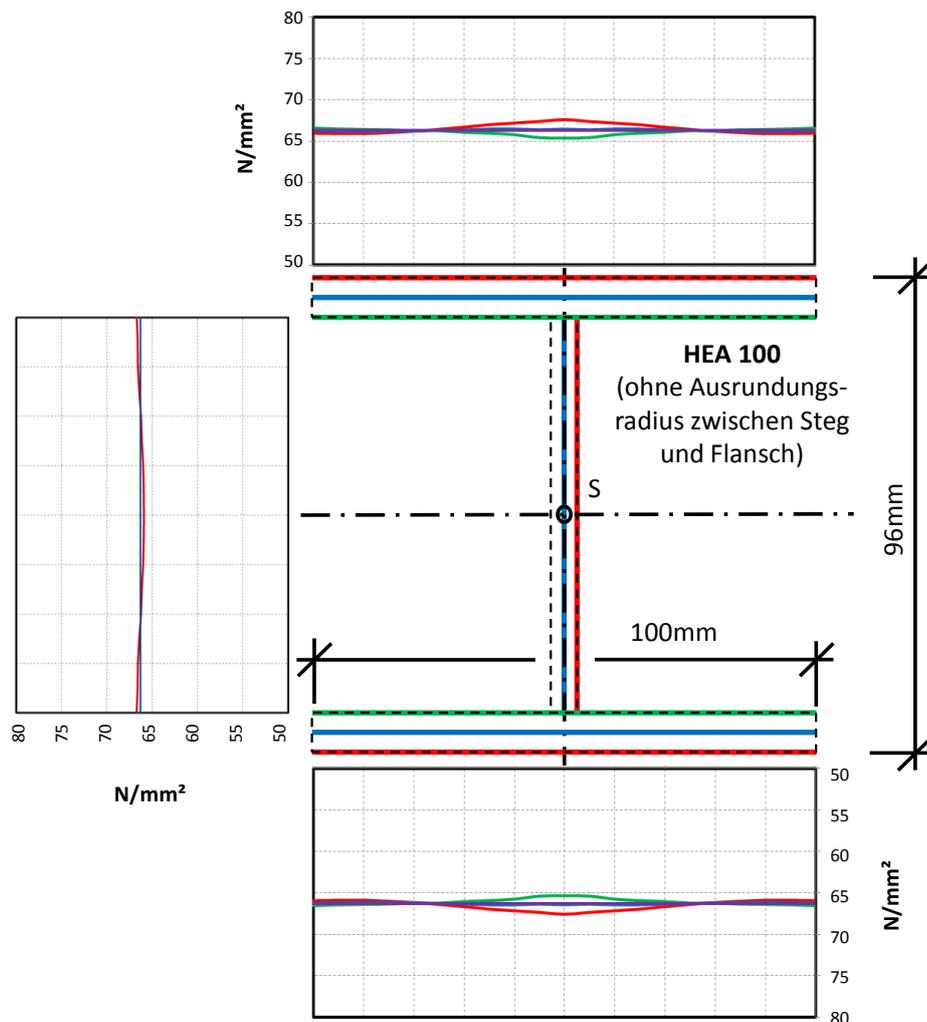


Abbildung A.12 – Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe des Strebenfachwerkanschlusses nach [1]

Die „wahre“ Spannung, konstant über den Querschnitt, deckt sich allerdings nahezu vollständig mit den jeweiligen mittleren Fasern der FE-Berechnung.

$$\begin{aligned}
 \text{HEA } 100 \quad h &= 96 \text{ mm} \\
 b &= 100 \text{ mm} \\
 t_f &= 8 \text{ mm} \\
 t_w &= 7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot t_f + (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w} = \frac{132,6 \text{ kN} \cdot 10^3}{2 \cdot 100 \cdot 8 + (96 - 2 \cdot 8) \cdot 7} = 66,3 \text{ N/mm}^2$$

A - 3.3 FE-Ergebnisse im Belastungszustand

Zugfolge der Druck- und Zugkrafteinleitung verformt sich der Untergurt entsprechend der Belastung. Das Knotenblech ist im Anschlussbereich der Strebe, die Zugstrebe in jener Zone, in welcher die Kraftübertragung in das Knotenblech stattfindet, am höchsten beansprucht, wie die folgenden Abbildungen A.13 bis A.16 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

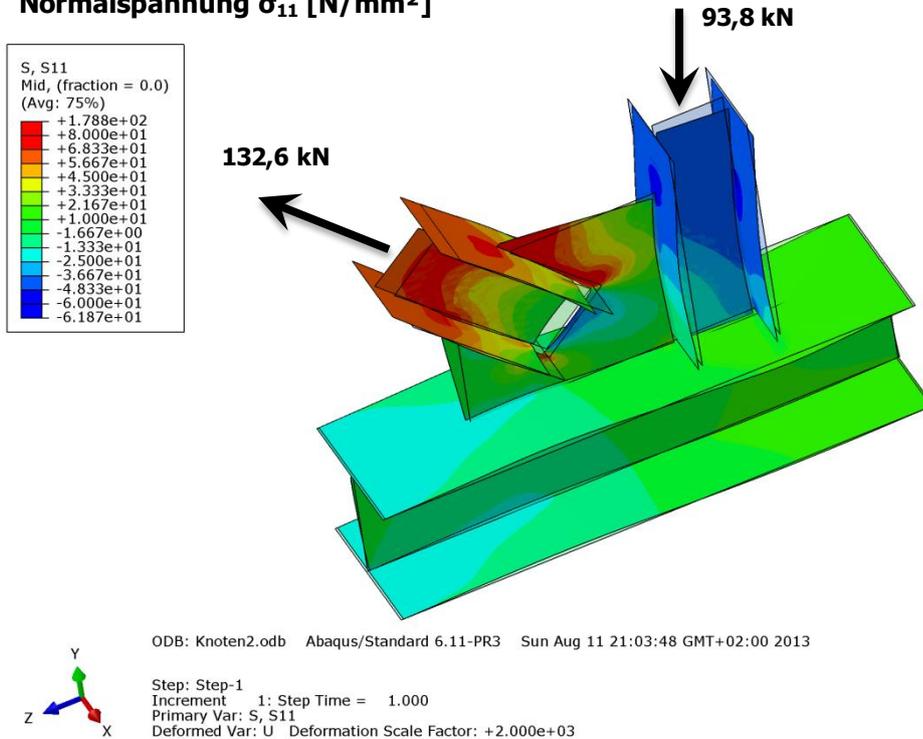


Abbildung A.13 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] des Ständerfachwerkknotens nach [1]

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

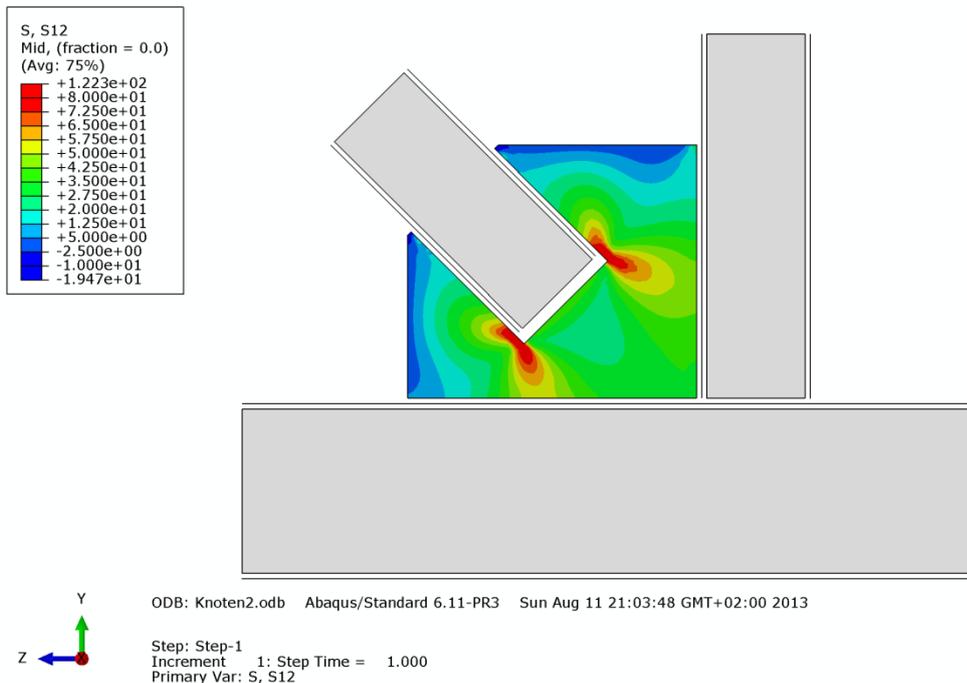


Abbildung A.14 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech des Ständerfachwerkknotens nach [1]

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

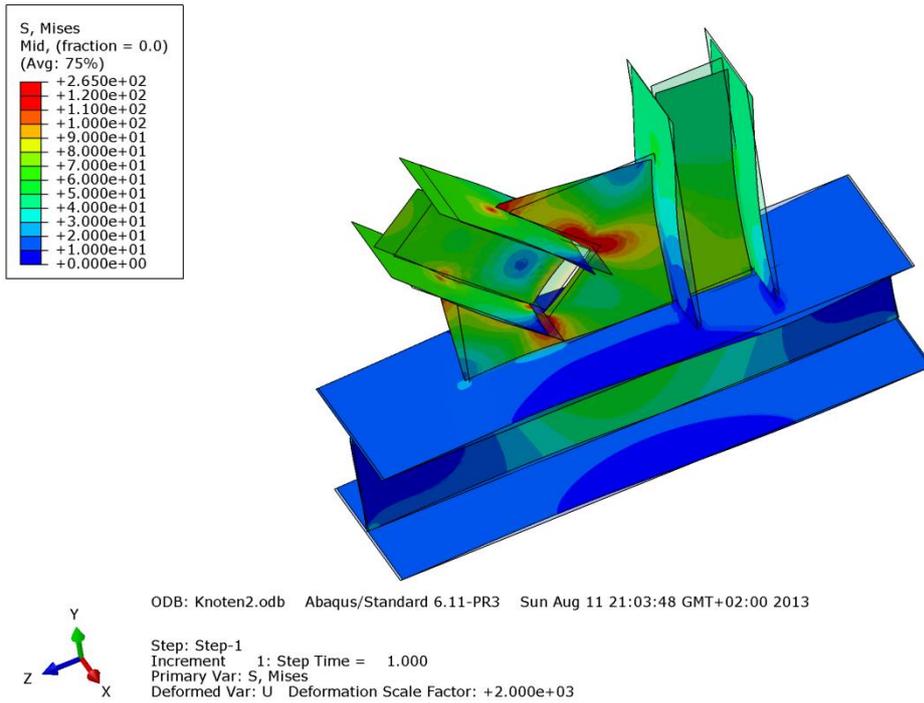


Abbildung A.15 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] des Ständerfachwerkknotens nach [1]

• **Verformung [N/mm²]**

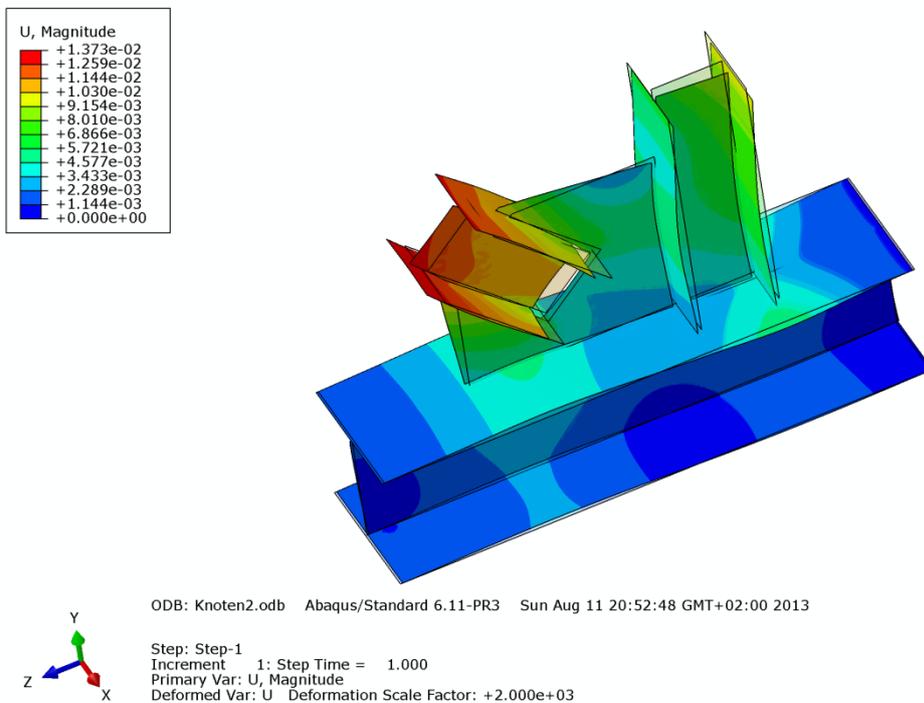


Abbildung A.16 – Verformung [mm] des Ständerfachwerkknotens nach [1]

A - 3.4 Ausgewertete Pfade

Der Vergleich der eigenen Spannungswerten mit jenen aus [1] wurde anhand von sechs Pfaden vorgenommen. Für diese Pfade finden sich die Spannungsverläufe in [1].

- **Pfad 1:** Diagonalensteg parallel zum Anschluss an das Knotenblech
- **Pfad 2:** Knotenblech parallel zum Anschluss an die Diagonale
- **Pfad 3:** Knotenblech parallel zum Anschluss an den Pfosten
- **Pfad 4:** Pfostensteg in vertikaler Richtung zur Blechseite hin
- **Pfad 5:** Knotenblech parallel zum Anschluss an den Untergurt
- **Pfad 6:** Gurtsteg in horizontaler Richtung zur Blechseite hin

Es wurden jeweils die Spannungsverläufe für σ_x , σ_y und τ_{xy} nach [1] den eigenen Werten für σ_{11} , σ_{22} und σ_{12} gegenübergestellt und miteinander verglichen. Die Lage der Pfade kann der Abbildung A.17 entnommen werden.

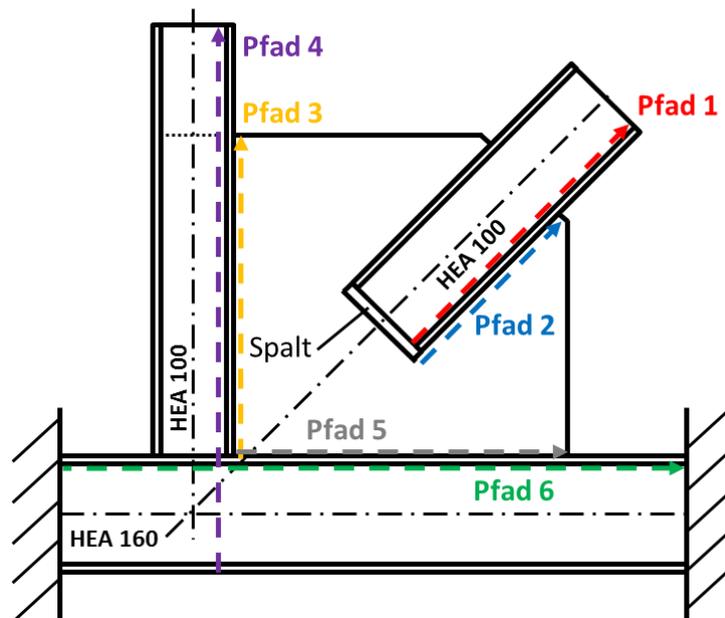


Abbildung A.17 – Auszuwertende Pfade des Ständerfachwerkanschlusses nach [1]

A - 3.4.1 Spannungsverlauf im Pfad 1

In Abbildung A.18 ist die Spannungsverteilung im Diagonalensteg parallel zum Anschluss an das Knotenblech aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad beginnt in der Strebeneinbindung (120mm innerhalb des Knotenblechs) und endet im Strebensteg in einem Abstand von 40mm außerhalb des Knotenblechs.

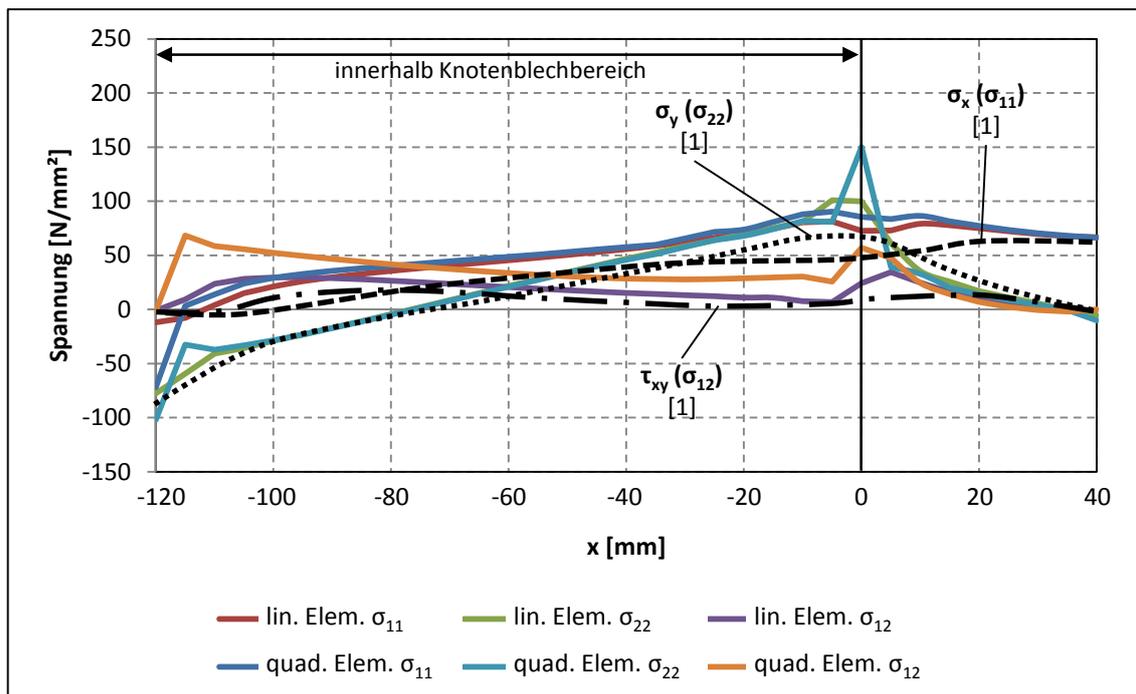
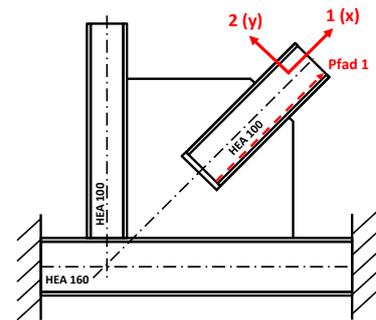


Abbildung A.18 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 1

Es zeigen sich bei den eigenen Ergebnissen Singularitäten am Ende des Knotenblechbereiches. Die S8R-Elemente mit quadratischer Lösungsfunktion zeigen im Gegensatz zu den linearen S4R-Elementen am Beginn des Spannungsverlaufes, unmittelbar nach dem Spalt zwischen der Knotenblechtasche und der Strebe, eine deutliche Spannungszunahme. Auch am Einbindepunkt ($x = 0\text{mm}$) sind die abgebildeten Spannungsspitzen der S4R-Elemente geringer. Die Spannungsverläufe nach [1] weisen keine dargestellten Singularitäten auf. Grundsätzlich stimmen die Tendenzen der Spannungsverläufe für σ_y , σ_x und τ_{xy} nach [1] mit den eigenen Werten für σ_{11} , σ_{22} und σ_{12} überein.

Im Steg der Diagonale werden die Normalspannungen in x-Richtung zum negativen Ende hin bei 120mm abgebaut. Die Schubspannungen zeigen nur geringe Werte. Senkrecht zum Diagonalensteg treten in y-Richtung an den Anschlussenden des Knotenbleches Spannungsspitzen mit unterschiedlichen Vorzeichen auf. Außerhalb des Knotenblechbereichs werden die $\sigma_y (\sigma_{22})$ – Spannungen abgebaut und eine reine Normalkraftbeanspruchung stellt sich ein (aus [1], Seite 62).

A - 3.4.2 Spannungsverlauf im Pfad 2

In Abbildung A.19 ist die Spannungsverteilung im Knotenblech parallel zum Anschluss der Strebe aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad beginnt in der Strebeinbindung (120mm innerhalb des Knotenblechs) und endet mit dem Knotenblech.

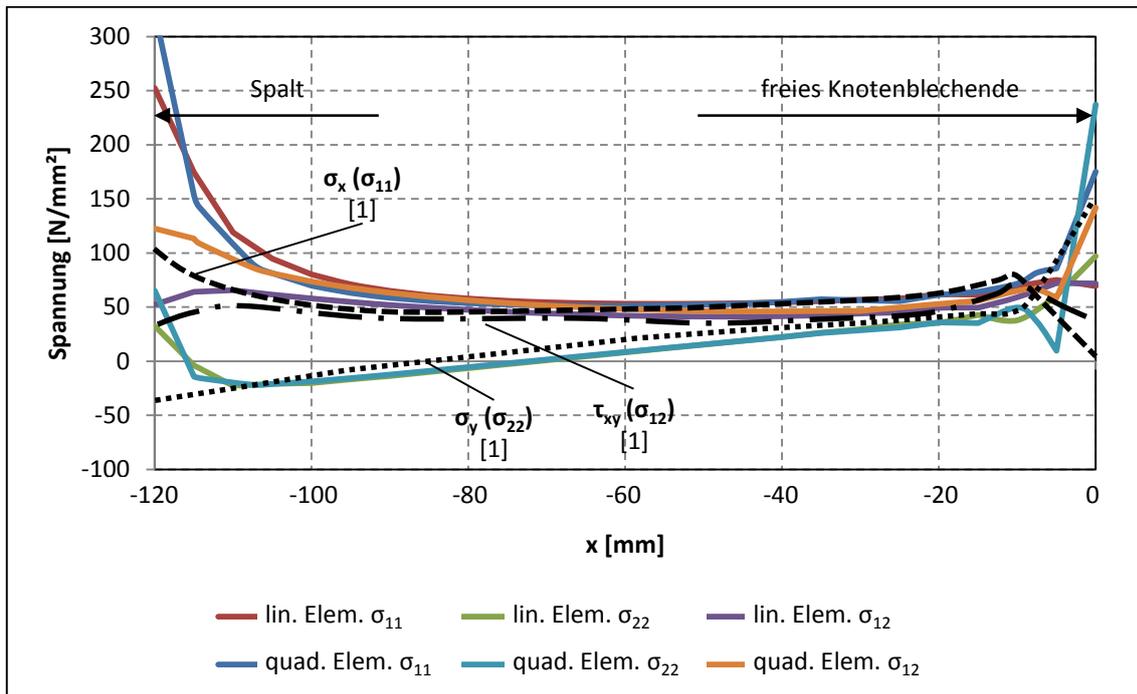
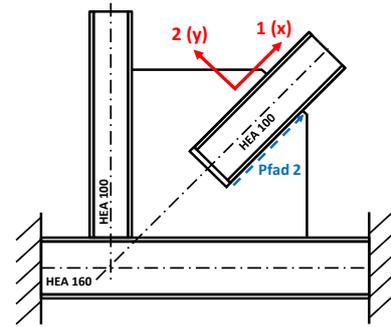


Abbildung A.19 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 2

Bei den eigenen FE-Werten sind wieder Spannungsspitzen nach dem Spalt zwischen der Knotenblechtasche und der Strebe zu erkennen. Grundsätzlich stimmen die Werte der Spannungsverläufe für σ_y , σ_x und τ_{xy} nach [1] mit den eigenen Werten für σ_{11} , σ_{22} und σ_{12} überein.

Die Diagonalkraft muss über Pfad 2 rechts und links der Diagonalen eingeleitet werden. Die Spannungsverläufe τ_{xy} (σ_{12}) liegen im Bereich des Mittelwertes $\tau_{xy} (\sigma_{12}) = D / [2 \cdot (l_d \cdot t)] \approx 50 \text{ N/mm}^2$. Am Knotenblechspalt entsteht eine Spannungsspitze, die hier zur besseren Darstellung nicht weiter aufgezeichnet wurde. Die Spannungen σ_y (σ_{22}) senkrecht zum Schnitt zeigen am Knotenblechrand eine Spannungsspitze und wechseln im Verlauf das Vorzeichen. Die Spannungen σ_x (σ_{11}) verlaufen entsprechend der Schubspannung annähernd konstant über die Länge (aus [1], Seite 63).

A - 3.4.3 Spannungsverlauf im Pfad 3

In Abbildung A.20 ist die Spannungsverteilung im Knotenblech parallel zum Anschluss an den Pfosten aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad beginnt an der Oberkante des Gurtes und verläuft horizontal nach oben bis zum Ende des Knotenbleches.

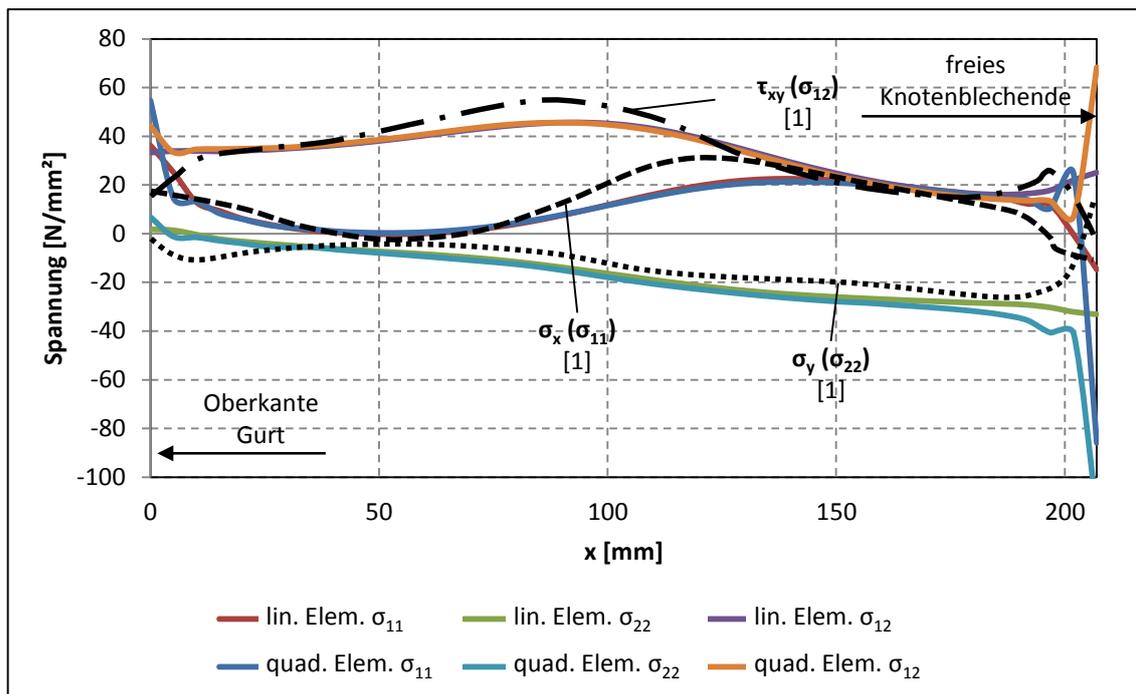
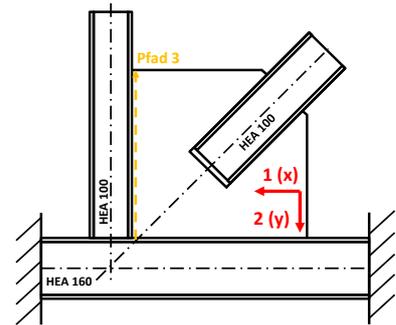


Abbildung A.20 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 3

Auch hier ist der Trend der Verläufe für σ_{11} , σ_{22} und σ_{12} mit jenen aus [1] nahezu ident. Die ersten und letzten Millimeter der Spannungsverläufe sind für die Bewertung der eigenen Ergebnisse aufgrund auftretender Singularitäten auszuschließen.

Der Vertikalanteil aus der Diagonalkraft wird von dem Pfosten aufgenommen. Aus dem Schubspannungsverlauf τ_{xy} (σ_{12}) wird ersichtlich, dass die Vertikalkomponente vorwiegend über Schub im Bereich des vertikalen Knotenblechanschlusses aufgenommen wird. Längs- und Querspannungsanteile sind wesentlich geringer als die Schubanteile und erreichen oberhalb des Knotenblechspaltes ihre Größtwerte (aus [1], Seite 64).

A - 3.4.4 Spannungsverlauf im Pfad 4

In Abbildung A.21 ist die Spannungsverteilung im Untergurtprofil und im Pfostensteg hin zur Seite des Knotenblechs aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad hat seinen Ursprung an der Unterkante des Gurtprofils und endet nach 450mm im Pfosten (152mm im Gurt, 207mm im Knotenblechbereich im Pfosten und 91mm im Pfostensteg).

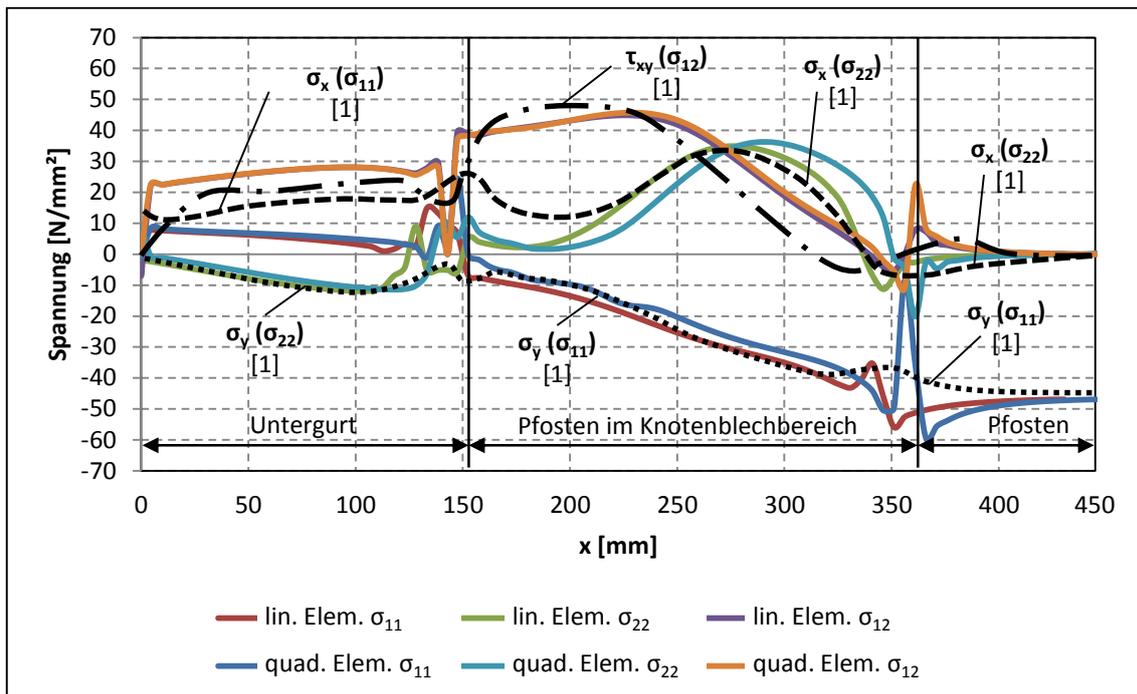
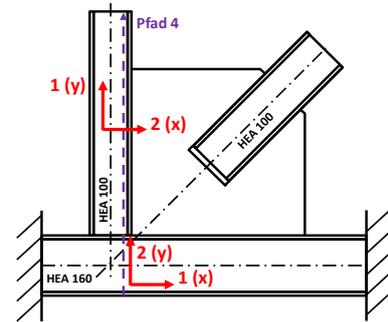


Abbildung A.21 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 4

Bis auf die σ_{11} (σ_x)-Verläufe innerhalb des Untergurtes zeigt sich eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung der eigenen Kurven zu jenen aus [1]. Die Spannung σ_{11} (σ_x) ist die Normalspannung in Richtung der Längsachse des Gurtes. Im Pfosten entspricht σ_{11} der Normalspannung in Pfostenachse der eigenen Ergebnisse, während bei den Verläufen nach [1] diese Spannung σ_y darstellt. Dieser Koordinatenunterschied hat sich dadurch ergeben, dass im eigenen FE-Modell die Profilachsen die „1“ (bzw. die x) – Richtungen durchgehend definieren.

Über Pfad 4 müssen 50% des vertikalen Diagonalkraftanteils in die gegenüberliegende Pfostenhälfte geleitet werden. Der Schubspannungsverlauf zeigt, dass der Gurtstab sowie der Pfostensteg auf Schub beansprucht werden. Durch die Querspannungen im Knotenblech wird auch der Pfostensteg beansprucht. Je weicher der Steg ist, desto kleiner werden die Querspannungen. Über die Pfadlänge werden die Längsspannungen σ_y (σ_{11}) aufgebaut. Außerhalb des Knotenbleches wird der Pfosten nur durch Normalspannungen beansprucht (aus [1], Seite 65).

A - 3.4.5 Spannungsverlauf im Pfad 5

In Abbildung A.22 ist die Spannungsverteilung im Knotenblech parallel zum Anschluss an den Untergurt aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad beginnt an der Pfosteninnenseite und endet am Knotenblechende.

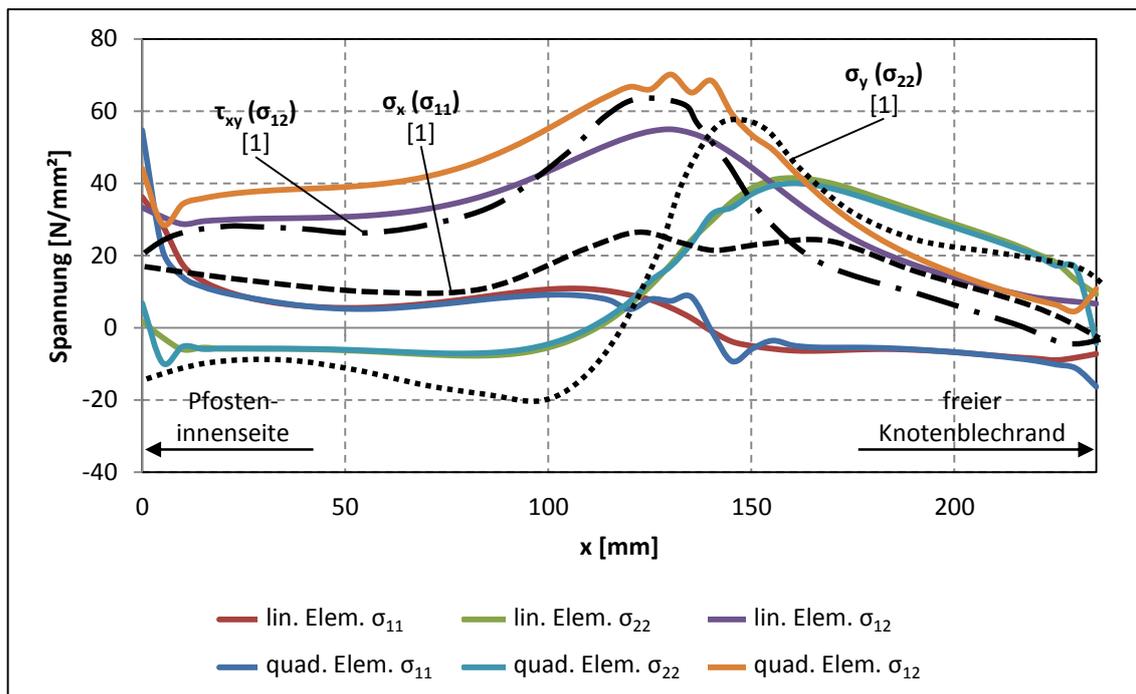
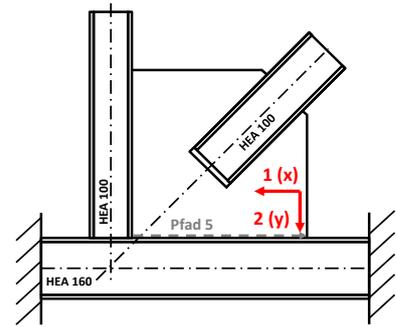


Abbildung A.22 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 5

Im Pfad 5 an der horizontalen Unterseite des Knotenblechs gibt es Abweichungen im Betrag der aufgetragenen Spannungswerte zwischen den eigenen und den Ergebnissen nach [1]. Während für τ_{xy} (σ_{12}) noch gleiche Tendenzen der Kurven erkennbar sind, folgen die Spannungsverläufe für σ_x (σ_{11}) bzw. σ_y (σ_{22}) keinen wirklichen gemeinsamen Trend mehr.

Im horizontalen Anschluss des Knotenbleches werden rund 66% des horizontalen Kraftanteiles über Schub übertragen. Die Längsspannungen σ_x (σ_{11}) verlaufen zwischen Knotenblechspalt und Pfosten relativ konstant, erreichen ihr Maximum im Bereich des Knotenblechspaltes und werden dann zum Ende hin abgebaut. Die σ_y (σ_{22}) – Spannungen weisen unterhalb des Knotenblechspaltes eine Spannungsspitze auf. Zum Pfosten hin fällt die Kurve steil ab und nimmt negative Werte an, zum Rand hin bleiben die Spannungen positiv (aus [1], Seite 66).

A - 3.4.6 Spannungsverlauf im Pfad 6

In Abbildung A.23 ist die Spannungsverteilung im Steg des Untergurtes in horizontaler Richtung hin zur Knotenblechseite aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [1] und eigenen FE-Ergebnissen. Der Pfad hat seinen Ursprung bei der Einspannung in einer Entfernung von 130mm vor dem Pfosten und endet 139mm nach Ende des Knotenblechs.

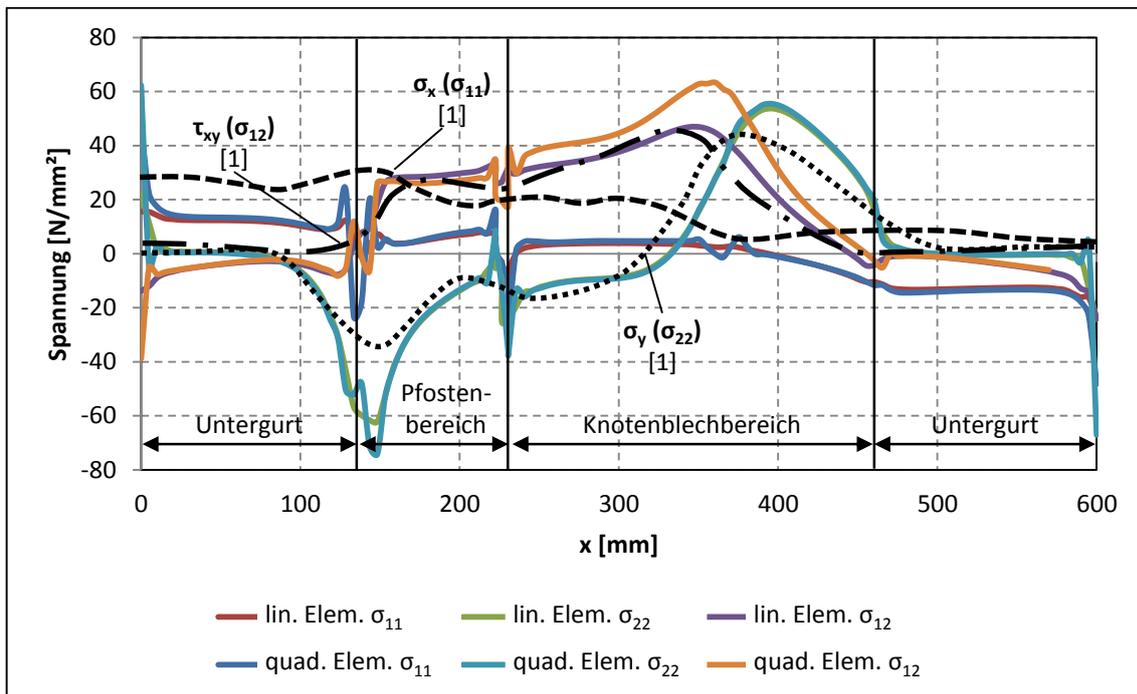
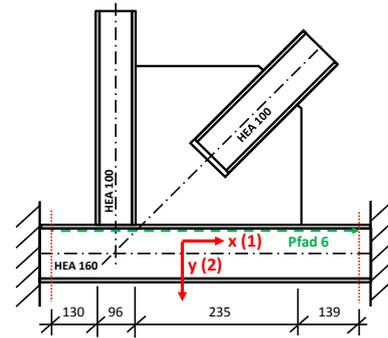


Abbildung A.23 – Ständerfachwerkanschluss - Spannungsverlauf im Pfad 6

Im Pfad 6 (horizontal im Steg des Untergurtes) folgen die Verläufen für $\sigma_y (\sigma_{22})$ und $\tau_{xy} (\sigma_{12})$ nach [1] und die eigenen einen deutlich erkennbaren gemeinsamen Trend. Beim Spannungsverlauf für $\sigma_x (\sigma_{11})$ gibt es allerdings Differenzen.

Die Horizontalkraft muss zu 50% über Pfad 6 in die untere Gurthälfte eingeleitet werden. Die Schubspannungen erreichen ähnlich wie in Pfad 5 ihr Maximum. Außerhalb des Anschlussbereiches treten keine Schubspannungen auf. Die Querspannungen $\sigma_y (\sigma_{22})$ haben unterhalb des Knotenblechspaltes eine positive Spannungsspitze, unter dem Pfosten einen negativen Spitzenwert. Die Längsspannungen werden nach dem Spalt aufgebaut und erreichen hinter dem Pfosten die erwartete Normalspannung des Gurtes (aus [1], Seite 67).

A - 3.4.7 Zusammenfassende Beurteilung des Vergleichs der ausgewerteten Pfade

Zusammenfassend ist die Übereinstimmung zwischen den eigenen Spannungsverläufen entlang der definierten Pfade und jenen aus [1] generell zufriedenstellend. Hauptsächlich fallen in den eigenen Kurven die dargestellten Singularitäten auf, während diese bei den Verläufen nach [1] nicht dargestellt wurden.

Vereinzelt gibt es Differenzen zu den Verläufen nach [1]. Erwähnenswert sind aber nur jene Abweichungen der Spannungen im Pfad 5 im Knotenblech parallel zum Anschluss an den Untergurt und die Differenzen im Spannungsverlauf für σ_x (σ_{11}) im Pfad 6, da diese betragsmäßig bedeutend sind.

Grundsätzlich wurde die Richtigkeit der gelieferten Spannungswerte des eigenen entwickelten FE-Modelles bestätigt.

A - 4 Strebenfachwerkanschluss nach [2]

Hierbei wurden die Spannungsverläufe einer FE-Berechnung eines Ständerfachwerkanschluss nach [2], siehe Abbildung A.24, mit jenen einer eigenen FE-Berechnung verglichen. Die Untersuchungen beziehen sich auf einen Spannungspfad in der Zugstrebe des Knotens bzw. einem Pfad im Knotenblech.

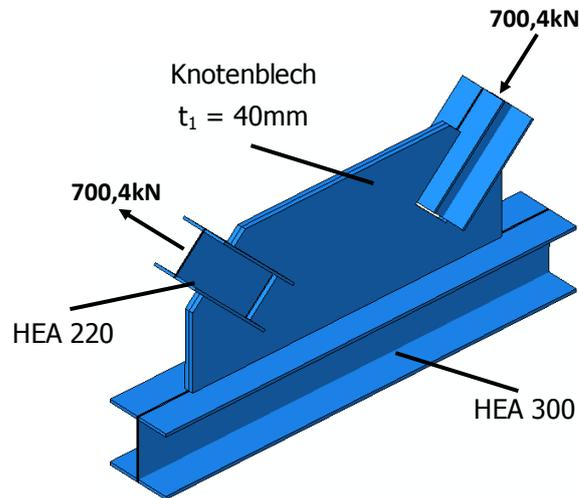


Abbildung A.24 – Strebenfachwerkanschluss nach [2]

A - 4.1 Geometrie und Abmessungen

Geometrie und Abmessungen sowie die Belastung des Strebenfachwerkanschlusses nach [2] können skizzenhaft Abbildung A.25 entnommen werden.

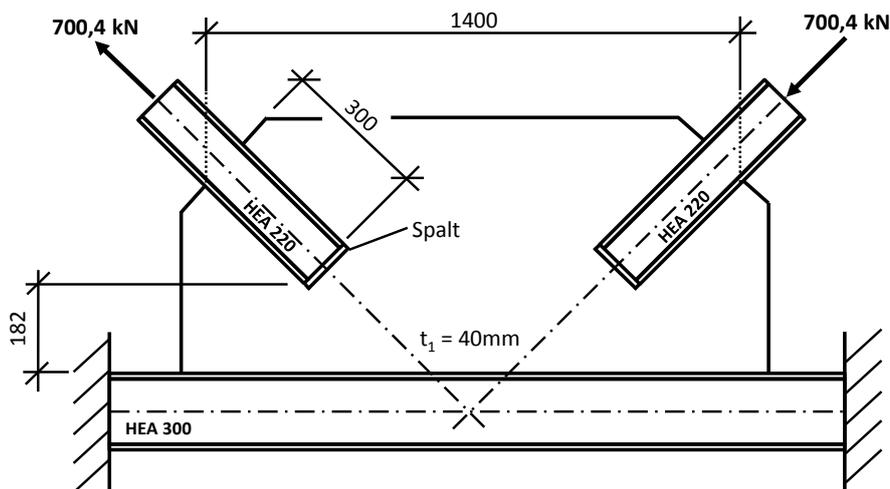


Abbildung A.25 – Maße des Strebenfachwerkanschlusses nach [2]

Für den Untergurt wurde der Profiltyp HEA 300, für die Streben HEA 220 eingesetzt. Das Knotenblech ist 40mm stark. Der Untergurt ist in einer Länge von jeweils einer Untergurtprofilhöhe über das Knotenblech hinausragend starr eingespannt. Die Krafteinleitung in den Knoten erfolgt über externe Kräfte in die freien Enden der Streben.

A - 4.2 Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe

Die nachfolgende Abbildung A.26 zeigt, differenziert nach den Fasern Oberkante, Unterkante und Mitte der Flansche, bzw. Mitte- und Außenkante des Steges, den Verlauf der Normalspannung über den Querschnitt der Strebe (HEA 220 ohne Ausrundungsradius zwischen Steg und Flansch) am Krafteinleitungsquerschnitt. Zu erkennen ist, dass sich aufgrund eines gewissen unvermeidbaren Biegeeinflusses die Spannungen an den Außenkanten der Flansche am Steganschluss etwas höher einstellen als an den Innenkanten, anstatt wie erwartet konstant über den gesamten Querschnitt zu verlaufen.

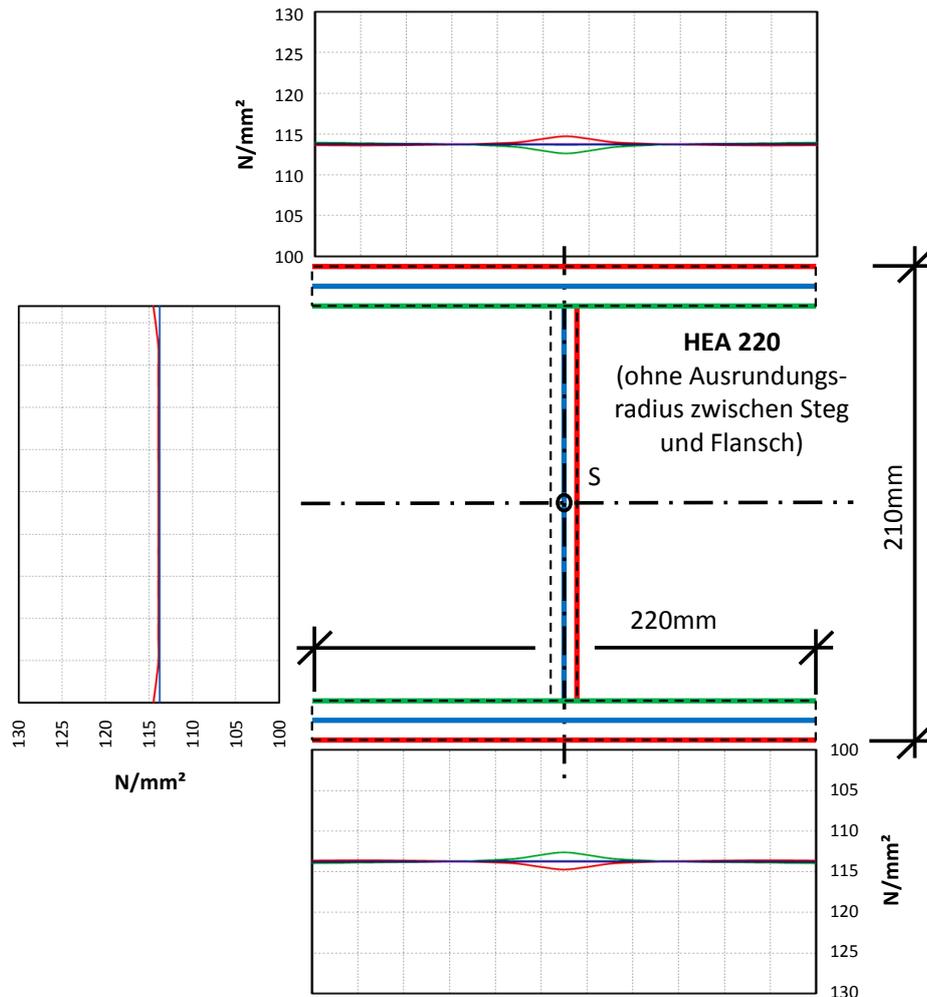


Abbildung A.26 - Normalspannungsverteilung am Querschnitt der Zugstrebe des Strebenfachwerkanschlusses nach [2]

Die „wahre“ Spannung, konstant über den Querschnitt, deckt sich allerdings nahezu vollständig mit den jeweiligen mittleren Fasern der FE-Berechnung.

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 220} \quad h &= 210 \text{ mm} \\
 b &= 220 \text{ mm} \\
 t_f &= 11 \text{ mm} \\
 t_w &= 7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot t_f + (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w} = \frac{700,4 \text{ kN} \cdot 10^3}{2 \cdot 220 \cdot 11 + (210 - 2 \cdot 11) \cdot 7} = 113,8 \text{ N/mm}^2$$

A - 4.3 FE-Ergebnisse im Belastungszustand

Zugfolge der Druck- und Zugkrafteinleitung verformt sich der Untergurt entsprechend der Belastung. Auf der Druckseite neigt das Knotenblech zu Stabilitätsversagen, wie die Abbildungen A.27 bis A.30 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

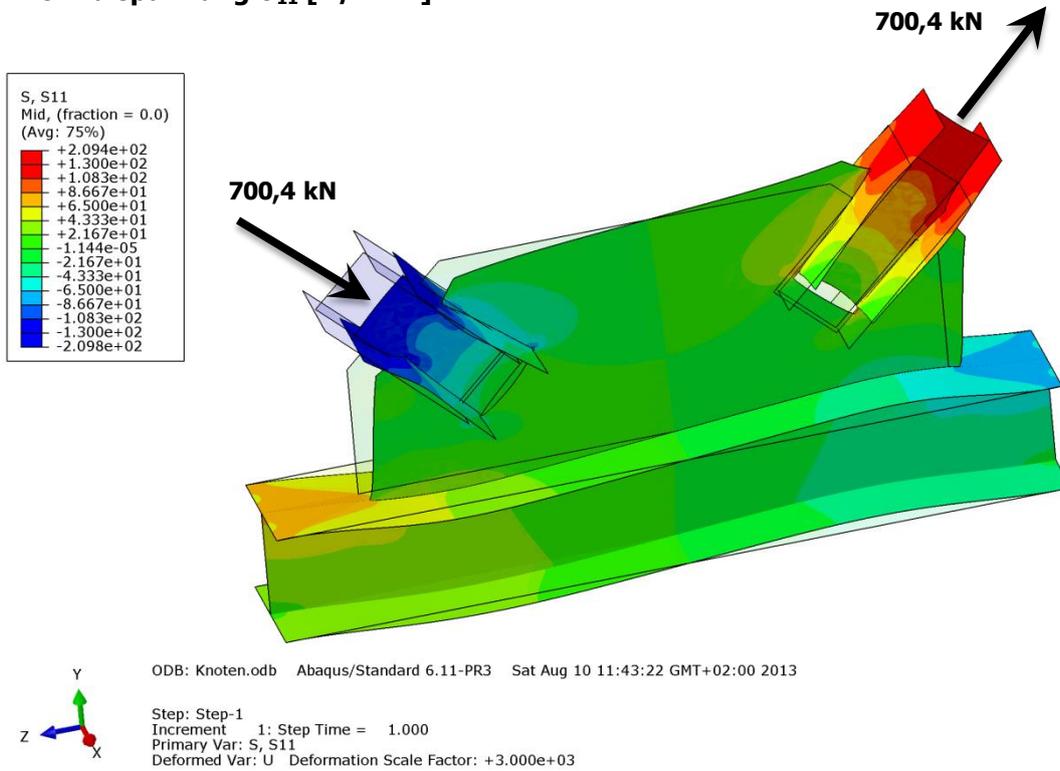


Abbildung A.27 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] des Strebenfachwerkknotens nach [2]

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

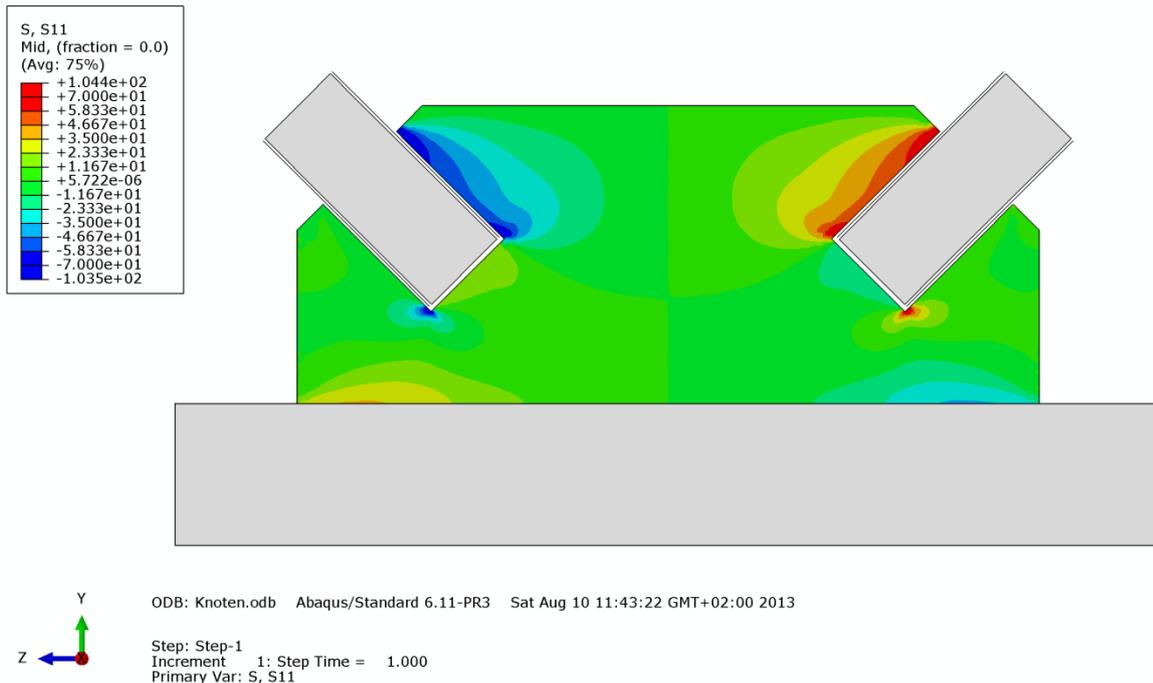


Abbildung A.28 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech des Strebenfachwerkknotens nach [2]

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

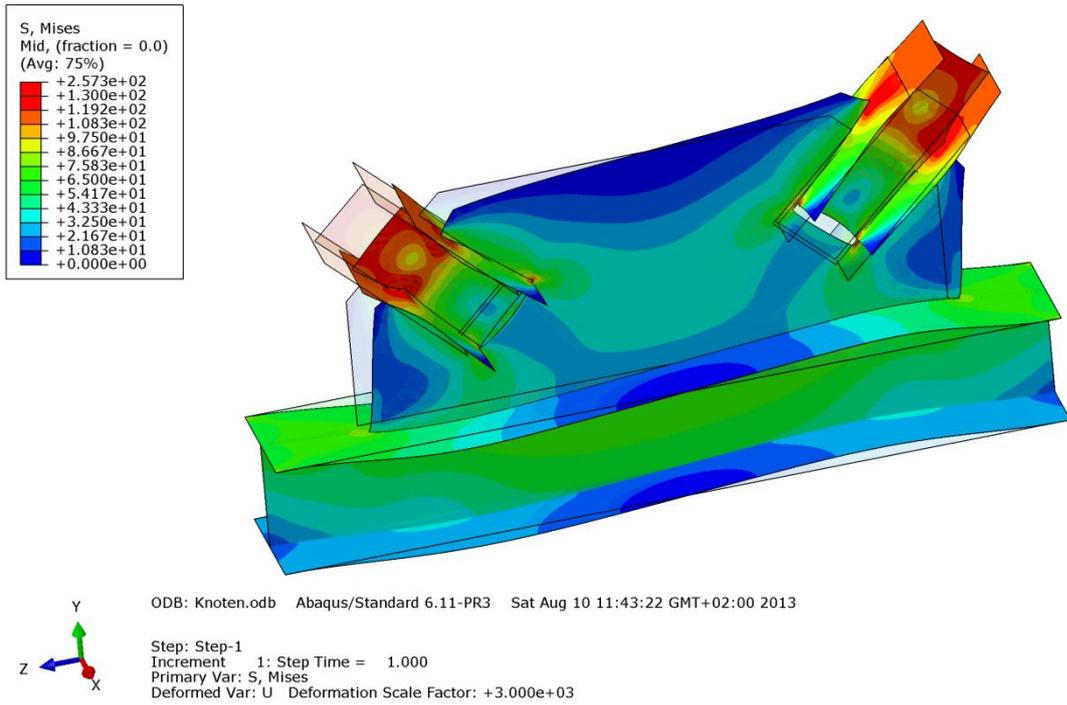


Abbildung A.29 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] des Strebenfachwerkknotens nach [2]

• **Verformung [N/mm²]**

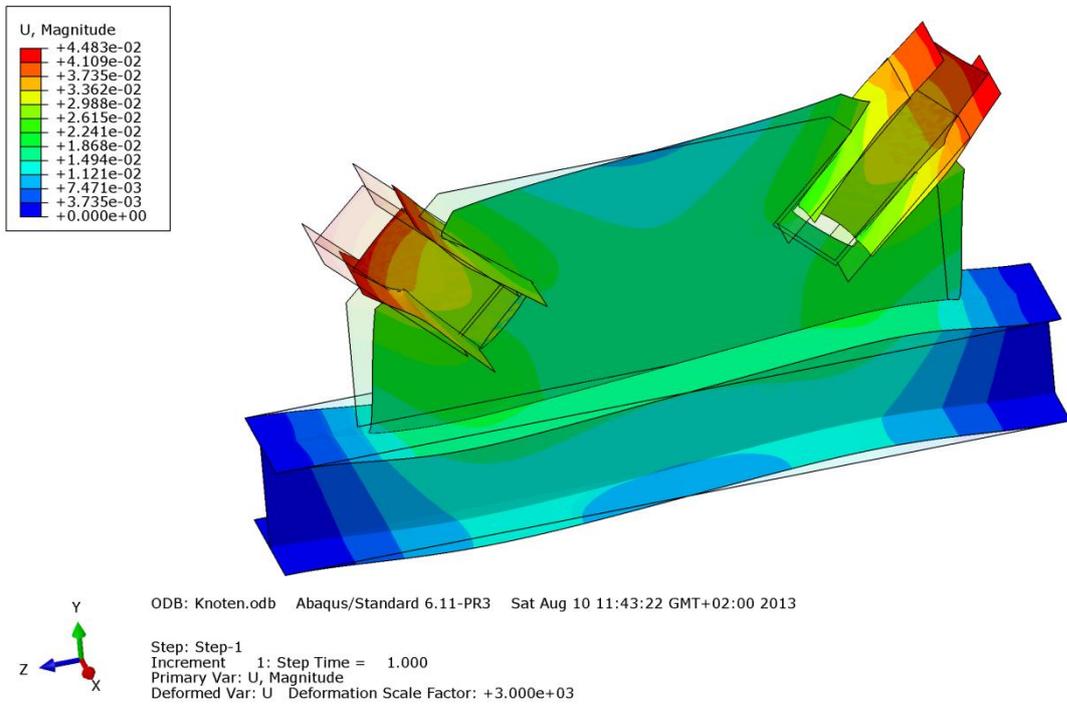


Abbildung A.30 – Verformung [mm] des Strebenfachwerkknotens nach [2]

A - 4.4 Ausgewertete Pfade

Für den Strebenfachwerkknoten wurden Spannungsverläufe entlang von sechs Pfaden ermittelt. Der Vergleich der eigenen Spannungswerten mit jenen aus [2] wurde anhand zweier Pfade vorgenommen. Für die Pfade 1 und 6 finden sich die Spannungsverläufe in [2]. Die Lage der Pfade kann der Abbildung A.31 entnommen werden.

- **Pfad 1:** Mittelschnitt des Steges der Diagonale
- **Pfad 2:** Mittelschnitt des Obergurtes der Diagonale
- **Pfad 3:** Mittelschnitt des Untergurtes der Diagonale
- **Pfad 4:** Außenkante des Obergurtes der Diagonale
- **Pfad 5:** Außenkante des Untergurtes der Diagonale
- **Pfad 6:** Schnitt im kürzesten Abstandes der Unterkante Knotenblech und Ende der Tasche der Diagonale im Knotenblech

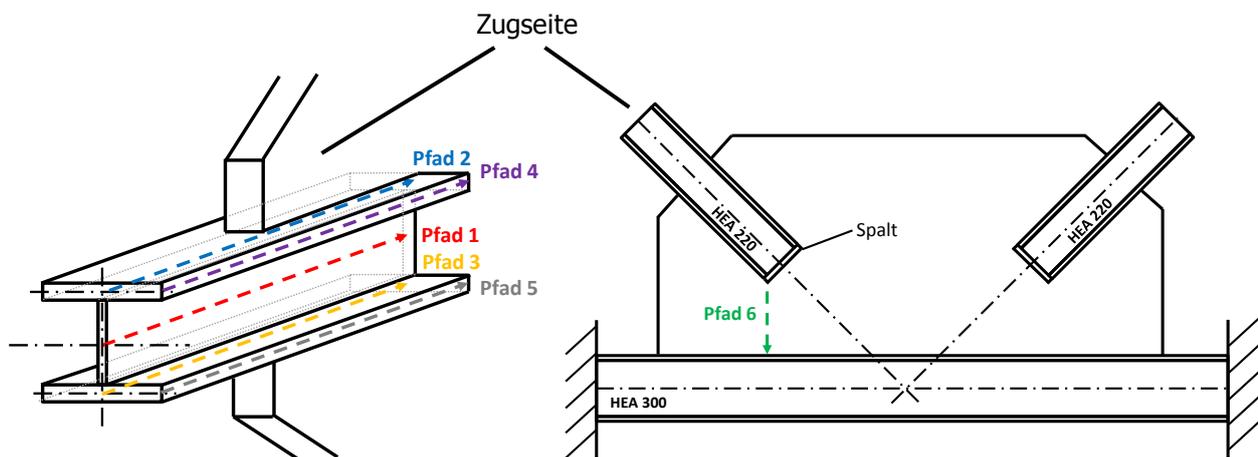


Abbildung A.31 – Auszuwertende Pfade des Strebenfachwerkanschlusses [2]

A - 4.4.1 Normalspannungsverlauf im Pfad 1

In Abbildung A.32 ist die Normalspannungsverteilung im Mittelschnitt des Steges der Zugdiagonale aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [2] und eigenen FE-Ergebnissen. Zudem ist die rechnerisch konstante „wahre“ Spannung (siehe Abschnitt A - 4.2) außerhalb des Knotenblechs dargestellt. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenblechs und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

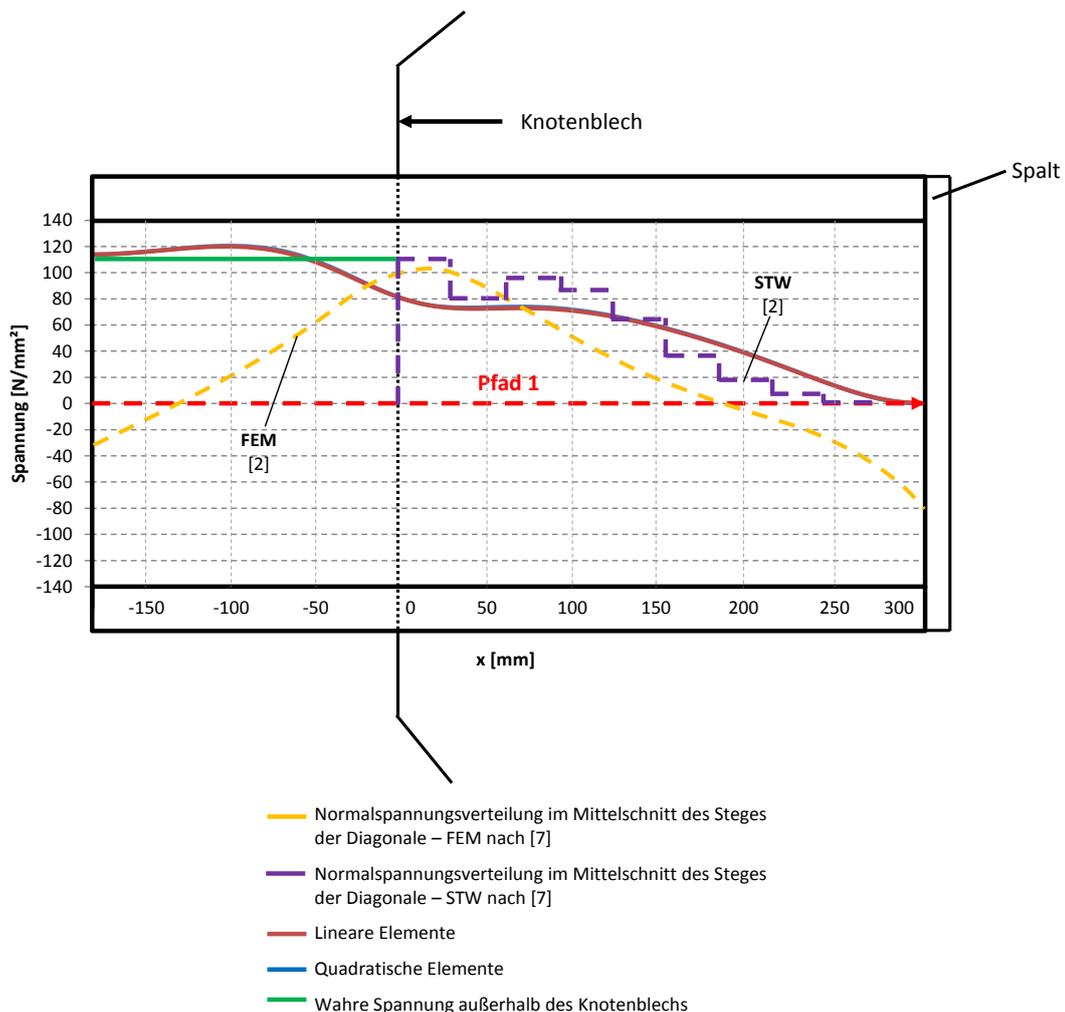
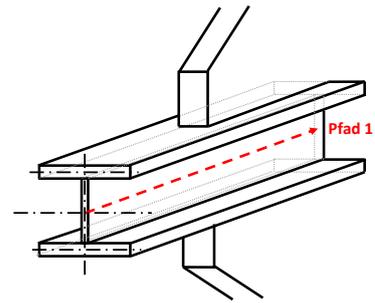


Abbildung A.32 – Strebenfachwerkanschluss [2] - Normalspannungsverlauf im Pfad 1

Es zeigt sich innerhalb des Knotenbleches eine Übereinstimmung der Verlaufstendenz der Ergebnisse. Allerdings kann die Druckbeanspruchung am Ende des Steges der FEM-Berechnung aus [2] nicht erklärt werden. Auch eine Begründung für die FEM-Spannungsverteilung außerhalb des Knotenbleches nach [2] (Druckspannung in der Zugdiagonale im Mittelschnitt Steges) auf der Zugseite wurde nicht gefunden. Die Ergebnisse der eigenen Berechnungen, einerseits mit Elementen mit linearem Lösungsansatz und andererseits mit quadratischem Ansatz sind nahezu ident. Während zu Beginn des Pfades die eigene FE-Lösung gleich der wahren Spannung ist, entzieht sich die Stegmittelfaser dem Knotenblech nähernd nach einem kurzen Anstieg bereits vor der Einbindung in das Knotenblech der Spannung. Zum Knotenblechspalt wird die Normalspannung erwartungsgemäß zu 0 abgebaut.

A - 4.4.2 Normalspannungsverlauf im Pfad 2

In Abbildung A.33 ist die Normalspannungsverteilung im Mittelschnitt des Obergurtes der Zugdiagonale aufgetragen. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenbleches und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

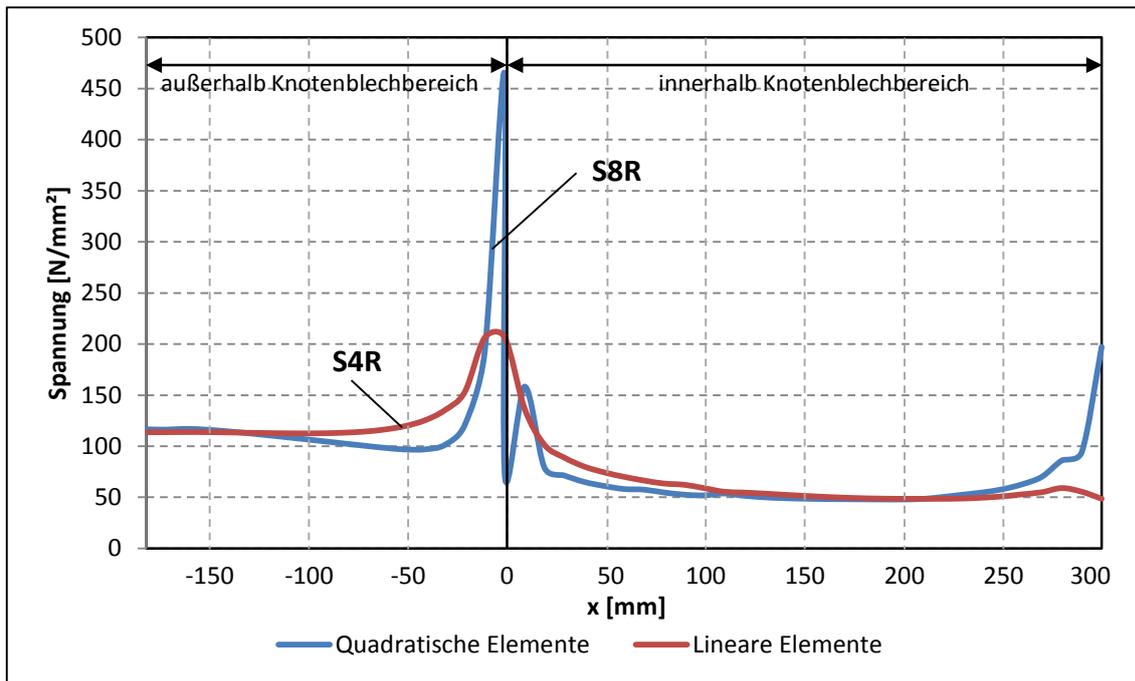
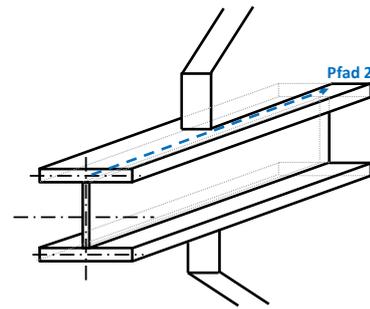


Abbildung A.33 – Strebenfachwerkanschluss - Normalspannungsverlauf im Pfad 2

Die FE-Rechnung mit S8R-Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion bildet am Einbindepunkt ($x = 0\text{mm}$) eine wesentlich höhere Spannungsspitze als die Rechnung mit S4R-Elementen ab. Dieser singuläre Punkt mit theoretisch unendlich hoher Spannung entsteht aufgrund der Modellierung mit einer scharfen Kante zwischen Zugstrebe und Knotenblech. In der praktischen Fertigung würde hier der Wulst der Schweißnaht bestehen. Daher müssen die berechneten Maximalwerte der Spannungsspitze an dieser Stelle besonders bewertet werden. Der Effekt der Singularität ist auch am Ende der Einbindelänge zu erkennen.

Außerhalb des Knotenblechbereiches verlaufen die Normalspannungen annähernd konstant auf Niveau der mit Hand berechneten Spannung von $113,8\text{ N/mm}^2$. Innerhalb des Knotenblechbereiches fällt die Spannung und nähert sich mit zunehmender Einbindelänge einem konstanten Wert von ungefähr 50 N/mm^2 .

A - 4.4.3 Normalspannungsverlauf im Pfad 3

In Abbildung A.34 ist die Normalspannungsverteilung im Mittelschnitt des Untergurtes der Zugdiagonale aufgetragen. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenbleches und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

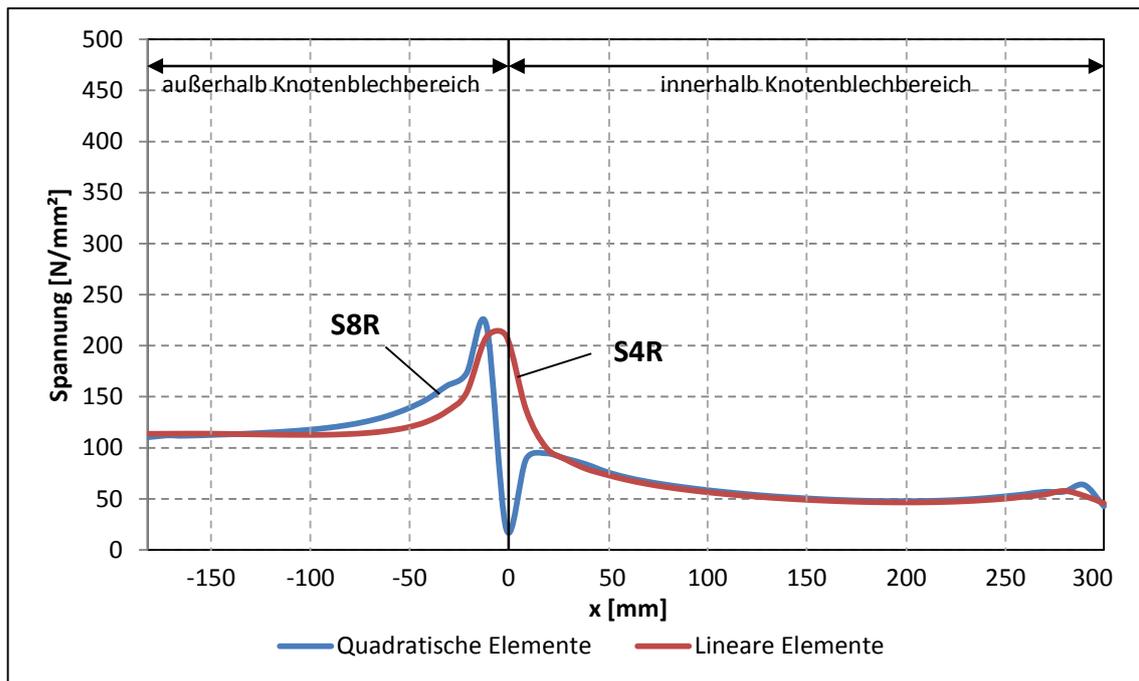
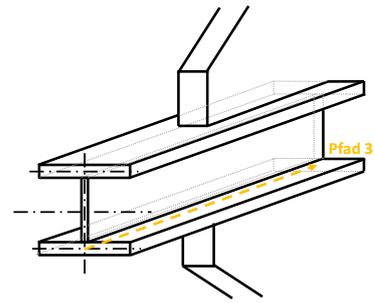


Abbildung A.34 – Strebenfachwerkanschluss - Normalspannungsverlauf im Pfad 3

Wie auch entlang des zweiten Pfades im Mittelschnitt des Obergurtes der Zugdiagonale gibt es Differenzen der Spannungswerte am Einbindepunkt ($x = 0\text{mm}$) aufgrund der auftretenden Singularität an dieser Stelle. Im übrigen Bereich können die berechneten Ergebnisse mit S8R bzw. S4R-Elementen als äquivalent angesehen werden.

Des Weiteren ist im Vergleich mit Abbildung A.33 die Gleichheit der Spannungswerte im Pfad 2 und Pfad 3, vor allem für die S4R-Elemente mit linearer Lösungsfunktion, zu erkennen.

A - 4.4.4 Normalspannungsverlauf im Pfad 4

In Abbildung A.35 ist die Normalspannungsverteilung an der Außenkante des Obergurtes der Zugdiagonale aufgetragen. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenbleches und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

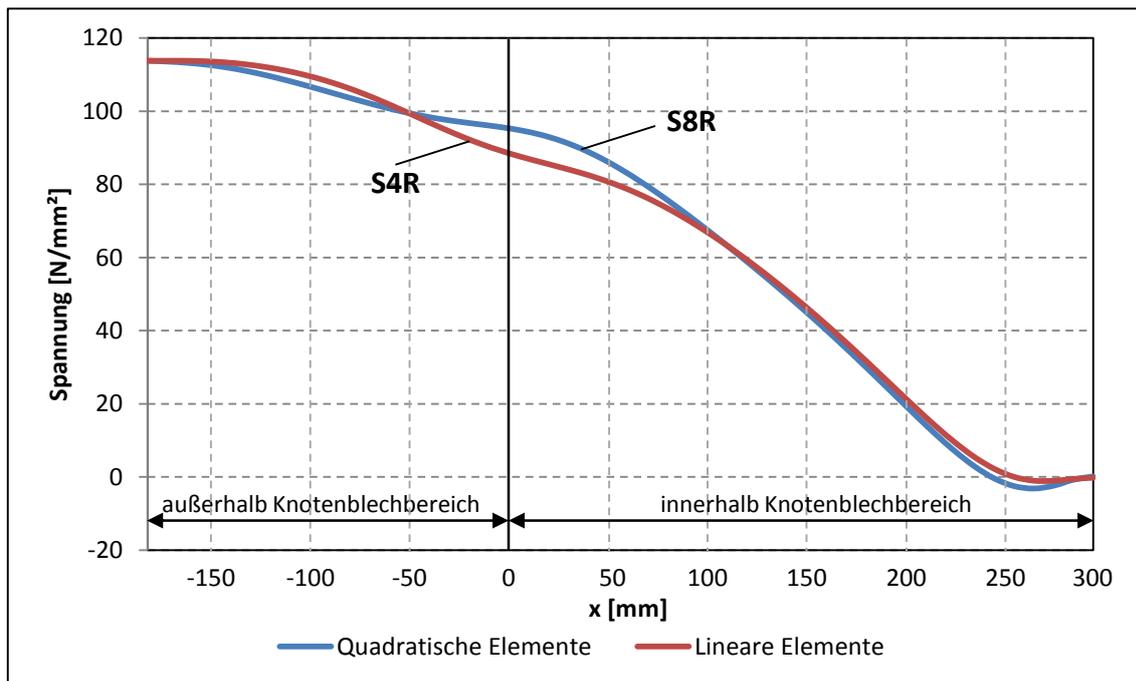
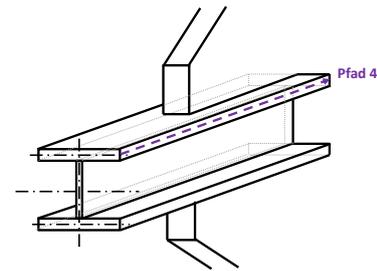


Abbildung A.35 – Strebenfachwerkanschluss - Normalspannungsverlauf im Pfad 4

Auch an der Außenkante des Obergurtes der Zugdiagonale können Abweichungen als Ausläufer der Singularität am Einbindepunkt ($x = 0\text{mm}$) der Strebe in das Knotenblech zwischen linearen und quadratischen Elementen festgestellt werden. Der restliche Verlauf zeigt nahezu identische Ergebnisse der Elementtypen.

Bereits vor dem Einbindepunkt ($x = 0\text{mm}$) vermindert sich die Spannung in der Außenkante und lagert sich zu dem steiferen Bereich des Anschlusses Flansch-Knotenblech um. Zu beobachten ist, wie sich mit zunehmender x -Koordinate zum Strebenende hin die Normalspannung der Gurtaußenkante zu 0 entwickelt.

A - 4.4.5 Normalspannungsverlauf im Pfad 5

In Abbildung A.36 ist die Normalspannungsverteilung an der Außenkante des Untergurtes der Zugdiagonale aufgetragen. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenbleches und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

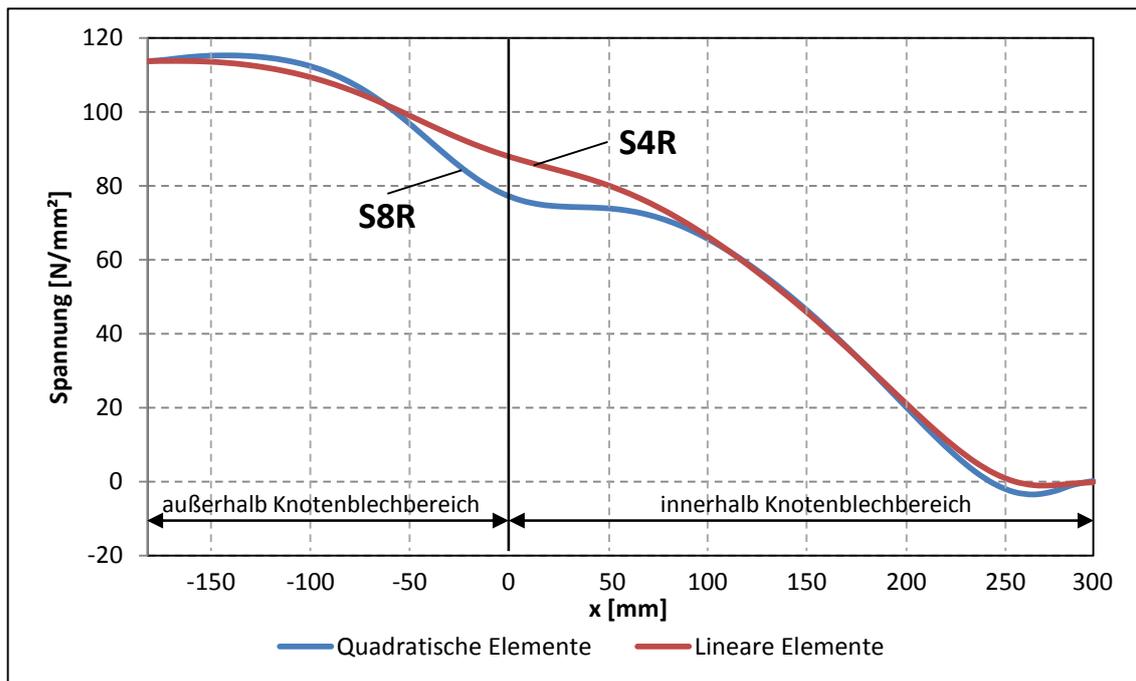
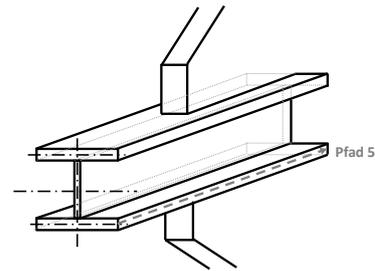


Abbildung A.36 – Strebenfachwerkanschluss - Normalspannungsverlauf im Pfad 5

Für die Normalspannungsverteilung in der Außenkante des Untergurtes der Zugdiagonale gilt das gleiche wie für Pfad 4 (Außenkante des Obergurtes der Zugdiagonale) in der Abbildung A.35.

Die Spannungswerte im Pfad 4 und Pfad 5 gleichen sich vor allem für die S4R-Elemente mit linearer Lösungsfunktion. Bei der Berechnung mit S8R-Elementen gibt es allerdings Unterschiede der Ergebnisse im Einbindebereich ($x = 0\text{mm}$) der Diagonale. Während im vierten Pfad die Werte über jenen der S4R-Elemente liegen, ist ihr Verlauf im fünften Pfad darunter, was auf einen gewissen unvermeidbaren Biegeeinfluss zurückzuführen ist.

A - 4.4.6 Normalspannungsverlauf im Pfad 6

In Abbildung A.37 ist die Normalspannungsverteilung im Schnitt zwischen untersten Punkt der Knotenblechtasche und Gurtoberkante aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [2] und eigenen FE-Ergebnissen.

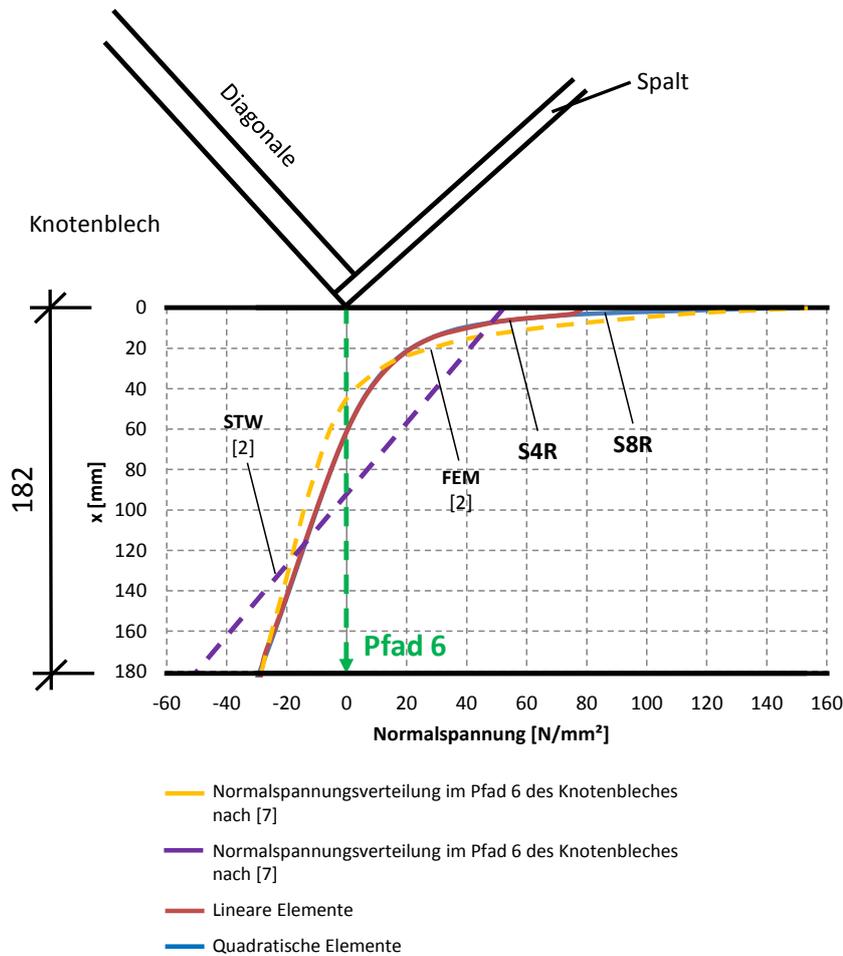
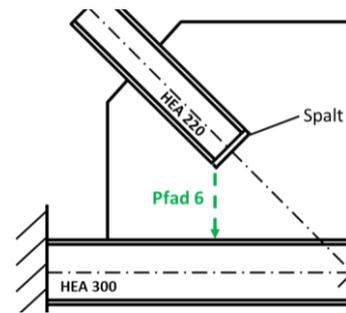


Abbildung A.37 – Strebenfachwerkanschluss - Normalspannungsverlauf im Pfad 6

Es zeigt sich entlang des vertikalen Pfades innerhalb des Knotenbleches eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus [2] und den eigenen FE-Ergebnissen. Auch das Stabwerkmodell nach [2] liefert für Überslagsrechnungen brauchbare Resultate. Die Ergebnisse der Berechnungen, einerseits mit Elementen mit linearem Lösungsansatz und andererseits mit quadratischem Ansatz sind nahezu deckungsgleich. Am Beginn des Pfades (unterster Punkt der Tasche im Knotenblech) ist die Spannungssitze des singulären Punktes zu erkennen.

A - 4.4.7 Schubspannungsverlauf im Pfad 6

In
Abbildung A.38 ist die Schubspannungsverteilung im Schnitt zwischen untersten Punkt der Knotenblechtasche und Gurtoberkante aufgetragen. Unterschieden wird zwischen Werten aus [2] und eigenen FE-Ergebnissen.

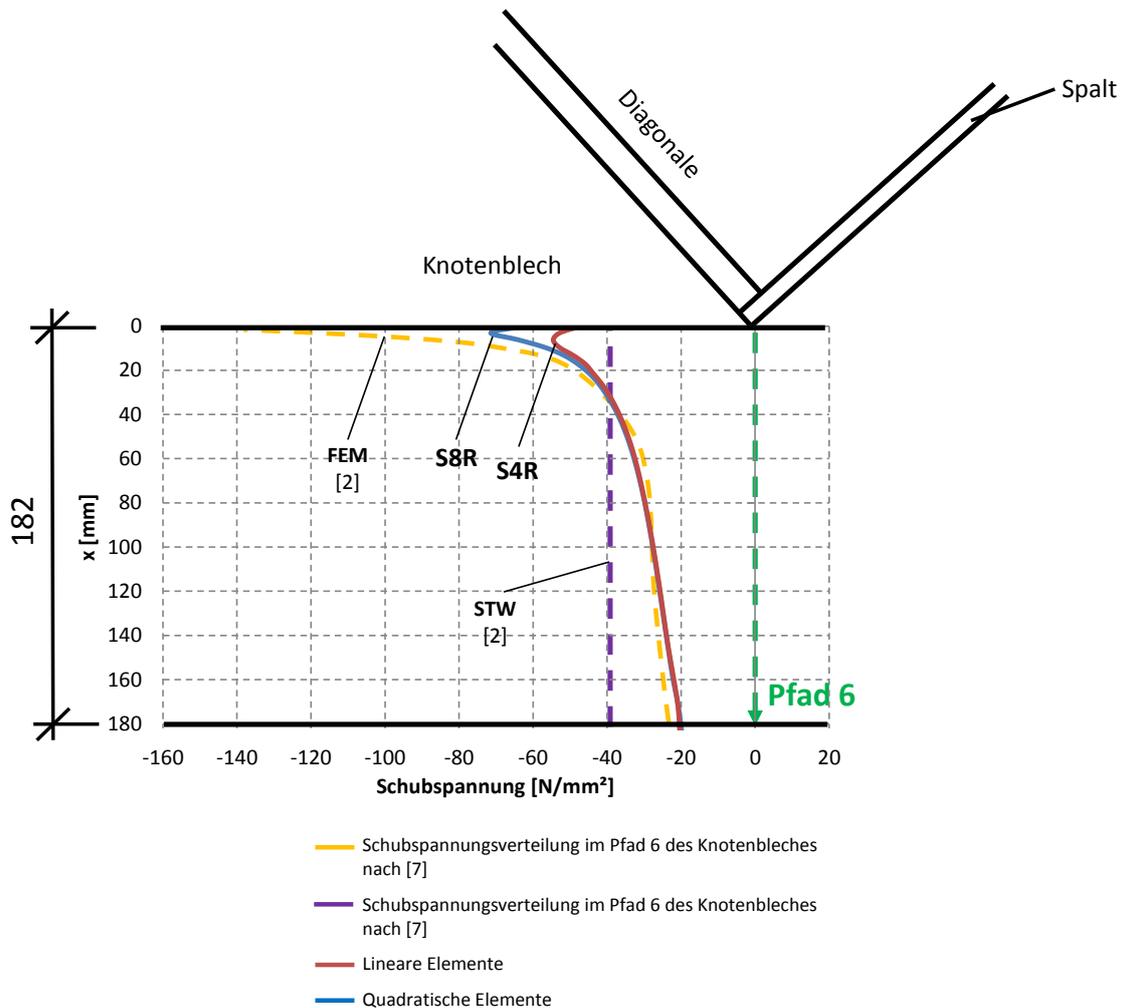
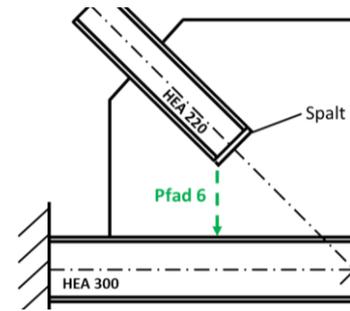


Abbildung A.38 – Strebenfachwerkanschluss - Schubspannungsverlauf im Pfad 6

Auch für den Schubspannungsverlauf zeigt sich eine gute Übereinstimmung der FE-Werte von [2] und den eigenen FE-Ergebnissen. Auch das Stabwerkmodell nach [2] liefert für Überslagsrechnungen brauchbare Ergebnisse. Die Resultate der Berechnungen, einerseits mit Elementen mit linearem Lösungsansatz und andererseits mit quadratischem Ansatz sind, ausgenommen im Bereich der Singularitätsstörung, ident.

A - 4.4.8 Vergleich der Pfade 1, 3 und 5

In Abbildung A.39 sind die Normalspannungsverteilungen im Mittelschnitt des Diagonalensteges (Pfad 1), im Mittelschnitt des Untergurtes (Pfad 3) und in der Außenkante des Untergurtes (Pfad 5) der Zugdiagonale einander gegenübergestellt. Der Pfad beginnt in einer Entfernung von 175mm außerhalb des Knotenblechs und endet mit der Einbindelänge des Profils in das Knotenblech bei 300mm. Der Koordinatenursprung wurde am Beginn des Knotenblechs festgelegt.

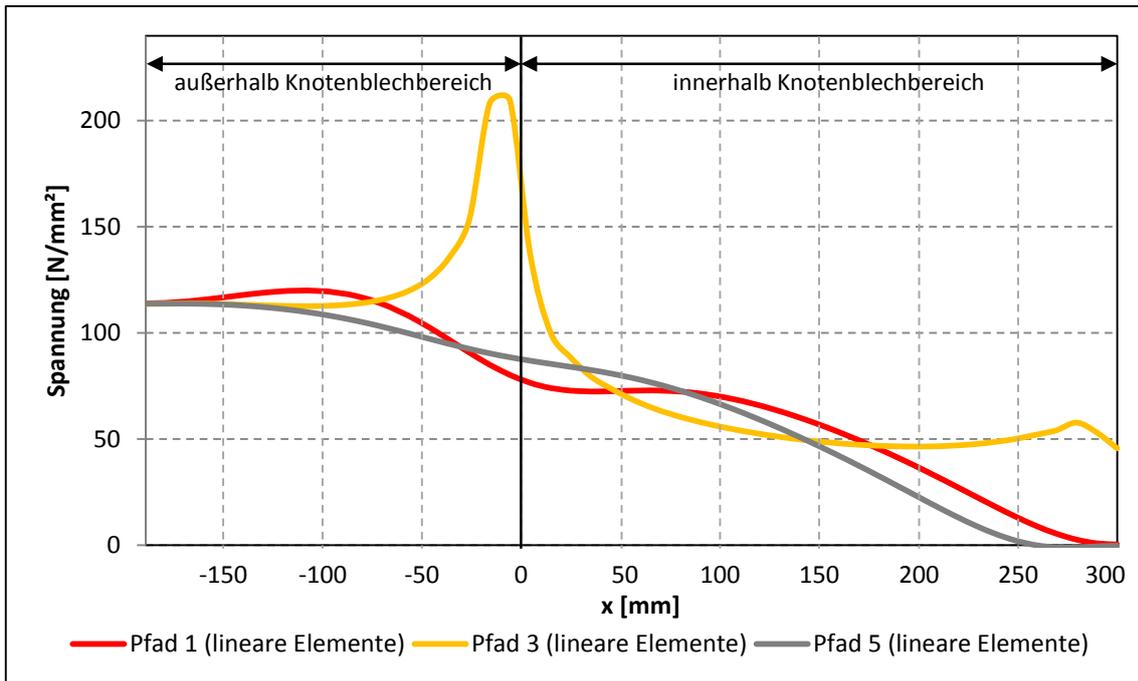
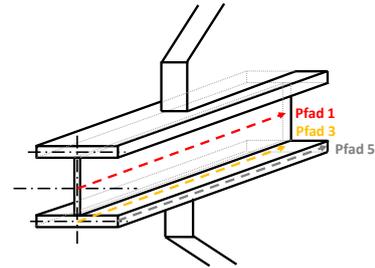


Abbildung A.39 – Strebenfachwerkanschluss – Vergleich der Normalspannungsverläufe in den Pfaden 1, 3 und 5

Der Vergleich der Verläufe von Pfad 1 (Mittelschnitt des Diagonalensteges) und 5 (Außenkante des Untergurtes) lässt einen ähnlichen Spannungsabbau in den beiden Schnitten erkennen. Als Gegenstück dazu zeigt der Pfad 3 (Mittelschnitt des Untergurtes) einen singulären Punkt an der Einbindestelle der Strebe in das Knotenblech ($x = 0\text{mm}$) und eine nahezu konstant auslaufende Normalspannung in der Nahtstelle von Flansch und Knotenblech.

Anhang B Parameterstudie basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau

B - 1 Aufnahme der Daten und Abmessungen

Anhand der von der Fa. Haslinger Stahlbau zur Verfügung gestellten Konstruktionsplänen von bereits ausgeführten Fachwerkträgern (BMW AG Dingolfing – Werk 02.40-Geb. 34.0 TKB West, BMW AG Leipzig – Werk 07.10 Loslager Süd und BMW AG Leipzig Werk 07.10 Gebäude 020.2: 2 Erweiterung Presswerk) wurde eine Tabelle aller Fachwerkknotenparameter erstellt, in welcher unter anderem die wichtigsten Knoten- und Diagonalstrebenabmessungen aufgenommen wurden. Kennzeichnend sind vor allem Längen wie die Systemlänge L^* , die Längen L_{ges} und L_1 , die Diagonalenlänge L_0 , die Einbindelänge l_d , der Diagonalenwinkel α , die Knotenblechdicke t_1 und die Profildimensionen (ausgeführt wurden IPE, HEA und HEB – Profile) von Druck- und Zugstrebe bzw. des Untergurtes.

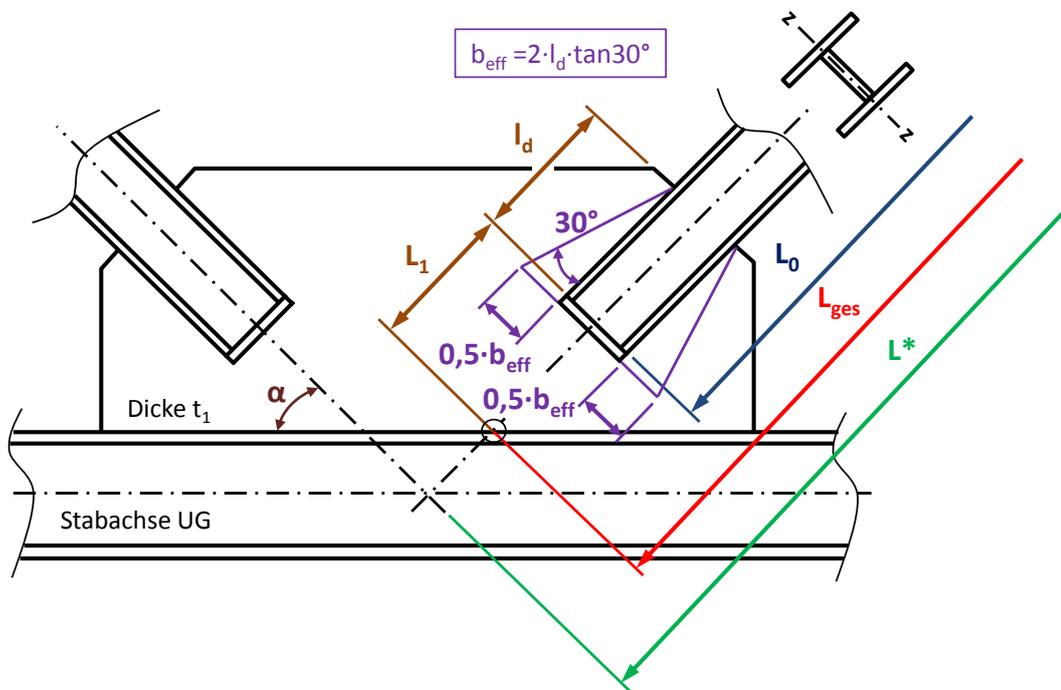


Abbildung B.1 – Definition der Bezeichnungen

Entgegen den tatsächlich ausgeführten Beispielen mit verschiedenen Materialkombinationen (z.B. Knotenblech S355 und Profile S235) wurden bei der Parameterstudie sämtliche Bauteile als S355 angenommen und in weiterer Folge berechnet.

Zusätzlich zu den Ausführungsbeispielen der Fa. Haslinger wurde ein weiterer Strebenfachwerkanschluss aus der Literatur nach [2] aufgenommen. Aufgrund der dort fehlenden Angaben zur den Längen der Streben (in [2] ist nur das Knotendetail als solches behandelt worden) wurden hier zwei Schlankheitsgruppen mit $\bar{\lambda}_{z,0} = 0,7$ und $1,0$ (bezogen auf die Länge L_{ges}) definiert und in die Parameterstudie integriert.

Die nachfolgenden Tabellen B.1 bis B.5 zeigen alle Parameter der aufgenommenen Knoten, sowohl jene der Fa. Haslinger Stahlbau als auch jenen aus [2].

Projekt: Fa. Haslinger - BMW AG - Werk Dingolfing West												
lfd. Nr.	Material	f_y [N/mm ²]	Profil	Knick- linie	l_{ges} [mm]	L^* [mm]	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	A [cm ²]	$\bar{\lambda}_{z,0}$ [l]	$L_{1,unten}$ [mm]	$L_{1,oben}$ [mm]	l_0 [mm]
1	S355	355	HEB 300	c	3648	4303	8560,0	149,0	0,630	278	258	3112
2	S355	355	HEB 340	c	3648	4303	9690,0	171,0	0,634	307	291	3049
3	S355	355	HEA 200	c	3648	4303	1340,0	53,8	0,957	200	220	3228
4	S355	355	HEA 200	c	3648	4303	1340,0	53,8	0,957	200	220	3228
5	S355	355	HEB 340	c	3648	4303	9690,0	171,0	0,634	307	291	3049
6	S355	355	HEB 300	c	3648	4303	8560,0	149,0	0,630	274	278	2795
7	S355	355	HEB 300	c	3648	4303	8560,0	149,0	0,630	278	258	3112
8	S355	355	HEB 340	c	3648	4303	9690,0	171,0	0,634	299	299	3049
9	S355	355	HEA 200	c	3648	4303	1340,0	53,8	0,957	200	220	3228
10	S355	355	HEA 200	c	3648	4303	1340,0	53,8	0,957	200	220	3228
11	S355	355	HEB 340	c	3648	4303	9690,0	171,0	0,634	299	299	3049
12	S355	355	HEB 300	c	3648	4303	8560,0	149,0	0,630	274	235	3139
13	S355	355	HEA 120	c	4085	4358	231,0	25,3	1,769	155	371	3559
14	S355	355	HEA 200	c	4202	4468	1340,0	53,8	1,102	196	196	3811
15	S355	355	HEA 140	c	4202	4468	389,0	31,4	1,562	152	157	3892
16	S355	355	HEA 140	c	4320	4581	389,0	31,4	1,606	156	156	4008
17	S355	355	HEA 120	c	4085	4358	231,0	25,3	1,769	155	96	3834
18	S355	355	HEA 200	c	4202	4468	1340,0	53,8	1,102	196	191	3816
19	S355	355	HEA 140	c	4202	4468	389,0	31,4	1,562	143	155	3904
20	S355	355	HEA 140	c	4320	4581	389,0	31,4	1,606	169	150	4001
21	S355	355	HEA 140	c	4320	4581	389,0	31,4	1,606	156	156	4008
22	S355	235	HEA 140	c	4202	4468	389,0	31,4	1,271	153	153	3896
23	S355	355	HEA 200	c	4202	4468	1340,0	53,8	1,102	196	191	3816
24	S355	355	HEA 120	c	4085	4358	231,0	25,3	1,769	155	96	3834
25	S355	355	HEA 140	c	4270	4558	389,0	31,4	1,588	153	153	3965
26	S355	355	HEA 140	c	4159	4454	389,0	31,4	1,546	153	153	3854
27	S355	355	HEA 200	c	4159	4454	1340,0	53,8	1,091	189	198	3772
28	S355	355	HEA 140	c	4042	4344	389,0	31,4	1,503	166	435	3441
29	S355	355	HEA 140	c	4270	4558	389,0	31,4	1,588	153	153	3965
30	S355	355	HEA 140	c	4159	4454	389,0	31,4	1,546	153	153	3854
31	S355	355	HEA 200	c	4159	4454	1340,0	53,8	1,091	189	198	3772
32	S355	355	HEA 140	c	4042	4344	389,0	31,4	1,503	166	367	3509
33	S355	355	HEA 140	c	4042	4344	389,0	31,4	1,503	166	435	3441
34	S355	355	HEA 200	c	4159	4454	1340,0	53,8	1,091	189	198	3772
35	S355	355	HEA 140	c	4159	4454	389,0	31,4	1,546	153	153	3854
36	S355	355	HEA 140	c	4270	4558	389,0	31,4	1,588	153	153	3965
37	S355	355	HEA 240	c	3872	4372	2770,0	76,8	0,844	241	216	3415
38	S355	355	HEB 320	c	3872	4372	9240,0	161,0	0,669	285	289	3298
39	S355	355	HEA 180	c	3872	4372	925,0	45,3	1,121	173	224	3475
40	S355	355	HEA 180	c	3872	4372	925,0	45,3	1,121	173	224	3475
41	S355	355	HEB 320	c	3872	4372	9240,0	161,0	0,669	285	289	3298
42	S355	355	HEA 240	c	3710	4372	2770,0	76,8	0,808	239	214	3257

Tabelle B.1 – Daten und Abmessungen: Projekt: BMW AG - Werk Dingolfing West – Teil 1

Projekt: Fa. Haslinger - BMW AG - Werk Dingolfing West														
lfd. Nr.	$l_{d,unten}$ [mm]	$l_{d,oben}$ [mm]	$b_{eff,unten}$ [mm]	$b_{eff,oben}$ [mm]	$t_{1,unten}$ [mm]	$t_{1,oben}$ [mm]	$l_{1,unten}/l_{ges}$ [/]	$l_{1,oben}/l_{ges}$ [/]	$l_{1,mittel}/l_{ges}$ [/]	$J_{1,unten}$ [cm ⁴]	$J_{1,oben}$ [cm ⁴]	$J_{1,unten}/J_{z,0}$ [/]	$J_{1,oben}/J_{z,0}$ [/]	$J_{1,mittel}/J_{z,0}$ [/]
1	370	400	427	462	45	25	0,076	0,071	0,074	324,4	60,1	0,038	0,007	0,022
2	360	360	416	416	45	45	0,084	0,080	0,082	315,7	315,7	0,033	0,033	0,033
3	190	200	219	231	25	45	0,055	0,060	0,057	28,6	175,4	0,021	0,131	0,076
4	190	200	219	231	25	45	0,055	0,060	0,057	28,6	175,4	0,021	0,131	0,076
5	360	360	416	416	45	25	0,084	0,080	0,082	315,7	315,7	0,033	0,033	0,033
6	370	300	427	346	45	25	0,075	0,158	0,117	324,4	45,1	0,038	0,005	0,022
7	370	400	427	462	45	25	0,076	0,071	0,074	324,4	60,1	0,038	0,007	0,022
8	360	360	416	416	45	45	0,082	0,082	0,082	315,7	315,7	0,033	0,033	0,033
9	190	200	219	231	25	45	0,055	0,060	0,057	28,6	175,4	0,021	0,131	0,076
10	190	200	219	231	25	45	0,055	0,060	0,057	28,6	175,4	0,021	0,131	0,076
11	360	360	416	416	45	45	0,082	0,082	0,082	315,7	315,7	0,033	0,033	0,033
12	370	300	427	346	45	25	0,075	0,064	0,070	324,4	45,1	0,038	0,005	0,022
13	190	190	219	219	25	30	0,038	0,091	0,064	28,6	49,4	0,124	0,214	0,169
14	250	230	289	266	25	25	0,047	0,047	0,047	37,6	34,6	0,028	0,026	0,027
15	140	140	162	162	20	25	0,036	0,037	0,037	10,8	21,0	0,028	0,054	0,041
16	140	140	162	162	20	20	0,036	0,036	0,036	10,8	10,8	0,028	0,028	0,028
17	190	190	219	219	25	25	0,038	0,023	0,031	28,6	28,6	0,124	0,124	0,124
18	250	190	289	219	25	15	0,047	0,045	0,046	37,6	6,2	0,028	0,005	0,016
19	140	140	162	162	12	15	0,034	0,037	0,035	2,3	4,5	0,006	0,012	0,009
20	140	140	162	162	12	12	0,039	0,035	0,037	2,3	2,3	0,006	0,006	0,006
21	140	140	162	162	12	12	0,036	0,036	0,036	2,3	2,3	0,006	0,006	0,006
22	140	140	162	162	12	15	0,036	0,036	0,036	2,3	4,5	0,006	0,012	0,009
23	190	250	219	289	25	15	0,047	0,045	0,046	28,6	8,1	0,021	0,006	0,014
24	190	190	219	219	25	25	0,038	0,023	0,031	28,6	28,6	0,124	0,124	0,124
25	140	140	162	162	20	20	0,036	0,036	0,036	10,8	10,8	0,028	0,028	0,028
26	140	140	162	162	20	25	0,037	0,037	0,037	10,8	21,0	0,028	0,054	0,041
27	250	230	289	266	25	25	0,045	0,048	0,047	37,6	34,6	0,028	0,026	0,027
28	215	215	248	248	25	25	0,041	0,108	0,074	32,3	32,3	0,083	0,083	0,083
29	140	140	162	162	20	20	0,036	0,036	0,036	10,8	10,8	0,028	0,028	0,028
30	140	140	162	162	20	20	0,037	0,037	0,037	10,8	10,8	0,028	0,054	0,041
31	250	230	289	266	25	25	0,045	0,048	0,047	37,6	34,6	0,028	0,026	0,027
32	215	215	248	248	25	35	0,041	0,091	0,066	32,3	88,7	0,083	0,228	0,156
33	215	215	248	248	25	25	0,041	0,108	0,074	32,3	32,3	0,083	0,083	0,083
34	250	230	289	266	25	25	0,045	0,048	0,047	37,6	34,6	0,028	0,026	0,027
35	140	140	162	162	20	25	0,037	0,037	0,037	10,8	21,0	0,028	0,054	0,041
36	140	140	162	162	20	20	0,036	0,036	0,036	10,8	10,8	0,028	0,028	0,028
37	340	340	393	393	50	25	0,062	0,056	0,059	409,0	51,1	0,148	0,018	0,083
38	320	320	370	370	50	50	0,074	0,075	0,075	384,9	384,9	0,042	0,042	0,042
39	190	180	219	208	25	50	0,045	0,058	0,051	28,6	216,5	0,031	0,234	0,132
40	190	180	219	208	25	50	0,045	0,058	0,051	28,6	216,5	0,031	0,234	0,132
41	320	320	370	370	50	50	0,074	0,075	0,074	384,9	384,9	0,042	0,042	0,042
42	340	340	393	393	50	25	0,064	0,058	0,061	409,0	51,1	0,148	0,018	0,083

Tabelle B.2 – Daten und Abmessungen: Projekt: BMW AG - Werk Dingolfing West – Teil 2

Projekt: Fa. Haslinger - BMW AG - Werk Leipzig Loslager Süd / Presswerk

lfd. Nr.	Material	f_y [N/mm ²]	Profil	Knick- linie	l_{ges} [mm]	L^* [mm]	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	A [cm ²]	$\bar{\lambda}_{z,0}$ [l]	$L_{1,unten}$ [mm]	$L_{1,oben}$ [mm]	L_0 [mm]
43	S355	355	HEA 120	c	4309	4590	231,0	25,3	1,866	163	162	3984
44	S355	355	IPE 120	b	4171	4445	27,7	13,2	3,768	158	160	3853
45	S355	355	HEA 160	c	4177	4466	616,0	38,8	1,372	187	187	3802
46	S355	355	HEA 120	c	4041	4322	231,0	25,3	1,750	161	298	3582
47	S355	355	HEA 200	c	4085	4423	1340,0	53,8	1,071	197	485	3404
48	S355	355	HEB 240	c	4085	4423	3920,0	106,0	0,879	222	216	3647
49	S355	355	HEA 140	c	4085	4423	389,0	31,4	1,519	161	322	3602
50	S355	355	HEA 140	c	4085	4423	389,0	31,4	1,519	161	322	3602
51	S355	355	HEB 240	c	4085	4423	3920,0	106,0	0,879	222	216	3647
52	S355	355	HEA 200	c	4085	4423	1340,0	53,8	1,071	197	485	3404
53	S355	355	HEA 120	c	3816	4065	231,0	25,3	1,653	156	200	3460
54	S355	355	HEA 120	c	3756	4007	231,0	25,3	1,627	158	159	3439
55	S355	355	HEA 160	c	3745	3996	616,0	38,8	1,230	170	170	3405
56	S355	355	HEA 160	c	3677	3930	616,0	38,8	1,208	172	172	3332
57	S355	355	HEA 180	c	3581	3834	925,0	45,3	1,037	172	172	3236
58	S355	355	HEA 180	c	3599	3854	925,0	45,3	1,042	181	181	3236
59	S355	355	HEA 200	c	3586	3841	1340,0	53,8	0,940	188	188	3210
60	S355	355	HEA 140	c	3228	3464	389,0	31,4	1,200	149	336	2743
61	S355	355	HEA 120	c	5146	5497	231,0	25,3	2,229	195	195	4756
62	S355	355	HEA 120	c	5146	5497	231,0	25,3	2,229	195	195	4756
63	S355	355	HEA 100	c	5048	5406	134,0	21,2	2,628	191	191	4666
64	S355	355	HEA 180	c	5037	5400	925,0	45,3	1,459	249	258	4530
65	S355	355	HEA 160	c	4934	5301	616,0	38,8	1,621	241	380	4313

Tabelle B.3 – Daten und Abmessungen: Projekt: Werk Leipzig Loslager Süd / Presswerk – Teil 1

Projekt: Fa. Haslinger - BMW AG - Werk Leipzig Loslager Süd / Presswerk

lfd. Nr.	$l_{d,unten}$ [mm]	$l_{d,oben}$ [mm]	$b_{eff,unten}$ [mm]	$b_{eff,oben}$ [mm]	$t_{1,unten}$ [mm]	$t_{1,oben}$ [mm]	$L_{1,unten}/L_{ges}$ [/]	$L_{1,oben}/L_{ges}$ [/]	$L_{1,mittel}/L_{ges}$ [/]	$J_{1,unten}$ [cm ⁴]	$J_{1,oben}$ [cm ⁴]	$J_{1,unten}/J_{2,0}$ [/]	$J_{1,oben}/J_{2,0}$ [/]	$J_{1,mittel}/J_{2,0}$ [/]
43	140	140	162	162	20	20	0,038	0,038	0,038	10,8	10,8	0,047	0,047	0,047
44	140	140	162	162	20	25	0,038	0,038	0,038	10,8	21,0	0,389	0,760	0,574
45	180	180	208	208	30	25	0,045	0,045	0,045	46,8	27,1	0,076	0,044	0,060
46	160	160	185	185	30	35	0,040	0,074	0,057	41,6	66,0	0,180	0,286	0,233
47	260	260	300	300	30	30	0,048	0,119	0,083	67,5	67,5	0,050	0,050	0,050
48	320	320	370	370	30	25	0,054	0,053	0,054	83,1	48,1	0,021	0,012	0,017
49	160	160	185	185	20	25	0,039	0,079	0,059	12,3	24,1	0,032	0,062	0,047
50	160	160	185	185	20	25	0,039	0,079	0,059	12,3	24,1	0,032	0,062	0,047
51	320	320	370	370	30	25	0,054	0,053	0,054	83,1	48,1	0,021	0,012	0,017
52	260	260	300	300	30	30	0,048	0,119	0,083	67,5	67,5	0,050	0,050	0,050
53	150	150	173	173	20	20	0,041	0,052	0,047	11,5	11,5	0,050	0,050	0,050
54	150	150	173	173	20	20	0,042	0,042	0,042	11,5	11,5	0,050	0,050	0,050
55	210	210	242	242	20	20	0,045	0,045	0,045	16,2	16,2	0,026	0,026	0,026
56	210	210	242	242	20	20	0,047	0,047	0,047	16,2	16,2	0,026	0,026	0,026
57	230	230	266	266	25	20	0,048	0,048	0,048	34,6	17,7	0,037	0,019	0,028
58	230	230	266	266	25	30	0,050	0,050	0,050	34,6	59,8	0,037	0,065	0,051
59	250	250	289	289	35	30	0,052	0,052	0,052	103,1	65,0	0,077	0,048	0,063
60	190	190	219	219	35	35	0,046	0,104	0,075	78,4	78,4	0,202	0,202	0,202
61	130	130	150	150	25	20	0,038	0,038	0,038	19,5	10,0	0,085	0,043	0,064
62	130	130	150	150	25	20	0,038	0,038	0,038	19,5	10,0	0,085	0,043	0,064
63	130	130	150	150	25	25	0,038	0,038	0,038	19,5	19,5	0,146	0,146	0,146
64	250	250	289	289	30	25	0,049	0,051	0,050	65,0	37,6	0,070	0,041	0,055
65	230	230	266	266	30	30	0,049	0,077	0,063	59,8	59,8	0,097	0,097	0,097

Tabelle B.4 – Daten und Abmessungen: Projekt: Werk Leipzig Loslager Süd / Presswerk – Teil 2

Knotenausführung nach [7]												
Ifd. Nr.	Material	f_y [N/mm ²]	Profil	Knick- linie	l_{ges} [mm]	l^* [mm]	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	A [cm ²]	$\bar{\lambda}_{z,0}$ [l]	$L_{1,unten}$ [mm]	$L_{1,oben}$ [mm]	L_0 [mm]
66	S355	355	HEA 220	c	4208	4618	1955,0	64,3	1,000	372	372	3463
67	S355	355	HEA 220	c	2945	3355	1955,0	64,3	0,700	372	372	2201

Knotenausführung nach [7]														
Ifd. Nr.	$l_{d,unten}$ [mm]	$l_{d,oben}$ [mm]	$b_{eff,unten}$ [mm]	$b_{eff,oben}$ [mm]	$t_{1,unten}$ [mm]	$t_{1,oben}$ [mm]	$L_{1,unten}/l_{ges}$ [l]	$L_{1,oben}/l_{ges}$ [l]	$L_{1,mittel}/l_{ges}$ [l]	$J_{1,unten}$ [cm ⁴]	$J_{1,oben}$ [cm ⁴]	$J_{1,unten}/J_{z,0}$ [l]	$J_{1,oben}/J_{z,0}$ [l]	$J_{1,mittel}/J_{z,0}$ [l]
66	300	300	346	346	40	40	0,088	0,088	0,088	184,8	184,8	0,095	0,095	0,095
67	300	300	346	346	40	40	0,126	0,126	0,126	184,8	184,8	0,095	0,095	0,095

Tabelle B.5 – Daten und Abmessungen: Knotenausführung nach [2]

B - 1.1 Zusammenfassung der ausgewählten Gruppen

Anhand der aufgenommenen Daten wurden sechs Gruppen definiert. Eine kurze Zusammenfassung dieser findet sich in der nachfolgenden Tabelle B.6. Für jene Gruppen wurden in der vorliegenden Arbeit genauere Untersuchungen der Tragfähigkeit mittels Hand- bzw. FE-Rechnungen durchgeführt.

Die Gruppen 1 bis 5 basieren auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau und wurden aufgrund bestehender Ähnlichkeiten zu mehreren anderen in den Plänen vorkommenden Knotenausführungen als repräsentative Gruppen definiert. Die Gruppe 6 stammt aus der Literatur [2] und differenziert in Hinblick der Schlankheit der Streben in die Untergruppen 6a mit $\bar{\lambda}_{z,0} = 1,0$ und 6b mit $\bar{\lambda}_{z,0} = 0,7$ (bezogen auf die Länge L_{ges}).

Ausgewählte Gruppen basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau												
Gruppe	Profil Druckstrebe	Material	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	$J_{z,0}$ (ohne R) [cm ⁴]	A [cm ²]	A (ohne R) [cm ²]	L_0 [mm]	L_{ges} [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L_{ges}}$ [/]	L^* [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	
Gruppe 1	HEB 340	S355	9690	9679,3	171,0	164,6	3049	3648	0,623	4303	0,735	
Gruppe 2	HEA 140	S355	389	388,9	31,4	30,2	4008	4320	1,575	4581	1,670	
Gruppe 3	HEA 200	S355	1340	1333,7	53,8	51,1	3772	4159	1,065	4454	1,141	
Gruppe 4	HEB 320	S355	9240	9228,5	161,0	155,1	3298	3872	0,657	4372	0,742	
Gruppe 5	HEB 240	S355	3920	3918,5	106,0	102,2	3647	4085	0,864	4423	0,935	

Ausgewählte Gruppen basierend [2]												
Gruppe	Profil Druckstrebe	Material	$J_{z,0}$ [cm ⁴]	$J_{z,0}$ (ohne R) [cm ⁴]	A [cm ²]	A (ohne R) [cm ²]	L_0 [mm]	L_{ges} [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L_{ges}}$ [/]	L^* [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	
Gruppe 6a	HEA 220	S355	1955	1952,7	64,3	61,6	3463	4208	1,0	4618	1,073	
Gruppe 6b	HEA 220	S355	1955	1952,7	64,3	61,6	2201	2945	0,7	3356	0,780	

Tabelle B.6 – Ausgewählte Gruppen basierend auf Plänen der Fa. Haslinger Stahlbau und der Literatur [2]

Hinweis zur Tabelle B.6:

Da die FE-Modellierung der Profile ohne Ausrundungsradius zwischen Flansch und Steg erfolgte (siehe Kapitel B - 2: Modellierung des Knotens), sind neben den Werten der Profilfläche und dem Flächenträgheitsmoment 2. Grades aus den Profiltabellen nach [4] auch die Berechnungswerte der idealisierten Profile angegeben. Die angeführten Schlankheiten wurden mit diesen idealisierten Werten berechnet, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der FE- und der Handrechnungen zu erhalten. Sämtliche Handrechnungen wurden mit den idealisierten Werten durchgeführt.

Auf den kommenden Seiten sind jene Konstruktionspläne eingefügt, in denen ein behandelter Fachwerkknoten vorkommt. Auf der jeweiligen Folgeseite ist das Knotendetail der entsprechenden Gruppe dargestellt.

- Kapitel B - 1.1.1 - Gruppe 1 Seite 72
- Kapitel B - 1.1.2 - Gruppe 2 Seite 74
- Kapitel B - 1.1.3 - Gruppe 3 Seite 76
- Kapitel B - 1.1.4 - Gruppe 4 Seite 78
- Kapitel B - 1.1.5 - Gruppe 5 Seite 80
- Kapitel B - 1.1.6 - Gruppe 6 Seite 81 (nur Skizze des Knotendetails)

B - 1.1.1 Gruppe 1

Die Abbildung B.2 zeigt den Konstruktionsplan der Fa. Haslinger Stahlbau mit dem Fachwerkknoten der Gruppe 1.

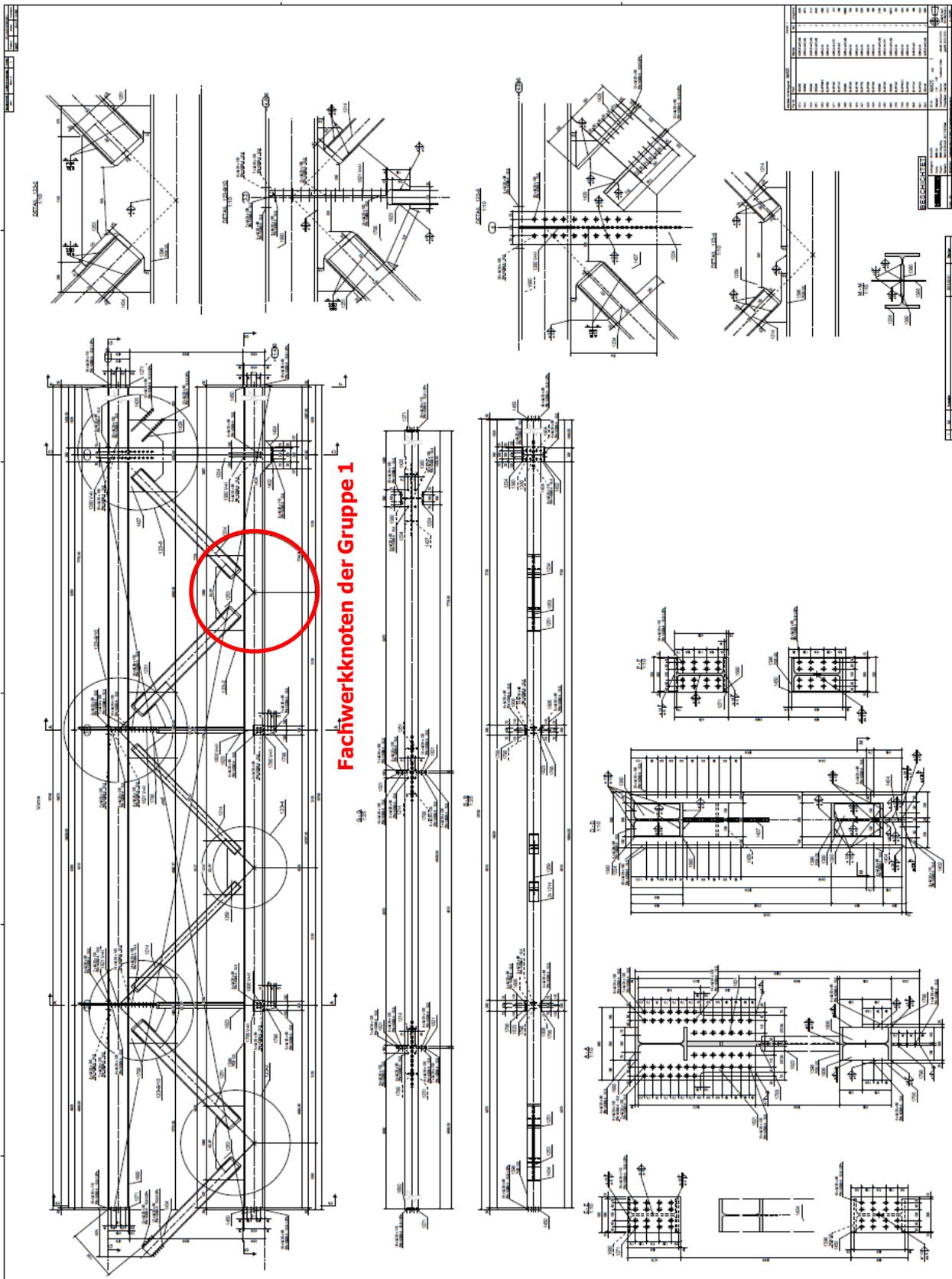


Abbildung B.2 – Plan der Gruppe 1

Detail Untergurt

Die nachfolgende Abbildung B.3 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 1. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten.

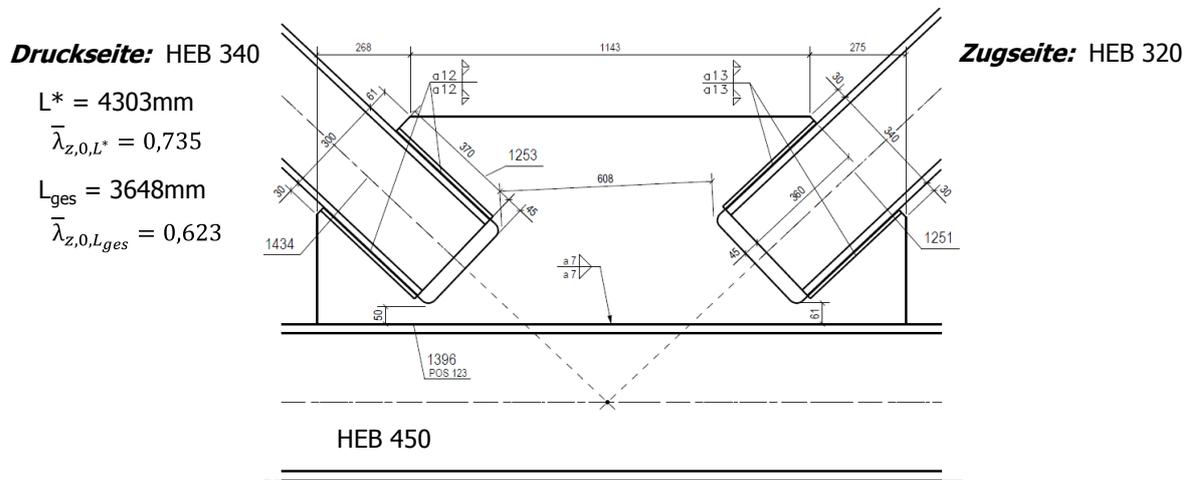
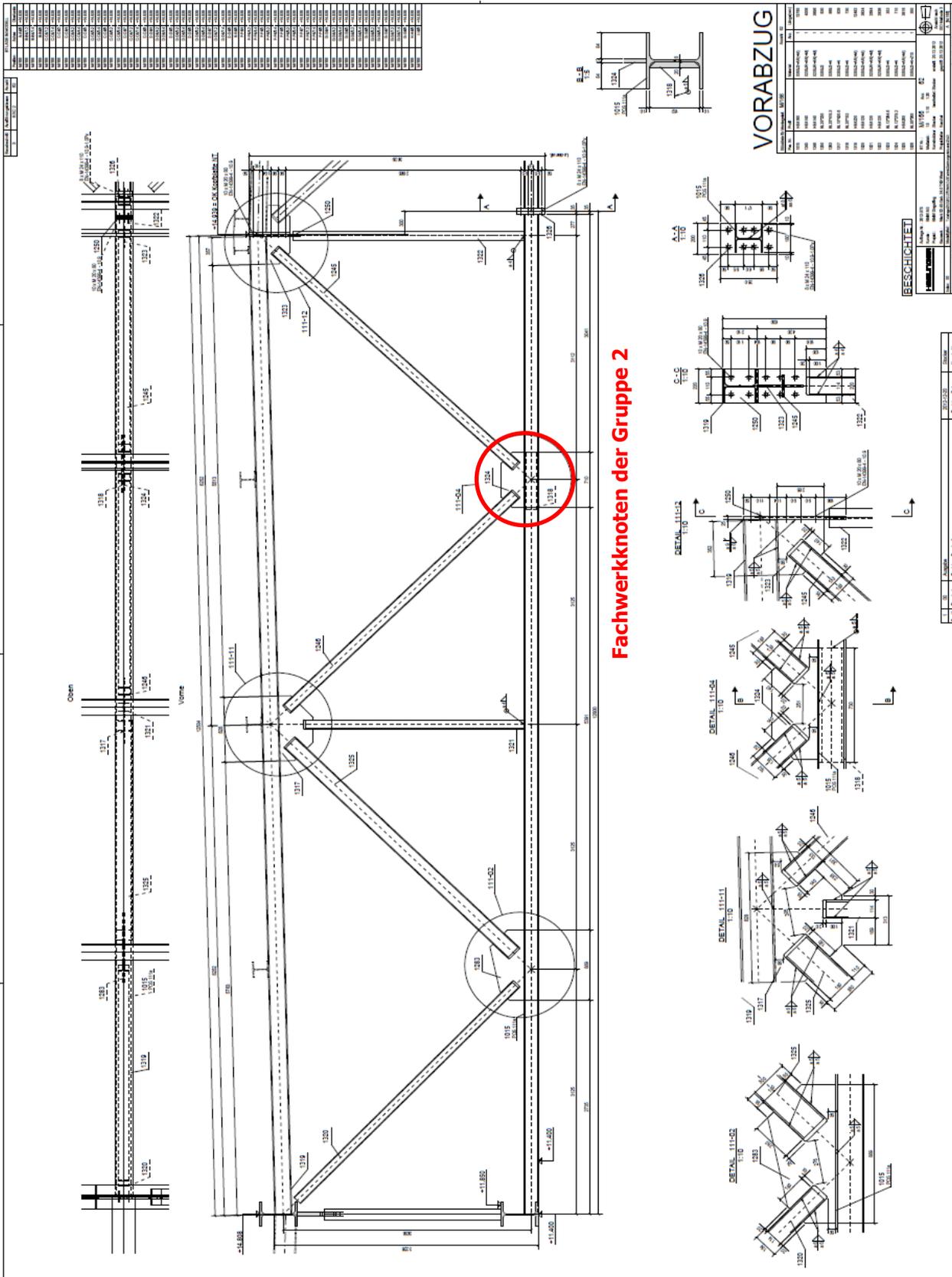


Abbildung B.3 – Knotendetail der Gruppe 1, Detail UG

B - 1.1.2 Gruppe 2

Die Abbildung B.4 zeigt den Konstruktionsplan der Fa. Haslinger Stahlbau mit dem Fachwerkknoten der Gruppe 2.



Fachwerkknoten der Gruppe 2

Abbildung B.4 – Plan der Gruppe 2

Detail Untergurt

Die nachfolgende Abbildung B.5 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 2. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten.

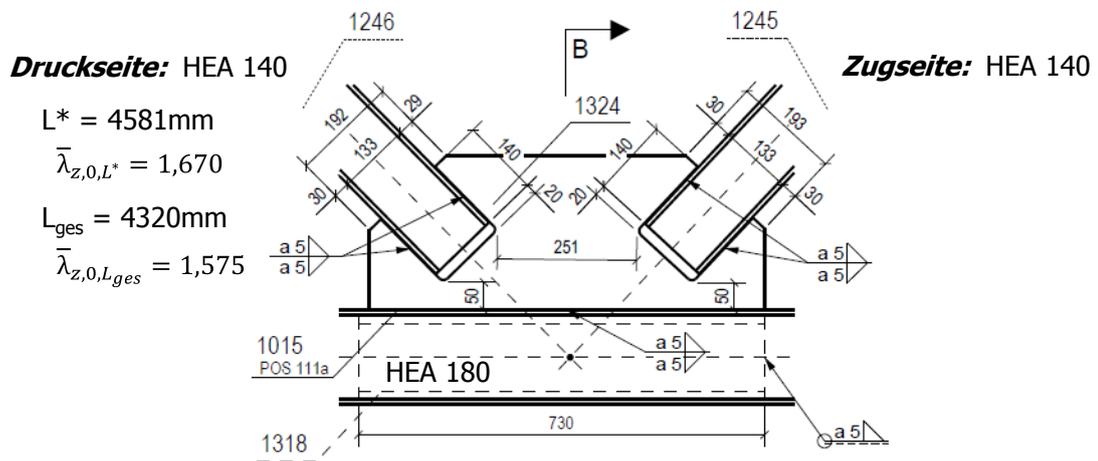


Abbildung B.5 – Knotendetail der Gruppe 2, Detail UG

B - 1.1.3 Gruppe 3

Die Abbildung B.6 zeigt den Konstruktionsplan der Fa. Haslinger Stahlbau mit dem Fachwerknoden der Gruppe 3.

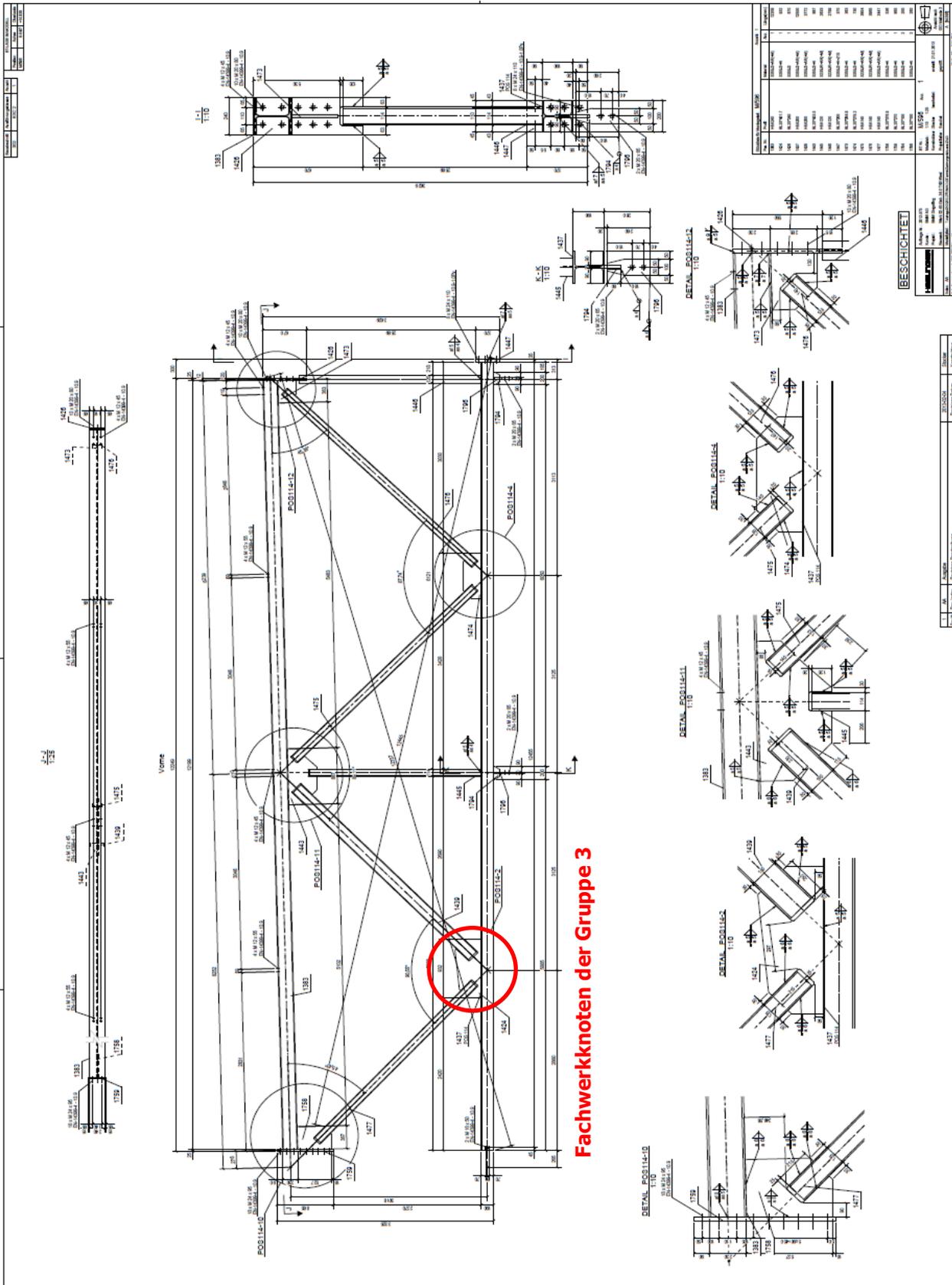


Abbildung B.6 – Plan der Gruppe 3

Detail Untergurt

Die nachfolgende Abbildung B.7 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 3. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten.

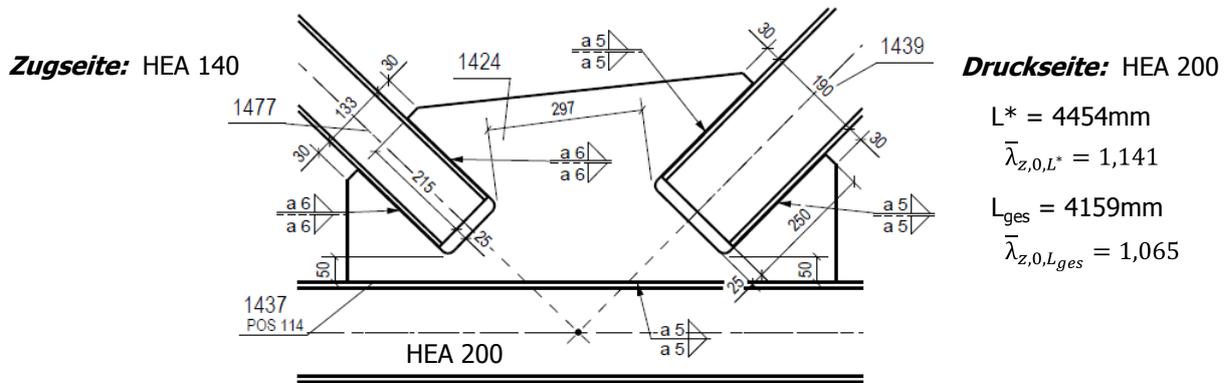


Abbildung B.7 – Knotendetail der Gruppe 3, Detail UG

B - 1.1.4 Gruppe 4

Die Abbildung B.8 zeigt den Konstruktionsplan der Fa. Haslinger Stahlbau mit dem Fachwerkknoten der Gruppe 4.

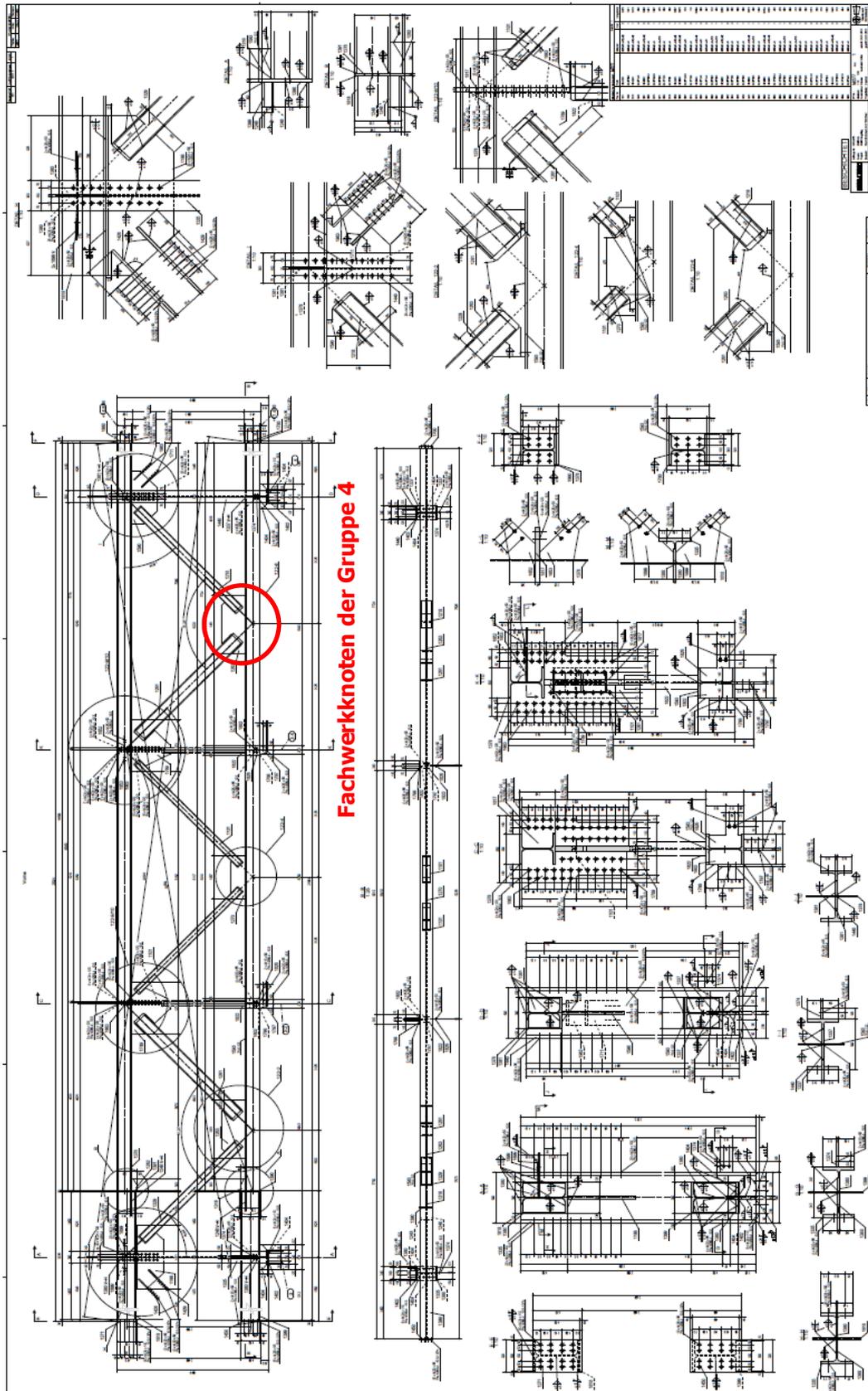


Abbildung B.8 – Plan der Gruppe 4

Detail Untergurt

Die nachfolgende Abbildung B.9 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 4. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten.

Druckseite: HEB 320

$$L^* = 4372\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} = 0,742$$

$$L_{ges} = 3872\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} = 0,657$$

Zugseite: HEA 240

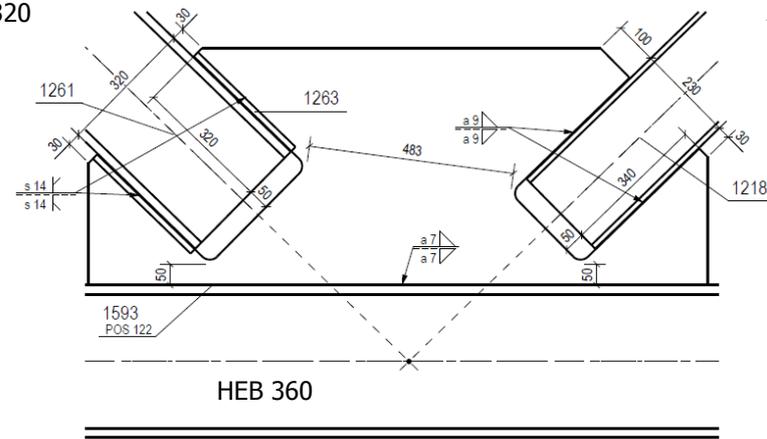


Abbildung B.9 – Knotendetail der Gruppe 4, Detail UG

B - 1.1.5 Gruppe 5

Die Abbildung B.10 zeigt den Konstruktionsplan der Fa. Haslinger Stahlbau mit dem Fachwerkknoten der Gruppe 5.

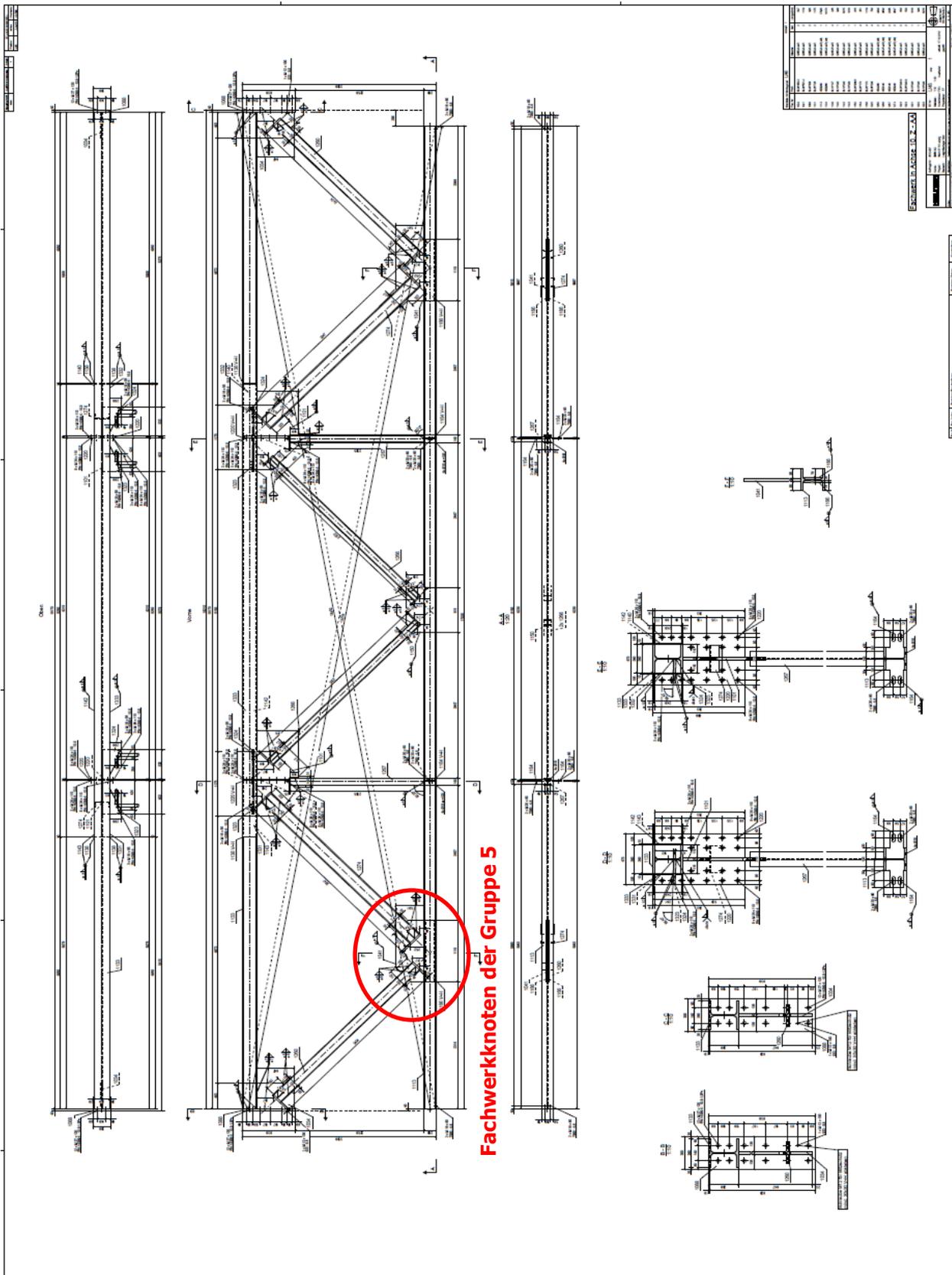


Abbildung B.10 – Plan der Gruppe 5

Detail Untergurt

Die nachfolgende Abbildung B.11 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 5. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten.

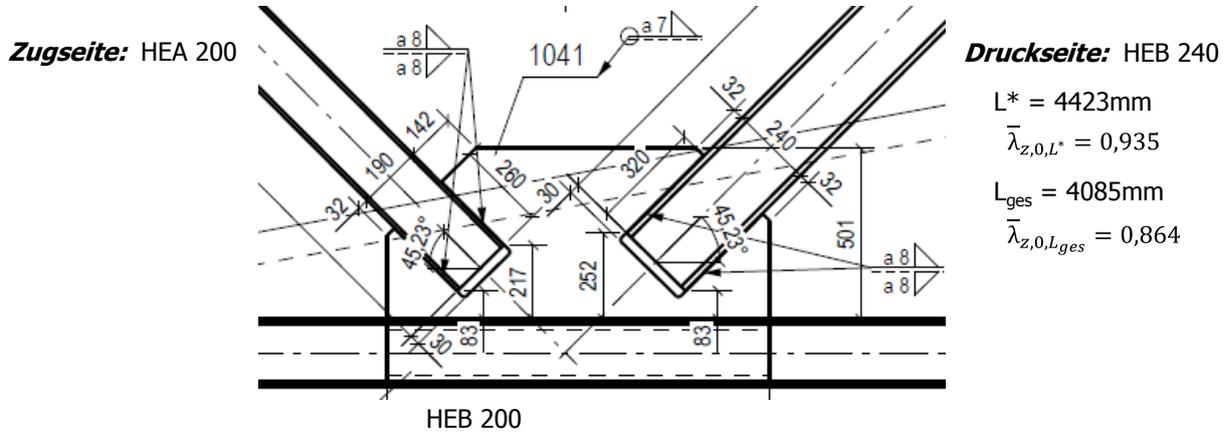


Abbildung B.11 – Knotendetail der Gruppe 5, Detail UG

B - 1.1.6 Gruppe 6

Die nachfolgende Abbildung B.12 zeigt die Abmessungen des Knotendetails des Untergurtanschlusses der Gruppe 6. Eingetragen sind auch die verwendeten Profile und die Längen L^* und L_{ges} der Druckdiagonale samt ihren Schlankheiten, differenziert nach der Gruppe 6a und 6b.

Druckseite: HEA 220

• 6a

$$L^* = 4618\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} = 1,073$$

$$L_{ges} = 4208\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} = 1,0$$

• 6b

$$L^* = 3355\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} = 0,780$$

$$L_{ges} = 2945\text{mm}$$

$$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} = 0,7$$

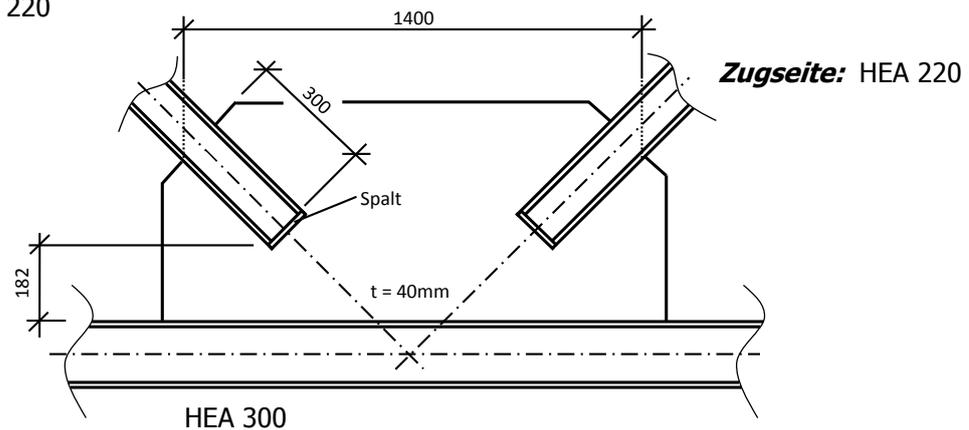


Abbildung B.12 – Knotendetail des Strebenfachwerkanschlusses nach [2]

Bei dem Knotendetail nach [2] fällt auf, dass der Abstand zwischen Oberkante Gurt und unteren Punkt der Knotenblechtasche mit 182mm im Vergleich zu den Ausführungen der Fa. Haslinger Stahlbau wesentlich größer ist.

B - 2 Modellierung der Knoten mittels der Finite Elemente - Software „Abaqus“

B - 2.1 Allgemeines

FE-Programm:

Grundlage zur Bewertung der Tragfähigkeit der Fachwerkknoten bilden neben einfachen Handrechnungen umfangreiche Finite Elemente-Analysen. Zur Modellierung und Berechnung der diversen Knotensysteme wurde das FE-Programm Abaqus [14], Version 6.11 pr3, eingesetzt.

Materialeigenschaften:

Der Einfachheit halber wurden alle Bestandteile des Knotens, bestehend aus den Diagonalen (Druck- und Zugstrebe), dem Untergurt und dem Knotenblech, mit der gleichen Stahlgüte modelliert und berechnet:

- S355**
- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
 - Fließgrenze $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
 - Poissonzahl $\nu = 0,3$
 - der Werkstoff ist homogen und isotrop
 - der Werkstoff verhält sich linear elastisch – ideal plastisch
 - Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt

Da die vorliegende Arbeit die Drucktragfähigkeit des Knotens untersucht, wurden bei bestimmten Rechnungen, bei denen die Plastizierung des Untergurtstabes oder der Zugstrebe die Tragfähigkeit des Systems begrenzen würde, rein elastische Materialeigenschaften der beiden vorher genannten Knotenbestandteile modelliert. Die jeweils entsprechende Materialmodellierung (linear elastisch – ideal plastisch / rein elastisch) wird bei den folgenden Kapiteln jeweils angeführt.

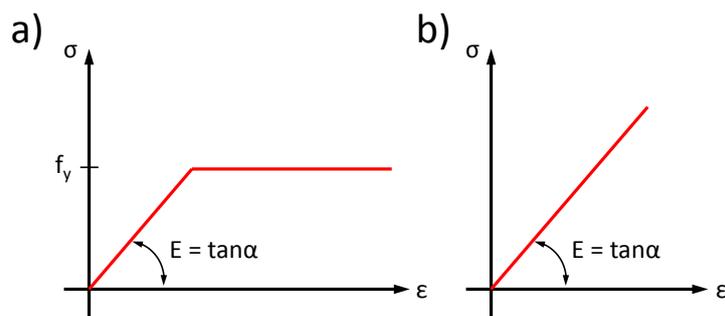


Abbildung B.13 – Materialarbeitslinien für Stahl: a) linear elastisch – ideal plastisch b) rein elastisch

Die Arbeitslinien, welche den Tragfähigkeitsberechnungen zugrunde liegen, können Abbildung B.13 entnommen werden: a) zeigt die linear elastische – ideal plastische und b) die rein elastische Spannungs-Dehnungsbeziehung.

Modellierung:

Für die Modellierung des Fachwerkausschnittes wurde ein Ersatzsystem entwickelt: Während das Knotenblech und die Druckstrebe (durch das Ausnutzen von symmetrischen bzw. antimetrischen Lagerungsbedingungen war nur die Modellierung der halben Druckstrebe erforderlich) zur Gänze aus Schalenelementen modelliert wurden, erfolgte bei der Zugstrebe sowie beim Untergurt eine Modellierung mit Schalen- und Stabelementen, um den Rechenaufwand zu minimieren.

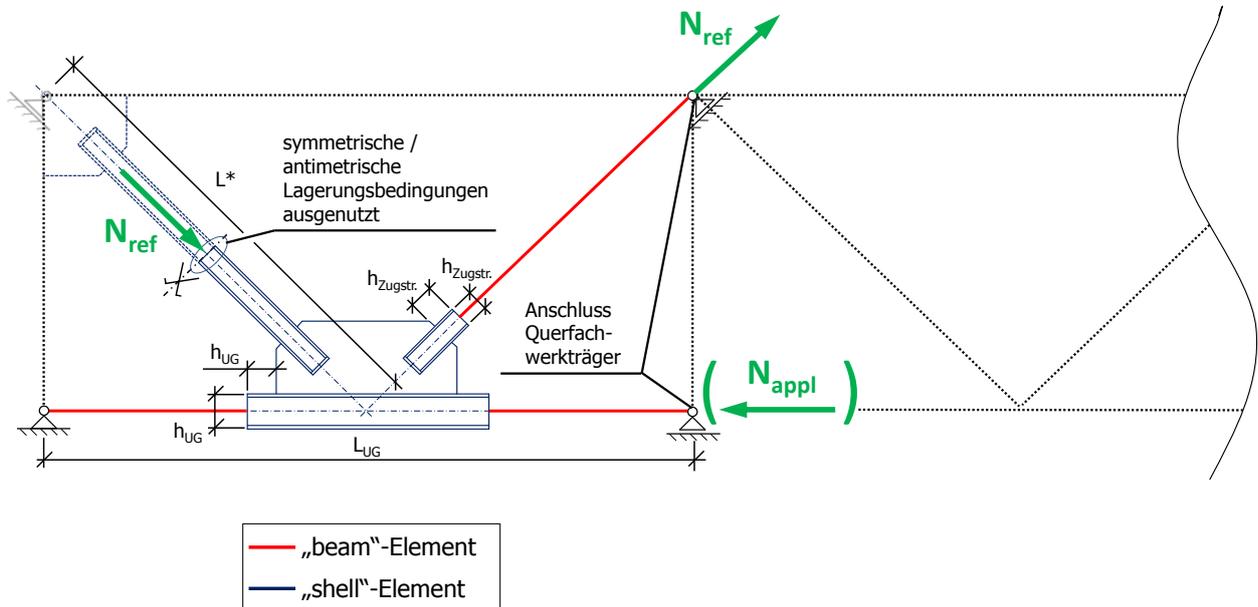


Abbildung B.14 – Schalen- und Stabelemente in der FE-Modellierung

Hierbei wurde die Konvention getroffen, dass wie in Abbildung B.14 gezeigt wird, über das Knotenblech hinausragende Profile in der Länge der jeweiligen Profilhöhe als Schalenelemente modelliert wurden. Im Anschluss daran sind Stabelemente bis zu den Auflagerpunkten angeordnet.

Elemente und FE-Netz:

Als Elementtyp wurden sogenannte „S4R“-Elemente verwendet. Hierbei handelt es sich um Elemente mit linearem FE-Lösungsansatz, vier Knoten und einem Integrationspunkt. Damit können dicke und dünne Schalen sehr gut modelliert werden. Das „R“ im Elementnamen deutet auf die reduzierte Integration der Steifigkeitsmatrix hin. Jeder Knoten des Elements besitzt sechs Freiheitsgrade (drei der Rotation und drei der Translation), wodurch Normal- und Schubkräfte, als auch Momente sehr gut abgebildet werden können.

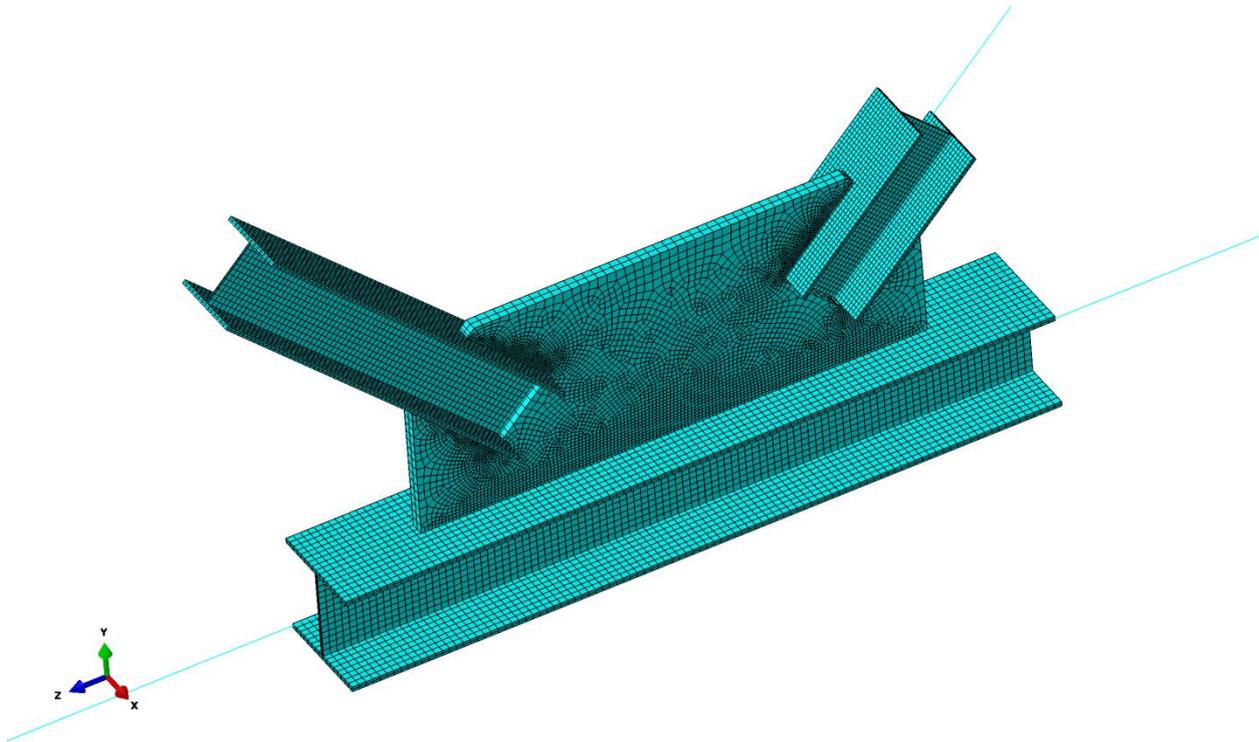


Abbildung B.15 – FE-Netz eines mit Abaqus [14] modellierten Knotens

Die Netzgenerierung erfolgte mit Elementgrößen zwischen 10mm und 20mm, je nach Dimension der im Knoten beteiligten Bauteile. Zu kritischen Stellen hin (zum Beispiel beim Anschluss der Strebe an das Knotenblech oder bei der Koppelung Knotenblech-Untergurt) wurde das FE-Netz entsprechend verfeinert.

Die Größe der Stabelemente (ebenfalls mit linearer Ansatzfunktion, schubnachgiebig) wurde durchgehend mit 10mm modelliert.

Materialorientierung:

Da für jedes Schalenelement ein eigenes lokales Koordinatensystem von Nöten ist, besitzt ein Profil (z.B. die Zugstrebe), welches aus drei modellierten Einzelschalen (Untergurt, Steg und Obergurt) zusammengesetzt ist, drei lokale Koordinatensysteme.

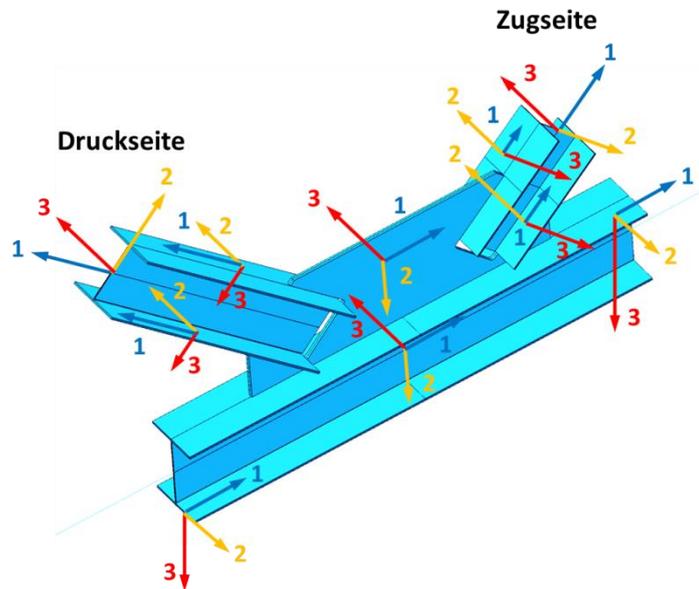


Abbildung B.16 – Materialorientierung der Knotenmodellierung

Bei den lokalen Koordinatensystemen handelt es sich um Rechtssysteme, bei welchem einerseits die "1"-Richtung als Längskoordinate jedes Bauteiles definiert ist und andererseits die "3"-Richtung die Flächennormale des jeweiligen Schalenelementes darstellt. Die entsprechenden Achsen sind in Abbildung B.16 dargestellt.

B - 2.2 Randbedingungen zur Ermittlung der System-Eigenformen

Die Lagerungsbedingungen des Fachwerkknotens setzen sich aus einer Gabellagerung des Untergurtstabes, einer Sperrung der Verschiebung des oberen Endes der Zugstrebe in die lokale 2- und 3-Richtung und einer die erste bzw. zweite Knickeigenform erzwingenden Lagerung im Druckstrebenhalbierenden Punkt zusammen. Die hier dargestellten Randbedingungen fanden auch für die entsprechenden Traglastberechnungen Verwendung.

• Erste Knickeigenform der Druckstrebe

Um die erste Eigenform (eine Halbwelle) zu erzwingen, wurde im Halbierungspunkt der Druckstrebe die Rotation um die lokale 2- und 3-Richtung gesperrt, wie Abbildung B.17 zeigt. Die Rotation um die 1-Achse sowie alle Verschiebungen bleiben frei. Die Amplitude der Druckstrebenimperfection entspricht einem Wert von $L^*/750$. Als L^* ist die Systemlänge definiert.

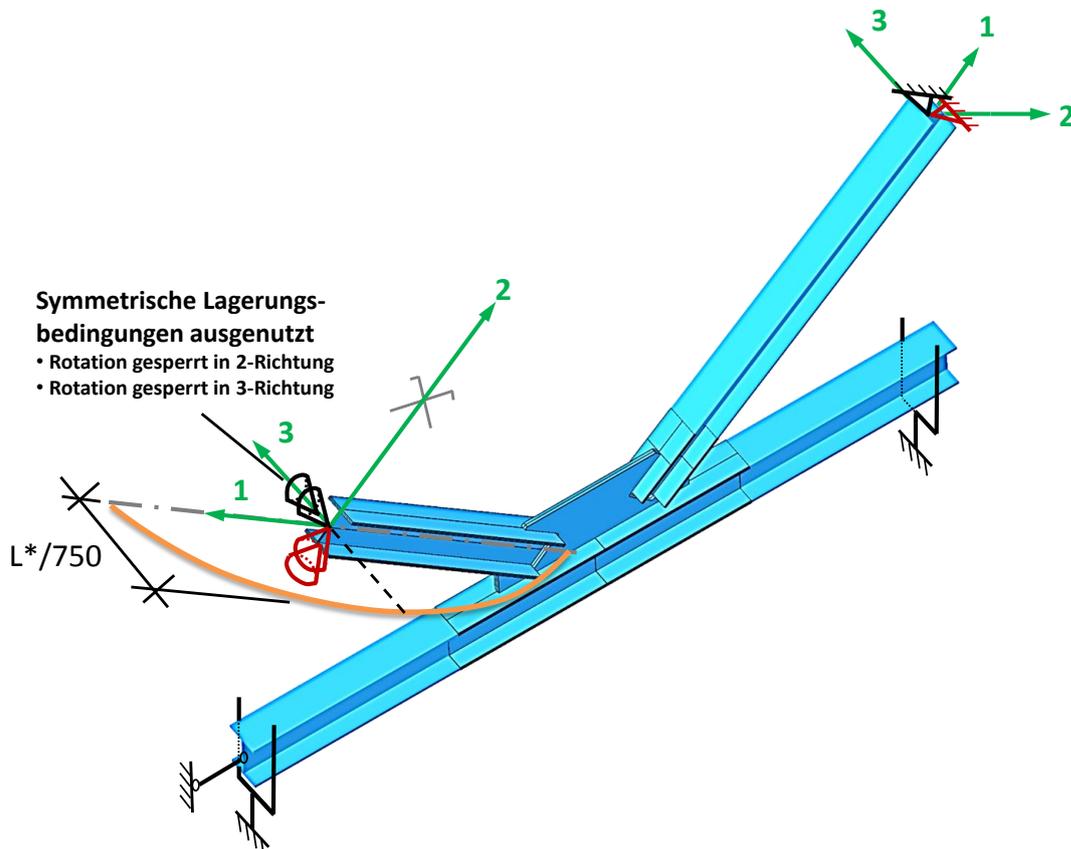


Abbildung B.17 – Randbedingungen der ersten Knickeigenform der Druckdiagonale

• Zweite Knickeigenform des Druckstrebe

Um die zweite Eigenform (zwei Halbwellen der Druckstrebe) zu erzwingen, wurde im Halbierungspunkt der Druckdiagonale die Verschiebung in die lokale 2- und 3-Richtung gesperrt. Die Verschiebung in Längsrichtung, sowie sämtliche Rotationen bleiben in diesem Punkt frei.

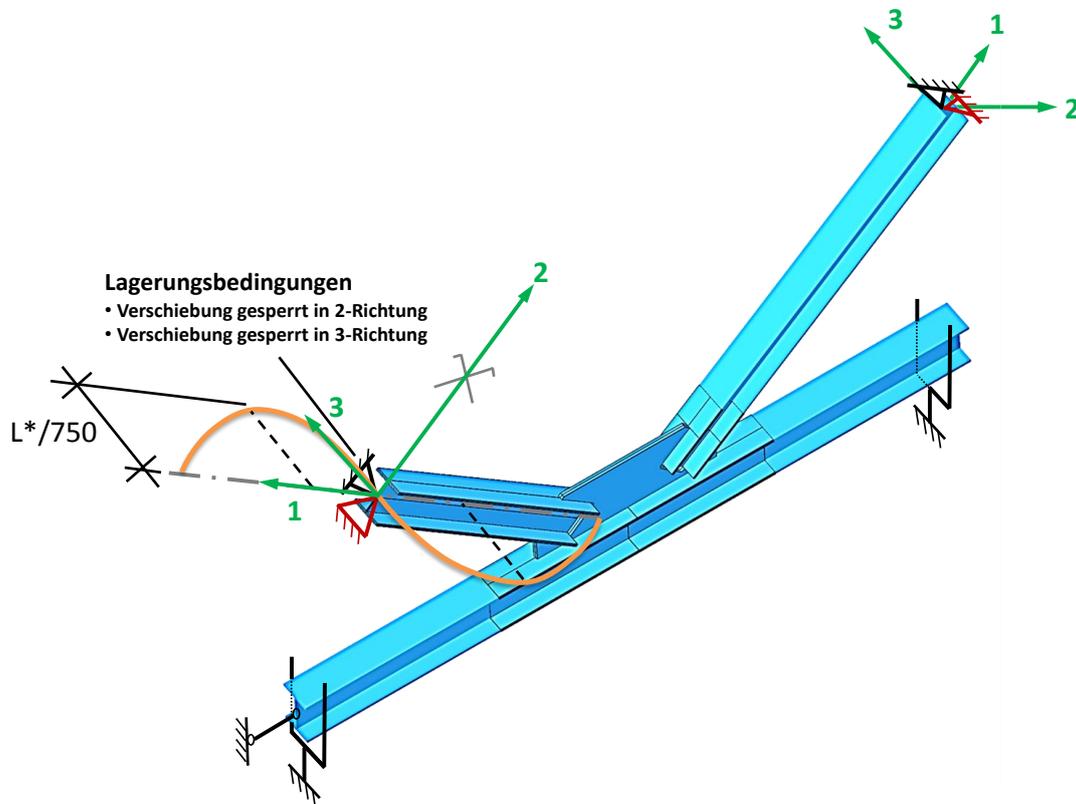


Abbildung B.18 – Randbedingungen der zweiten Knickeigenform der Druckdiagonale

Es wurde entsprechend EN1090-2 [12] festgelegt, dass die Amplitude der Imperfektion für die Traglastberechnungen trotz zweier Halbwellen mit $L^*/750$ jener der ersten Knickeigenform entspricht. Der Amplitudenwert kann für jede Gruppe aus Tabelle B.7 entnommen werden.

Gruppe	L^*	$L^*/750$
	[mm]	[mm]
1	4303	5,7
2	4581	6,1
3	4454	5,9
4	4372	5,8
5	4423	5,9
6a	4618	6,2
6b	3355	4,5

Tabelle B.7 – Amplitude der Imperfektion $L^*/750$ für die erste und zweite Knickeigenform der Druckdiagonale

• **Erste Knickeigenform des Untergurtstabes zufolge N_{appl} alleine**

Die erste Knickeigenform des gabelgelagerten Untergurtstabes ergibt sich durch das Aufbringen einer externen Kraft N_{appl} . Die Rotation der Druckstrebe um die lokale 2- und 3-Richtung ist in ihrem Halbpunkt gesperrt, wie die Abbildung B.19 zeigt.

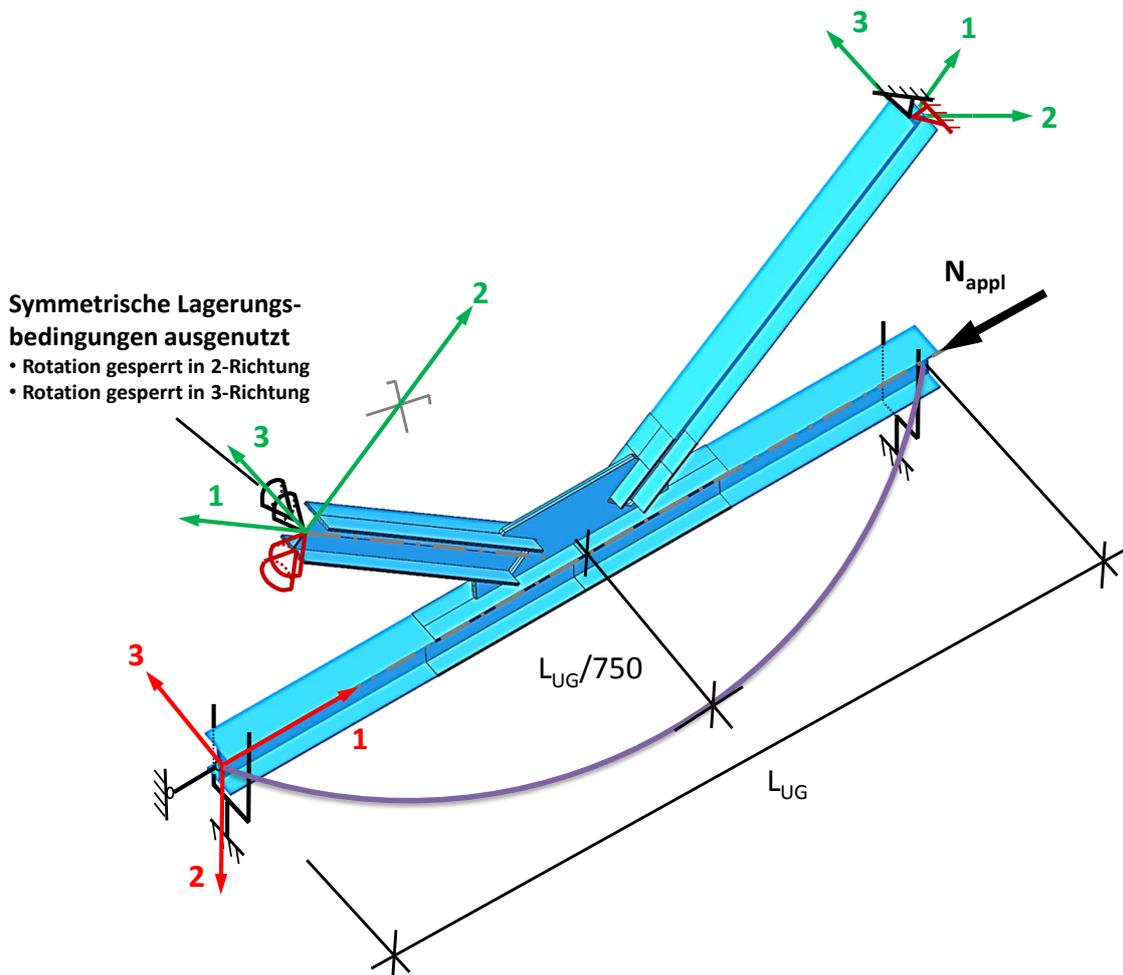


Abbildung B.19 – Randbedingungen der ersten Knickeigenform des Untergurtstabes

Als Imperfektion des Untergurtstabes für die Traglastberechnungen wurden $L_{UG}/750$ festgelegt. Die Größe der Imperfektion ist für jede der definierten Gruppe 1 bis 5 bzw. 6a und 6b aus Tabelle B.8 zu entnehmen.

Gruppe	L_{UG}	$L_{UG}/750$
	[mm]	[mm]
1	6250	8,3
2	6250	8,3
3	6250	8,3
4	6250	8,3
5	6250	8,3
6a	6530	8,7
6b	4750	6,3

Tabelle B.8 – Amplitude der Imperfektion $L^*/750$ für die erste Knickeigenform des Untergurtstabes

B - 3 Tragfähigkeit mit Handrechnung

B - 3.1 Allgemeines

Wie in der Praxis üblich, wurde auch in der vorliegenden Arbeit die Tragfähigkeit der Druckstreben zuerst mit bekannten und bewährten „Hand“-Rechnungsmethoden abgeschätzt, bevor aufwendige Finite Elemente – Simulationen herangezogen wurden. Hierbei wurden zwei Knickspannungsnachweise nach EN 1993-1-1 [10] mit dem Abminderungsfaktoren χ , einerseits als Referenz mit der Systemlänge L^* und andererseits mit der Länge L_{ges} , welche der Länge von der Unterkante des Fachwerkobergurtes bis zur Oberkante des Fachwerkuntergurtes entspricht, geführt.

Des Weiteren wurde ein Bemessungsvorschlag nach [3] für Hohlprofile mit beidseits zentrisch eingeschlitzten Knotenblechen auf die vorliegende Problemstellung mit I-Profilen und beidseits eingeschlitzten Knotenblechen angewandt. Dieser Bemessungsvorschlag unterscheidet zwischen der Tragfähigkeit des Stabes und der des Knotenbleches.

In den folgenden Kapiteln B - 3.2 bis B - 3.8 sind die oben erwähnten Berechnungen durchgeführt. Es gilt zu beachten, dass eine ausführliche Berechnung mit allen Zwischenschritten und den benötigten Formeln der Gruppe 1 vorbehalten ist. Für die restlichen Gruppen sind nur die Zwischenergebnisse angegeben.

Abschließend erfolgt in Kapitel B - 3.9 die Gegenüberstellung der vier pro Gruppe gewonnenen Tragfähigkeiten.

B - 3.2 Gruppe 1

B - 3.2.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEB 340, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 340:} \quad & h = 34 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,15 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,2 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w + 2 \cdot t_f \cdot b = (34 - 2 \cdot 2,15) \cdot 1,2 + 2 \cdot 2,15 \cdot 30 = 164,6 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl} = A \cdot f_y = 164,6 \cdot 35,5 = 5844,7 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b^3}{12} + \frac{t_w^3 \cdot (h - 2 \cdot t_f)}{12} = 2 \cdot \frac{2,15 \cdot 30^3}{12} + \frac{1,2^3 \cdot (34 - 2 \cdot 2,15)}{12} = 9679,3 \text{ cm}^4$$

Trägheitsradius i_z :

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{9679,3}{164,6}} = 7,67 \text{ cm}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^***

Systemlänge L^* : $L^* = 4303 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(\beta \cdot L^*)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 9679,3 \cdot 10^{-8}}{(1,00 \cdot 4,303)^2} = 10834,8 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L^*}{\lambda_1 \cdot i_z} = \frac{4303}{76,4 \cdot 7,67} = 0,735$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Für die Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z ist es notwendig, die dem Profil entsprechende Knicklinie und den zugehörigen Imperfektionswert α zu bestimmen. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um ein gewalztes I-Profil. Untersucht wird das Knickverhalten um die schwache z-Achse des Profils.

Knicklinie	a	b	c
α	0,21	0,34	0,49

Tabelle B.9 – Imperfektionswerte α [10]

Profil	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	Ausweichen um	S 235 bis S 420
I gewalzt	$h/b > 1,2$	y-y z-z	a b
	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	b c

Tabelle B.10 – Knicklinien für Biegeknicken [10]

Es gilt:

$$t_f = 2,15 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \quad \text{und} \quad \frac{h}{b} = \frac{34}{30} = 1,13 < 1,2 \quad \rightarrow \quad \text{Knicklinie c:} \quad \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,735 - 0,2) + 0,735^2 \right] = 0,901$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,901 + \sqrt{0,901^2 - 0,735^2}} = 0,703 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = \chi_z \cdot N_{pl} = 0,703 \cdot 5844,7 = 4108,8 \text{ kN}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 3648 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,ref} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(\beta \cdot L_{ges})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 9679,3 \cdot 10^{-8}}{(1,00 \cdot 3,648)^2} = 15074,9 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{ges}}{\lambda_1 \cdot i_z} = \frac{364,8}{76,4 \cdot 7,67} = 0,623$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,623 - 0,2) + 0,623^2] = 0,797$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,797 + \sqrt{0,797^2 - 0,623^2}} = 0,772 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$:

$$N_{Rd,Lges} = \chi_z \cdot N_{pl} = 0,772 \cdot 5844,7 = 4512,1 \text{ kN}$$

B - 3.2.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

- Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1 (Index 1 steht für die erste Knickeigenform der Druckstrebe)

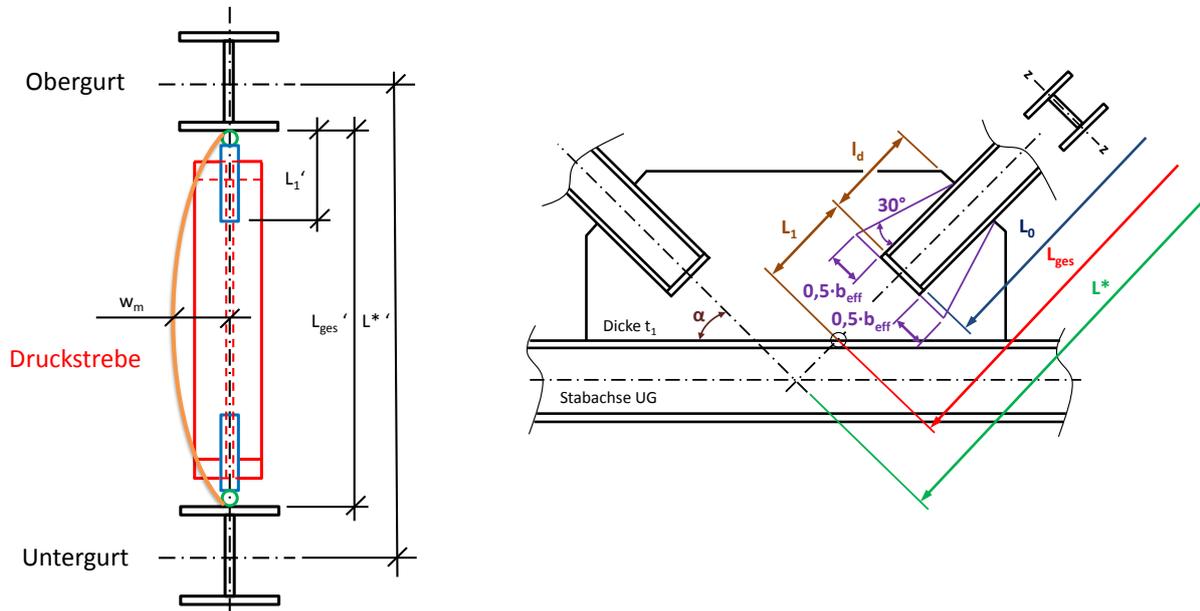


Abbildung B.20 – Bezeichnungen der Größen für den Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

Aus den Tabellen B.1 und B.2 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 1 abgelesen werden, welche zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 nach [3] notwendig sind. Es handelt sich hierbei um folgende benötigte Einflussgrößen:

Einbindelänge:

$$l_{d,oben} = 360 \text{ mm}$$

$$l_{d,unten} = 360 \text{ mm}$$

Effektive Breite:

$$b_{eff,oben} = 2 \cdot l_{d,oben} \cdot \tan 30^\circ = 416 \text{ mm}$$

$$b_{eff,unten} = 2 \cdot l_{d,unten} \cdot \tan 30^\circ = 416 \text{ mm}$$

Knotenblechdicke:

$$t_{1,oben} = 45 \text{ mm}$$

$$t_{1,unten} = 45 \text{ mm}$$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech:

$$I_{1,oben} = \frac{t_{1,oben} \cdot b_{eff,oben}^3}{12} = \frac{4,5 \cdot 41,6^3}{12} = 315,9 \text{ cm}^4$$

$$I_{1,unten} = \frac{t_{1,unten} \cdot b_{eff,unten}^3}{12} = \frac{4,5 \cdot 41,6^3}{12} = 315,9 \text{ cm}^4$$

$$I_{1,mittel} = \frac{I_{1,oben} + I_{1,unten}}{2} = \frac{315,9 + 315,9}{2} = 315,9 \text{ cm}^4$$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe:

$$I_z = 9679,3 \text{ cm}^4$$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente:

$$I_{1,mittel}/I_z = 315,9/9679,3 = 0,033$$

Längen:

$$L_{1,oben} = 291 \text{ mm}$$

$$L_{1,unten} = 307 \text{ mm}$$

$$L_{1,mittel} = 299 \text{ mm}$$

$$L_{ges} = 3648 \text{ mm}$$

Verhältnis Längen:

$$L_{1,mittel}/L_{ges} = 299/3648 = 0,082$$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann nun auf zwei Varianten bestimmt werden.

Dieser kann als erste Möglichkeit aus dem folgenden Diagramm in Abbildung A.21 ermittelt werden:

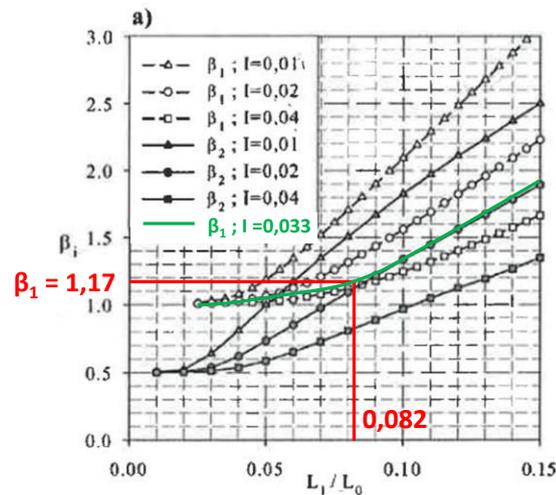


Abbildung B.21 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 1

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung der nachstehenden Formel:

$$\sqrt{\frac{I_{1,mittel}}{I_z}} \cdot \tan\left(\frac{L_{1,mittel} \cdot \pi}{L_{ges} \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{I_{1,mittel}/I_z}}\right) \cdot \tan\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{L_{1,mittel}}{L_{ges}}\right) \cdot \frac{\pi}{\beta_1}\right] - 1,0 = 0$$

$$\sqrt{\frac{315,9}{9679,3}} \cdot \tan\left(\frac{299 \cdot \pi}{3648 \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{315,9/9679,3}}\right) \cdot \tan\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{299}{3648}\right) \cdot \frac{\pi}{\beta_1}\right] - 1,0 = 0$$

$$\rightarrow \beta_1 = 1,17$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 3648 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,17$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(\beta \cdot L_{ges})^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 9679,3 \cdot 10^{-8}}{(1,17 \cdot 3,648)^2} = 10993,6 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,4$$

$$L_{cr,1} = L_{ges} \cdot \beta_1 = 3648 \cdot 1,17 = 4272 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,1}}{\lambda_1 \cdot i_z} = \frac{427,2}{76,4 \cdot 7,67} = 0,729$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,732 - 0,2) + 0,732^2 \right] = 0,896$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,896 + \sqrt{0,896^2 - 0,729^2}} = 0,707 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = \chi_z \cdot N_{pl} = 0,707 \cdot 5844,7 = 4132,2 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = \frac{b_{eff} \cdot t_1^2}{4} \cdot f_y = \frac{41,6 \cdot 4,5^2}{4} \cdot 35,5 = 7476 \text{ kNcm} = 74,8 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = b_{eff} \cdot t_1 \cdot f_y = 41,6 \cdot 4,5 \cdot 35,5 = 6645,6 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfection $e_{1,equ}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,equ} = f_{equ} \cdot e_{1,0,max} = 2,0 \cdot \frac{L_{1,mittel}}{100} = 2,0 \cdot \frac{299}{100} = 5,98 \text{ mm} \geq 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Der Grenzwert der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ kann durch Gleichsetzung und Lösung der nachstehenden Formel bestimmt werden:

$$N_{Rd,1} \cdot e_{1,equ} \cdot \frac{1}{1 - N_{Rd,1}/N_{cr,1}} \leq M_{1,pl,Rd} \cdot \left(1 - \frac{N_{Rd,1}}{N_{1,pl,Rd}} \right)$$

$$N_{Rd,1} \cdot 5,98 \cdot \frac{1}{1 - N_{Rd,1}/10918,9} \leq 74,8 \cdot \left(1 - \frac{N_{Rd,1}}{6645,6} \right)$$

$$\rightarrow N_{Rd,1} = 3692,1 \text{ kN}$$

B - 3.3 Gruppe 2

B - 3.3.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEA 140, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 140:} & h = 13,3 \text{ cm} \\
 & b = 14 \text{ cm} \\
 & t_f = 0,85 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,55 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 30,2 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 1071,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 388,9 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 3,59 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

- **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^***

Systemlänge L^ :* $L^* = 4581 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 384,1 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 76,4 \\
 \bar{\lambda}_z &= 1,670
 \end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

$$\begin{aligned}
 \text{Knicklinie } c: & \quad \alpha = 0,49 \\
 \phi_z &= 2,255 \\
 \chi_z &= 0,265 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,265 \cdot 1071,4 = 283,9 \text{ kN}$$

• **Knickspannungstragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4320 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$N_{cr,ref} = 431,9 \text{ kN}$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$\lambda_1 = 76,4$

$\bar{\lambda}_z = 1,575$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$\phi_z = 2,077$

$\chi_z = 0,291 \leq 1,0$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$:

$N_{Rd,Lges} = 0,291 \cdot 1071,4 = 311,8 \text{ kN}$

B - 3.3.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

• **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus den Tabellen B.1 und B.2 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 2 abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 140 \text{ mm}$

$l_{d,unten} = 140 \text{ mm}$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 162 \text{ mm}$

$b_{eff,unten} = 162 \text{ mm}$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 12 \text{ mm}$

$t_{1,unten} = 12 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 2,328 \text{ cm}^4$

$I_{1,unten} = 2,328 \text{ cm}^4$

$I_{1,mittel} = 2,328 \text{ cm}^4$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 388,9 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,006$

Längen: $L_{1,oben} = 156 \text{ mm}$

$L_{1,unten} = 156 \text{ mm}$

$L_{1,mittel} = 156 \text{ mm}$

$L_{ges} = 4320 \text{ mm}$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,036$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm in Abbildung B.22 ermittelt werden:

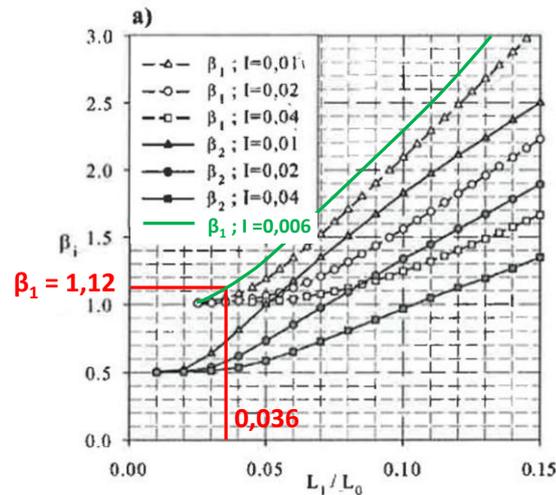


Abbildung B.22 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 2

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,12$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4320 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,12$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 342,5 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 4851 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 1,769$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 2,449$$

$$\chi_z = 0,241 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = 0,241 \cdot 1071,4 = 258,2 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 2,1 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 690,1 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfektion $e_{1,equ}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,equ} = 3,12 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm} \rightarrow e_{1,equ} = 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 181,7 \text{ kN}$$

B - 3.4 Gruppe 3

B - 3.4.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 200:} & h = 19 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,0 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,65 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 51,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 1812,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 1333,7 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 7,67 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

• Knickspannungstragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^*

Systemlänge L^ :* $L^* = 4454 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 1393,4 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 76,4 \\
 \bar{\lambda}_z &= 1,141
 \end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

$$\begin{aligned}
 \text{Knicklinie } c: & \quad \alpha = 0,49 \\
 \phi_z &= 1,381 \\
 \chi_z &= 0,463 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,463 \cdot 1393,4 = 645,1 \text{ kN}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4320 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$N_{cr,ref} = 1598,1 \text{ kN}$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$\lambda_1 = 76,4$

$\bar{\lambda}_z = 1,065$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$\phi_z = 1,279$

$\chi_z = 0,503 \leq 1,0$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$:

$N_{Rd,L_{ges}} = 0,503 \cdot 1333,4 = 911,6 \text{ kN}$

B - 3.4.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

• **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus den Tabellen B.1 und B.2 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 3 abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 230 \text{ mm}$

$l_{d,unten} = 250 \text{ mm}$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 266 \text{ mm}$

$b_{eff,unten} = 289 \text{ mm}$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 25 \text{ mm}$

$t_{1,unten} = 25 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 34,6 \text{ cm}^4$

$I_{1,unten} = 37,6 \text{ cm}^4$

$I_{1,mittel} = 36,1 \text{ cm}^4$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 1333,7 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,027$

Längen: $L_{1,oben} = 198 \text{ mm}$

$L_{1,unten} = 189 \text{ mm}$

$L_{1,mittel} = 194 \text{ mm}$

$L_{ges} = 4159 \text{ mm}$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,047$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:

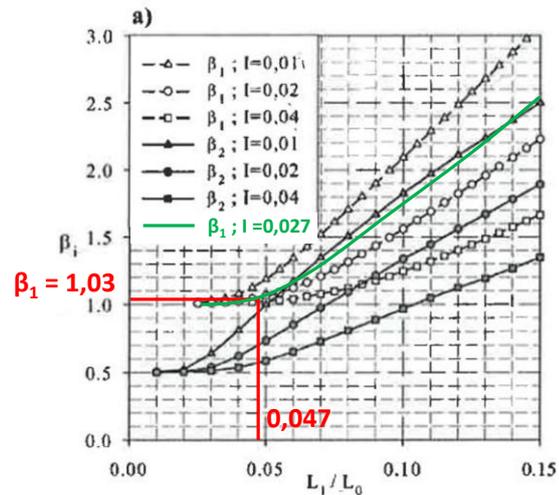


Abbildung B.23 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 3

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,03$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4159 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,03$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 1497,6 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 4296 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 1,100$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 1,326$$

$$\chi_z = 0,484 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = 0,484 \cdot 1333,4 = 877,2 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 15,4 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 2462,8 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfektion $e_{1,equ}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,equ} = 3,88 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm} \rightarrow e_{1,equ} = 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 923,2 \text{ kN}$$

B - 3.5 Gruppe 4

B - 3.5.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEB 320, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEB 320:} & h = 32 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,05 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,15 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 155,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 5505,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 9228,5 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 7,71 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

• Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^*

Systemlänge L^ :* $L^* = 4372 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 10006,7 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,742$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,908$$

$$\chi_z = 0,699 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,699 \cdot 5505,5 = 3848,3 \text{ kN}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 3872 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$N_{cr,ref} = 12757,9 \text{ kN}$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$\lambda_1 = 76,4$

$\bar{\lambda}_z = 0,657$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$\phi_z = 0,828$

$\chi_z = 0,751 \leq 1,0$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$:

$N_{Rd,L_{ges}} = 0,751 \cdot 5505,5 = 4134,6 \text{ kN}$

B - 3.5.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

• **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus den Tabellen B.1 und B.2 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 4 abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 320 \text{ mm}$

$l_{d,unten} = 320 \text{ mm}$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 370 \text{ mm}$

$b_{eff,unten} = 370 \text{ mm}$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 50 \text{ mm}$

$t_{1,unten} = 50 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 385,4 \text{ cm}^4$

$I_{1,unten} = 385,4 \text{ cm}^4$

$I_{1,mittel} = 385,4 \text{ cm}^4$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 9228,5 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,042$

Längen: $L_{1,oben} = 289 \text{ mm}$

$L_{1,unten} = 285 \text{ mm}$

$L_{1,mittel} = 287 \text{ mm}$

$L_{ges} = 3872 \text{ mm}$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,074$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:

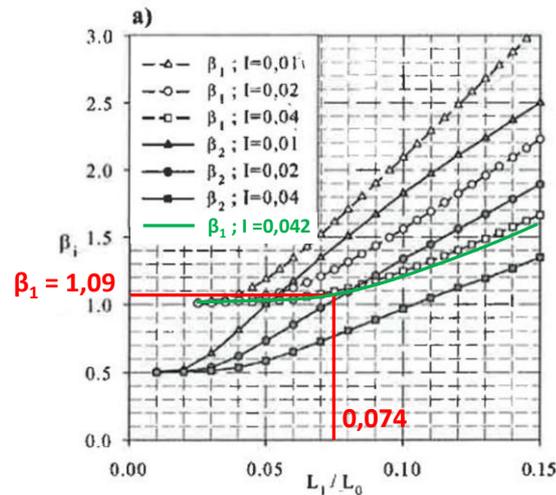


Abbildung B.24 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 4

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,09$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 3872 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,09$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 10817,3 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 4205 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,714$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,880$$

$$\chi_z = 0,716 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = 0,716 \cdot 5505,5 = 3941,9 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 82,1 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 6567,5 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfektion $e_{1,eq}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,eq} = 5,74 \text{ mm} \geq 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 3837,1 \text{ kN}$$

B - 3.6 Gruppe 5

B - 3.6.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEB 240, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEB 240:} & h = 24 \text{ cm} \\
 & b = 24 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,7 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,0 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 102,2 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 3628,1 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 3918,5 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 6,19 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

• Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^*

Systemlänge L^ :* $L^* = 4423 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 4151,5 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 76,4 \\
 \bar{\lambda}_z &= 0,935
 \end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

$$\begin{aligned}
 \text{Knicklinie } c: & \quad \alpha = 0,49 \\
 \phi_z &= 1,117 \\
 \chi_z &= 0,579 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,579 \cdot 3628,1 = 2100,7 \text{ kN}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4085 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$N_{cr,ref} = 4867,3 \text{ kN}$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$\lambda_1 = 76,4$

$\bar{\lambda}_z = 0,864$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$\phi_z = 1,035$

$\chi_z = 0,622 \leq 1,0$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$:

$N_{Rd,L_{ges}} = 0,622 \cdot 3628,1 = 2256,7 \text{ kN}$

B - 3.6.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

• **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus den Tabellen B.3 und B.4 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 5 abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 320 \text{ mm}$

$l_{d,unten} = 320 \text{ mm}$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 370 \text{ mm}$

$b_{eff,unten} = 370 \text{ mm}$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 25 \text{ mm}$

$t_{1,unten} = 30 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 48,2 \text{ cm}^4$

$I_{1,unten} = 83,3 \text{ cm}^4$

$I_{1,mittel} = 65,75 \text{ cm}^4$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 3918,5 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,017$

Längen: $L_{1,oben} = 216 \text{ mm}$

$L_{1,unten} = 222 \text{ mm}$

$L_{1,mittel} = 219 \text{ mm}$

$L_{ges} = 4085 \text{ mm}$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,054$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:

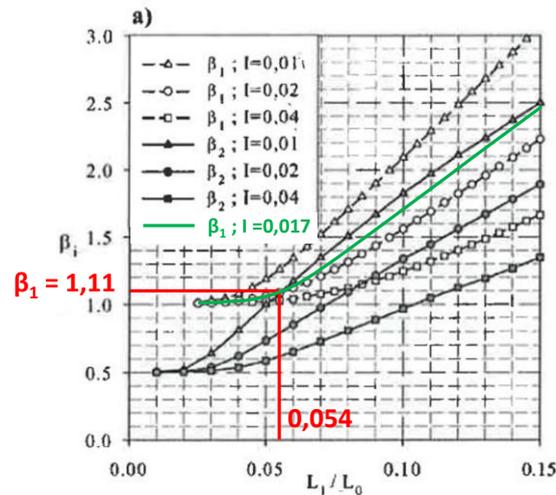


Abbildung B.25 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 5

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,11 \text{ mm}$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4085 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,11$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 3979,0 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 4518 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,955$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 1,141$$

$$\chi_z = 0,566 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = 0,566 \cdot 3628,1 = 2053,5 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 24,8 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 3612,1 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfection $e_{1,eq}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,eq} = 4,38 \text{ mm} \geq 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 1706,3 \text{ kN}$$

B - 3.7 Gruppe 6a

B - 3.7.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEA 220, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 220:} & h = 21 \text{ cm} \\
 & b = 22 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,1 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,7 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 61,6 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 2185,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 1952,7 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 5,63 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

• Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^*

Systemlänge L^ :* $L^* = 4618 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 1897,8 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 76,4 \\
 \bar{\lambda}_z &= 1,073
 \end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

$$\begin{aligned}
 \text{Knicklinie } c: & \quad \alpha = 0,49 \\
 \phi_z &= 1,290 \\
 \chi_z &= 0,499 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,499 \cdot 2185,4 = 1090,5 \text{ kN}$$

- **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4208 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,ref} = 2285,6 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = 1,000$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 1,196$$

$$\chi_z = 0,540 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,L_{ges}}$:

$$N_{Rd,L_{ges}} = 0,540 \cdot 2185,4 = 1180,1 \text{ kN}$$

B - 3.7.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

- **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus der Tabelle B.5 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 6a abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 300 \text{ mm}$

$$l_{d,unten} = 300 \text{ mm}$$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 346 \text{ mm}$

$$b_{eff,unten} = 346 \text{ mm}$$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 40 \text{ mm}$

$$t_{1,unten} = 40 \text{ mm}$$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 184,5 \text{ cm}^4$

$$I_{1,unten} = 184,5 \text{ cm}^4$$

$$I_{1,mittel} = 184,5 \text{ cm}^4$$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 1947,7 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,095$

Längen: $L_{1,oben} = 372 \text{ mm}$

$$L_{1,unten} = 372 \text{ mm}$$

$$L_{1,mittel} = 372 \text{ mm}$$

$$L_{ges} = 4208 \text{ mm}$$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,088$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:

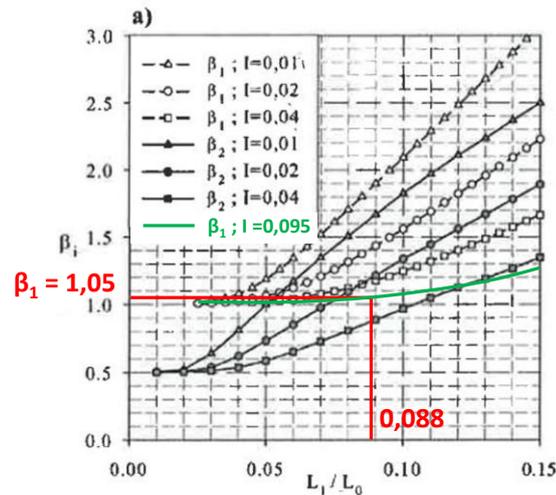


Abbildung B.26 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 6a

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,05 \text{ mm}$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 4208 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,05$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 2068,8 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 4423 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 1,028$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 1,231$$

$$\chi_z = 0,524 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0}$:

$$N_{Rd,0} = 0,524 \cdot 2185,4 = 1145,1 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 49,1 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 4913,2 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfektion $e_{1,eq}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,eq} = 7,44 \text{ mm} \geq 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 1434,0 \text{ kN}$$

B - 3.8 Gruppe 6b

B - 3.8.1 Knicktragfähigkeit

Ermittlung der Querschnittswerte des Druckstrebenprofils:

Berechnungsgrundlage bildet der Profiltyp HEA 220, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 220:} & h = 21 \text{ cm} \\
 & b = 22 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,1 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,7 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 61,6 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl} &= 2185,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$\begin{aligned}
 I_z &= 1952,7 \text{ cm}^4 \\
 \text{Trägheitsradius } i_z: & \quad i_z = 5,63 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

• Knicktragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$ mit Systemlänge L^*

Systemlänge L^ :* $L^* = 3355 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast $N_{cr,ref}$:

$$N_{cr,ref} = 3595,6 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 76,4 \\
 \bar{\lambda}_z &= 0,780
 \end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

$$\begin{aligned}
 \text{Knicklinie } c: & \quad \alpha = 0,49 \\
 \phi_z &= 0,946 \\
 \chi_z &= 0,675 \leq 1,0
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*}$:

$$N_{Rd,ref} = N_{Rd,L^*} = 0,675 \cdot 2185,4 = 1475,1 \text{ kN}$$

• **Knicktragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$ mit der Länge L_{ges} (OK Untergurt - UK Obergurt)**

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 2945 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β : $\beta = 1,00$ *Annahme: beidseits gelenkige Lagerung um die schwache Achse*

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$N_{cr,ref} = 4654,5 \text{ kN}$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$\lambda_1 = 76,4$

$\bar{\lambda}_z = 0,700$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$\phi_z = 0,868$

$\chi_z = 0,725 \leq 1,0$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,Lges}$:

$N_{Rd,Lges} = 0,725 \cdot 2185,4 = 1584,4 \text{ kN}$

B - 3.8.2 Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]

• **Ersatzstabverfahren – Knicktragfähigkeit $N_{Rd,0}$ mit der Länge L_{ges} und dem Knicklängenfaktor β_1**

Aus der Tabelle B.5 können folgende bemessungsbestimmende Knotenparameter für die Gruppe 6b abgelesen werden:

Einbindelänge: $l_{d,oben} = 300 \text{ mm}$

$l_{d,unten} = 300 \text{ mm}$

Effektive Breite: $b_{eff,oben} = 346 \text{ mm}$

$b_{eff,unten} = 346 \text{ mm}$

Knotenblechdicke: $t_{1,oben} = 40 \text{ mm}$

$t_{1,unten} = 40 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment Knotenblech: $I_{1,oben} = 184,5 \text{ cm}^4$

$I_{1,unten} = 184,5 \text{ cm}^4$

$I_{1,mittel} = 184,5 \text{ cm}^4$

Flächenträgheitsmoment Druckstrebe: $I_z = 1947,7 \text{ cm}^4$

Verhältnis Flächenträgheitsmomente: $I_{1,mittel}/I_z = 0,095$

Längen: $L_{1,oben} = 372 \text{ mm}$

$L_{1,unten} = 372 \text{ mm}$

$L_{1,mittel} = 372 \text{ mm}$

$L_{ges} = 2945 \text{ mm}$

Verhältnis Längen: $L_{1,mittel}/L_{ges} = 0,126$

Der Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung kann aus dem folgenden Diagramm ermittelt werden:

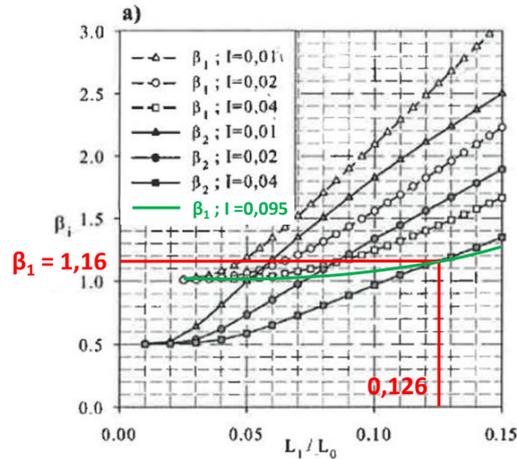


Abbildung B.27 – Knicklängenbeiwert β_1 des Ersatzstabes für die erste Eigenform bei beidseits gelenkiger Lagerung nach [3]
– Gruppe 6b

Eine weitere Option zur Bestimmung des Knicklängenfaktors β_1 ist die Lösung nach der Formel aus Abschnitt B - 3.2.2:

$$\rightarrow \beta_1 = 1,16 \text{ mm}$$

Länge L_{ges} : $L_{ges} = 2945 \text{ mm}$

Knicklängenbeiwert β_1 : $\beta_1 = 1,16$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} :

$$N_{cr,1} = 3486,7 \text{ kN}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegeknicken der Druckstrebe:

$$\lambda_1 = 76,4$$

$$L_{cr,1} = 3407 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = 0,792$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z für Normalkraft N:

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,959$$

$$\chi_z = 0,667 \leq 1,0$$

Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rd,0z}$:

$$N_{Rd,0} = 0,667 \cdot 2185,4 = 1457,7 \text{ kN}$$

- **Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ – vereinfachtes Ingenieurmodell**

Plastische Tragfähigkeit im Knotenblechquerschnitt:

$$M_{1,pl,Rd} = 49,1 \text{ kNm}$$

$$N_{1,pl,Rd} = 4913,2 \text{ kN}$$

Geometrische Ersatzimperfektion $e_{1,eq}$ im Knotenblechquerschnitt:

$$e_{1,eq} = 7,44 \text{ mm} \geq 4 \text{ mm}$$

Bestimmung der Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$:

Die Knotenblechtragfähigkeit $N_{Rd,1}$ wird durch Lösung der Formel aus Abschnitt B - 3.3.2 berechnet.

$$N_{Rd,1} = 1879,1 \text{ kN}$$

B - 3.9 Zusammenfassung

Tabelle B.11 zeigt die Ergebnisse der Knicktragfähigkeit für $L_K = L^*$ und $L_K = L_{ges}$ mit angenommener beidseits gelenkiger Lagerung ($\beta = 1,0$). Tabelle B.12 fasst die Ergebnisse des Bemessungsvorschlags nach [3] für Hohlprofile, getrennt nach der Tragfähigkeit des Ersatzstabes und des Knotenblechs, zusammen.

Knicktragfähigkeit nach EN 1993-1-1 [10]									
Gruppe	Profil Druckstrebe	Stabknicken mit $L_K = L^*$				Stabknicken mit $L_K = L_{ges}$			
		$L_K = L^*$ [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L^*}$ [/]	χ [/]	N_{Rd,L^*} [kN]	$L_K = L_{ges}$ [mm]	$\bar{\lambda}_{z,L_{ges}}$ [/]	χ [/]	$N_{Rd,L_{ges}}$ [kN]
Gruppe 1	HEB 340	4303	0,735	0,703	4108,8	3648	0,623	0,772	4512,1
Gruppe 2	HEA 140	4581	1,670	0,265	283,9	4320	1,575	0,291	311,8
Gruppe 3	HEA 200	4454	1,141	0,463	839,1	4159	1,065	0,503	911,6
Gruppe 4	HEB 320	4372	0,742	0,699	3848,3	3872	0,657	0,751	4134,6
Gruppe 5	HEB 240	4423	0,935	0,579	2100,7	4085	0,864	0,622	2256,7
Gruppe 6a	HEA 220	4618	1,073	0,499	1090,5	4802	1,000	0,540	1180,1
Gruppe 6b	HEA 220	3355	0,780	0,675	1475,1	2945	0,700	0,725	1584,4

Tabelle B.11 – Tragfähigkeitsvergleich der ausgewählten Gruppen – Knicktragfähigkeit nach EN 1993-1-1 [10]

Abschätzung – Bemessungsvorschlag Hohlprofile nach [3]								
Gruppe	Profil Druckstrebe	Ersatzstabverfahren					Knotenblech	
		β_1 [/]	$\bar{\lambda}_z$ [/]	$L_K = \beta_1 \cdot L_{ges}$ [mm]	χ [/]	$N_{Rd,0}$ [kN]	t_1 [mm]	$N_{Rd,1}$ [kN]
Gruppe 1	HEB 340	1,171	0,729	4272	0,707	4132,2	45	3692,1
Gruppe 2	HEA 140	1,123	1,769	4851	0,241	258,2	12	181,7
Gruppe 3	HEA 200	1,033	1,100	4296	0,484	877,2	25	923,2
Gruppe 4	HEB 320	1,086	0,714	4205	0,716	3941,9	50	3837,1
Gruppe 5	HEB 240	1,106	0,955	4518	0,566	2053,5	30	1706,3
Gruppe 6a	HEA 220	1,051	1,028	4423	0,524	1145,1	40	1434,0
Gruppe 6b	HEA 220	1,157	0,792	3407	0,667	1457,7	40	1879,1

Tabelle B.12 – Tragfähigkeitsvergleich der ausgewählten Gruppen – Bemessungsvorschlag nach [3]

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden diese in Abbildung A.14 grafisch aufgetragen. Jede Gruppe hat vier Traglastergebnisse, dargestellt durch vier Balken:

- N_{Rd,L^*} Stabknicken mit L^*
- $N_{Rd,L_{ges}}$ Stabknicken mit L_{ges}
- $N_{Rd,0}$ Bemessungsvorschlag für eingeschlitzte Hohlprofile - Stabknicken Ersatzstabverfahren
- $N_{Rd,1}$ Bemessungsvorschlag für eingeschlitzte Hohlprofile – Knotenblech

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass die Tragfähigkeit des Knickspannungsnachweises berechnet mit den Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ (beidseits gelenkige Lagerung) und der Systemlänge L^* für alle Gruppen nahezu der Tragfähigkeit des Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] entspricht.

Die höchste Tragfähigkeit zeigt selbstverständlich jener Fall mit der Ermittlung der Traglast mit $\beta = 1,0$ und der Länge L_{ges} . Die Höhe des Unterschiedes der Knicktragfähigkeit zwischen L^* und L_{ges} , jeweils mit $\beta = 1,0$, hängt vom Verhältnis dieser beiden Längen ab. Als einzige Parameter haben die Höhe des Untergurtprofils h_{UG} und der Diagonalenwinkel α Einfluss (siehe Abbildung B.28).

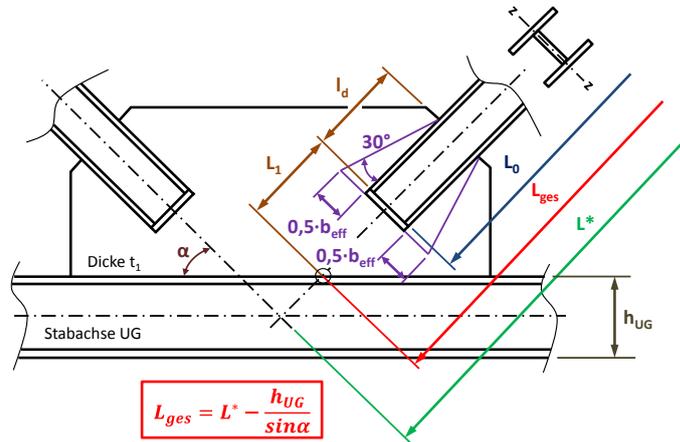


Abbildung B.28 – Längenverhältnis L_{ges}/L^*

Die Tragfähigkeit des Knotenblechs nach [3] hängt entscheidend von dessen Dicke t_1 und der Breite b_{eff} ab. Die erhöhte rechnerische Tragfähigkeit des Knotenblechs der Gruppe 6 kann dadurch erklärt werden, dass die wichtige Eingangsgröße, die Diagonaleneinbindelänge l_d ($b_{eff} = 2 \cdot l_d \cdot \tan 30^\circ$), bei Gruppe 6 rund $1,5 \cdot h_{Strebe}$ beträgt, während bei den Gruppen 1 bis 5 diese lediglich rund $1,0 \cdot h_{Strebe}$ einnimmt.

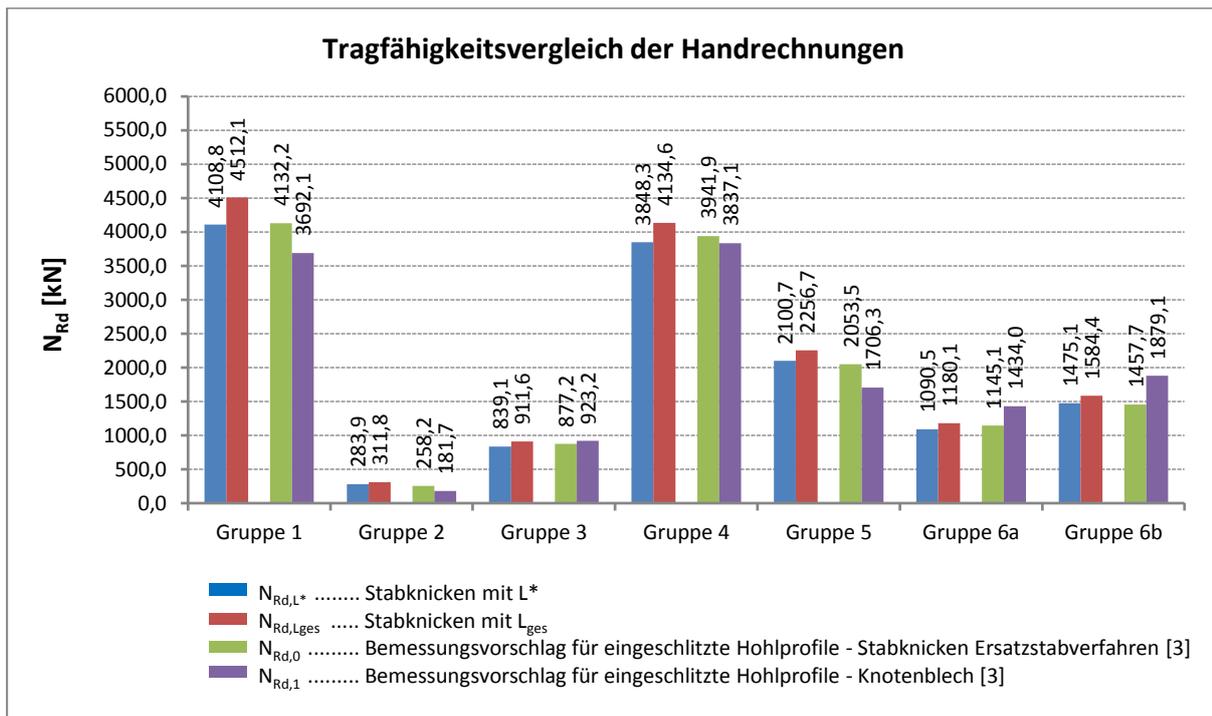


Abbildung B.29 – Tragfähigkeitsvergleich der untersuchten Gruppen – Diagrammform

B - 4 Tragfähigkeit mit FE-Berechnung

B - 4.1 Allgemeines

Um die Tragfähigkeit des modellierten Knotens zu erhalten, wurden Druck- und Zugstrebe mit einer Referenznormalkraft N_{ref} belastet. Diese Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen:

$$N_{ref} = A \cdot f_y$$

Mit der Streckgrenze $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$ für die Stahlgüte S355 und den Profilquerschnittsflächen $A \text{ [cm}^2\text{]}$ nach [4] ergeben sich für die sechs behandelten Gruppen folgende plastischen Normalkräfte als Referenzkräfte für die FE-Rechnungen:

Gruppe	Profil der Druckstrebe	f_y [kN/cm ²]	A [cm ²]	$N_{pl} = N_{ref}$ [kN]
1	HEB 340	35,5	171	6070,5
2	HEA 140	35,5	31,4	1114,7
3	HEA 200	35,5	53,8	1909,9
4	HEB 320	35,5	161	5715,5
5	HEB 240	35,5	106	3763,0
6a	HEA 220	35,5	64,3	2282,7
6b	HEA 220	35,5	64,3	2282,7

Abbildung B.30 – Übersicht über die Referenznormalkräfte N_{ref}

Das Ergebnis der Analyse bildet ein Lastfaktor (LF). Dieser gibt an, wie weit das Programm Abaqus [14] die aufgebrachte Kraft N_{ref} steigern konnte, bis die Traglast des Systems erreicht wurde. Durch Multiplikation dieses Lastfaktors mit der Referenznormalkraft wurde die Tragfähigkeit bestimmt.

$$N_{Rd} = LF \cdot N_{ref}$$

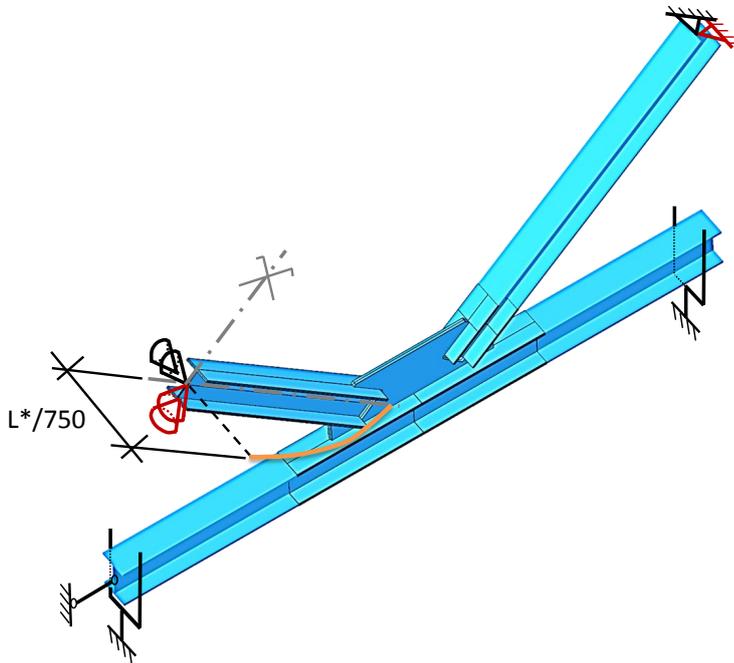
B - 4.1.1 Imperfektionen für die GMNIA-Berechnungen

Bei der Traglastberechnung wurden drei Arten von Imperfektionsformen unterschieden. Dabei wurde jeweils eine Imperfektionsart einer geometrischen und materiell nicht linearen Analyse mit Imperfektionen (GMNIA) zugrunde gelegt. Somit gibt es pro untersuchtem Knoten drei Traglastzustände, von denen es jenen mit der minimalen Tragfähigkeit zu finden gilt.

- Imperfektion in der Druckdiagonale – Fall Symmetrie; erste Knickeigenform ($L^*/750$)
- Imperfektion in der Druckdiagonale – Fall Antimetrie; zweite Knickeigenform ($L^*/750$)
- Imperfektion im Knotenblech – Schiefstellung des Knotenbleches ($1/100$, entspricht $0,57^\circ$)

Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform

Die erste Traglastberechnung berücksichtigt die Imperfektion $L^*/750$ in der Druckdiagonale. Dabei sind die Lagerungsbedingungen (siehe Abschnitt B - 2.2) derartig gewählt, dass sich die erste Druckeigenform ausbildet, wie Abbildung B.31 zeigt.

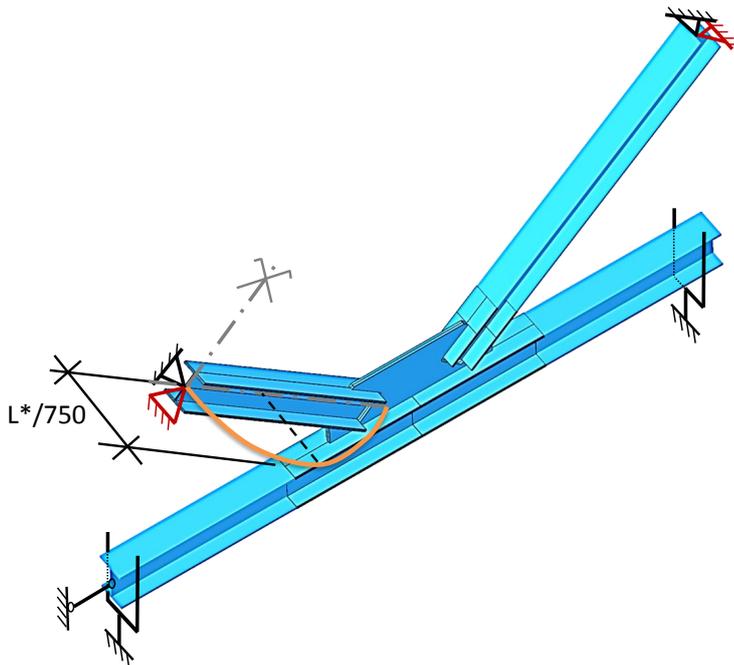


Gruppe	L*	L*/750
	[mm]	[mm]
1	4303	5,7
2	4581	6,1
3	4454	5,9
4	4372	5,8
5	4423	5,9
6a	4618	6,2
6b	3355	4,5

Abbildung B.31 – Imperfektion in der Druckdiagonale – Fall Symmetrie; erste Knickeigenform ($L^*/750$)

Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform

Die zweite Traglastberechnung berücksichtigt ebenfalls die Imperfektion $L^*/750$ in der Druckdiagonale. Allerdings sind hier die Lagerungsbedingungen (siehe Abschnitt B - 2.2) so gewählt, dass sich die zweite Druckeigenform einstellt, wie Abbildung B.32 zeigt.



Gruppe	L*	L*/750
	[mm]	[mm]
1	4303	5,7
2	4581	6,1
3	4454	5,9
4	4372	5,8
5	4423	5,9
6a	4618	6,2
6b	3355	4,5

Abbildung B.32 – Imperfektion in der Druckdiagonale – Fall Antimetrie; zweite Knickeigenform ($L^*/750$)

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblechschiefstellung**

Diese Imperfektionsform wurde modelliert, indem das Knotenblech mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse, um 1/100, was in etwa 0,57° entspricht, gedreht wurde. Zusätzlich wurden auch die beiden Streben um das Maß Δ_3 horizontal in Drehrichtung des Knotenblechs verschoben.

$$\Delta_3 = \frac{1}{100} \cdot h_3$$

Wobei als Höhe h_3 das Maß normal stehend zwischen Oberkante Untergurt und Achse der Diagonale im Halbierungspunkt der Einbindelänge definiert wurde (siehe Abbildung B.33). Weiters gilt:

$$h_3 = \frac{h_2 + h_4}{2}$$

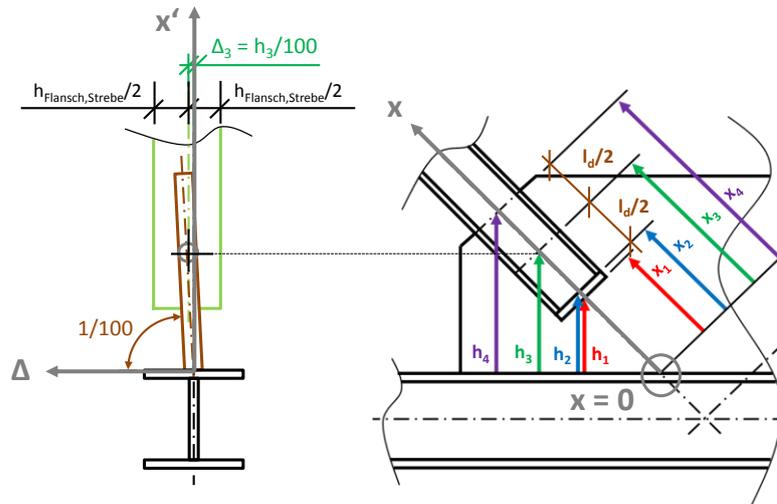


Abbildung B.33 – Ermittlung der Horizontalverschiebung Δ_3 der Diagonalen bei Imperfektion Knotenblechschiefstellung

Die folgende Abbildung B.34 zeigt die Verschiebung Δ in Abhängigkeit der Laufvariable x im Mittelschnitt des Knotens, beginnend an der Oberkante des Gurtes.

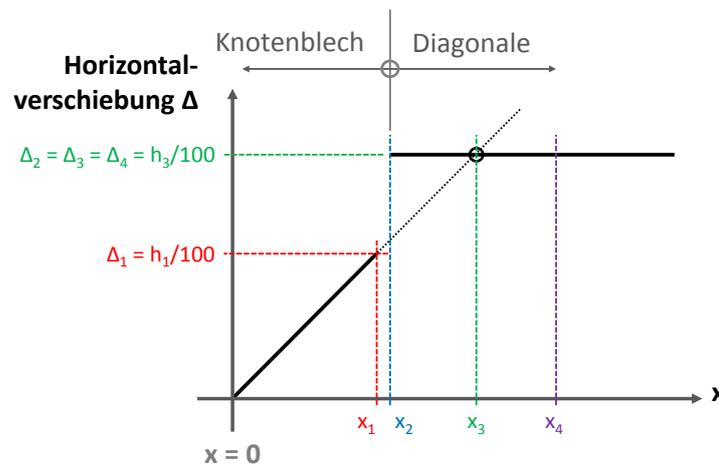


Abbildung B.34 – Horizontalverschiebung Δ in Abhängigkeit der Laufvariable x

Bis zur Länge x_1 im Knotenblech nimmt die Verschiebung Δ linear zu, bis ab der Entfernung x_2 die Horizontalverschiebung der Diagonale konstant auf den Wert Δ_3 bleibt.

Tabelle B.13 gibt für die sechs Gruppen die Höhe h_3 , respektive die zugehörige Verschiebung Δ_3 , getrennt für die Druck- und die Zugseite des Fachwerkknotens an.

Gruppe	Höhe h_3 der Druckseite	Δ_3 der Druckseite	Höhe h_3 der Zugseite	Δ_3 der Zugseite
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	330	3,3	318	3,2
2	168	1,7	168	1,7
3	224	2,2	190	1,9
4	311	3,1	286	2,9
5	281	2,8	242	2,4
6a	375	3,75	375	3,75
6b	375	3,75	375	3,75

Tabelle B.13 – Imperfektion im Knotenblech – Fall Knotenblechschiefstellung (1/100)

Strukturelle Imperfektionen, in erster Linie durch das Schweißen hervorgerufene Eigenspannungen, wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht berücksichtigt.

B - 4.1.2 Zusammenfassung der Vorgehensweise der FE-Berechnung

Zu Beginn wurden für jeden Knoten zwei lokale Beulanalysen (LBA) mit Abaqus [14] durchgeführt. Das Ergebnis waren die Eigenformen des Knotens, je nach Randbedingung (siehe Kapitel B - 2.2) die erste bzw. zweite Knickeigenform.

Diese LBA-Rechnungen zur Eigenformfindung dienten den Traglastberechnungen als Basis für die Imperfektion. Auch hier waren wiederum zwei FE-Rechnungen, um als Ergebnis die Tragfähigkeit affin zur ersten und zweiten Eigenform zu erhalten, notwendig. Die als Voraussetzung dienenden LBA-Eigenformen wurden für die GMNIA-Rechnung entsprechend um den Wert $L^*/750$ als geometrische Ersatzimperfektion skaliert.

Die dritte Imperfektion, die Knotenblechschiefstellung, wurde direkt in der grafischen Benutzeroberfläche von Abaqus [14] (CAE) modelliert.

B - 4.1.3 Zusätzliche Druckstreben-Stabrechnung mit der Länge L^* als Vergleich

Zu der Knotenberechnung wurde noch eine reine Stabrechnung der Druckstrebe vorgenommen. Ziel ist ein Vergleich mit den in Kapitel B - 3 erhaltenen Ergebnissen der Handrechnungen und der Systemtragfähigkeiten.

Den Stabrechnungen wurden zwei Imperfektionsgrößen zugrunde gelegt:

- $L^*/200$
- $L^*/750$

Die geometrische Ersatzimperfektion $L^*/200$ deckt auch vorhandene Eigenspannungen (z.B. durch Schweißen) des Profils mit ab.

Die nachfolgende Tabelle B.14 zeigt die Amplituden der Imperfektionen der Druckstreben-Stabrechnung für $L^*/750$ bzw. $L^*/200$.

Gruppe	L^*	$L^*/750$	$L^*/200$
	[mm]	[mm]	[mm]
1	4303	5,7	21,5
2	4581	6,1	22,9
3	4454	5,9	22,3
4	4372	5,8	21,9
5	4423	5,9	22,1
6a	4618	6,2	23,1
6b	3355	4,5	16,8

Tabelle B.14 – Imperfektionen der Druckstreben-Stabrechnung: $L^*/750$ und $L^*/200$

B - 4.1.4 Dargestellte Traglastzustände

In den anschließenden Kapiteln B - 4 bis B - 8, ausgenommen B - 6, sind die Abbildungen der Traglastzustände nach Art der Imperfektion gegliedert:

- Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform
- Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Für jeden dieser oben genannten Imperfektionsfälle gibt es vier FE-Grafiken zum Traglastzustand, welche jeweils folgende Situation zeigen:

- Normalspannung σ_{11}
- Schubspannung σ_{12} im Knotenblech
- Mises-Vergleichsspannung
- Verformung

Da hauptsächlich die Situation „Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform“ maßgebend wird, werden in den Kapiteln B - 6 und B - 9 die Ergebnisse

- Normalspannung σ_{11}
- Schubspannung σ_{12} im Knotenblech
- Mises-Vergleichsspannung
- Verformung

nur mehr für diese Imperfektionsform gezeigt.

B - 4.2 Gruppe 1

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 1 zu charakterisieren sind in Tabelle B.15 zusammengefasst.

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge L^* =	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*}$ =	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	L_{ges} =	3648mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	45mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}}$ =	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.15 – FE-Eingangsdaten Gruppe 1

B - 4.2.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.35, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.36 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.37 entnommen werden kann.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.35 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1.

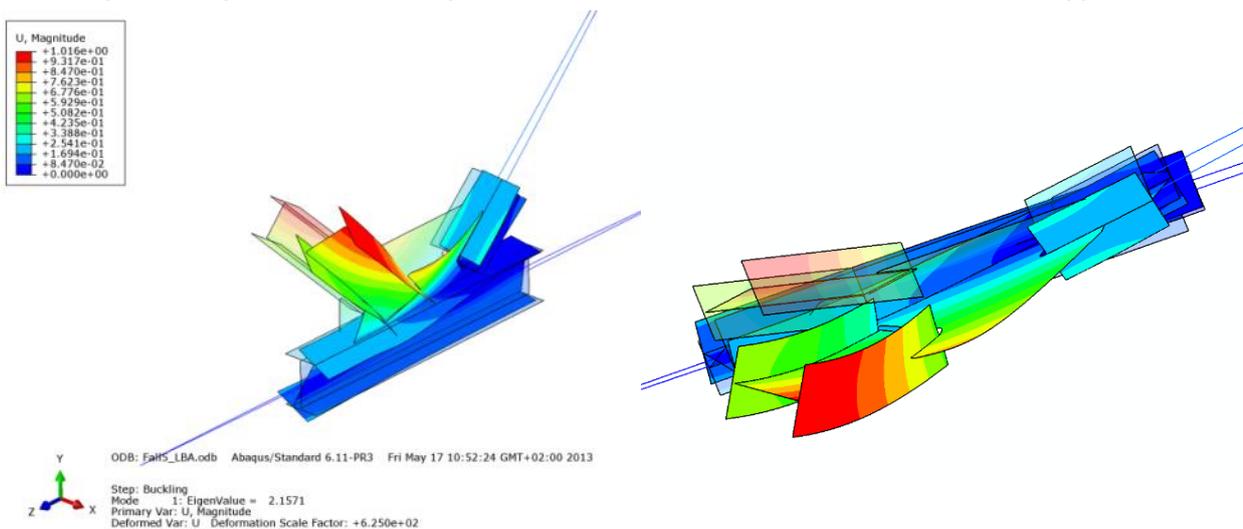


Abbildung B.35 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$.
Abbildung B.36 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1.

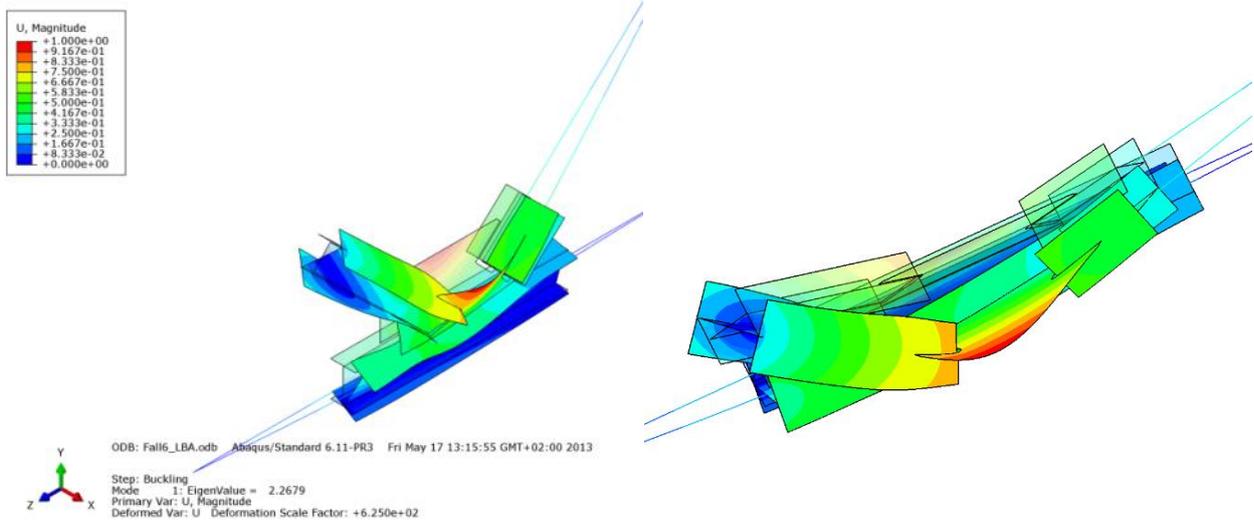


Abbildung B.36 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,3\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 3,2\text{mm}$), wie der Abbildung B.37 entnommen werden kann.

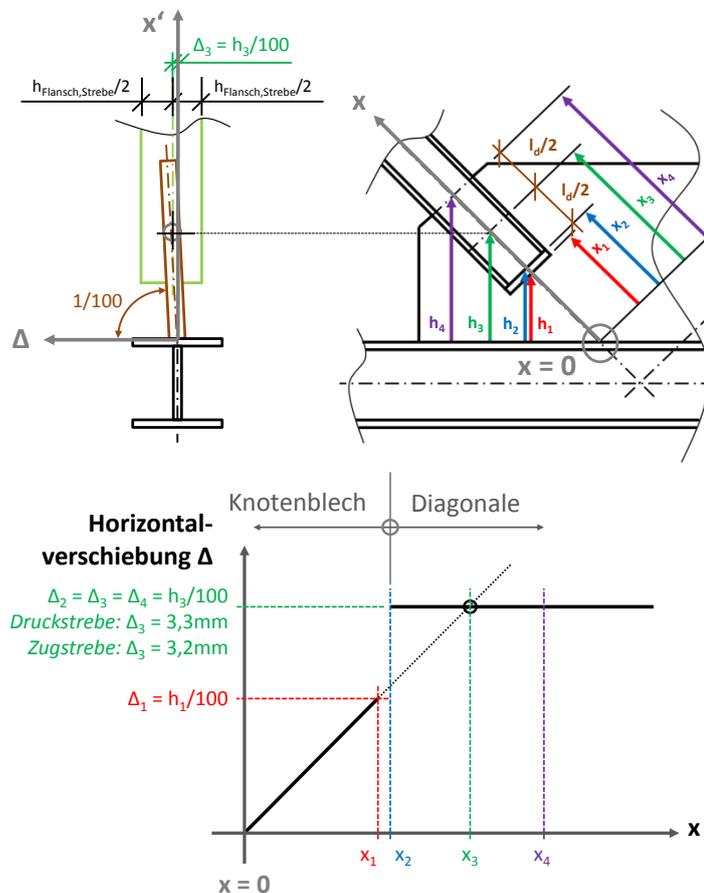


Abbildung B.37 – Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion Knotenblech

B - 4.2.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.2.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen der Druckstrebe sowie des Untergurtstabes. Plastizierung tritt hauptsächlich in den Diagonalen und im Untergurt, sowie im Einbindebereich der Druckdiagonale im Knotenblech auf. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurts limitiert hier die Traglast, wie die Abbildungen B.38 bis B.41 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

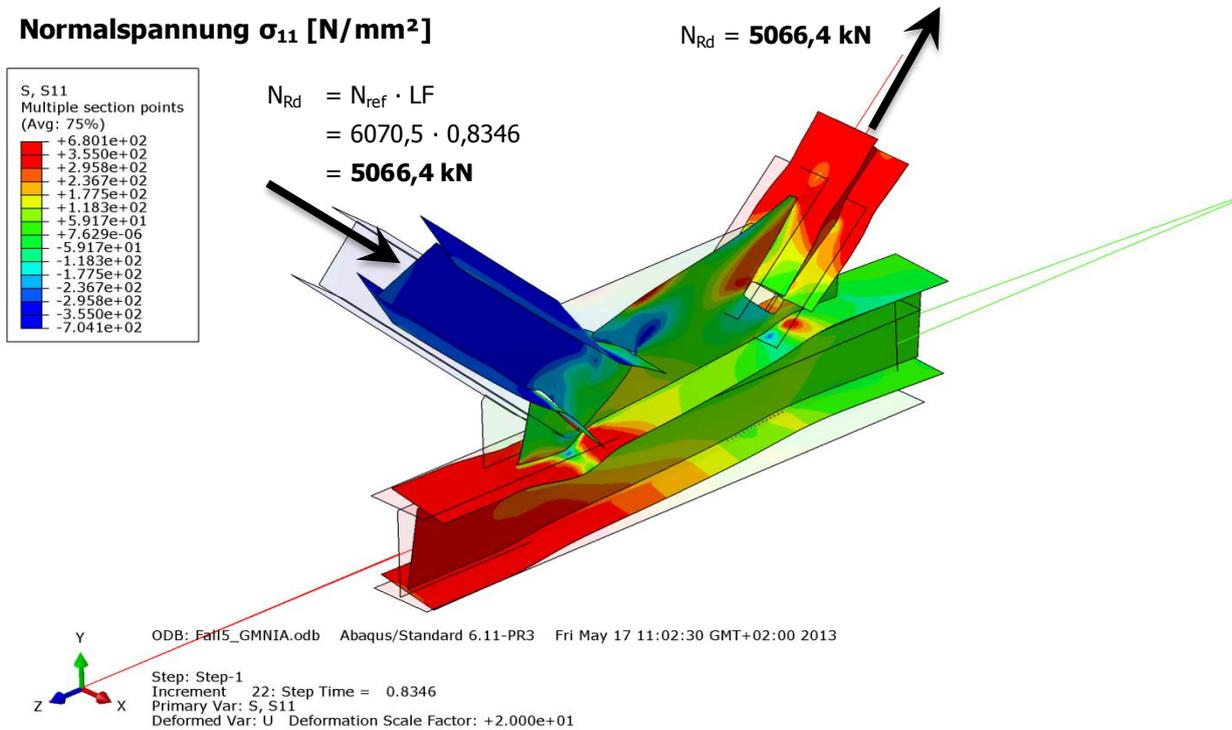


Abbildung B.38 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

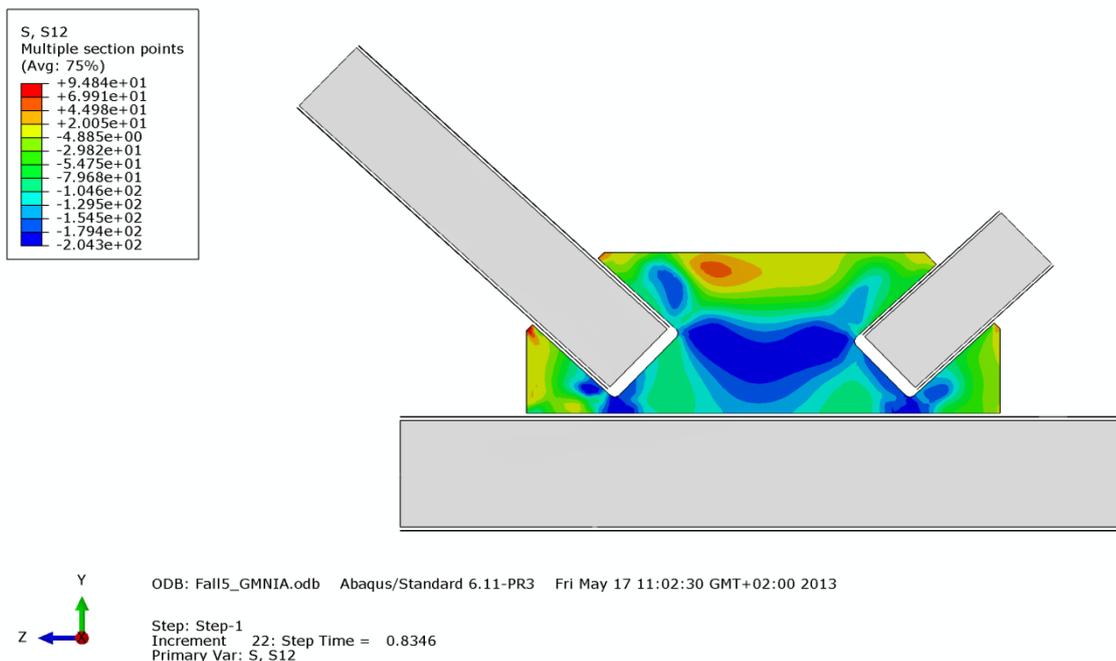


Abbildung B.39 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

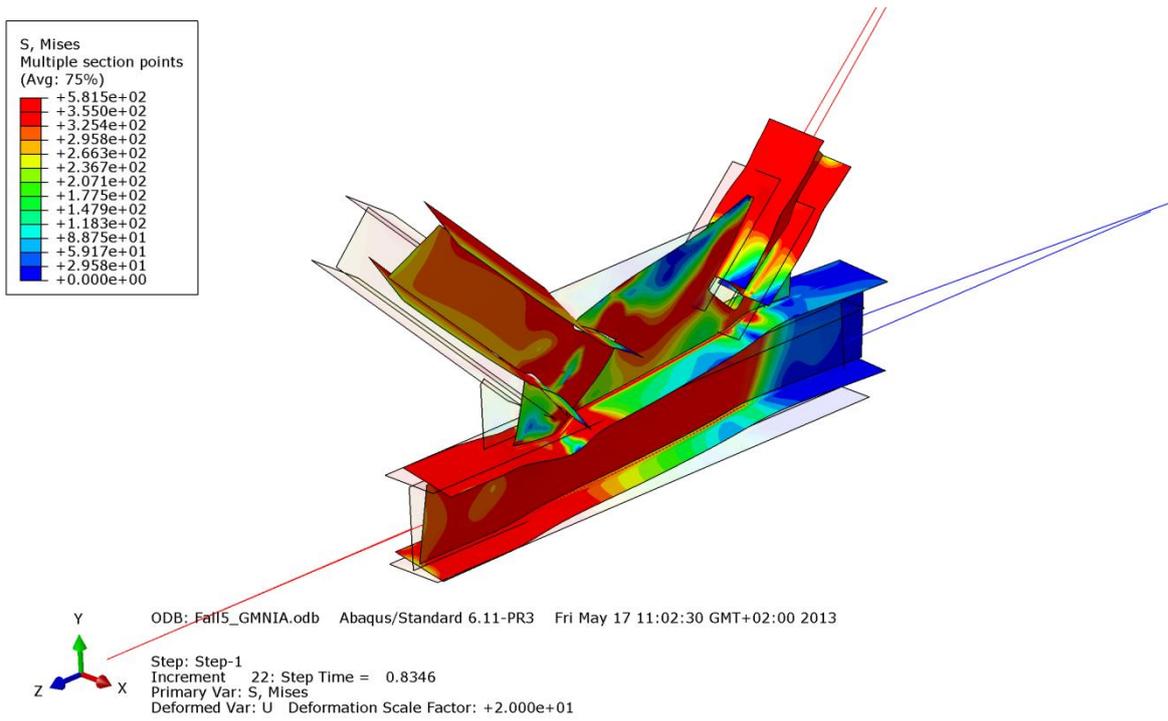


Abbildung B.40 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

• **Verformung [N/mm²]**

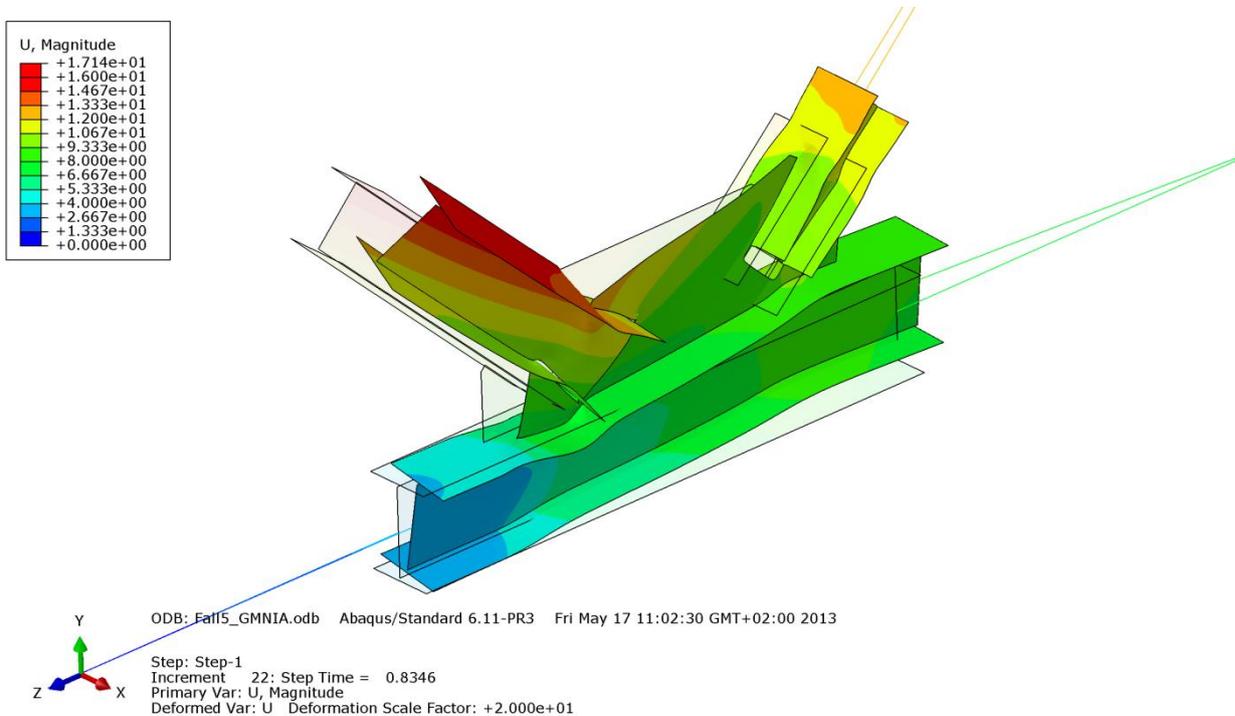


Abbildung B.41 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

B - 4.2.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist geprägt durch eine Längsverschiebung der Druckdiagonale und dem Ausweichen mit kombinierter Verdrehung des Untergurtstabes. Plastizierung tritt hauptsächlich in den Diagonalen und im Untergurt, sowie im Einbindebereich der Druckstrebe im Knotenblech auf. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurts limitiert hier die Traglast, wie die Abbildungen B.42 bis B.45 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

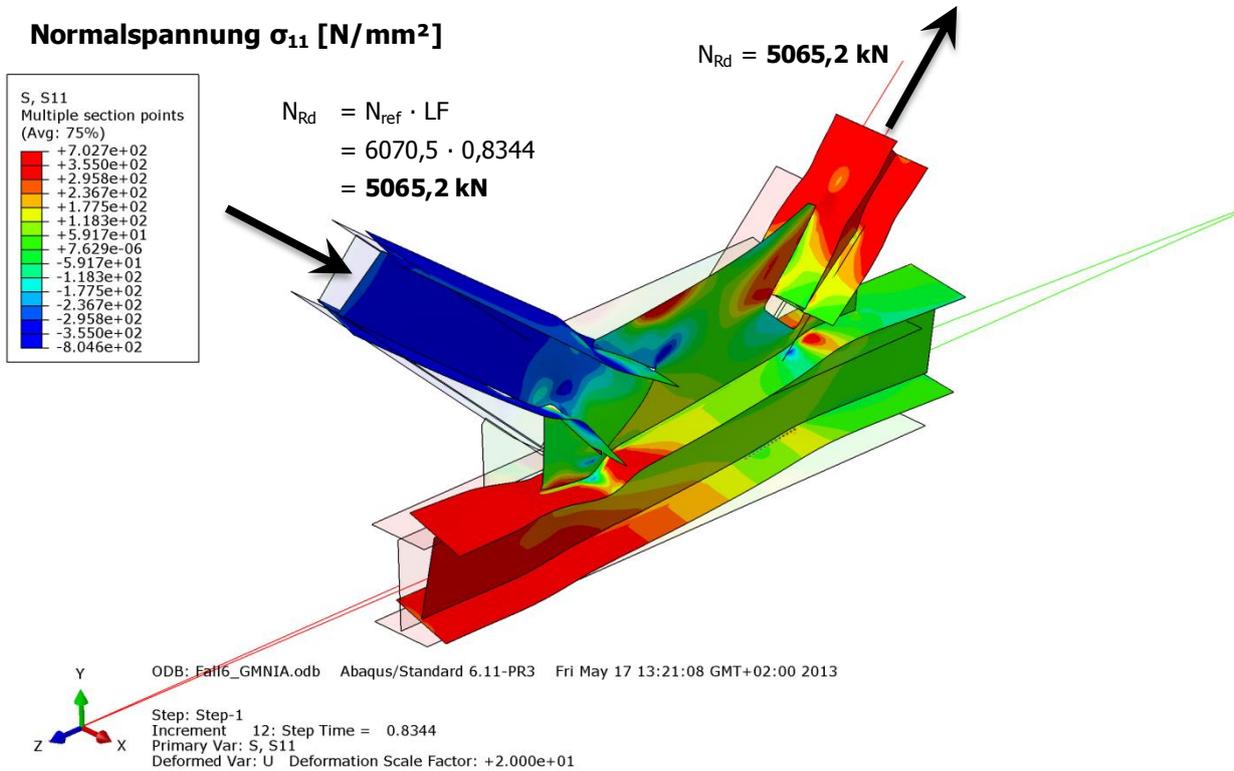


Abbildung B.42 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

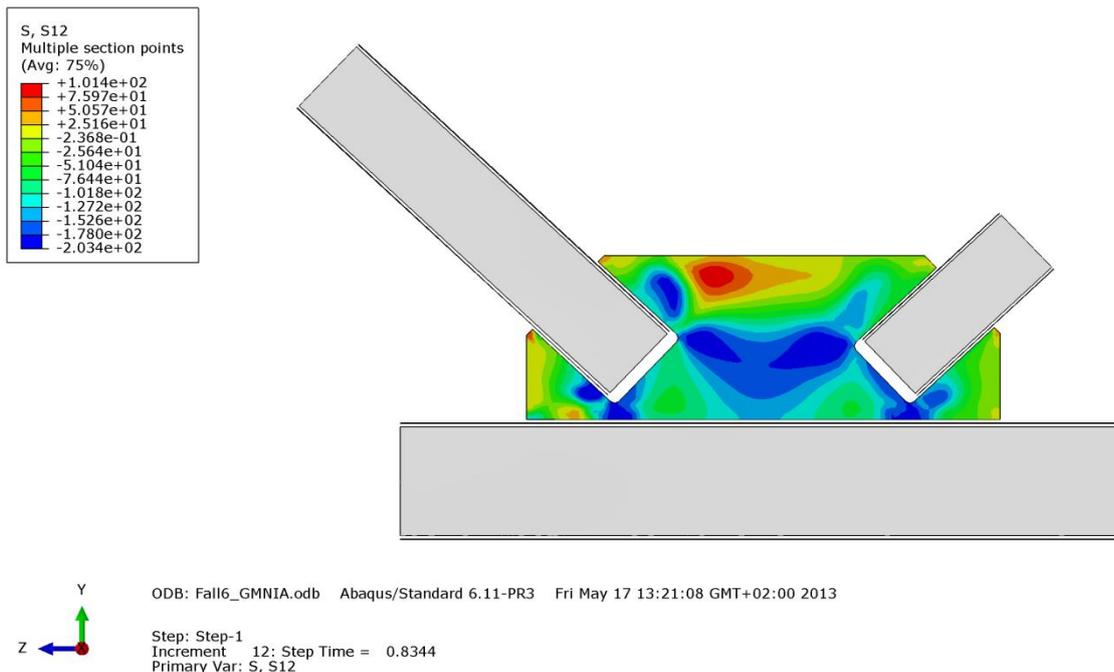


Abbildung B.43 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

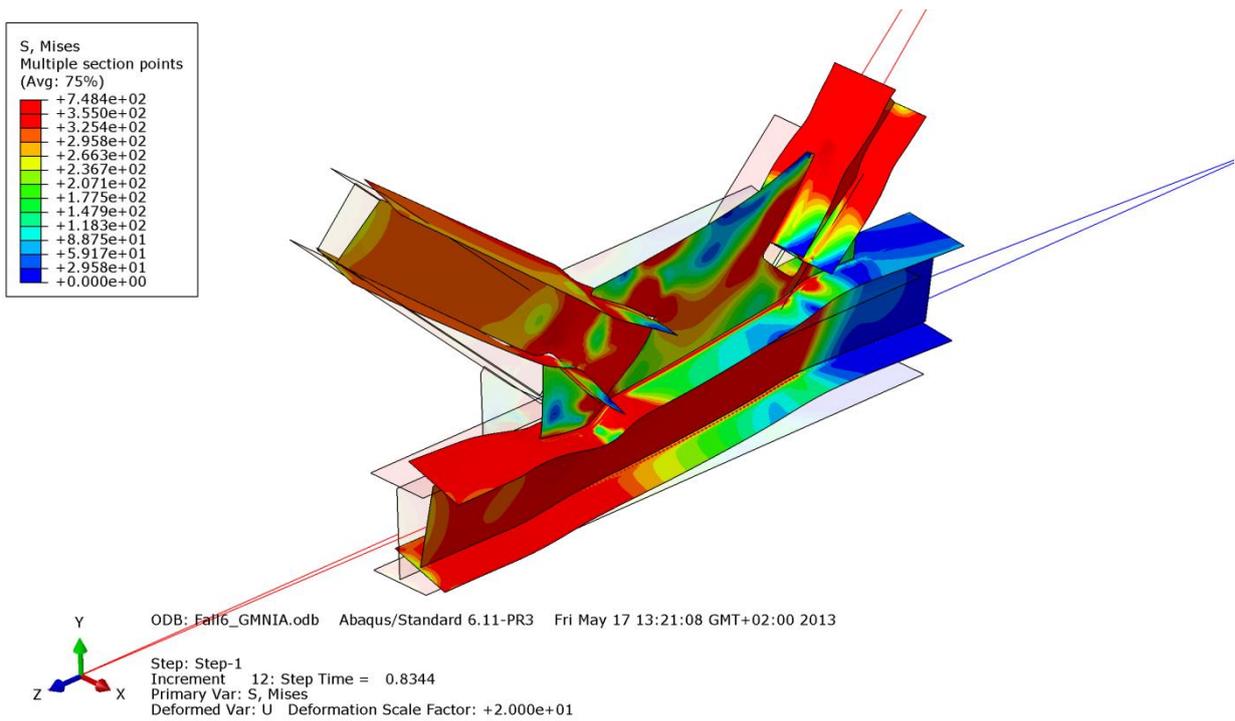


Abbildung B.44 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [N/mm²]**

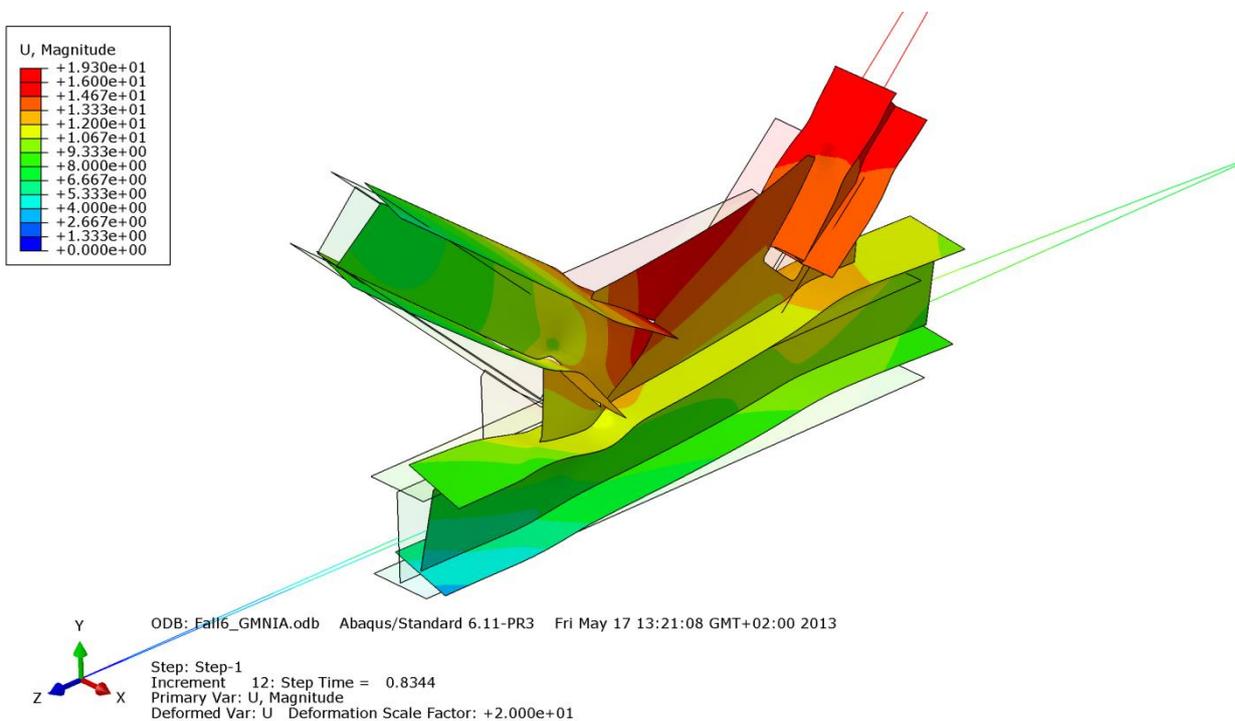


Abbildung B.45 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.2.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung der Druckdiagonale und des Untergurtstabes und dem Ausweichen mit kombinierter Verdrehung des Knotenbleches. Plastizierung tritt hauptsächlich in den Diagonalen und im Untergurt, sowie im Einbindebereich der Druckdiagonale in das Knotenblech auf. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurts limitiert hier die Traglast, wie die Abbildungen B.46 bis B.49 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

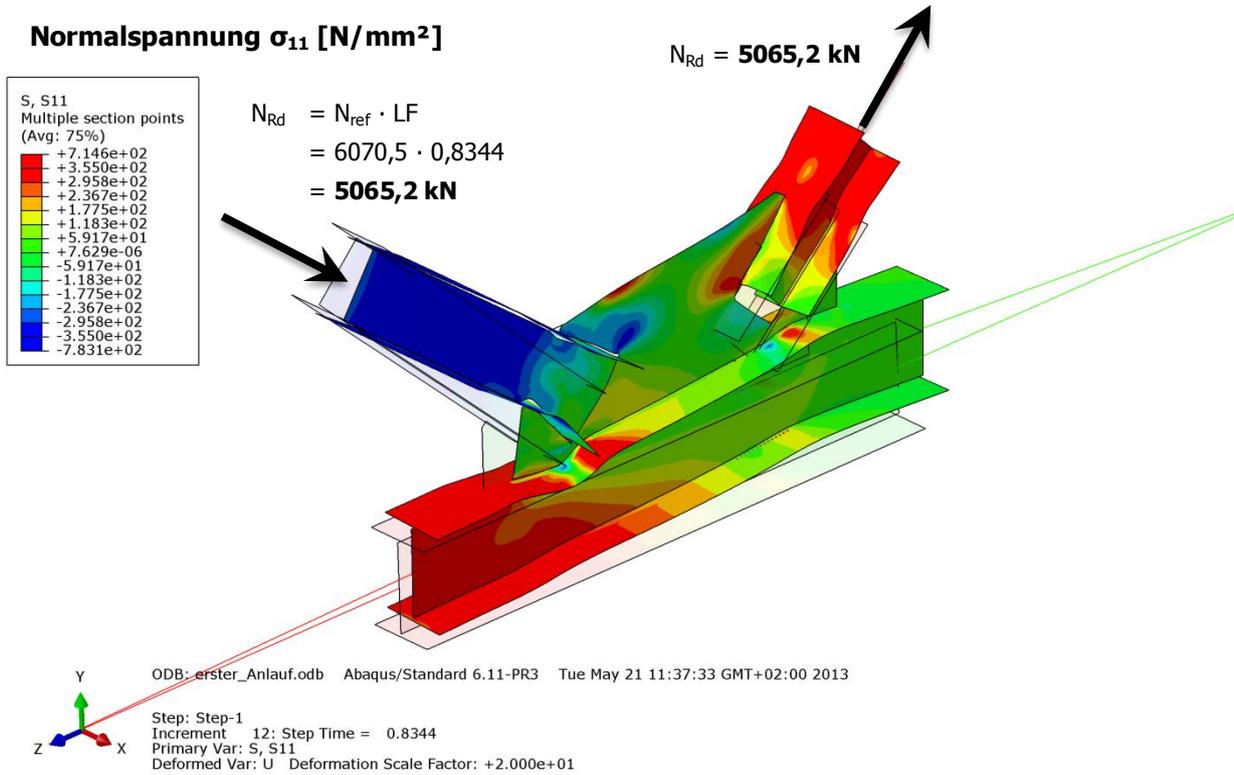


Abbildung B.46 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

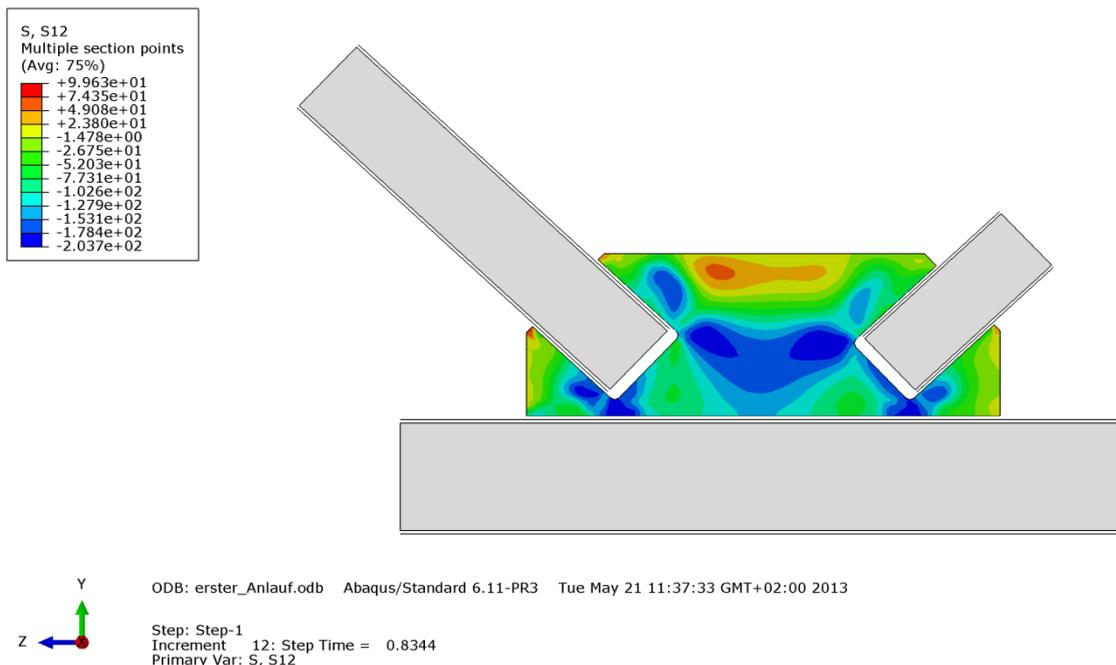


Abbildung B.47 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

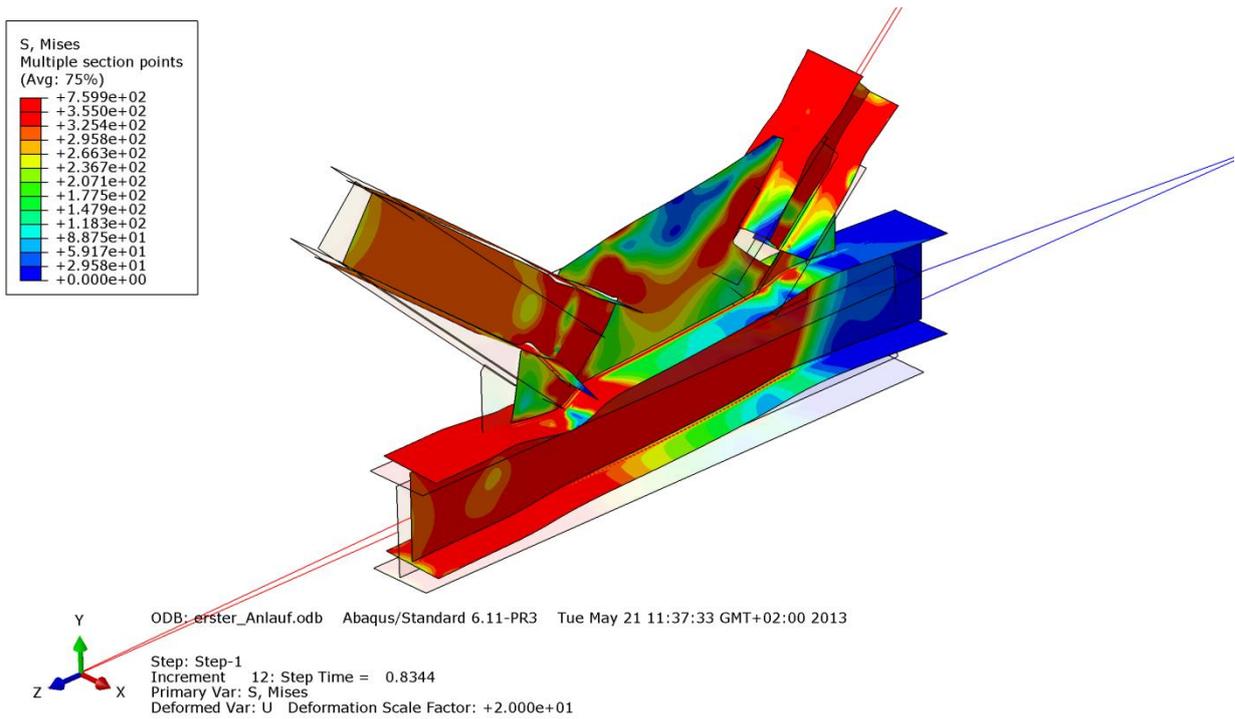


Abbildung B.48 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

• **Verformung [mm]**

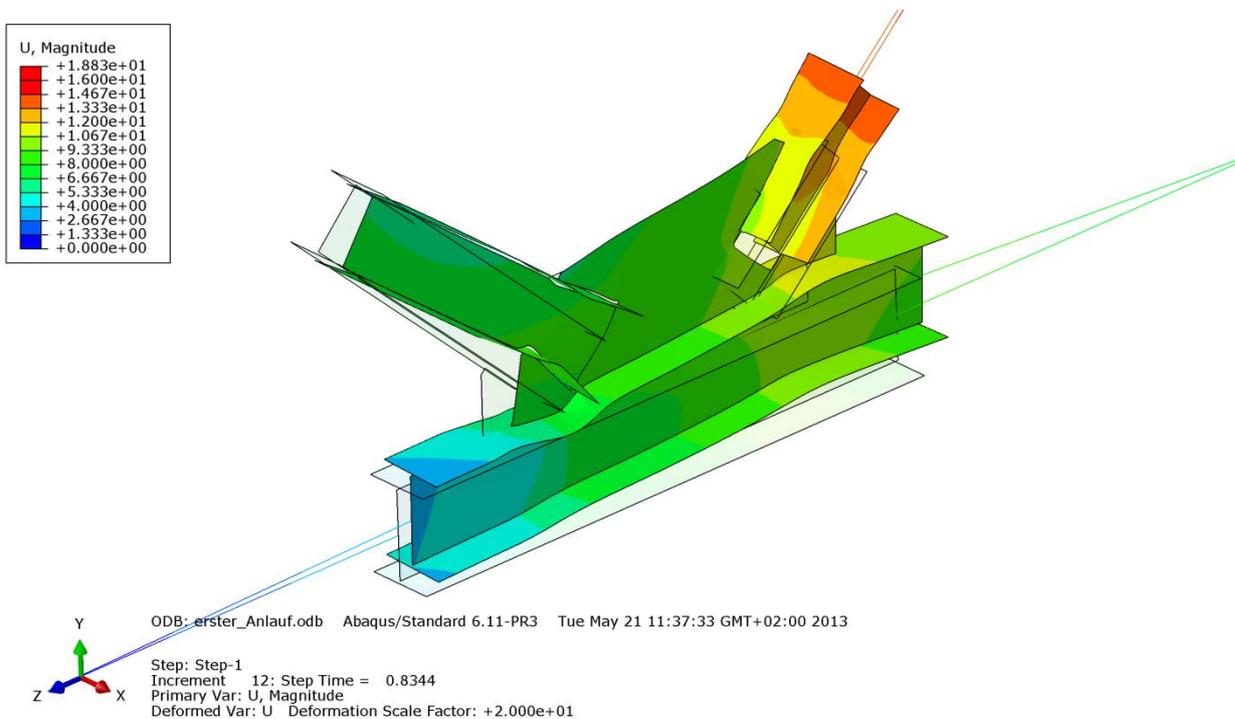


Abbildung B.49 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

B - 4.2.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Knicken des Stabes. Es erfolgt eine Plastizierung des Stabmaterials aufgrund der Drucknormalkraft, wie in den Abbildungen B.50 und B.51 zu erkennen ist.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/200 = 4303\text{mm}/200 = 21,5\text{mm}$.

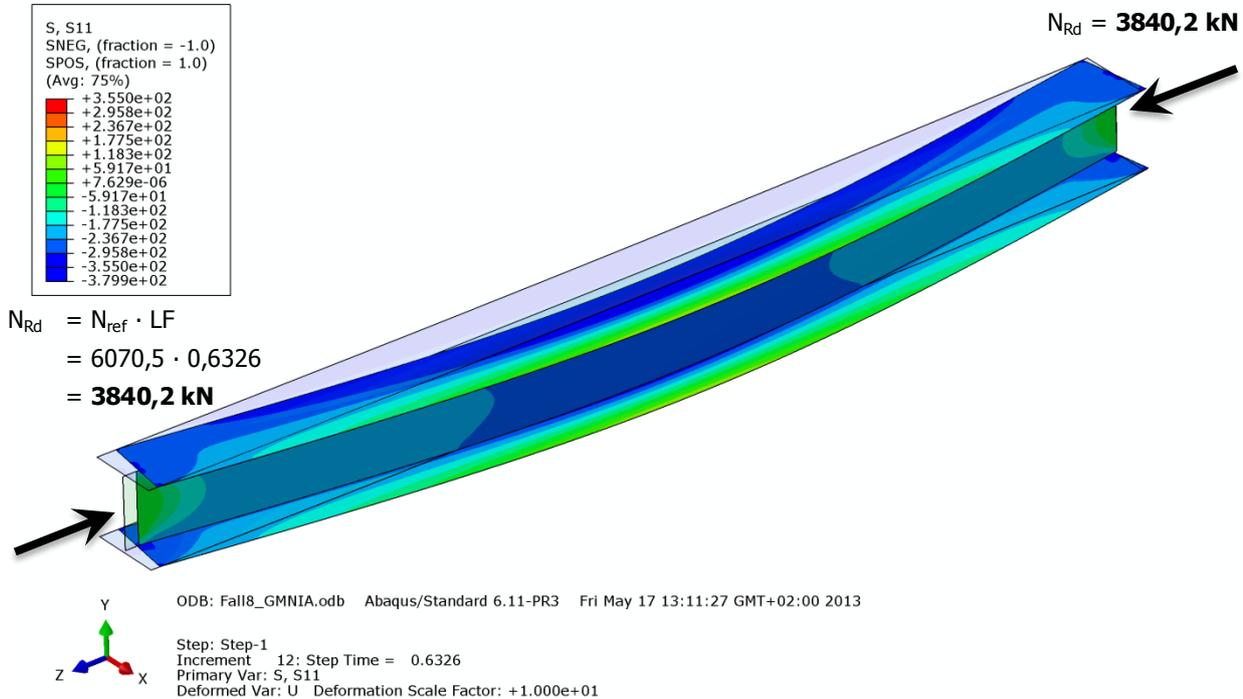


Abbildung B.50 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$.

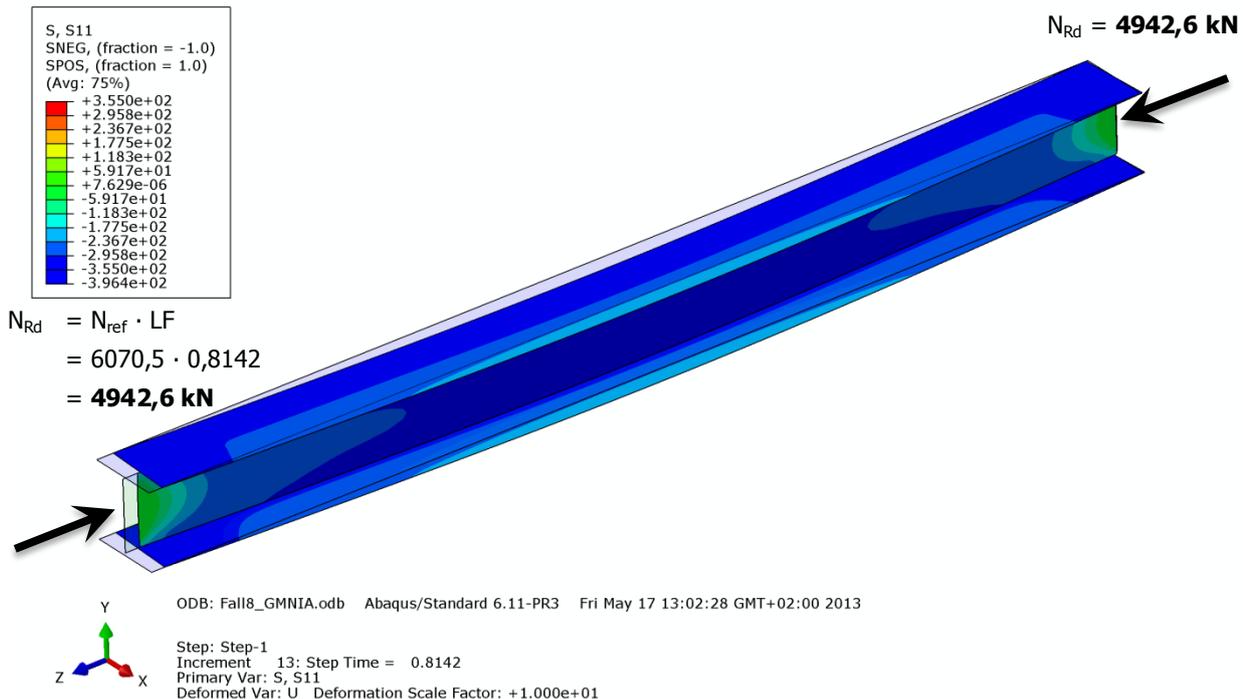


Abbildung B.51 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.3 Gruppe 2

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 2 zu charakterisieren sind in Tabelle B.16 zusammengefasst.

Gruppe 2			
Profil der Druckstrebe:	HEA 140	Systemlänge L^* =	4581mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,670
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	30,1cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4320mm
$t_{Knotenblech}$ =	12mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,575
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 180	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.16 – FE-Eingangsdaten Gruppe 2

B - 4.3.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.52, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.53 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.54 entnommen werden kann.

• Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4581\text{mm}/750 = 6,1\text{mm}$. Abbildung B.52 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 2.

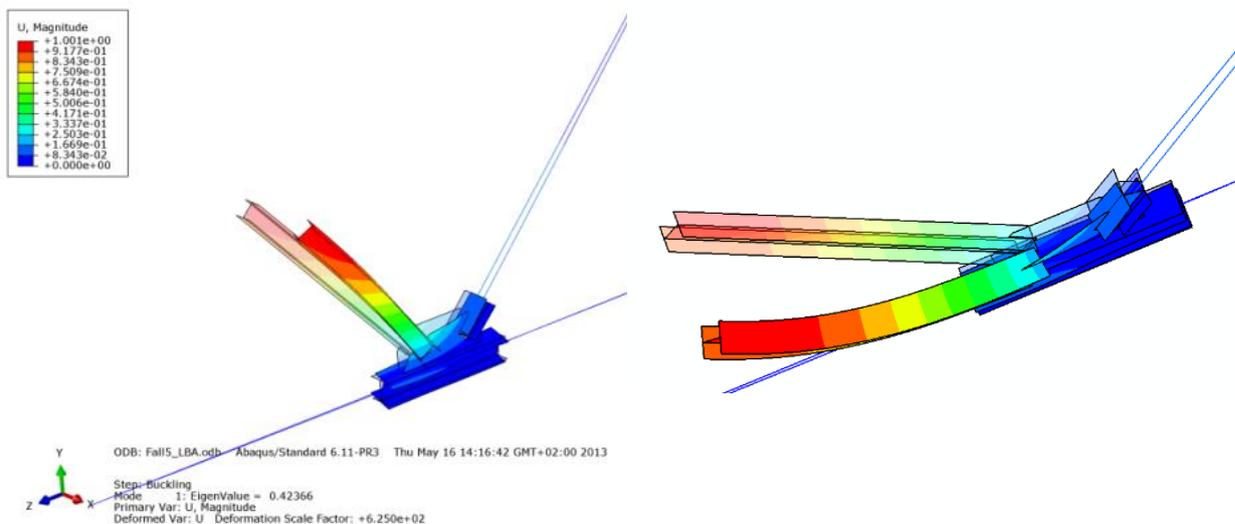


Abbildung B.52 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 2 – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4581\text{mm}/750 = 6,1\text{mm}$. Abbildung B.53 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 2.

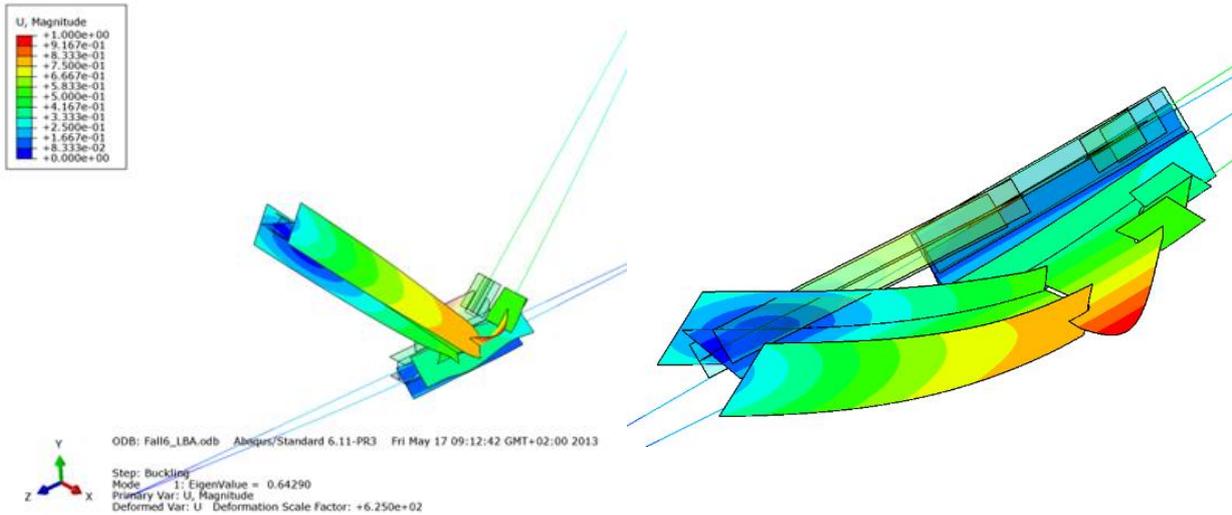


Abbildung B.53 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 2 – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (Druckstrebe und Zugstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 1,7\text{mm}$), wie der Abbildung B.54 entnommen werden kann.

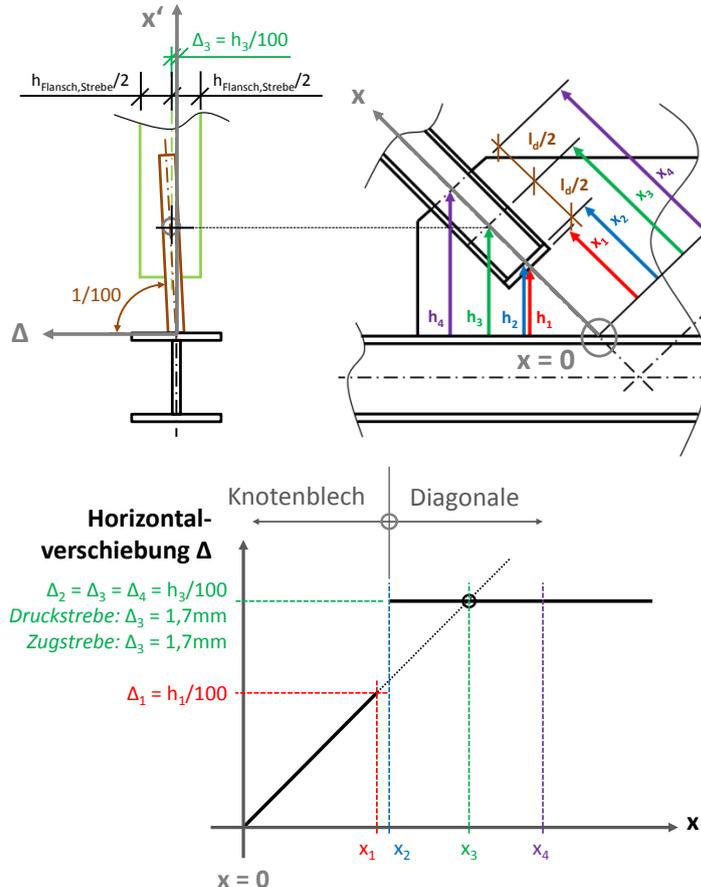


Abbildung B.54 – Eigenform der Gruppe 2 – Imperfektion Knotenblech

B - 4.3.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.3.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen der sehr schlanken Druckdiagonale in Kombination mit dem Knotenblech, wie den Abbildungen B.55 bis B.58 zu entnehmen ist. Die Randfasern der Druckstrebenflansche plastizieren auf der Biegedruckseite.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

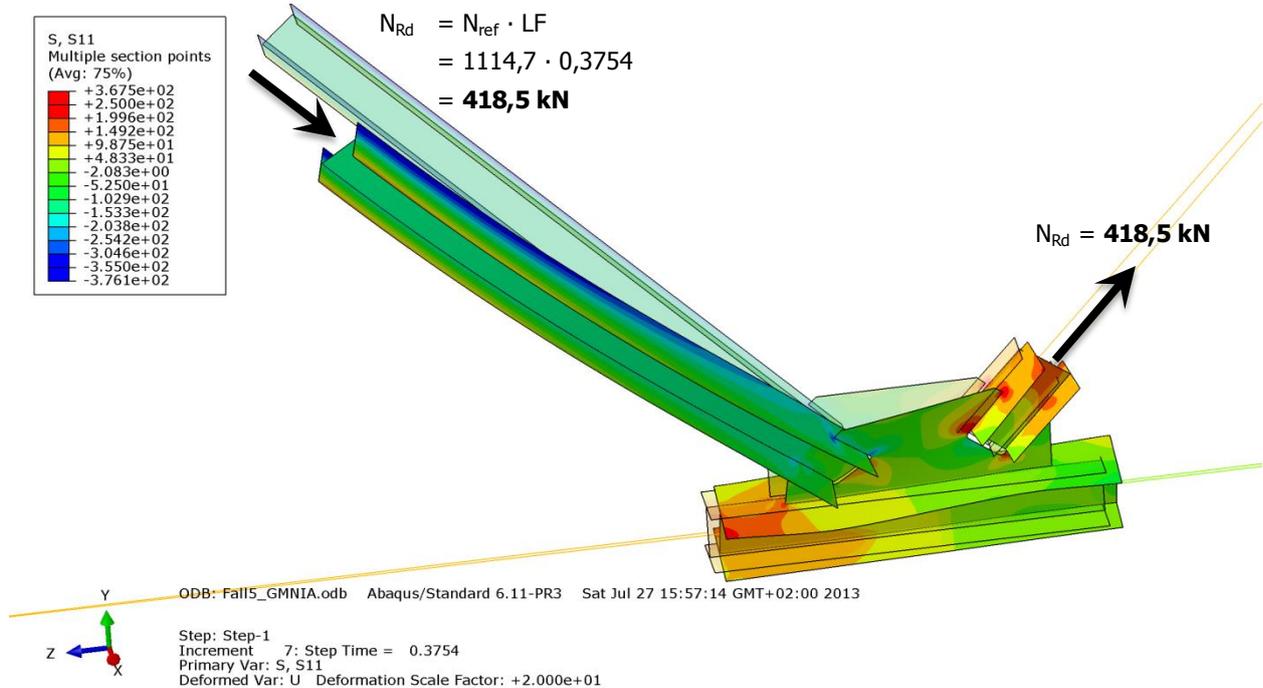


Abbildung B.55 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

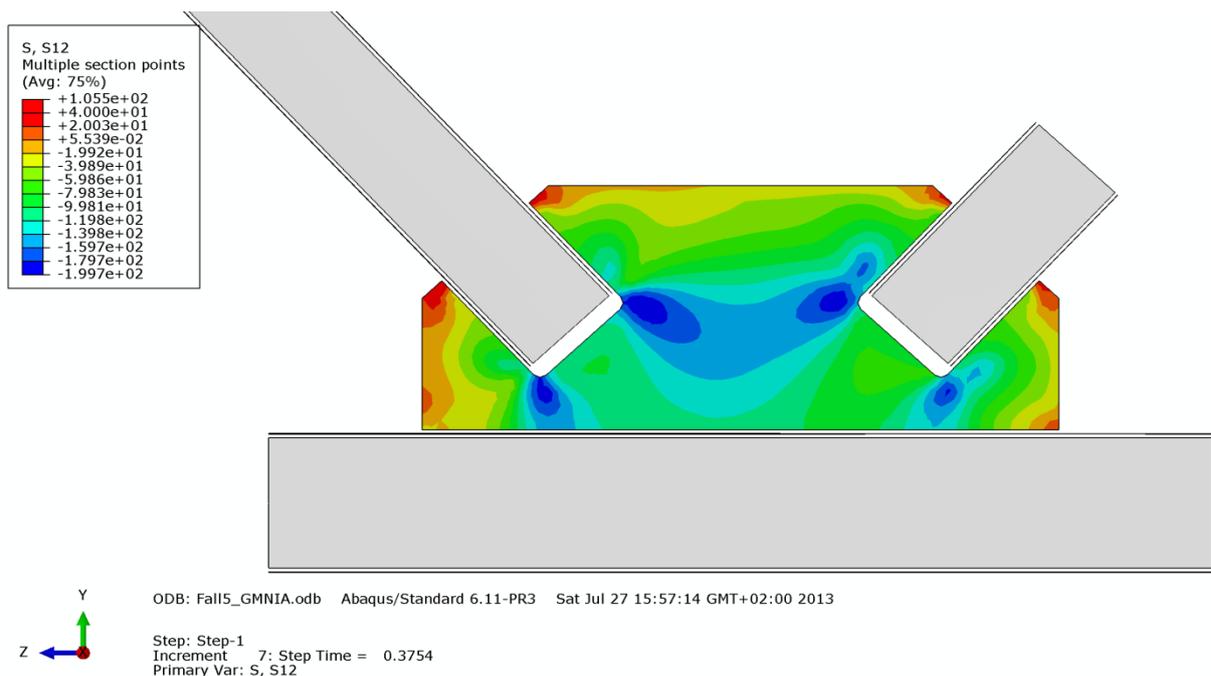


Abbildung B.56 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

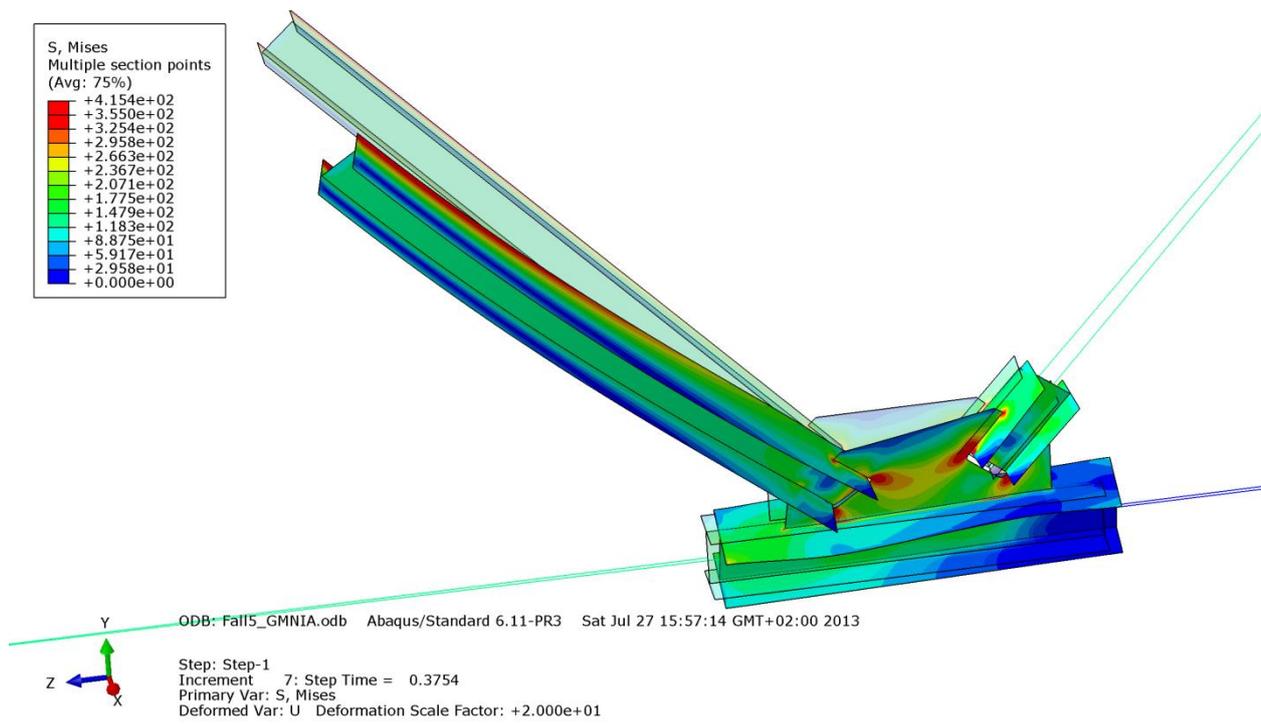


Abbildung B.57 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

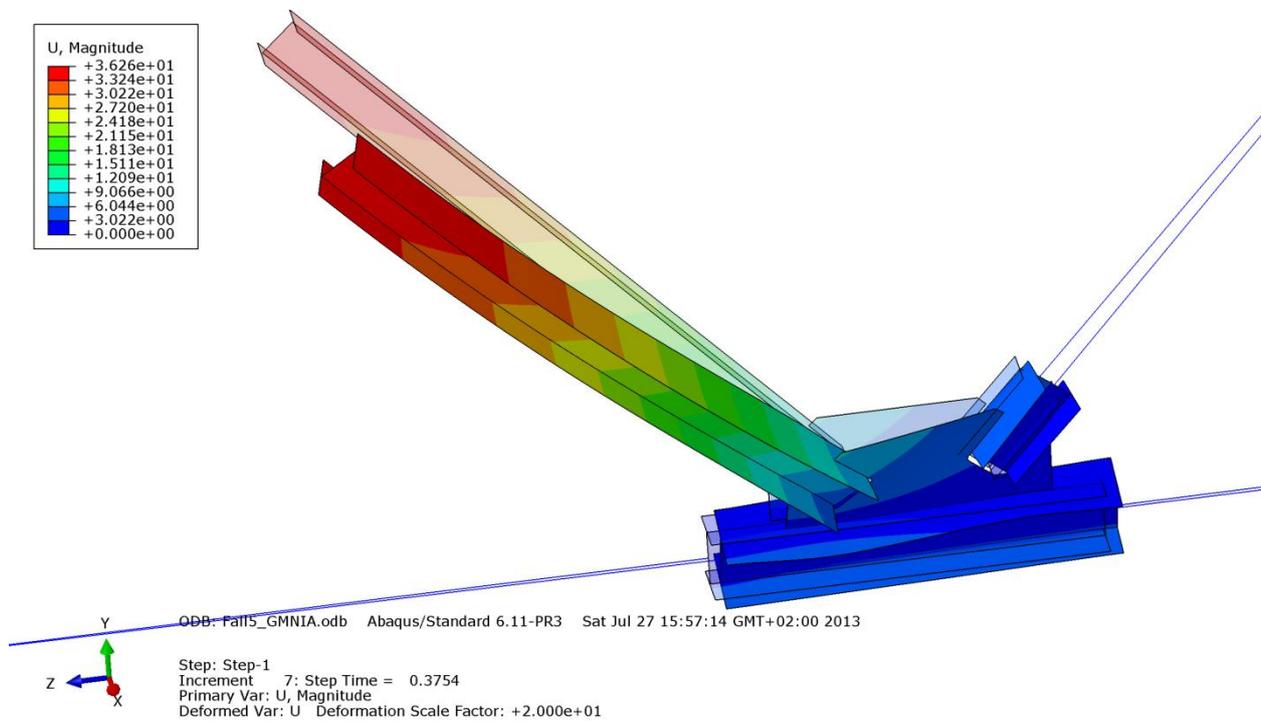


Abbildung B.58 – Verformung U [mm] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

B - 4.3.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen des Untergurtstabes mit kombinierter Verdrehung. Das Knotenblech knickt aus und plastiziert, wie die Abbildungen B.59 bis B.62 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

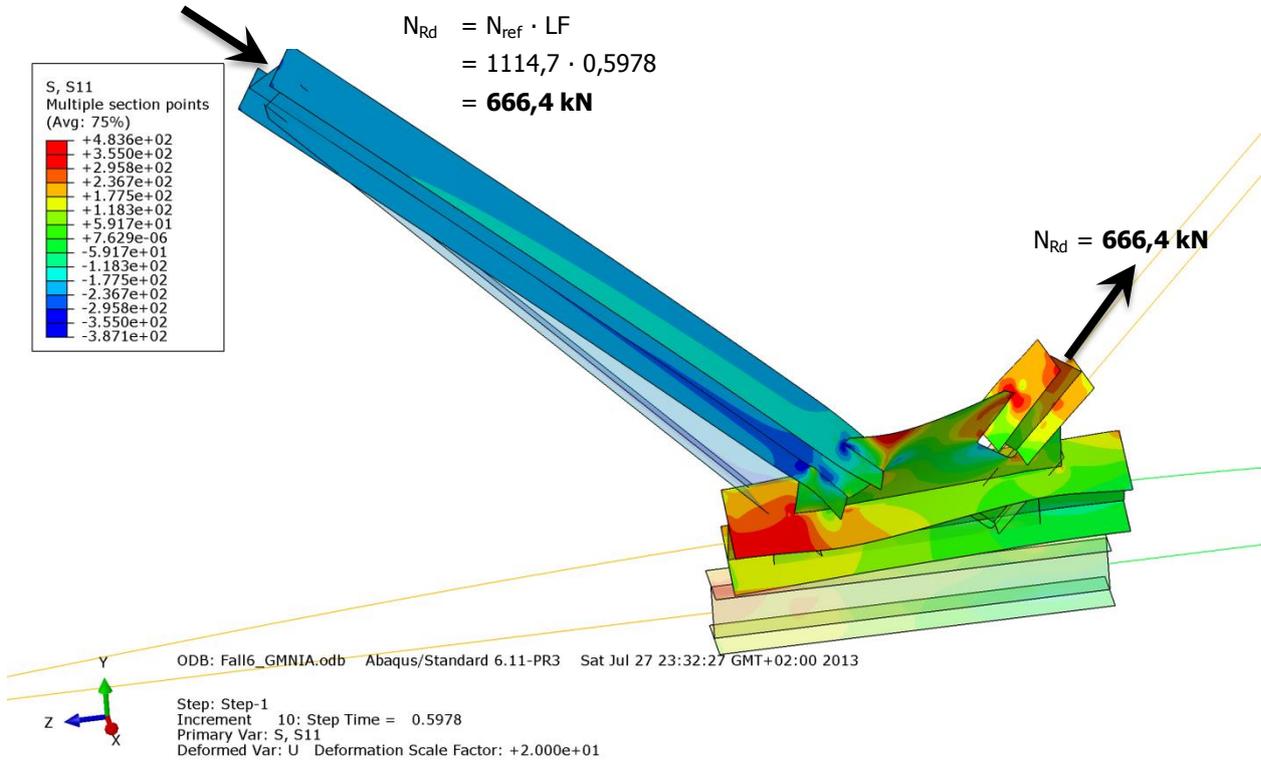


Abbildung B.59 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannungen σ_{12} [N/mm²]**

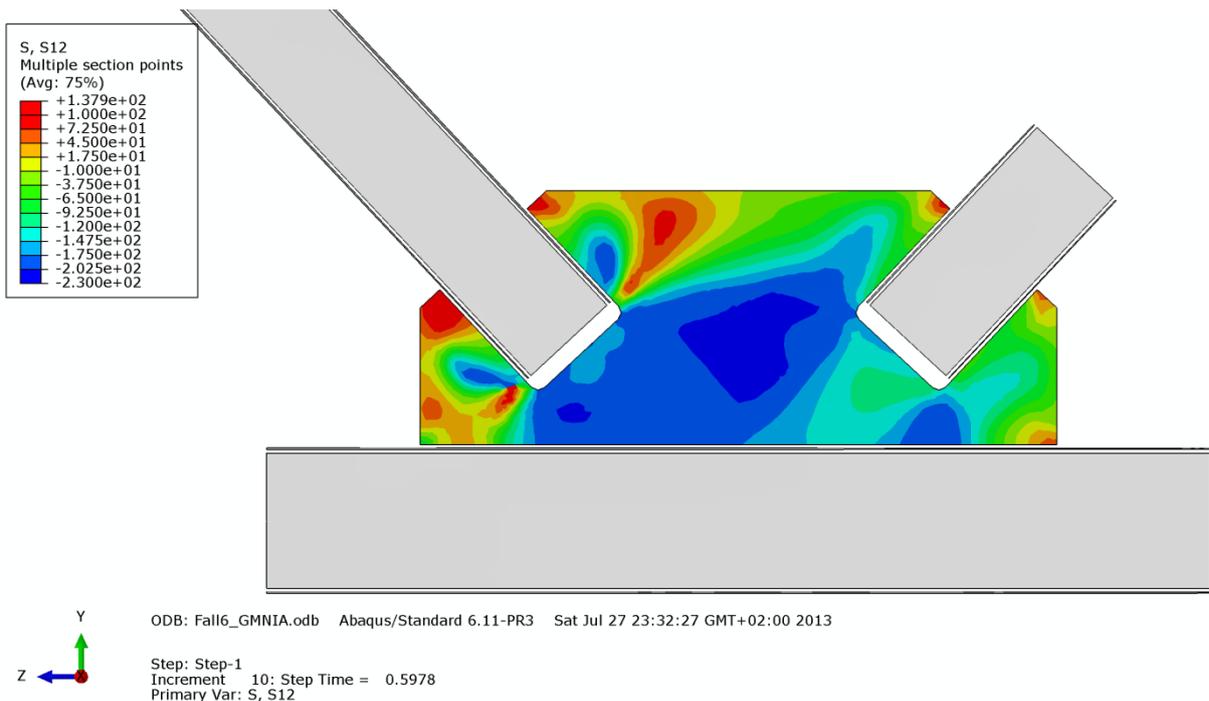


Abbildung B.60 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

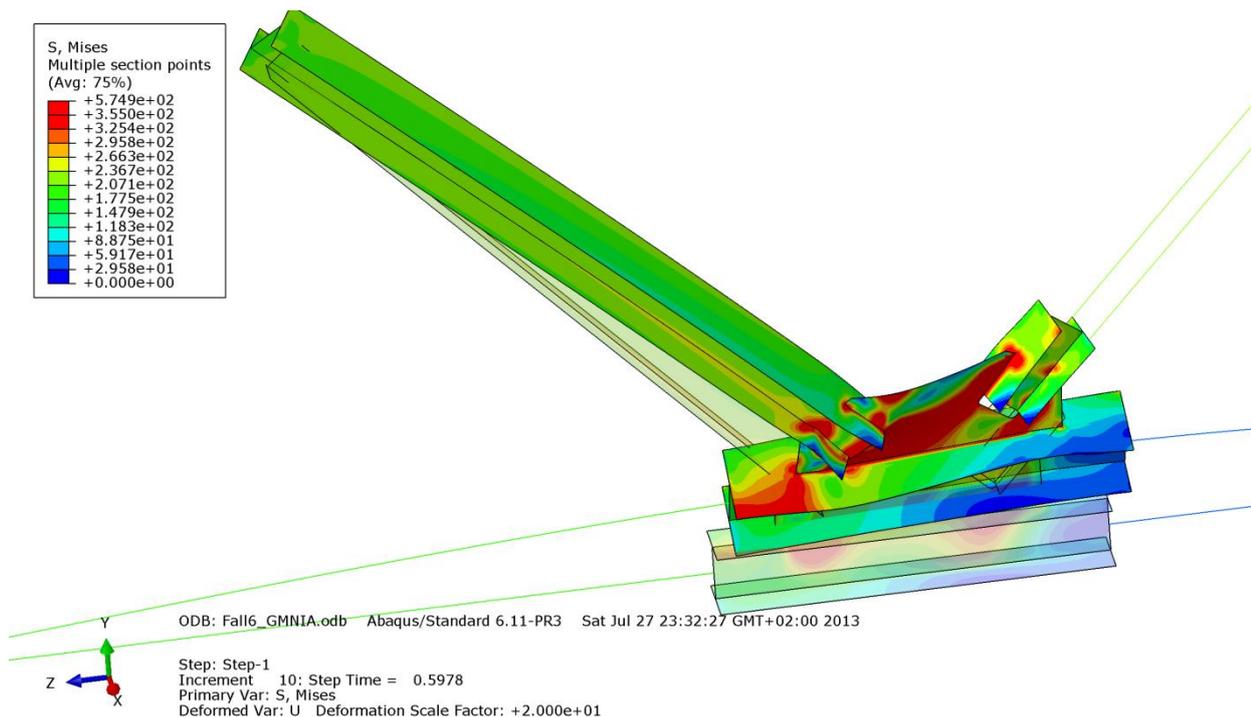


Abbildung B.61 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

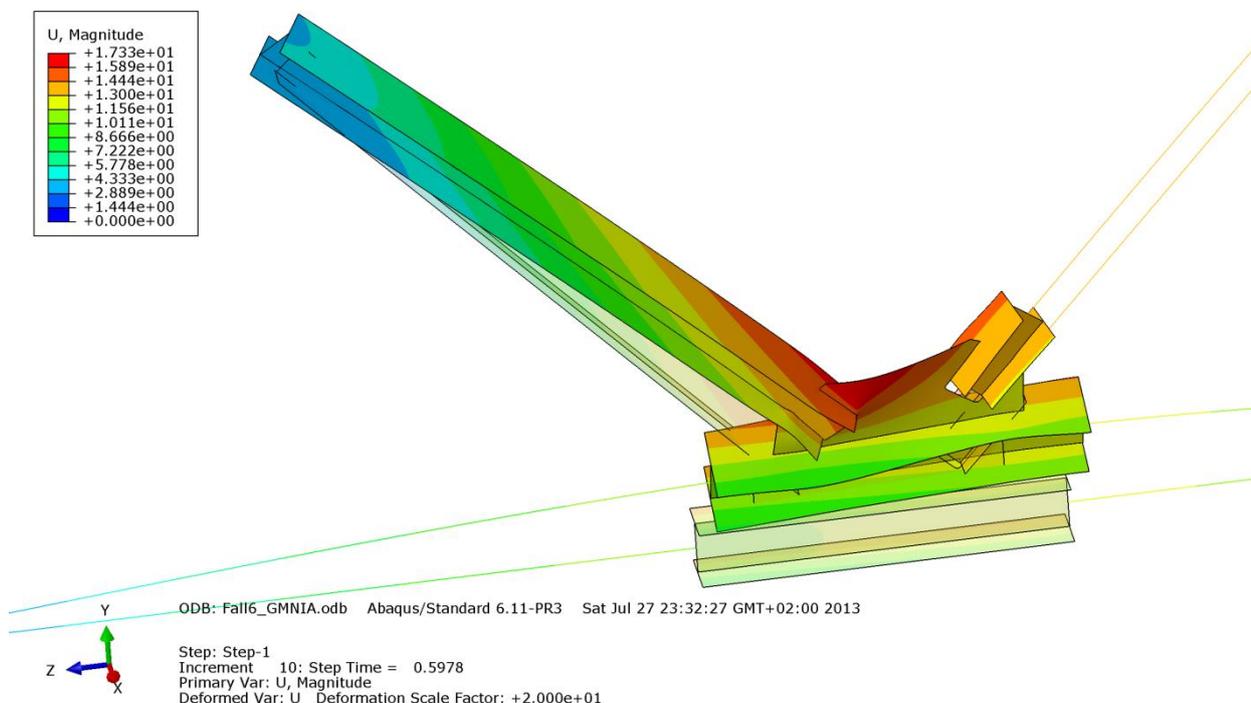


Abbildung B.62 – Verformung U [mm] der Gruppe 2 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.3.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe und des Untergurtstabes. Das Knotenblech knickt aus und plastiziert, wie die Abbildungen B.63 bis B.66 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

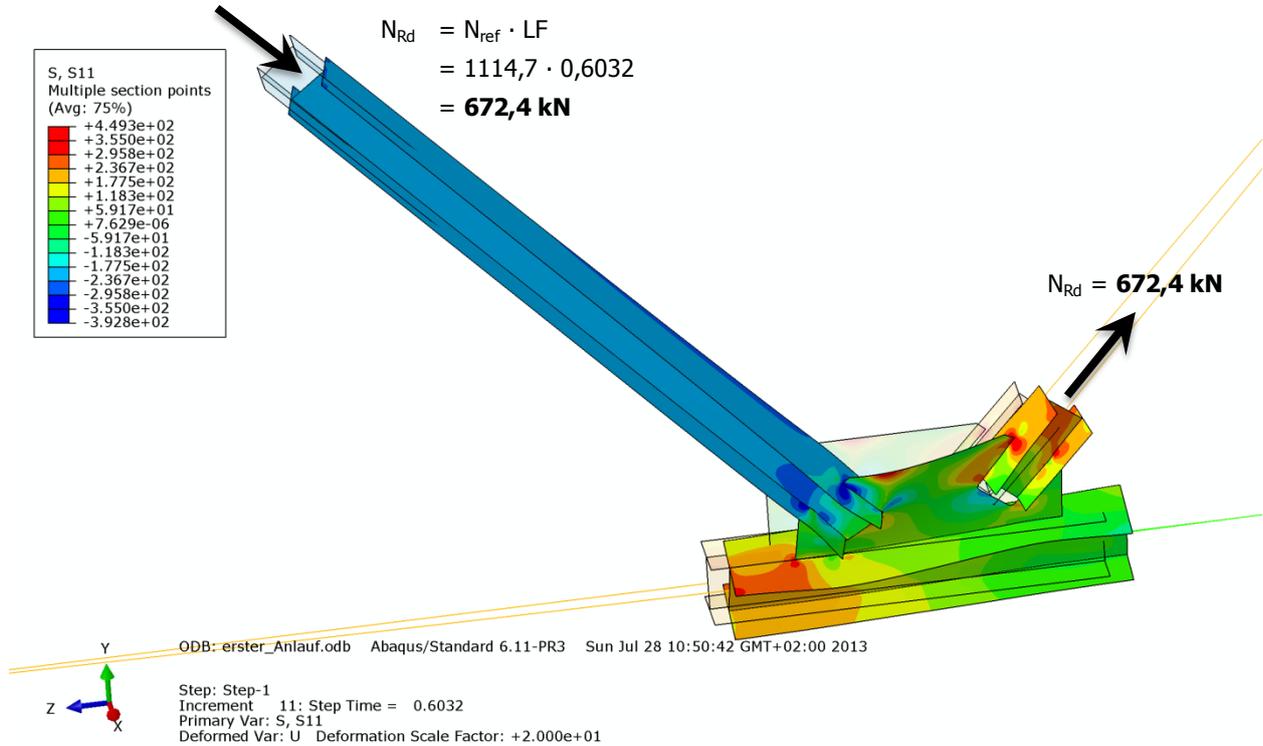


Abbildung B.63 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

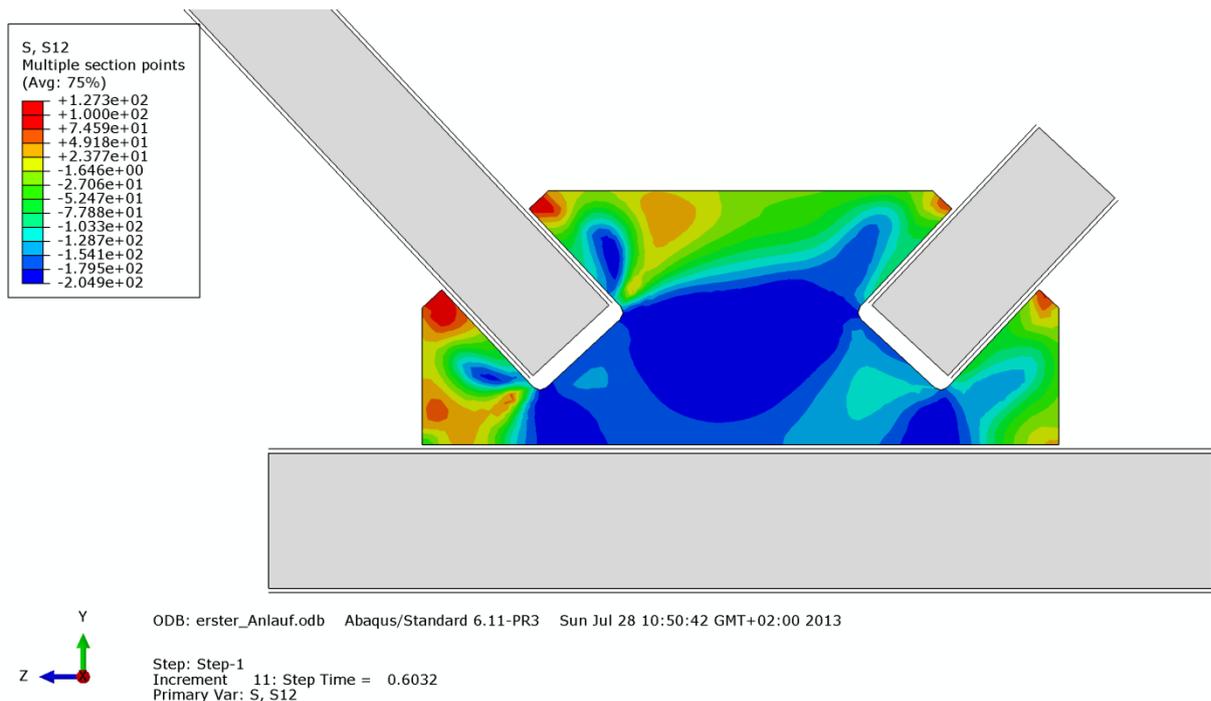


Abbildung B.64 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 2 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

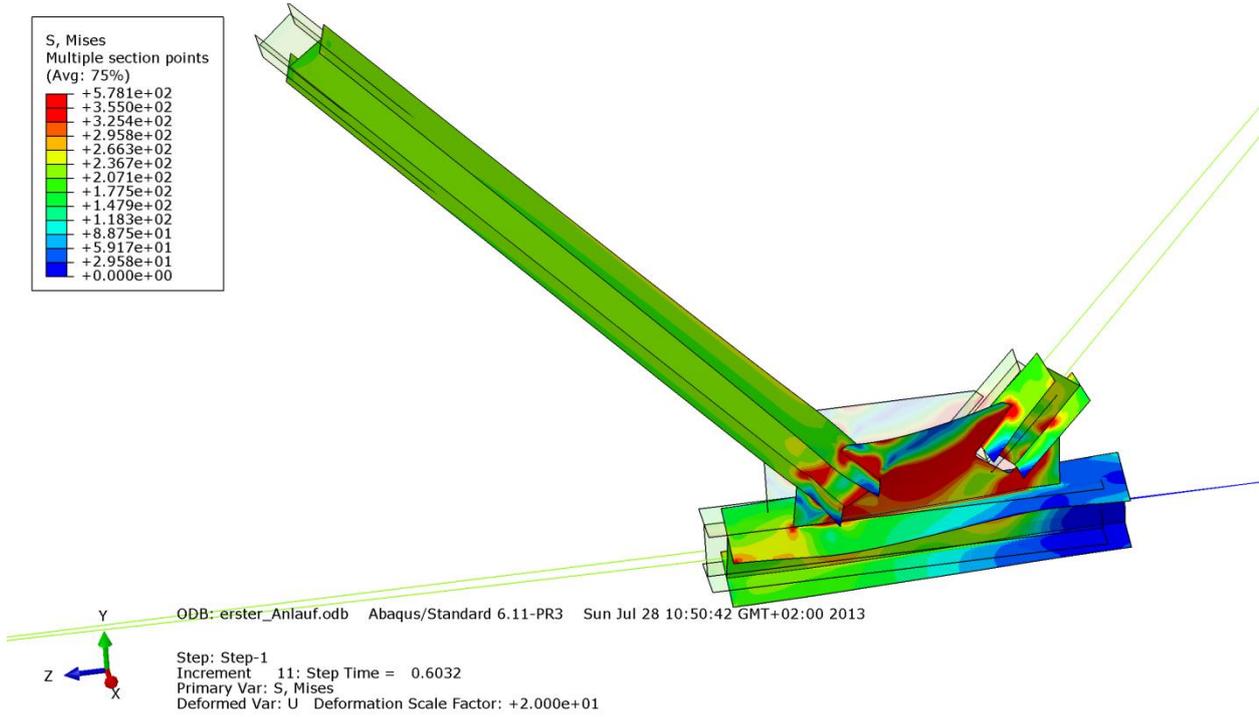


Abbildung B.65 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 2 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Verformung [mm]**

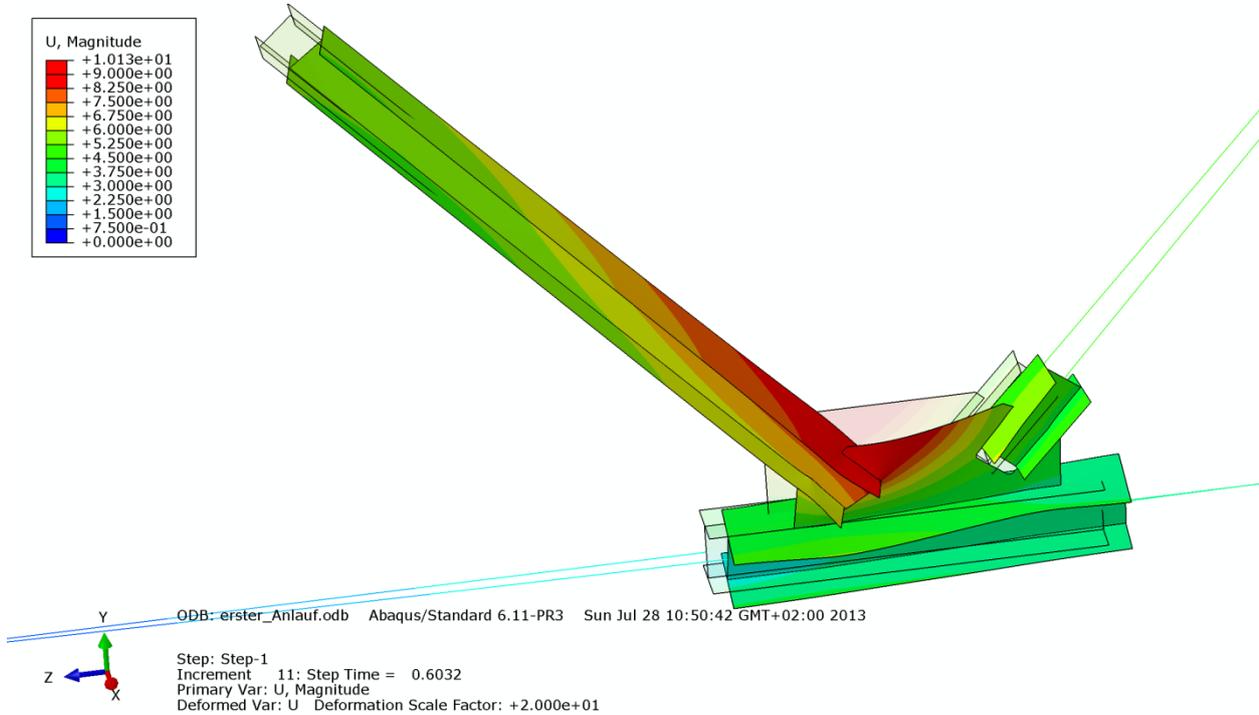


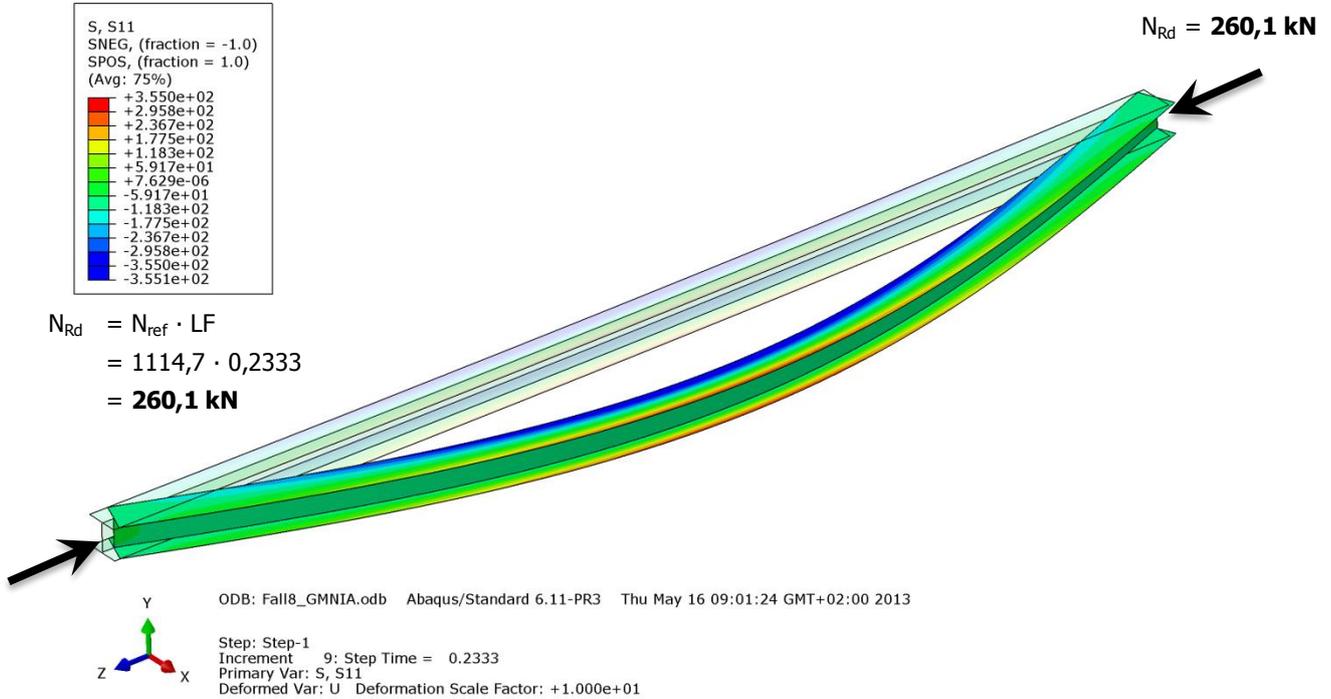
Abbildung B.66 – Verformung U [mm] der Gruppe 2 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

B - 4.3.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform ist Knicken der Druckstrebe. Durch die Drucknormalkraft plastizieren die Randfasern der Flansche sowohl auf der Biegedruck-, als auch auf der Biegezugseite der Druckstrebe, wie die Abbildungen B.67 und B.68 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knick eigenform beträgt $L^*/750 = 4581\text{mm}/2000 = 22,9\text{mm}$.

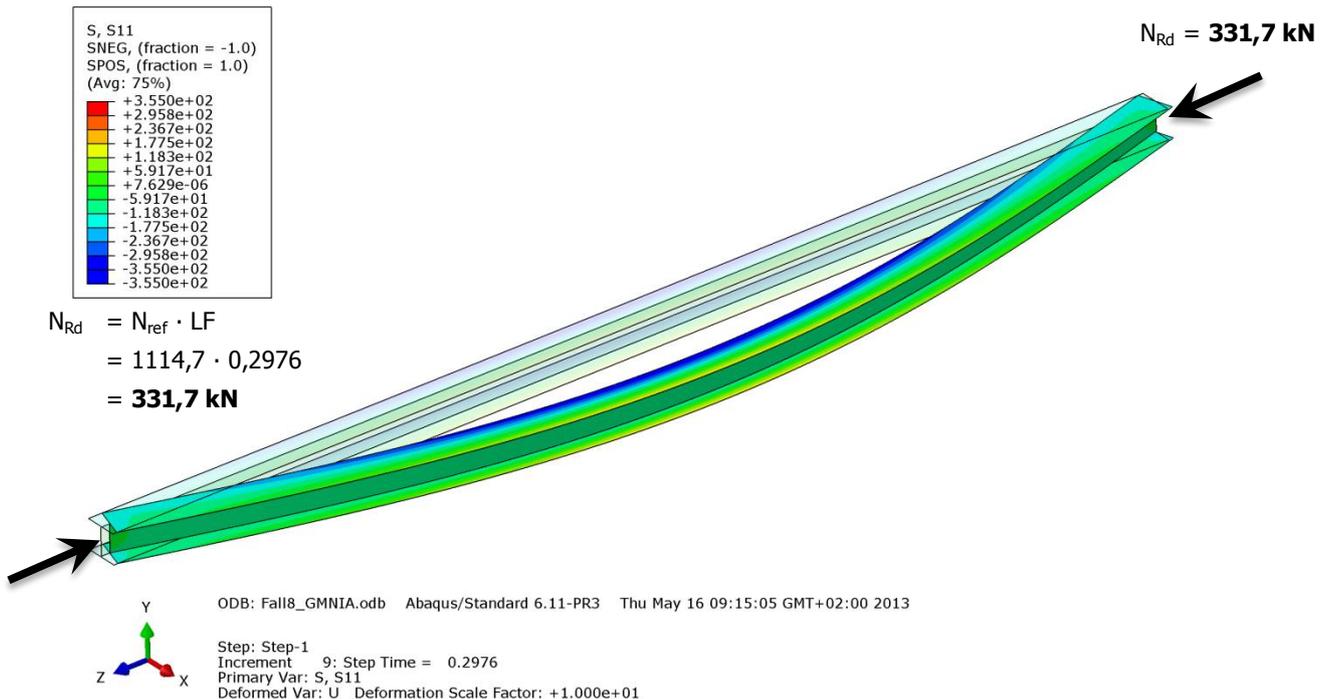


$$\begin{aligned}
 N_{Rd} &= N_{ref} \cdot LF \\
 &= 1114,7 \cdot 0,2333 \\
 &= \mathbf{260,1 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

Abbildung B.67 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knick eigenform beträgt $L^*/750 = 4581\text{mm}/750 = 6,1\text{mm}$.



$$\begin{aligned}
 N_{Rd} &= N_{ref} \cdot LF \\
 &= 1114,7 \cdot 0,2976 \\
 &= \mathbf{331,7 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

Abbildung B.68 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.4 Gruppe 3

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 3 zu charakterisieren sind in Tabelle B.17 zusammengefasst.

Gruppe 3			
Profil der Druckstrebe:	HEA 200	Systemlänge L^* =	4454mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*}$ =	1,141
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	51,1cm ²	L_{ges} =	4159mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{knotenblech}$ =	25mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}}$ =	1,065
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.17 – FE-Eingangsdaten Gruppe 3

B - 4.4.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.69, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.70 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.71 entnommen werden kann.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4454\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.69 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 3.

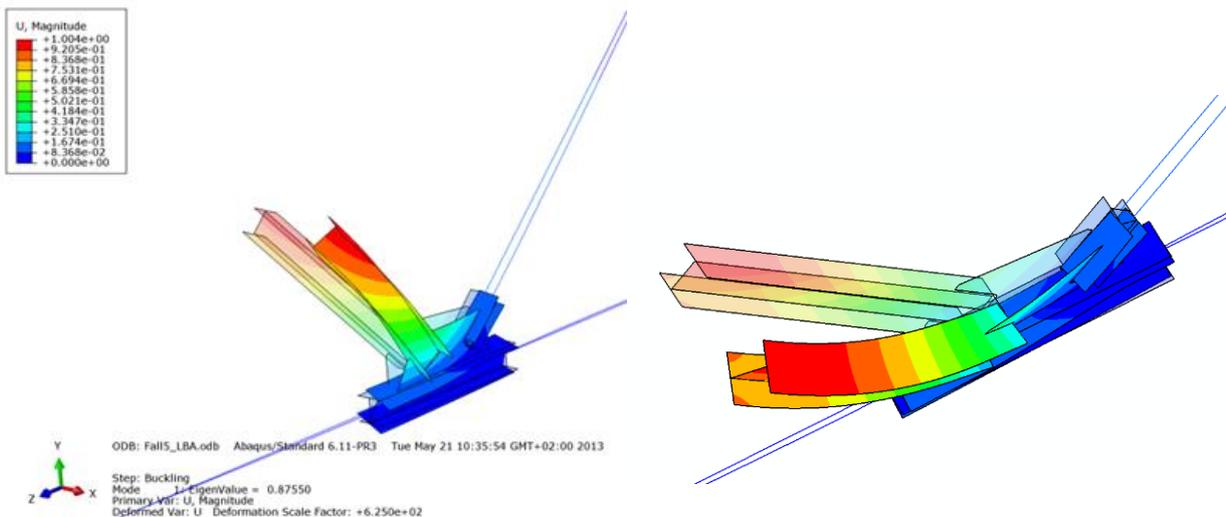


Abbildung B.69 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 3 – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4454\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.
Abbildung B.70 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 3.

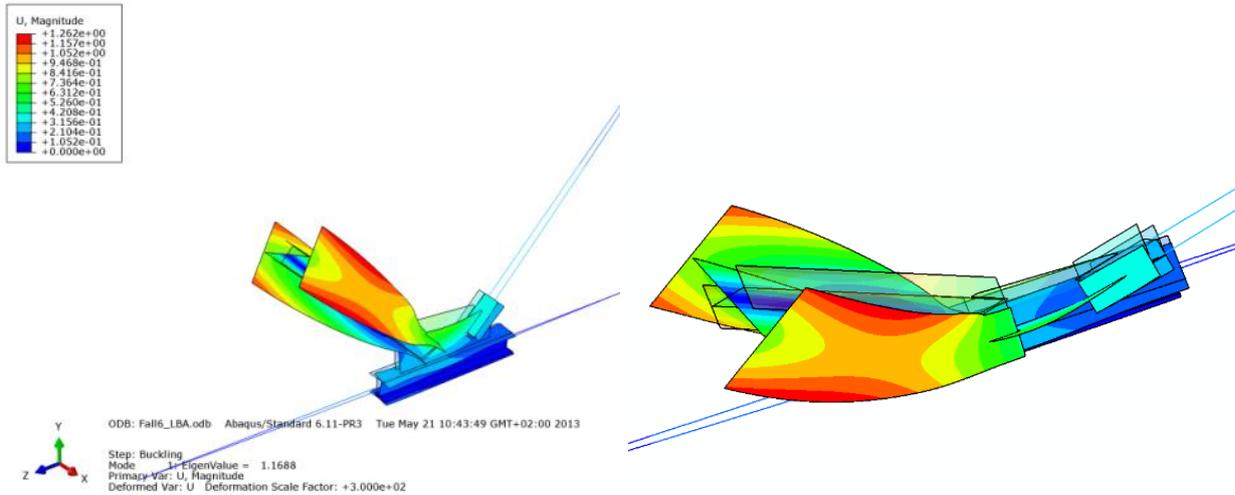


Abbildung B.70 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 3 – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 2,2\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 1,9\text{mm}$), wie der Abbildung B.71 entnommen werden kann.

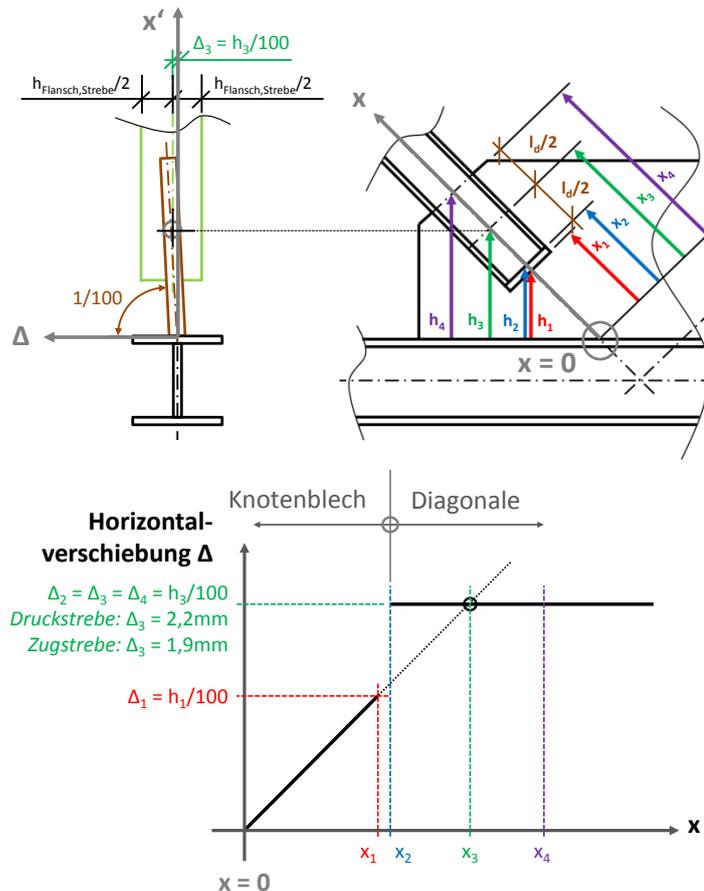


Abbildung B.71 – Eigenform der Gruppe 3 – Imperfektion Knotenblech

B - 4.4.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.4.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist durch seitliches Ausweichen des gesamten Knotens charakterisiert, wie die Abbildungen B.72 bis B.75 zeigen. Es plastiziert hauptsächlich der Untergurt und die Zugstrebe sowie die Druckdiagonale auf der Biegedruckseite. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurtstabes limitiert hier die Traglast.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

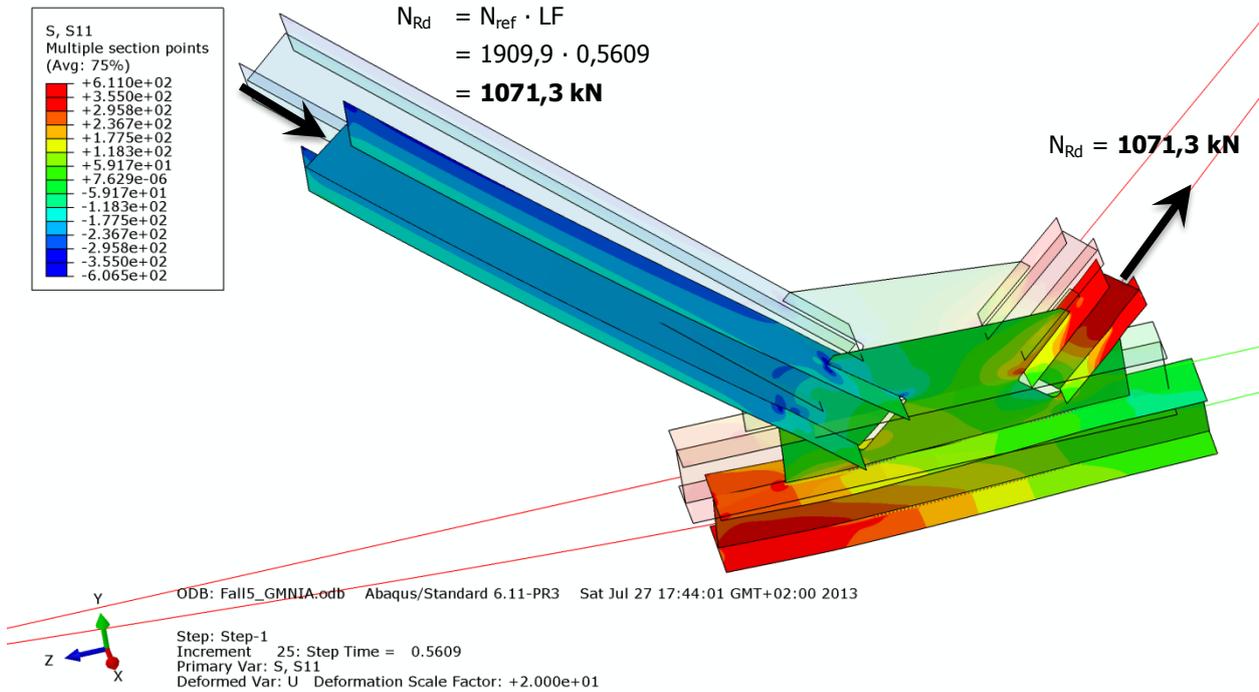


Abbildung B.72 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

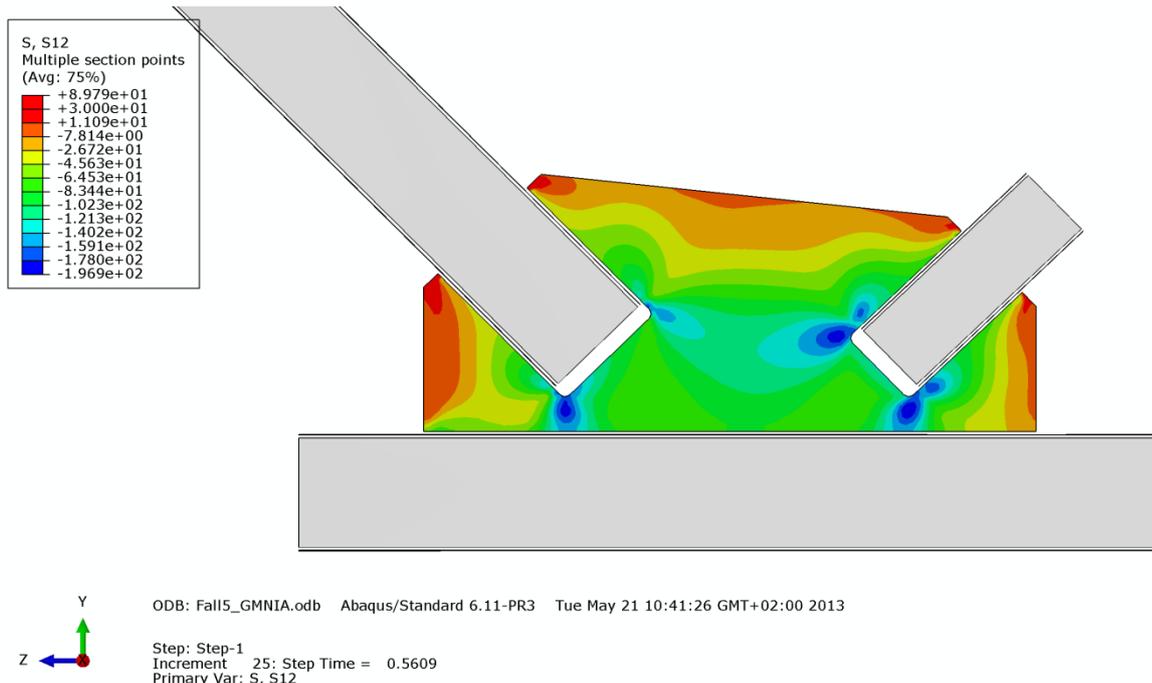


Abbildung B.73 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

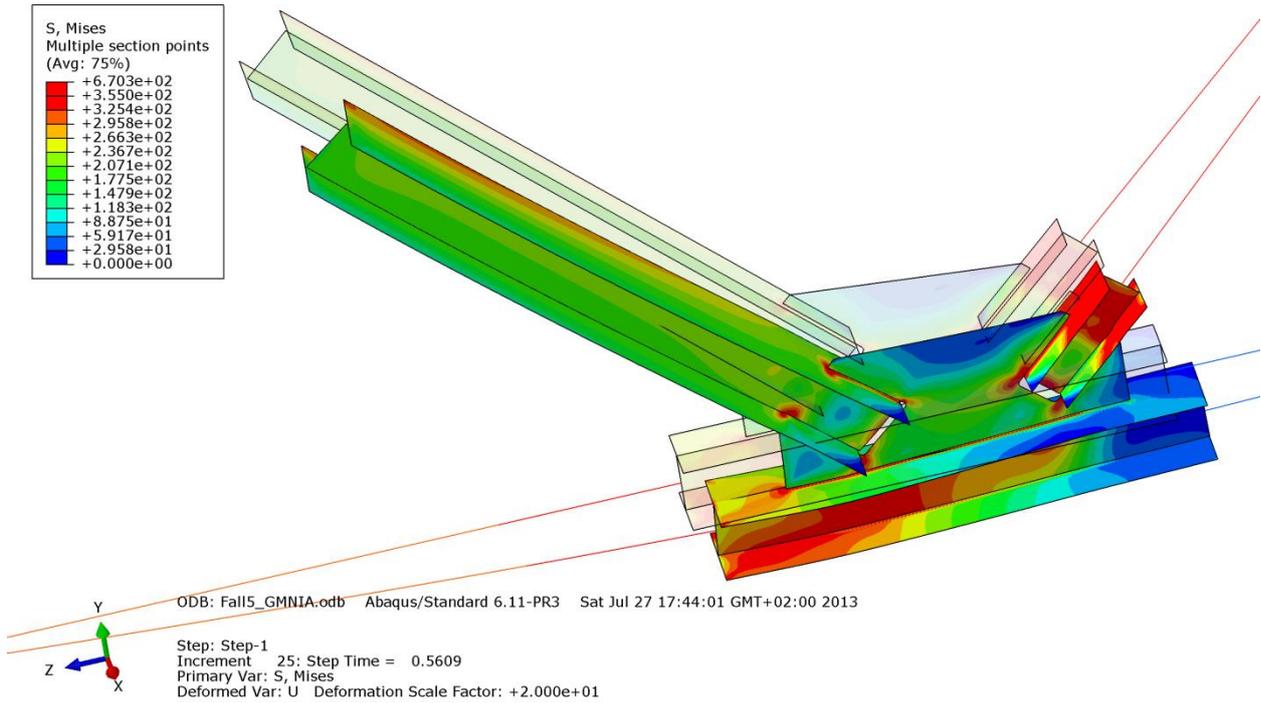


Abbildung B.74 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

• **Verformung [mm]**

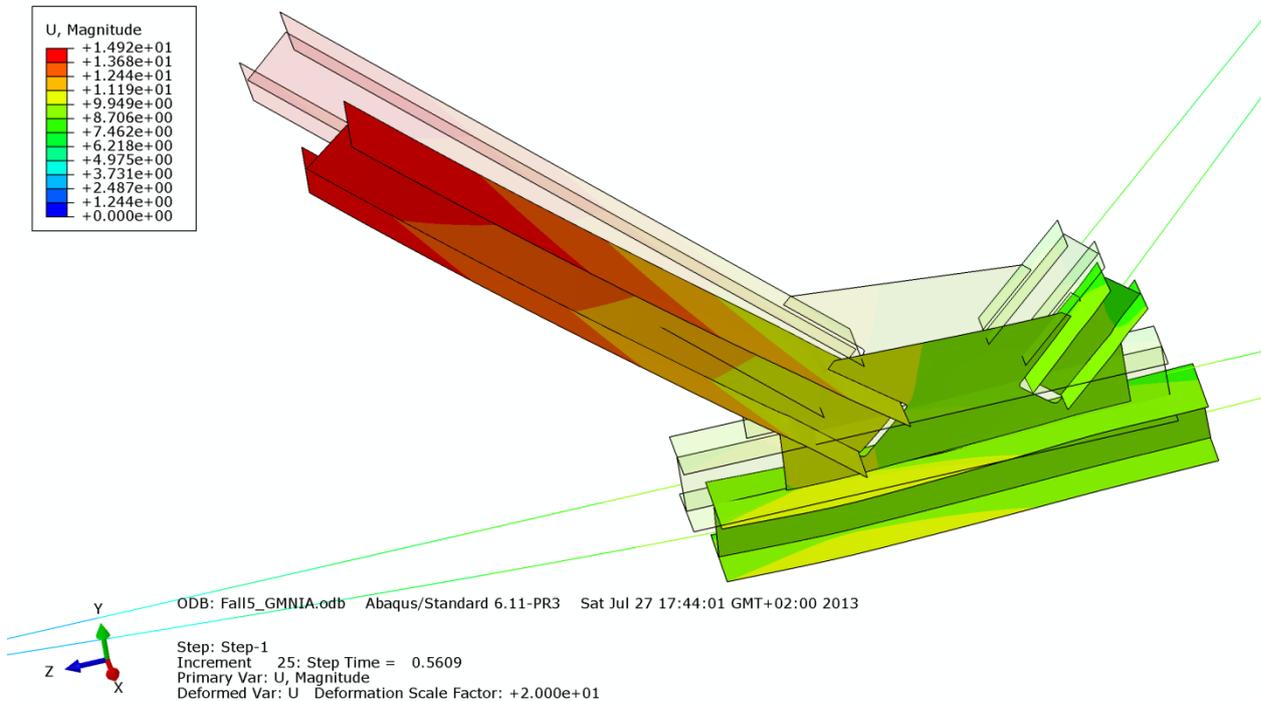


Abbildung B.75 – Verformung U [mm] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

B - 4.4.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist durch die Verdrehung der Druckdiagonale in Kombination mit einer Verschiebung des gesamten Knotens gekennzeichnet, wie die Abbildungen B.76 bis B.79 zeigen. Es plastiziert hauptsächlich der Untergurt und die Zugstrebe. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurtstabes limitiert hier die Traglast.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

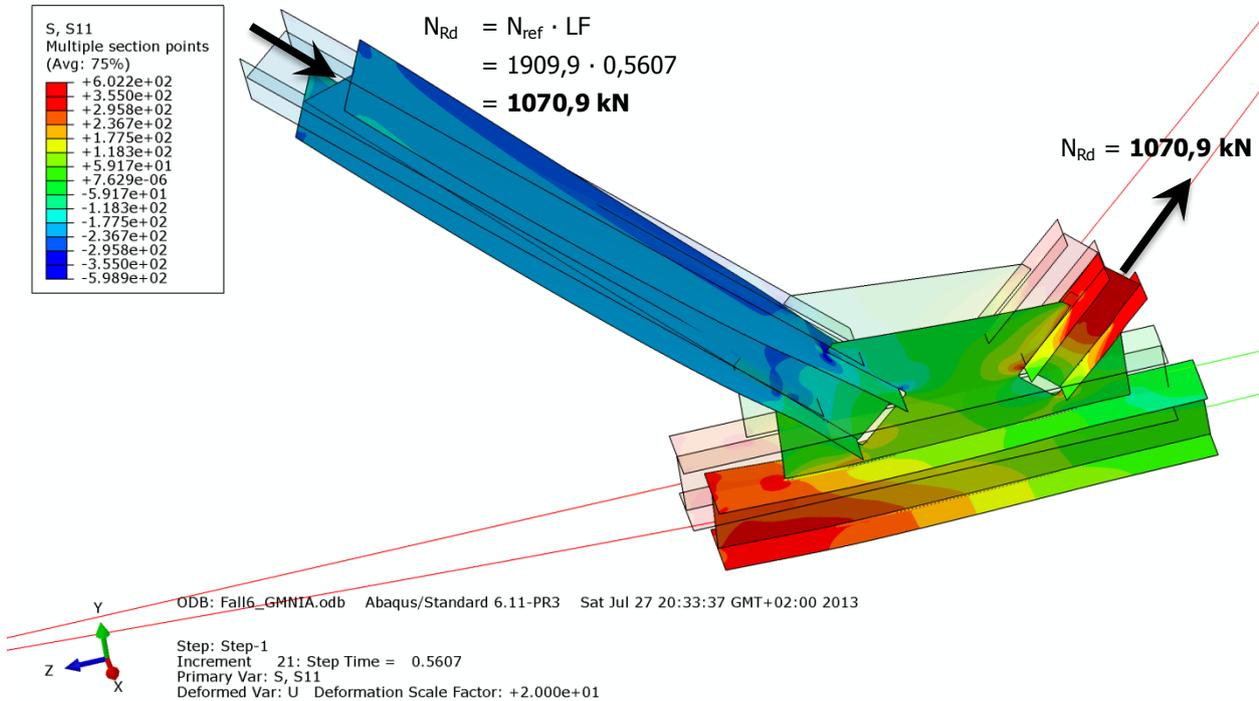


Abbildung B.76 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

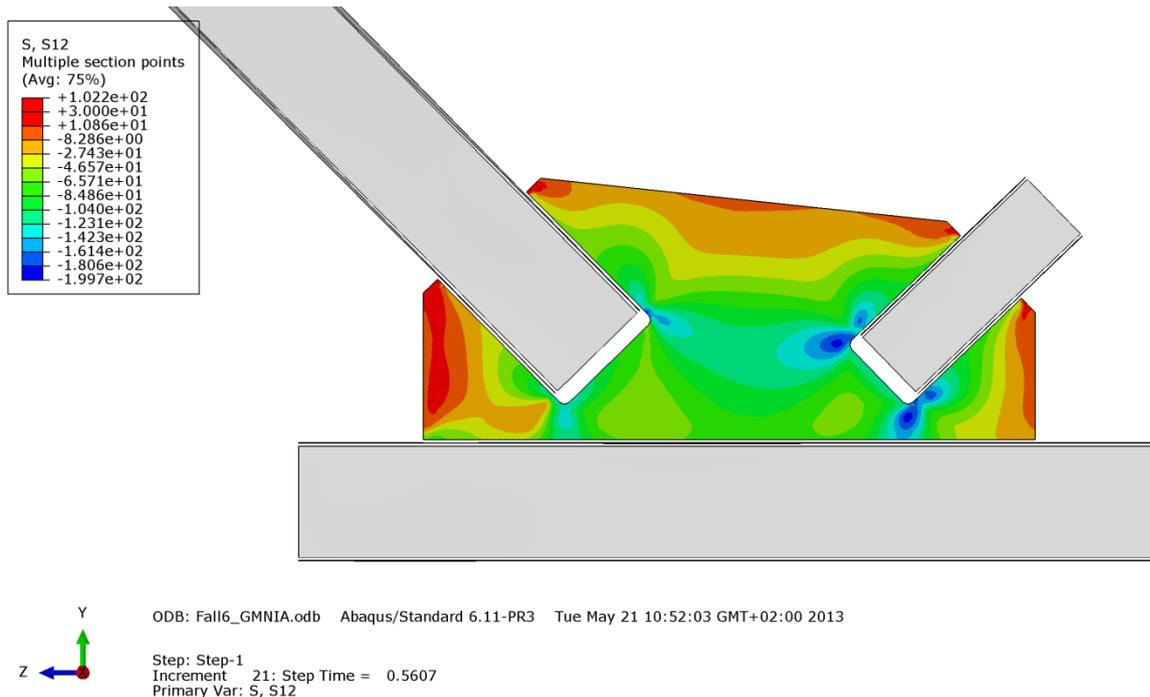


Abbildung B.77 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

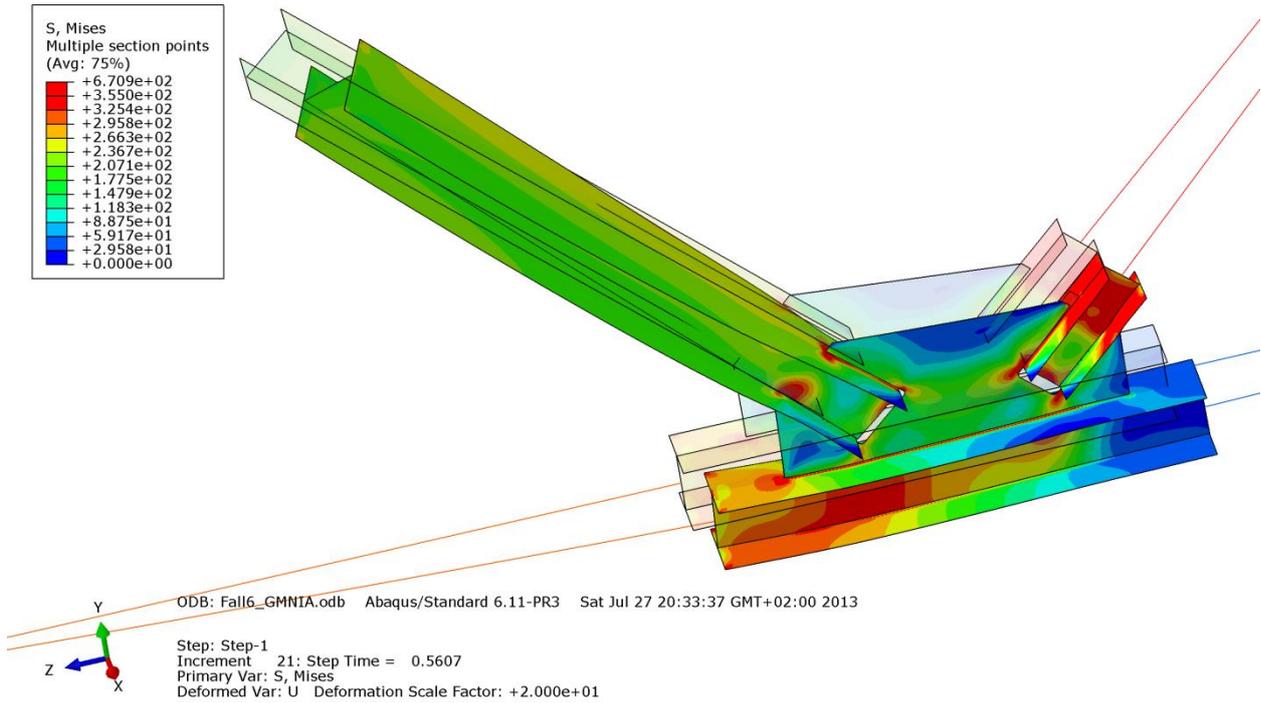


Abbildung B.78 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

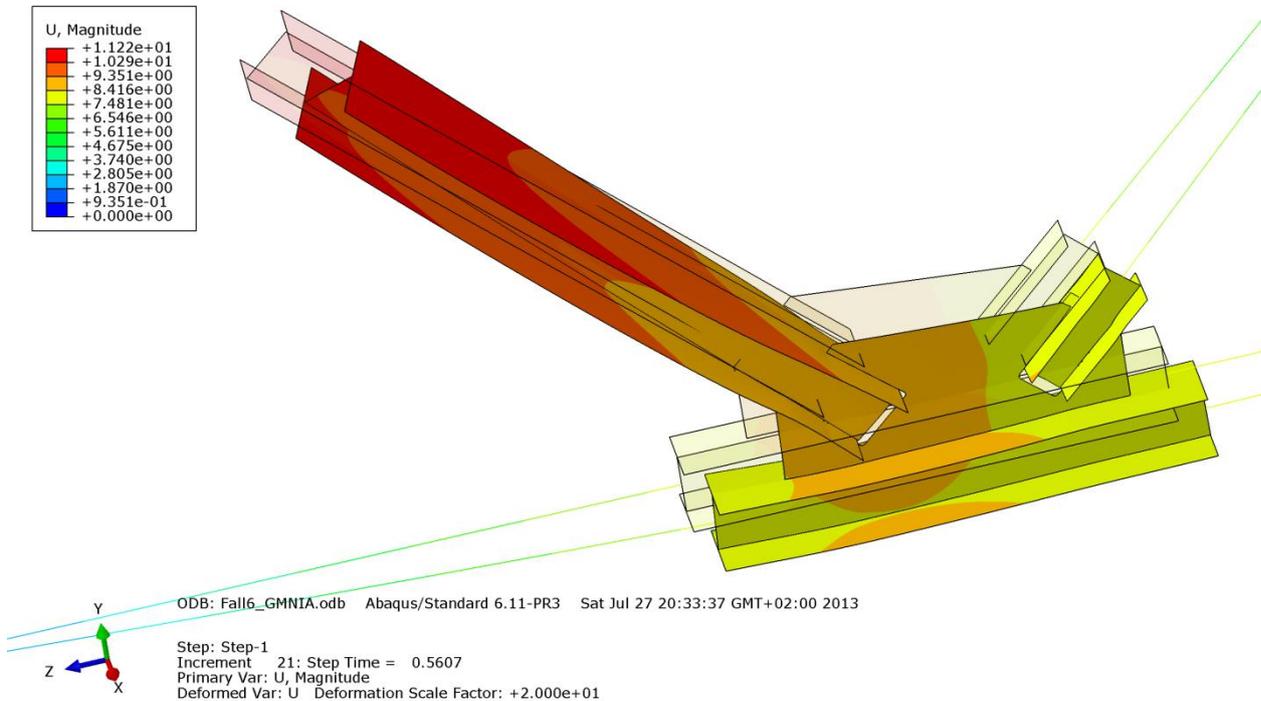


Abbildung B.79 – Verformung U [mm] der Gruppe 3 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.4.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist durch die Längsverschiebung der Druckdiagonale in Kombination mit einer seitlichen Verschiebung des gesamten Knotens gekennzeichnet, wie die Abbildungen B.80 bis B.83 zeigen. Es plastiziert hauptsächlich der Untergurt und die Zugstrebe. Das Plastizieren der Zugdiagonale und des Untergurtstabes limitiert hier die Traglast.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

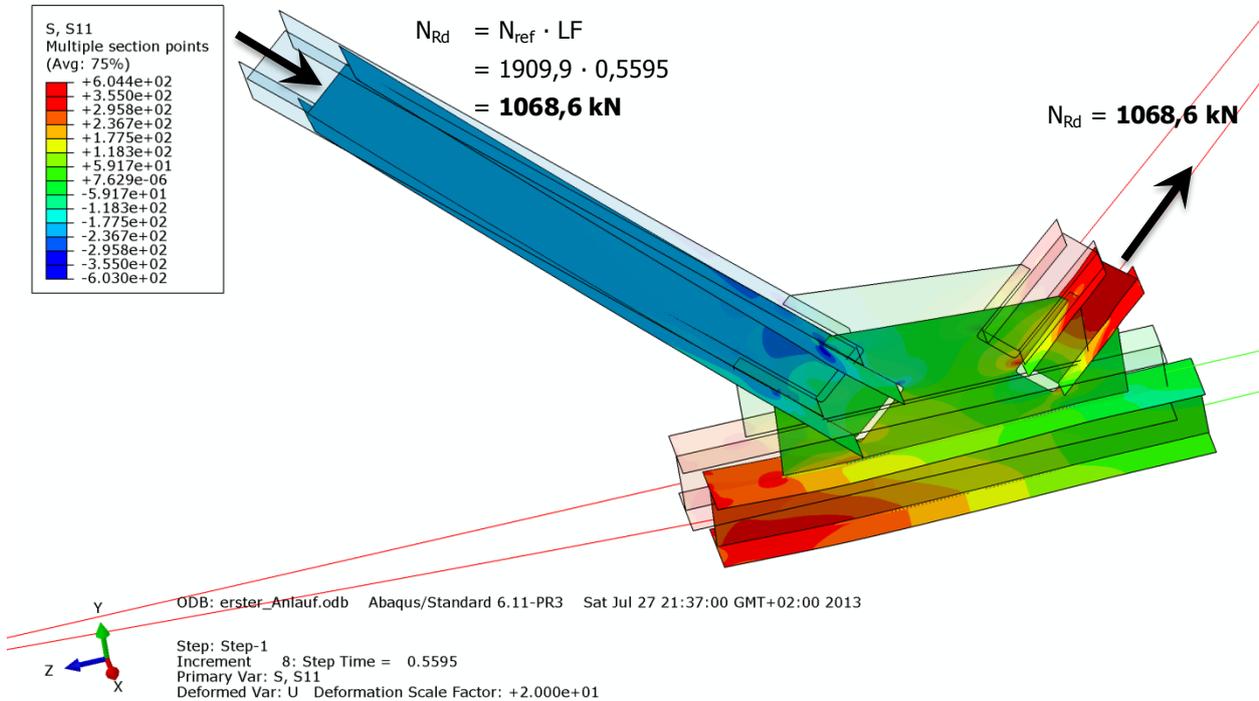


Abbildung B.80 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

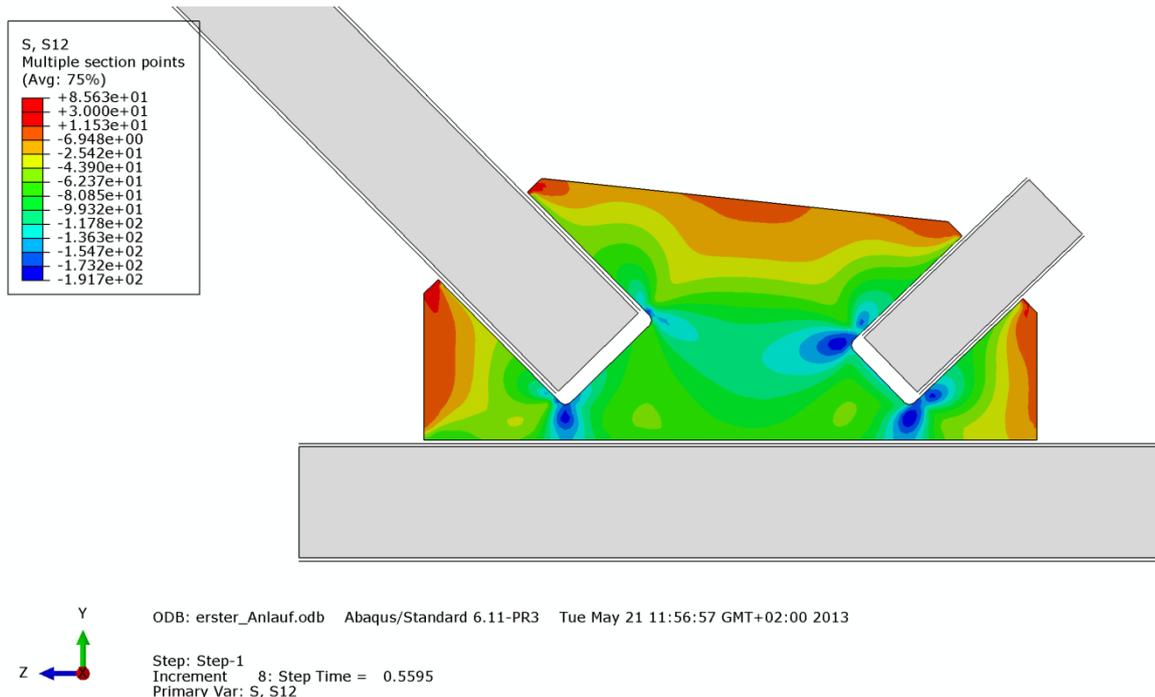


Abbildung B.81 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 3 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

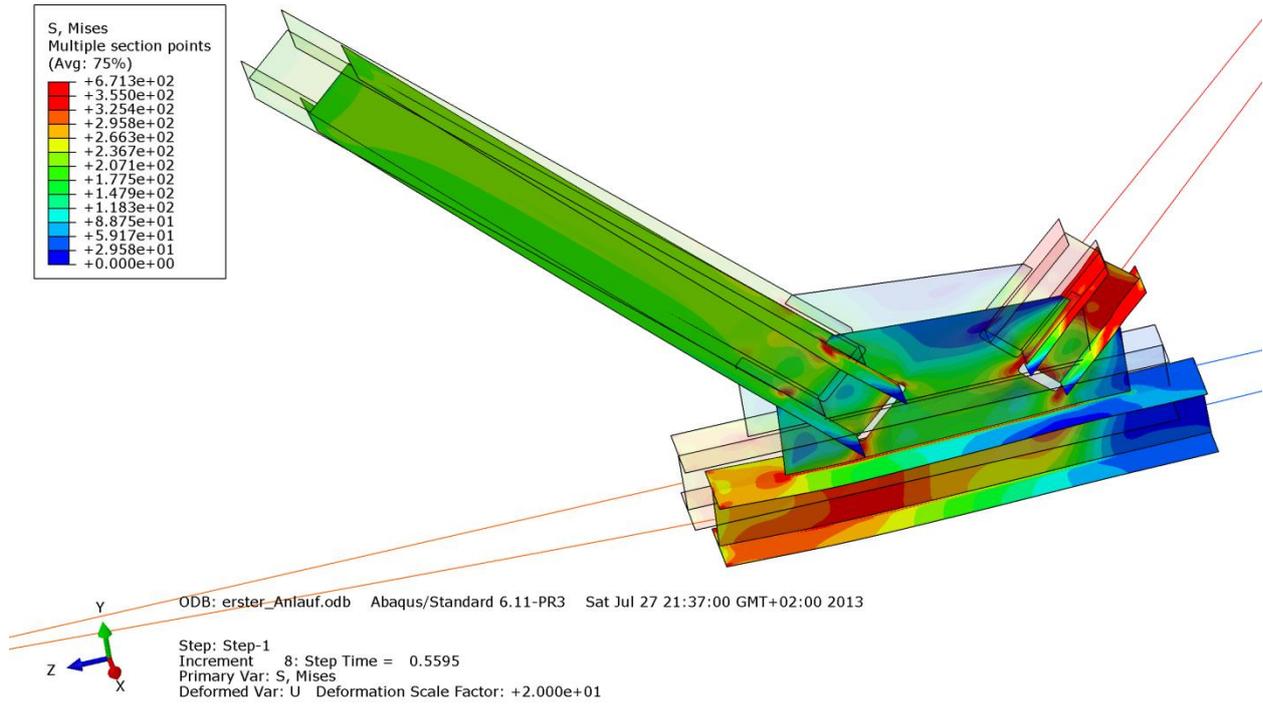


Abbildung B.82 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 3 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

• **Verformung [mm]**

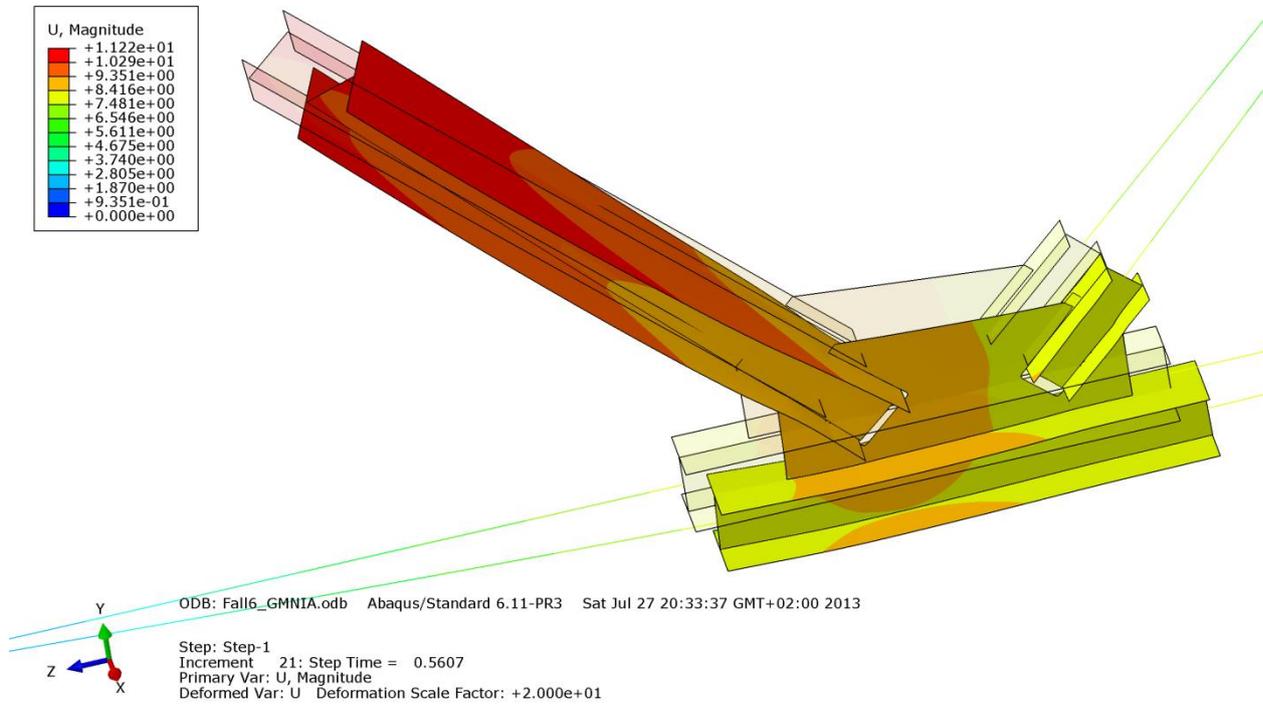


Abbildung B.83 – Verformung U [mm] der Gruppe 3 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

B - 4.4.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform zeigt ein Ausknicken um die schwache Achse, wie in den Abbildungen B.84 und B.85 zu erkennen ist. Durch die Drucknormalkraft plastizieren die Randfasern der Flansche sowohl auf der Biegedruck-, als auch auf der Biegezugseite der Druckstrebe.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/200 = 4454\text{mm}/750 = 22,3\text{mm}$.

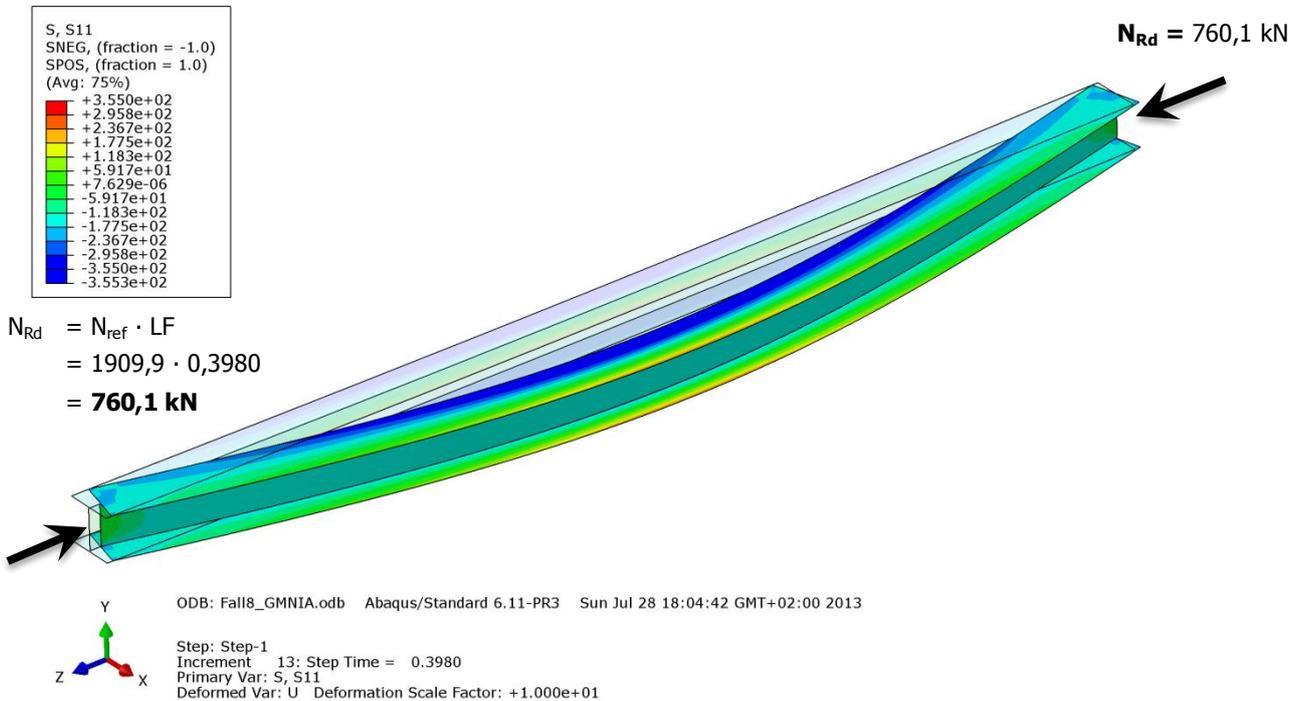


Abbildung B.84 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4454\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.

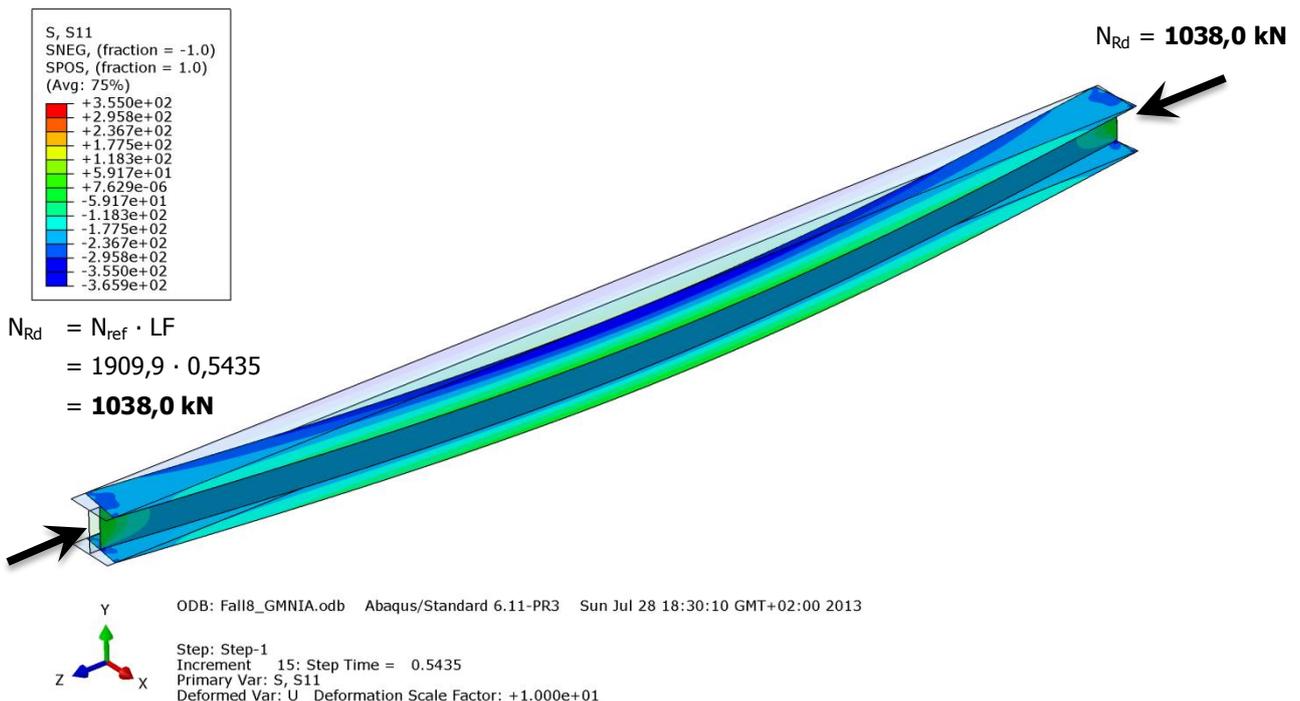


Abbildung B.85 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.5 Gruppe 4

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 4 zu charakterisieren sind in Tabelle B.18 zusammengefasst.

Gruppe 4			
Profil der Druckstrebe:	HEB 320	Systemlänge L^* =	4372mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,742
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	155,1cm ²	L_{ges} =	3872mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	50mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,657
Profil der Zugstrebe:	HEA 240		
Profil des Untergurtes:	HEB 360	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.18 – FE-Eingangsdaten Gruppe 4

B - 4.5.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.86, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.87 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.88 entnommen werden kann.

• Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4372\text{mm}/750 = 5,8\text{mm}$. Abbildung B.86 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 4.

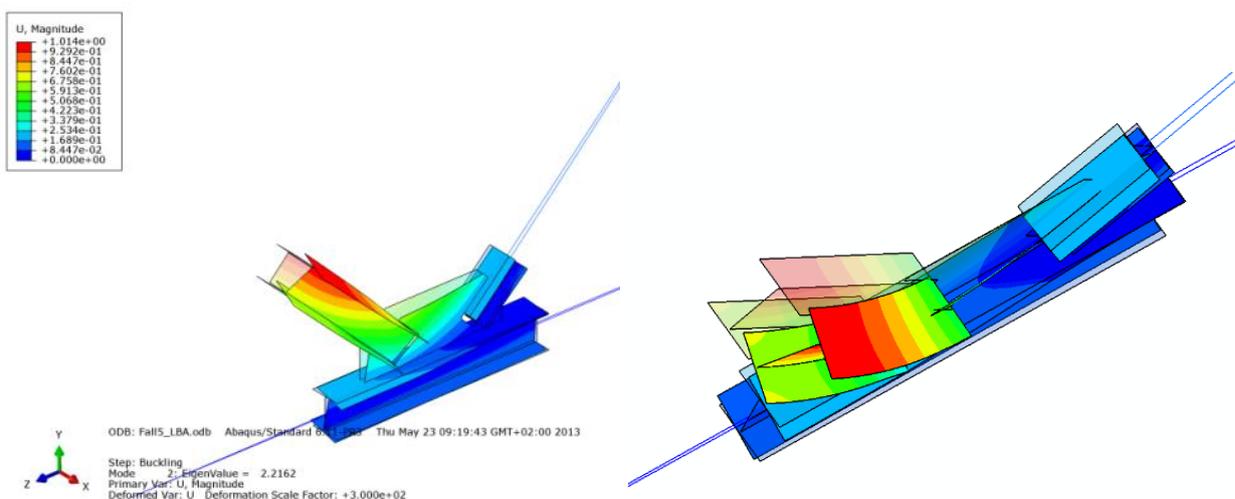


Abbildung B.86 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 4 – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4372\text{mm}/750 = 5,8\text{mm}$.
Abbildung B.87 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 4.

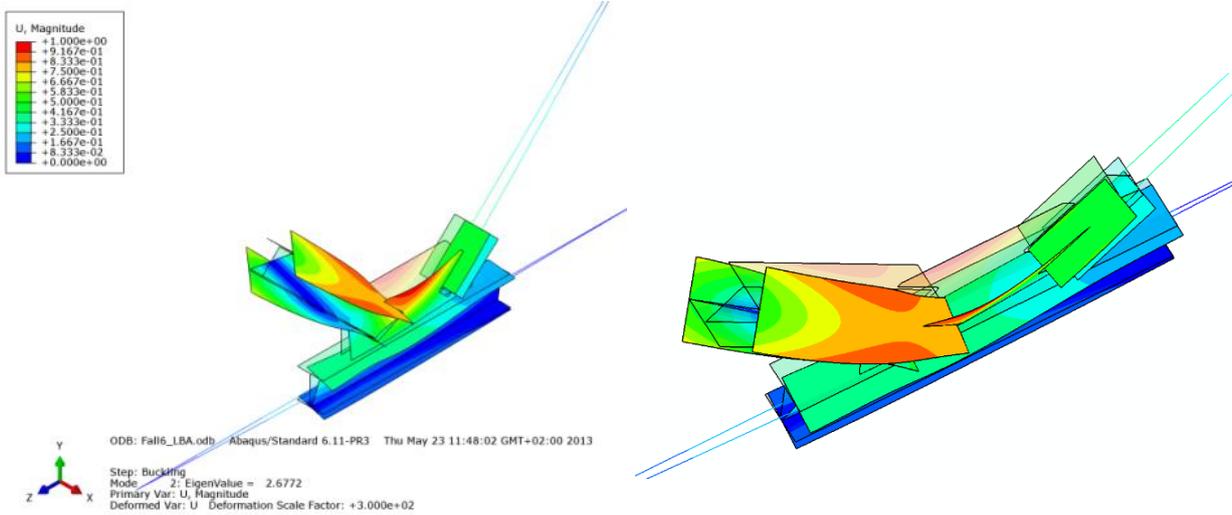


Abbildung B.87 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 4 – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,1\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 2,9\text{mm}$), wie der Abbildung B.88 entnommen werden kann.

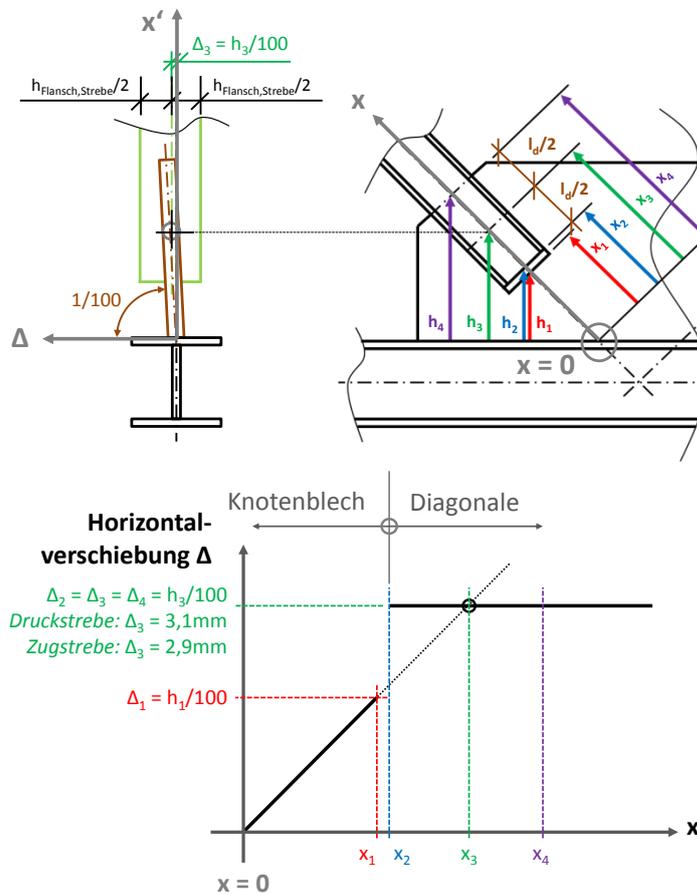


Abbildung B.88 – Eigenform der Gruppe 4 – Imperfektion Knotenblech

B - 4.5.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.5.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die schwach dimensionierte Zugdiagonale limitiert deutlich die Tragfähigkeit des Knotens, wie die Abbildungen B.89 bis B.92 zeigen. Die Versagensform wird dadurch geprägt.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

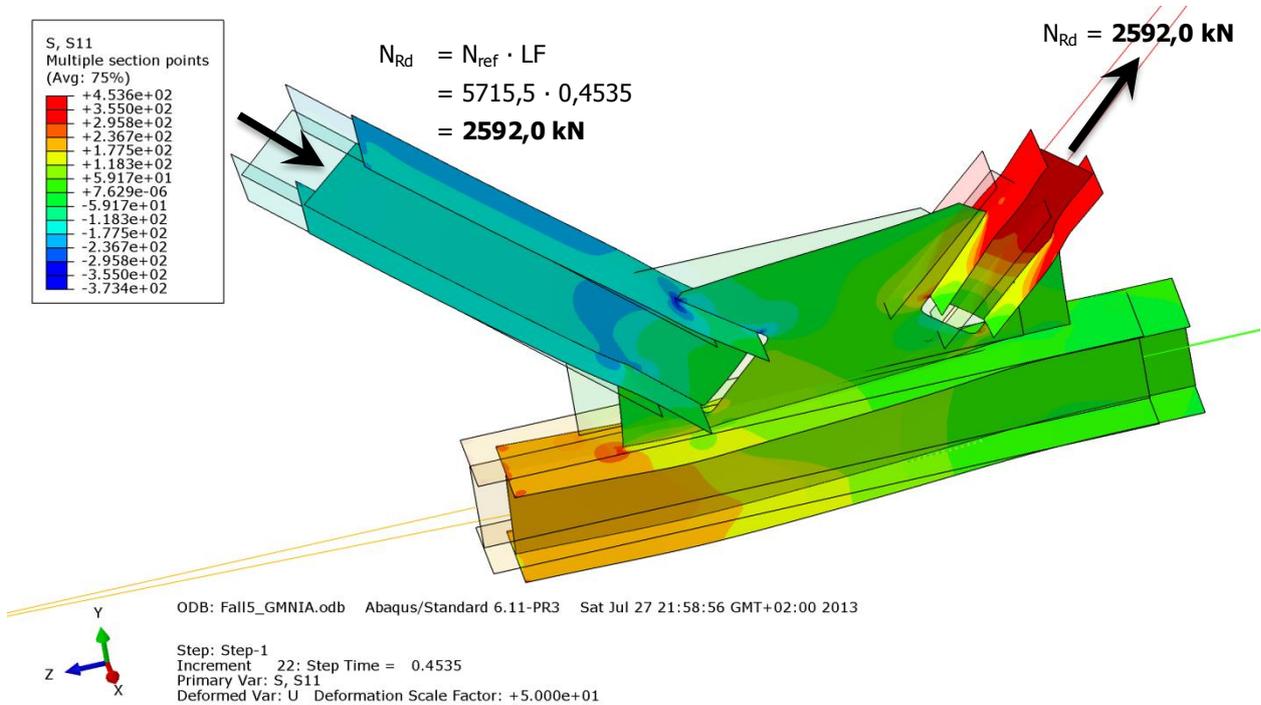


Abbildung B.89 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

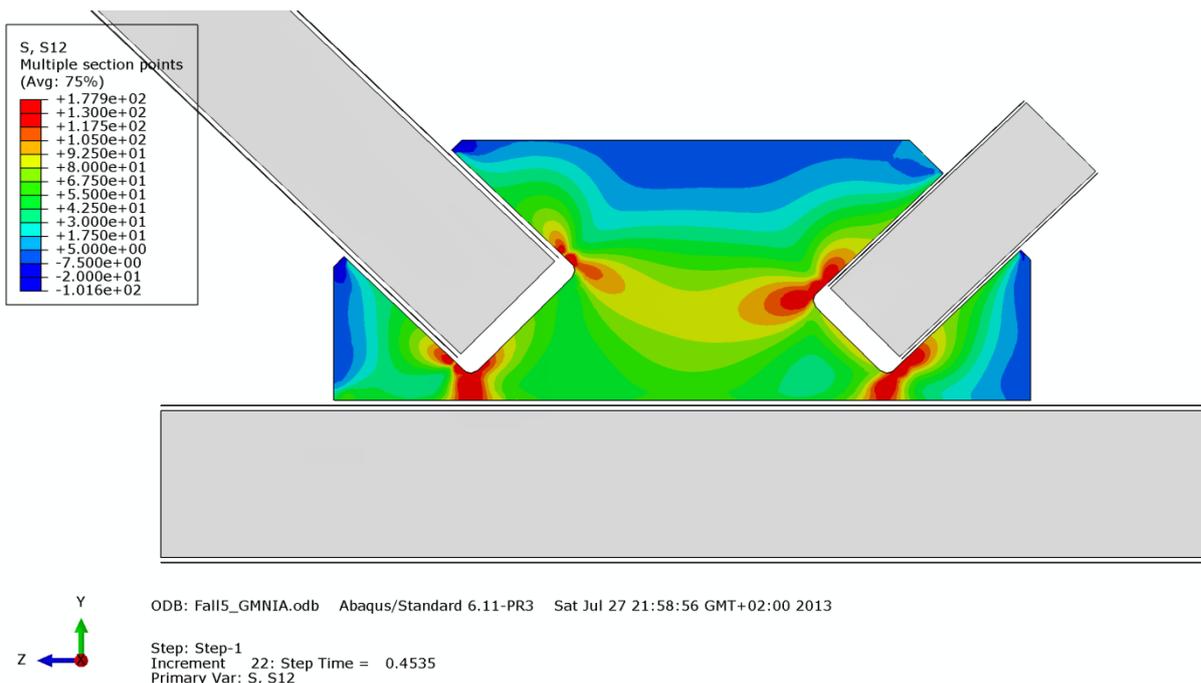


Abbildung B.90 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

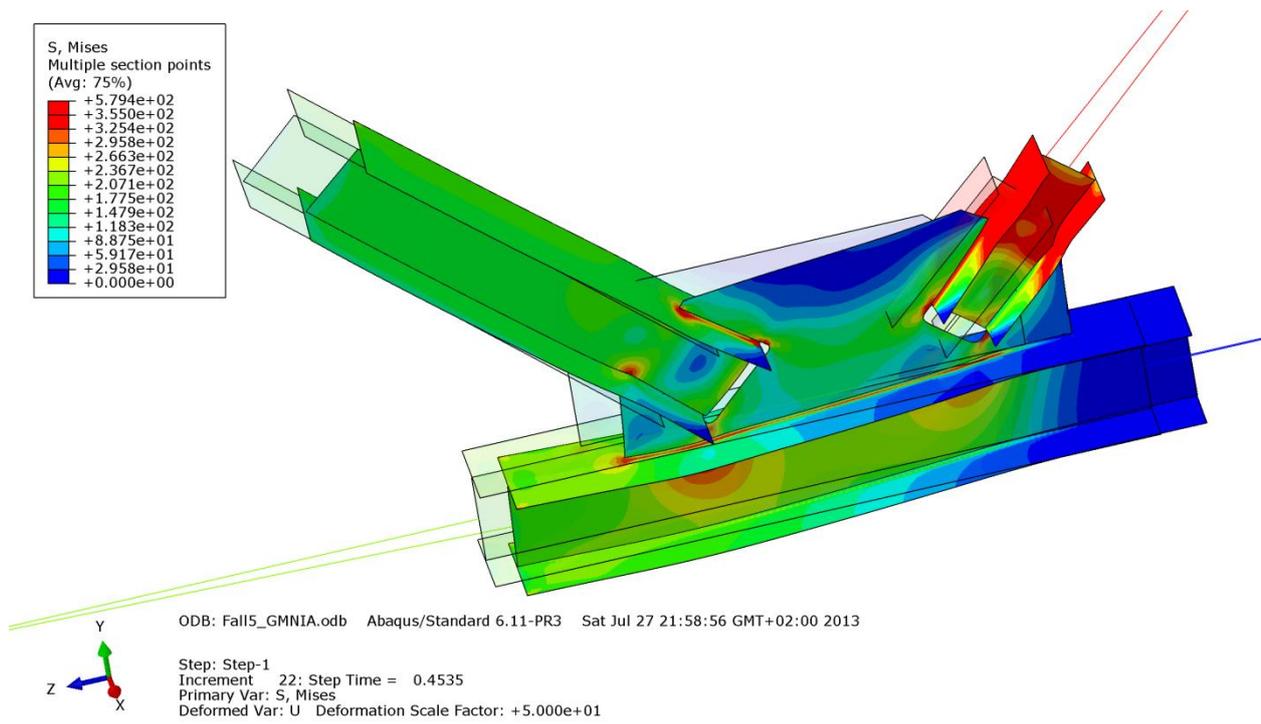


Abbildung B.91 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

• **Verformung [mm]**

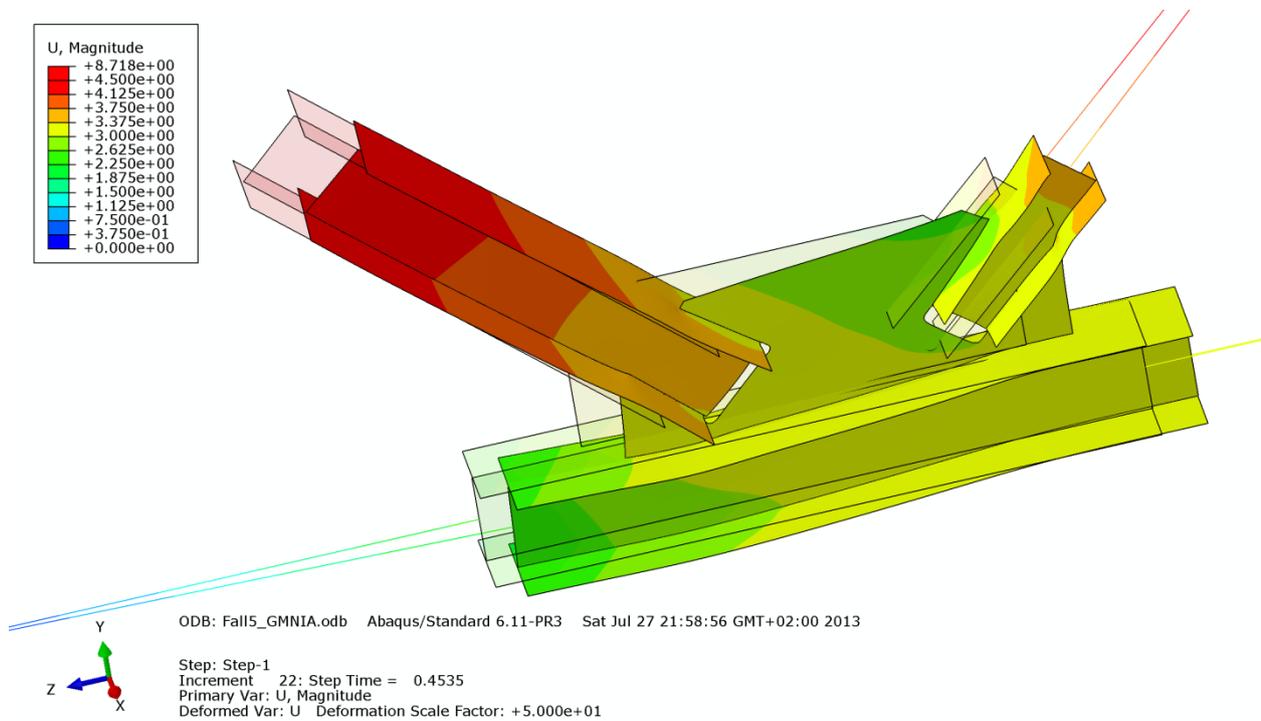


Abbildung B.92 – Verformung U [mm] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

B - 4.5.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Zugdiagonale limitiert auch hier die Tragfähigkeit des Knotens. Die Versagensform ist außerdem durch die Verdrehung der Druckstrebe und das Ausweichen des Untergurtstabes geprägt, wie die Abbildungen B.93 bis B.96 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

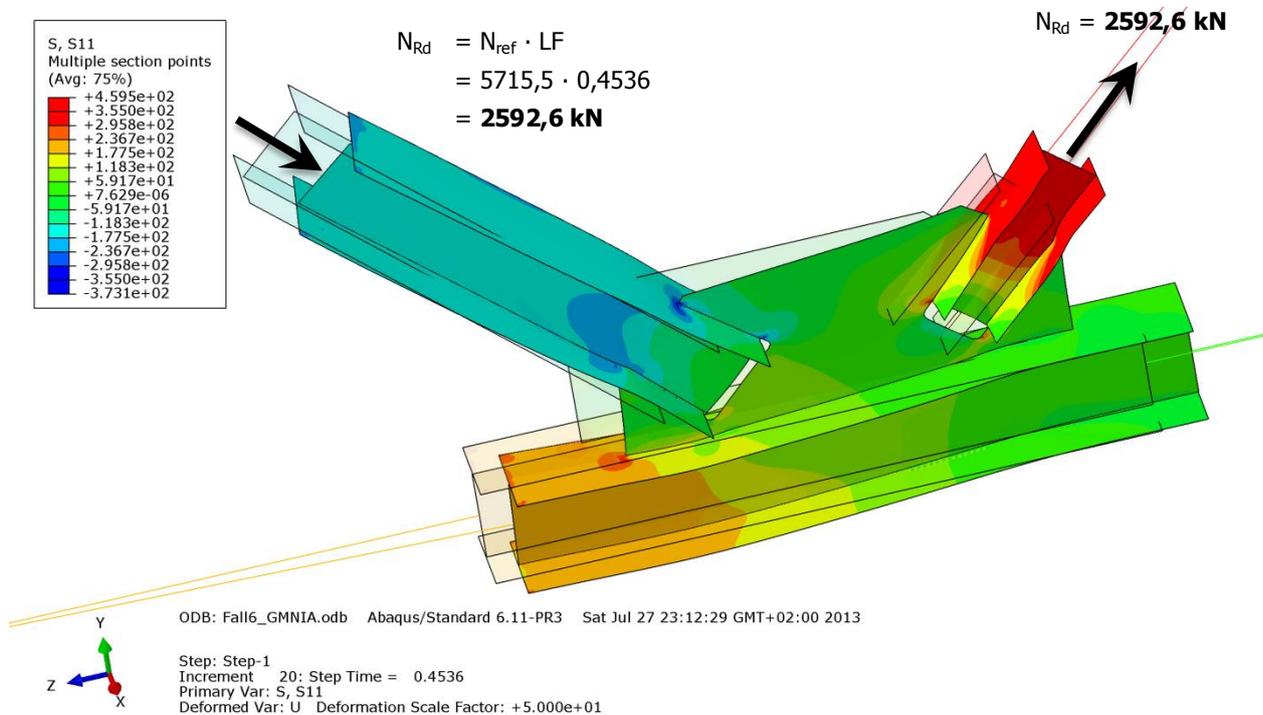


Abbildung B.93 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

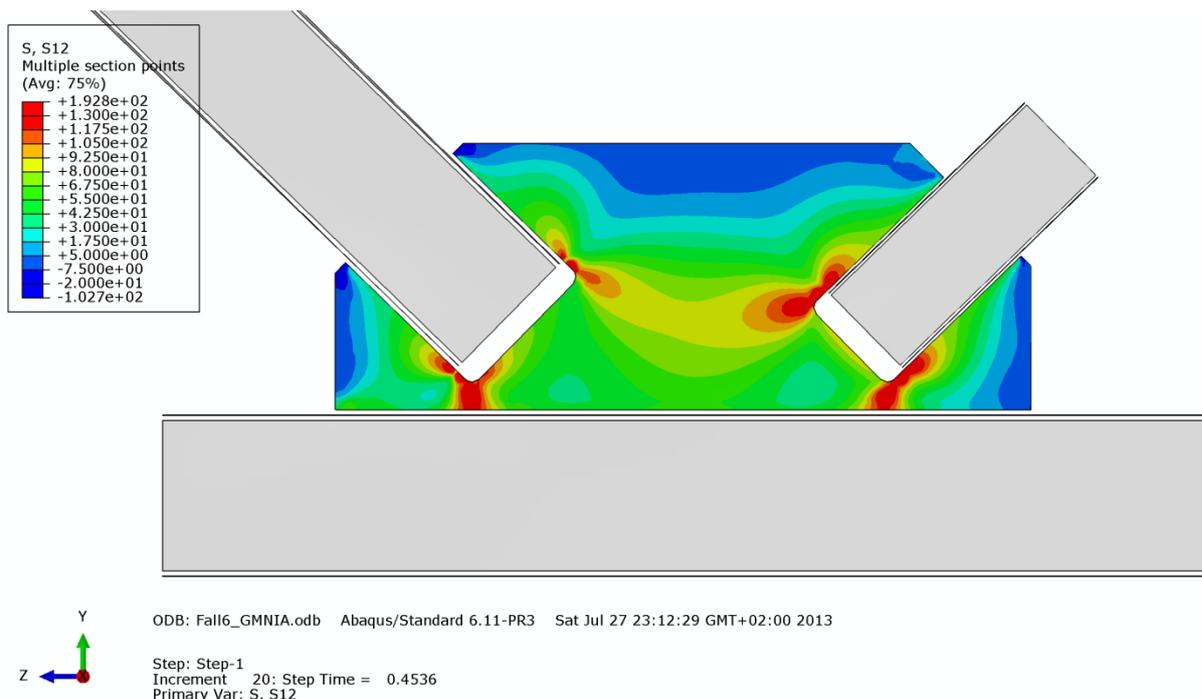


Abbildung B.94 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

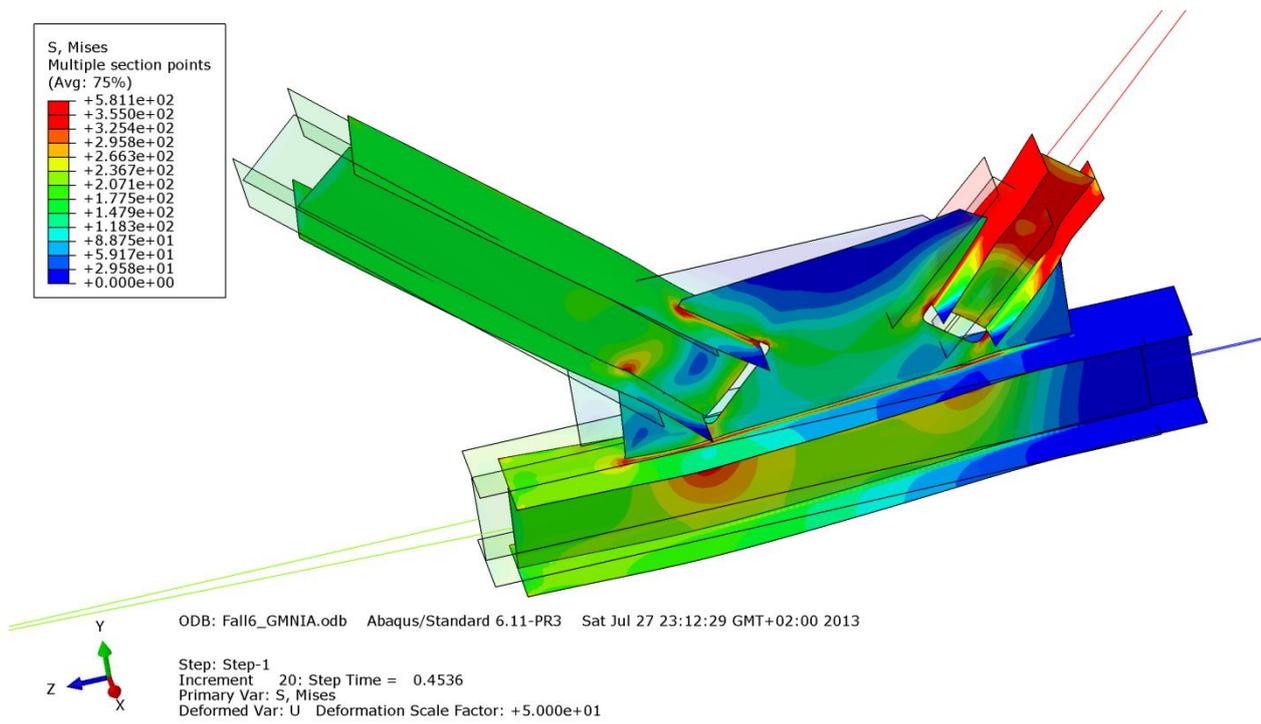


Abbildung B.95 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur zweiten Knick eigenform

• **Verformung [mm]**

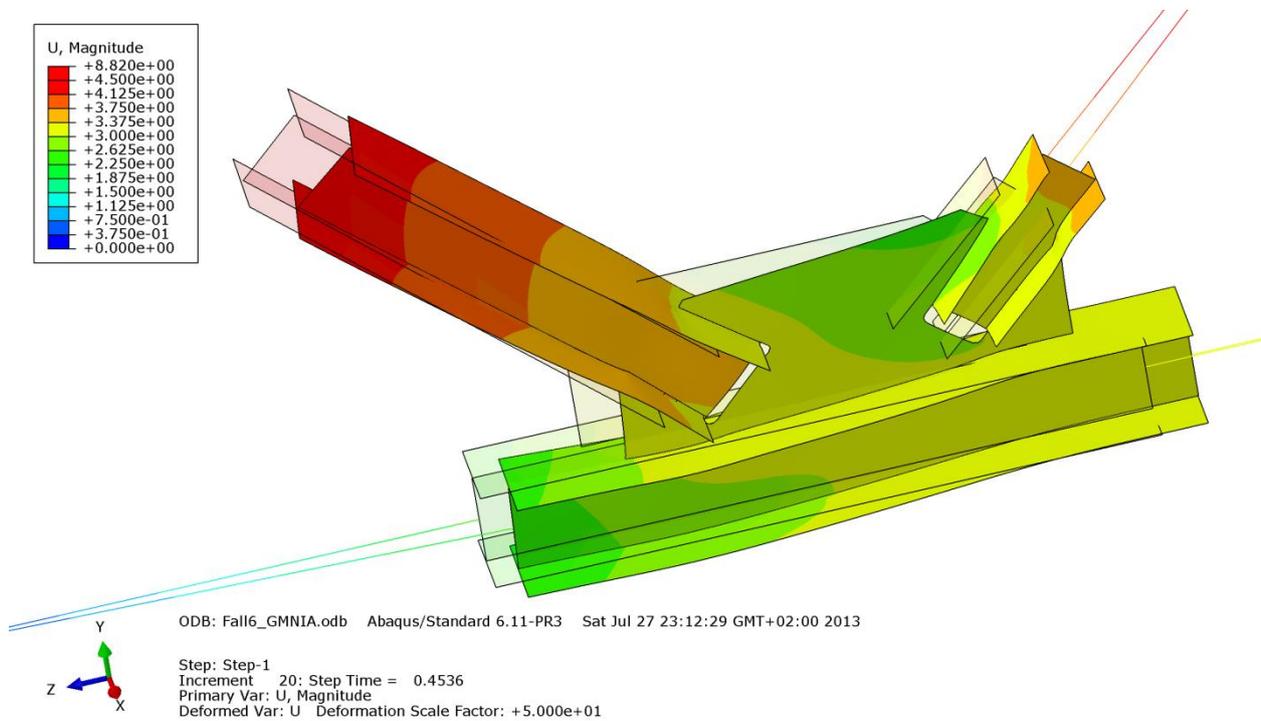


Abbildung B.96 – Verformung U [mm] der Gruppe 4 – Imperfektion affin zur zweiten Knick eigenform

B - 4.5.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Zugdiagonale limitiert auch hier die Tragfähigkeit des Knotens. Die Versagensform ist dadurch geprägt, wie die Abbildungen B.97 bis B.100 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

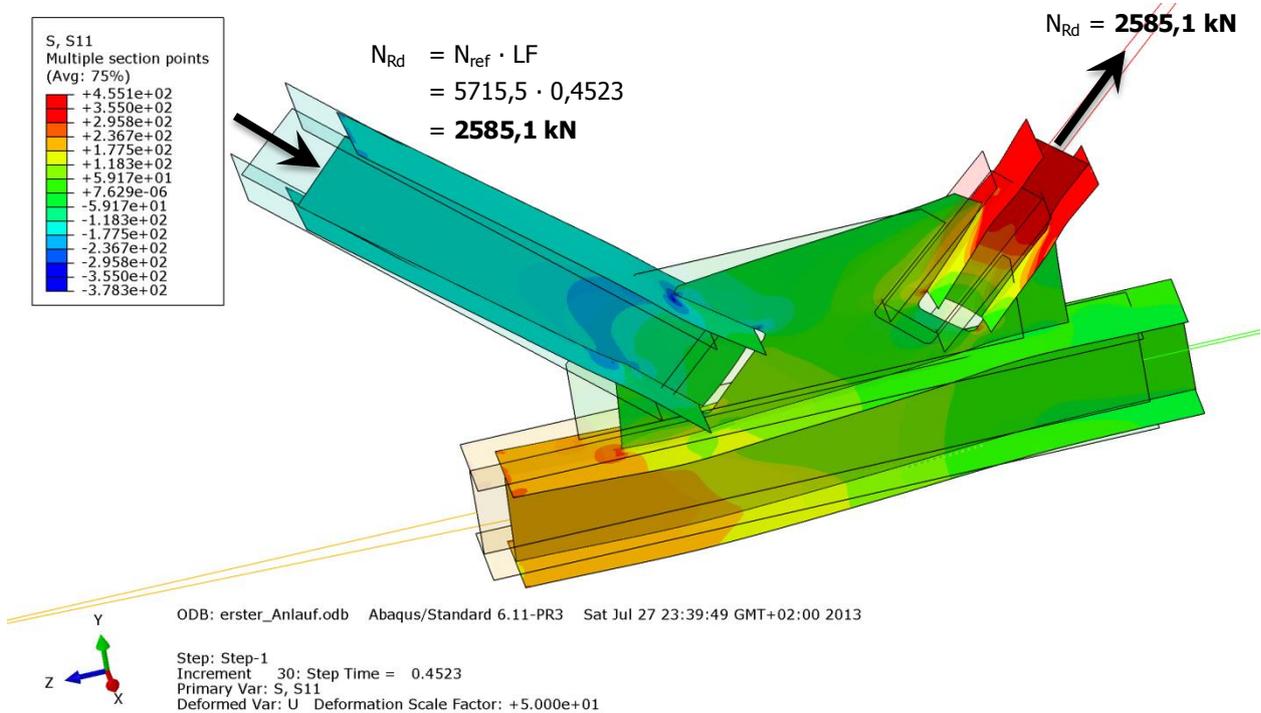


Abbildung B.97 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

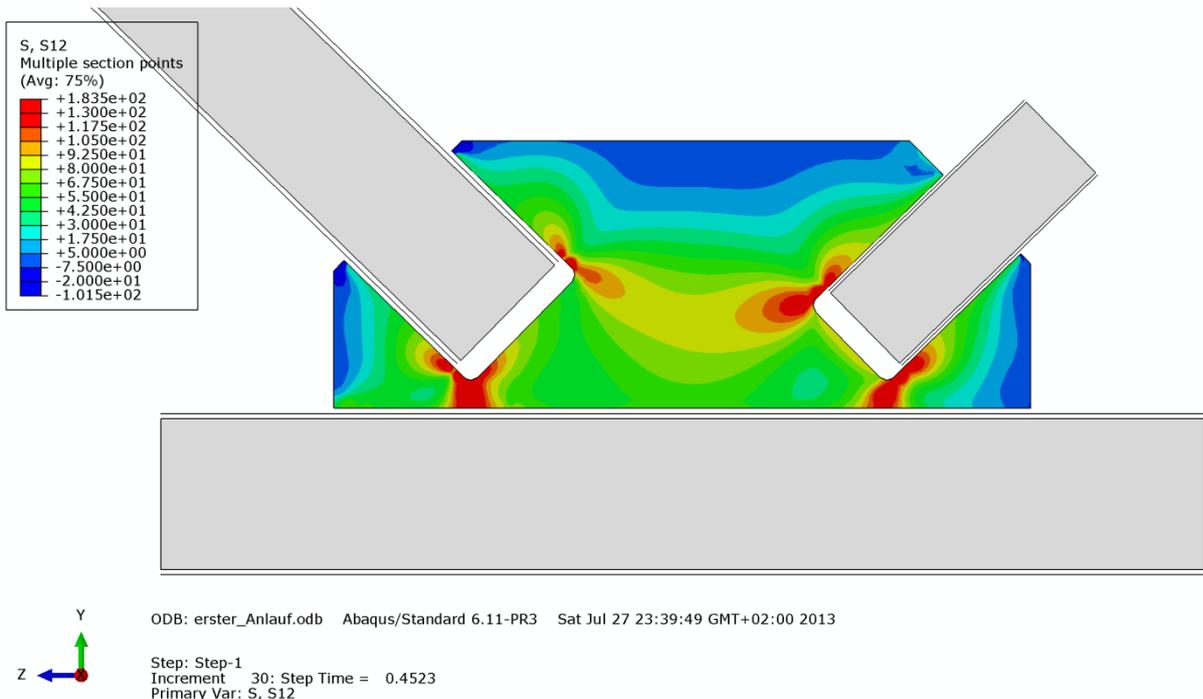


Abbildung B.98 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 4 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

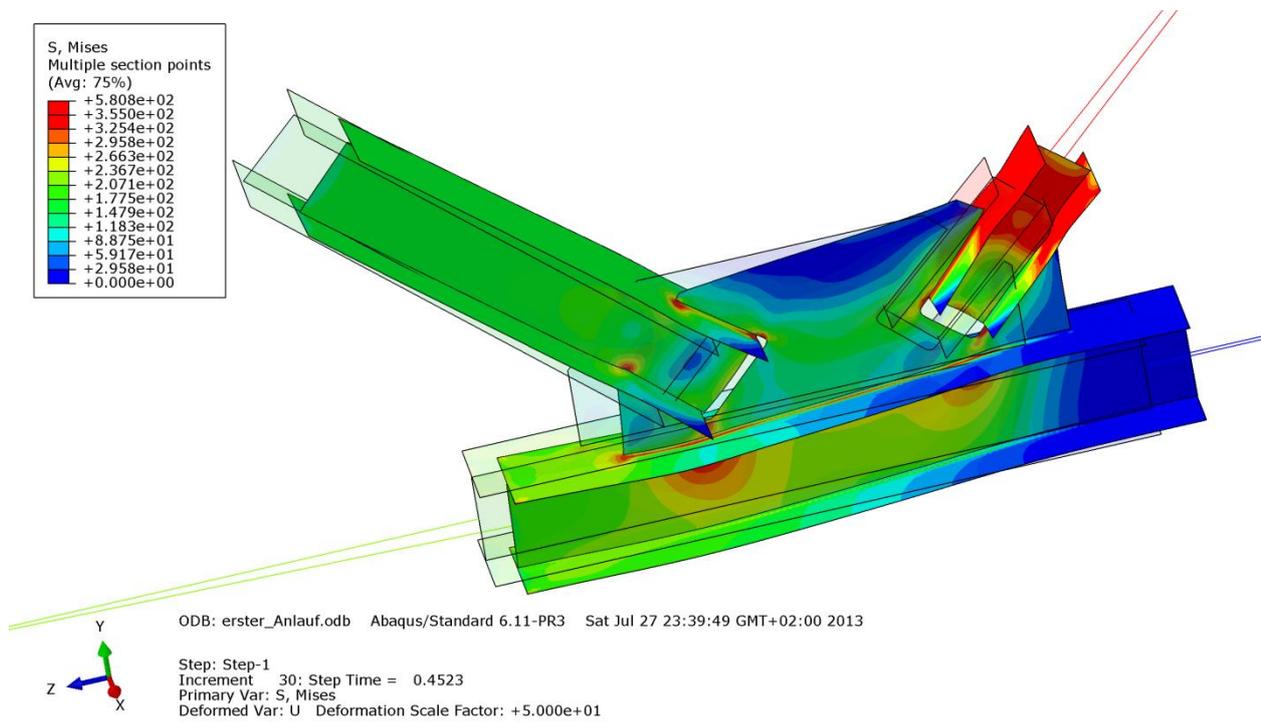


Abbildung B.99 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 4 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Verformungen [mm]**

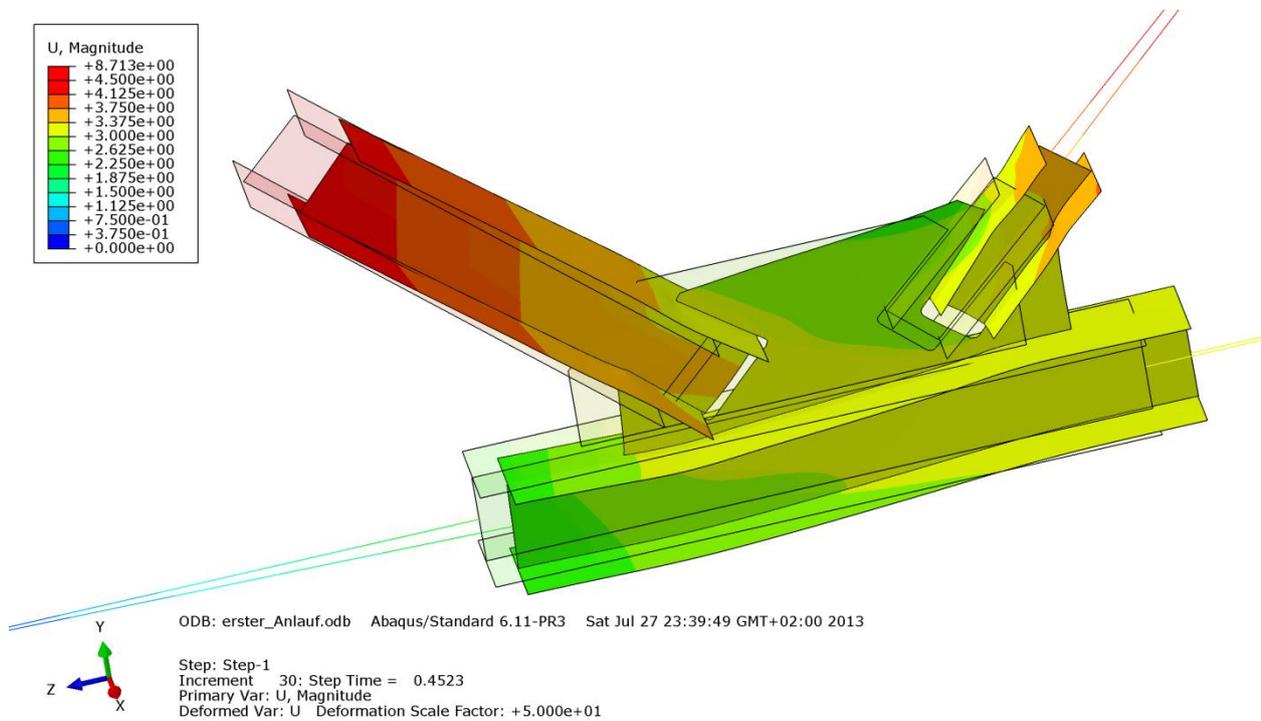


Abbildung B.100 – Verformungen U [mm] der Gruppe 4 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

B - 4.5.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Knicken des Stabes um seine schwache Achse, wie die Abbildungen B.101 und B.102 zeigen. Es erfolgt eine Plastizierung des Stabmaterials aufgrund der Drucknormalkraft.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4372\text{mm}/200 = 21,9\text{mm}$.

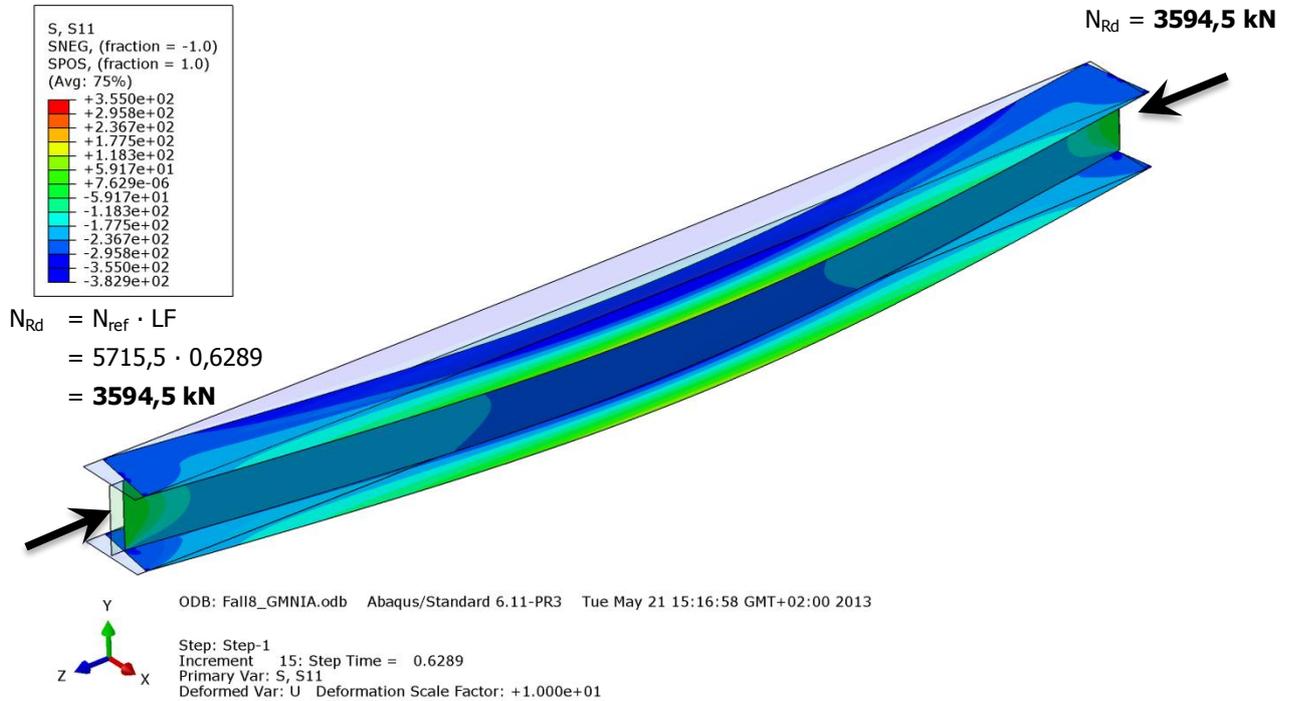


Abbildung B.101 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4372\text{mm}/750 = 5,8\text{mm}$.

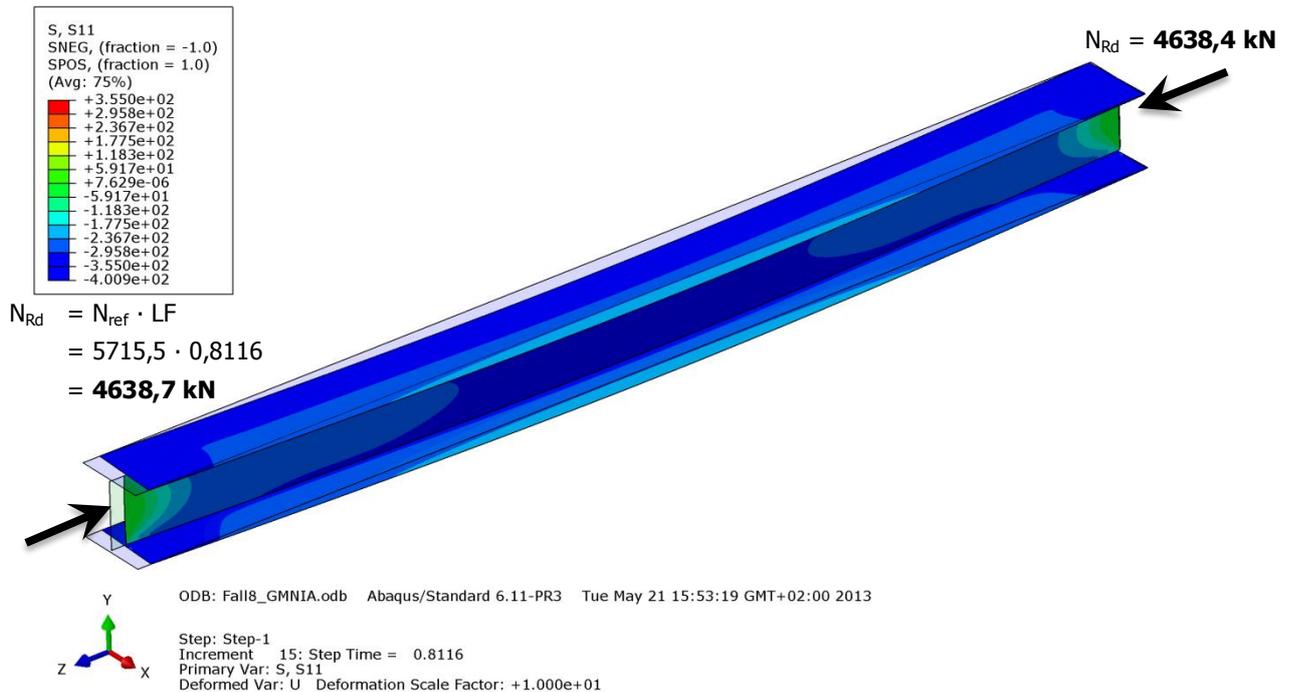


Abbildung B.102 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.6 Gruppe 5

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 5 zu charakterisieren sind in Tabelle B.19 zusammengefasst.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge L^* =	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	L_{ges} =	4085mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{knotenblech}$ =	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.19 – FE-Eingangsdaten Gruppe 5

B - 4.6.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.103, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.104 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.105 entnommen werden kann.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.103 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5.

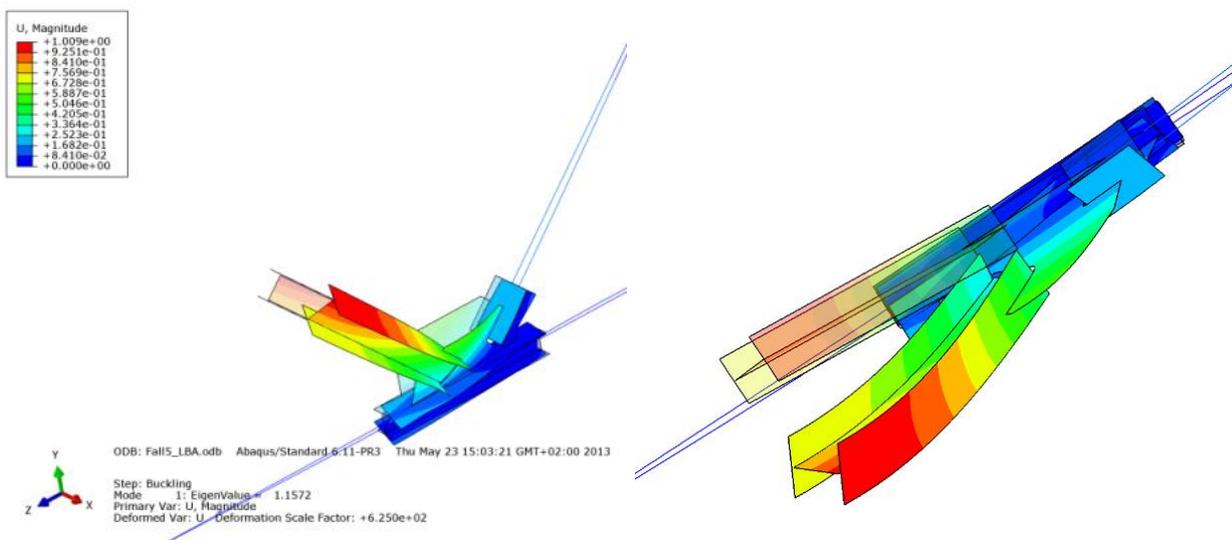


Abbildung B.103 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.
Abbildung B.104 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5.

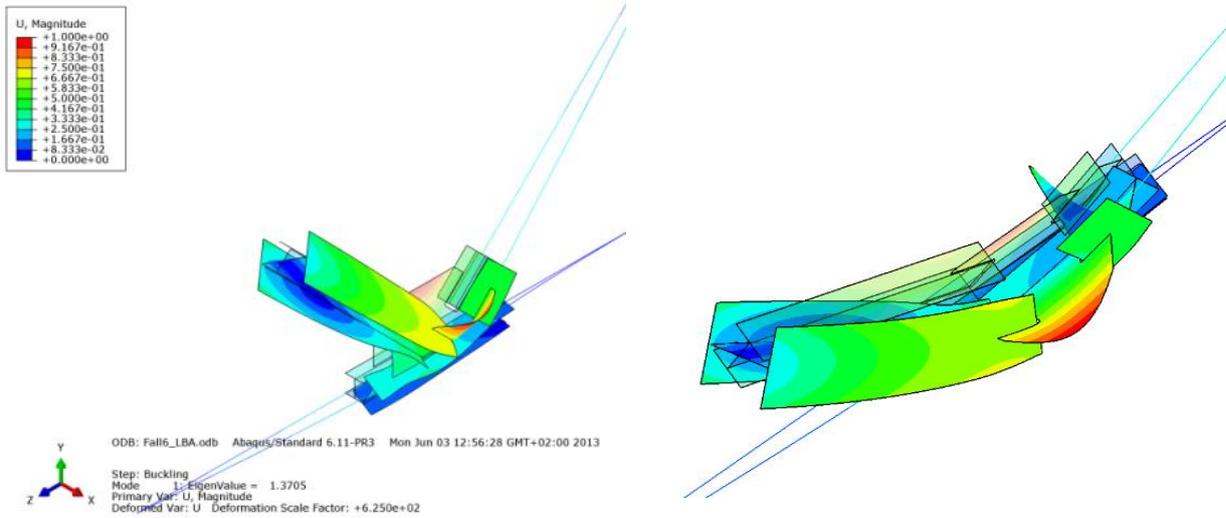


Abbildung B.104 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 2,8\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 2,4\text{mm}$), wie der Abbildung B.105 entnommen werden kann.

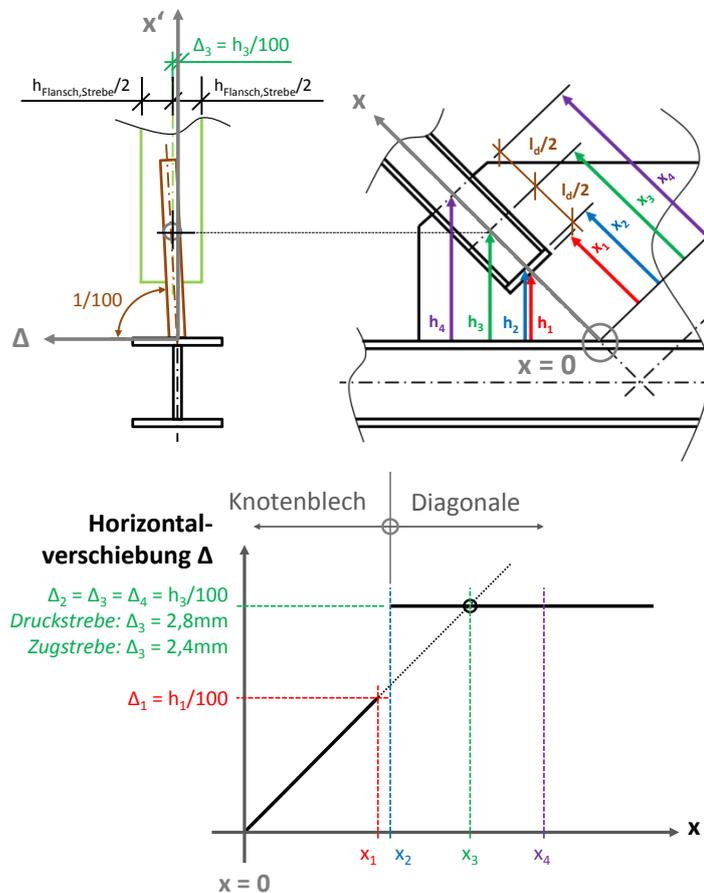


Abbildung B.105 – Eigenform der Gruppe 5 – Imperfektion Knotenblech

B - 4.6.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.6.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist durch Ausweichen der Druckdiagonale charakterisiert, wie die Abbildungen B.106 bis B.109 zeigen. Des Weiteren plastizieren Zugstrebe und Untergurt deutlich vor der Druckdiagonale und limitieren somit die Traglast.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

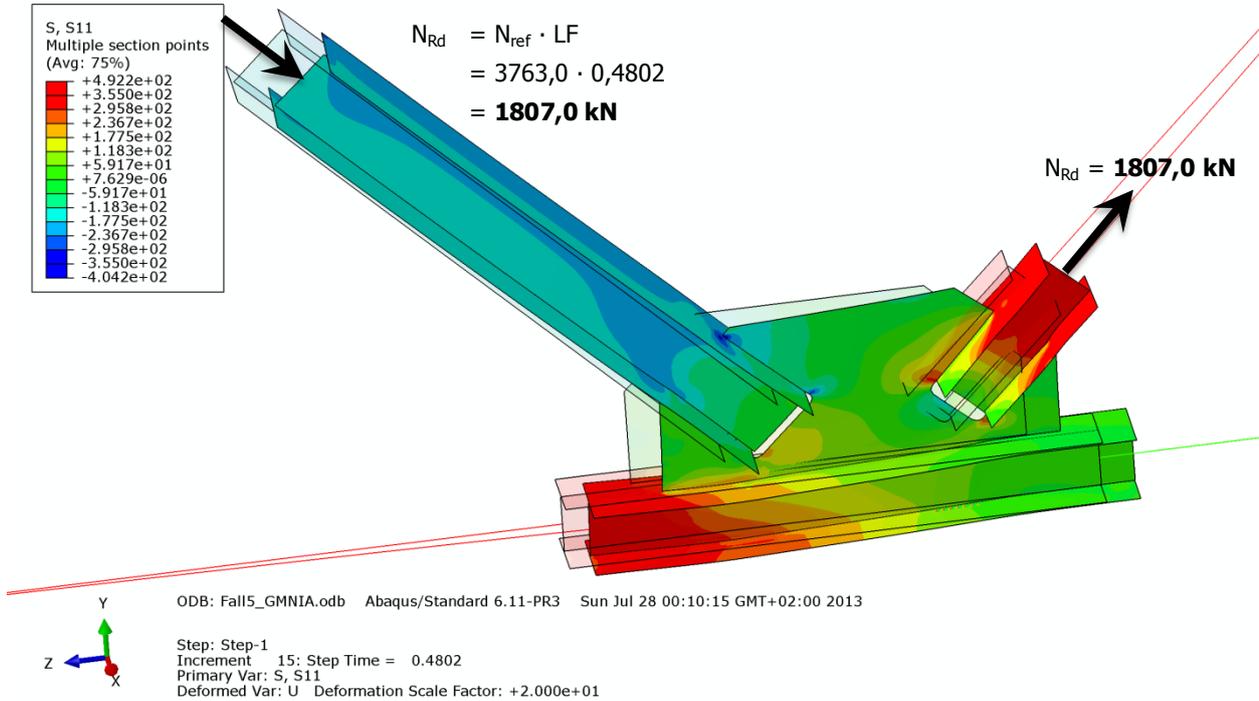


Abbildung B.106 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

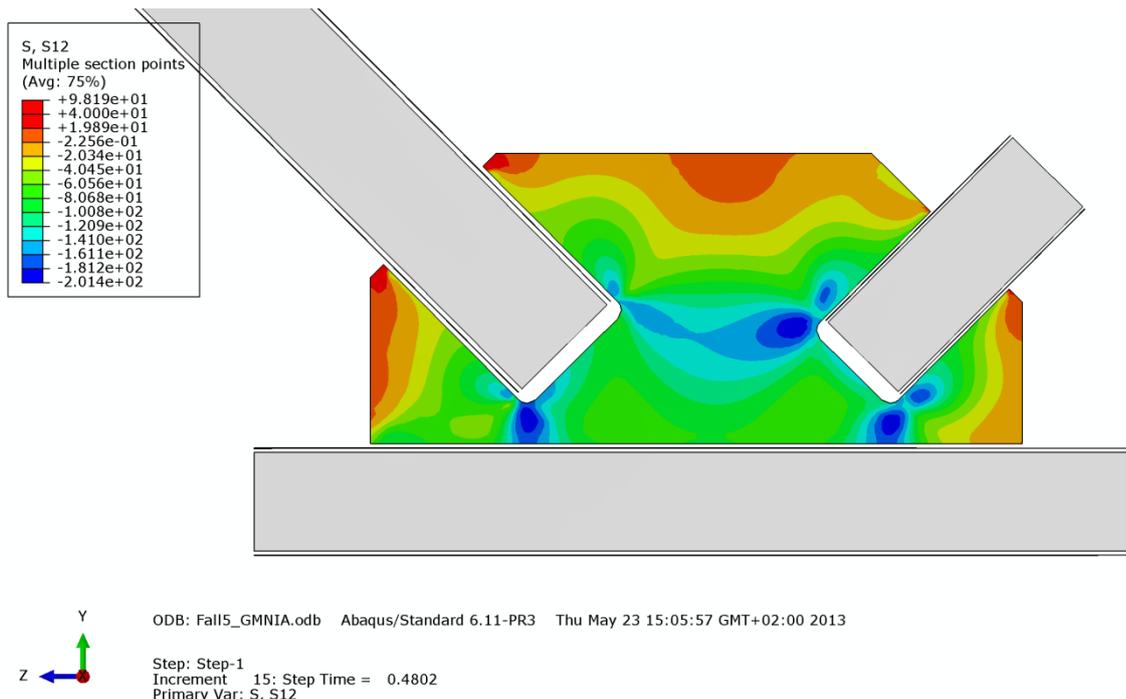


Abbildung B.107 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

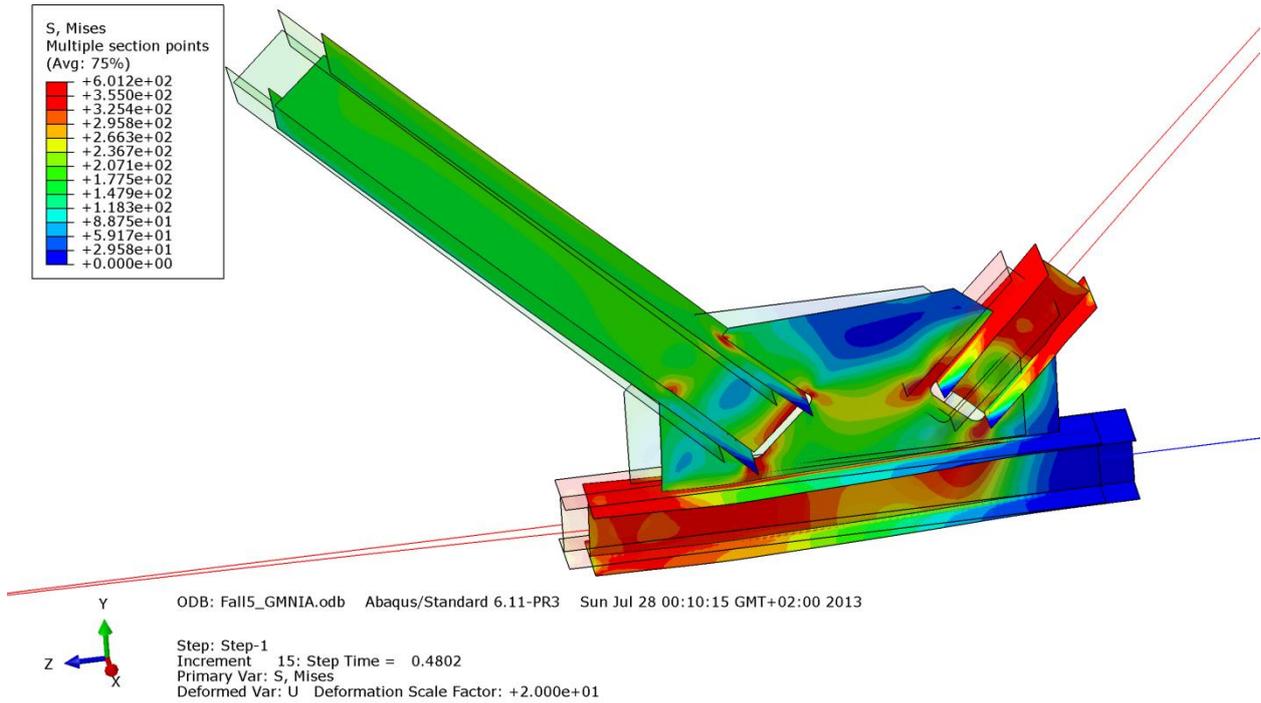


Abbildung B.108 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

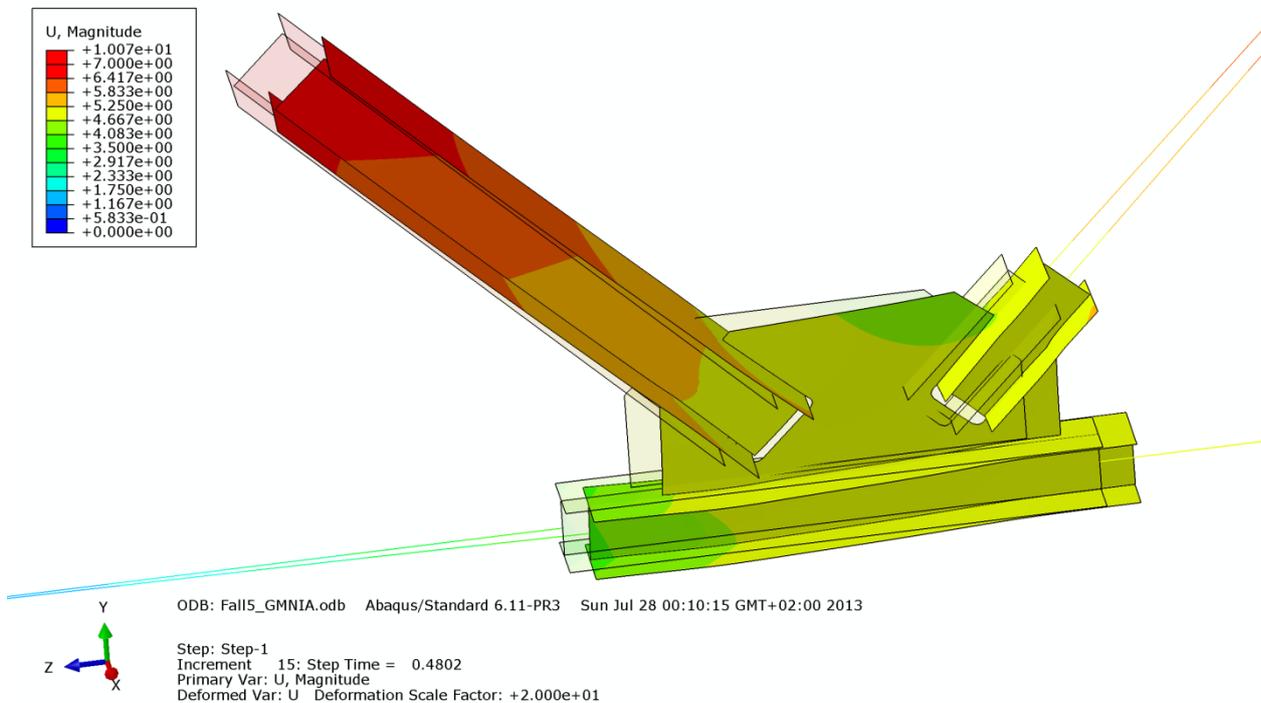


Abbildung B.109 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

B - 4.6.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist durch Ausweichen der Druckdiagonale charakterisiert, wie die Abbildungen B.110 bis B.113 zeigen. Des Weiteren plastizieren Zugstrebe und Untergurt deutlich vor der Druckdiagonale und limitieren somit die Traglast.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

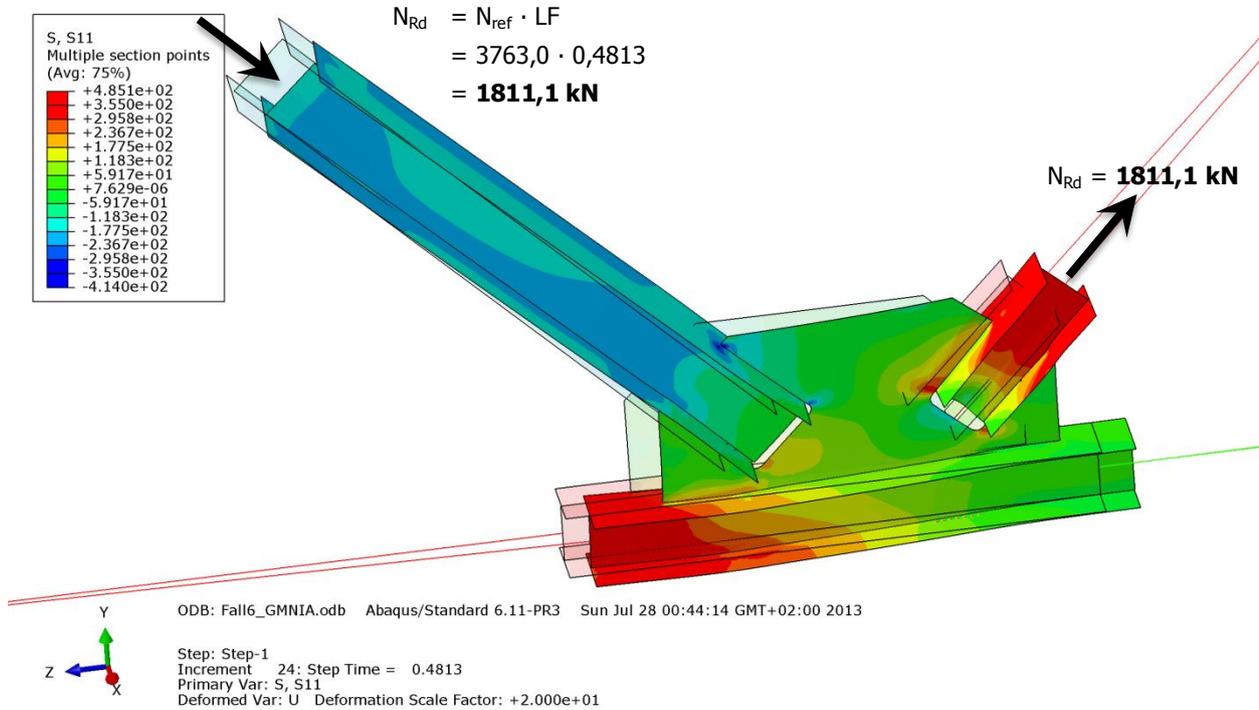


Abbildung B.110 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

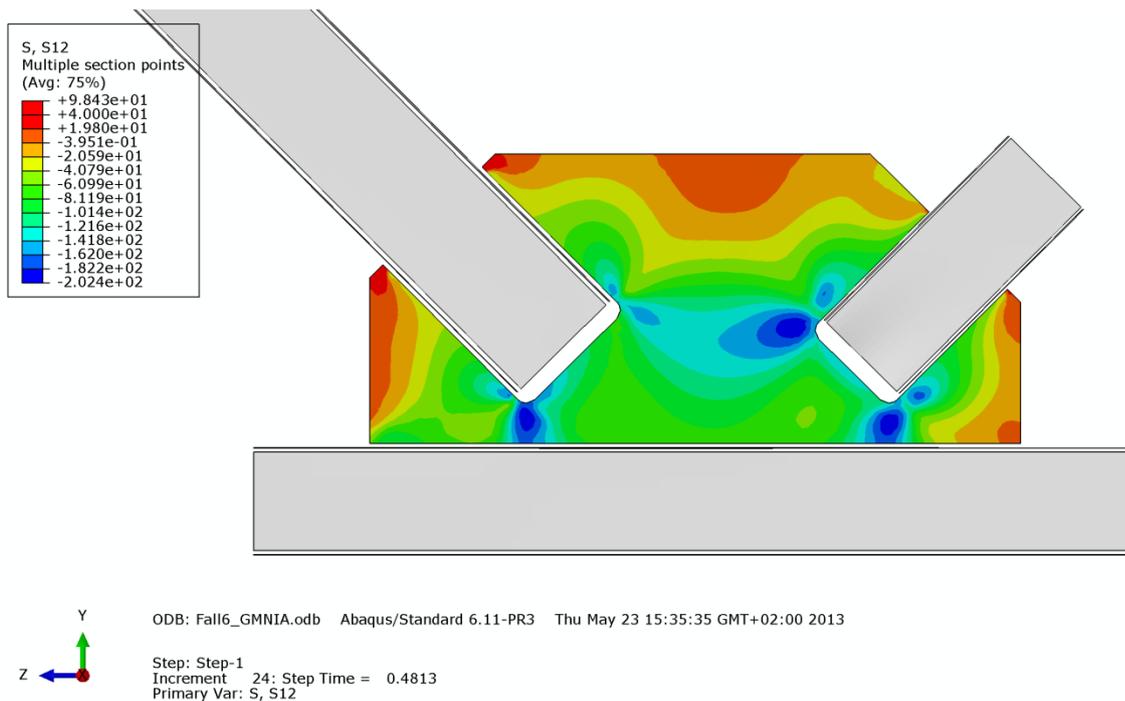


Abbildung B.111 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

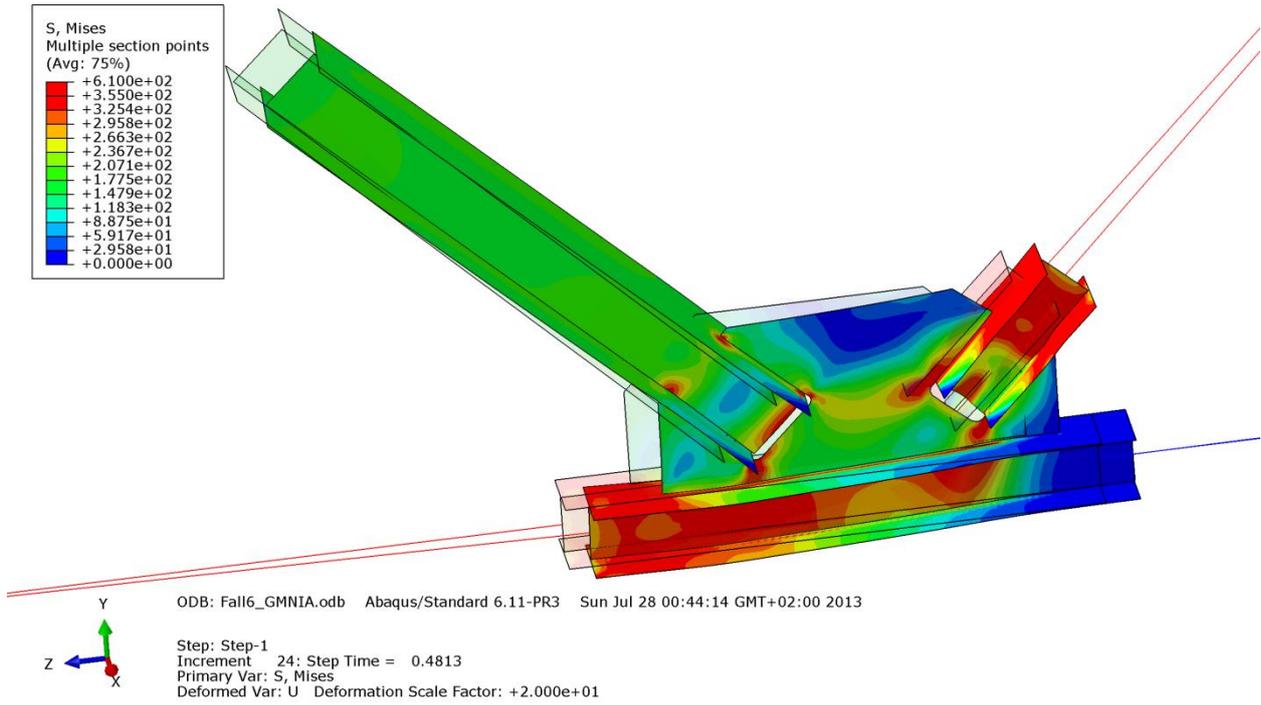


Abbildung B.112 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

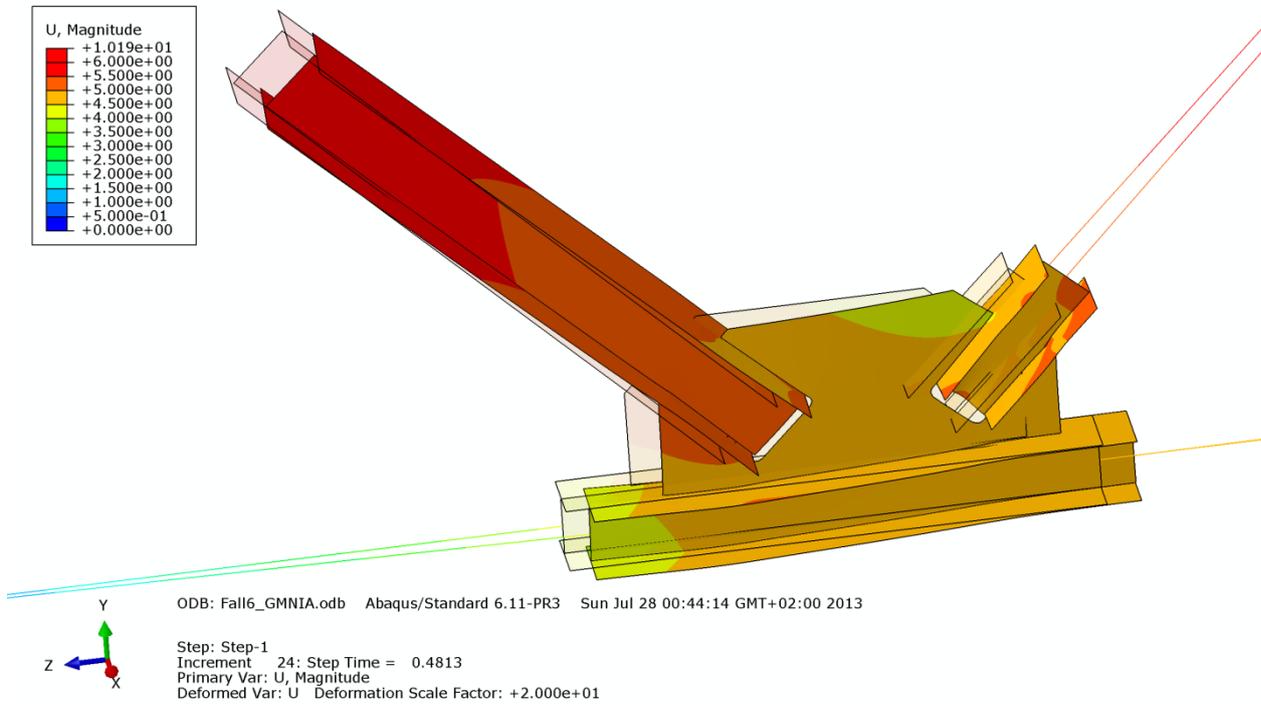


Abbildung B.113 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.6.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist durch plastizieren der Zugstrebe und des Untergurtstabes charakterisiert, wie in den Abbildungen B.114 bis B.117 zu erkennen ist.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

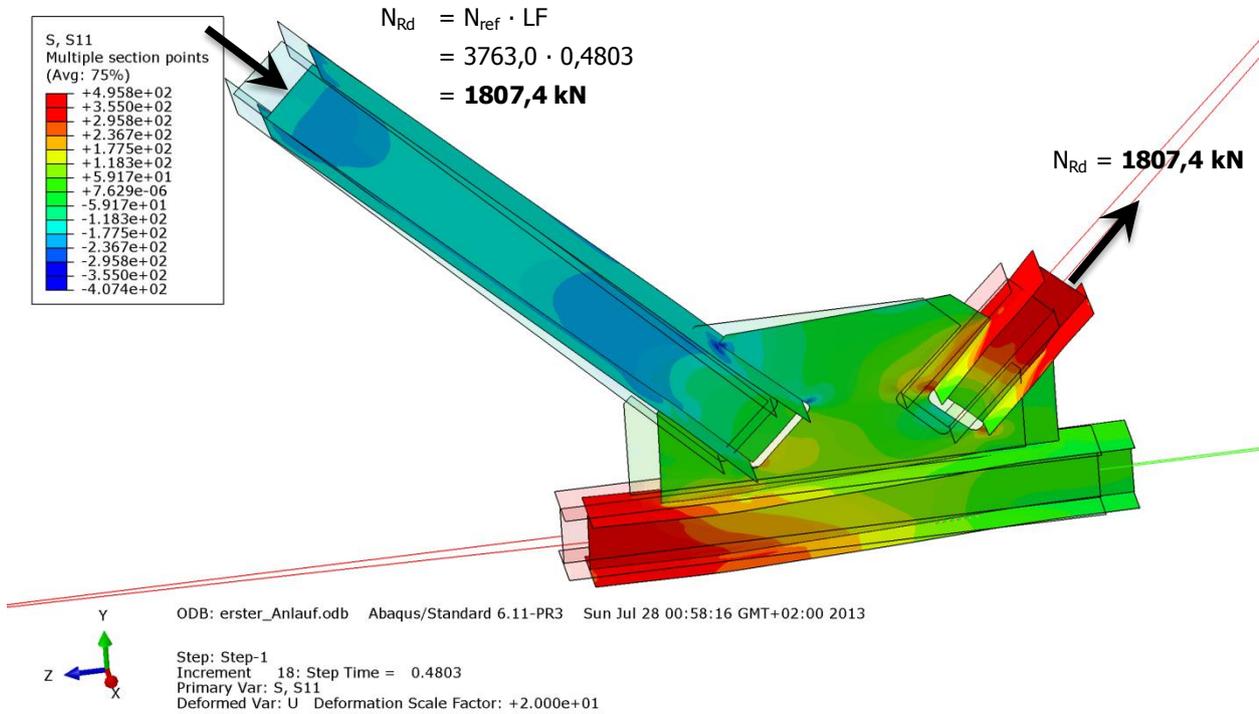


Abbildung B.114 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

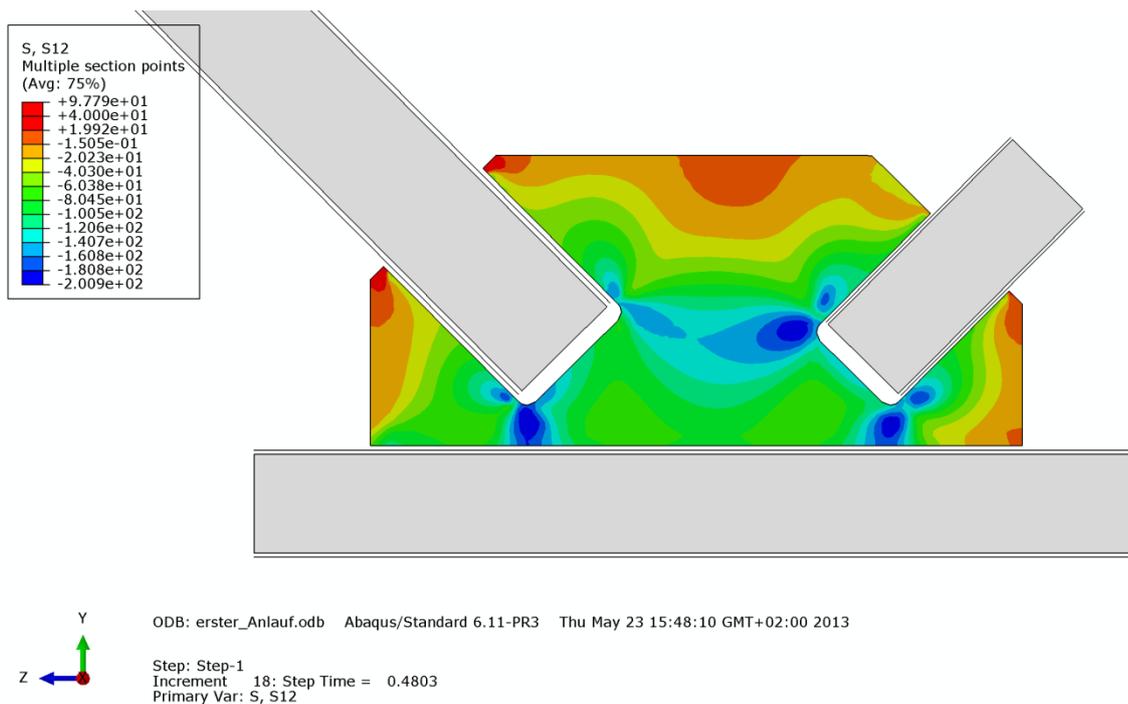


Abbildung B.115 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

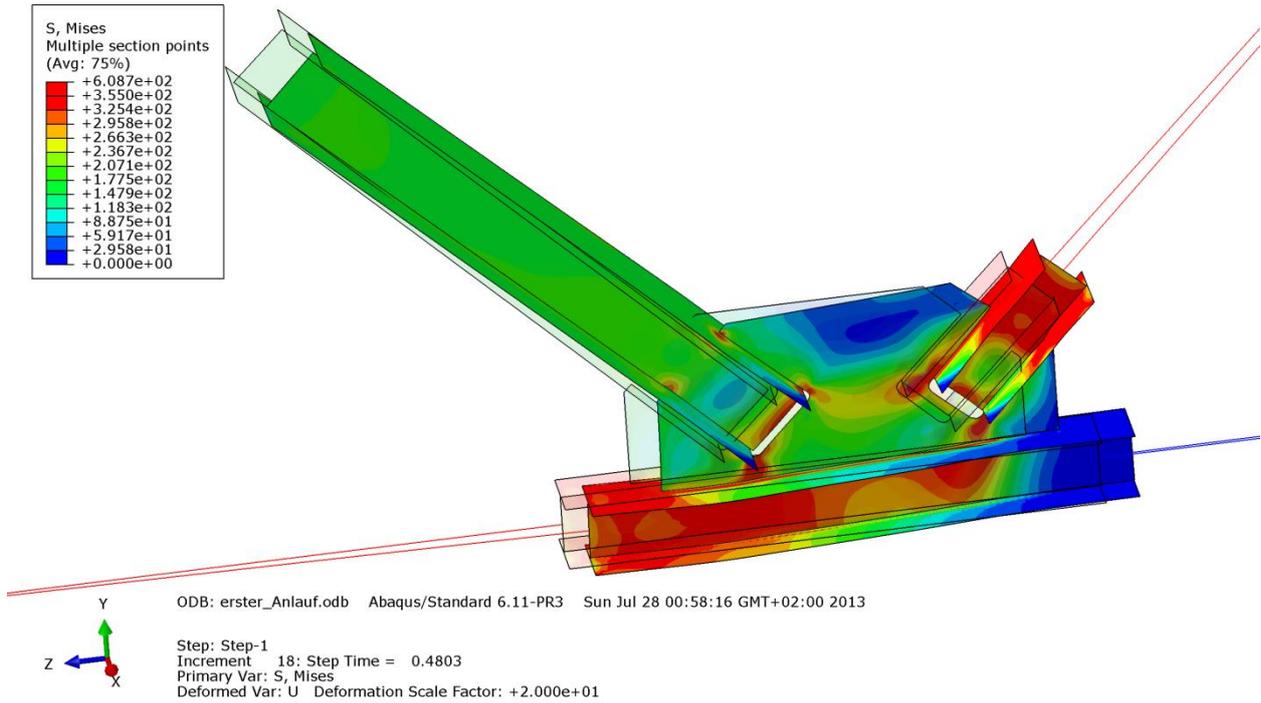


Abbildung B.116 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Verformung [mm]**

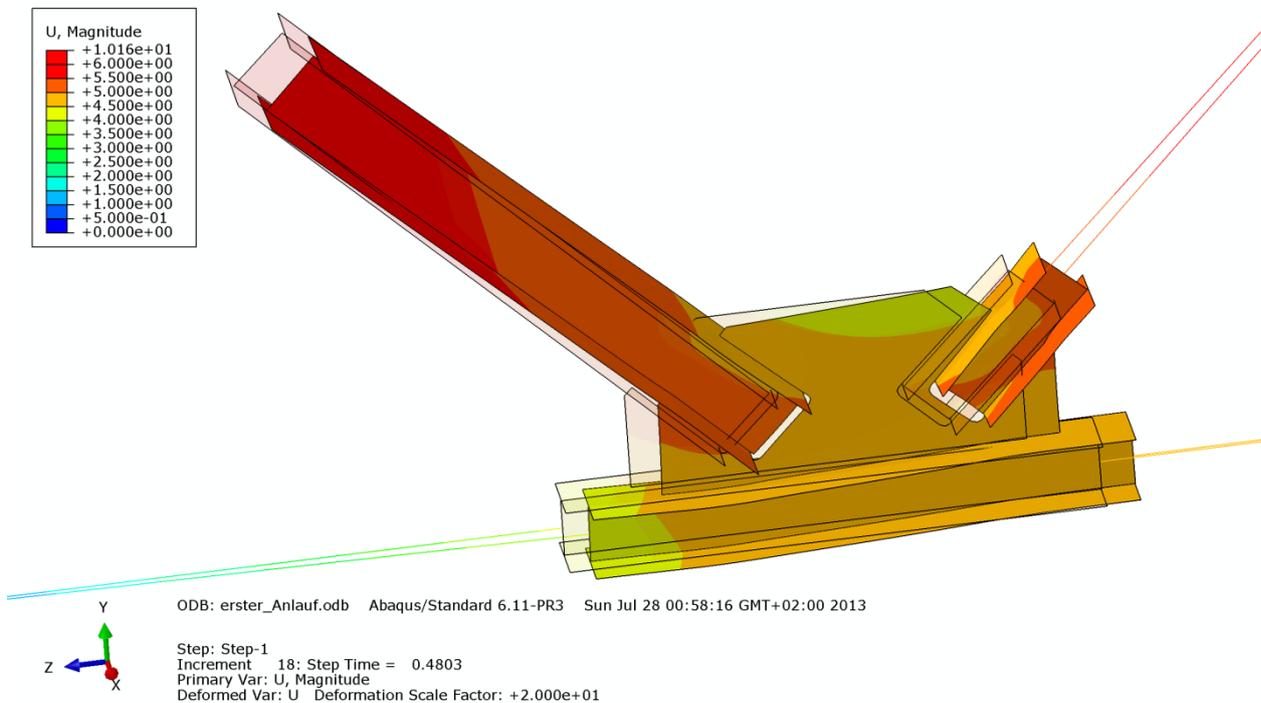


Abbildung B.117 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

B - 4.6.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Ausknicken des Stabes um die schwache Achse aufgrund der Drucknormalkraft, wie die Abbildungen B.118 und B.119 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knick eigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.

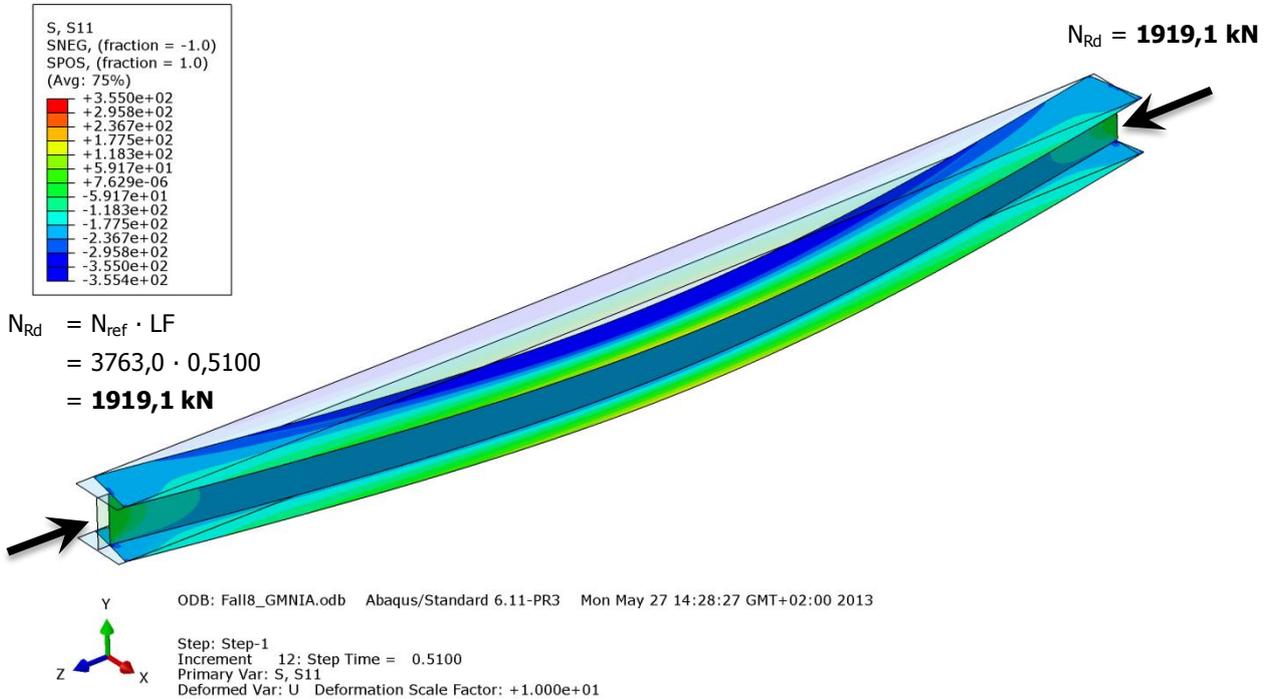


Abbildung B.118 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knick eigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.

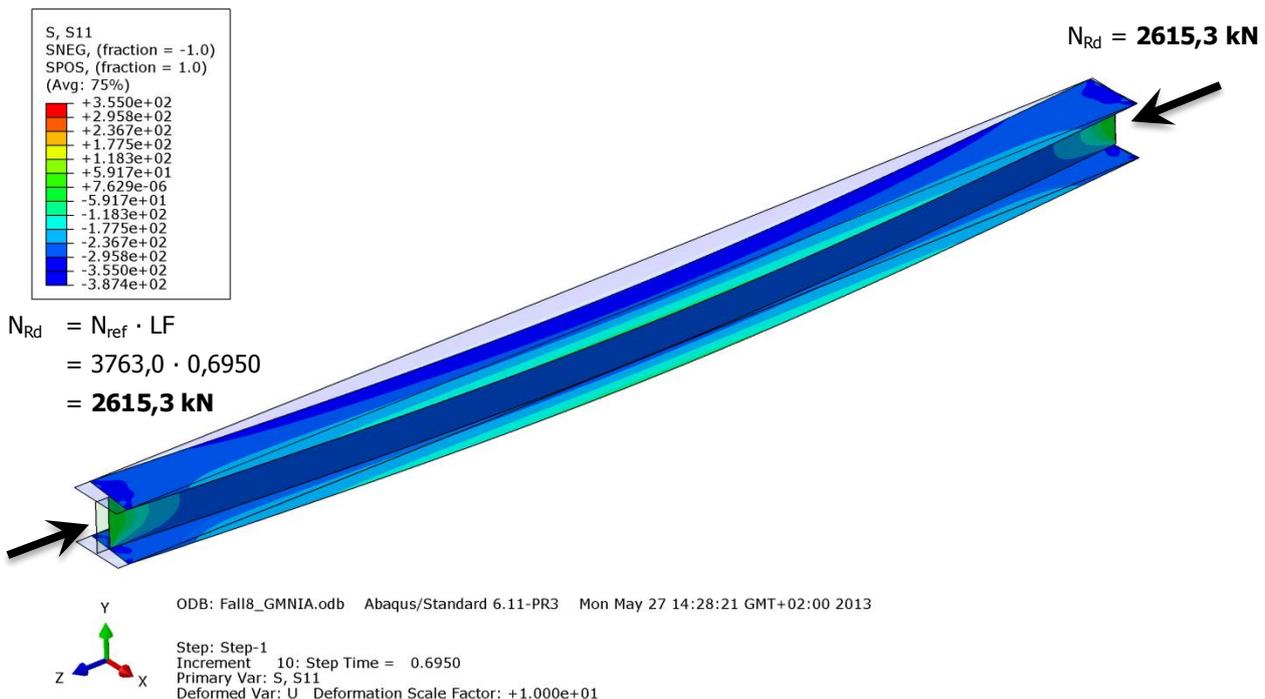


Abbildung B.119 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.7 Gruppe 6a

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6a zu charakterisieren sind in Tabelle B.20 zusammengefasst.

Gruppe 6a			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	4618mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,073
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{ges} =	4208mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,0
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	6530mm

Tabelle B.20 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6a

B - 4.7.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.120, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.121 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.122 entnommen werden kann.

• Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4618\text{mm}/750 = 6,2\text{mm}$. Abbildung B.120 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6a.

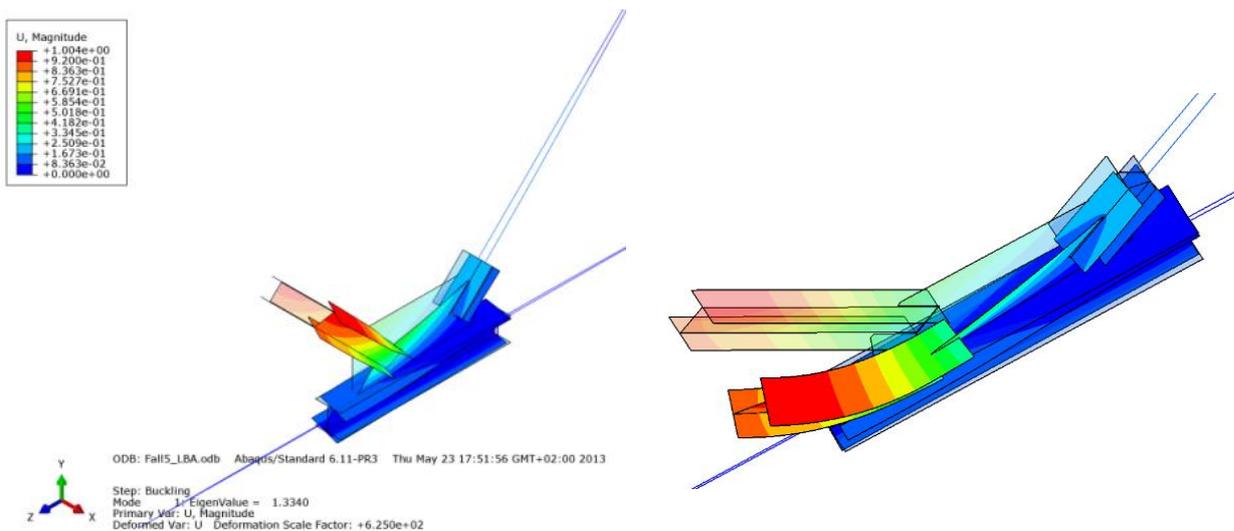


Abbildung B.120 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6a – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4618\text{mm}/750 = 6,2\text{mm}$.
Abbildung B.121 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6a.

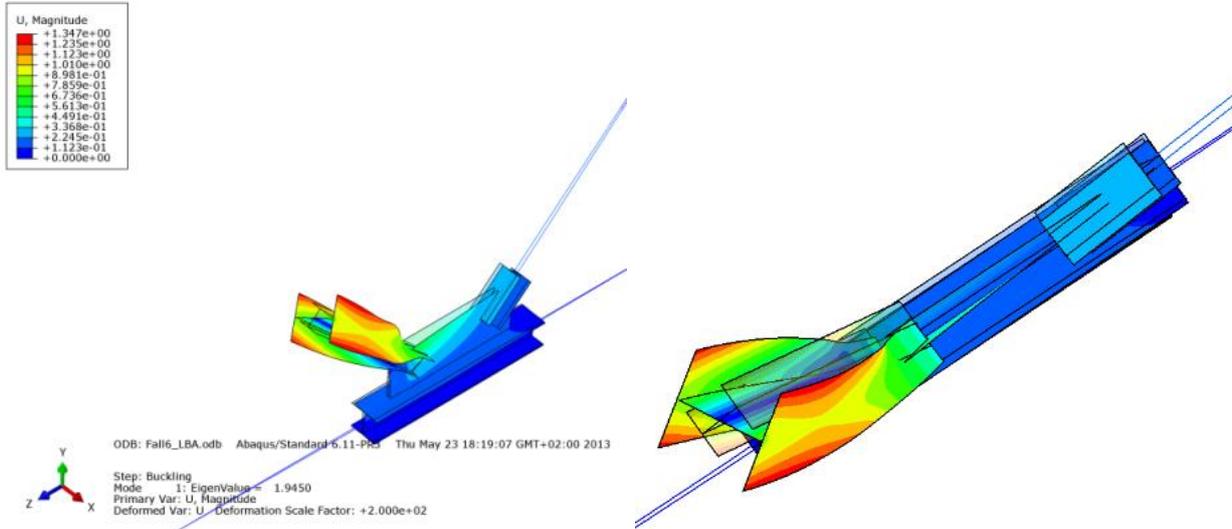


Abbildung B.121 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6a – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe und die Zugstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,75\text{mm}$), wie der Abbildung B.122 entnommen werden kann.

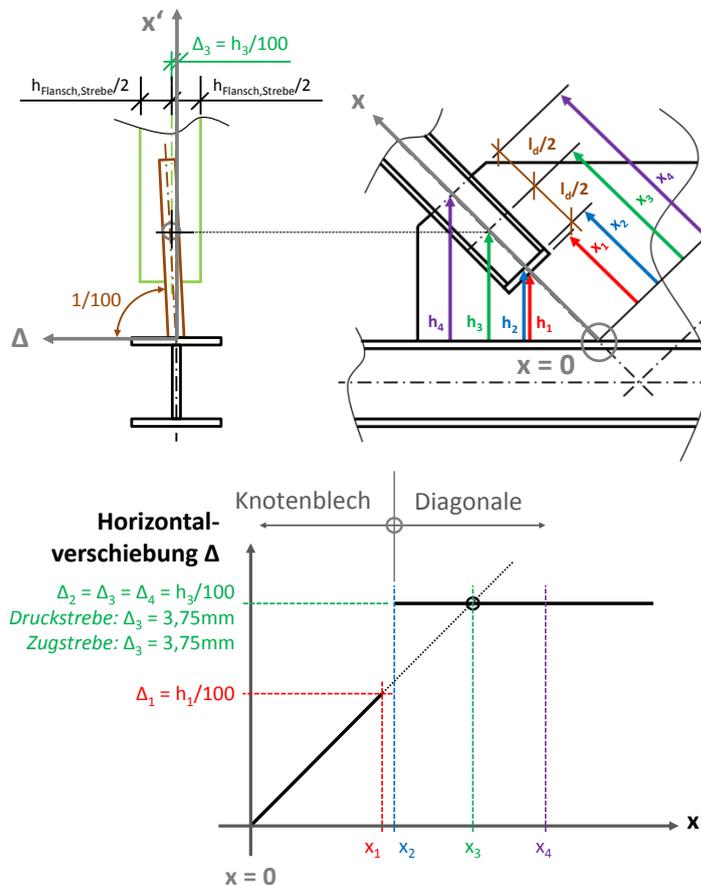


Abbildung B.122 – Eigenform der Gruppe 6a – Imperfektion Knotenblech

B - 4.7.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.7.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe sowie Ausweichen des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.123 bis B.126 zeigen. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

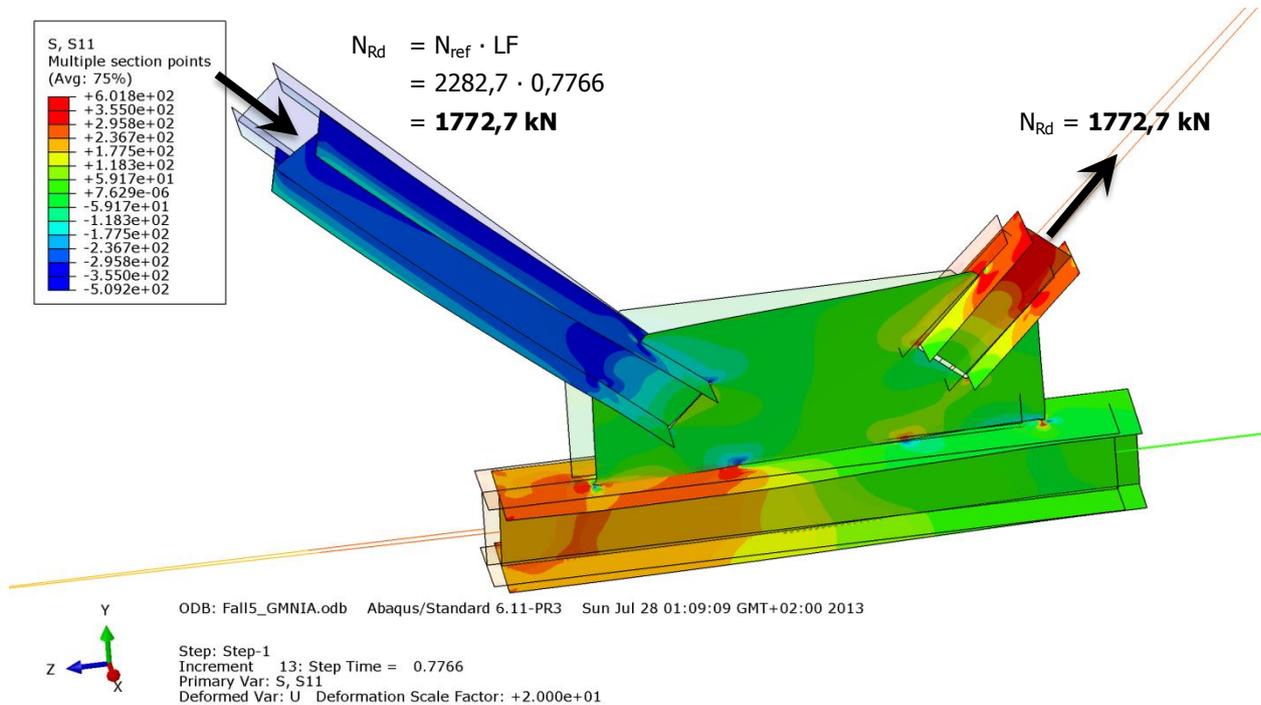


Abbildung B.123 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

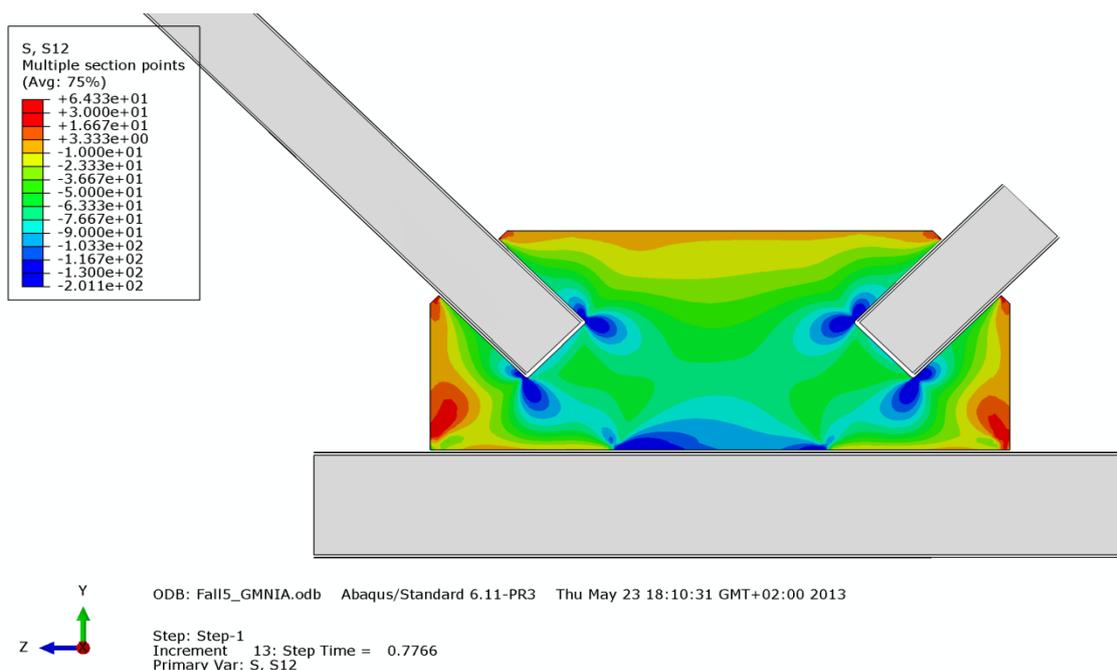


Abbildung B.124 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

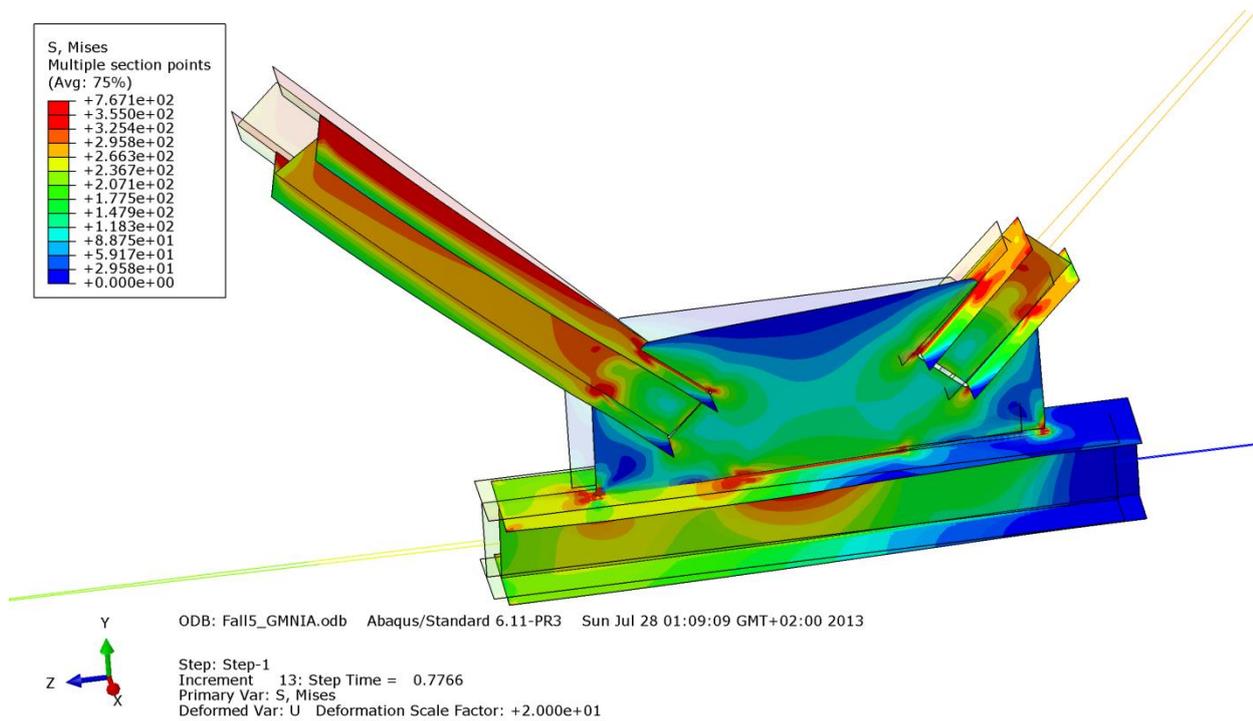


Abbildung B.125 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

• **Verformung [mm]**

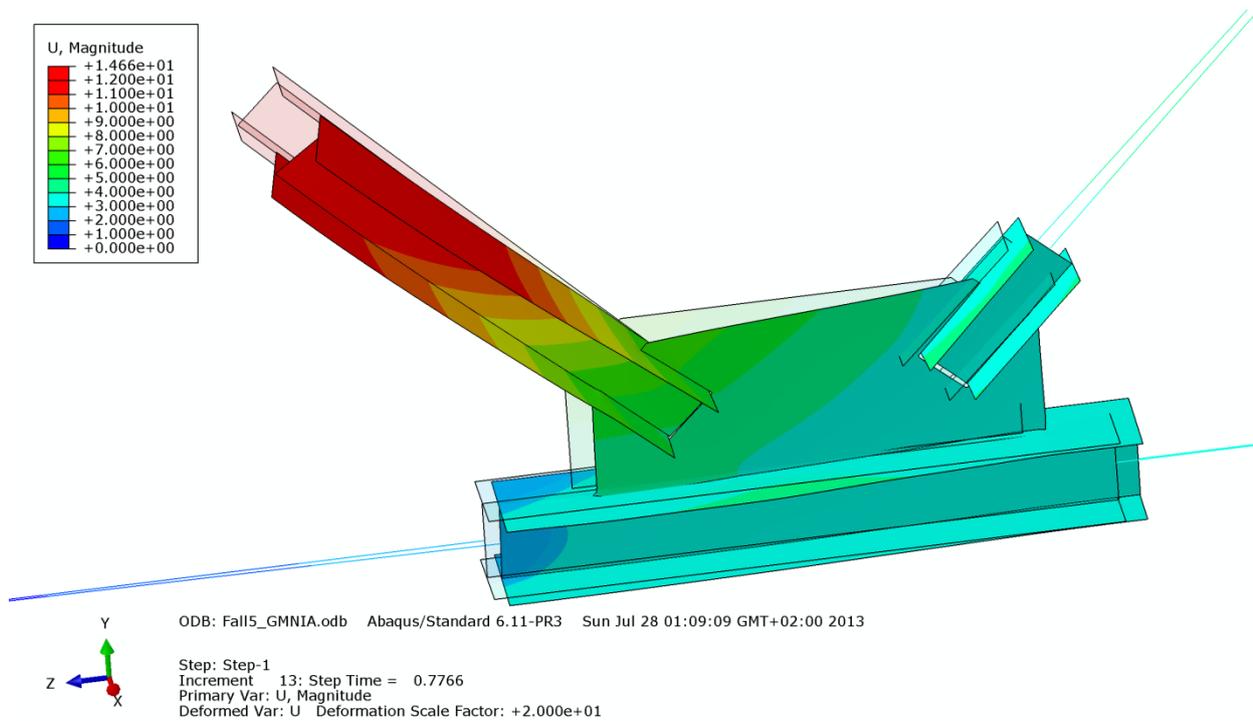


Abbildung B.126 – Verformung U [mm] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

B - 4.7.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Verdrillung der Druckstrebe sowie dem Ausweichen des Untergurtstabes und des Knotenbleches, wie den Abbildungen B.127 bis B.130 entnommen werden kann. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen und lokal am oberen Flansch des Untergurtes auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

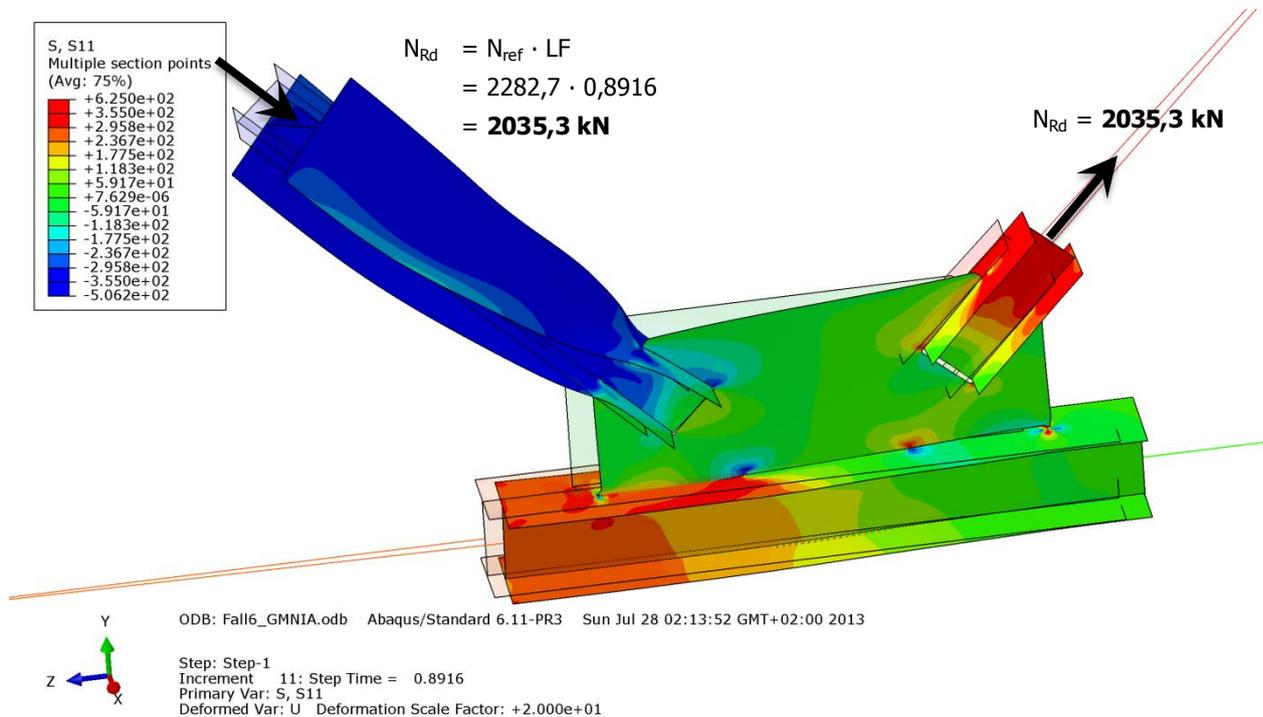


Abbildung B.127 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

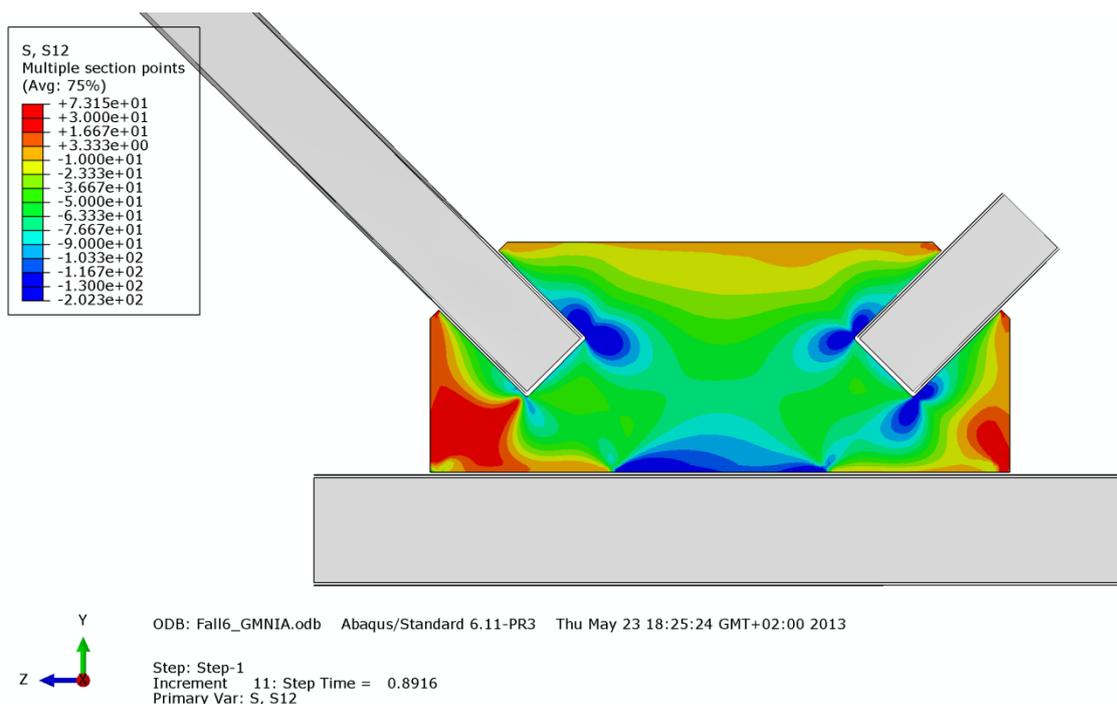


Abbildung B.128 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

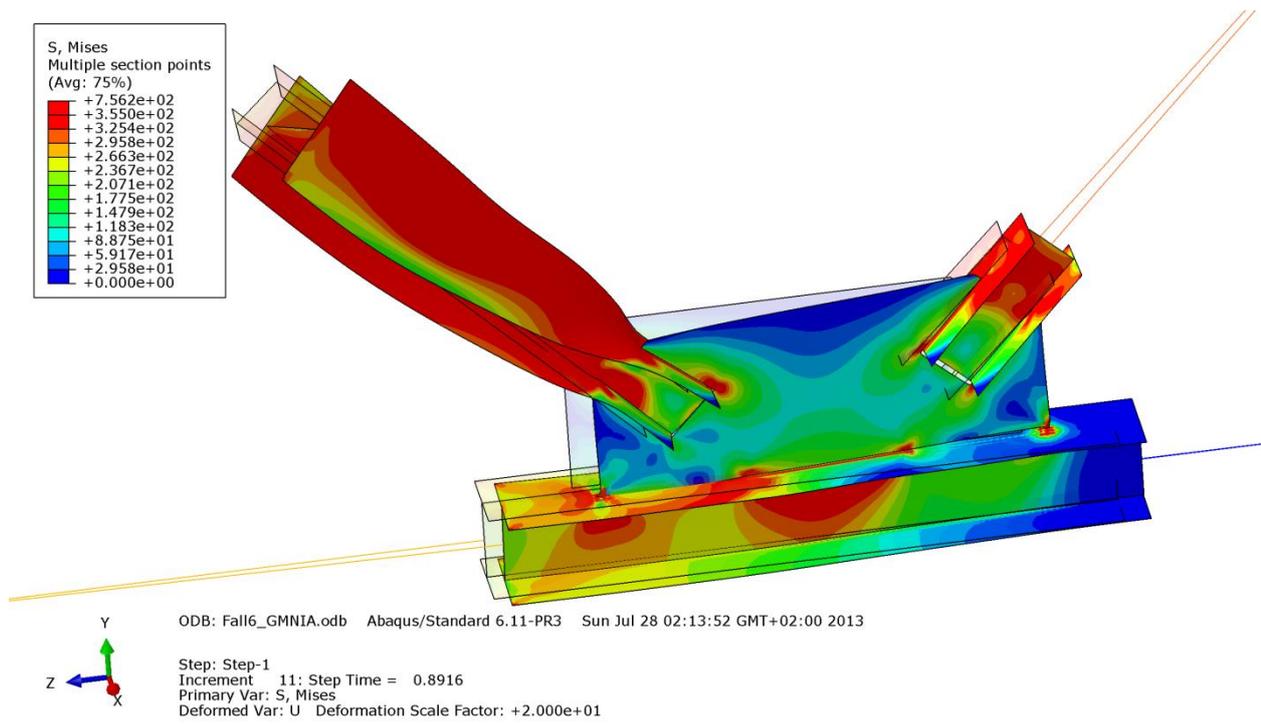


Abbildung B.129 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

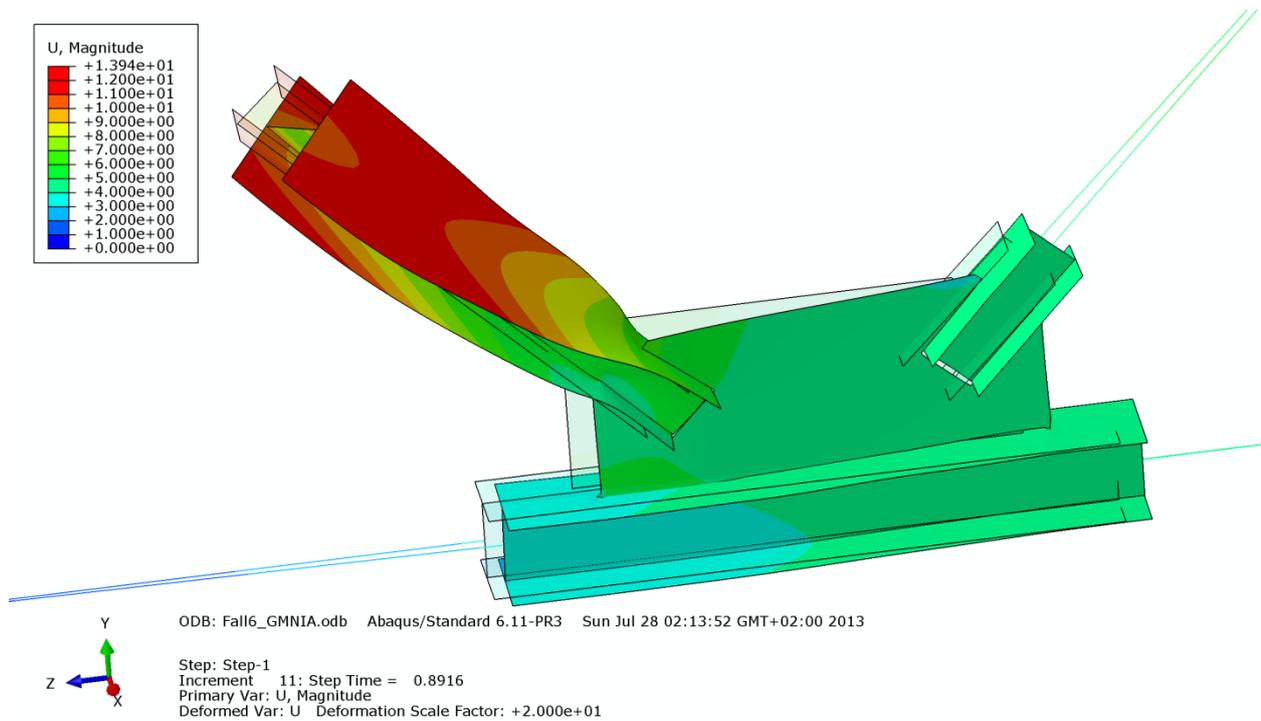


Abbildung B.130 – Verformung U [mm] der Gruppe 6a – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.7.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe sowie Ausweichen des Untergurtes und des Knotenbleches, wie den Abbildungen B.131 bis B.134 zu entnehmen ist. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen und lokal am oberen Flansch des Untergurtes auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

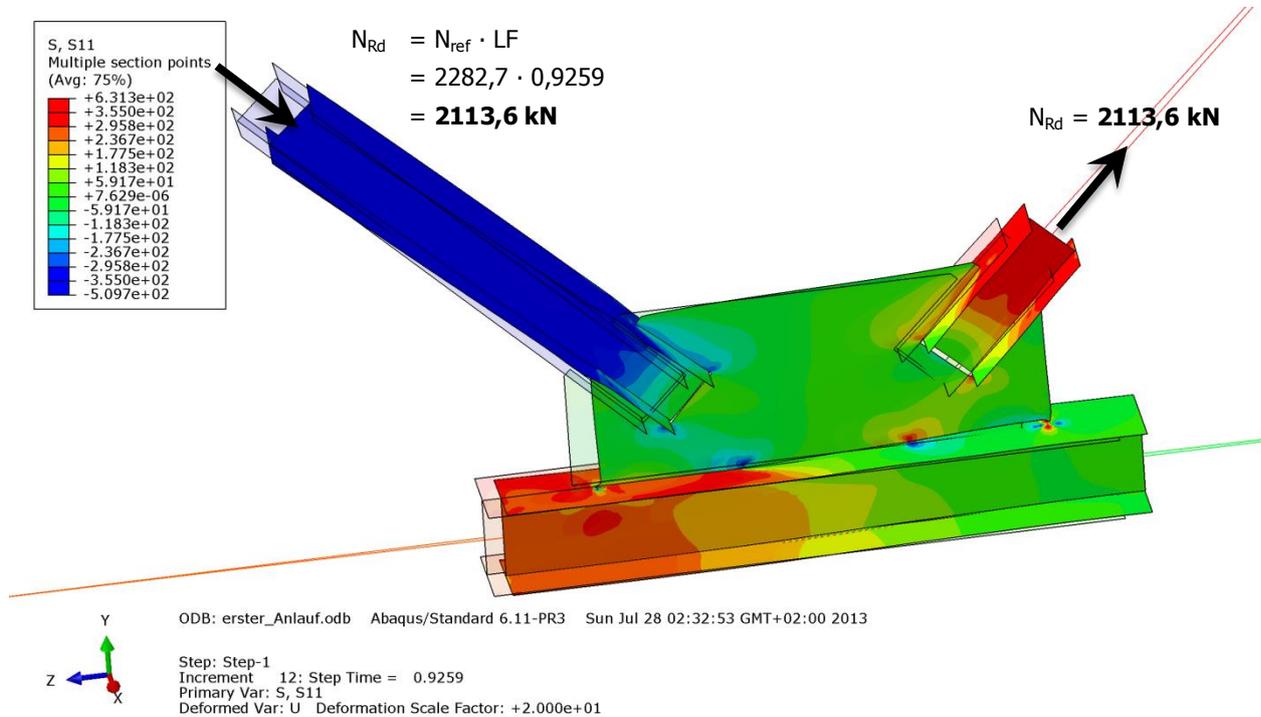


Abbildung B.131 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

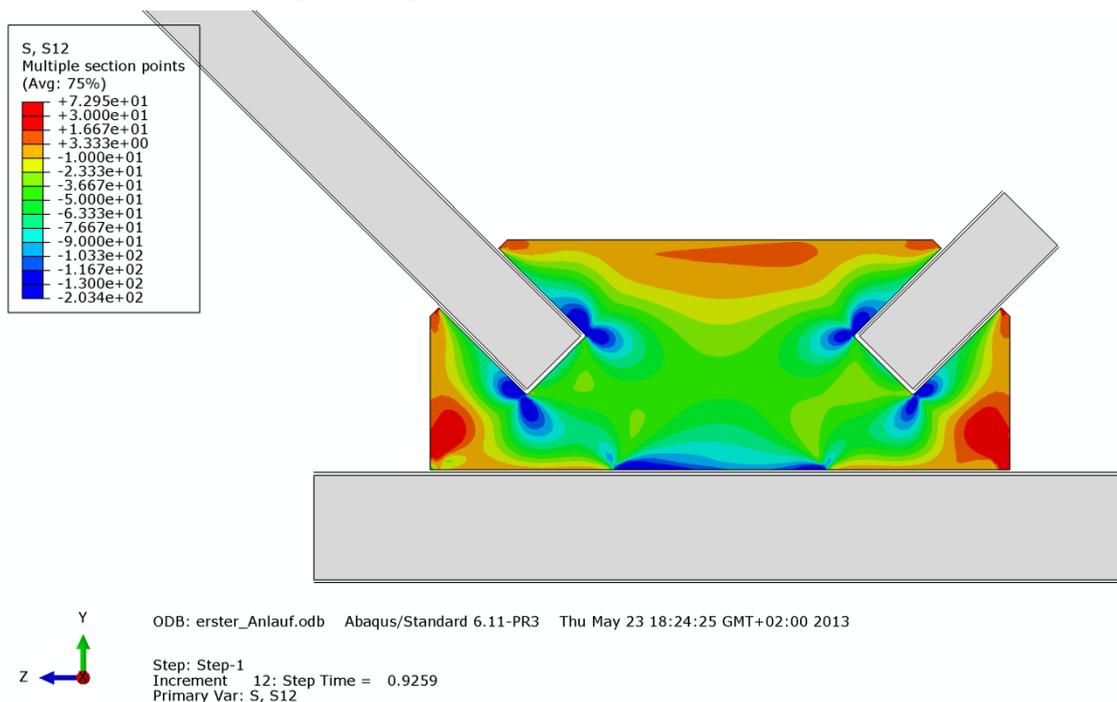


Abbildung B.132 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6a – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

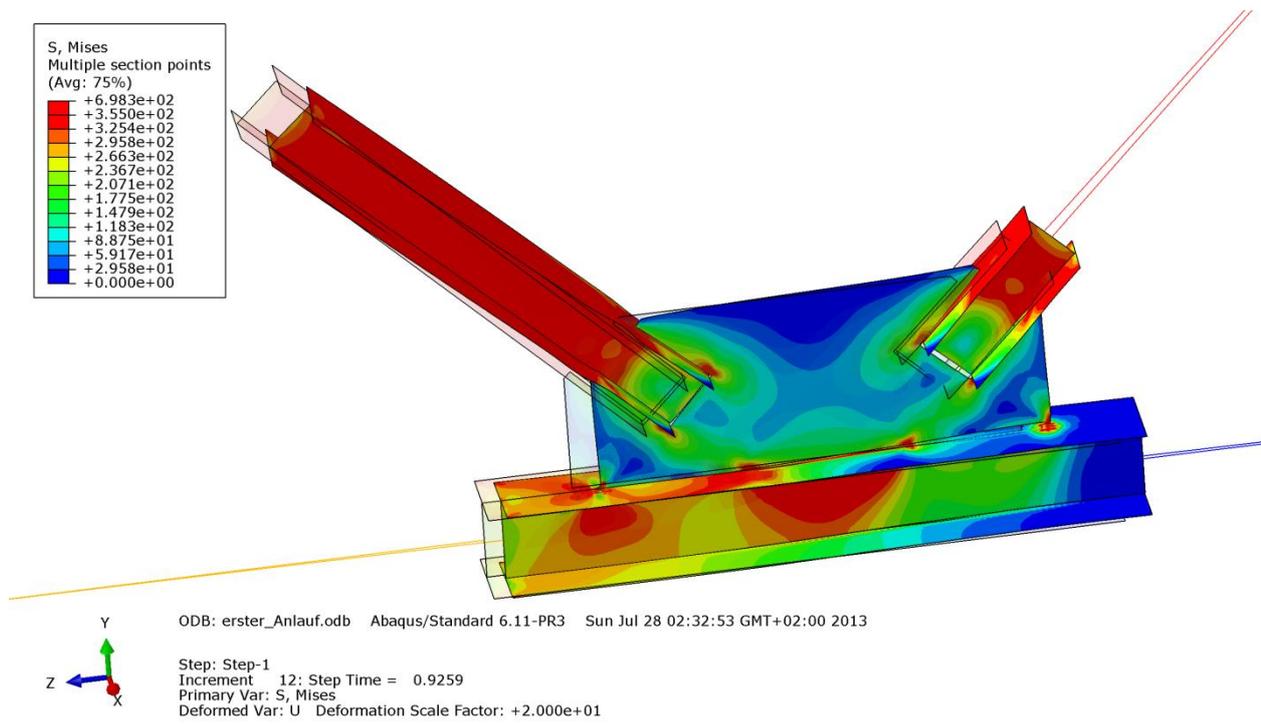


Abbildung B.133 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6a – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Verformung [mm]**

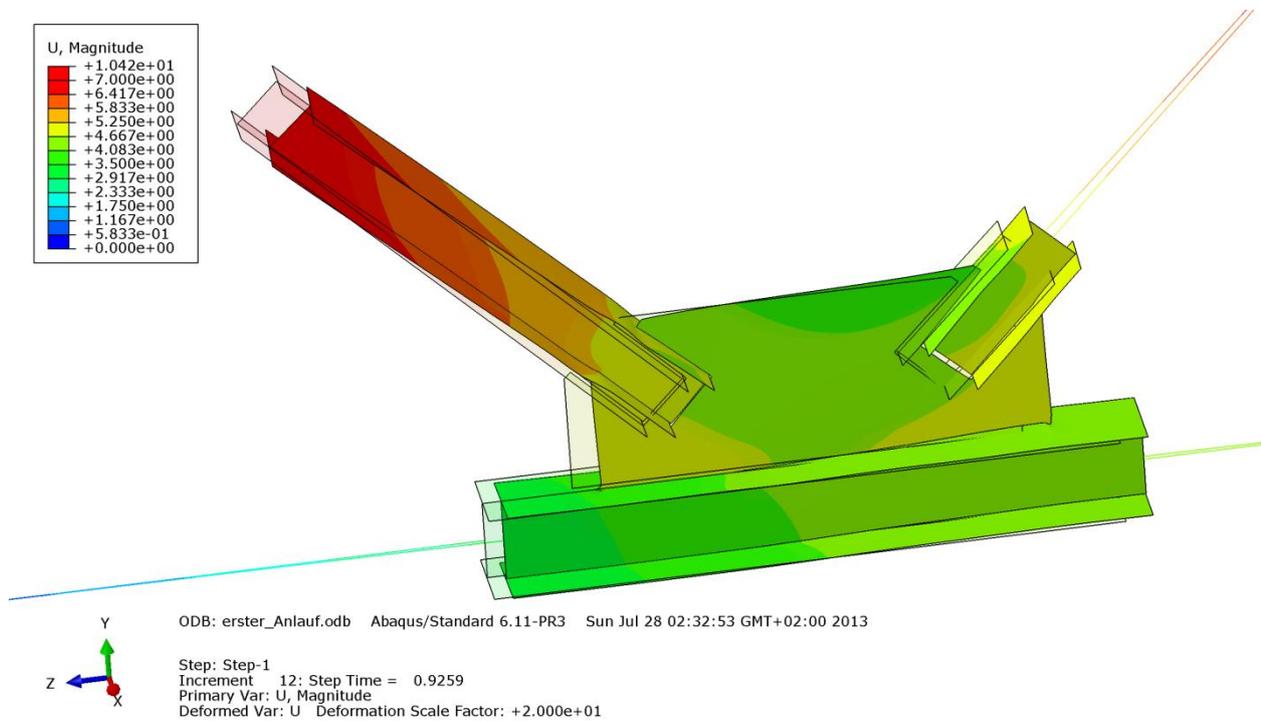


Abbildung B.134 – Verformung U [mm] der Gruppe 6a – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

B - 4.7.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform des Stabes ist gekennzeichnet durch Knicken der Strebe, wie die Abbildungen B.135 und B.136 zeigen. Eine Plastizierung der Druckrandfaser der Profilflansche erfolgt aufgrund der Drucknormalkraft.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4618\text{mm}/200 = 23,1\text{mm}$.

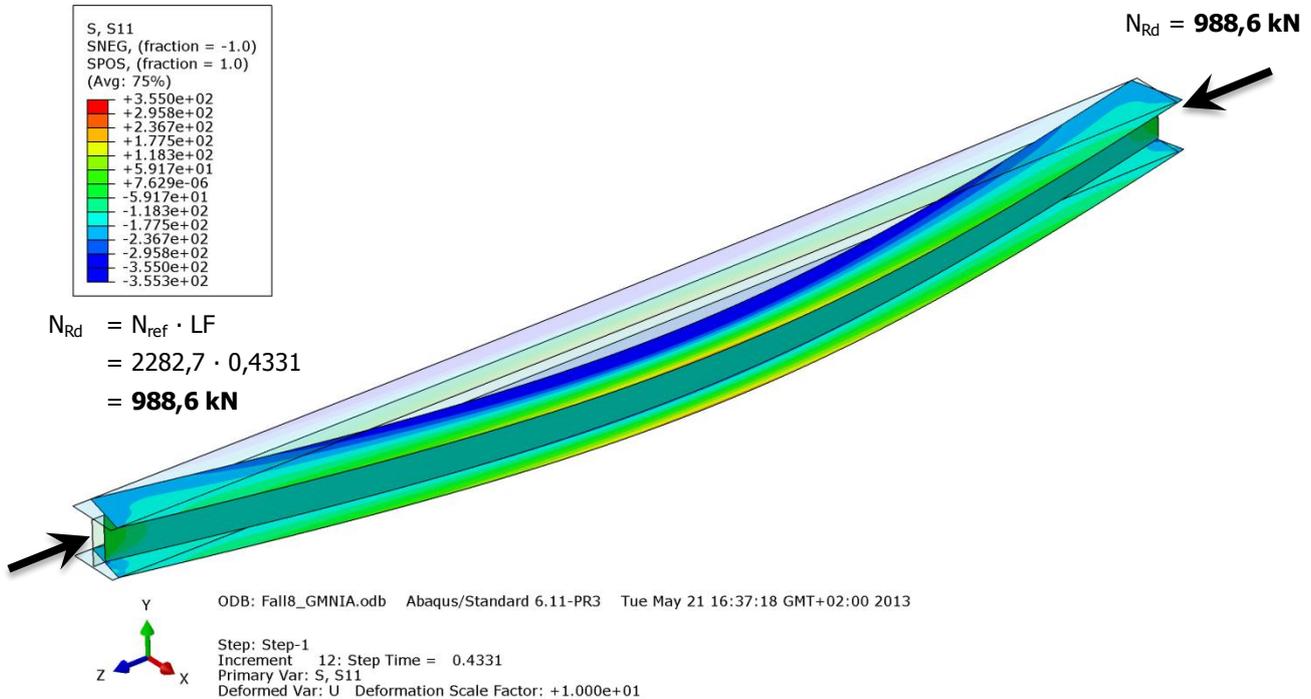


Abbildung B.135 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4618\text{mm}/750 = 6,2\text{mm}$.

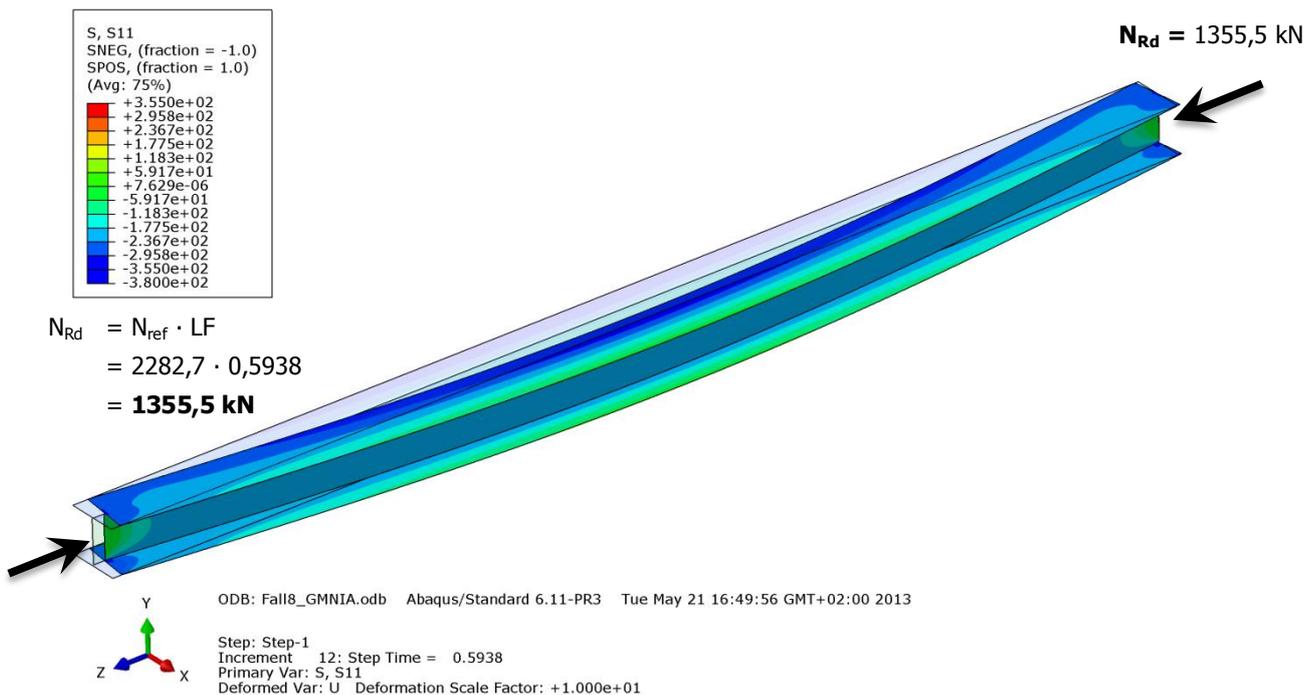


Abbildung B.136 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 4.8 Gruppe 6b

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6b zu charakterisieren sind in Tabelle B.21 zusammengefasst.

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{ges} =	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	4750mm

Tabelle B.21 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6b

B - 4.8.1 Imperfektionen

Den Traglastberechnungen wurden geometrische Ersatzimperfektionen mit affinen Verläufen zur durchgeführten Eigenformanalyse zugrunde gelegt. Die erste Knickeigenform des Fachwerkknotens zeigt Abbildung B.137, die zweite Eigenform ist in Abbildung B.138 dargestellt. Der Maximalwert der Verformung wurde als geometrische Ersatzimperfektion jeweils mit $L^*/750$ skaliert. Neben diesen beiden Imperfektionsfiguren wurde eine weitere Traglastberechnung mit Imperfektionsauftritt im Knotenblech durchgeführt. Hierbei wurde das Knotenblech um 1/100 mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben, wie der Abbildung B.139 entnommen werden kann.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der erste Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.137 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b.

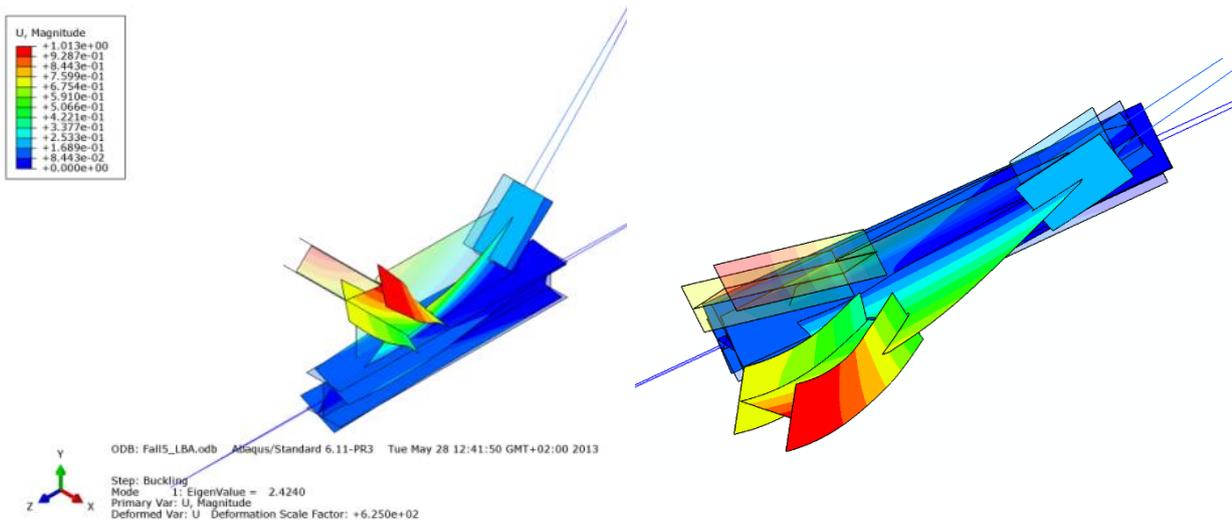


Abbildung B.137 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – erste Knickeigenform

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$.
Abbildung B.137 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b.

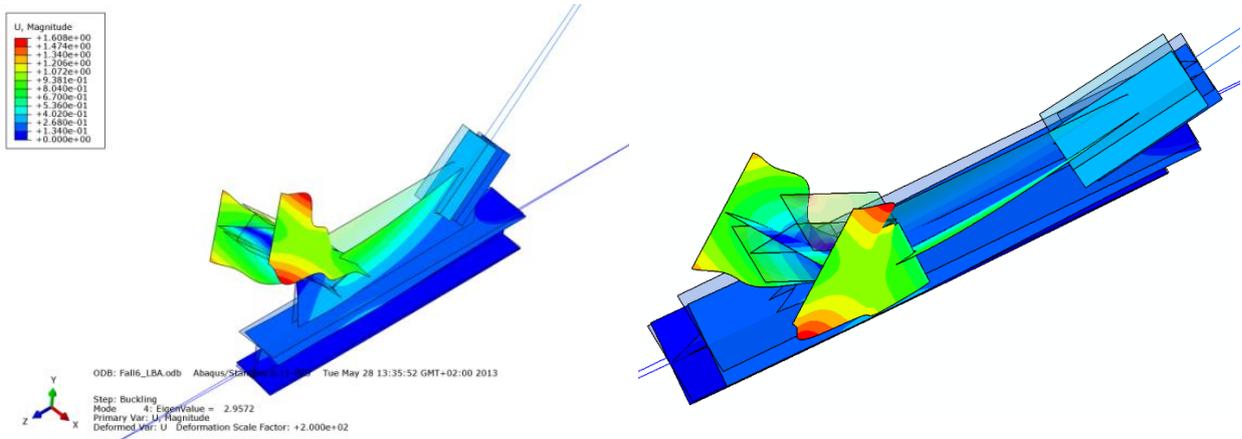


Abbildung B.138 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – zweite Knickeigenform

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe und die Zugstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,75\text{mm}$), wie der Abbildung B.139 entnommen werden kann.

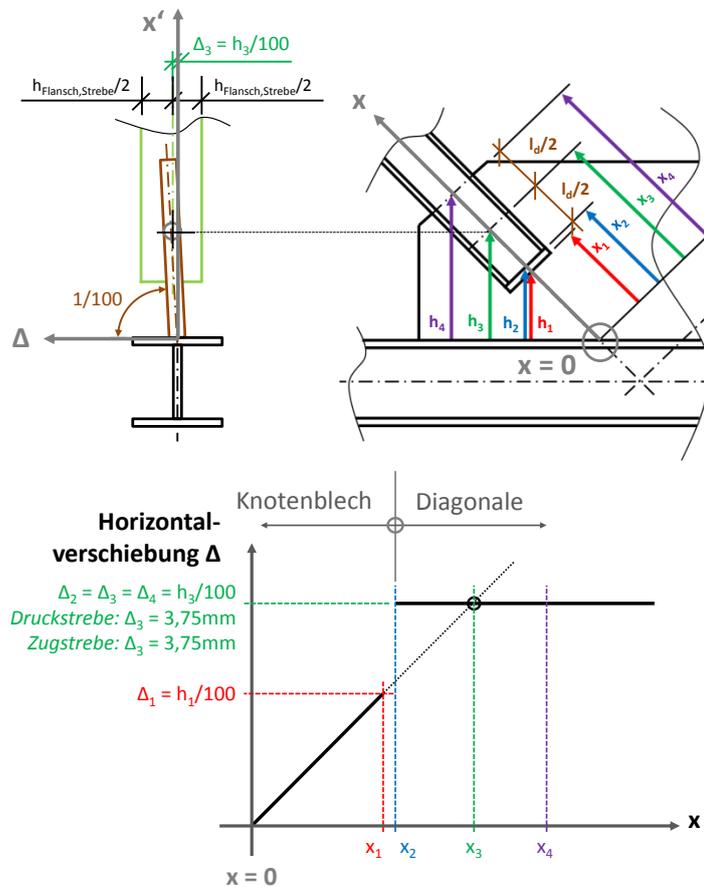


Abbildung B.139 – Eigenform der Gruppe 6b – Imperfektion Knotenblech

B - 4.8.2 Ergebnisse im Traglastzustand

B - 4.8.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen der Druckstrebe mit kombinierter Verdrehung, wie die Abbildungen B.140 bis B.143 zeigen. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen, lokal beginnend auch am oberen Flansch des Untergurtes auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

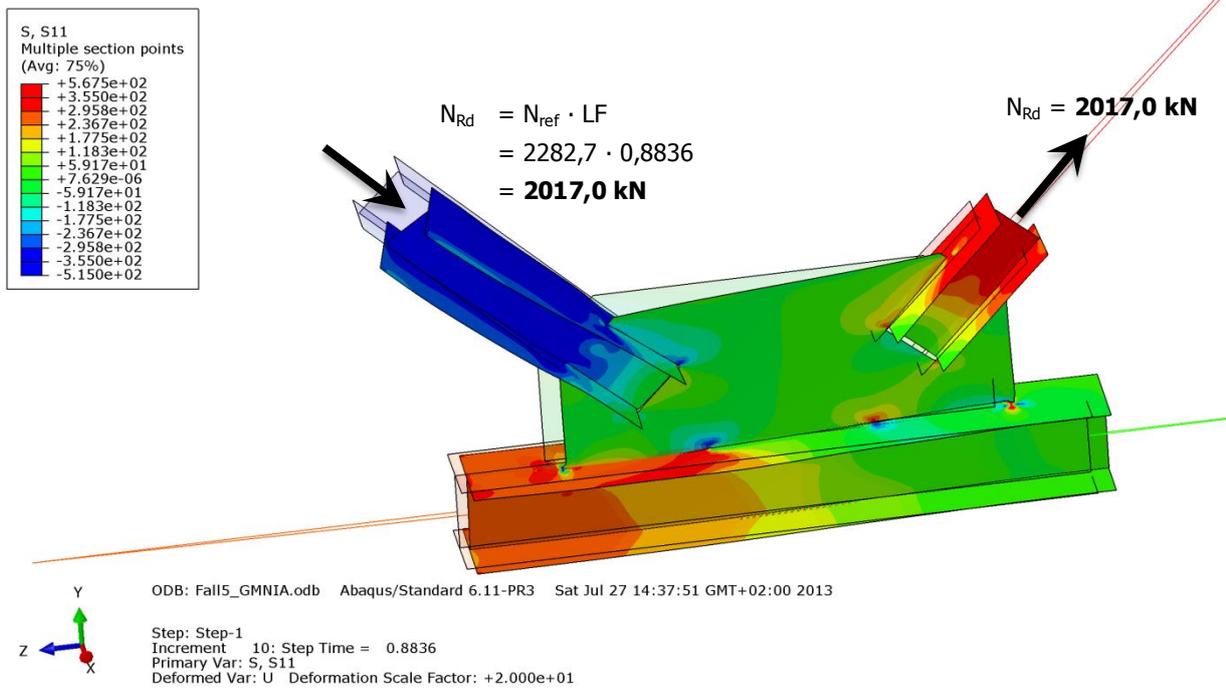


Abbildung B.140 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

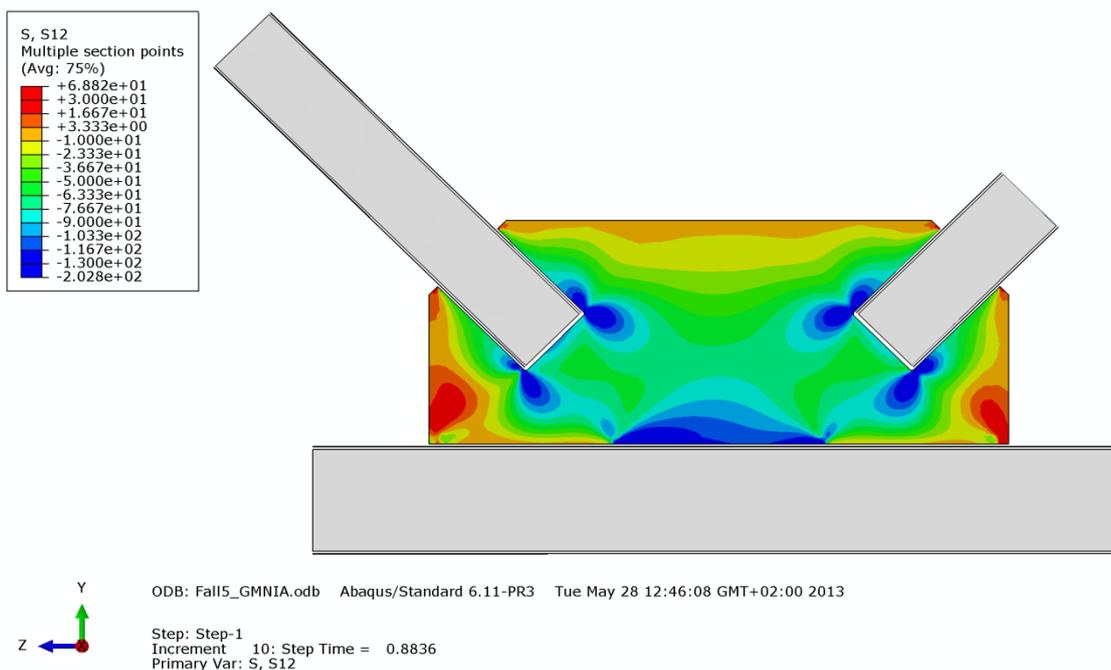


Abbildung B.141 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

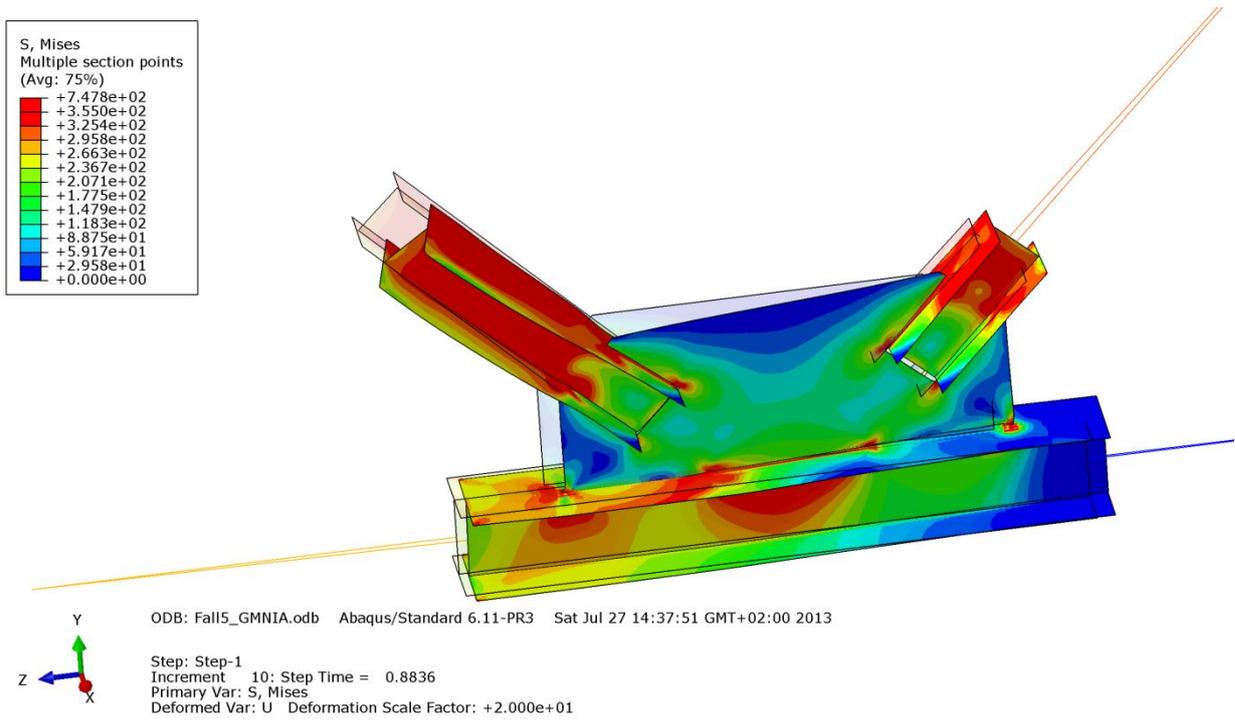


Abbildung B.142 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickform

• **Verformung [mm]**

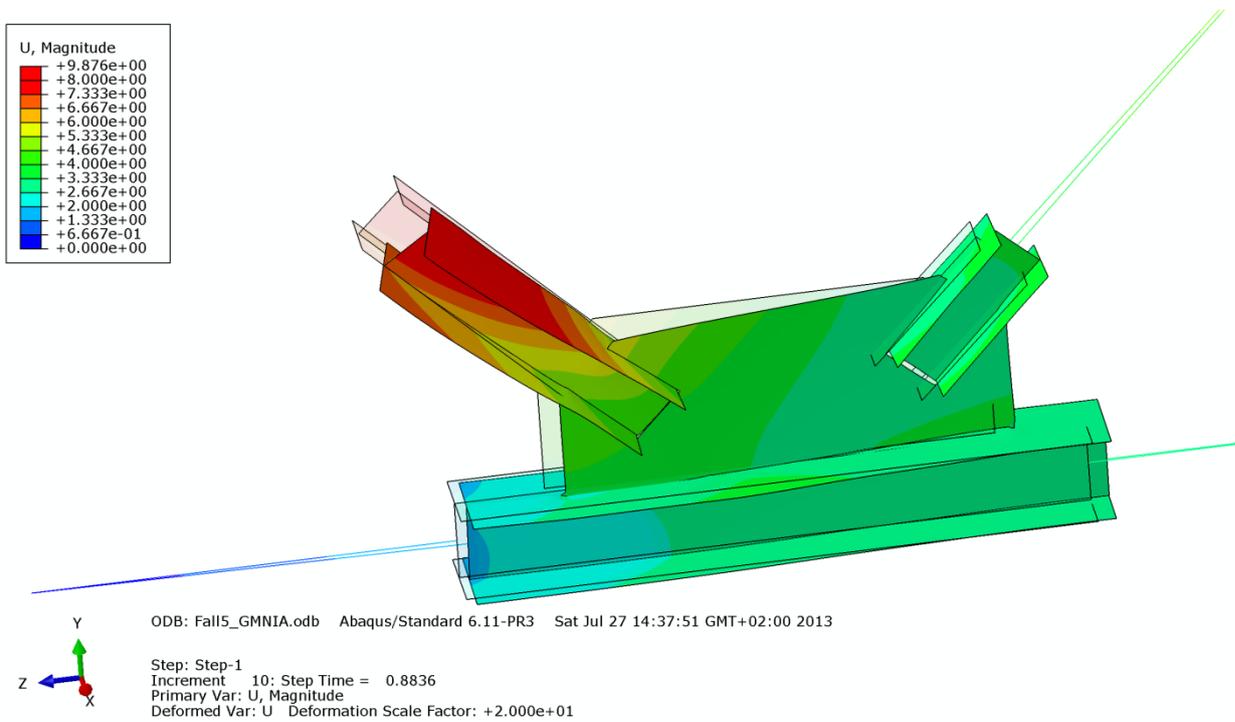


Abbildung B.143 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickform

B - 4.8.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch die Verdrillung der Druckstrebe mit kombiniertem Knotenblechnicken, wie die Abbildungen B.144 bis B.147 zeigen. Der Druckstrebenflansch beult zusätzlich. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen, lokal beginnend auch am oberen Flansch des Untergurtes auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

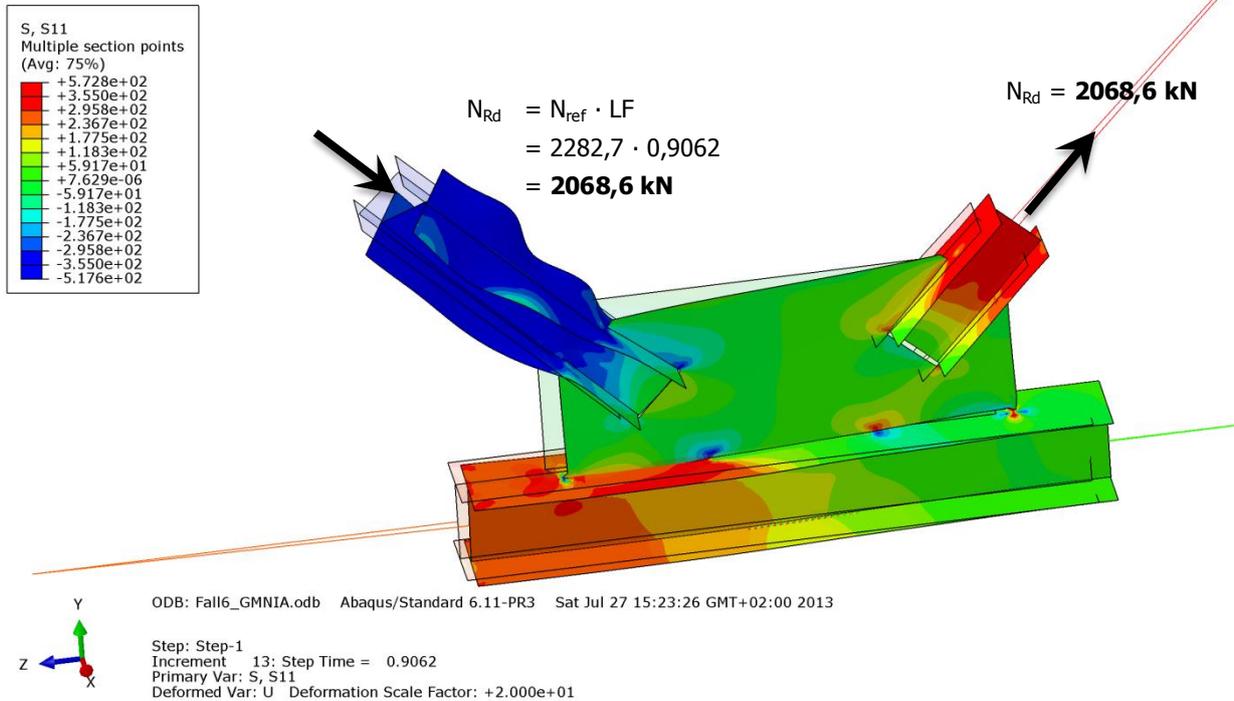


Abbildung B.144 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

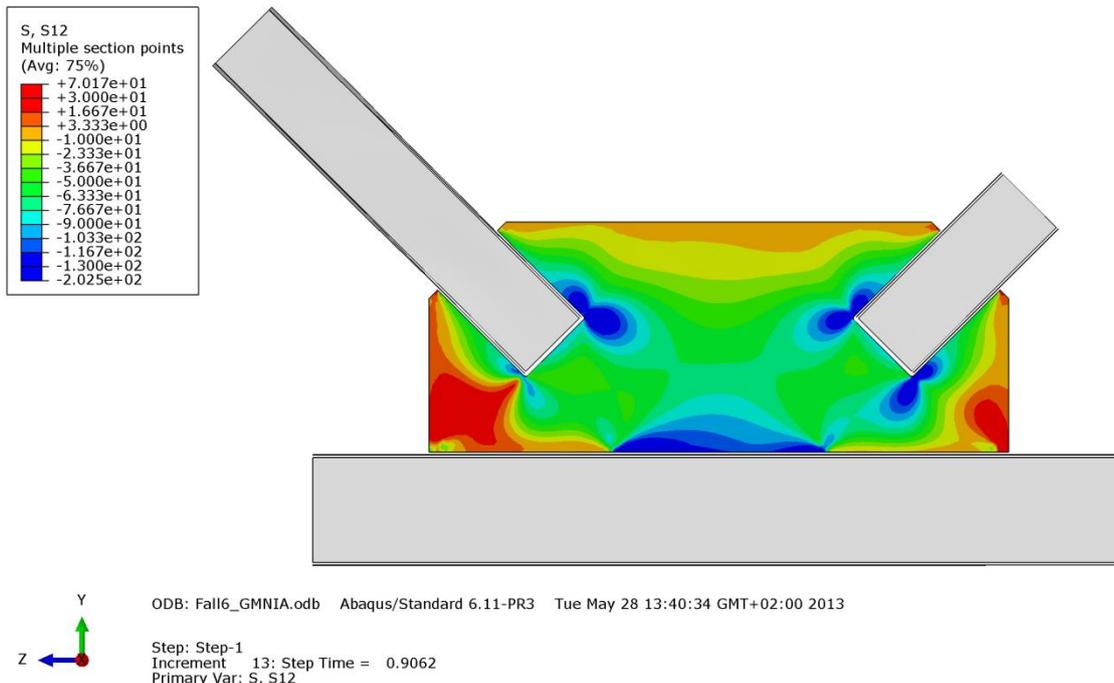


Abbildung B.145 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

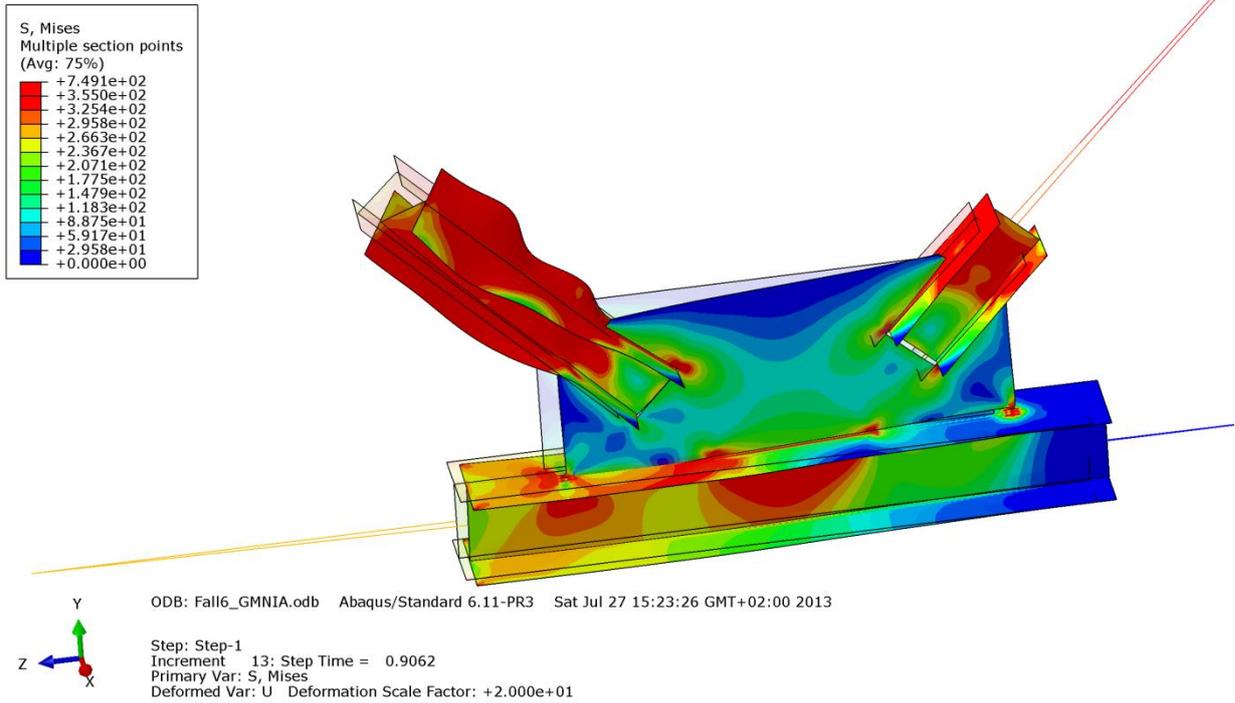


Abbildung B.146 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

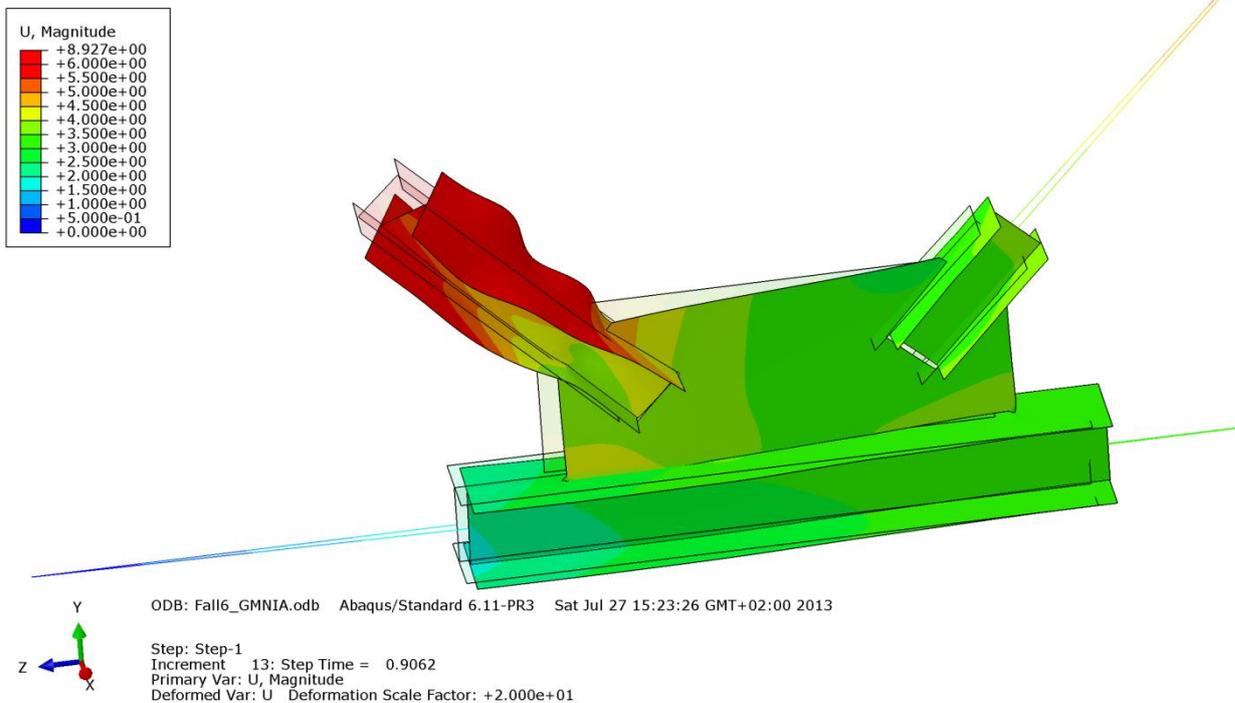


Abbildung B.147 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 4.8.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Ausweichen der Druckstrebe mit kombiniertem Knotenblechnicken, wie die Abbildungen B.148 bis B.151 zeigen. Plastizierung tritt vor allem in den Diagonalen, lokal beginnend auch am oberen Flansch des Untergurtes auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

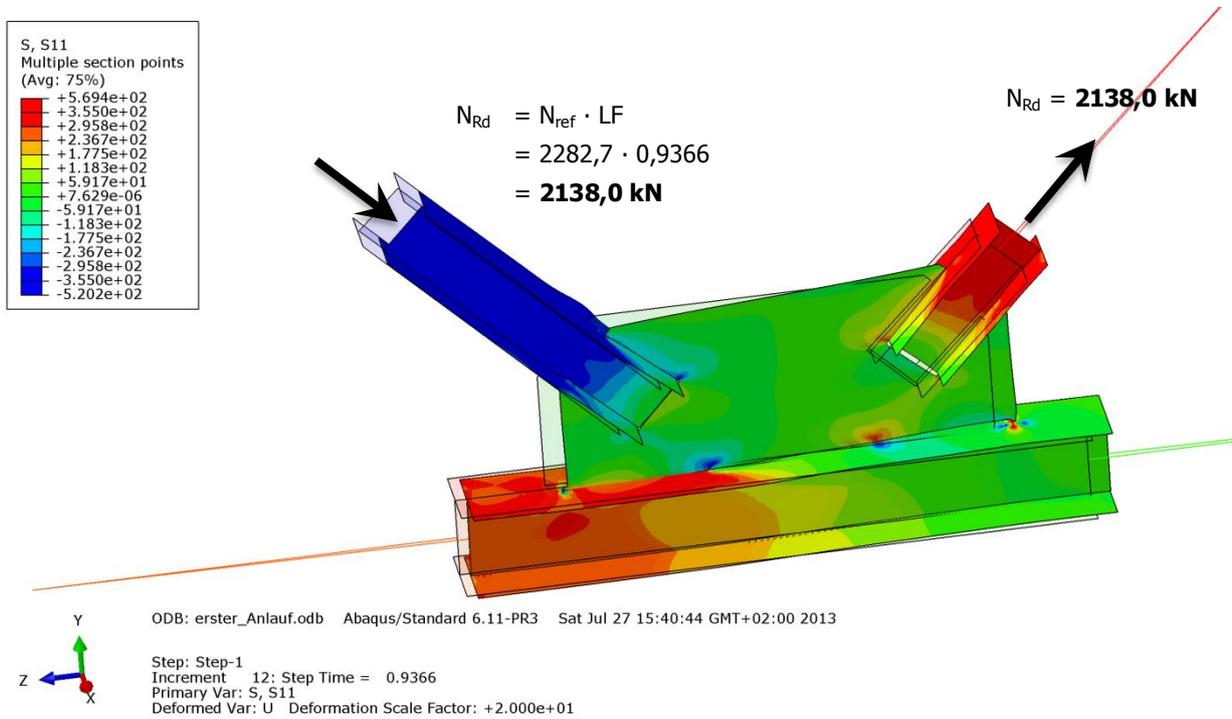


Abbildung B.148 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

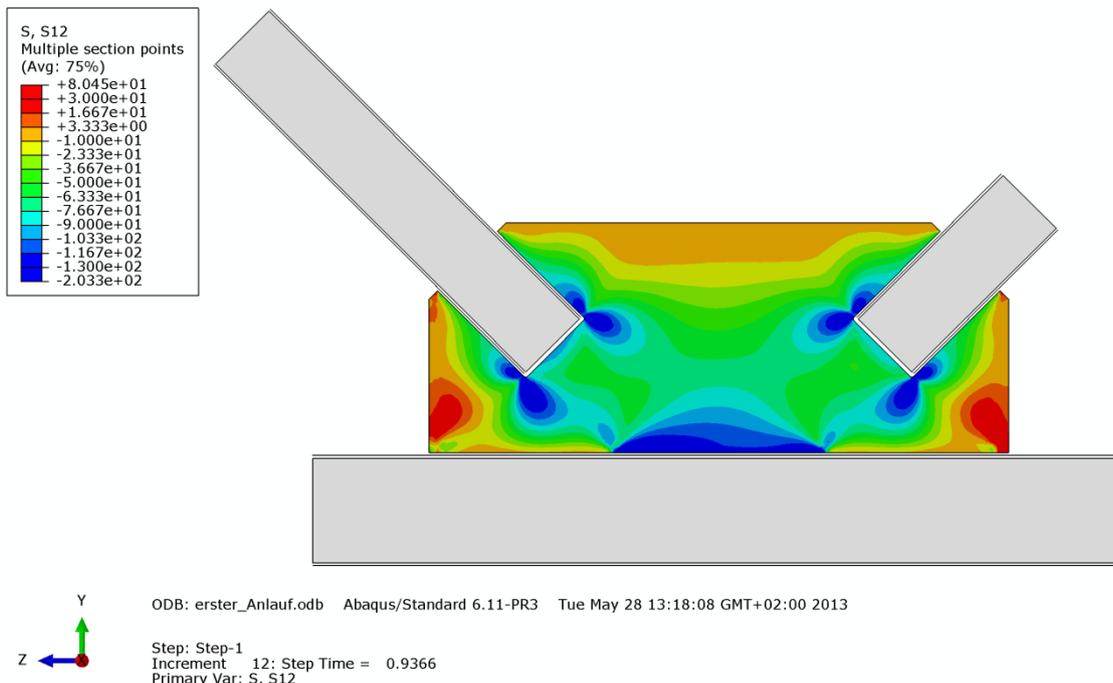


Abbildung B.149 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

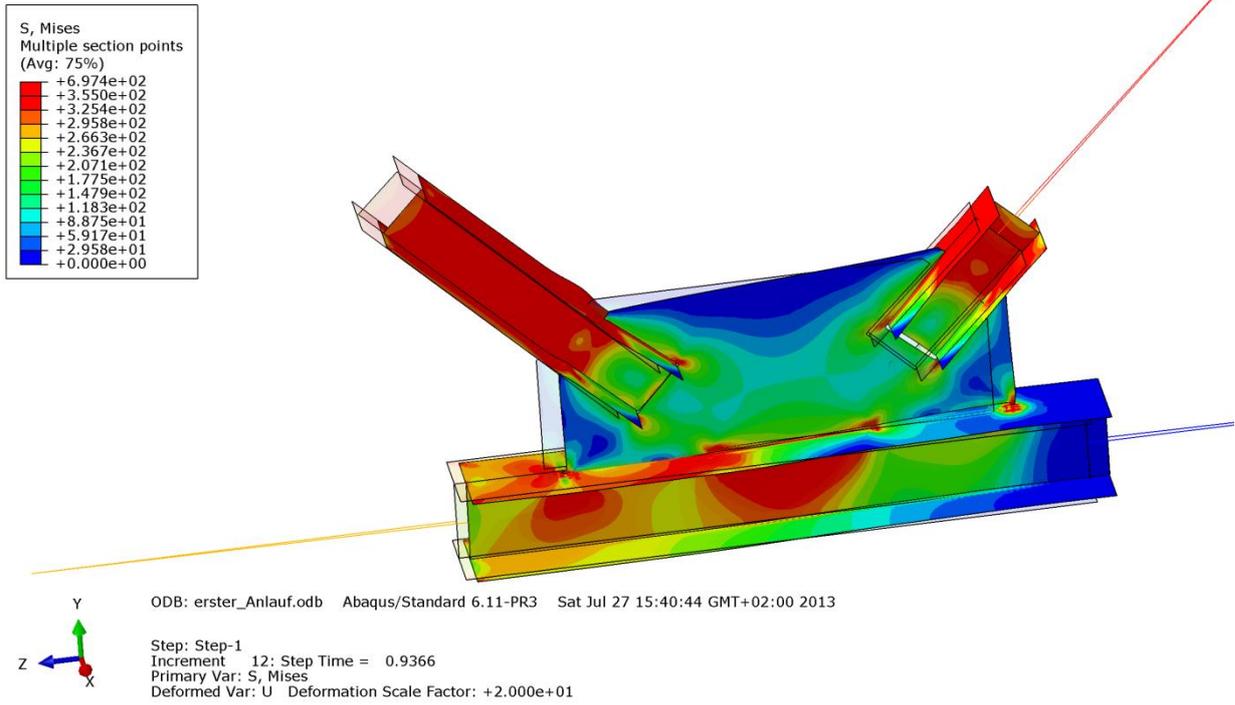


Abbildung B.150 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

• **Verformung [mm]**

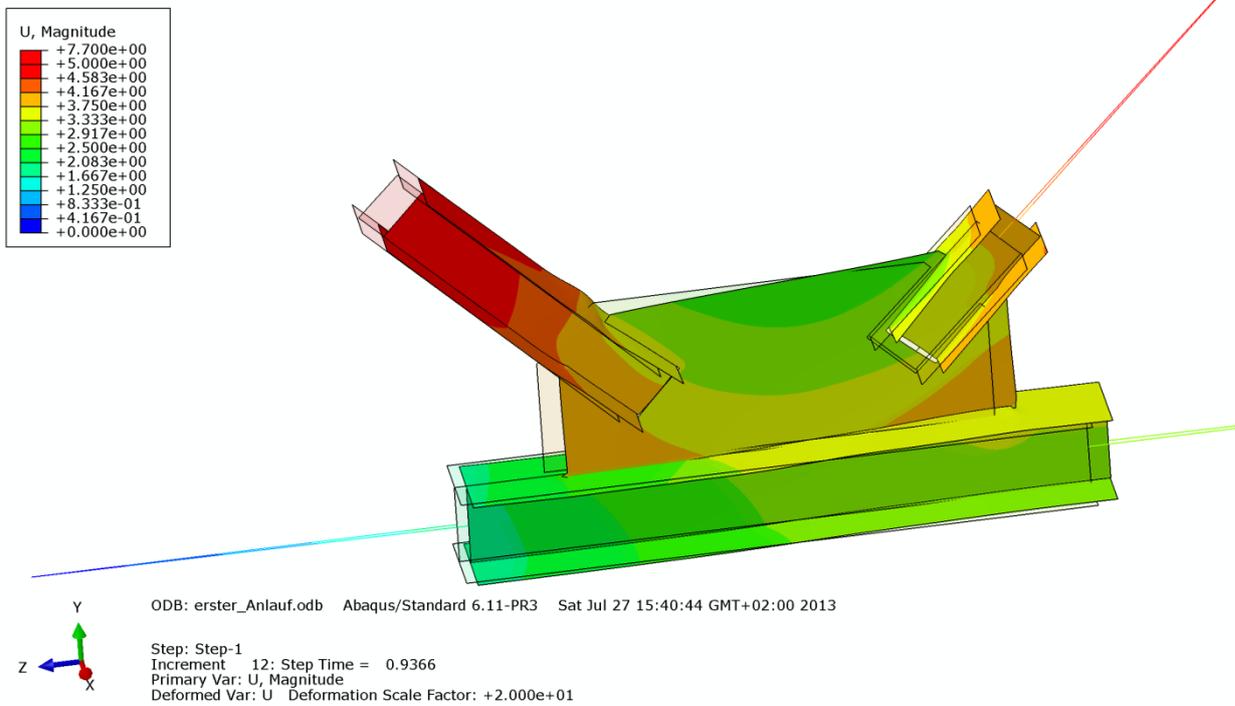


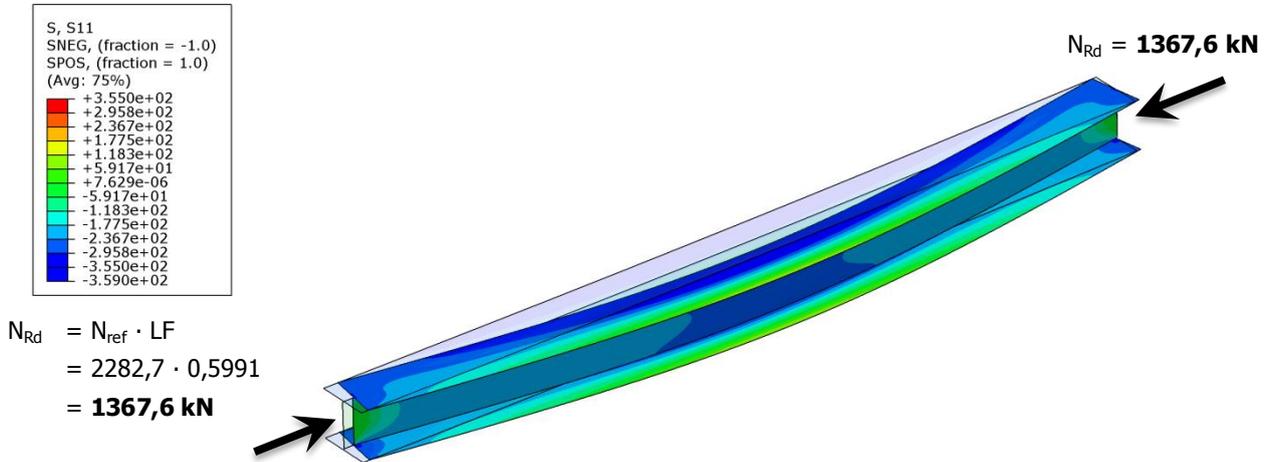
Abbildung B.151 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

B - 4.8.2.4 Stabrechnung

Die Versagensform ist Knicken des Stabes um die schwache Achse, wie die Abbildungen B.152 und B.153 zeigen. Der Mittelquerschnitt ist vollständig durchplastiziert.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/200$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/200 = 16,8\text{mm}$.

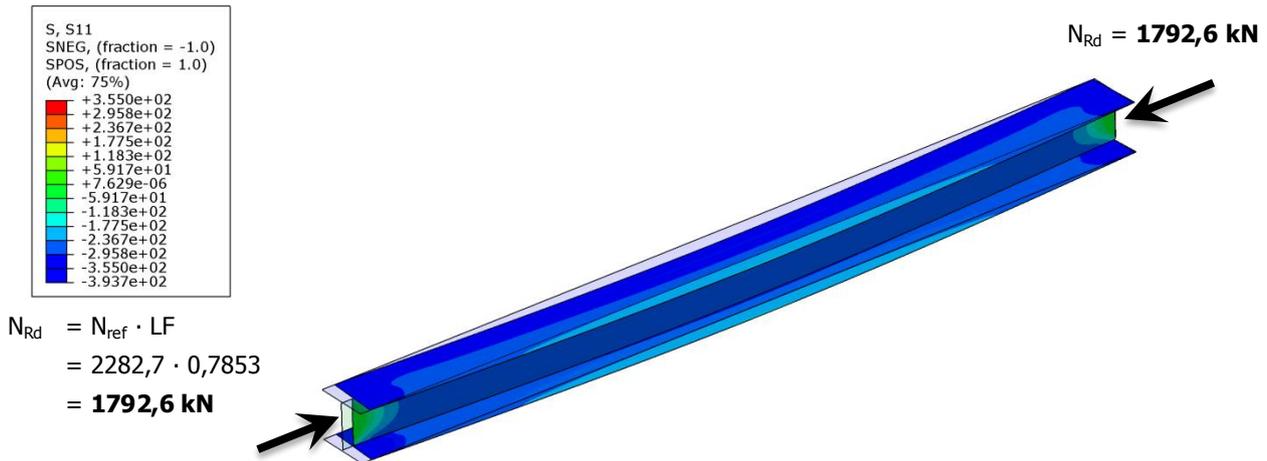


ODB: Fall8_GMNIA.odb Abaqus/Standard 6.11-PR3 Tue May 28 13:10:03 GMT+02:00 2013
 Step: Step-1
 Increment 14: Step Time = 0.5991
 Primary Var: S, S11
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+01

Abbildung B.152 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²] mit Imperfektion $L^*/750$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$.



ODB: Fall8_GMNIA.odb Abaqus/Standard 6.11-PR3 Tue May 28 13:20:56 GMT+02:00 2013
 Step: Step-1
 Increment 17: Step Time = 0.7853
 Primary Var: S, S11
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+01

Abbildung B.153 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$

B - 5 Vergleich der Traglastberechnungen – Handrechnung versus FE-Rechnung

B - 5.1 Allgemeines

In den Kapiteln B - 5.3 bis B - 5.9 sind die Ergebnisse der diversen berechneten Traglasten für die untersuchten Gruppen zusammengestellt:

- FE-Tragfähigkeit affin zur ersten Knickeigenform
- FE-Tragfähigkeit affin zur zweiten Knickeigenform
- FE-Tragfähigkeit mit Knotenblechschiefstellung
- FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$
- FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/750$
- Knickspannungsnachweis mit L^* bzw. L_{ges}
- Ergebnisse des Bemessungsvorschlages für Hohlprofile nach [3]

Bei der Gruppe 1 und den Gruppen 3 bis 6 ist nicht das Versagen von Knotenblech und Druckstrebe mit ihren Stabilitätseffekten für die Limitierung der Tragfähigkeit des Knotens maßgebend, sondern das Plastizieren der Zugstrebe bzw. des Untergurtes.

Da die Untersuchung des Druckverhaltens primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist, wurden die Berechnungen für diese Gruppen erneut durchgeführt - mit der Änderung, dass eine Plastizierung von Zugstrebe und Untergurt durch Modifizierung des Materialgesetzes verhindert wurde (rein elastisches Materialverhalten). Die jeweils rechten Balken der Diagramme in den Abbildungen B.155 bis B.161 zeigen die Tragfähigkeiten die sich ergeben, wenn sich die Spannungs-Dehnungs-Interaktionen von Zugstrebe und Untergurt linear verhalten.

Die Balken in den Abbildungen B.155 bis B.161 der linear elastischen – ideal plastischen FE-Traglasten mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. mit Knotenblechschiefstellung sind hellrot, das jeweilige Minimum hellblau, dargestellt. Jene Balken der Ergebnisse mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt sind dunkelrot bzw. ist das Minimum dunkelblau abgebildet.

Zuletzt erfolgte auch ein Ergebnisvergleich der idealen Knicklasten der Druckstreben aus den Handrechnungen mit jenen aus den FE-Rechnungen. Der entsprechende Laststeigerungsfaktor der FE-Rechnung stammt aus der Beulanalyse des Stabes.

B - 5.2 Zusätzlich berechnete Werte für den Ergebnisvergleich Hand-FE

Um die Plastizierung von Zugstrebe und Untergurt in den Abbildungen B.155 bis B.161 ersichtlich zu machen, sind die plastischen Normalkräfte der Druck- und Zugstrebe, sowie jene Diagonalkraft N_{Rd} , die notwendig ist, um Untergurtplastizieren hervorzurufen, als horizontale Linien zusätzlich in den Ergebnisdarstellungen eingetragen.

Die Berechnung dieser Größen erfolgt in den Abschnitten B - 5.2.1 bis B - 5.2.7 getrennt für die sechs Gruppen. Formeln zur Berechnung der entsprechenden Werte sind für die Gruppe 1 angeführt. Für die Gruppen 2 bis 6 werden nur die Ergebnisse gezeigt.

B - 5.2.1 Gruppe 1

Ermittlung der Querschnittswerte der Druckstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Druckstrebenprofil HEB 340, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 340:} \quad & h = 34 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,15 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,2 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w + 2 \cdot t_f \cdot b = (34 - 2 \cdot 2,15) \cdot 1,2 + 2 \cdot 2,15 \cdot 30 = 164,6 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Druck} = A \cdot f_y = 164,6 \cdot 35,5 = 5844,7 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b^3}{12} + \frac{t_w^3 \cdot (h - 2 \cdot t_f)}{12} = 2 \cdot \frac{2,15 \cdot 30^3}{12} + \frac{1,2^3 \cdot (34 - 2 \cdot 2,15)}{12} = 9679,3 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$L^* = 430,3 \text{ cm}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{L^{*2}} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 9679,3}{430,3^2} = 10834,8 \text{ kN}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = A \cdot f_y = 171,0 \cdot 35,5 = 6070,5 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte der Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Zugstrebenprofil HEB 320, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 320:} \quad & h = 32 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,05 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,15 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w + 2 \cdot t_f \cdot b = (32 - 2 \cdot 2,05) \cdot 1,15 + 2 \cdot 2,05 \cdot 30 = 155,1 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Zug} = A \cdot f_y = 155,1 \cdot 35,5 = 5505,5 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 450, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

<i>HEB 450:</i>	$h = 45 \text{ cm}$
	$b = 30 \text{ cm}$
	$t_f = 2,6 \text{ cm}$
	$t_w = 1,4 \text{ cm}$
<i>S355:</i>	$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w + 2 \cdot t_f \cdot b = (45 - 2 \cdot 2,6) \cdot 1,4 + 2 \cdot 2,6 \cdot 30 = 211,7 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = A \cdot f_y = 211,7 \cdot 35,5 = 7516,1 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 43,43^\circ$$

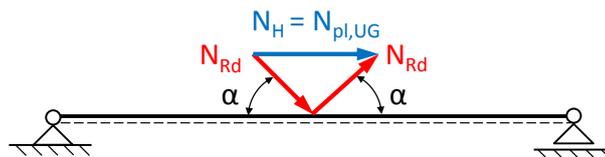


Abbildung B.154 – Der Diagonalenwinkel α

$$N_{Rd} \text{ (für } N_{pl,UG}) = \frac{N_{pl,UG}/2}{\cos(\alpha)} = \frac{7516,1/2}{\cos(43,43^\circ)} = 5174,8 \text{ kN}$$

B - 5.2.2 Gruppe 2

Ermittlung der Querschnittswerte der Druck- und Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Profil HEA 140, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 140:} & h = 13,3 \text{ cm} \\
 & b = 14 \text{ cm} \\
 & t_f = 0,85 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,55 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 30,2 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Druck} = N_{pl,Zug} = 1071,4 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 388,9 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$L^* = 458,1 \text{ cm}$$

$$N_{cr} = 384,1 \text{ kN}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 1114,7 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 180, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 180:} & h = 17,1 \text{ cm} \\
 & b = 18 \text{ cm} \\
 & t_f = 0,95 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,6 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 43,3 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 1537,9 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 46,98^\circ$$

$$N_{Rd} (\text{für } N_{pl,UG}) = 1113,0 \text{ kN}$$

B - 5.2.3 Gruppe 3

Ermittlung der Querschnittswerte der Druckstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Druckstrebenprofil HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 200:} & h = 19 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,0 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,65 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 51,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Druck} &= 1812,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 1333,7 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 445,4 \text{ cm} \\
 N_{cr} &= 1393,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 1909,9 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte der Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Zugstrebenprofil HEA 140, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 140:} & h = 13,3 \text{ cm} \\
 & b = 14 \text{ cm} \\
 & t_f = 0,85 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,55 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 30,2 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Zug} &= 1071,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned} \text{HEA 200:} \quad & h = 19 \text{ cm} \\ & b = 20 \text{ cm} \\ & t_f = 1,0 \text{ cm} \\ & t_w = 0,65 \text{ cm} \\ \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 51,1 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 1812,3 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 45,44^\circ$$

$$N_{Rd} (\text{für } N_{pl,UG}) = 1275,4 \text{ kN}$$

B - 5.2.4 Gruppe 4

Ermittlung der Querschnittswerte der Druckstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Druckstrebenprofil HEB 320, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEB 320:} & h = 32 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,05 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,15 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 155,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Druck} &= 5505,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 9228,5 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 437,2 \text{ cm} \\
 N_{cr} &= 10006,7 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 5715,5 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte der Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Zugstrebenprofil HEA 240, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 240:} & h = 23 \text{ cm} \\
 & b = 24 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,2 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,75 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 73,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Zug} &= 2593,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 360, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll} \text{HEB 360:} & h = 36 \text{ cm} \\ & b = 36 \text{ cm} \\ & t_f = 2,25 \text{ cm} \\ & t_w = 1,25 \text{ cm} \\ \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 174,4 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 6190,3 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 44,38^\circ$$

$$N_{Rd} (\text{für } N_{pl,UG}) = 4330,6 \text{ kN}$$

B - 5.2.5 Gruppe 5

Ermittlung der Querschnittswerte der Druckstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Druckstrebenprofil HEB 240, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEB 240:} & h = 24 \text{ cm} \\
 & b = 24 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,7 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,0 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 102,2 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Druck} &= 3628,1 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 3918,5 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 442,3 \text{ cm} \\
 N_{cr} &= 4151,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 3763,0 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte der Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Zugstrebenprofil HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 200:} & h = 19 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,0 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,65 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 51,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,Zug} &= 1812,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned} \text{HEB 200:} \quad & h = 20 \text{ cm} \\ & b = 20 \text{ cm} \\ & t_f = 1,5 \text{ cm} \\ & t_w = 0,9 \text{ cm} \\ \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 75,3 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 2673,2 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 45,23^\circ$$

$$N_{Rd} (\text{für } N_{pl,UG}) = 1897,8 \text{ kN}$$

B - 5.2.6 Gruppe 6a

Ermittlung der Querschnittswerte der Druck- und Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Profil HEA 220, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 220:} & h = 21 \text{ cm} \\
 & b = 22 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,1 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,7 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 61,6 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Druck} = N_{pl,Zug} = 2185,4 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 1952,7 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$L^* = 461,8 \text{ cm}$$

$$N_{cr} = 1892,9 \text{ kN}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 2282,7 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 300, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 300:} & h = 30 \text{ cm} \\
 & b = 29 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 106,3 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 3772,6 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 45,00^\circ$$

$$N_{Rd} (\text{für } N_{pl,UG}) = 2667,6 \text{ kN}$$

B - 5.2.7 Gruppe 6b

Ermittlung der Querschnittswerte der Druck- und Zugstrebe:

Berechnungsgrundlage bildet ein Profil HEA 220, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 220:} \quad & h = 21 \text{ cm} \\
 & b = 22 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,1 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,7 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 61,6 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,Druck} = N_{pl,Zug} = 2185,4 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmoment 2. Grades I_z :

$$I_z = 1952,7 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der idealen Knicklast N_{cr} der Druckstrebe:

$$L^* = 335,5 \text{ cm}$$

$$N_{cr} = 3586,4 \text{ kN}$$

Die Normalkraft N_{ref} entspricht der plastischen Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius zwischen Steg und den Flanschen (siehe Kapitel B - 4.1):

$$N_{ref} = 2282,7 \text{ kN}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 300, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 300:} \quad & h = 30 \text{ cm} \\
 & b = 29 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = 106,3 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = 3772,6 \text{ kN}$$

Über den Winkel α der Druck- und der Zugstrebe kann die Strebenkraft errechnet werden, bei der die plastische Normalkraft des Untergurtes erreicht wird.

$$\alpha = 45,00^\circ$$

$$N_{Rd} \text{ (für } N_{pl,UG}) = 2667,6 \text{ kN}$$

B - 5.3 Gruppe 1

Die nachfolgende Tabelle B.22 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 1						
Profil der Druckstrebe:	HEB 340		Systemlänge $L^* =$	4303mm		
Material	S355		$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,735		
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²		$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3648mm		
$t_{\text{Knotenblech}} =$	45mm		$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,623		
Profil der Zugstrebe:	HEB 320					
Profil des Untergurtes:	HEB 450		Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm		
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,8346 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5066,4 kN	LF = 0,8344 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5065,2 kN	LF = 0,8344 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5065,2 kN	LF = 0,6326 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3840,2 kN	LF = 0,8142 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 4942,6 kN	L^* : LF = 0,703 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 4108,8 kN	Stabknicken: LF = 0,707 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 4132,2 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,772 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 4512,1 kN	Knotenblech: 3692,1 kN
LF = 0,8941 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5427,6 kN	LF = 0,9003 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5465,3 kN	LF = 0,9197 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5583,0 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 5844,7 kN			N _{cr} aus Hand- rechnung		N _{cr} aus FE-Rechnung	
N _{pl} - Zugstrebe = 5505,5 kN			mit $L^* = 430,3 \text{ cm}$		LF = 1,7591	
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 5174,8 kN			$I_z = 9679,3 \text{ cm}^4$		LF · N _{ref} =	
N _{ref} = 6070,5 kN			10834,8 kN		10678,6 kN	
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>						

Tabelle B.22 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 1

Abbildung B.155 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes um rund 10% im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten steigern lässt. Diese Modellierung rechtfertigt sich dadurch, dass in der vorliegenden Arbeit primär die Drucktragfähigkeit der Diagonale untersucht werden soll. Es ist deutlich erkennbar, dass die Traglast des Fachwerkknotensystems nicht durch die Tragfähigkeit der Druckstrebe begrenzt ist, sondern der Untergurt schon vor der Grenztragfähigkeit der Druckdiagonale versagt (N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ ist geringer als die Traglast des Systems bei elastischer Zugstrebe und elastischem Untergurt).

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Hand- bzw. FE-Rechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen liegen. In der Praxis abgeschätzte Tragfähigkeiten der Druckstrebe sind daher stets konservativer als die tatsächliche Systemtragfähigkeit. Des Weiteren zeigt sich, dass die Knicktragfähigkeit berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahren ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 1 bildet die Knotenblechtragfähigkeit nach [3] die untere Schranke der Traglast, gefolgt von der Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$.

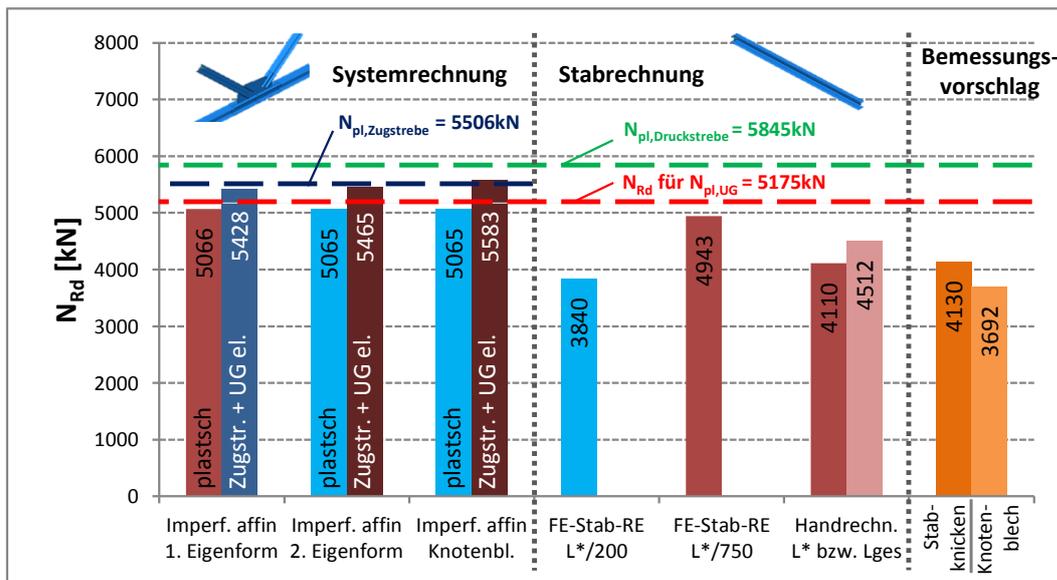


Abbildung B.155 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 1

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 92% (bei elastisch-plastischer Modellierung, maßgebend Imperfektion affin zur 2. Knickeigenform bzw. Imperfektion im Knotenblech) bzw. ca. 98% (bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

B - 5.4 Gruppe 2

Die nachfolgende Tabelle B.23 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefe

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Aufgrund der großen Stabschlankheiten war es für die Gruppe 2 nicht erforderlich, die Systemrechnung zusätzlich mit einer rein elastisch modellierten Zugstrebe bzw. einem rein elastisch modellierten Untergurt durchzuführen, da die erreichten Traglasten für die linear elastisch – ideal plastische Modellierung jenseits der plastischen Normalkräfte der verwendeten Profiltypen liegen.

Gruppe 2						
Profil der Druckstrebe:	HEA 140	Systemlänge $L^* =$	4581mm			
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	1,670			
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	30,2cm ²	$L_{ges} =$	4320mm			
		(OK Untergurt - UK Obergurt)				
$t_{Knotenblech} =$	12mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	1,575			
Profil der Zugstrebe:	HEA 140					
Profil des Untergurtes:	HEA 180	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm			
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,3754	LF = 0,5978	LF = 0,6032	LF = 0,2333	LF = 0,2976	$L^*:$ LF = 0,265	<i>Stabknicken:</i> LF = 0,241
LF · N _{ref} = N _{Rd} = 418,5 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 666,4 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 672,4 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 260,1 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 331,7 kN	LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 283,9 kN	LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 258,2 kN
					$L_{ges}:$ LF = 0,291	<i>Knotenblech:</i>
					LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 311,8 kN	181,7 kN
N _{pl} - Druckstrebe = 1071,4 kN				N _{cr} aus Hand- rechnung		N _{cr} aus FE-Rechnung
N _{pl} - Zugstrebe = 1071,4 kN				mit $L^* = 458,1 \text{ cm}$		LF = 0,3423
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1113,0 kN				$I_z = 388,9 \text{ cm}^4$		LF · N _{ref} =
N _{ref} = 1114,7 kN				384,1 kN		381,6 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>						

Tabelle B.23 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 2

Abbildung B.156 zeigt, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen liegen. In der Praxis abgeschätzte Tragfähigkeiten der Druckstrebe sind daher stets konservativer als die tatsächliche Systemtragfähigkeit.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 2 bildet die Knotenblechtragfähigkeit nach [3] die untere Schranke der Traglast, gefolgt von der Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$ (Berücksichtigung der Profileigenspannungen). Die berechneten Traglasten können bei weitem nicht die plastische Normalkraft der Druckstrebe erreichen.

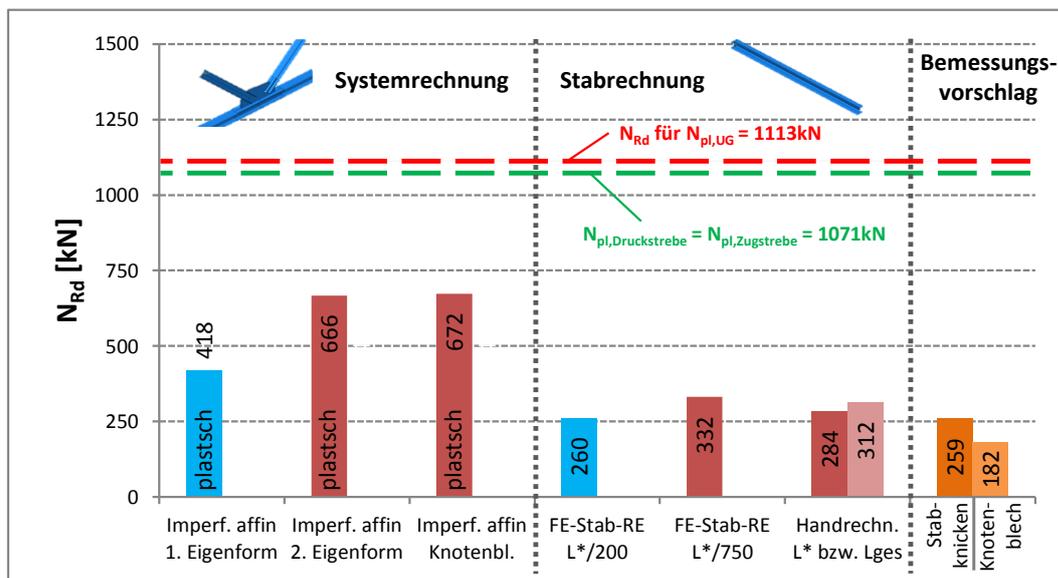


Abbildung B.156 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 2

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 39% (maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 5.5 Gruppe 3

Die nachfolgende Tabelle B.24 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefe

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 3						
Profil der Druckstrebe:	HEA 200	Systemlänge $L^* =$	4454mm			
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	1,141			
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	51,1cm ²	$L_{ges} =$	4159mm			
$t_{Knotenblech} =$	25mm	(OK Untergurt - UK Obergurt)				
Profil der Zugstrebe:	HEA 140	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	1,065			
Profil des Untergurtes:	HEA 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm			
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,5609 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1071,3 kN	LF = 0,5607 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1070,9 kN	LF = 0,5595 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1068,6 kN	LF = 0,3980 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 760,1 kN	LF = 0,5435 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1038,0 kN	L^* : LF = 0,463 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 839,1 kN	<i>Stabknicken:</i> LF = 0,484 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 877,2 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,503 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 911,6 kN	<i>Knotenblech:</i> 923,2 kN
LF = 0,6539 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1248,9 kN	LF = 0,8177 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1561,7 kN	LF = 0,8946 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1708,6 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 1812,3 kN					N _{cr} aus Hand- rechnung	N _{cr} aus FE-Rechnung
N _{pl} - Zugstrebe = 1071,4 kN					<i>mit</i> $L^* = 445,4 \text{ cm}$ $I_z = 1333,7 \text{ cm}^4$ 1393,4 kN	LF = 0,7251 LF · N _{ref} = 1384,8 kN
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1275,4 kN						
N _{ref} = 1909,9 kN						
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>						

Tabelle B.24 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 3

Abbildung B.157 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes um rund 14% im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten steigern lässt (bezogen auf den Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform). Diese Modellierung rechtfertigt sich dadurch, dass in der vorliegenden Arbeit primär die Drucktragfähigkeit der Diagonale untersucht werden soll. Es ist deutlich erkennbar, dass die Traglast des Fachwerkknotensystems nicht durch die Tragfähigkeit der Druckstrebe begrenzt ist, sondern die Zugstrebe und der Untergurt schon vor der Grenztragfähigkeit der Druckdiagonale versagt (N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ ist geringer als die Traglast des Systems bei elastischer Zugstrebe und elastischem Untergurt und N_{pl} der Zugstrebe limitiert die Traglast bei linear elastischem – ideal plastischem Materialverhalten).

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen liegen. In der Praxis abgeschätzte Tragfähigkeiten der Druckstrebe sind daher stets konservativer als die tatsächliche Systemtragfähigkeit. Des Weiteren zeigt sich, dass die Knicktragfähigkeit berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 3 bildet die FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$ die untere Schranke der Traglast, gefolgt vom Ergebnis aus dem Knickspannungsnachweis mit L^* .

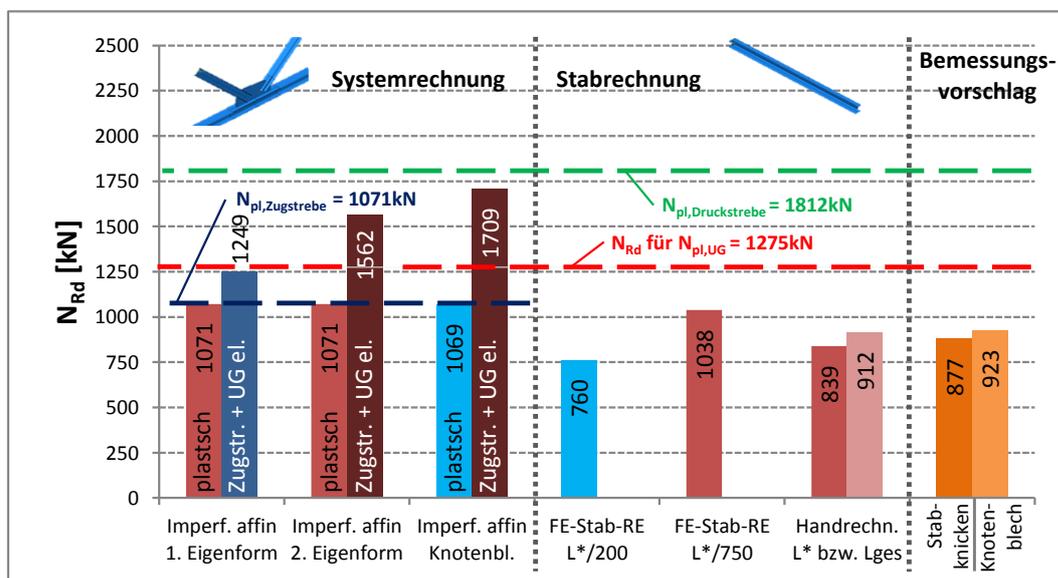


Abbildung B.157 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 3

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 59% (bei elastisch-plastischer Modellierung, maßgebend Imperfektion im Knotenblech) bzw. ca. 69% (bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 5.6 Gruppe 4

Die nachfolgende Tabelle B.25 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 4						
Profil der Druckstrebe:	HEB 320		Systemlänge $L^* =$	4372mm		
Material	S355		$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,742		
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	155,1cm ²		$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3872mm		
$t_{\text{Knotenblech}} =$	50mm		$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,657		
Profil der Zugstrebe:	HEA 240		Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm		
Profil des Untergurtes:	HEB 360					
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,4535 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2592,0 kN	LF = 0,4536 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2592,6 kN	LF = 0,4523 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2585,1 kN	LF = 0,6289 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3594,5 kN	LF = 0,8116 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 4638,7 kN	L^* : LF = 0,699 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 3848,3 kN	Stabknicken: LF = 0,716 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 3941,9 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,751 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 4134,6 kN	Knotenblech: 3837,1 kN
LF = 0,8837 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5050,8 kN	LF = 0,8920 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5098,2 kN	LF = 0,9225 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5272,5 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 5505,5 kN N _{pl} - Zugstrebe = 2593,3 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 4330,6 kN N _{ref} = 5715,5 kN (N _{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			N _{cr} aus Hand- rechnung mit $L^* = 437,2 \text{ cm}$ $I_z = 9228,5 \text{ cm}^4$ 10006,7 kN		N _{cr} aus FE-Rechnung LF = 1,7318 LF · N _{ref} = 9898,1 kN	

Tabelle B.25 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 4

Abbildung B.158 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes um rund 50% im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten steigern lässt (bezogen auf den Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform). Diese Modellierung rechtfertigt sich dadurch, dass in der vorliegenden Arbeit primär die Drucktragfähigkeit der Diagonale untersucht werden soll. Es ist deutlich erkennbar, dass die Traglast des Fachwerkknotensystems nicht durch die Tragfähigkeit der Druckstrebe begrenzt ist, sondern die Zugstrebe und der Untergurt schon vor der Grenztragfähigkeit der Druckdiagonale versagt (N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ ist geringer als die Traglast des Systems bei elastischer Zugstrebe und elastischem Untergurt und N_{pl} der Zugstrebe limitiert die Traglast bei linear elastischem – ideal plastischem Materialverhalten).

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen (entscheidend sind jene FE-Rechnungen mit Fokus auf die Tragfähigkeit der Druckdiagonale) liegen. Des Weiteren zeigt sich, dass die Knicktragfähigkeit berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 4 bildet die FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$ die untere Schranke der Traglast, gefolgt von der Knotenblechtragfähigkeit nach [3] und dem Ergebnis des Knickspannungsnachweises mit L^* .

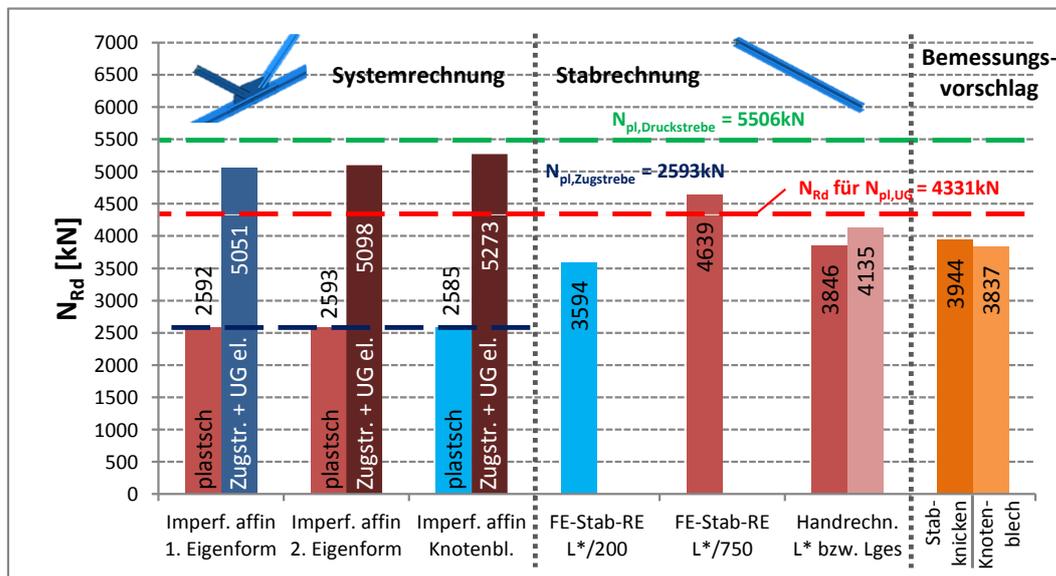


Abbildung B.158 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 4

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 47% (bei elastisch-plastischer Modellierung, maßgebend Imperfektion im Knotenblech) bzw. ca. 92% (bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 5.7 Gruppe 5

Die nachfolgende Tabelle B.26 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefe

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 5						
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge $L^* =$	4423mm			
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,935			
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	$L_{ges} =$	4085mm			
$t_{\text{Knotenblech}} =$	30mm	(OK Untergurt - UK Obergurt)				
Profil der Zugstrebe:	HEA 200	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,864			
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm			
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag [3]
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,4813 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1811,1 kN	LF = 0,4803 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,4 kN	LF = 0,5100 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1919,1 kN	LF = 0,6950 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2615,3 kN	L^* : LF = 0,579 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2100,7 kN	Stabknicken: LF = 0,566 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2053,5 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,622 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 2256,7 kN	Knotenblech: 1706,3 kN
LF = 0,7705 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2899,4 kN	LF = 0,8230 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3096,9 kN	LF = 0,8193 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3083,0 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 3628,1 kN			N _{cr} aus Hand- rechnung		N _{cr} aus FE-Rechnung	
N _{pl} - Zugstrebe = 1812,3 kN			mit $L^* = 442,3$ cm		LF = 1,0953	
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1897,8 kN			$I_z = 3918,5$ cm ⁴		LF · N _{ref} =	
N _{ref} = 3763,0 kN			4151,5 kN		4121,6 kN	
(N _{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)						

Tabelle B.26 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 5

Abbildung B.159 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes um rund 38% im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten steigern lässt (bezogen auf den Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform). Diese Modellierung rechtfertigt sich dadurch, dass in der vorliegenden Arbeit primär die Drucktragfähigkeit der Diagonale untersucht werden soll. Es ist deutlich erkennbar, dass die Traglast des Fachwerkknotensystems nicht durch die Tragfähigkeit der Druckstrebe begrenzt ist, sondern die Zugstrebe und der Untergurt schon vor der Grenztragfähigkeit der Druckdiagonale versagt (N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ ist geringer als die Traglast des Systems bei elastischer Zugstrebe und elastischem Untergurt und N_{pl} der Zugstrebe limitiert die Traglast bei linear elastischem – ideal plastischem Materialverhalten).

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Handrechnung ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen (entscheidend sind jene FE-Rechnungen mit Fokus auf die Tragfähigkeit der Druckdiagonale) liegen. Des Weiteren zeigt sich, dass die Knicktragfähigkeit berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahren ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 5 bildet die Knotenblechtragfähigkeit nach [3] das Minimum, gefolgt von dem Ergebnis der FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$.

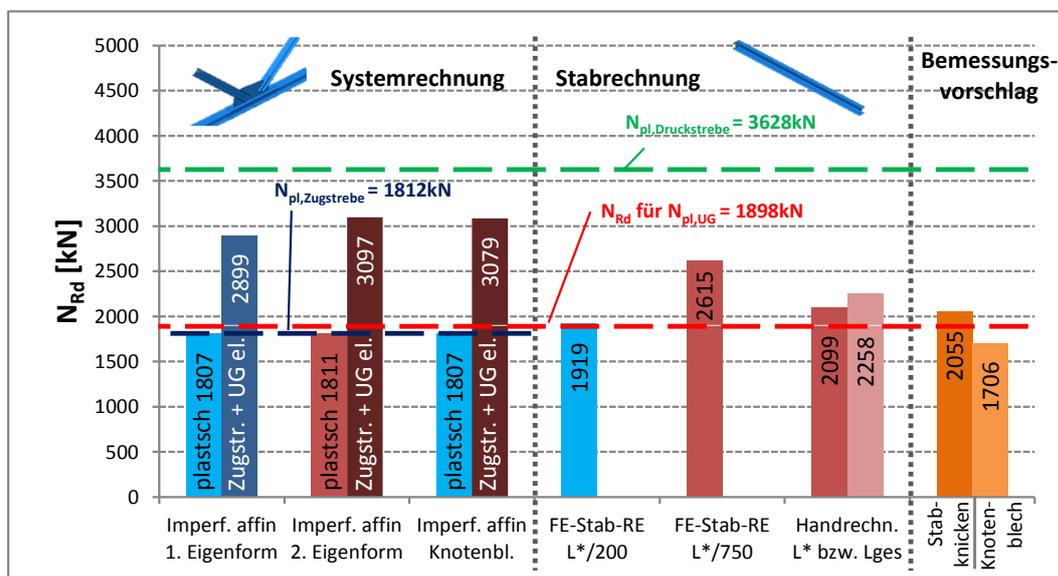


Abbildung B.159 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 5

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 50% (bei elastisch-plastischer Modellierung, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform bzw. Imperfektion im Knotenblech) bzw. ca. 80% (bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 5.8 Gruppe 6a

Die nachfolgende Tabelle B.27 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefe

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 6a						
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	4618mm			
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	1,073			
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{ges} =$	4208mm			
		(OK Untergurt - UK Obergurt)				
$t_{Knotenblech} =$	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	1,0			
Profil der Zugstrebe:	HEA 220					
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6530mm			
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,7766 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1772,7 kN	LF = 0,8916 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2035,3 kN	LF = 0,9259 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2113,6 kN	LF = 0,4331 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 988,6 kN	LF = 0,5938 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1355,5 kN	L^* : LF = 0,499 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1090,5 kN	Stabknicken: LF = 0,524 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1145,1 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,540 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1180,1 kN	Knotenblech: 1434,0 kN
LF = 0,7783 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1776,6 kN	LF = 0,8935 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2039,6 kN	LF = 0,9282 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2118,8 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 2185,4 kN N _{pl} - Zugstrebe = 2185,4 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 2667,6 kN N _{ref} = 2282,7 kN (N _{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			N _{cr} aus Hand- rechnung mit $L^* = 461,8$ cm $I_z = 1947,7$ cm ⁴ 1892,9 kN		N _{cr} aus FE-Rechnung LF = 0,8261 LF · N _{ref} = 1885,7 kN	

Tabelle B.27 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 6a

Abbildung B.160 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten nicht mehr steigern lässt. Somit kann auf ein Versagen des Knotensystems in der Druckstrebe geschlossen werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen liegen. Des Weiteren wird verdeutlicht, dass der Knickspannungsnachweis berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 6a bildet die FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$ die untere Schranke der Traglast, gefolgt von dem Ergebnis aus dem Knickspannungsnachweis mit L^* .

Die Tragfähigkeit des Knotenblechs nach [3] ist gegenüber der Gruppen 1 bis 5 verhältnismäßig entscheidend höher, da diese von der Knotenblechdicke t_1 und der Breite b_{eff} abhängt. Warum die Tragfähigkeit des Knotenblechs der Gruppe 6 höher liegt als bei den restlichen Gruppen kann dadurch erklärt werden, dass die wichtige Eingangsgröße, die Diagonaleneinbindelänge l_d ($b_{eff} = 2 \cdot l_d \cdot \tan 30^\circ$), bei der Gruppe 6 rund $1,5 \cdot h_{Strebe}$ beträgt, während diese bei den Gruppen 1 bis 5 lediglich rund $1,0 \cdot h_{Strebe}$ einnimmt.

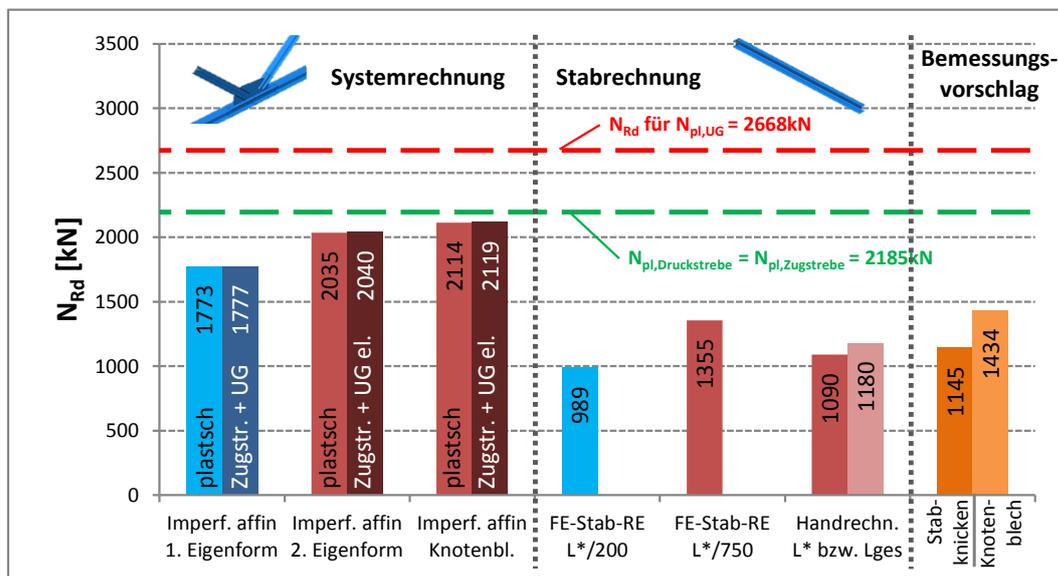


Abbildung B.160 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 6a

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 81% (bei elastisch-plastischer Modellierung gleich wie bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 5.9 Gruppe 6b

Die nachfolgende Tabelle B.28 stellt die Ergebnisse der ermittelten FE-Tragfähigkeiten des Systems mit

- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 1. Knickeigenform
- Imperfektion in den Diagonalen affin zur 2. Knickeigenform
- Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

den Traglasten der FE-Stabrechnungen mit

- Imperfektion $L^*/200$
- Imperfektion $L^*/750$

und den Handrechnungen

- Knicktragfähigkeit mit L^*
- Knicktragfähigkeit mit L_{ges}
- Bemessungsvorschlag nach [3]: Ersatzstabverfahren und Knotenblechtragfähigkeit

gegenüber.

Für die FE-Systemrechnung sind die Ergebnisse jeweils für linear elastisch – ideal plastische bzw. rein elastische Materialeigenschaften der Zugstrebe und des Untergurtes angeführt.

Gruppe 6b						
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	3355mm			
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,780			
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{ges} =$	2945mm			
		(OK Untergurt - UK Obergurt)				
$t_{Knotenblech} =$	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,7			
Profil der Zugstrebe:	HEA 220					
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge $L_{UG} =$	4750mm			
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.	FE-Stab-RE $L^*/200$	FE-Stab-RE $L^*/750$	Handrechn. L^* bzw. L_{ges}	Bemessungs- vorschlag
LF = 0,8836 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2017,0 kN	LF = 0,9062 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2068,6 kN	LF = 0,9366 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2138,0 kN	LF = 0,5991 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1367,6 kN	LF = 0,7853 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1792,6 kN	L^* : LF = 0,675 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1475,1 kN	<i>Stabknicken:</i> LF = 0,667 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1457,7 kN
<i>Zugstrebe und Untergurt elastisch:</i>					L_{ges} : LF = 0,725 LF · N _{pl,Druck} = N _{Rd} = 1584,4 kN	<i>Knotenblech:</i> 1879,1 kN
LF = 0,8888 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2028,9 kN	LF = 0,9078 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2072,2 kN	LF = 0,9379 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2140,9 kN				
N _{pl} - Druckstrebe = 2185,4 kN					N _{cr} aus Hand- rechnung	N _{cr} aus FE-Rechnung
N _{pl} - Zugstrebe = 2185,4 kN					<i>mit</i> $L^* = 335,5 \text{ cm}$ $I_z = 1947,7 \text{ cm}^4$ 3586,4 kN	LF = 1,5525 LF · N _{ref} = 3543,9 kN
N _{Rd} für N _{pl,UG} = 2667,6 kN						
N _{ref} = 2282,7 kN						
<small>(N_{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>						

Tabelle B.28 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 6b

Abbildung B.161 zeigt, dass sich die Traglast des Systems durch eine rein elastische Modellierung der Zugstrebe bzw. des Untergurtes im Vergleich zum linear elastisch – ideal plastischen Materialverhalten nicht mehr steigern lässt. Somit kann auf ein Versagen des Knotensystems in der Druckstrebe geschlossen werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse fällt auf, dass alle durch Handrechnungen ermittelten Stabtraglasten niedriger als die FE-Systemrechnungen liegen. Des Weiteren wird verdeutlicht, dass der Knickspannungsnachweis berechnet mit dem Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$ und der Systemlänge L^* nahezu die gleiche Tragfähigkeit wie das Ersatzstabverfahrens ($\beta_1 > 1,0$; dafür Berechnung mit der kürzeren Länge L_{ges}) des Bemessungsvorschlages nach [3] liefert.

Die FE-Stabrechnung mit einer geometrischen Ersatzimperfektion von $L^*/200$ deckt auch den Effekt der Profileigenspannungen mit ab. In den Ergebnissen der Systemberechnung ist dieser Einfluss mit einer Imperfektionsamplitude von $L^*/750$ nicht berücksichtigt. Demnach bildet die Stabrechnung mit $L^*/750$ den entsprechenden Vergleichswert zur Systemberechnung. Der Einfluss von Eigenspannungen kann am Verhältnis der Traglast mit Imperfektion $L^*/750$ zur Traglast mit $L^*/200$ erfasst werden.

Für die Gruppe 6b bildet die FE-Stabrechnung mit Imperfektion $L^*/200$ die untere Schranke der Traglast, gefolgt vom Ersatzstabverfahren des Bemessungsvorschlages nach [3].

Für das hohe Knotenblechtragvermögen gilt für die Gruppe 6b gleiches wie unter Abschnitt B - 5.8 für die Gruppe 6a beschrieben.

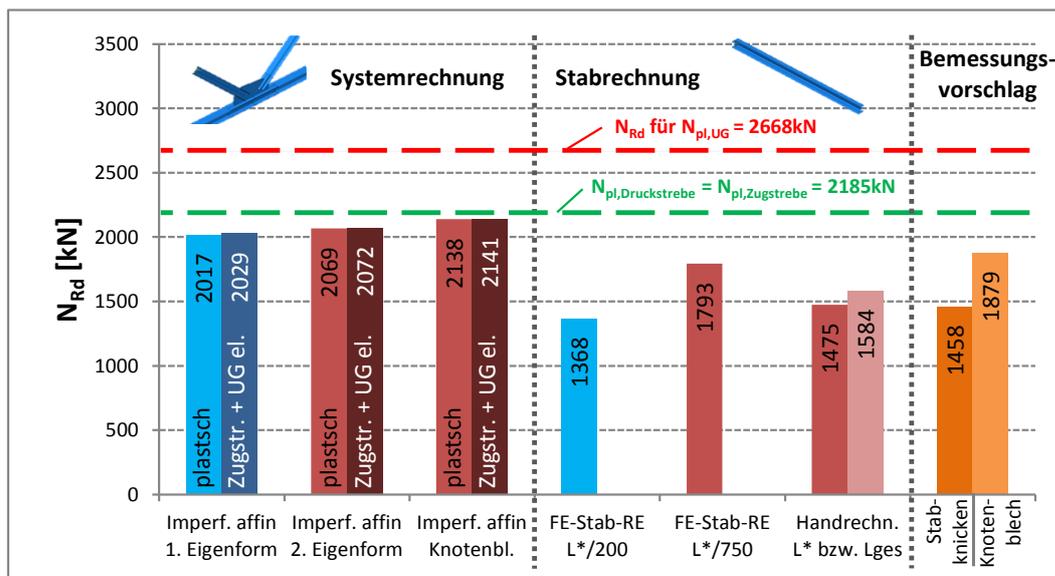


Abbildung B.161 – Vergleich der Traglastberechnungen Hand-FE – Gruppe 6b

Die Druckstrebe kann unter zugrunde Legung der FE-Systemrechnungen zu ca. 92% (bei elastisch-plastischer Modellierung gleich wie bei rein elastischer Modellierung von Zugstrebe und Untergurt, maßgebend Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) im Verhältnis zur plastischen Normalkraft ausgenutzt werden.

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben und jene Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 6 Berechnung ohne Zugkraftkomponente

B - 6.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Berechnungen mit Druck- und Zugkraft, wurden die sechs Gruppen auch einer Berechnung ohne der jeweiligen Zugkraftkomponente unterworfen.

Hierbei wurde zwischen zwei verschiedenen Randbedingungen (siehe Abbildung B.162) unterschieden:

- RBa die „Standard“-Lagerungsbedingungen nach Abschnitt B - 2.2 (siehe Abbildung B.162 RBa)
- RBb zusätzlich zur Lagerungsbedingung RBa sind die Verschiebungen der Untergurtachse in vertikaler Richtung gehalten (siehe Abbildung B.162 RBb)

Betrachtet wurde ausschließlich der Fall mit Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform, da dieser Fall immer der maßgebende ist.

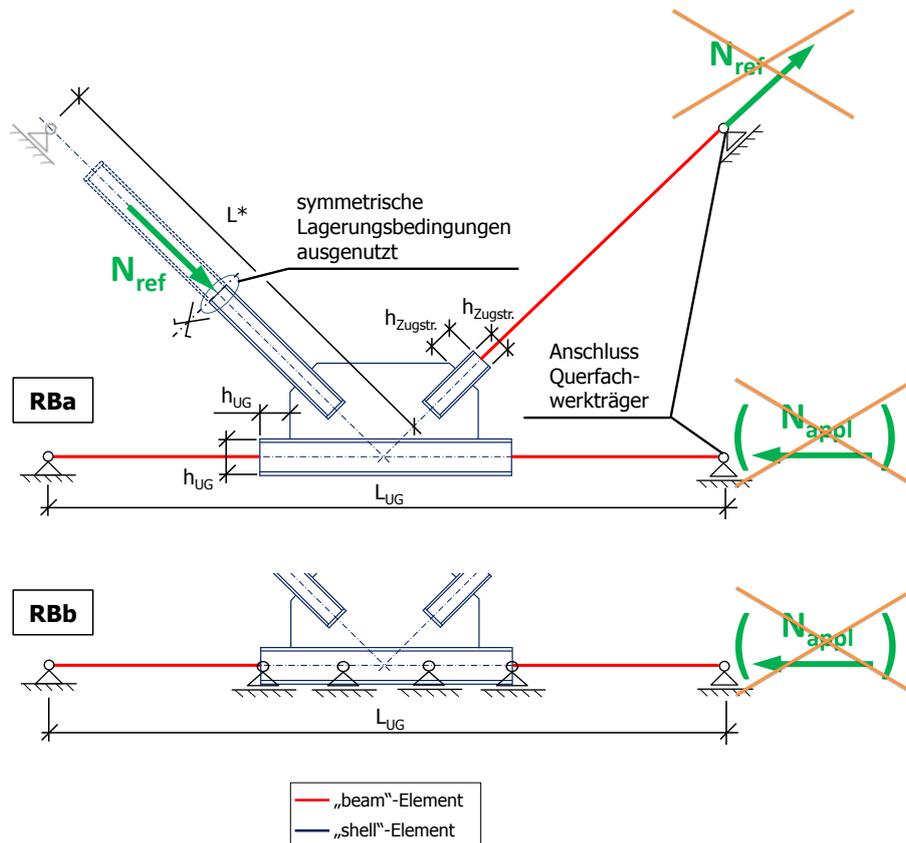


Abbildung B.162 – Berechnung ohne Zugkraftkomponente: RBa Untergurt gabelgelagert und RBb zusätzlich zur Lagerungsbedingung RBa mit Sperrung der Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung

Gegenübergestellt werden die Ergebnisse der maximalen Traglast mit Zugkraft (Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform, RBa) jenen Ergebnissen der Berechnung ohne Zugkraftkomponente, dafür mit zusätzlicher Stützung des Untergurtes (Lagerungsbedingungen RBb).

Da die Verformungsfiguren aller Gruppen bei der Randbedingung RBa deutlich zeigen, dass im Fall ohne Zugkraft ein Biegedrillknickversagen des Untergurtes auftritt, wurde die entsprechende Tragfähigkeit des Untergurtstabes auf Biegedrillknicken nach EN 1993-1-1 [10] ermittelt. Über die Momenten Tragfähigkeit M_{Rd} kann auf die maximal aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} in den Streben geschlossen werden.

Diese über den Biegedrillknicknachweis errechnete Normalkraft dient als Vergleichswert für die FE-Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente und der Lagerungsbedingung RBa.

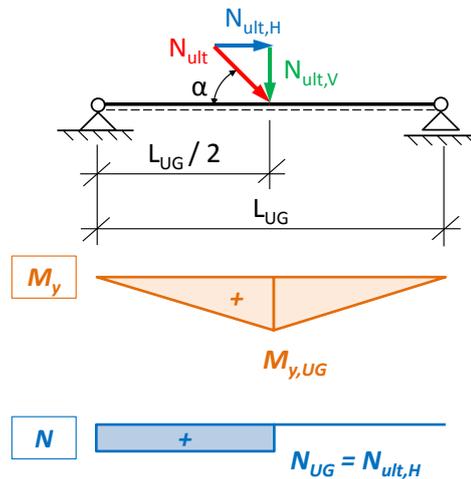


Abbildung B.163 – Normalkraft und Momentenverteilung zur Ermittlung der Tragfähigkeit des Untergurtstabes auf Biegedrillknicken

Die stabilisierend wirkende Zugkraft im Untergurt (in der linken Systemhälfte, siehe Abbildung B.163) wurde in der Handrechnung vernachlässigt. Demzufolge liegen die ermittelten Tragfähigkeiten der Handrechnung auf der sicheren Seite.

B - 6.2 Gruppe 1

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 1 zu charakterisieren sind in Tabelle B.29 zusammengefasst.

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge L^* =	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	3648mm
$t_{Knotenblech}$ =	45mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.29 – FE-Eingangsdaten Gruppe 1

B - 6.2.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzustände Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.3:

$N_{ult} = 5427,6 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

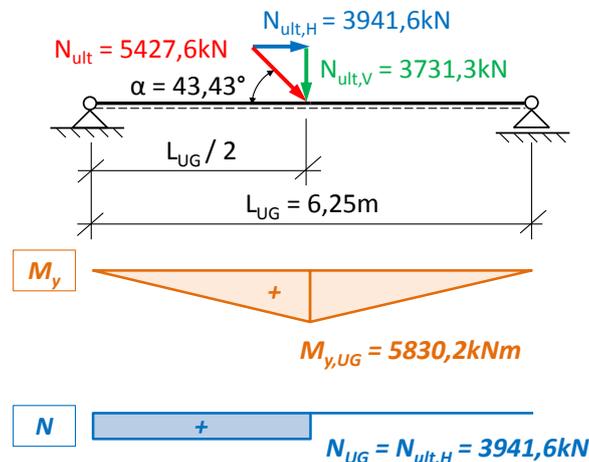


Abbildung B.164 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 1

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 43,43^\circ$ zur Horizontalen können die vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.164 zeigt:

$$N_{ult,V} = 5427,6 \cdot \sin(43,43^\circ) = 3731,3 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 5427,6 \cdot \cos(43,43^\circ) = 3941,6 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,25\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = \frac{N_{ult,V}}{2} \cdot \frac{L_{UG}}{2} = \frac{3731,3}{2} \cdot \frac{6,25}{2} = 5830,2 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEB 450, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 450:} \quad & h = 45 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,6 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,4 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = \frac{t_w \cdot h^2}{4} + (b - t_w) \cdot (h - t_f) \cdot t_f = \frac{1,4 \cdot 45^2}{4} + (30 - 1,4) \cdot (45 - 2,6) \cdot 2,6 = 3861,6 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momenten­tragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 3861,6 \cdot \frac{35,5}{100} = 1370,9 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = c_1 \cdot \pi^2 \cdot \frac{EI_z}{L_{UG}^2} \cdot \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{UG}^2 \cdot GI_T}{\pi^2 EI_z}}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\begin{aligned}
 \text{Flächenträgheitsmoment 2. Grades:} \quad & I_z = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b^3}{12} + \frac{t_w^3 \cdot (h - 2 \cdot t_f)}{12} = 2 \cdot \frac{2,6 \cdot 30^3}{12} + \frac{1,4^3 \cdot (45 - 2 \cdot 2,6)}{12} = \\
 & I_z = 11709,1 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad & I_w = \frac{t_f \cdot b^3}{24} \cdot (h - t_f)^2 = \frac{2,6 \cdot 30^3}{24} + (45 - 2,6) = \\
 & I_w = 5258448,0 \text{ cm}^6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad & I_t = \frac{2}{3} \cdot (b - 0,63 t_f) \cdot t_f^3 + \frac{1}{3} \cdot (h - 2 t_f) \cdot t_w^3 \\
 & I_t = \frac{2}{3} \cdot (30 - 0,63 \cdot 2,6) \cdot 2,6^3 + \frac{1}{3} \cdot (45 - 2 \cdot 2,6) \cdot 1,4^3 = \\
 & I_t = 368,7 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 210000 \text{ N/mm}^2 = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{2,1 \cdot 10^5}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{cr} = 1,363 \cdot \pi^2 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^8 \cdot 11709,1 \cdot 10^{-8}}{6,25^2} \cdot \sqrt{\frac{5258448,0 \cdot 10^{-12}}{11709,1} + \frac{6,25^2 \cdot 8,0769 \cdot 10^7 \cdot 368,7 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 11709,1 \cdot 10^{-8}}} =$$

$$M_{cr} = 2580,2 \text{ kNm}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Untergurtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3861,6 \cdot 35,5}{2580,2 \cdot 10^2}} = 0,729$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

Für die Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} ist es notwendig, die dem Profil entsprechende Knicklinie und den zugehörigen Imperfektionswert α_{LT} zu bestimmen. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um ein gewalztes I-Profil.

Knicklinie	a	b	c	d
α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle B.30 – Imperfektionswerte α_{LT} [10]

Profil	h / b	Knicklinie
I gewalzt	≤ 2	a
	> 2	b
I geschweißt	≤ 2	c
	> 2	d

Tabelle B.31 – Knicklinien für Biegedrillknicken, allgemeiner Fall [10]

Es gilt:

$$\frac{h}{b} = \frac{45}{30} = 1,5 < 2 \quad \rightarrow \quad \text{Knicklinie a: } \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,21 \cdot (0,729 - 0,2) + 0,729^2 \right] = 0,821$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,821 + \sqrt{0,821^2 - 0,729^2}} = 0,834 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momenten Tragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd} = 0,834 \cdot 1370,9 = 1143,3 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 4 \cdot \frac{M_{pl,y,Rd}}{L_{UG}} = 4 \cdot \frac{1143,3}{6,25} = 731,7 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$LF = \frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = \frac{731,7}{3731,3} = 0,196$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = LF \cdot N_{Ed,min} = 0,196 \cdot 5427,6 = 1064,4 \text{ kN}$$

B - 6.2.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.2.1 in der Abbildung B.35 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 1 mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.165 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.165 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

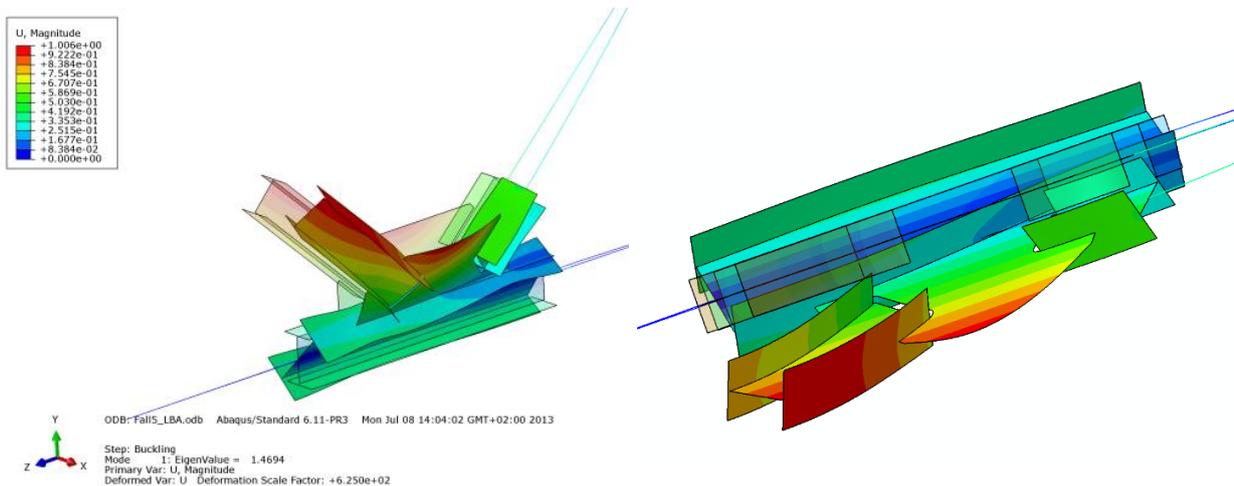


Abbildung B.165 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.2.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.2.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich der beiden Diagonalen kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.166 bis B.169 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

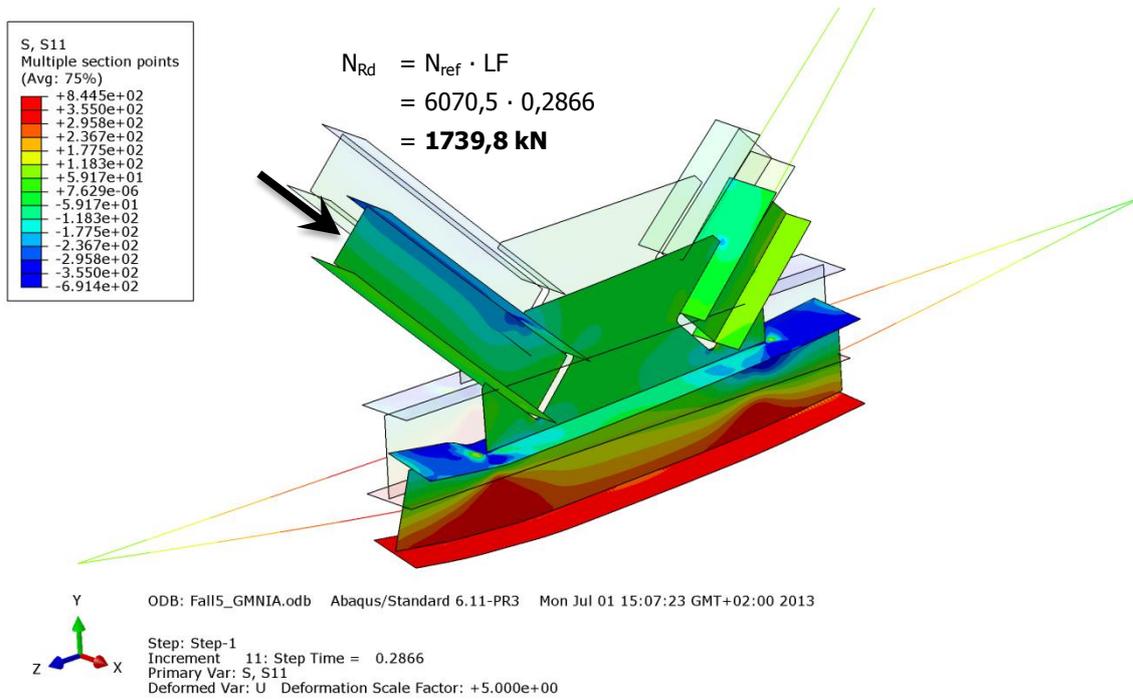


Abbildung B.166 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

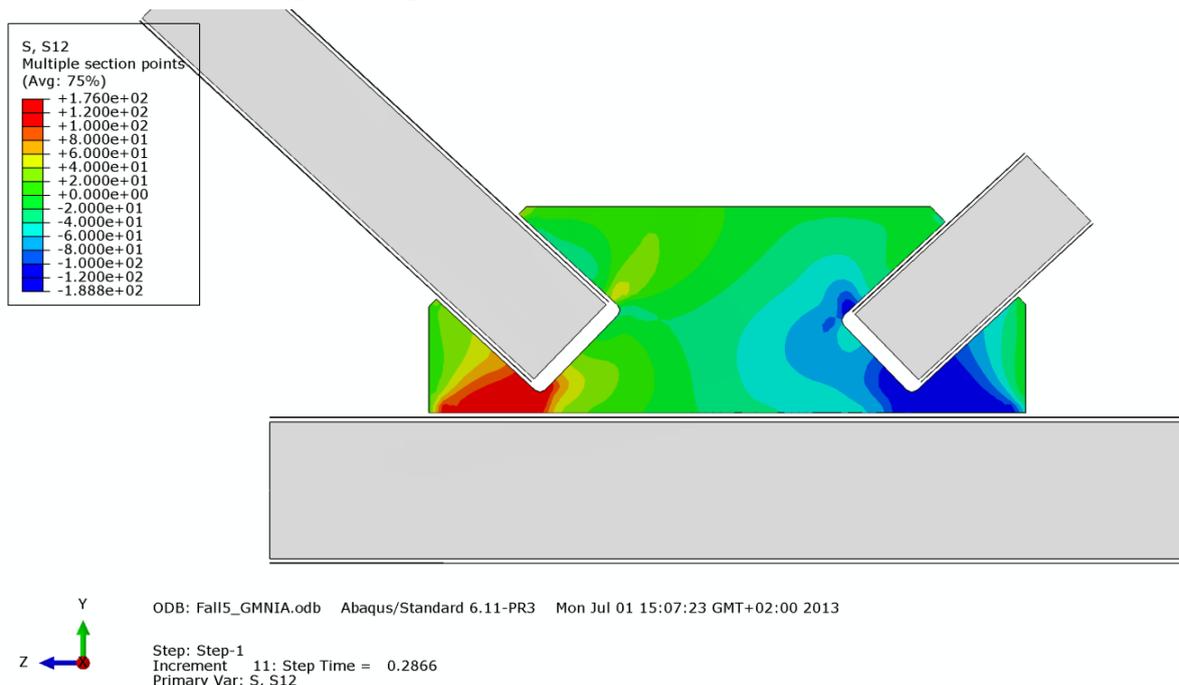


Abbildung B.167 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

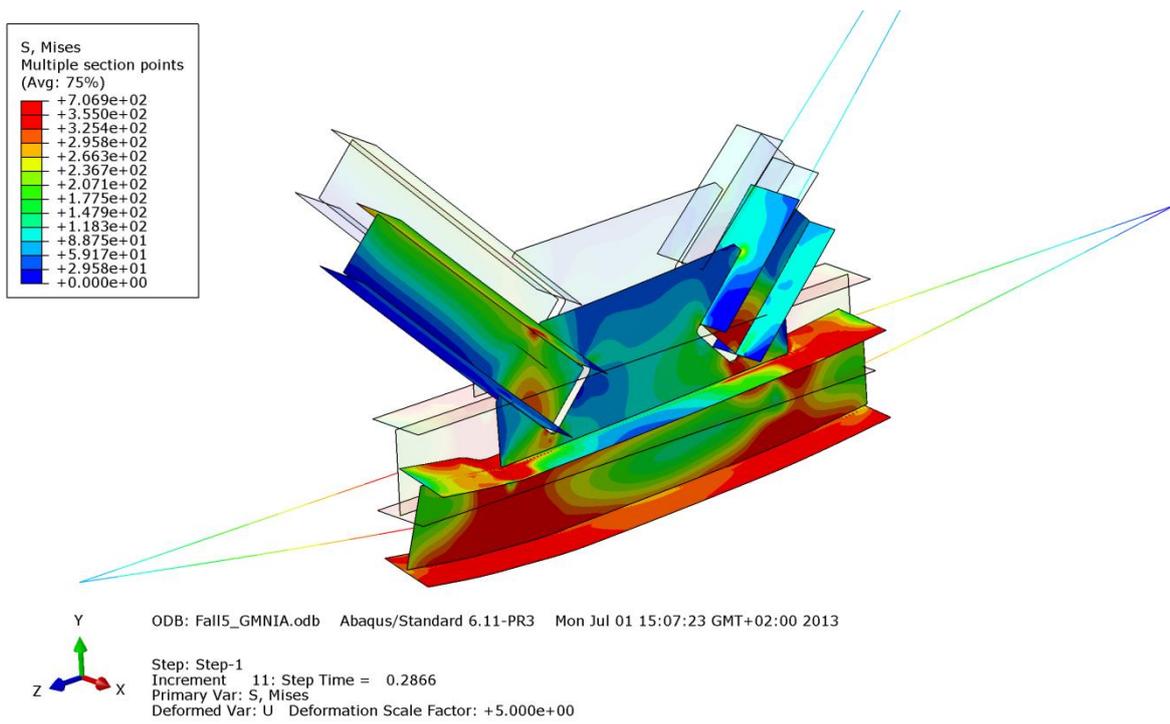


Abbildung B.168 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

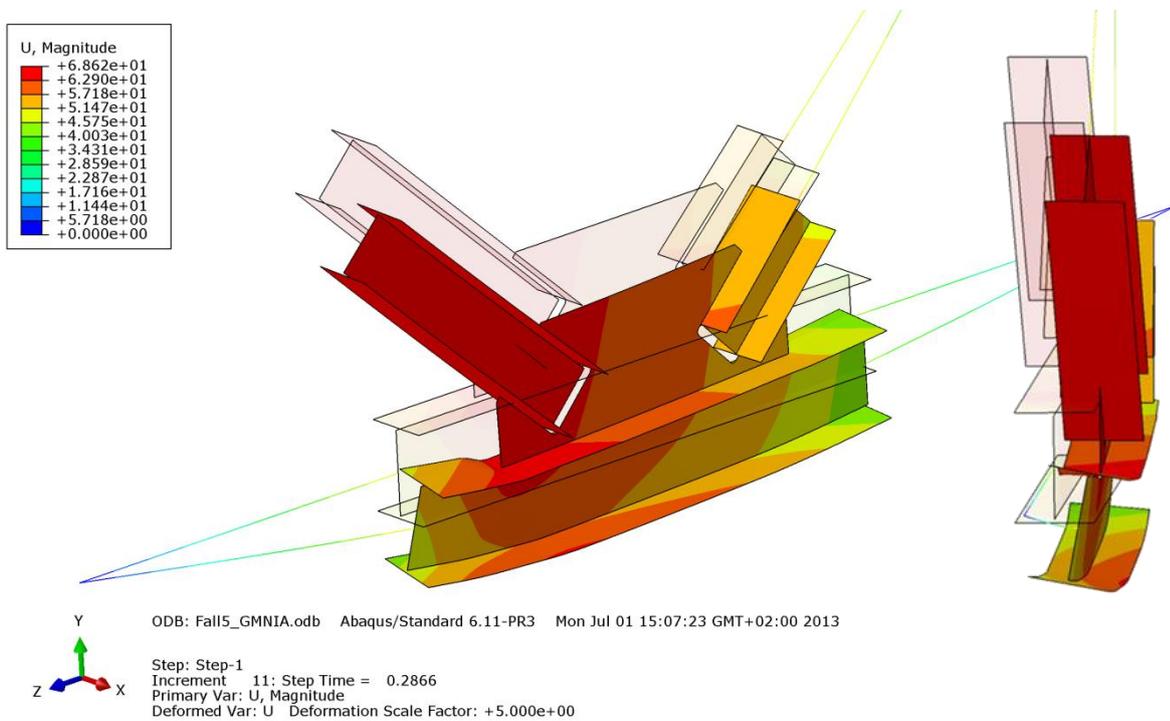


Abbildung B.169 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.2.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken), wie die Abbildungen B.170 bis B.173 deutlich zeigen. Des Weiteren plastiziert ein kleinerer Bereich am Flansch des Untergurtes zufolge der Krafteinleitung über das Knotenblech.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

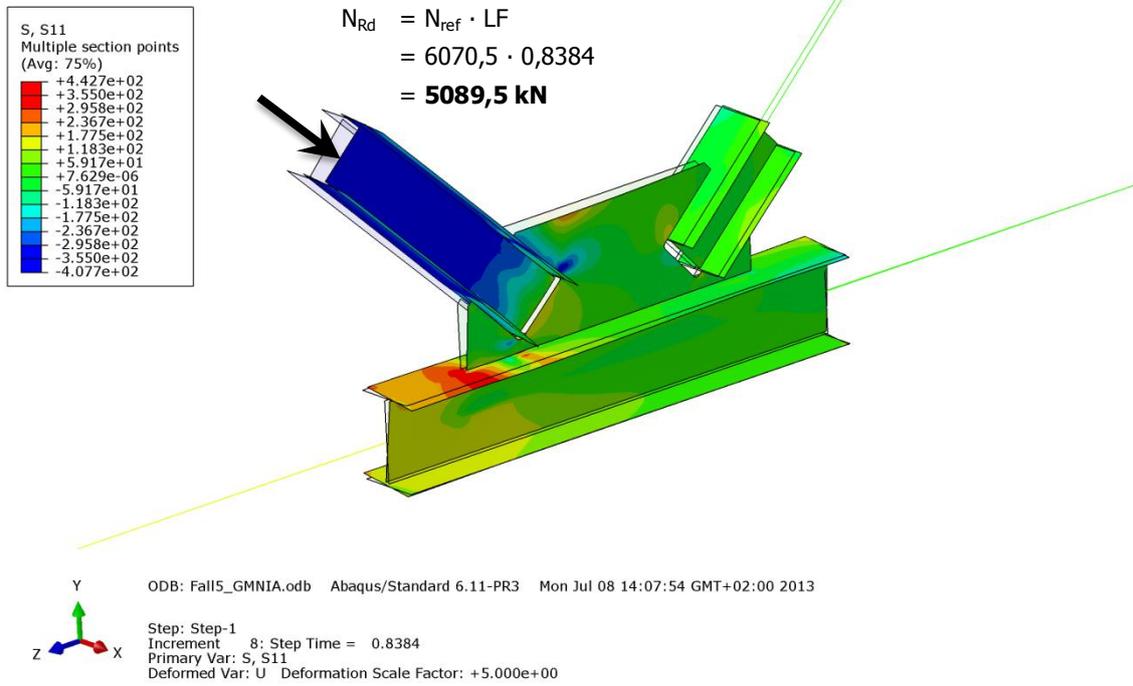


Abbildung B.170 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

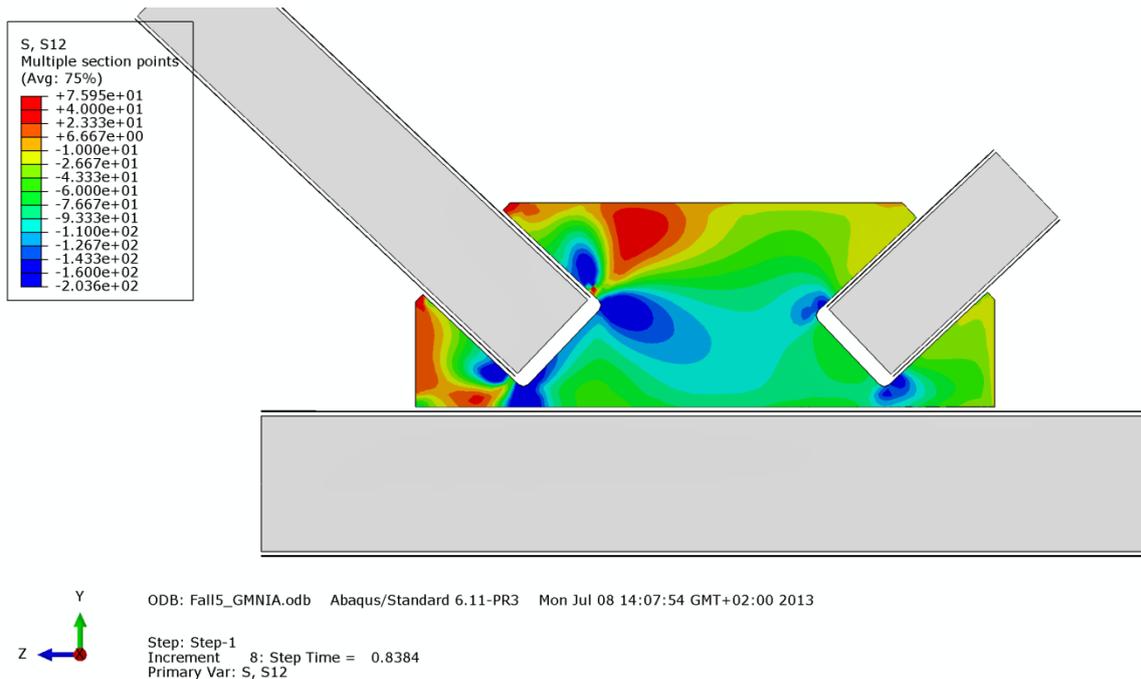


Abbildung B.171 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

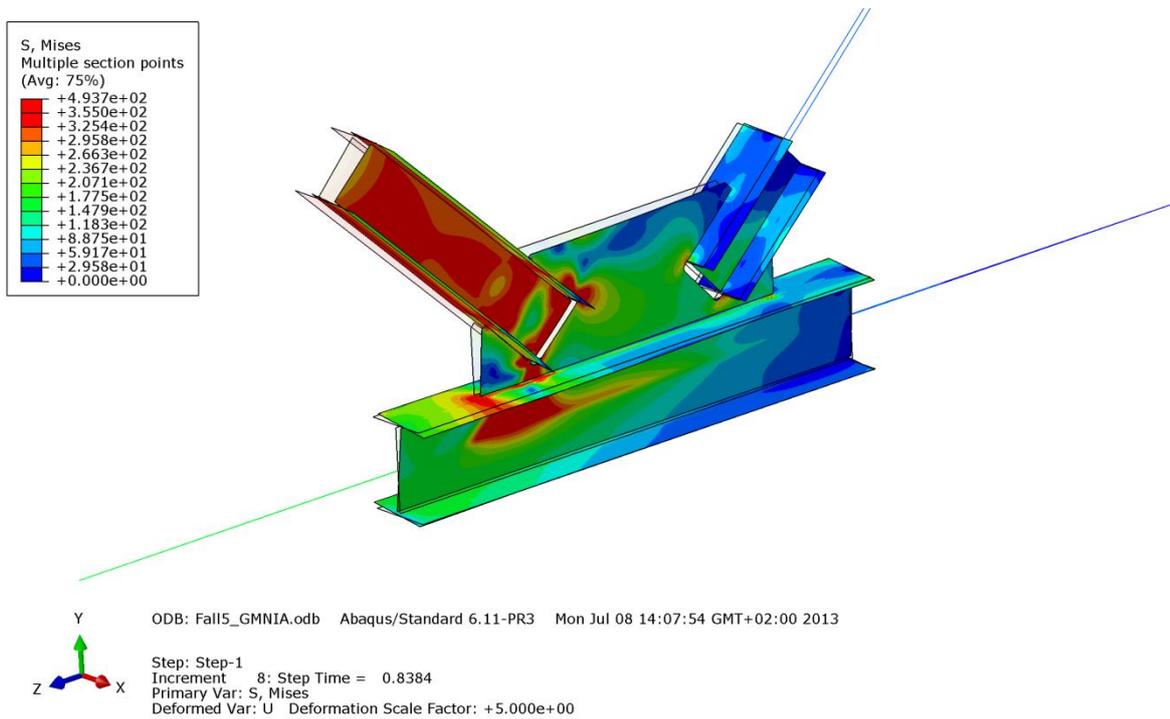


Abbildung B.172 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RbB

• **Verformung [mm]**

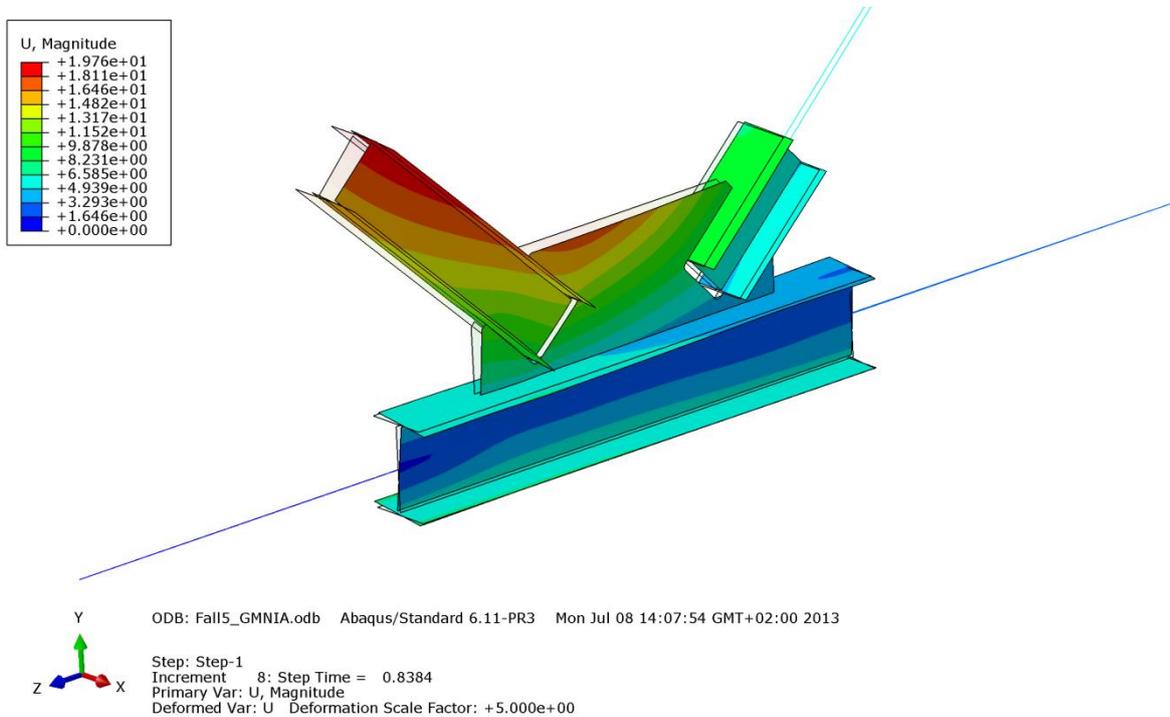


Abbildung B.173 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RbB

B - 6.2.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.32 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge $L^* =$	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	$L_{res} =$	3648mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech} =$	45mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand-rechnung: ohne Zugkraft
"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel-lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,8346 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5066,4 kN	LF = 0,2866 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1739,8 kN	LF = 0,8384 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5089,5 kN	LF = 0,196 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 1063,8 kN
<i>Zugstr. u. UG elastisch</i>			
LF = 0,8941 5427,6 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 5844,7 kN N _{pl} - Zugstrebe = 5505,5 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 5174,8 kN N _{ult} = 5427,6 kN N _{ref} = 6070,5 kN (N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			

Tabelle B.32 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 1

Aus Abbildung B.174 geht hervor, dass die maximale Traglast der Systemberechnung mit Zugkraft annähernd jener Tragfähigkeit, welche ohne Zugkraftkomponente, jedoch mit den Lagerungsbedingungen RBb (mit gesperrter Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen in Abschnitt B - 2.2) ermittelt wurde, entspricht (linear elastisch – ideal plastisches Materialverhalten). Die Tragfähigkeit ohne Zugkraft mit den Randbedingungen RBb (5090kN) liegt etwas höher als die Traglast mit Zugkraft und den Randbedingungen RBa (5066kN), da der Untergurt weniger stark plastiziert. Sie kommt aber nicht an das Niveau der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt (5428kN) heran.

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 1740kN auf 5090kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.164) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 1064kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 1740kN.

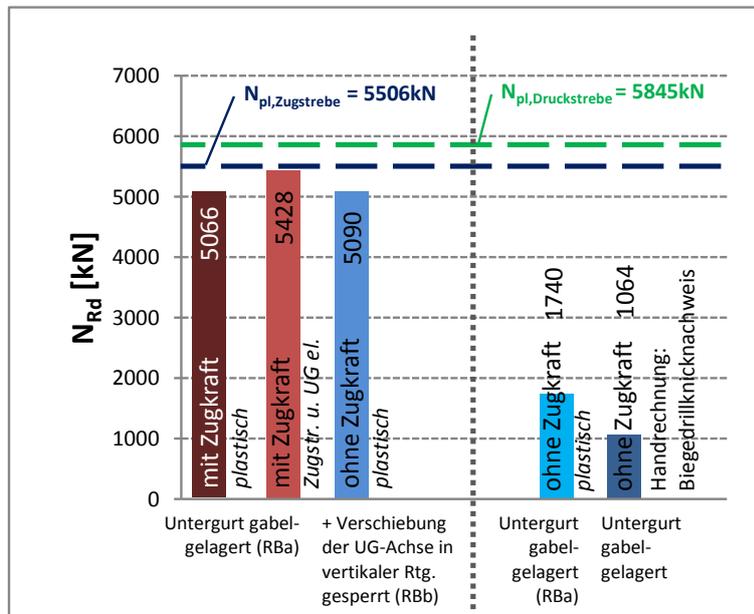


Abbildung B.174 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 1

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.3 Gruppe 2

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 2 zu charakterisieren sind in Tabelle B.33 zusammengefasst.

Gruppe 2			
Profil der Druckstrebe:	HEA 140	Systemlänge $L^* =$	4581mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	1,6702
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	30,18cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	4320mm
$t_{\text{Knotenblech}} =$	12mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	1,5751
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 180	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Tabelle B.33 – FE-Eingangsdaten Gruppe 2

B - 6.3.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.4:

$N_{ult} = 418,5 \text{ kN}$ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

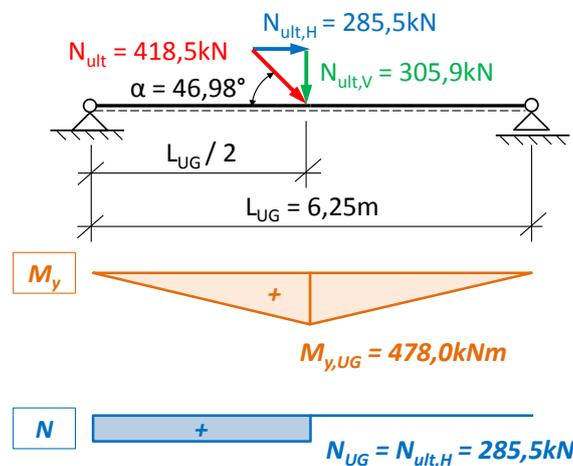


Abbildung B.175 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 2

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 46,98^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.175 zeigt:

$$N_{ult,V} = 305,9 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 285,5 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,25\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 478,0 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEA 180, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

<i>HEA 180:</i>	$h = 17,1 \text{ cm}$
	$b = 18 \text{ cm}$
	$t_f = 0,95 \text{ cm}$
	$t_w = 0,6 \text{ cm}$
<i>S355:</i>	$f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 310,8 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 110,3 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillnickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 105,0 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

Flächenträgheitsmoment 2. Grades: $I_z = 923,7 \text{ cm}^4$

Wölbflächenmoment 2. Grades: $I_w = 60210,9 \text{ cm}^6$

Torsionsflächenmoment 2. Grades: $I_t = 11,0 \text{ cm}^4$

Elastizitätsmodul: $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$

Poissonzahl: $\nu = 0,3$

Schubmodul: $G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Untergurtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1,025$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

Knicklinie a: $\alpha_{LT} = 0,21$

$$\phi_{LT} = 1,112$$

$$\chi_{LT} = 0,648 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 71,5 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 45,8 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,150$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,150 \cdot 418,5 = 62,6 \text{ kN}$$

B - 6.3.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbirungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.3.1 in der Abbildung B.52 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 2 mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.176 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4581\text{mm}/750 = 6,1\text{mm}$. Abbildung B.176 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 2 ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

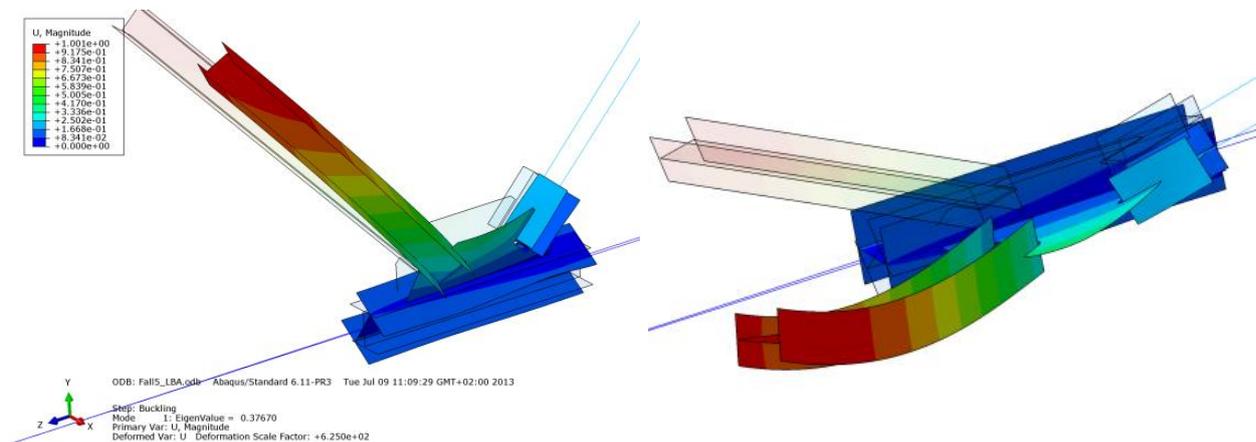


Abbildung B.176 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 2 – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.3.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.3.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich der beiden Diagonalen kommt es im Untergurtbereich zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.177 bis B.180 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

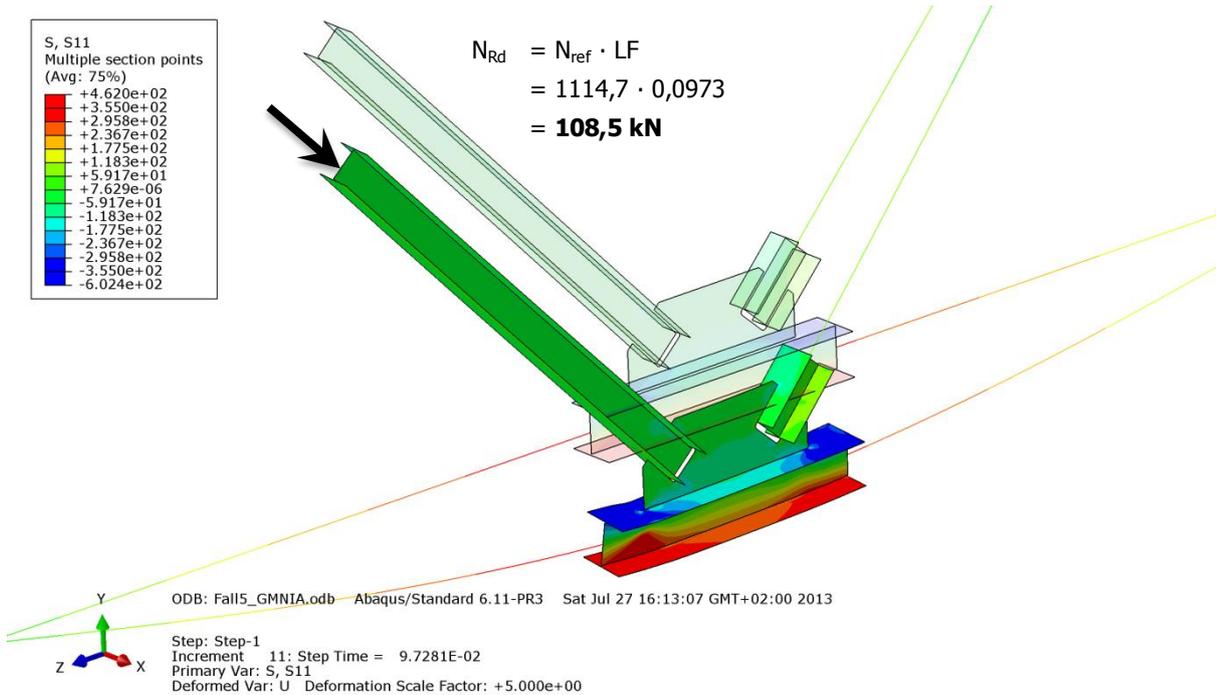


Abbildung B.177 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

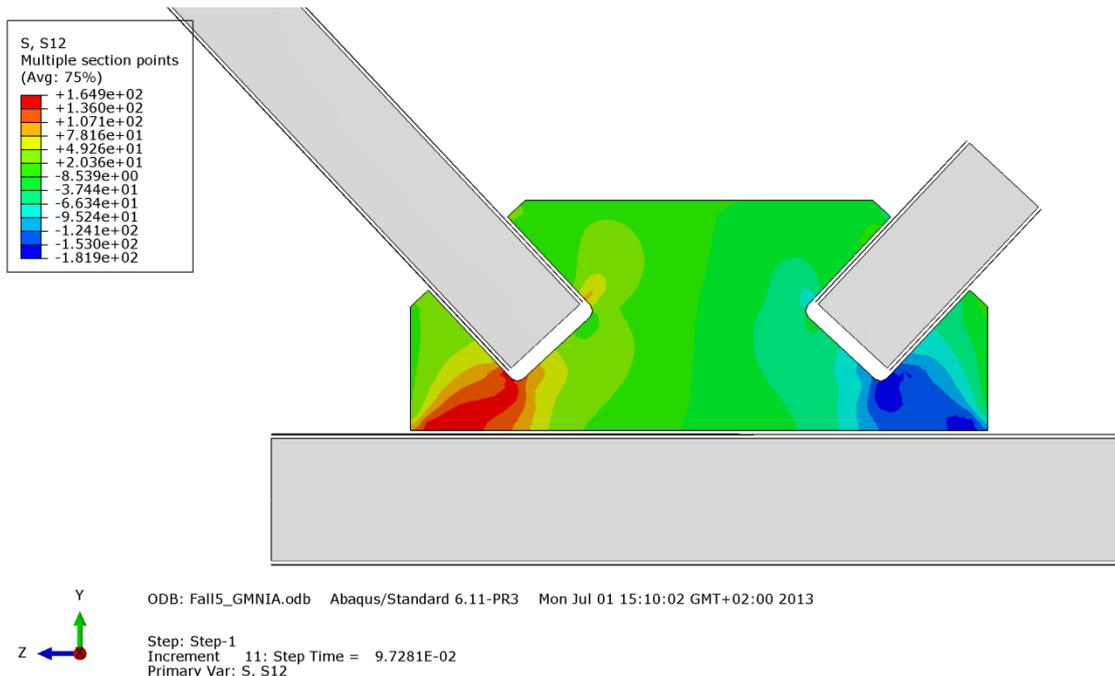


Abbildung B.178 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

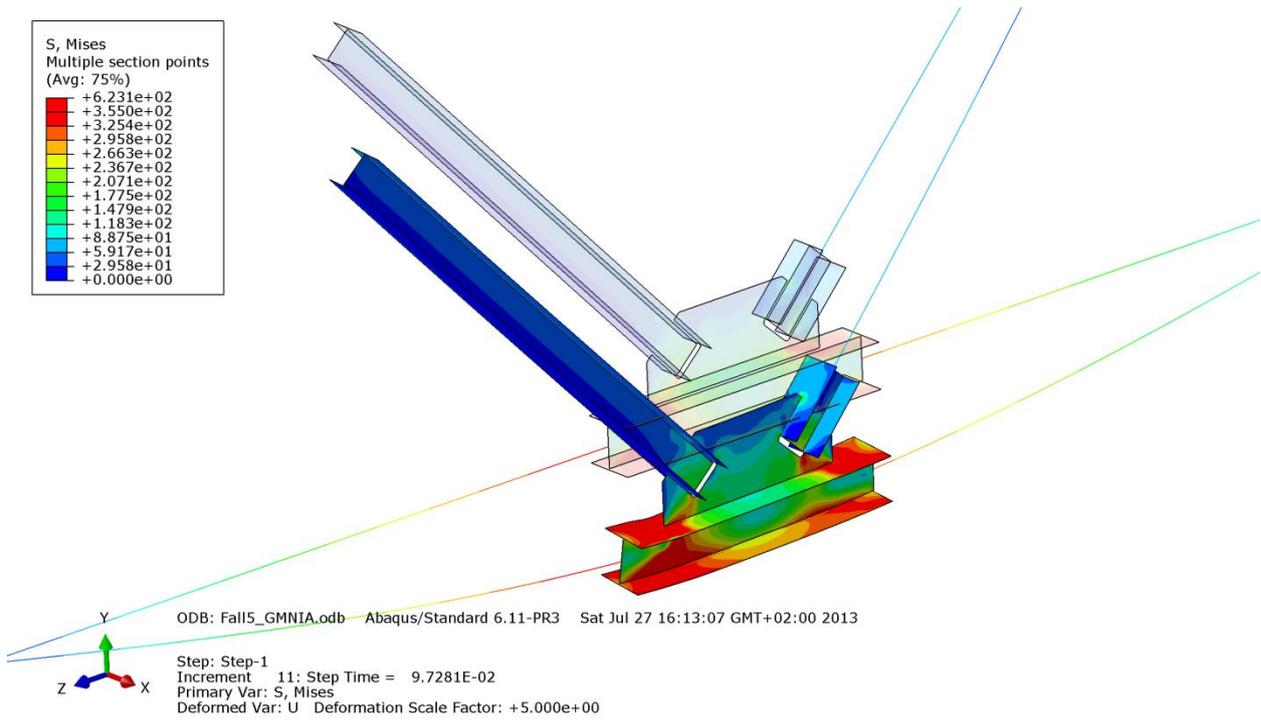


Abbildung B.179 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

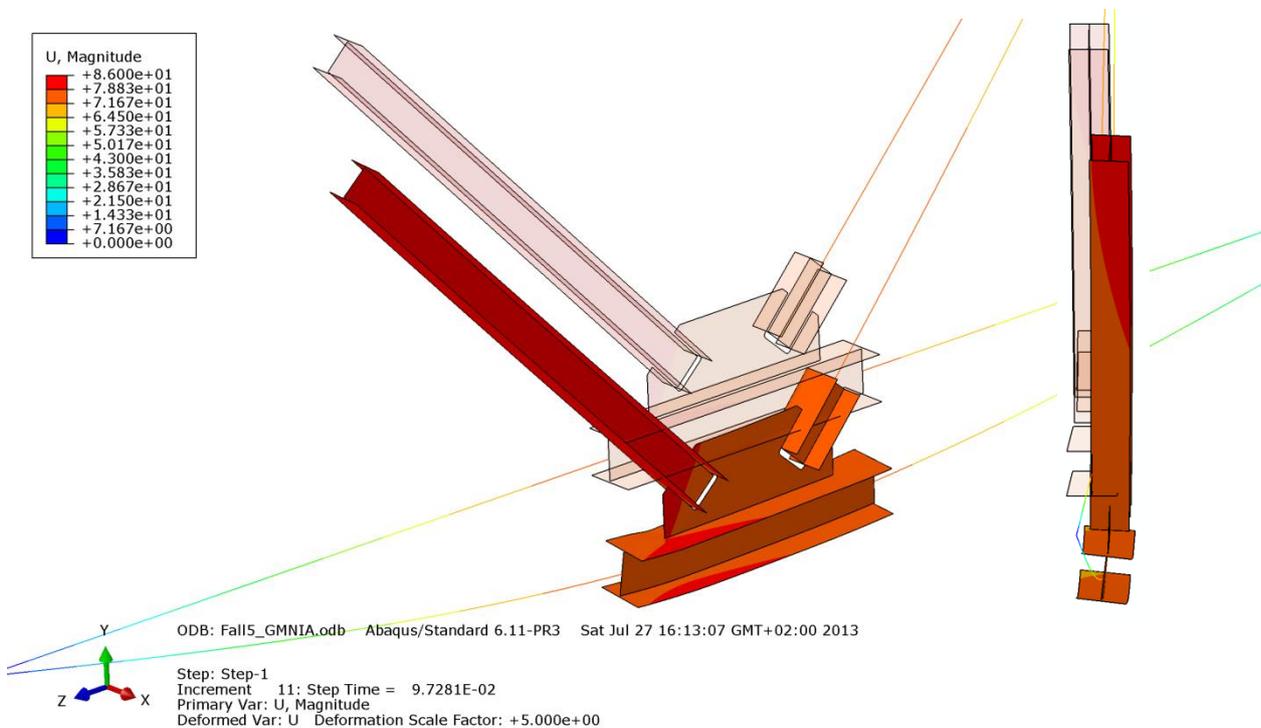


Abbildung B.180 – Verformung U [mm] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.3.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Ausweichen der Druckstrebe (Stabknicken), wie die Abbildungen B.181 bis B.184 zeigen. Es plastizieren die Flanschrandfasern sowohl auf der Druck-, als auch auf der Zugseite. Des Weiteren plastizieren Bereiche des Knotenbleches, welche an der Überleitung der Diagonalkraft beteiligt sind.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

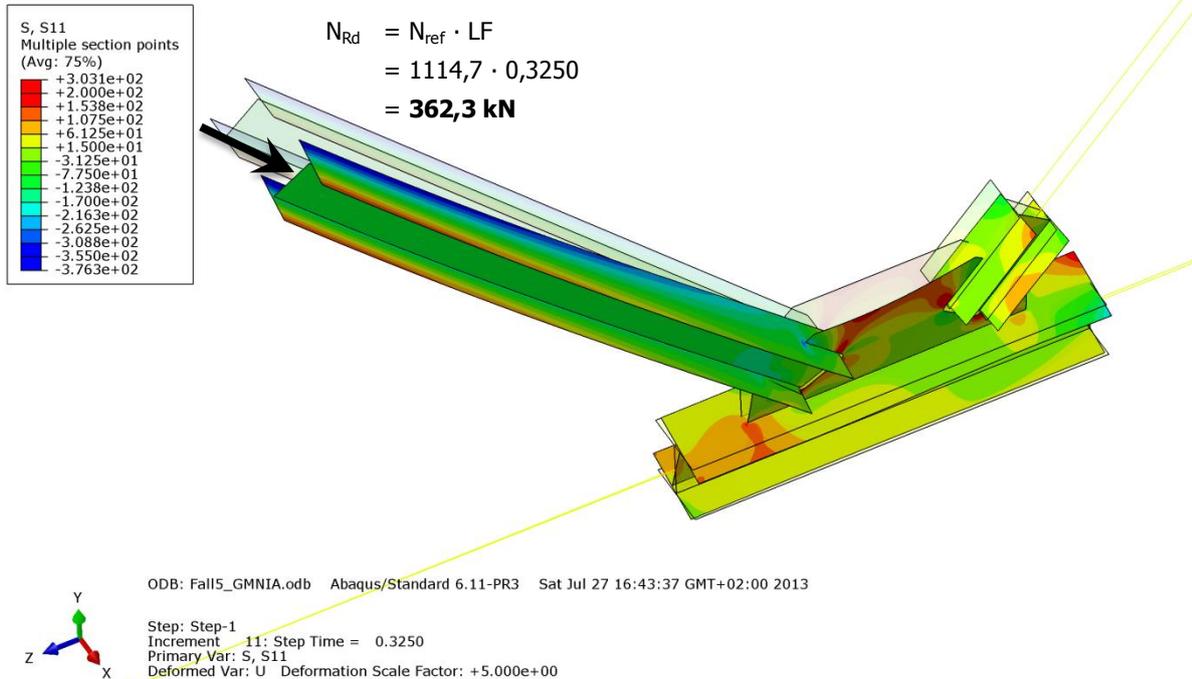


Abbildung B.181 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

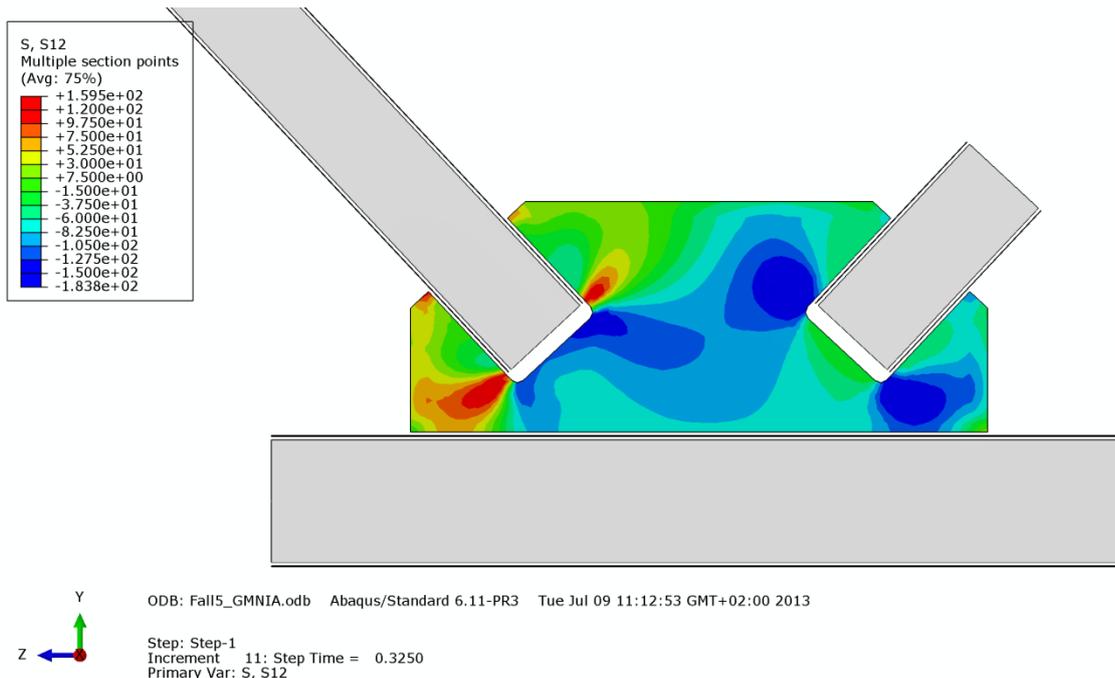


Abbildung B.182 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

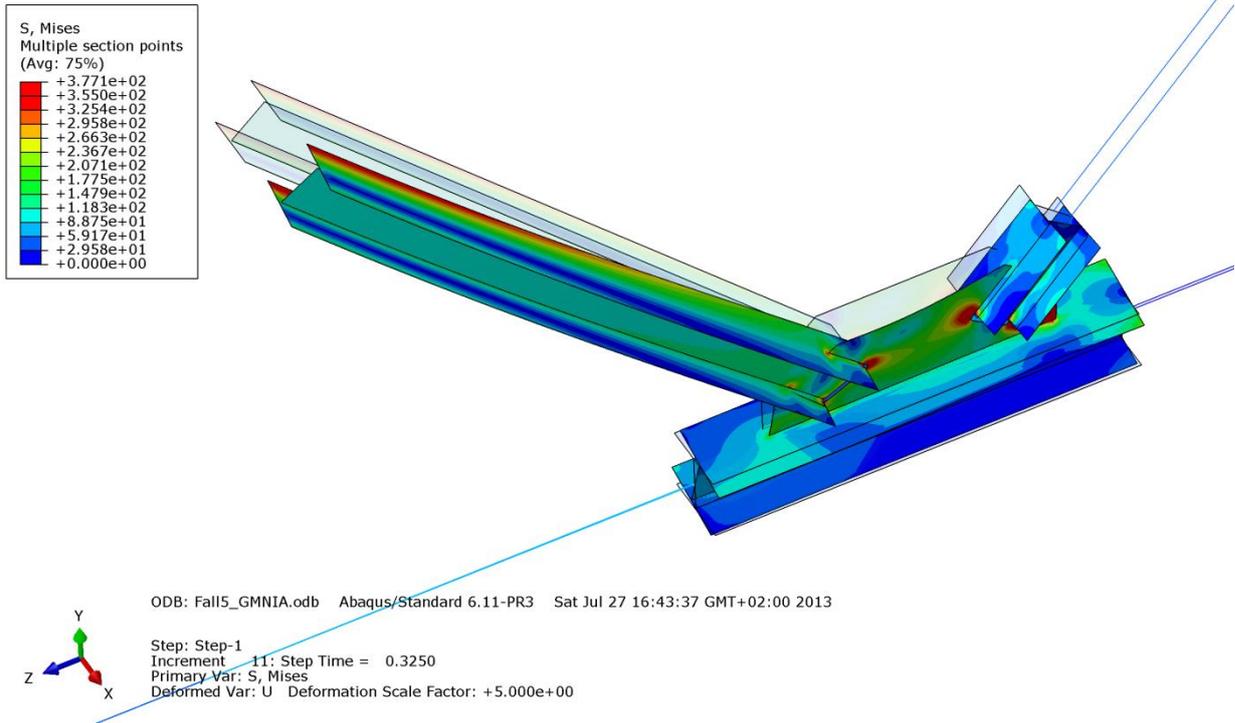


Abbildung B.183 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

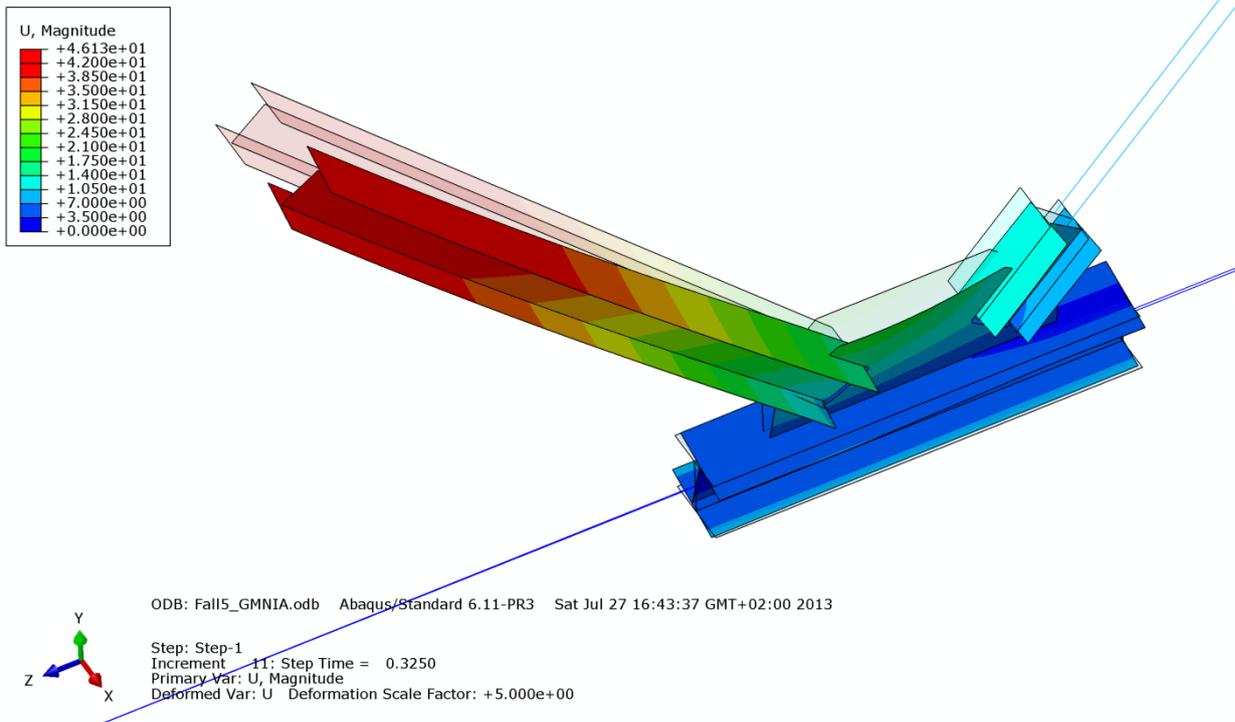


Abbildung B.184 – Verformung U [mm] der Gruppe 2 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.3.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.34 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (linear elastisch – ideal plastische Materialmodellierung des gesamten Systems)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 2			
Profil der Druckstrebe:	HEA 140	Systemlänge L* =	4581mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L}$ =	1,670
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	30,1cm ²	L _{ges} =	4320mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
t _{Knotenblech} =	12mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,575
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 180	Untergurtlänge L _{UG} =	6250mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Handrechnung: ohne Zugkraft
"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2	"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt	Gabel-lagerung des Einzelstabes
RBa	RBa	RBb	
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,3754	LF = 0,0973	LF = 0,3250	LF = 0,150
LF · N _{ref} =	LF · N _{ref} =	LF · N _{ref} =	LF · N _{ult} =
N _{Rd} =	N _{Rd} =	N _{Rd} =	N _{Rd} =
418,5 kN	108,5 kN	362,3 kN	62,6 kN
<p>N_{pl} - Druckstrebe = 1071,4 kN N_{pl} - Zugstrebe = 1071,4 kN N_{Rd} für N_{pl,UG} = 1113,0 kN N_{ult} = 418,5 kN N_{ref} = 1114,7 kN</p>			
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>			

Tabelle B.34 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 2

In Abbildung B.185 ist erkennbar, dass die Traglast mit Zugkraft und Lagerungsbedingung RBa 419kN beträgt und um rund 14% höher als jene Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente (362kN), dafür mit zusätzlicher Stützung der Untergurtachse (Lagerungsbedingung RBb), ist. Dies ist durch die fehlende, für den Untergurt stabilisierend wirkende Horizontalkomponente der Zugkraft erklärbar. Bei der Gruppe 2 kommen sehr schlanke Profile zum Einsatz.

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 108kN auf 362kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.175) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 63kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 108kN.

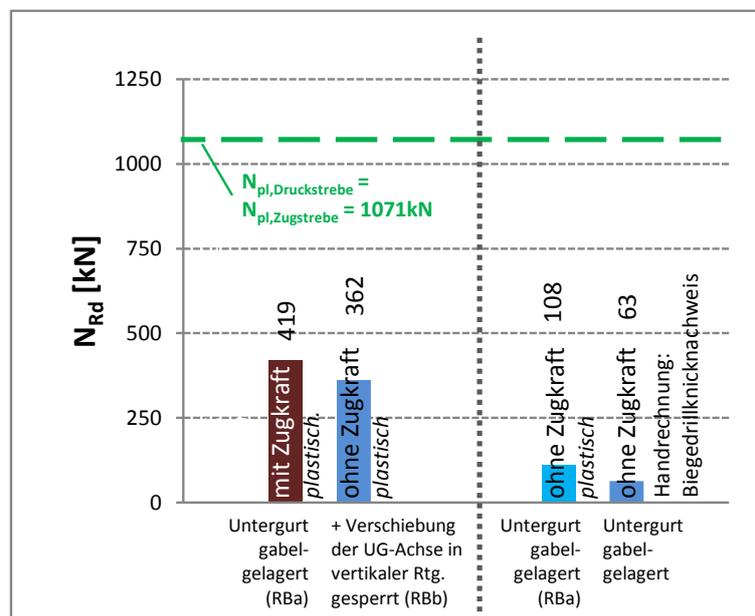


Abbildung B.185 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 2

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.4 Gruppe 3

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 3 zu charakterisieren sind in Tabelle B.35 zusammengefasst.

Gruppe 3			
Profil der Druckstrebe:	HEA 200	Systemlänge L^* =	4454mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,141
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	51,1cm ²	L_{res} =	4159mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	25mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,065
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.35 – FE-Eingangsdaten Gruppe 3

B - 6.4.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefe.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.5:

$N_{ult} = 1248,9 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

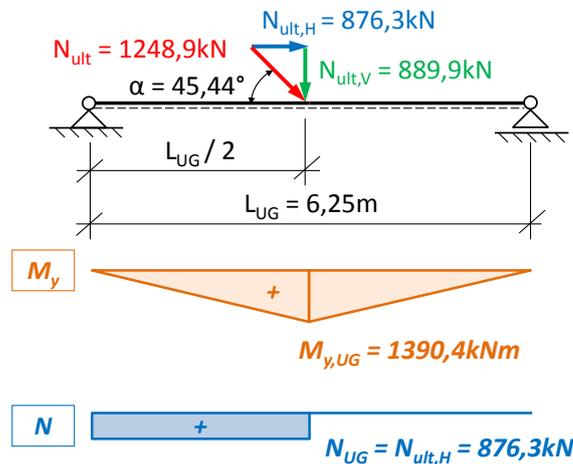


Abbildung B.186 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 3

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 45,44^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.186 zeigt:

$$N_{ult,V} = 889,9 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 876,3 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,25\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 1390,4 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 200:} \quad & h = 19 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,0 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,65 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 407,0 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 144,5 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillnickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 151,3 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\text{Flächenmoment 2. Grades:} \quad I_z = 1333,7 \text{ cm}^4$$

$$\text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad I_w = 108000 \text{ cm}^6$$

$$\text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad I_t = 14,5 \text{ cm}^4$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Unterqrtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,977$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

$$\text{Knicklinie } a: \quad \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 1,059$$

$$\chi_{LT} = 0,682 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 98,5 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 63,0 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,071$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,071 \cdot 1248,9 = 88,4 \text{ kN}$$

B - 6.4.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.4.1 in der Abbildung B.69 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 3 mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.187 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4454\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.187 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 3 ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

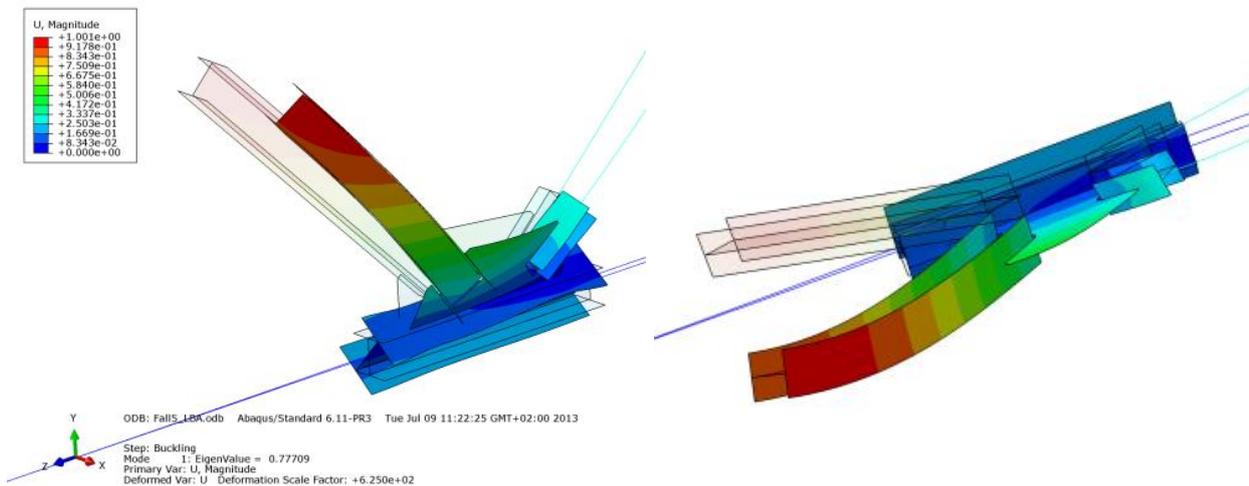


Abbildung B.187 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 3 – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.4.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.4.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich der beiden Diagonalen kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.188 bis B.191 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

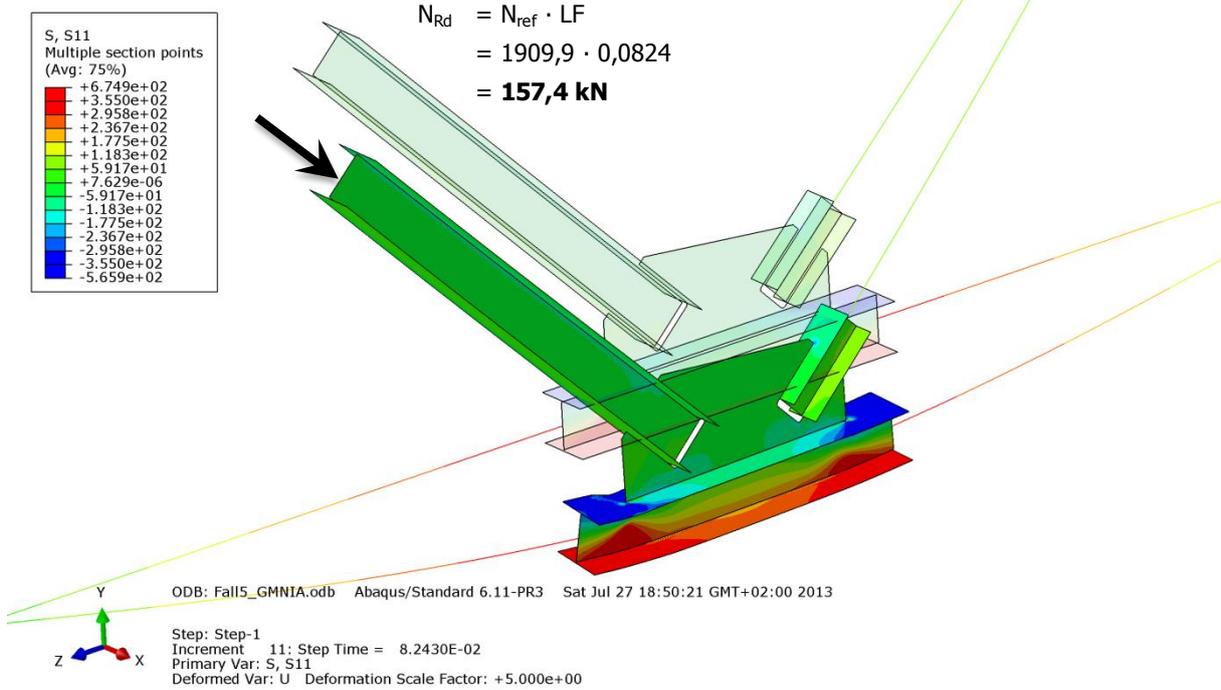


Abbildung B.188 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

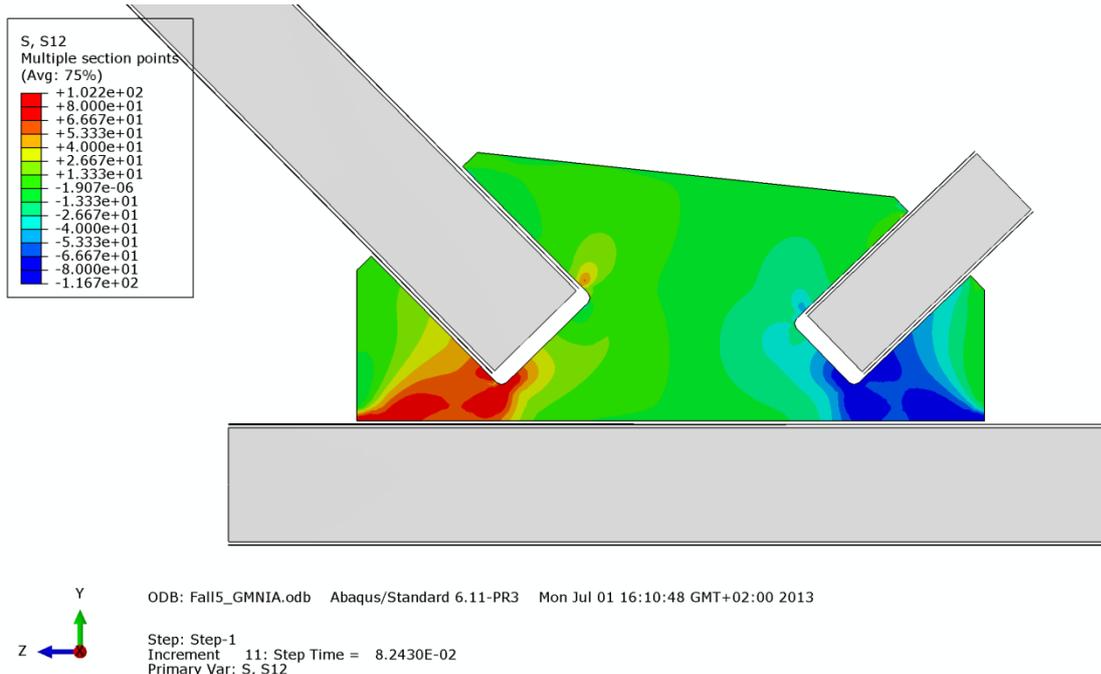


Abbildung B.189 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

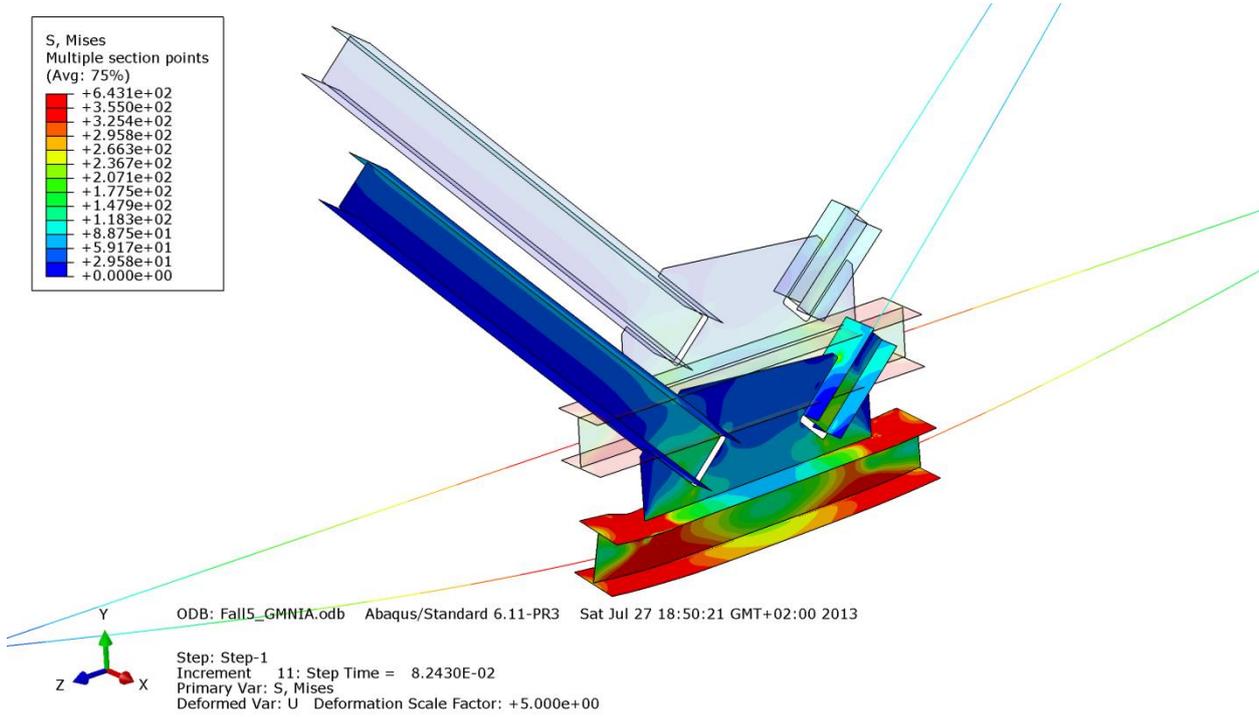


Abbildung B.190 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

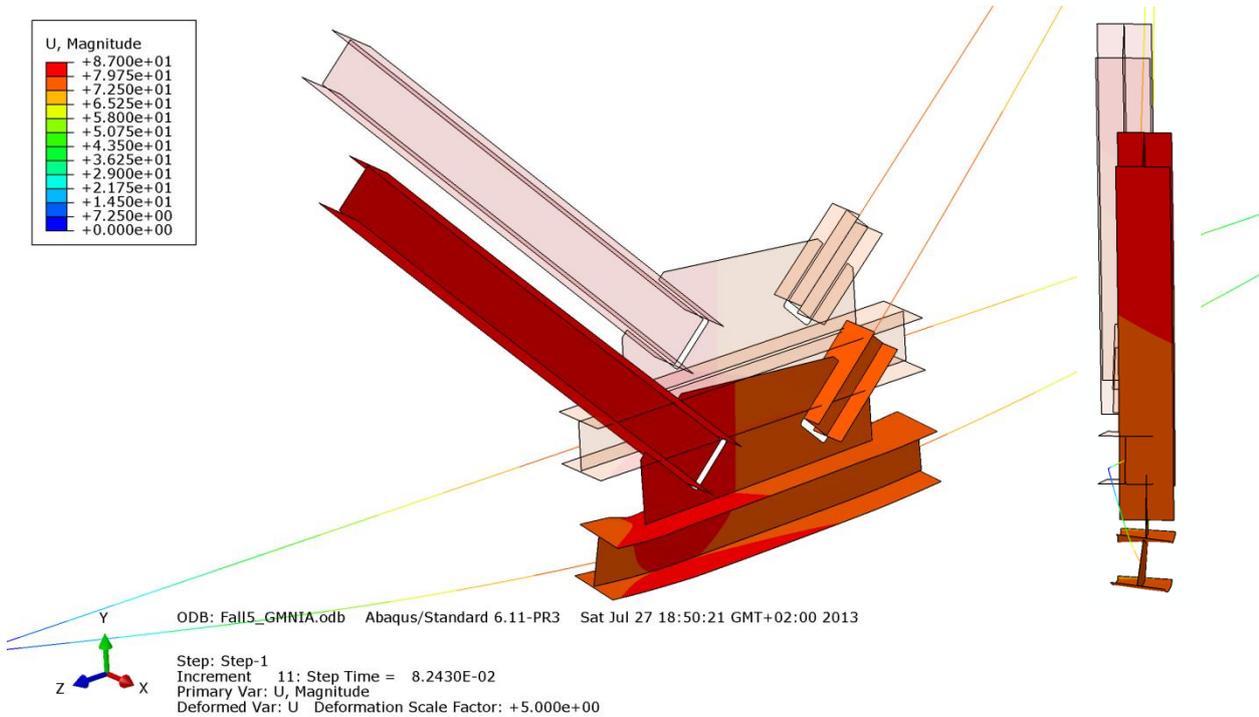


Abbildung B.191 – Verformung U [mm] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.4.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken), wie in den Abbildung B.192 bis B.195 zu erkennen ist. Des Weiteren plastiziert ein kleinerer Bereich am Flansch des Untergurtes zufolge der Krafteinleitung über das Knotenblech.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

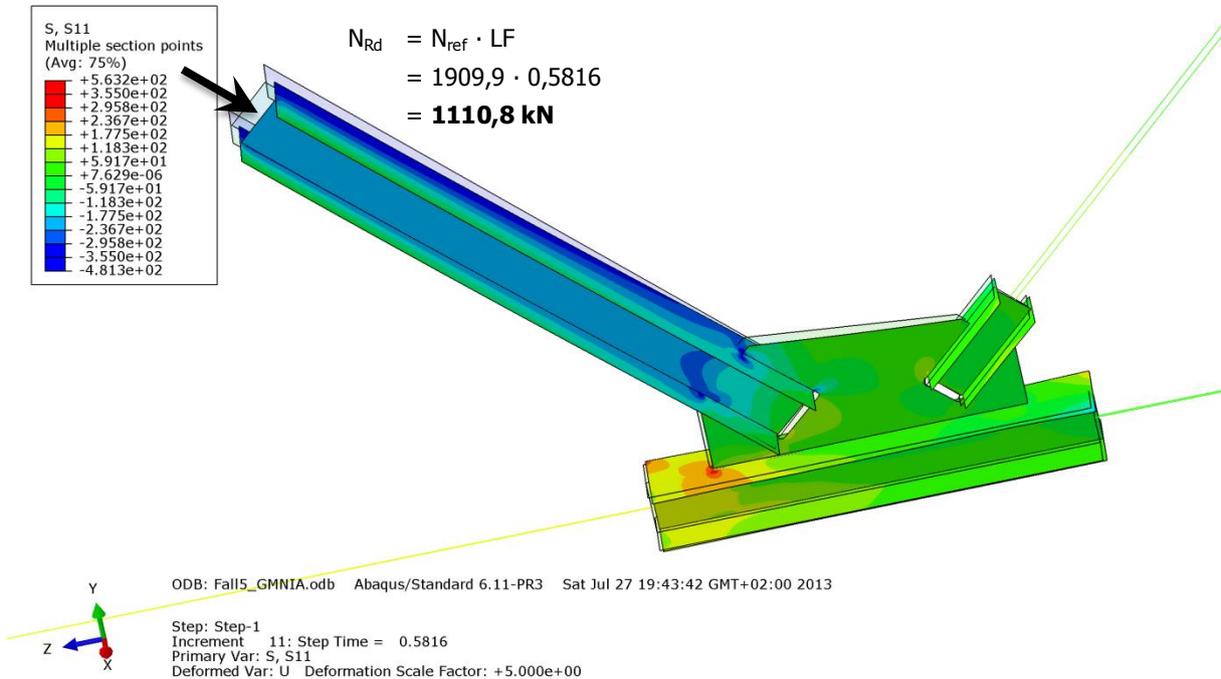


Abbildung B.192 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

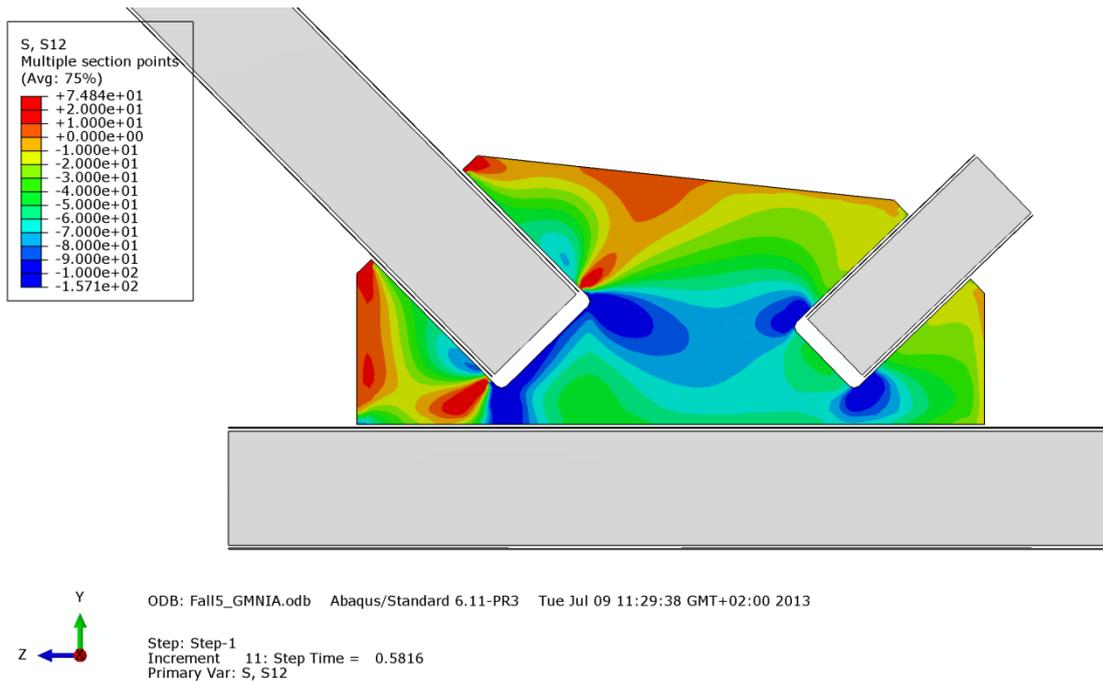


Abbildung B.193 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

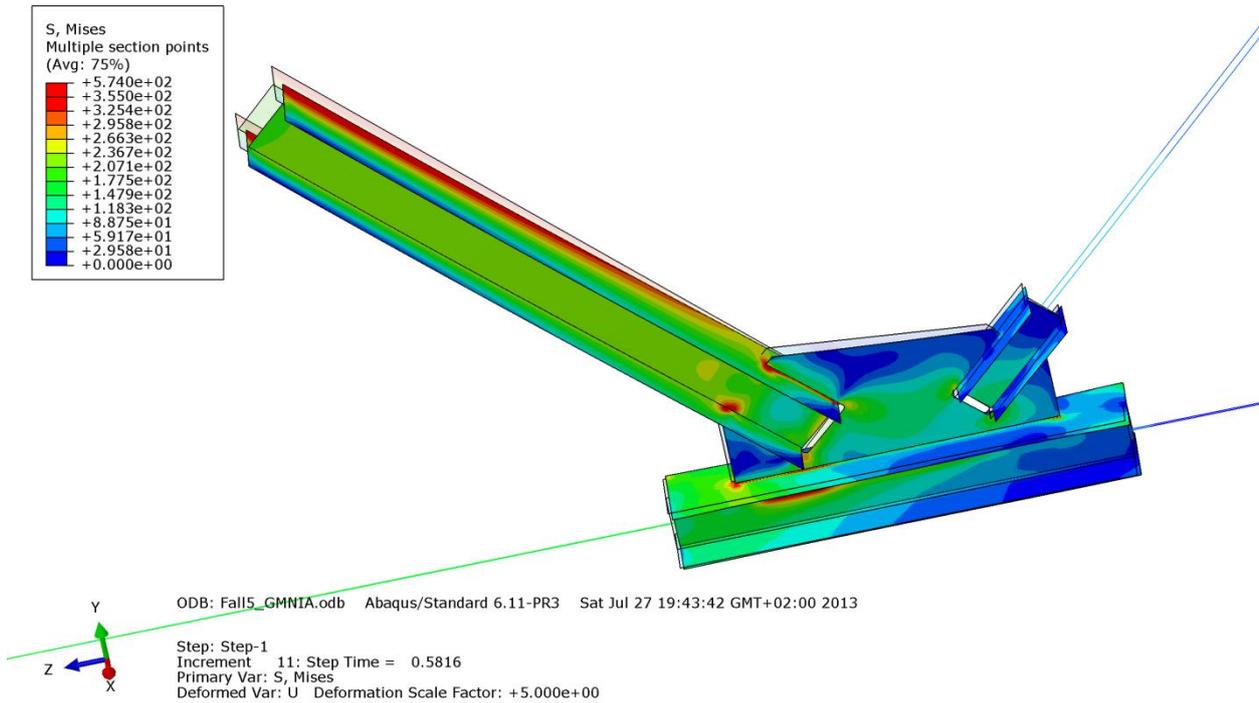


Abbildung B.194 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

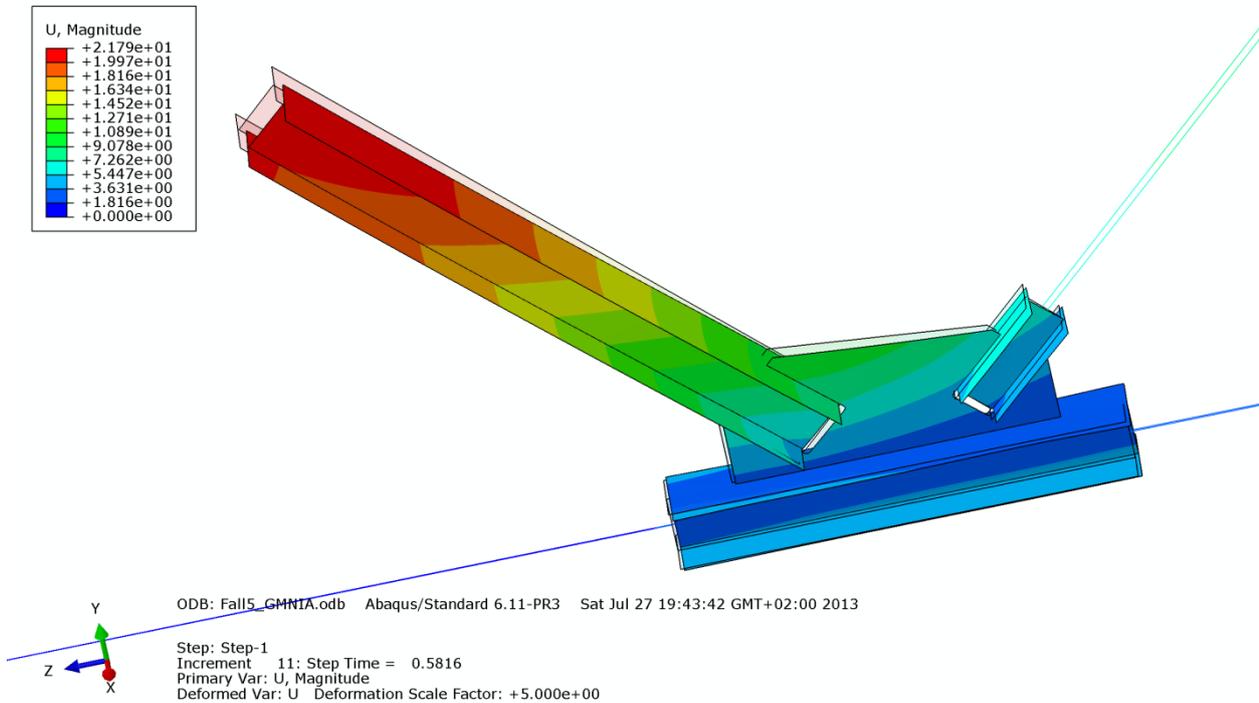


Abbildung B.195 – Verformung U [mm] der Gruppe 3 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.4.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.36 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 3			
Profil der Druckstrebe:	HEA 200	Systemlänge $L^* =$	4454mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	1,141
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	51,1cm ²	$L_{res} =$	4159mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech} =$	25mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	1,065
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand-rechnung: ohne Zugkraft
"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel-lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,5609 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1071,3 kN	LF = 0,0824 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 157,4 kN	LF = 0,5816 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1110,8 kN	LF = 0,071 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 88,4 kN
<i>Zugstr. u. UG elastisch</i>			
LF = 0,6539 1248,9 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 1812,3 kN N _{pl} - Zugstrebe = 1071,4 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1275,4 kN N _{ult} = 1248,9 kN N _{ref} = 1909,9 kN (N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			

Tabelle B.36 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 3

Abbildung B.196, zeigt, dass die maximale Traglast der Systemberechnung mit Zugkraft annähernd jener Tragfähigkeit, welche ohne Zugkraftkomponente, jedoch mit den Lagerungsbedingungen RBb (mit gesperrter Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa, siehe Abschnitt B - 2.2) ermittelt wurde, entspricht (bezogen auf die linear elastisch – ideal plastische Materialmodellierung des gesamten Systems). Die Tragfähigkeit ohne Zugkraft mit den Randbedingungen RBb beträgt 1111kN und ist nahezu identisch mit der Traglast mit Zugkraft und den Randbedingungen RBa von 1071kN. Aber auch die Traglast mit der Randbedingung RBb kommt nicht an das Niveau der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt (1249kN) heran. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass ein Ausweichen des Untergurtes nicht maßgebend für die Limitierung der Traglast wird.

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 157kN auf 1111kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.186) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 88kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 157kN.

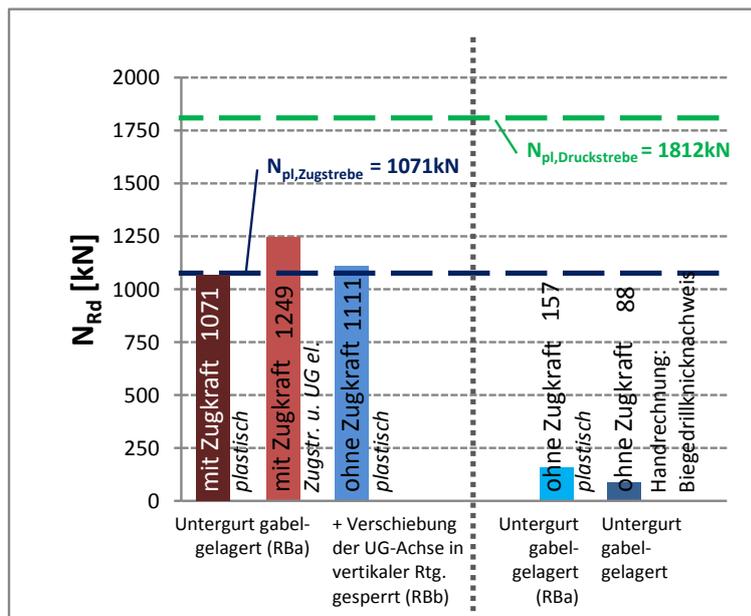


Abbildung B.196 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 3

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.5 Gruppe 4

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 4 zu charakterisieren sind in Tabelle B.37 zusammengefasst.

Gruppe 4			
Profil der Druckstrebe:	HEB 320	Systemlänge L^* =	4372mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,742
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	155,1cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	3872mm
$t_{Knotenblech}$ =	50mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,657
Profil der Zugstrebe:	HEA 240		
Profil des Untergurtes:	HEB 360	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.37 – FE-Eingangsdaten Gruppe 4

B - 6.5.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.6:

$N_{ult} = 5050,8 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

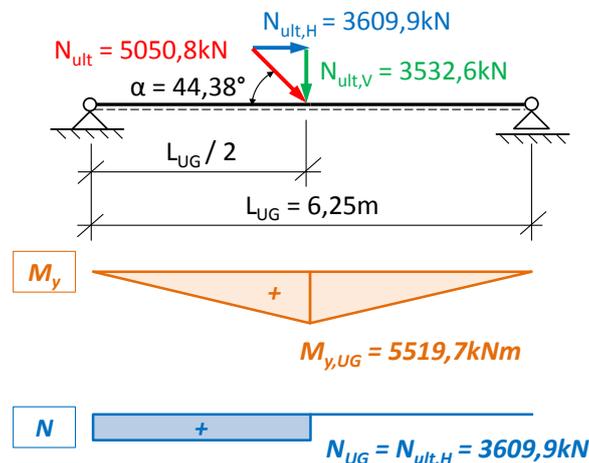


Abbildung B.197 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 4

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 46,98^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.197 zeigt:

$$N_{ult,V} = 3532,6 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 3609,9 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,25\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 5519,7 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEB 360, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEB 360:} & h = 36 \text{ cm} \\
 & b = 36 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,25 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,25 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 2588,2 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 919,8 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillnickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 1855,6 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\text{Flächenmoment 2. Grades:} \quad I_z = 10129,5 \text{ cm}^4$$

$$\text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad I_w = 2883252 \text{ cm}^6$$

$$\text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad I_t = 237,6 \text{ cm}^4$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Untergurtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,704$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

$$\text{Knicklinie } a: \quad \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,800$$

$$\chi_{LT} = 0,846 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 777,3 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 497,5 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,141$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,141 \cdot 5050,8 = 711,2 \text{ kN}$$

B - 6.5.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.5.1 in der Abbildung B.86 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 4 mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.198 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4372\text{mm}/750 = 5,8\text{mm}$. Abbildung B.198 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 4 ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

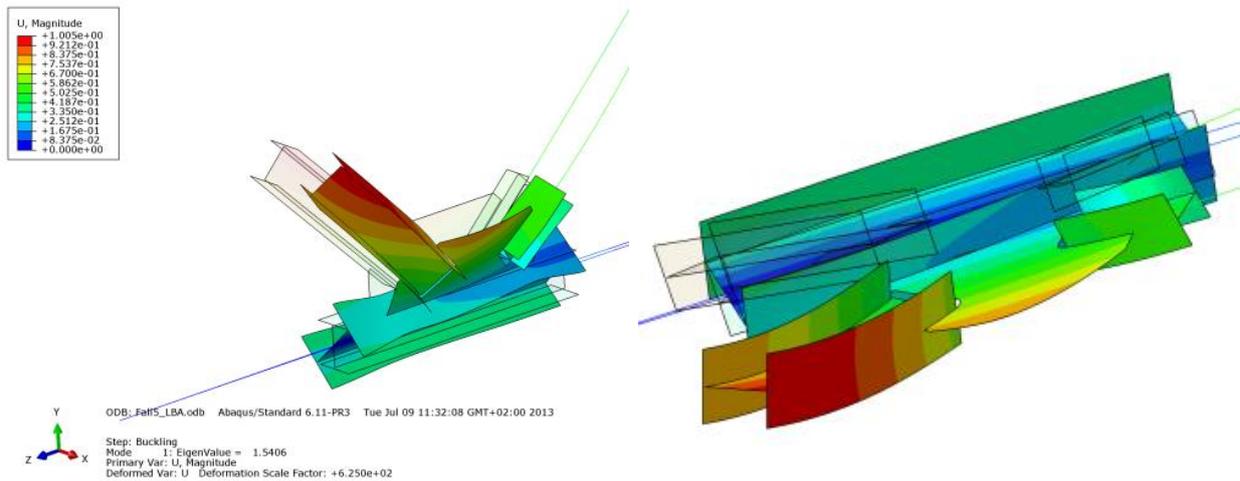


Abbildung B.198 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 4 – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.5.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.5.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich der beiden Diagonalen kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildung B.199 bis B.202 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

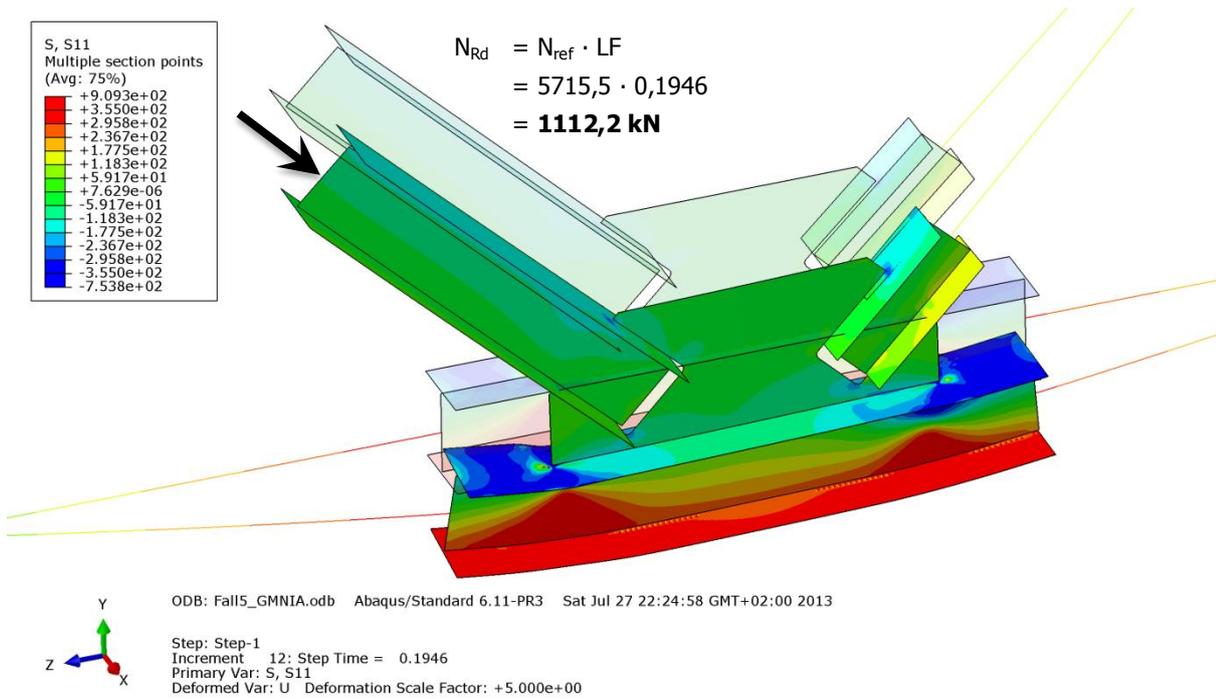


Abbildung B.199 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

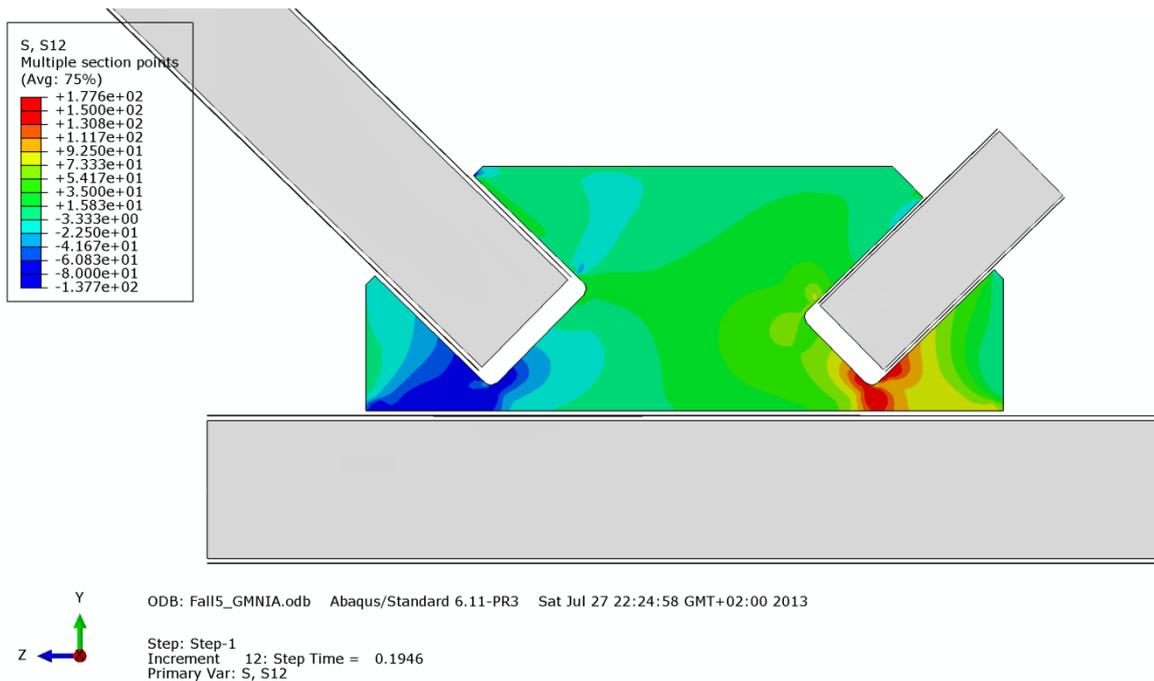


Abbildung B.200 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

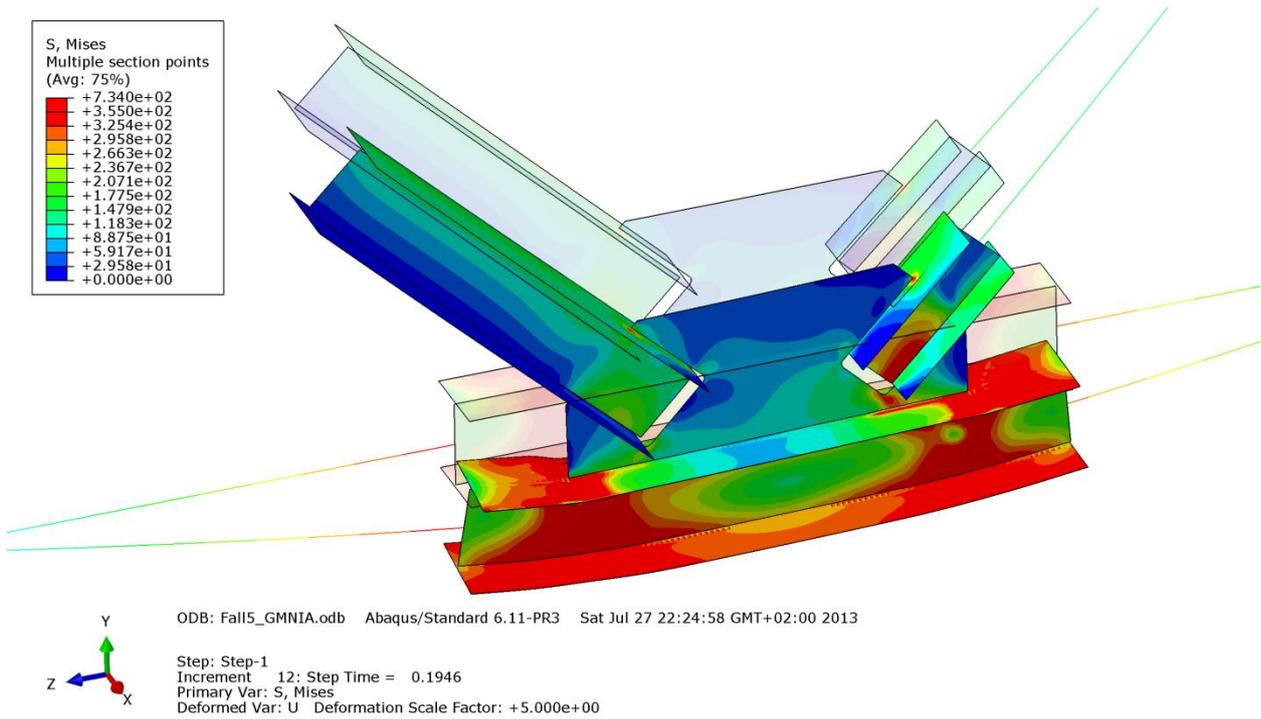


Abbildung B.201 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

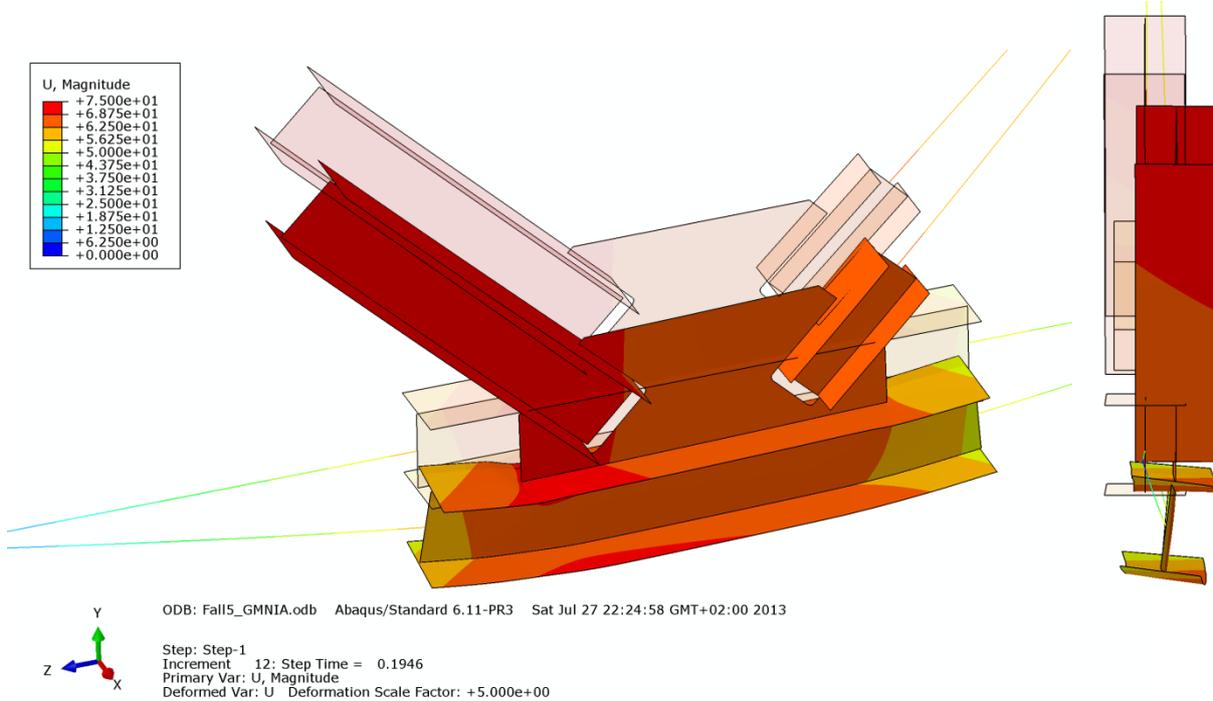


Abbildung B.202 – Verformung U [mm] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.5.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken bei gleichzeitiger Verdrehung des Querschnitts), wie die Abbildung B.203 bis B.206 zeigen. Des Weiteren plastiziert ein Teil des Untergurtes zufolge der Krafteinleitung über das Knotenblech und dieses selbst im Einbindebereich.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

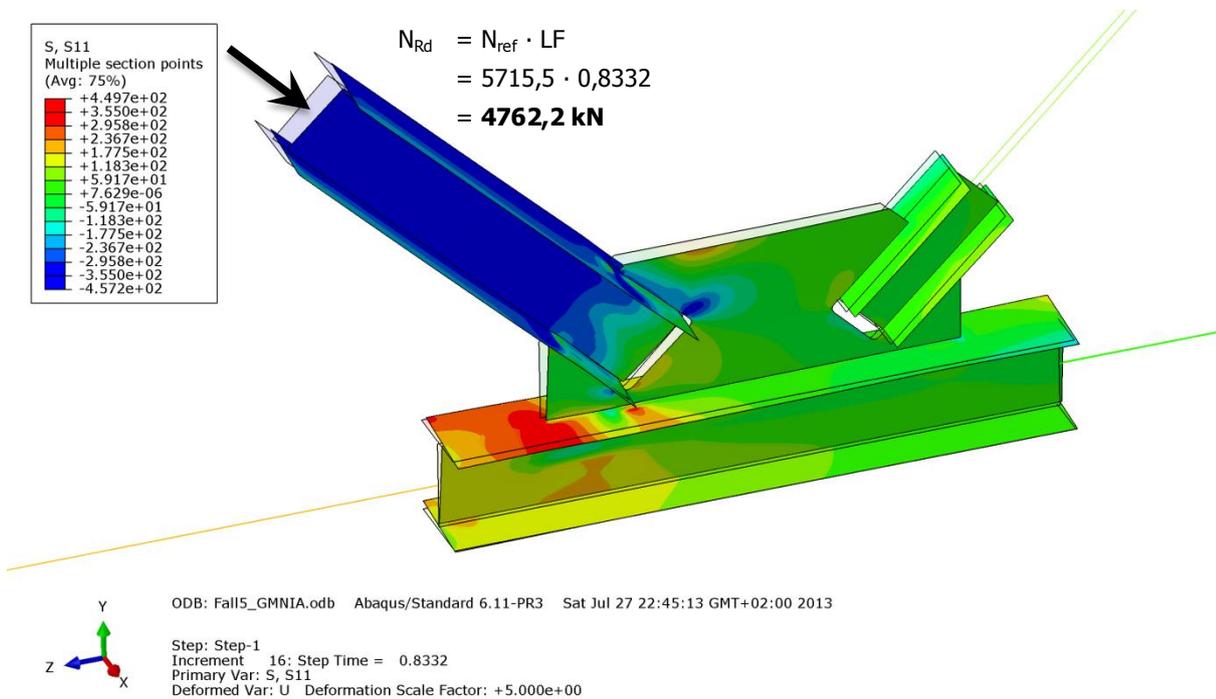


Abbildung B.203 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

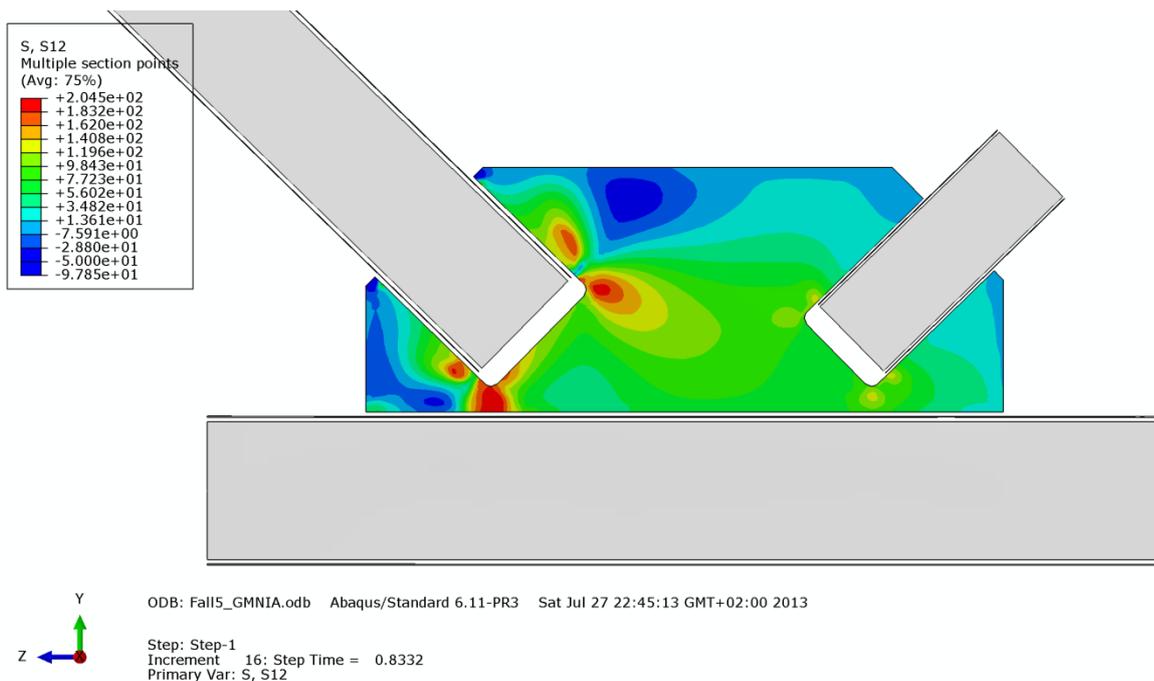


Abbildung B.204 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

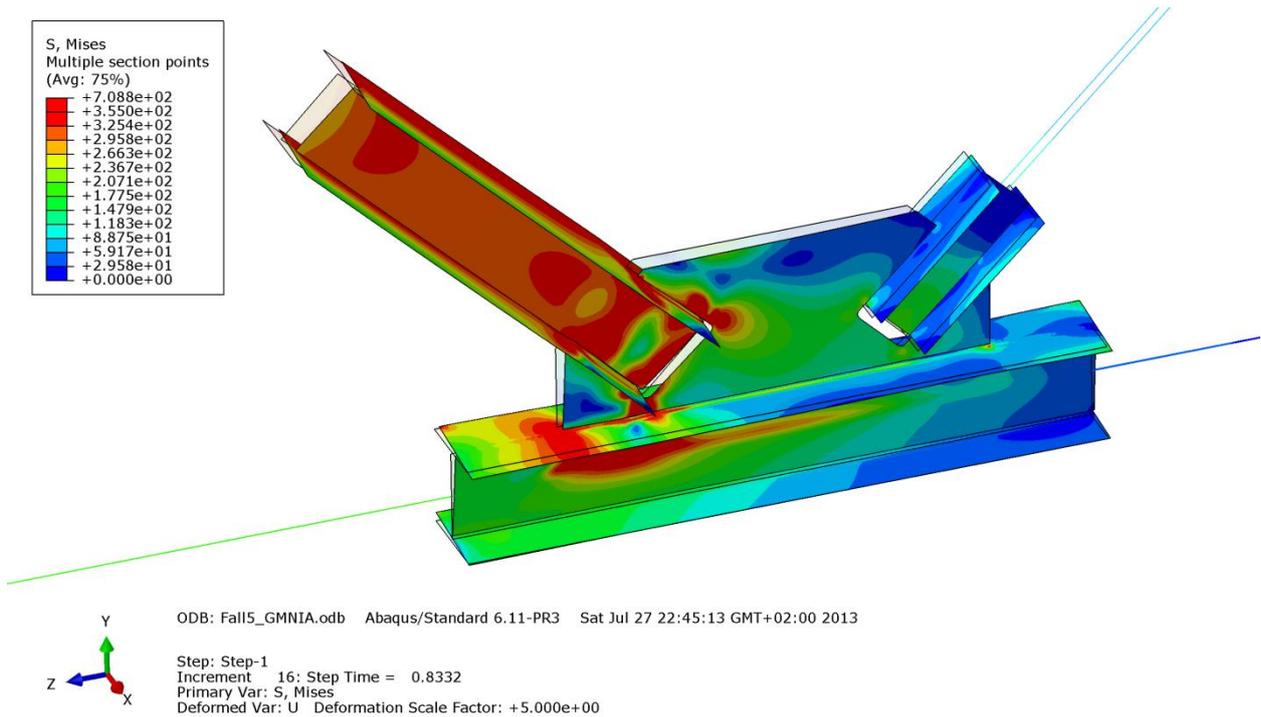


Abbildung B.205 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

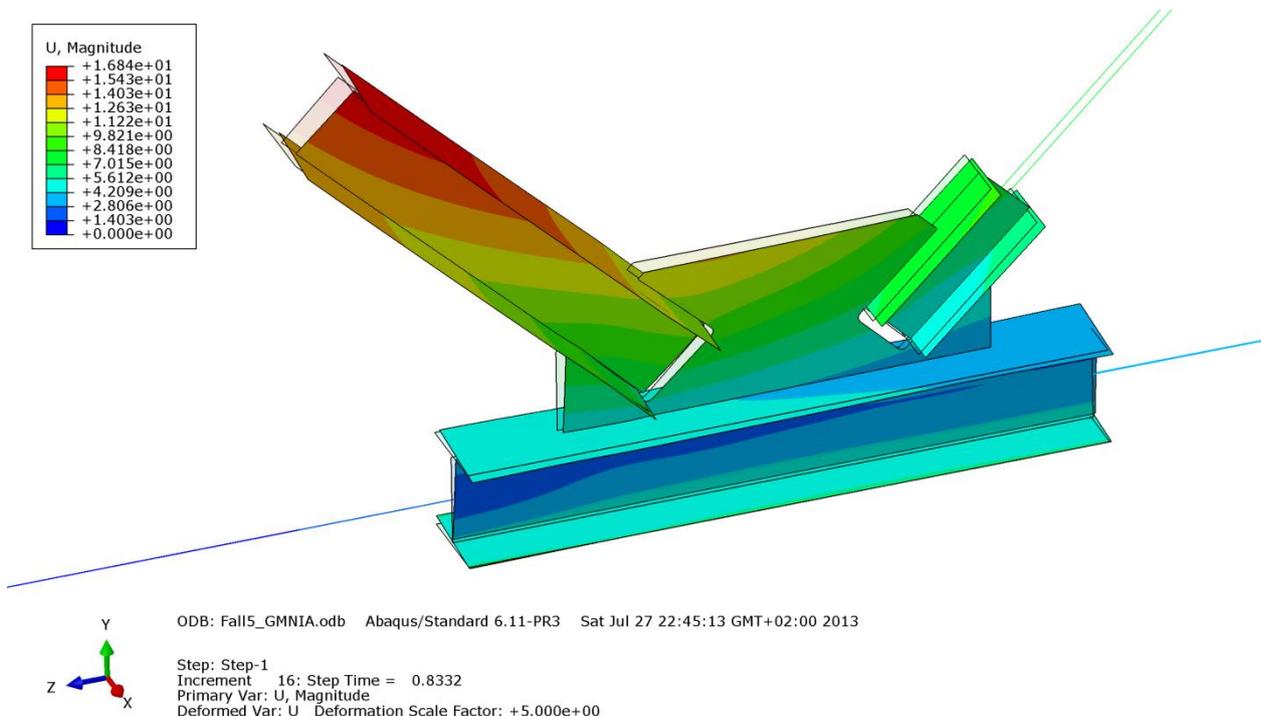


Abbildung B.206 – Verformung U [mm] der Gruppe 4 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt – RBb

B - 6.5.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.38 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 4			
Profil der Druckstrebe:	HEB 320	Systemlänge L* =	4372mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L}$ =	0,742
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	155,1cm ²	L _{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	3872mm
t _{knotenblech} =	50mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,657
Profil der Zugstrebe:	HEA 240		
Profil des Untergurtes:	HEB 360	Untergurtlänge L _{UG} =	6250mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand- rechnung: ohne Zugkraft
"Standard"- Lagerungs- bedingungen nach B - 2.2 RBa	"Standard"- Lagerungs- bedingungen nach B - 2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel- lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,4535 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2592,0 kN	LF = 0,1946 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1112,2 kN	LF = 0,8332 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 4762,2 kN	LF = 0,141 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 711,2 kN
Zugstr. u. UG elastisch			
LF = 0,8837 5050,8 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 5505,5 kN N _{pl} - Zugstrebe = 2593,3 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 4330,6 kN N _{ult} = 5050,8 kN N _{ref} = 5715,5 kN			
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>			

Tabelle B.38 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 4

Die Abbildung B.207 zeigt, dass die maximale Traglast der Systemberechnung mit Zugkraft bei der Gruppe 4 wesentlich geringer ist als jene Tragfähigkeit, welche ohne Zugkraftkomponente, jedoch mit den Lagerungsbedingungen RBb (mit gesperrter Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa, siehe Abschnitt B - 2.2) ermittelt wurde (bezogen auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert). Die Tragfähigkeit ohne Zugkraft mit den Randbedingungen RBb (4762kN) ist um rund 45% höher als die Traglast mit Zugkraft und den Randbedingungen RBa (2592kN). Die Traglast mit der Randbedingung RBb kommt nahezu an das Niveau der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt (5051kN) heran. Daraus kann auf einen nicht tragfähigkeitslimitierenden Untergurt geschlossen werden. Der große Unterschied zwischen den beiden Berechnungen mit und ohne Zugkraft (in Bezug auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert) ist dadurch zu erklären, dass der Untergurtstab durch die vertikale Stützung (Randbedingung RBb) nicht mehr plastiziert und somit die Traglast entscheidend steigt (von 2592kN auf 4762kN).

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 1112kN auf 4762kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.197) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 711kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 1112kN.

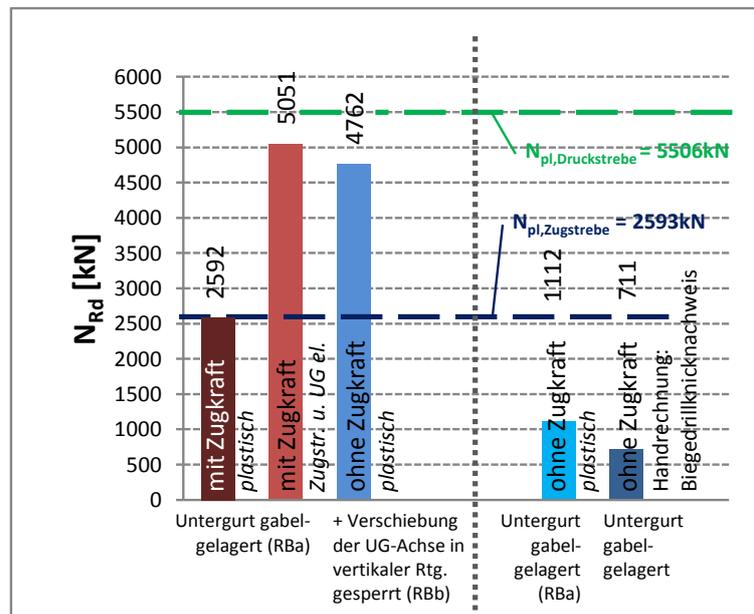


Abbildung B.207 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 4

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.6 Gruppe 5

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 5 zu charakterisieren sind in Tabelle B.39 zusammengefasst.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge L^* =	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	L_{ges} =	4085mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{knotenblech}$ =	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.39 – FE-Eingangsdaten Gruppe 5

B - 6.6.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.7:

$N_{ult} = 2899,4 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

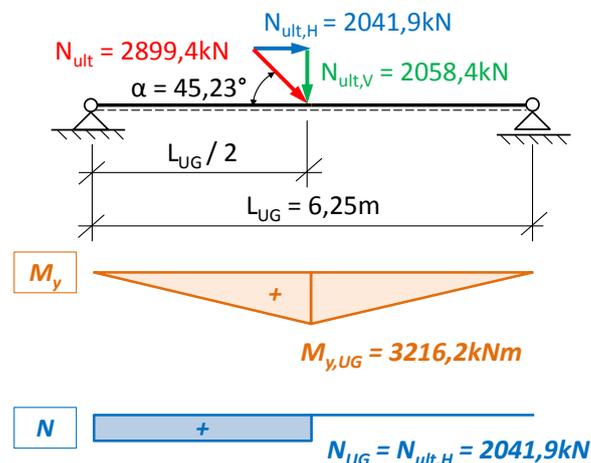


Abbildung B.208 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 5

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 45,23^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.208 zeigt:

$$N_{ult,V} = 2058,4 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 2041,9 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,25\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 3216,2 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEB 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 200:} \quad & h = 20 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,5 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,9 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 620,0 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 3216,2 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillnickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 304,6 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\text{Flächenmoment 2. Grades:} \quad I_z = 2001,0 \text{ cm}^4$$

$$\text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad I_w = 171125 \text{ cm}^6$$

$$\text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad I_t = 47,0 \text{ cm}^4$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Unterqrtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,850$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

$$\text{Knicklinie } a: \quad \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,930$$

$$\chi_{LT} = 0,766 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 168,6 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 107,9 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,052$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,052 \cdot 2899,4 = 151,9 \text{ kN}$$

B - 6.6.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.6.1 in der Abbildung B.103 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 5 mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.209 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.209 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

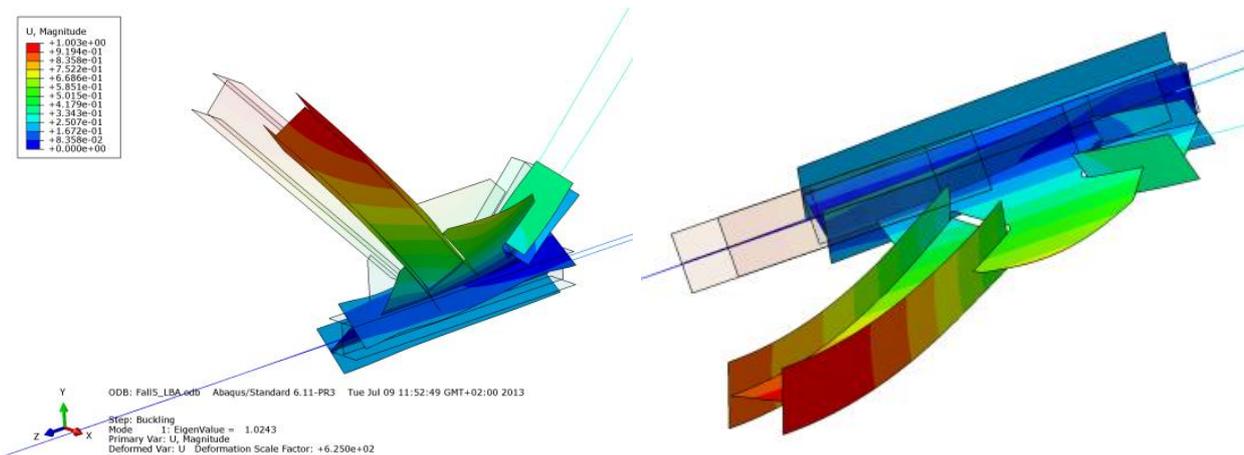


Abbildung B.209 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.6.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.6.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich des Knotenbleches kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.210 bis B.213 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

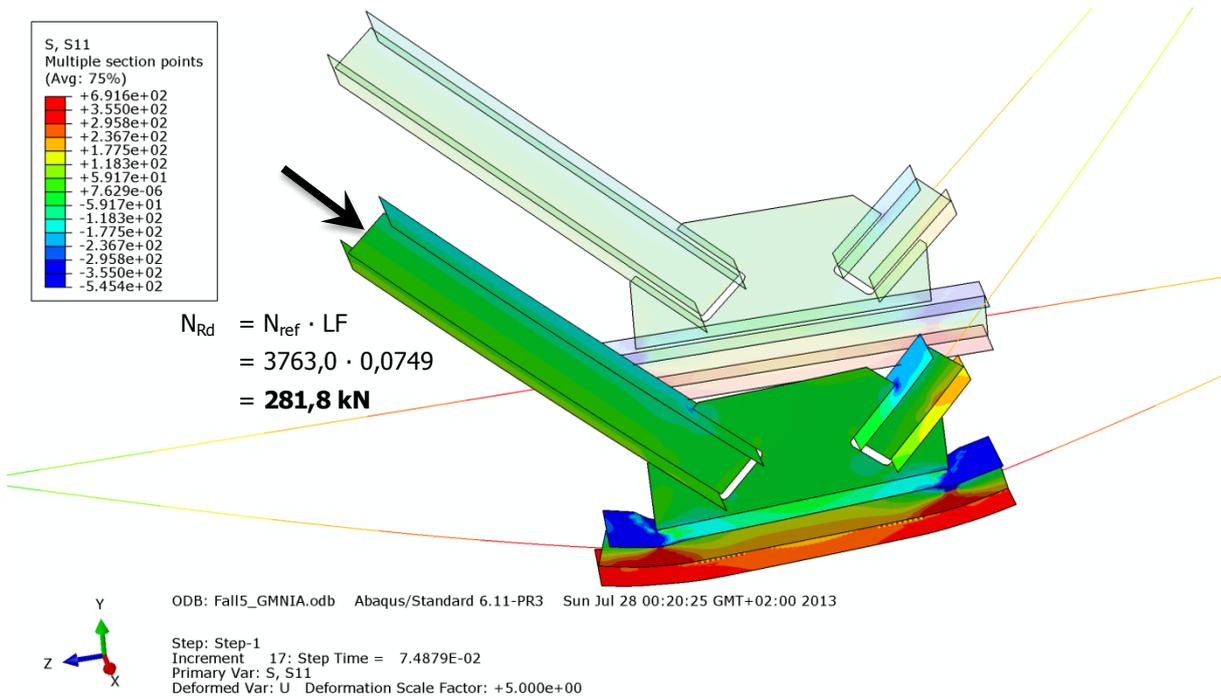


Abbildung B.210 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

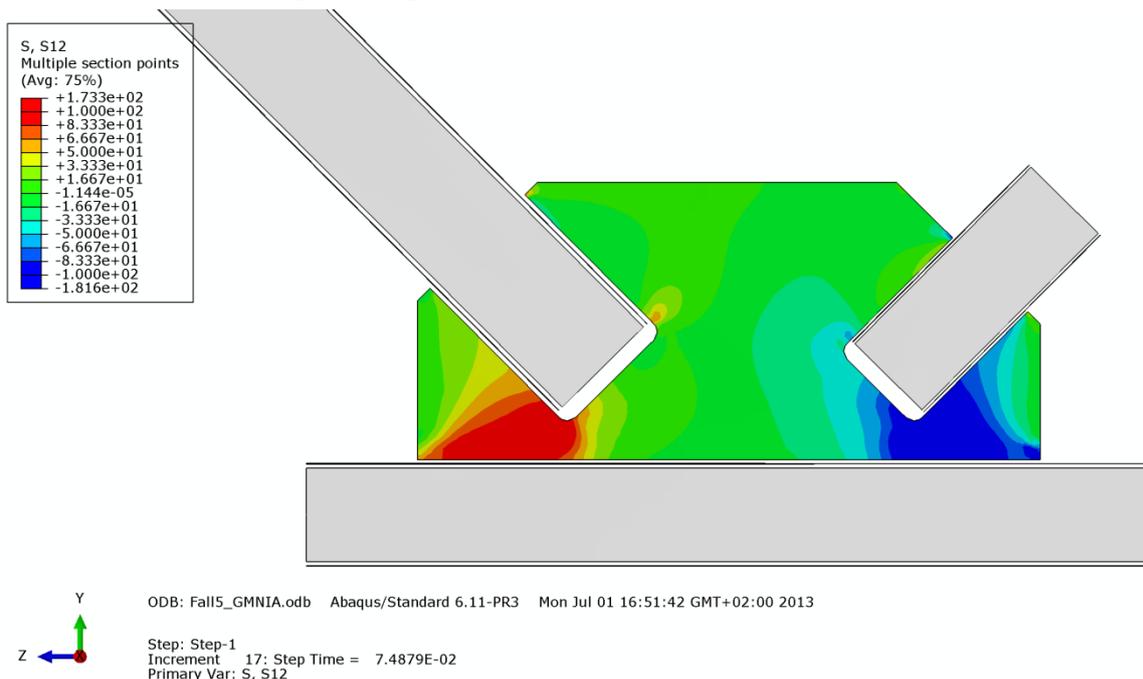


Abbildung B.211 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

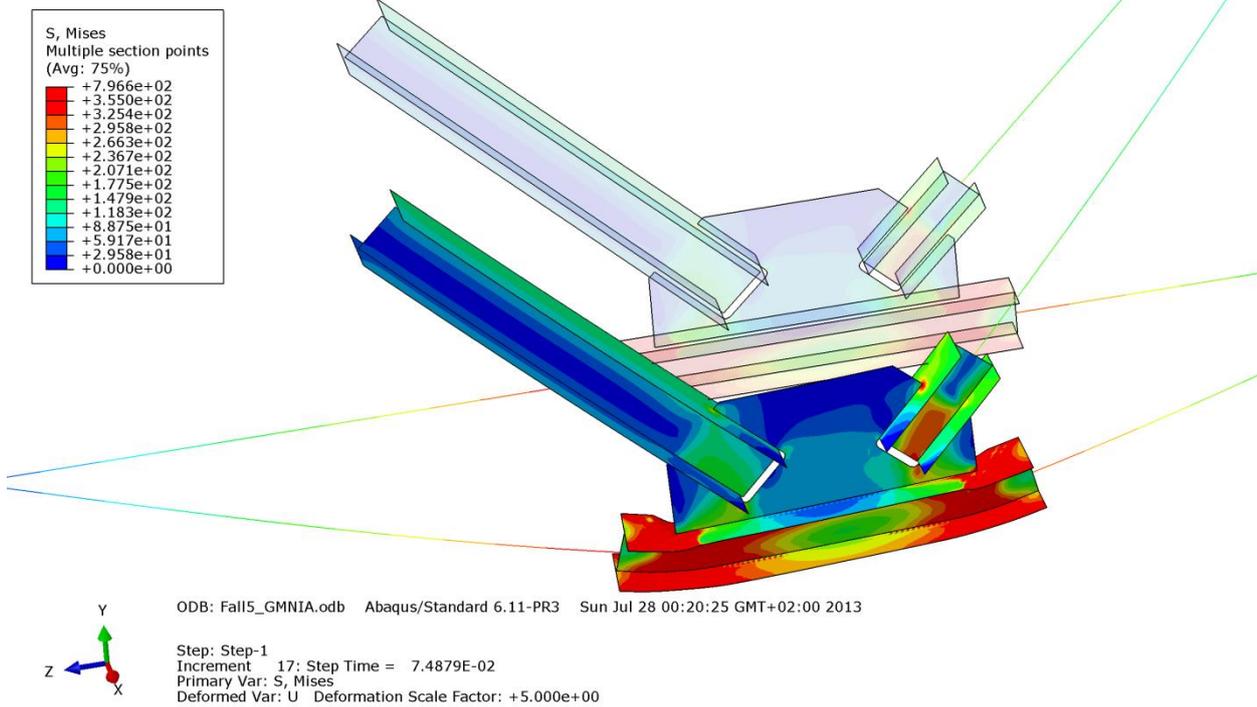


Abbildung B.212 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

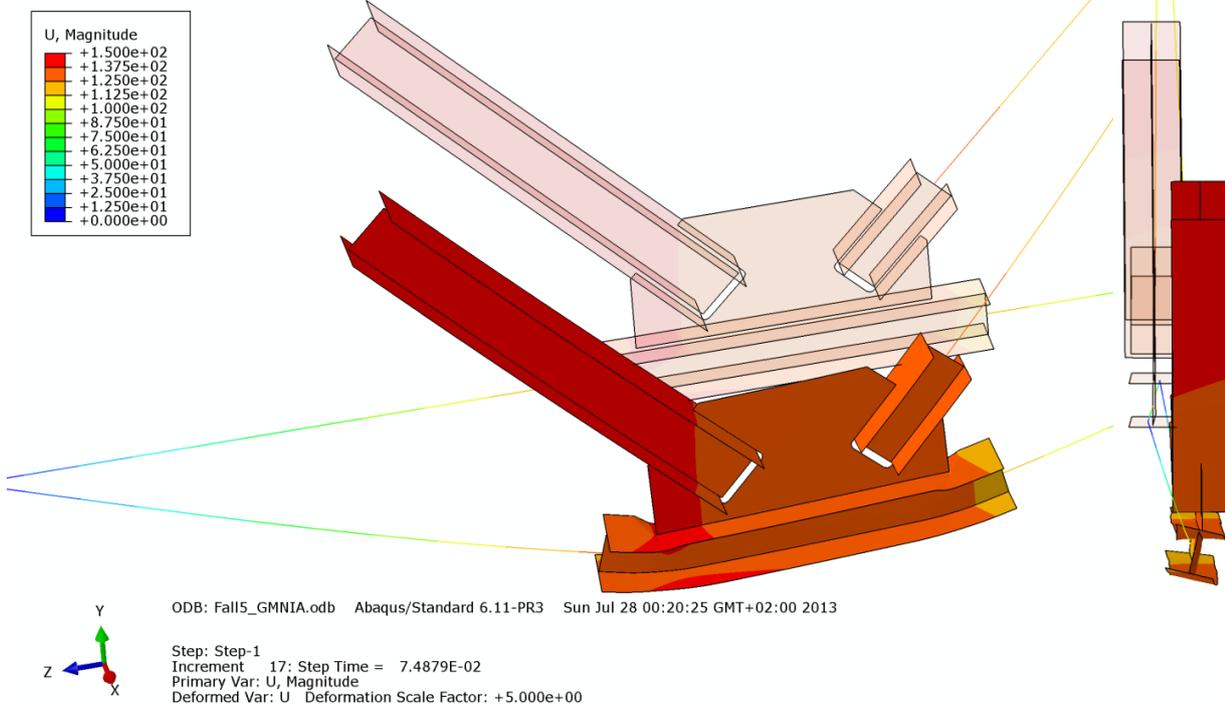


Abbildung B.213 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.6.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken), wie die Abbildungen B.214 bis B.217 zeigen. Des Weiteren plastiziert ein Teil des Untergurtes zufolge der Krafteinleitung über das Knotenblech und dieses selbst sehr lokal im Einbindebereich.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

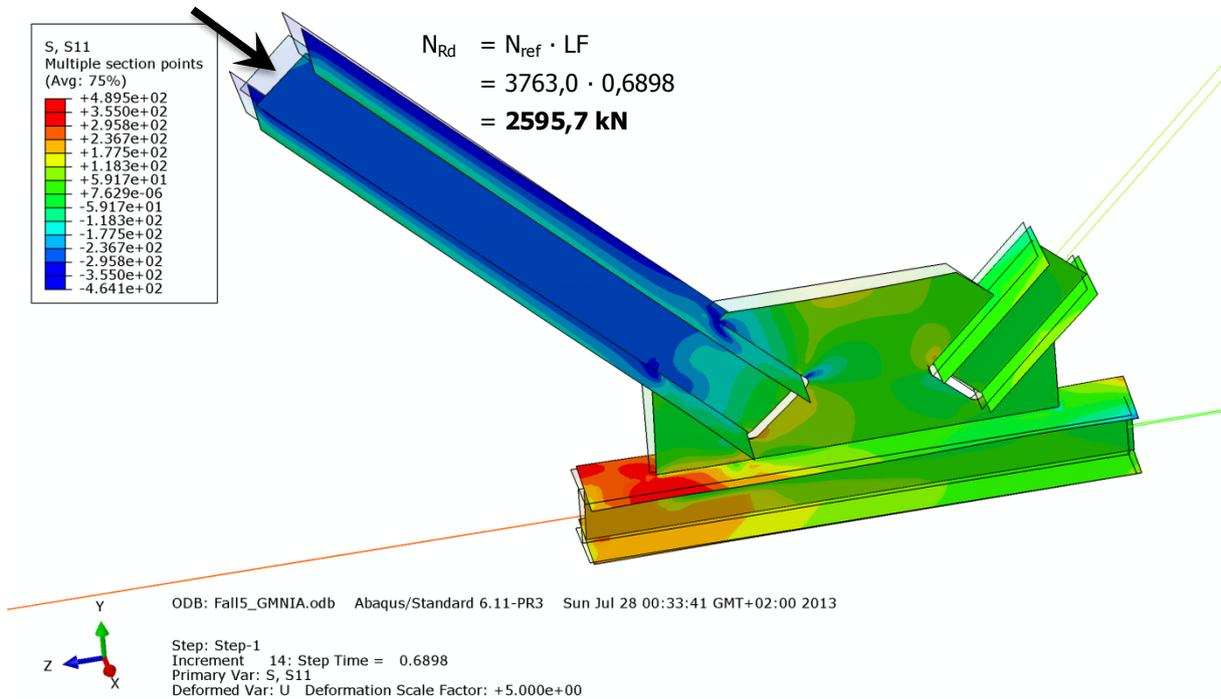


Abbildung B.214 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

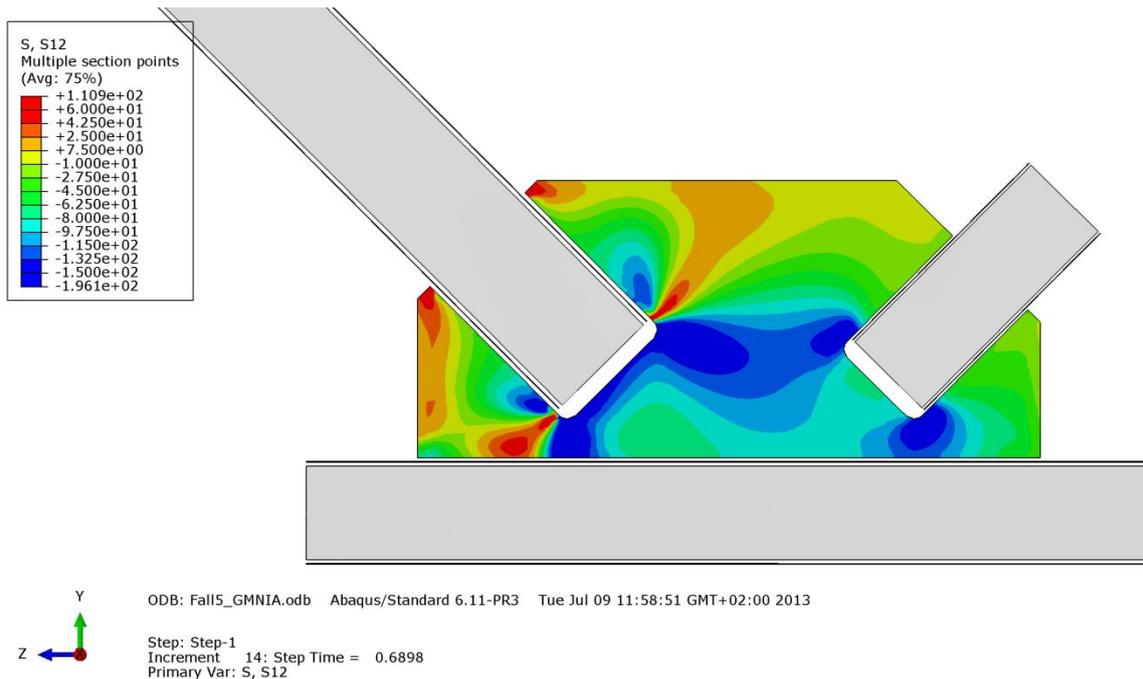


Abbildung B.215 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

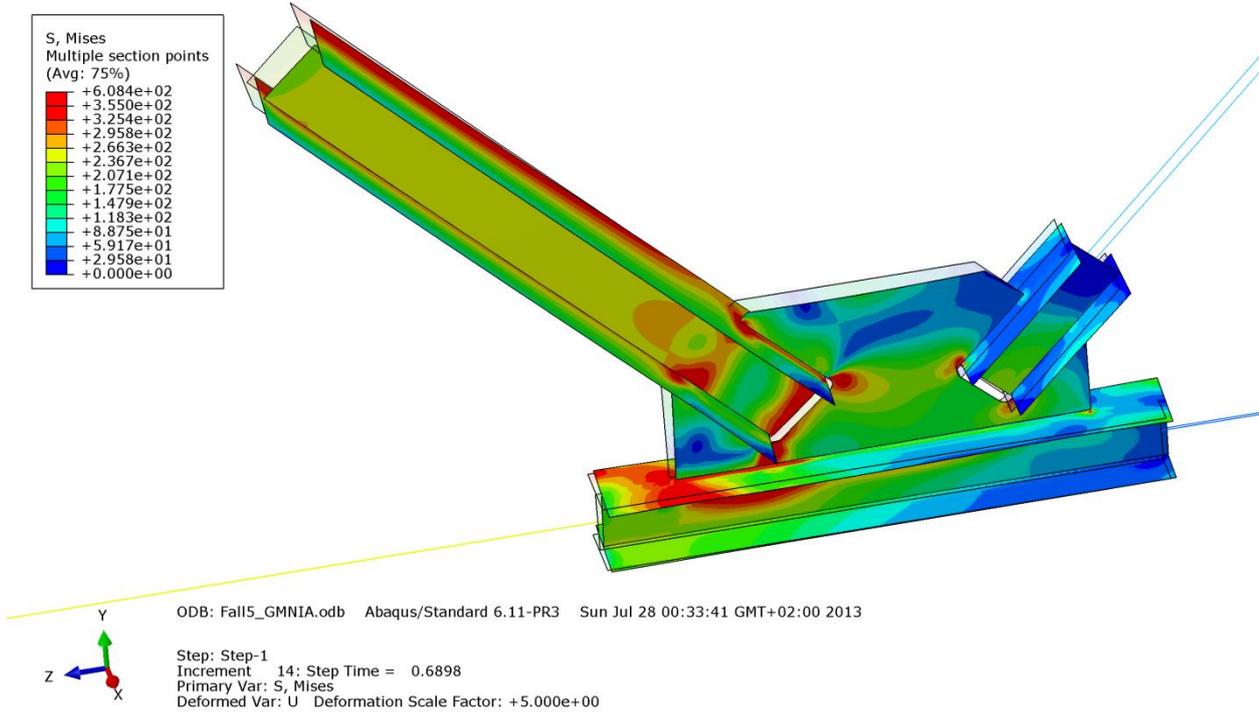


Abbildung B.216 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

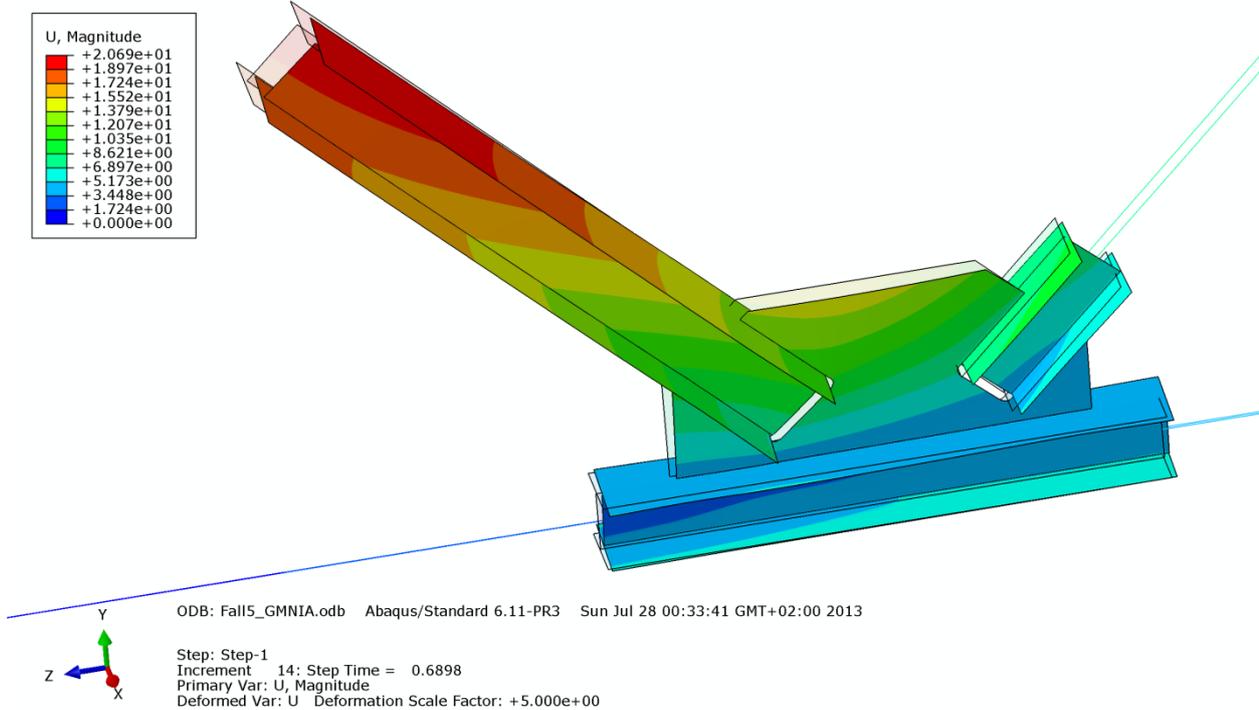


Abbildung B.217 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.6.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.40 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge $L^* =$	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2m ²	$L_{ges} =$	4085mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech} =$	30mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand-rechnung:
"Standard"- Lagerungs- bedingungen nach B - 2.2 RBa	"Standard"- Lagerungs- bedingungen nach B - 2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	ohne Zugkraft
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Gabel- lagerung des Einzelstabes
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,0749 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 281,8 kN	LF = 0,6898 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2595,7 kN	LF = 0,052 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 151,9 kN
<i>Zugstr. u. UG elastisch</i>			
LF = 0,7705 2899,4 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 3628,1 kN N _{pl} - Zugstrebe = 1812,3 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 1897,8 kN N _{ult} = 2899,4 kN N _{ref} = 3763,0 kN (N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			

Tabelle B.40 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 5

Abbildung B.218 zeigt, dass die maximale Traglast der Systemberechnung mit Zugkraft bei der Gruppe 5 wesentlich geringer ist als jene Tragfähigkeit, welche ohne Zugkraftkomponente, jedoch mit den Lagerungsbedingungen RBb (mit gesperrter Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa, siehe Abschnitt B - 2.2) ermittelt wurde (bezogen auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert). Die Tragfähigkeit ohne Zugkraft mit den Randbedingungen RBb (2596kN) ist um rund 30% höher als die Traglast mit Zugkraft und den Randbedingungen RBa (1807kN). Die Traglast mit der Randbedingung RBb kommt bis zu etwa 90% an das Niveau der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt (2899kN) heran. Der große Unterschied zwischen den beiden Berechnungen mit und ohne Zugkraft (in Bezug auf gesamtes Systemmaterialverhalten linear elastisch – ideal plastisch modelliert) ist dadurch zu erklären, dass der Untergurtstab durch die vertikale Stützung (Randbedingung RBb) nicht mehr plastiziert und somit die Traglast entscheidend steigt (von 1807kN auf 2596kN).

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 282kN auf 2596kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.208) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 152kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 282kN.

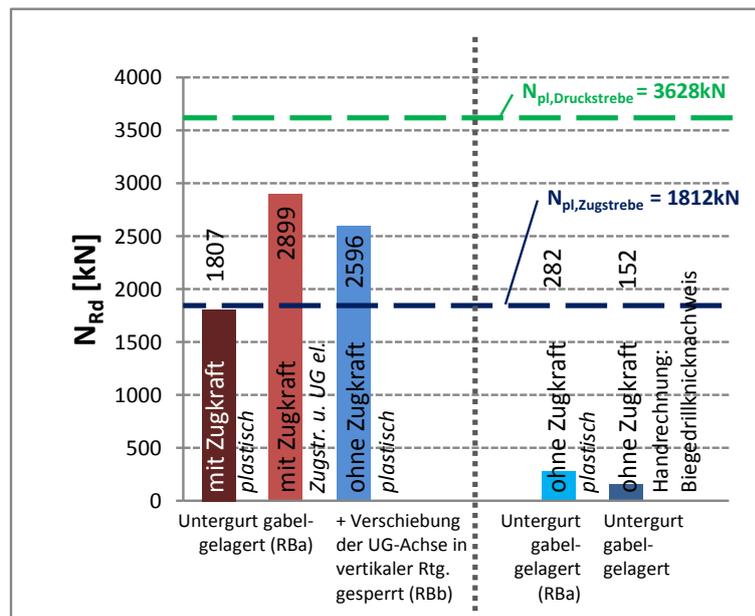


Abbildung B.218 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 5

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.7 Gruppe 6a

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6a zu charakterisieren sind in Tabelle B.41 zusammengefasst.

Gruppe 6a			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	4618mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,073
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4208mm
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,0
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	6530mm

Tabelle B.41 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6a

B - 6.7.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.8, wie die Abbildung B.219 zeigt:

$N_{ult} = 1776,6 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

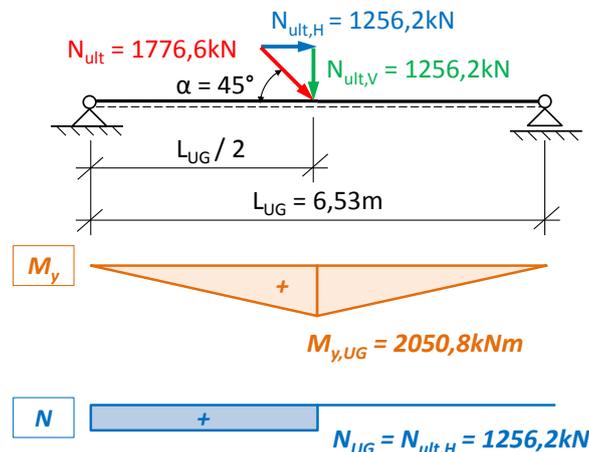


Abbildung B.219 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 6a

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 45^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden:

$$N_{ult,V} = 1256,2 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 1256,2 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 6,53\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 2050,8 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEA 300, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{array}{ll}
 \text{HEA 300:} & h = 30 \text{ cm} \\
 & b = 29 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{array}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 1305,1 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 775,4 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 764,1 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\text{Flächenmoment 2. Grades:} \quad I_z = 6301,3 \text{ cm}^4$$

$$\text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad I_w = 1199772 \text{ cm}^6$$

$$\text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad I_t = 58,6 \text{ cm}^4$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Untergurtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,773$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

$$\text{Knicklinie a:} \quad \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,859$$

$$\chi_{LT} = 0,811 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 375,6 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 230,1 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,183$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,183 \cdot 1776,6 = 325,5 \text{ kN}$$

B - 6.7.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.7.1 in der Abbildung B.120 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 6a mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.220 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4618\text{mm}/750 = 6,2\text{mm}$. Abbildung B.220 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6a ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

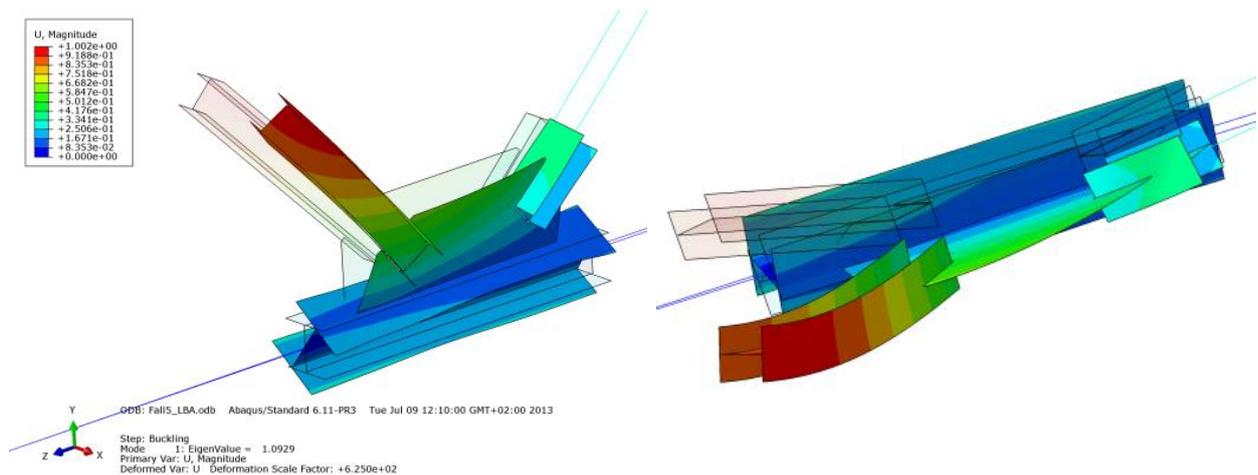


Abbildung B.220 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6a – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.7.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.7.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich des Knotenbleches kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das seitliche Ausweichen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.221 bis B.224 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

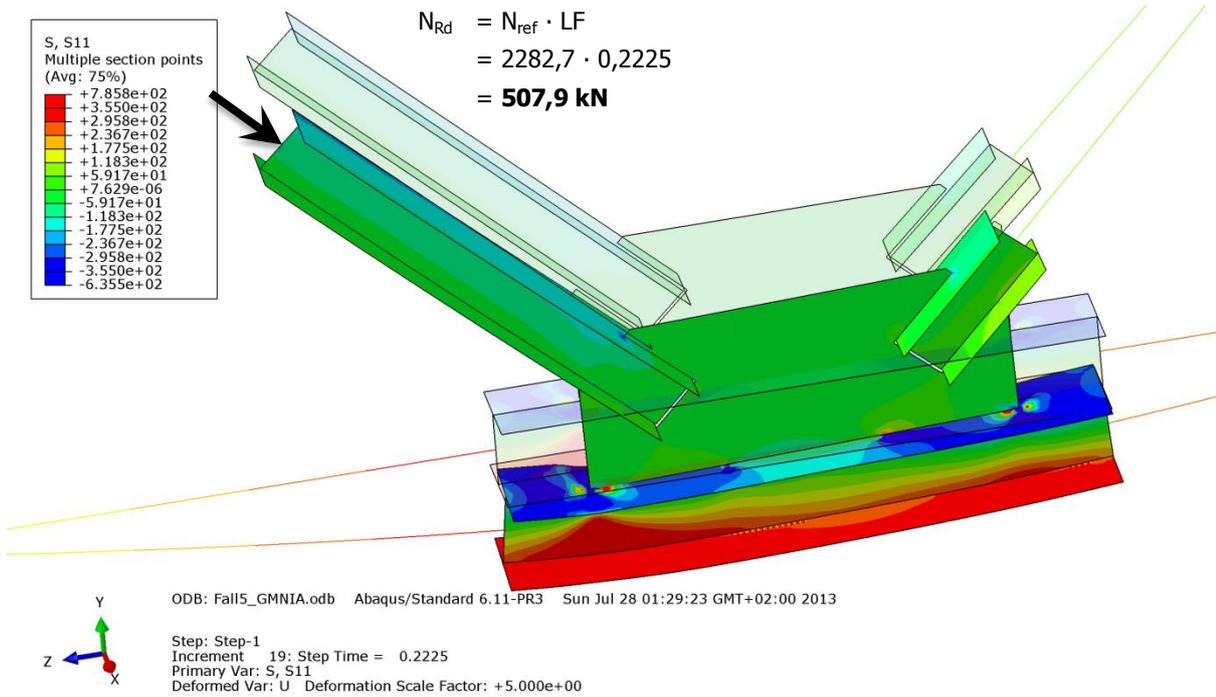


Abbildung B.221 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

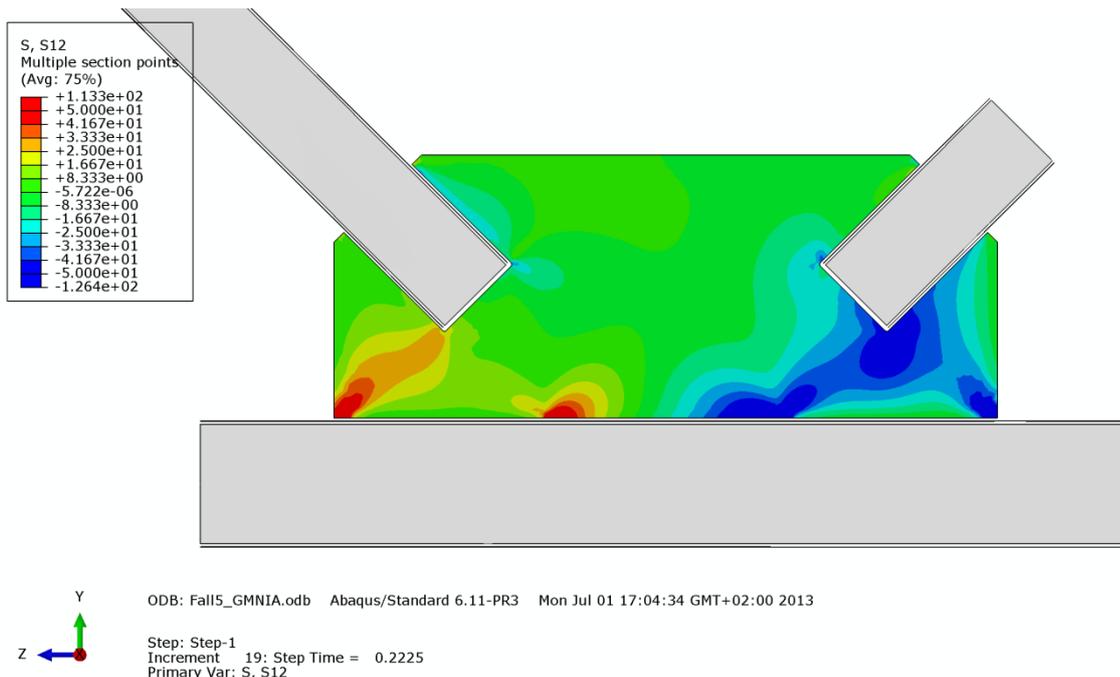


Abbildung B.222 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech d. Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

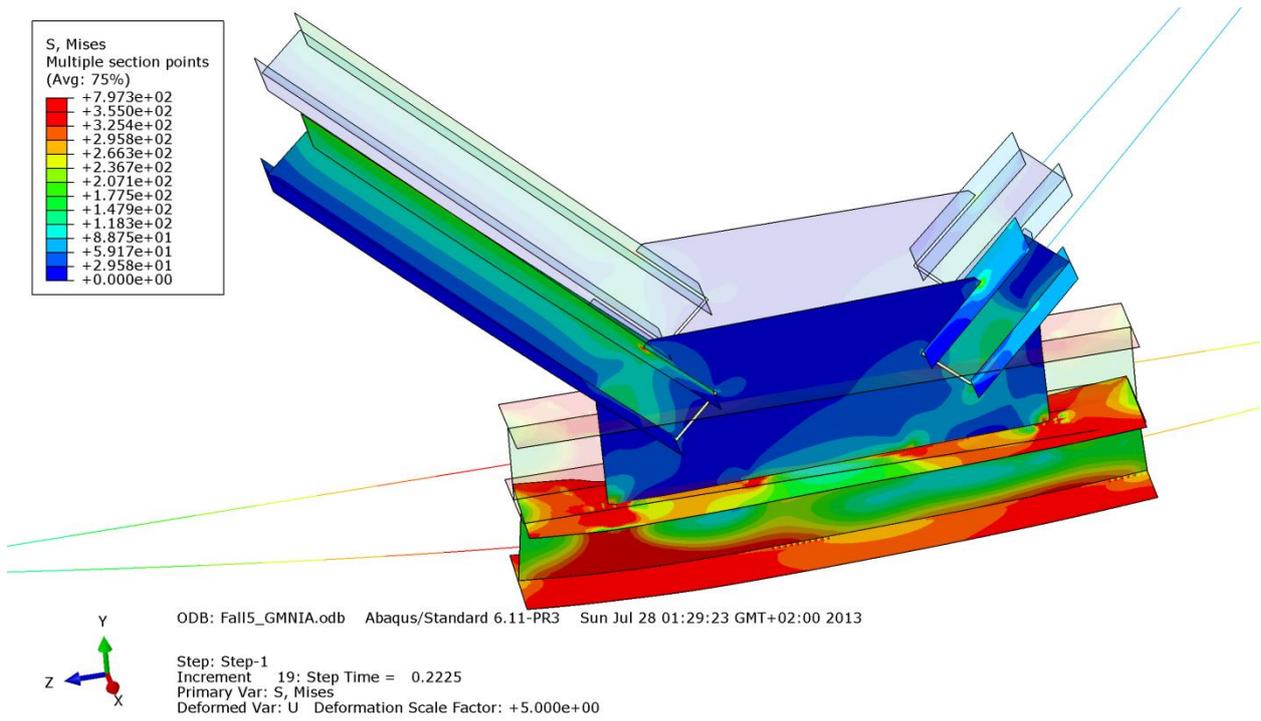


Abbildung B.223 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

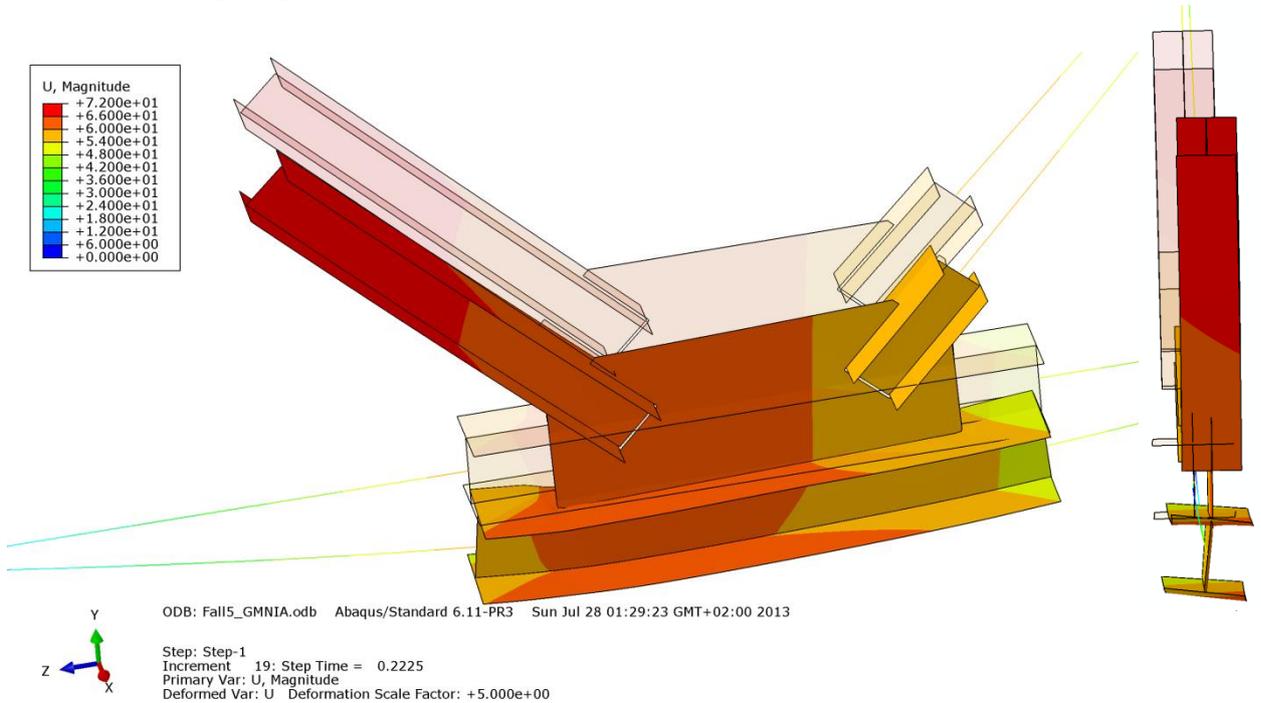


Abbildung B.224 – Verformung U [mm] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.7.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken), wie die Abbildungen B.225 bis B.228 zeigen. Des Weiteren plastizieren kleine Bereiche des Untergurtes an der Nahtstelle zum Knotenblech zufolge der Krafteinleitung.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

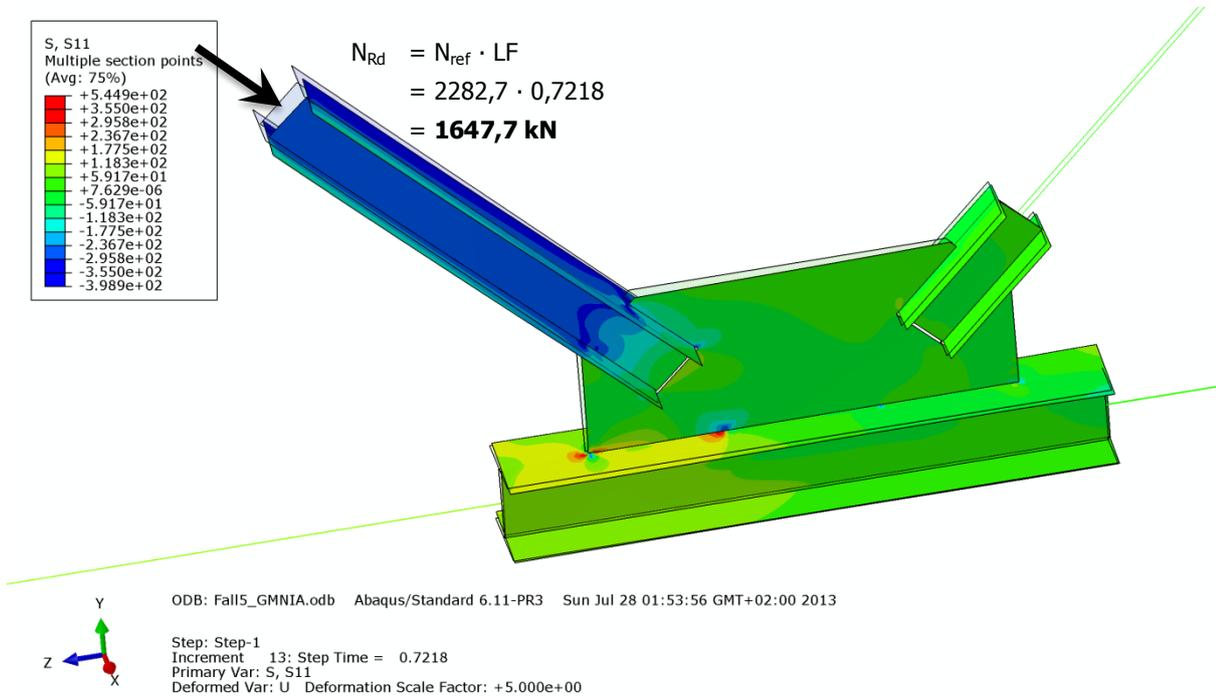


Abbildung B.225 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

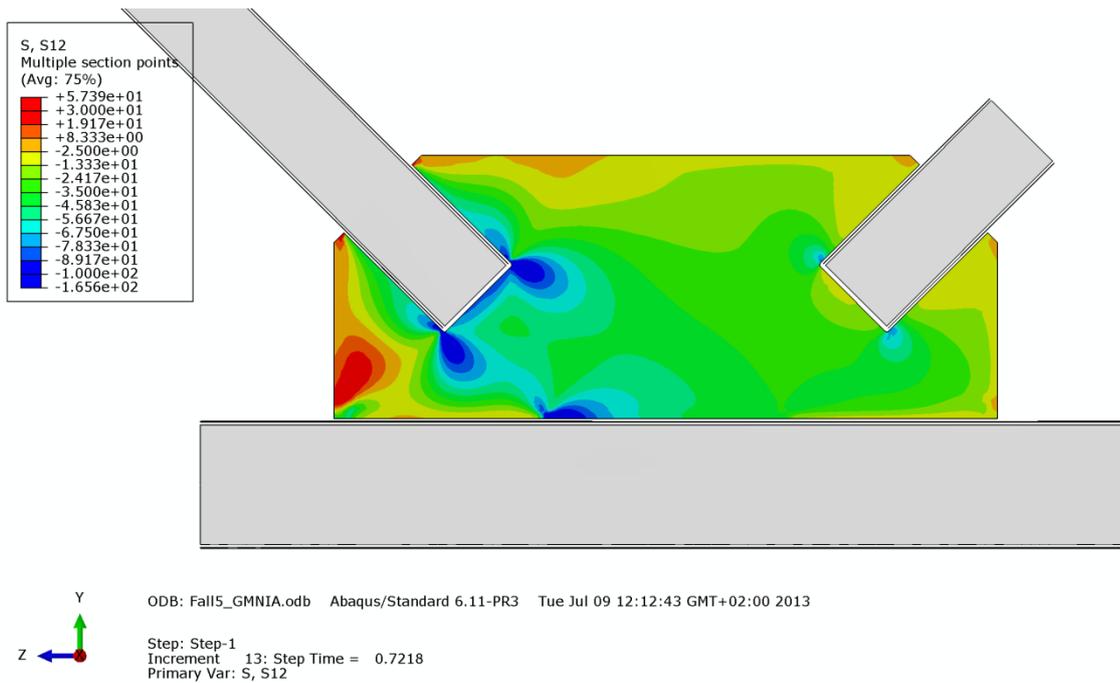


Abbildung B.226 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

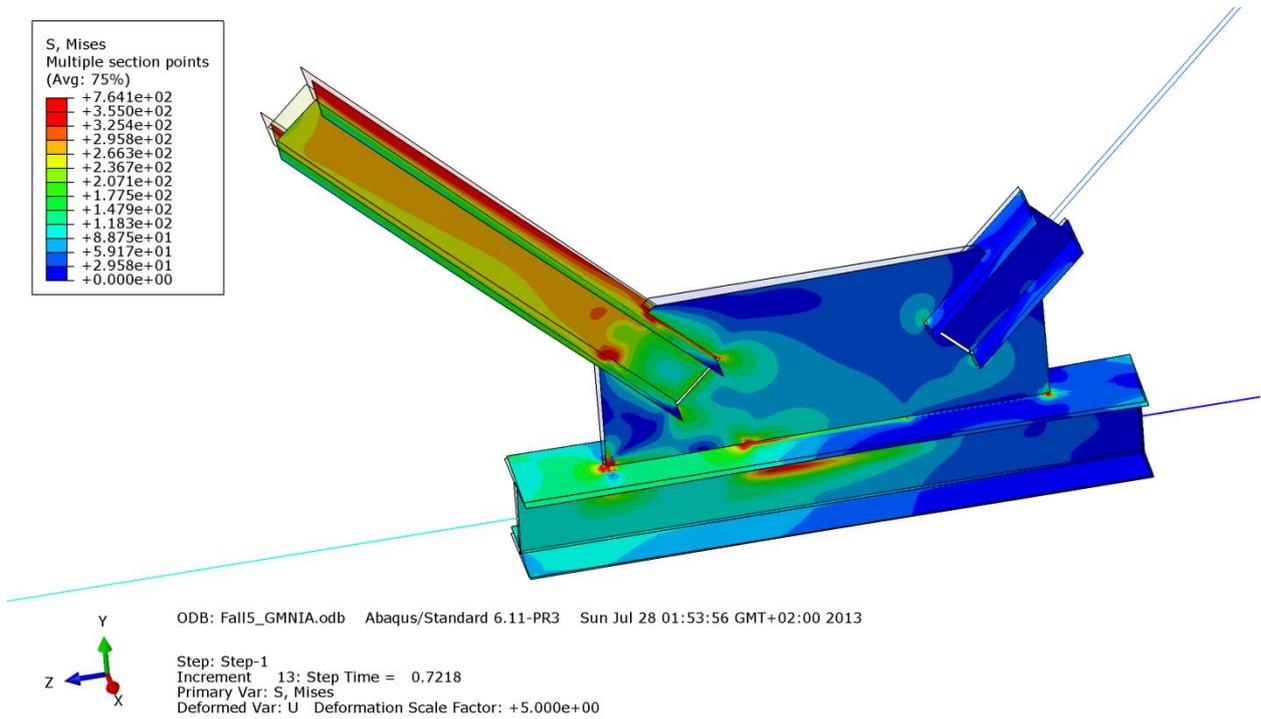


Abbildung B.227 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

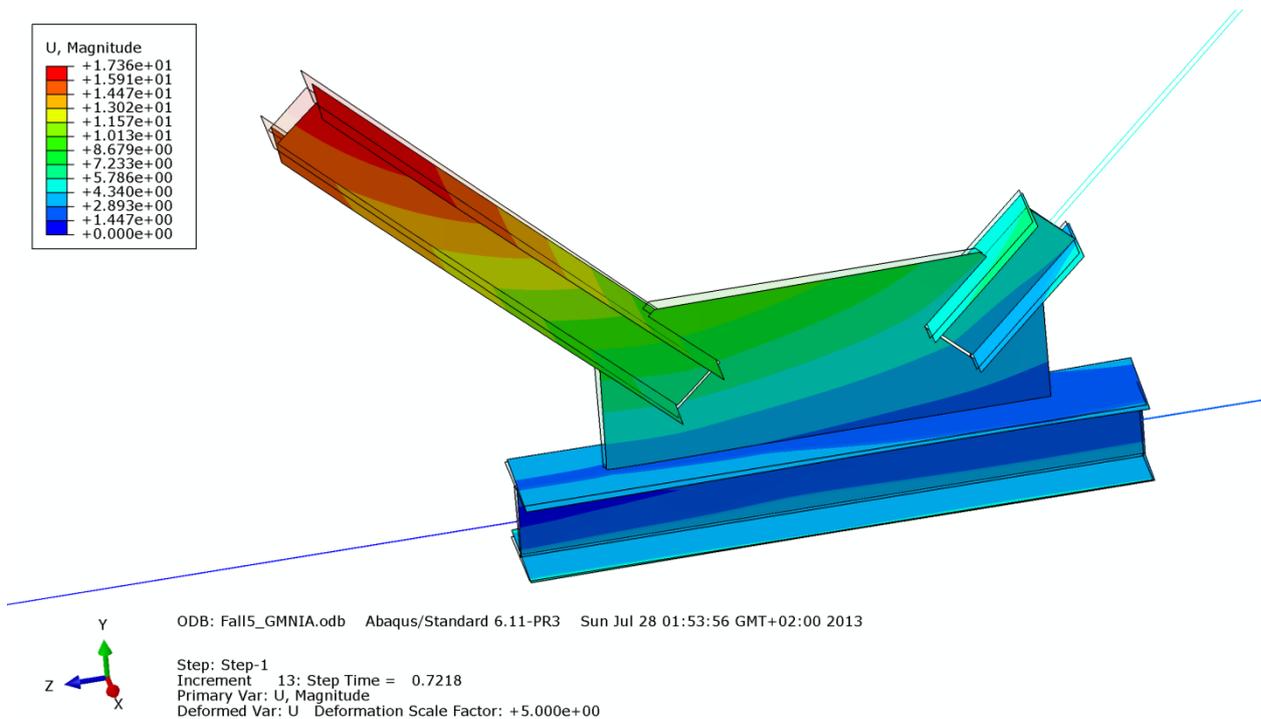


Abbildung B.228 – Verformung U [mm] der Gruppe 6a – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.7.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.42 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 6a			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L* =	4618mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L}$ =	1,073
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L _{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4208mm
t _{knotenblech} =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,0
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtstabes:	HEA 300	Untergurtlänge L _{UG} =	6530mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Handrechnung: ohne Zugkraft
"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B - 2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel-lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,7766 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1772,7 kN	LF = 0,2225 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 507,9 kN	LF = 0,7218 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1647,7 kN	LF = 0,183 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 325,5 kN
Zugstr. u. UG elastisch			
LF = 0,7783 1776,6 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 2185,4 kN N _{pl} - Zugstrebe = 2185,4 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 2667,6 kN N _{ult} = 1776,6 kN N _{ref} = 2282,7 kN <small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>			

Tabelle B.42 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 6a

Abbildung B.229 zeigt, dass die Traglast mit Zugkraft und Lagerungsbedingung RBa für beide Materialmodellierungsvarianten (gesamt linear elastisch – ideal plastisch bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch) in etwa gleich groß ist (1773kN bzw. 1777kN) und um rund 7% höher als jene Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente (1648kN), dafür mit zusätzlicher Stützung der Untergurtachse (Lagerungsbedingung RBb) liegt. Dies ist durch die fehlende, für den Untergurt stabilisierend wirkende Horizontalkomponente der Zugkraft erklärbar.

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 508kN auf 1648kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.219) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 326kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 508kN.

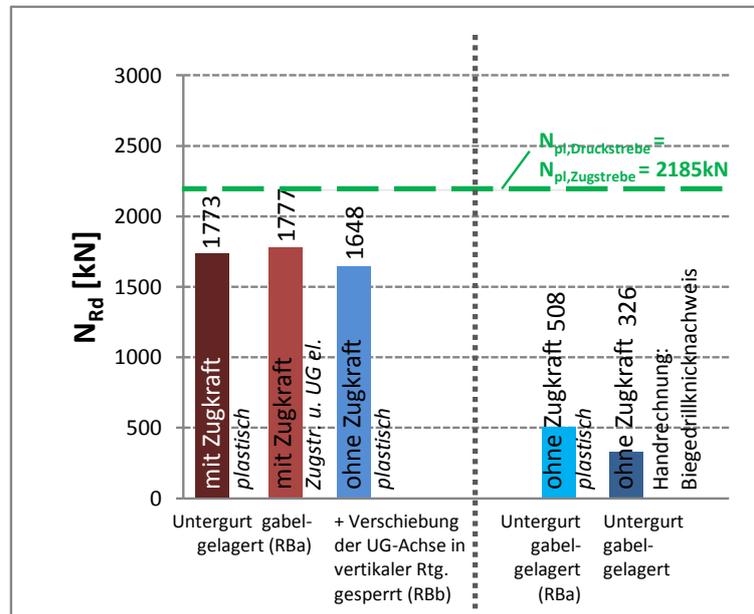


Abbildung B.229 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 6a

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 6.8 Gruppe 6b

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6b zu charakterisieren sind in Tabelle B.39 zusammengefasst.

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{res} =	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	4750mm

Tabelle B.43 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6b

B - 6.8.1 Tragfähigkeit des Untergurtstabes zufolge Biegedrillknicken

Ermittlung der Kräfte:

Die bemessungsbestimmende Strebennormalkraft ergibt sich aus dem Minimum der drei mit FE berechneten Traglastzuständen Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung.

Es folgt aus Abschnitt B - 5.9:

$N_{ult} = 2028,9 \text{ kN}$ (Ergebnis der Berechnung mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt, maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)

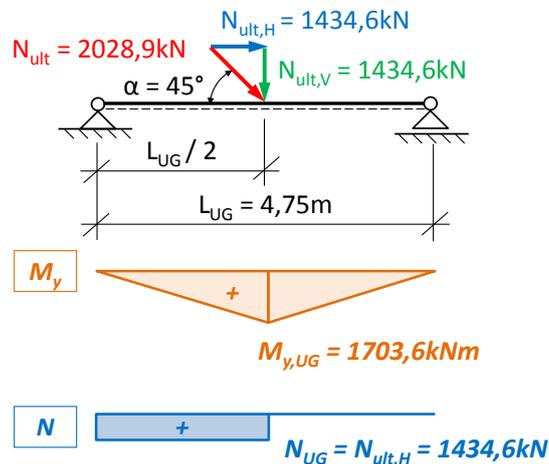


Abbildung B.230 – System des Biegedrillknicknachweises für die Gruppe 6b

Über den Diagonalenwinkel $\alpha = 45^\circ$ zur Horizontalen können vertikale und horizontale Kraftkomponente berechnet werden, wie die Abbildung B.230 zeigt:

$$N_{ult,V} = 1434,6 \text{ kN}$$

$$N_{ult,H} = 1434,6 \text{ kN}$$

und in weiterer Folge mit $L_{UG} = 4,75\text{m}$ das maximale Biegemoment:

$$M_{y,UG} = 1703,6 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtprofils:

Berechnungsgrundlage bildet ein HEA 300, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 300:} \quad & h = 29 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung des plastischen Widerstandsmomentes $W_{pl,y}$:

$$W_{pl,y} = 1305,1 \text{ cm}^3$$

Bestimmung der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,y,Rd}$:

$$M_{pl,y,Rd} = 463,3 \text{ kNm}$$

Bestimmung des idealen Biegedrillnickmomentes M_{cr} :

$$M_{cr} = 1301,7 \text{ kNm}$$

mit: $c_1 = 1,363$ für dreiecksförmigen Momentenverlauf, aus [11]

$$\text{Flächenmoment 2. Grades:} \quad I_z = 6301,3 \text{ cm}^4$$

$$\text{Wölbflächenmoment 2. Grades:} \quad I_w = 1199772 \text{ cm}^6$$

$$\text{Torsionsflächenmoment 2. Grades:} \quad I_t = 11,0 \text{ cm}^4$$

$$\text{Elastizitätsmodul:} \quad E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Poissonzahl:} \quad \nu = 0,3$$

$$\text{Schubmodul:} \quad G = 8,0769 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades für Biegedrillknicken des Untergurtes:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,597$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für Biegemoment M_y – allgemeiner Fall:

$$\text{Knicklinie } a: \quad \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,720$$

$$\chi_{LT} = 0,891 \leq 1,0$$

Bestimmung der Momententragfähigkeit M_{Rd} :

$$M_{Rd} = 412,9 \text{ kNm}$$

Bestimmung von $N_{V,Rd}$:

$$N_{V,Rd} = 347,7 \text{ kN}$$

Lastfaktor:

$$\frac{N_{V,Rd}}{N_{V,Ed}} = 0,242$$

Bestimmung von N_{Rd} :

$$N_{Rd} = 0,242 \cdot 2028,9 = 491,8 \text{ kN}$$

B - 6.8.2 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Der FE-Traglastberechnung für den Fall ohne Zugkraftkomponente wurde die erste Knickeigenform (mit den die Symmetrie ausnutzenden Lagerungsbedingungen im Halbierungspunkt der Druckdiagonale, siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt, da der symmetrische Fall der ersten Knickeigenform immer maßgebend wird. Es wurden jeweils zwei lineare Beulanalysen und darauf basierende Traglastberechnungen, einerseits mit der Randbedingung RBa und andererseits mit der Randbedingung RBb (Definitionen der beiden verschiedenen Lagerungen in Kapitel B - 6.1) durchgeführt. Zwei Ansichten der ersten Knickeigenform mit den Randbedingungen RBa wurden bereits im Abschnitt B - 4.8.1 in der Abbildung B.137 gezeigt. Die Knickeigenform in zwei Ansichten des Knotens der Gruppe 6b mit den Randbedingung RBb sind in der nachfolgenden Abbildung B.231 dargestellt.

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.231 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b ohne Zugkraft und den Lagerungsbedingungen RBb.

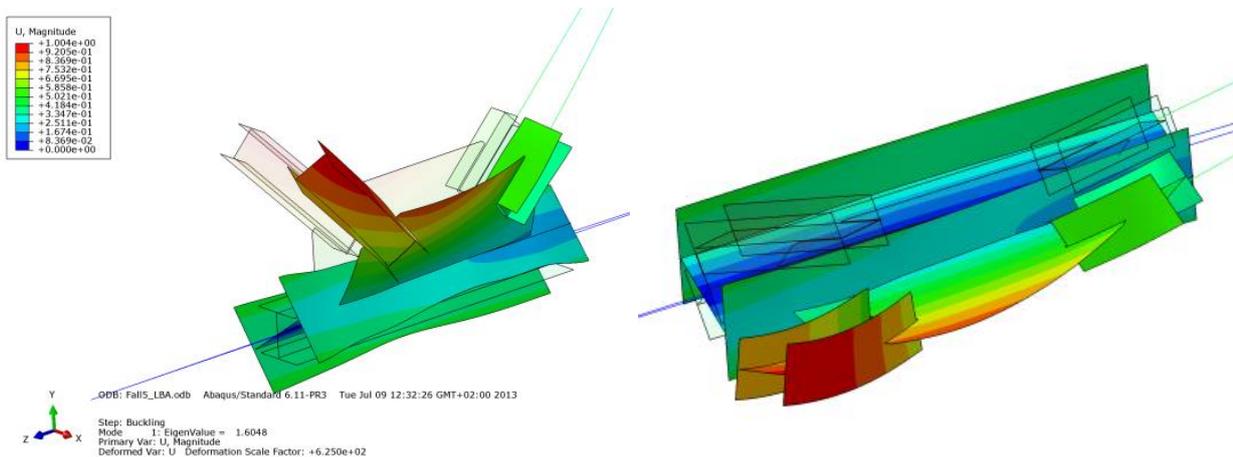


Abbildung B.231 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – erste Knickeigenform – ohne Zugkraftkomponente, Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.8.3 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – Imperfektion affin zur ersten Knick-eigenform

B - 6.8.3.1 Randbedingung RBa

Als Versagensform wird hier Biegedrillknicken des Untergurtstabes maßgebend. Im Anschlussbereich des Knotenbleches kommt es im Untergurtstab zum Durchplastizieren des gesamten Querschnitts. Das Verdrehen des Untergurtstabes ist in den Abbildungen B.232 bis B.235 deutlich zu erkennen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

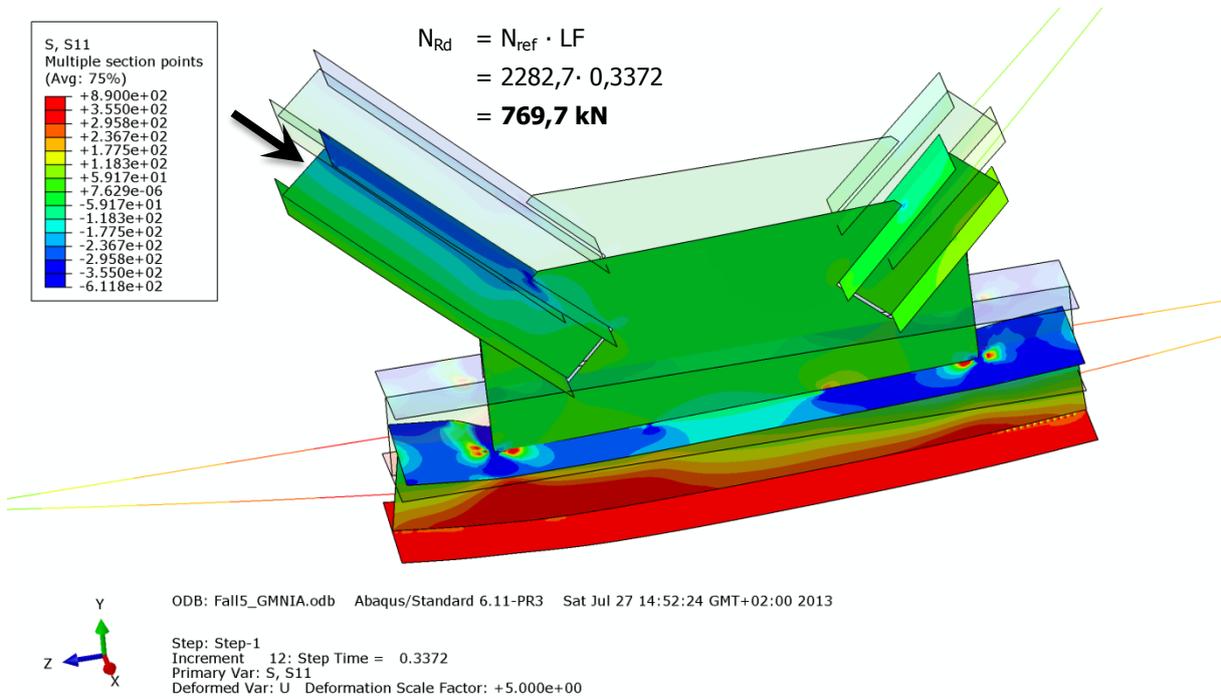


Abbildung B.232 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

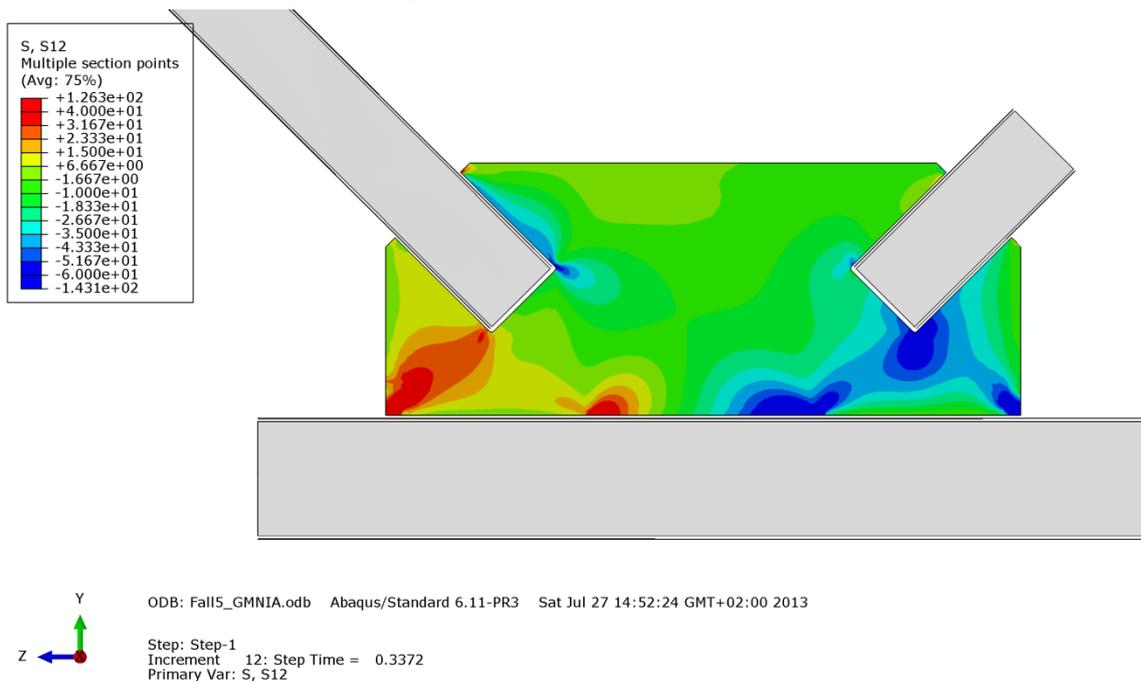


Abbildung B.233 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech d. Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, UG gabelgelagert - RBa

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

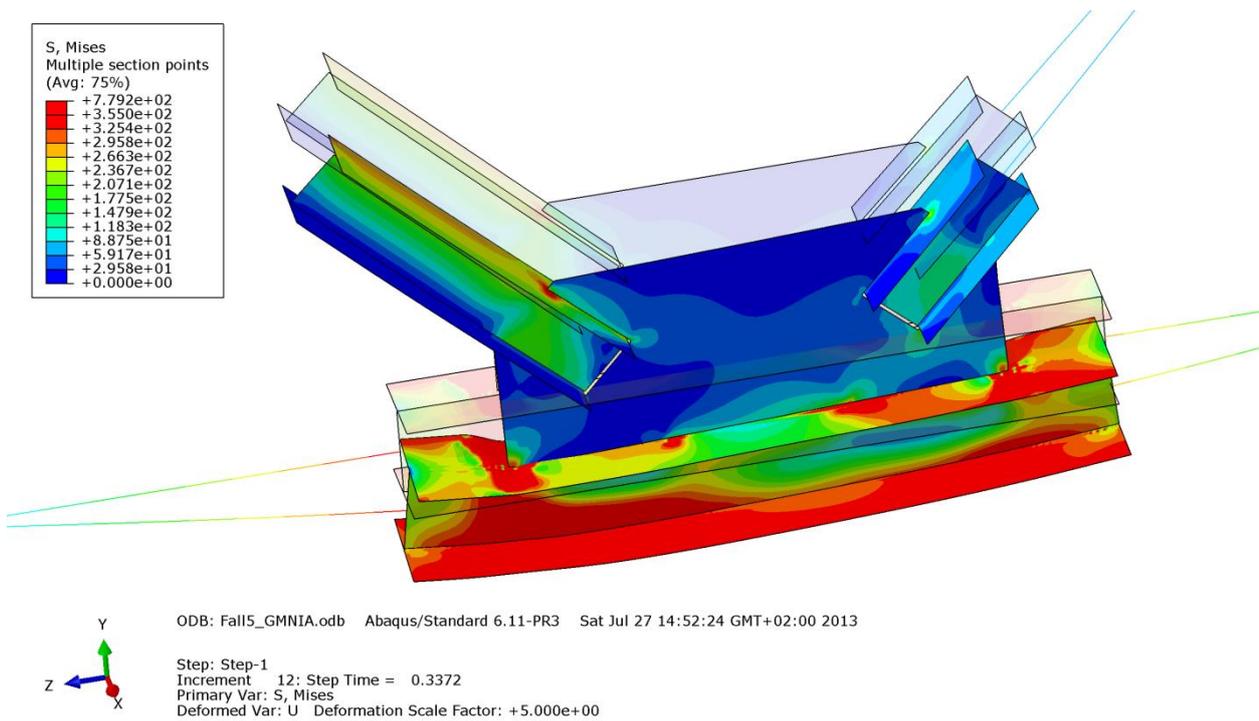


Abbildung B.234 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

• **Verformung [mm]**

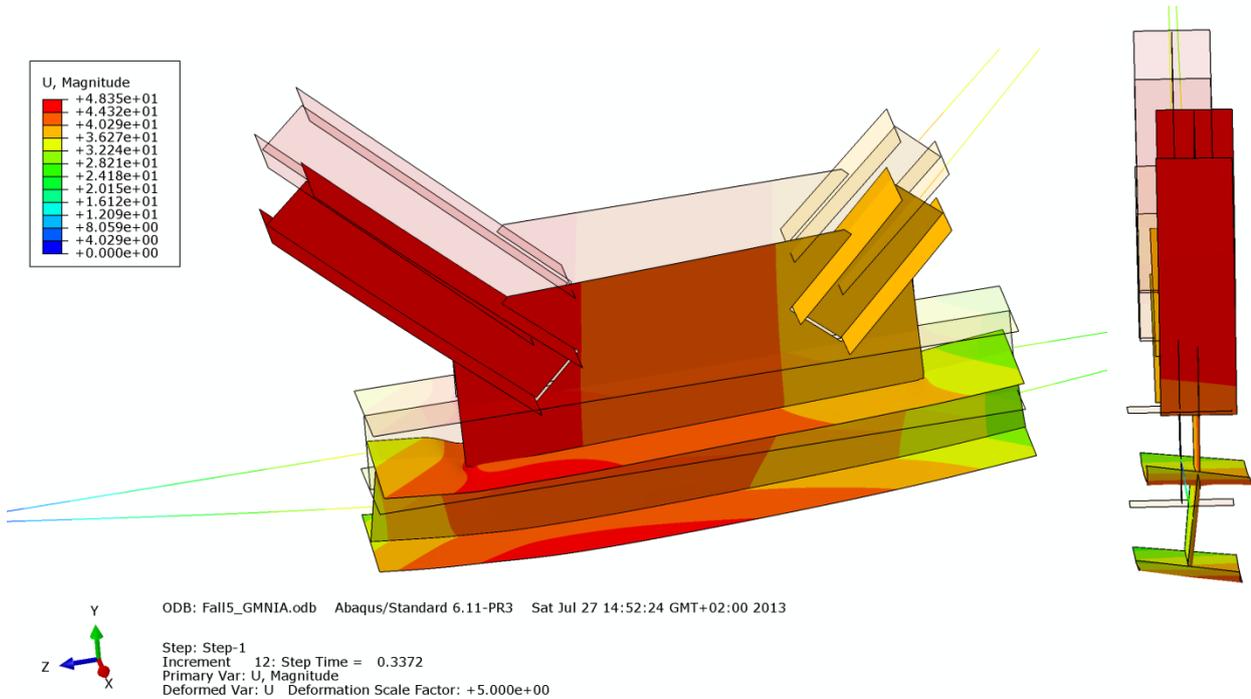


Abbildung B.235 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert - RBa

B - 6.8.3.2 Randbedingung RBb

Maßgebend für die Traglastgrenze ist hier das Versagen der Druckstrebe (Stabknicken), wie die Abbildungen B.236 bis B.239 zeigen. Des Weiteren plastizieren kleine Bereiche des Untergurtflansches an der Nahtstelle zum Knotenblech und Bereiche des Steges des Untergurtstabes zufolge der Krafteinleitung.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

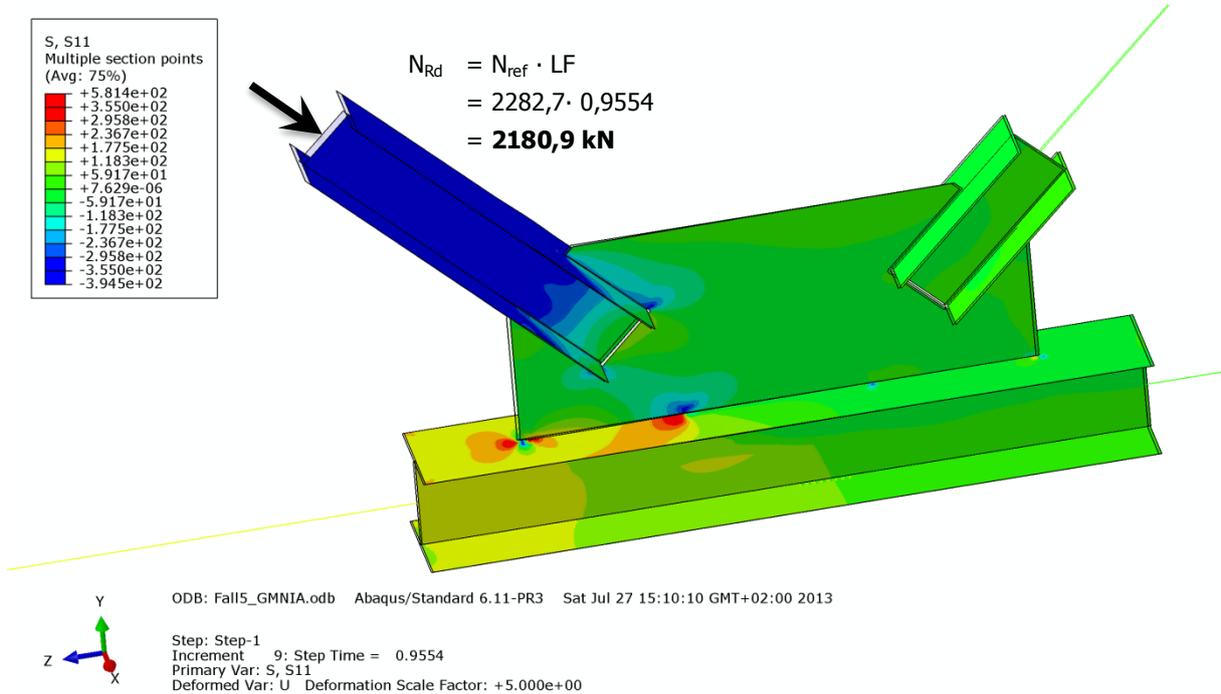


Abbildung B.236 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

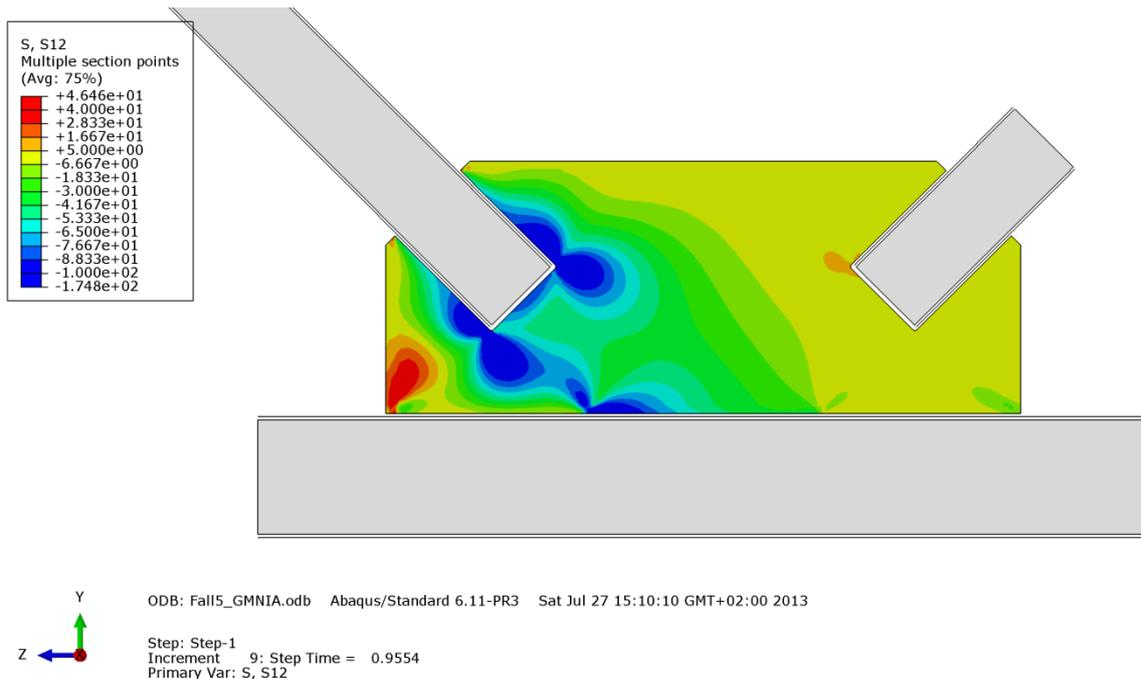


Abbildung B.237 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

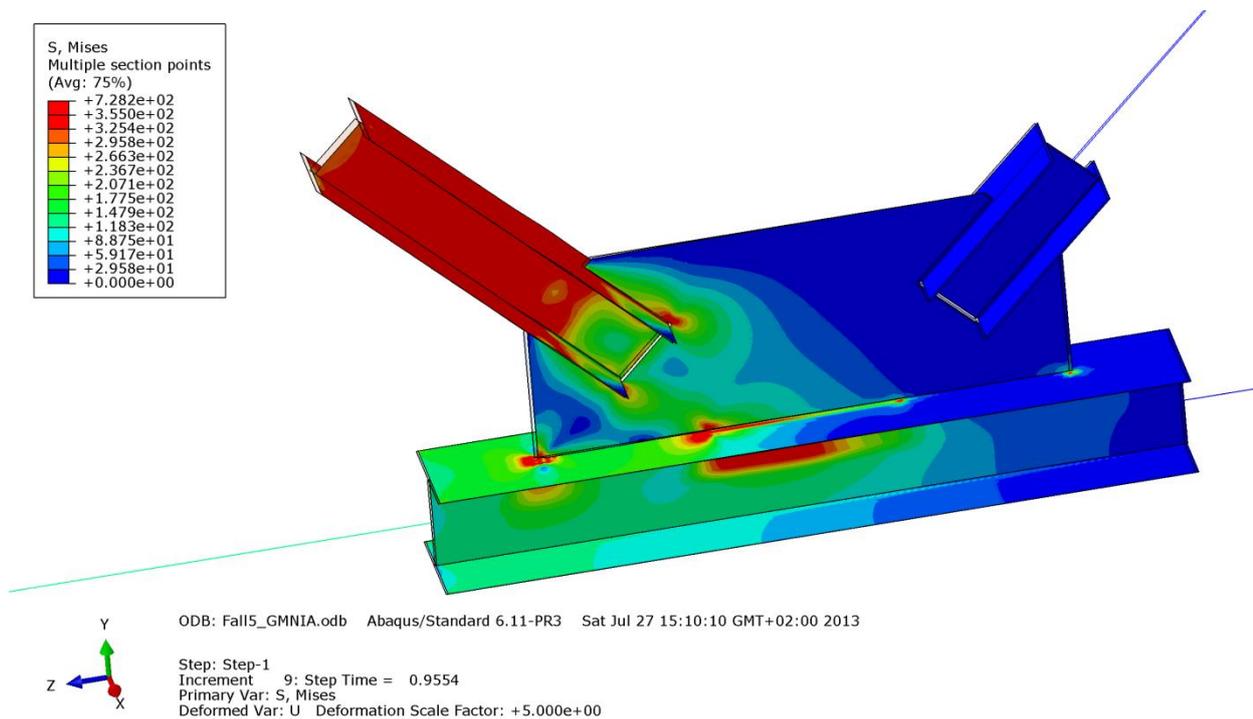


Abbildung B.238 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

• **Verformung [mm]**

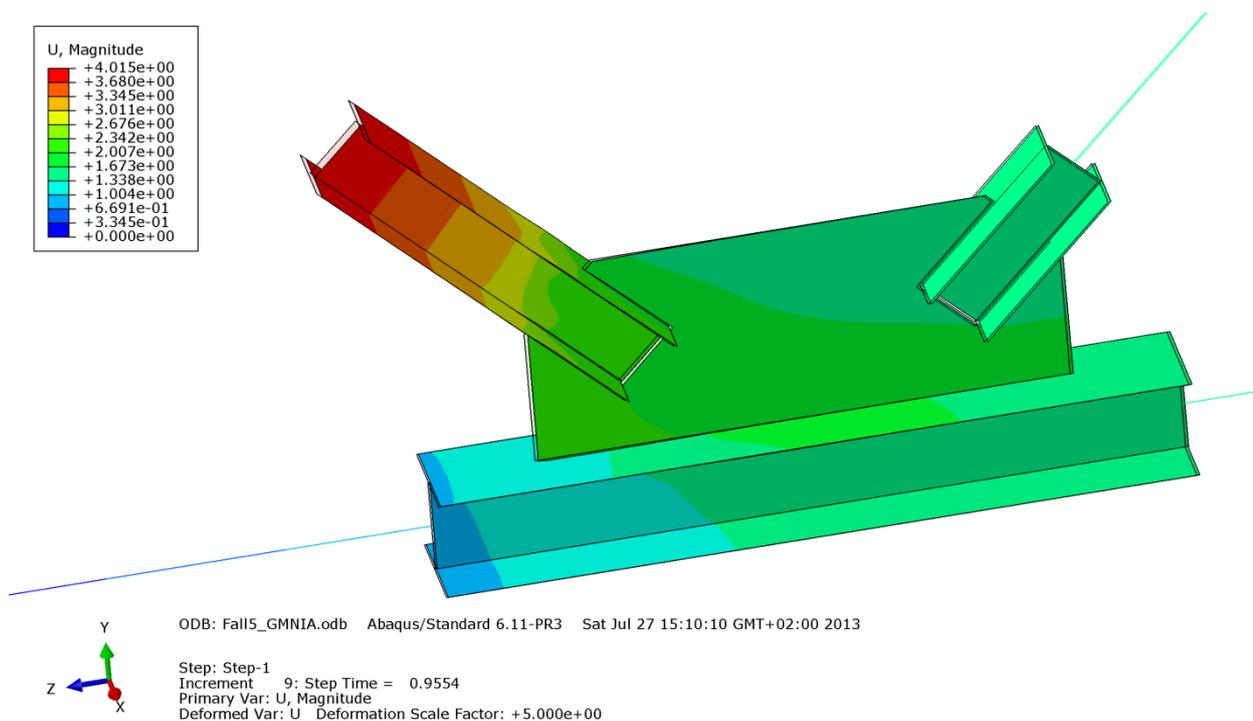


Abbildung B.239 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – ohne Zugkraftkomponente, Untergurt gabelgelagert und zusätzlich Verschiebung der Untergurtachse in vertikaler Richtung gesperrt - RBb

B - 6.8.4 Vergleich der Traglastberechnungen ohne Zugkraftkomponente

Die nachfolgende Tabelle B.44 stellt die ermittelten Ergebnisse des Systems gegenüber:

- Berechnung mit Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform (plastische Materialmodellierung des gesamten Systems bzw. elastische Modellierung von Zugstrebe und Untergurt)
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBa - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knick-eigenform
- Berechnung ohne Zugkraftkomponente - RBb (Verschiebung der Untergurtachse zusätzlich zu den Lagerungsbedingungen RBa (siehe Abschnitt B - 2.2) in vertikaler Richtung gesperrt) - Imperfektion in der Druckdiagonale affin zur 1. Knickeigenform
- Ergebnis der Tragfähigkeit des Untergurtstabes der durchgeführten Handrechnung zufolge Biegedrillknicken

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{res} =$	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech} =$	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge $L_{UG} =$	4750mm

FE: mit Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	FE: ohne Zugkraft	Hand-rechnung: ohne Zugkraft
"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B-2.2 RBa	"Standard"-Lagerungsbedingungen nach B-2.2 RBa	Verschiebung der UG-Achse in vertikaler Rtg. gesperrt RBb	Gabel-lagerung des Einzelstabes
Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 1. Eigenform	
LF = 0,8836 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2017,0 kN	LF = 0,3372 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 769,7 kN	LF = 0,9554 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2180,9 kN	LF = 0,242 LF · N _{ult} = N _{Rd} = 491,8 kN
<i>Zugstr. u. UG elastisch</i>			
LF = 0,8888 2028,9 kN			
N _{pl} - Druckstrebe = 2185,4 kN N _{pl} - Zugstrebe = 2185,4 kN N _{Rd} für N _{pl,UG} = 2667,6 kN N _{ult} = 2028,9 kN N _{ref} = 2282,7 kN (N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)			

Tabelle B.44 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 6b

Abbildung B.240 zeigt, dass die Traglast mit Zugkraft und Lagerungsbedingung RBa für beide Materialmodellierungsvarianten (gesamt linear elastisch – ideal plastisch bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch) in etwa gleich groß ist (2017kN bzw. 2029kN) und um rund 8% niedriger als jene Tragfähigkeit ohne Zugkraftkomponente (2181kN), dafür mit zusätzlicher Stützung der Untergurtachse (Lagerungsbedingung RBb) liegt. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Untergurt durch die Sperrung der vertikalen Verschiebung bei RBb nicht mehr plastiziert. Somit kann die Traglast gegenüber den Lagerungsbedingungen RBa gesteigert werden.

Interessant ist, dass im Gegensatz hierzu bei der Gruppe 6a mit der höheren Schlankheit der Streben ($\bar{\lambda}_{z,0} = 1,0$) aber ansonsten gleichen Knotendimensionen, die Tragfähigkeit mit der Randbedingung RBb geringer ist als jene mit der Randbedingung RBa (siehe Abbildung B.229 in Abschnitt B - 6.7.4). Bei der Gruppe 6b (Strebenschlankheit $\bar{\lambda}_{z,0} = 0,7$) fehlt die stabilisierend wirkende Zugkraft nicht in der linken Untergurtstabhälfte (siehe Abbildung B.230), da die Tragfähigkeit sogar steigt.

Beim Vergleich der beiden FE-Rechnungen ohne Zugkraft, einerseits mit der Randbedingung RBa, andererseits mit der Randbedingung RBb fällt auf, dass sich die Tragfähigkeit entscheidend erhöht (von 770kN auf 2181kN), da durch die Sperrung der Vertikalverschiebung des Untergurtstabes (Randbedingung RBb) die Biegedrillknickneigung und das vertikale Ausweichen des Untergurtes verhindert wurde. Aufgrund der Vernachlässigung der stabilisierend wirkenden Normalkraft in der linken Hälfte des Untergurtstabes (siehe Abbildung B.230) bei der nach EN 1993-1-1 [10] ermittelten Tragfähigkeit zufolge Biegedrillknicken, ist die errechnete Tragfähigkeit von 492kN geringer als jene der FE-Rechnung ohne Zugkraftkomponente von 770kN.

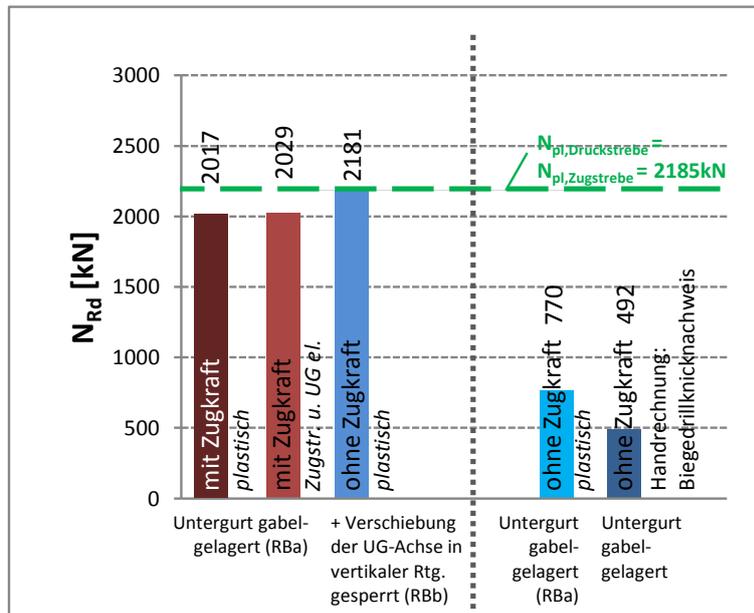


Abbildung B.240 – Vergleich der Traglastberechnungen mit und ohne Zugkraftkomponente – Gruppe 6b

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls im Diagramm eingetragen.

B - 7 Variation der Untergurtbreite

B - 7.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Verdrehung des Untergurtstabes an der Tragfähigkeit des Fachwerkausschnittes bestimmen zu können, wurde im Zuge der Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

eine Variation der Breite der Untergurtflansche durchgeführt. Einerseits wurde die Untergurtbreite verdoppelt ($2,0 \cdot b_{UG}$), um die Verdrehsteifigkeit des Untergurtstabes zu erhöhen, andererseits auch halbiert ($0,5 \cdot b_{UG}$), um die Steifigkeit zu verringern. Es wurden wiederum drei Fälle untersucht: Zwei mit Imperfektion in der Druckdiagonalen, erste und zweite Knickeigenform; sowie einer mit der Imperfektion im Knotenblech (Knotenblechschiefstellung).

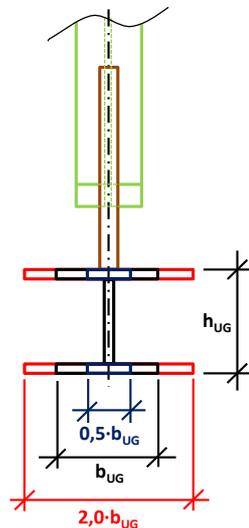


Abbildung B.241 – Variation der Untergurtbreite

Die Tabelle B.45 zeigt die Nennbreite der Untergurtprofile, sowie die variierten Breiten als Eingangsgrößen für die FE-Rechnungen.

Gruppe	Profil des Untergurtstabes	b_{UG}	$2,0 \cdot b_{UG}$	$0,5 \cdot b_{UG}$
		[mm]	[mm]	[mm]
1	HEB 450	300	600	150
5	HEB 200	200	400	100
6b	HEA 300	300	600	150

Tabelle B.45 – Untergurtbreiten

Um keinen die Traglast des Knoten mindernden Steifigkeitsverlust des Untergurtstabes durch lokales oder globales Plastizieren zu erhalten, wurde in den folgenden Rechnungen B - 7.2 bis B - 7.4 ein rein elastisches Materialverhalten des Untergurtstabes modelliert. Des Weiteren gilt dies auch für die Zugstrebe, um die Traglast für das System Druckstrebe in Interaktion mit dem Knotenblech herausarbeiten zu können.

B - 7.2 Gruppe 1

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 1 zu charakterisieren sind in Tabelle B.46 zusammengefasst.

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge L^* =	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L}$ =	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	L_{res} =	3648mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	45mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L,ges}$ =	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.46 – FE-Eingangsdaten Gruppe 1

B - 7.2.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestellten Knotenblech angenommen. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die doppelte und die halbe Untergurtbreite gezeigt. Die erste und zweite Knickeigenform für die Nennuntergurtbreite war bereits in Kapitel B - 4.2.1 in den Abbildungen B.35 und B.36 dargestellt.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

- **Untergurt-Breite: 1,0·b_{UG} = 300mm**

Die erste Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.2.1 in der Abbildung B.35 gezeigt.

- **Untergurt-Breite: 2,0·b_{UG} = 600mm**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.242 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

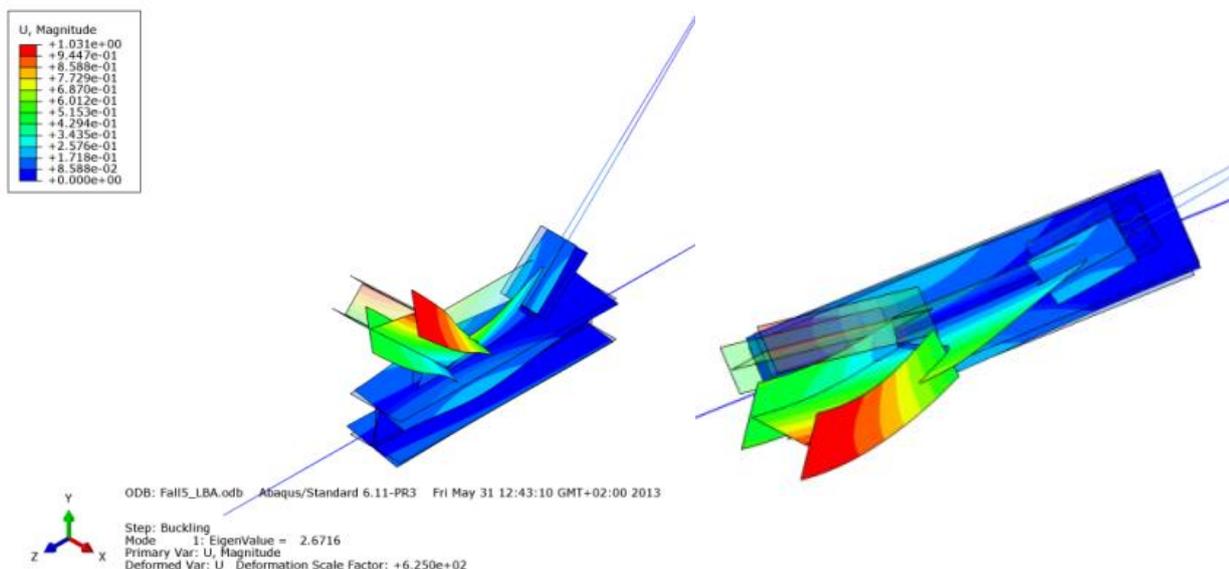


Abbildung B.242 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.243 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$).

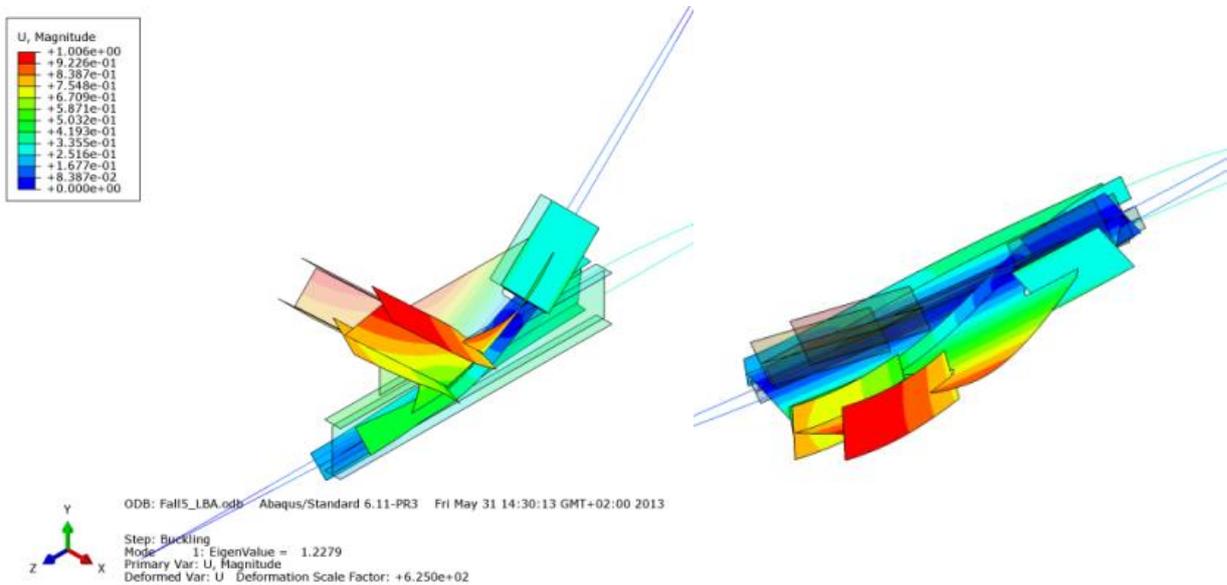


Abbildung B.243 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – erste Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

– **Untergurt-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$**

Die zweite Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.2.1 in der Abbildung B.36 gezeigt.

– **Untergurt-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.244 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

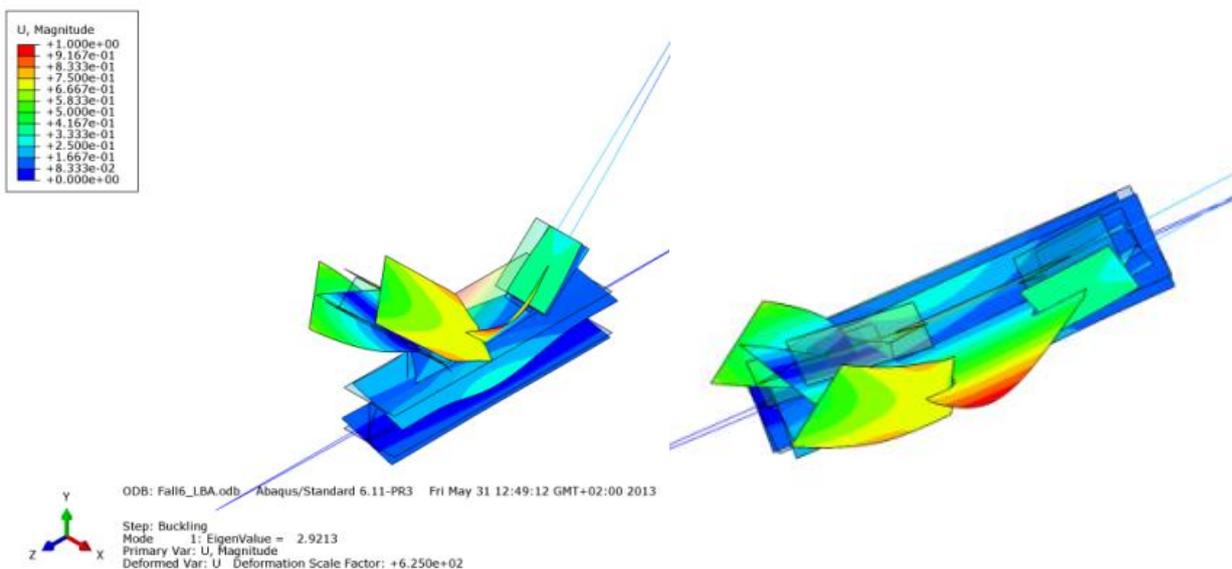


Abbildung B.244 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.245 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$).

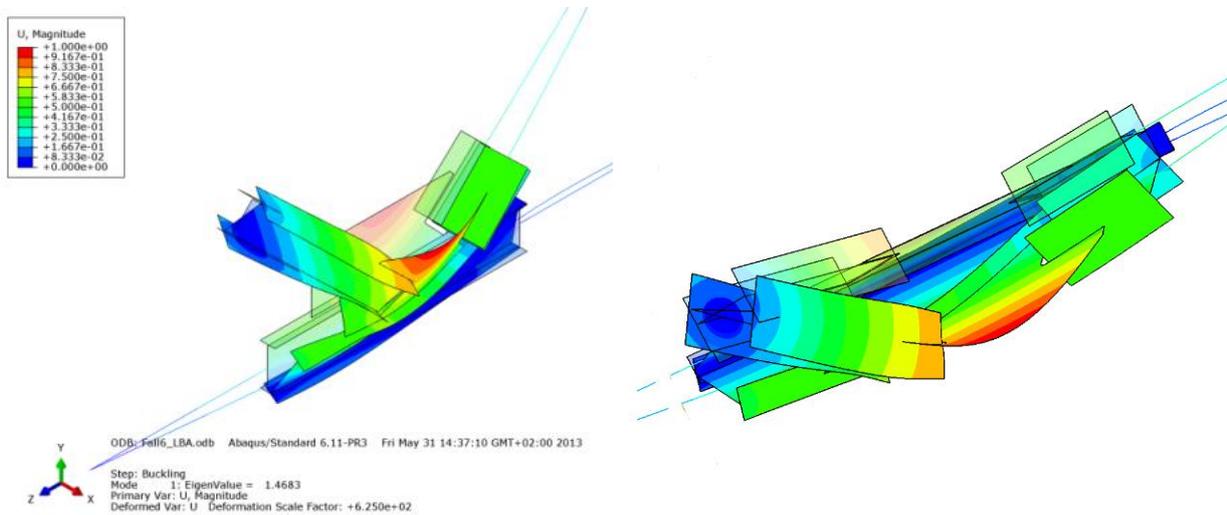


Abbildung B.245 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – zweite Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,3\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 3,2\text{mm}$), wie der Abbildung B.246 entnommen werden kann. Für jede Untergurtbreite ($1,0 \cdot b_{UG}$, $2,0 \cdot b_{UG}$, $0,5 \cdot b_{UG}$) wurde eine Traglastberechnung mit Knotenblechschiefstellung als Imperfektion durchgeführt.

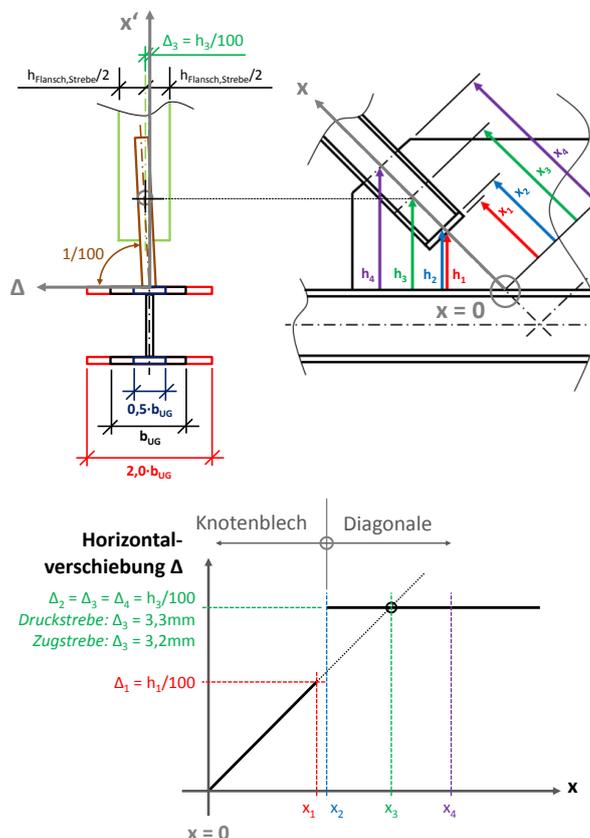


Abbildung B.246 – Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion im Knotenblech mit variierten Untergurtbreiten

B - 7.2.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 7.2.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Ausknicken mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe sowie Verdrehung des Untergurtstabes. Die Druckstrebe und das Knotenblech plastizieren in großen Bereichen, das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus, wie die Abbildungen B.247 bis B.250 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

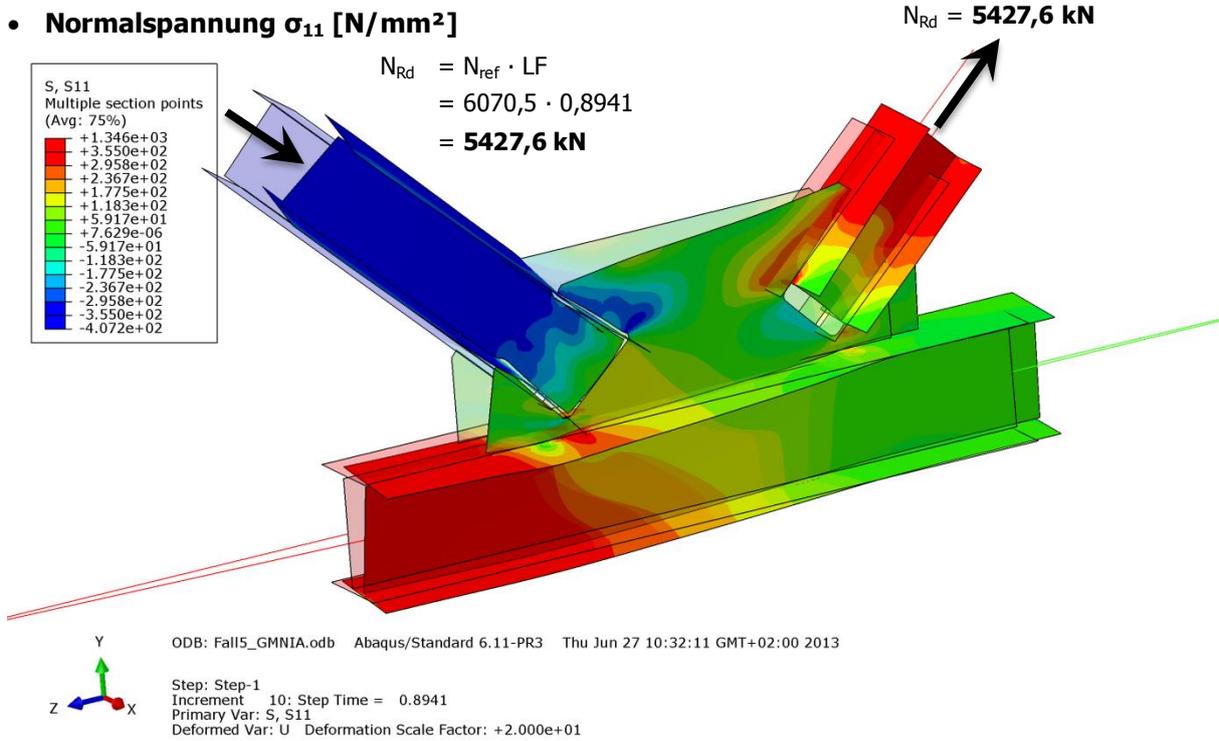


Abbildung B.247 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

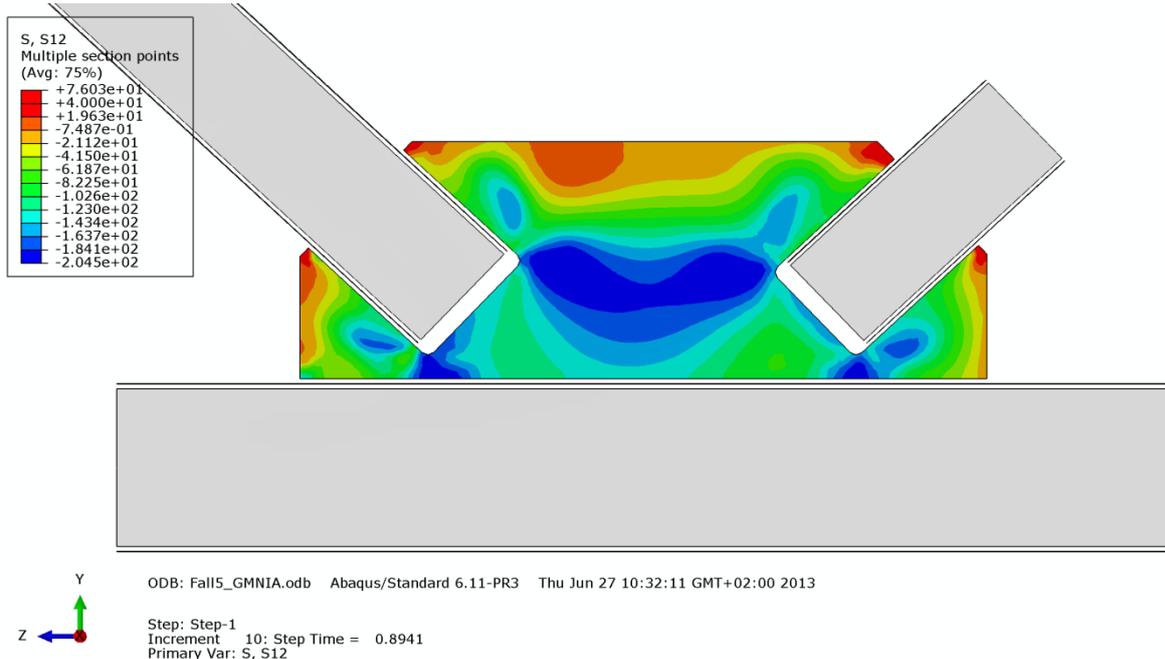


Abbildung B.248 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

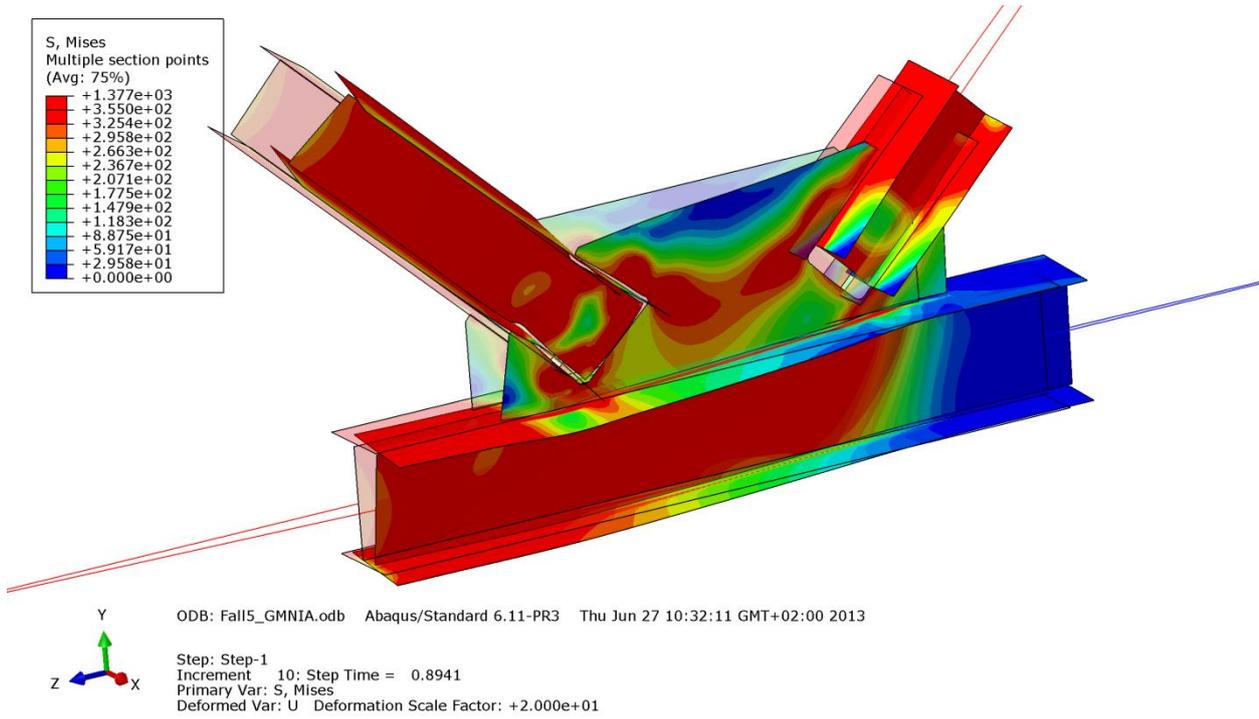


Abbildung B.249 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

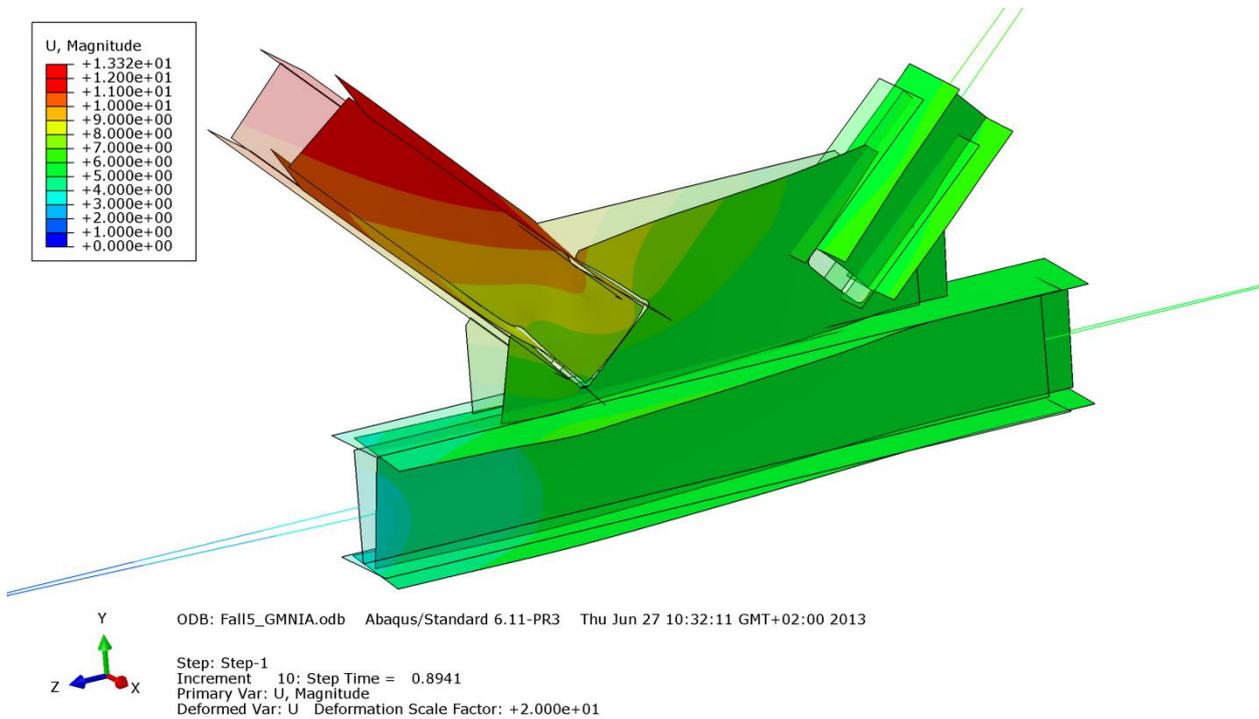


Abbildung B.250 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

B - 7.2.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: 1,0·b_{UG} = 300mm

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung mit kombinierter Verdrehung der Druckdiagonale und durch Ausweichen des Untergurtstabes, wie die Abbildungen B.251 bis B.254 zeigen. Druckstrebe und Knotenblech plastizieren in großen Bereichen, das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

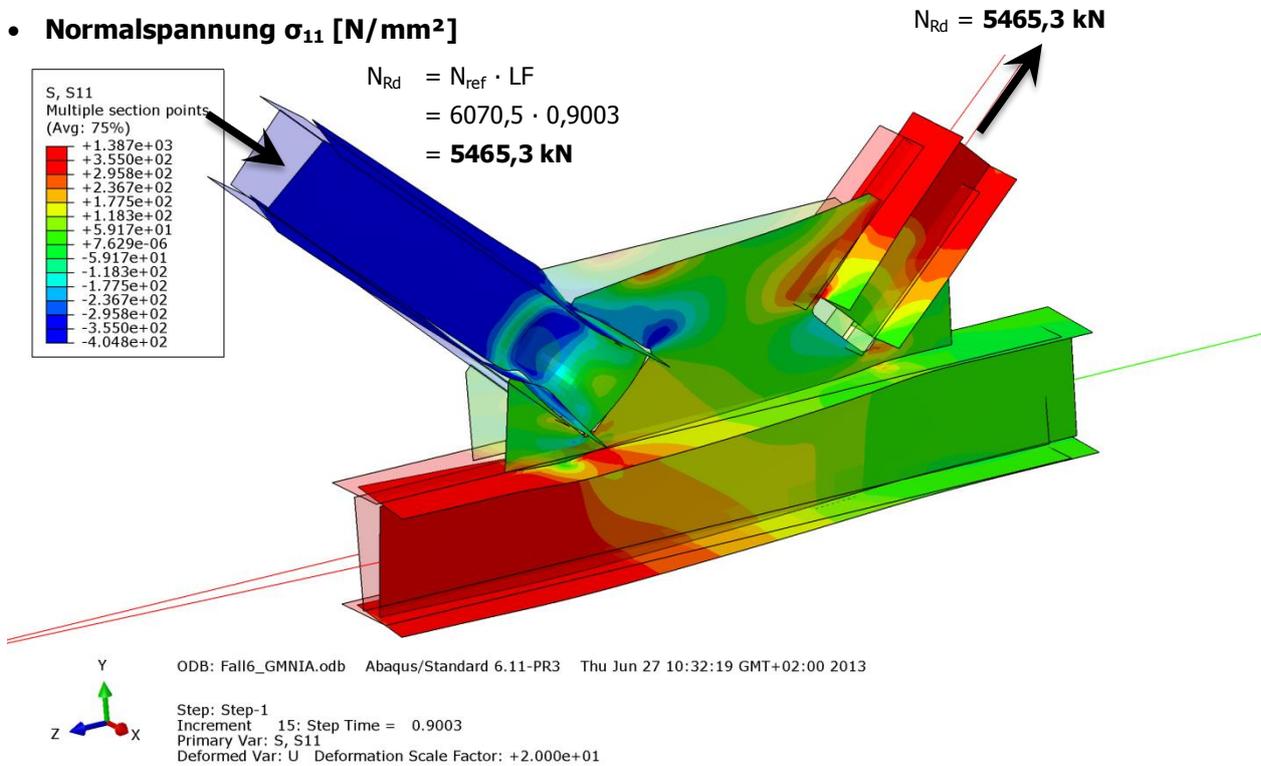


Abbildung B.251 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

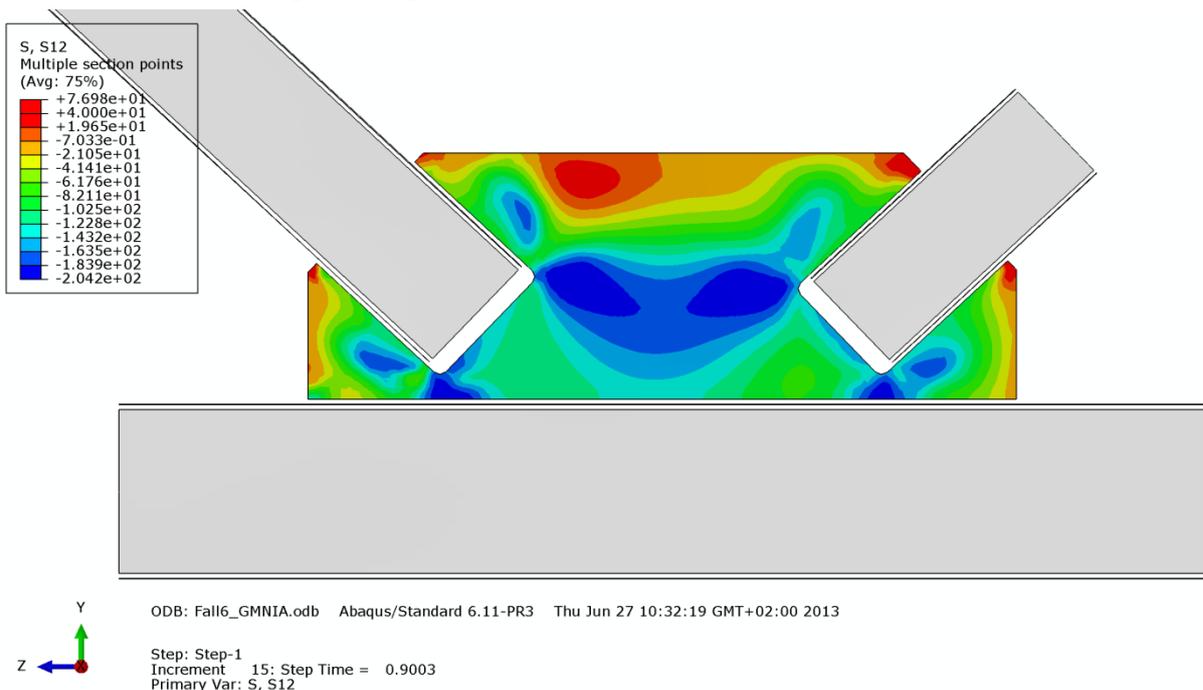


Abbildung B.252 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

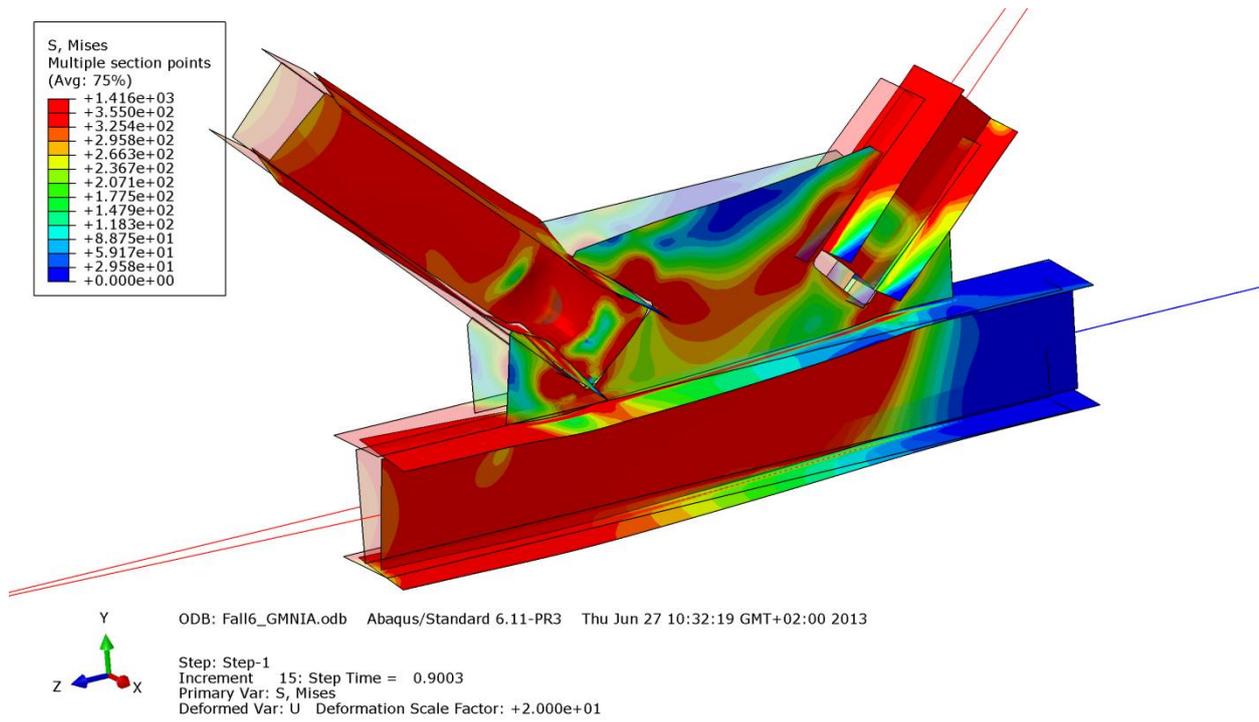


Abbildung B.253 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

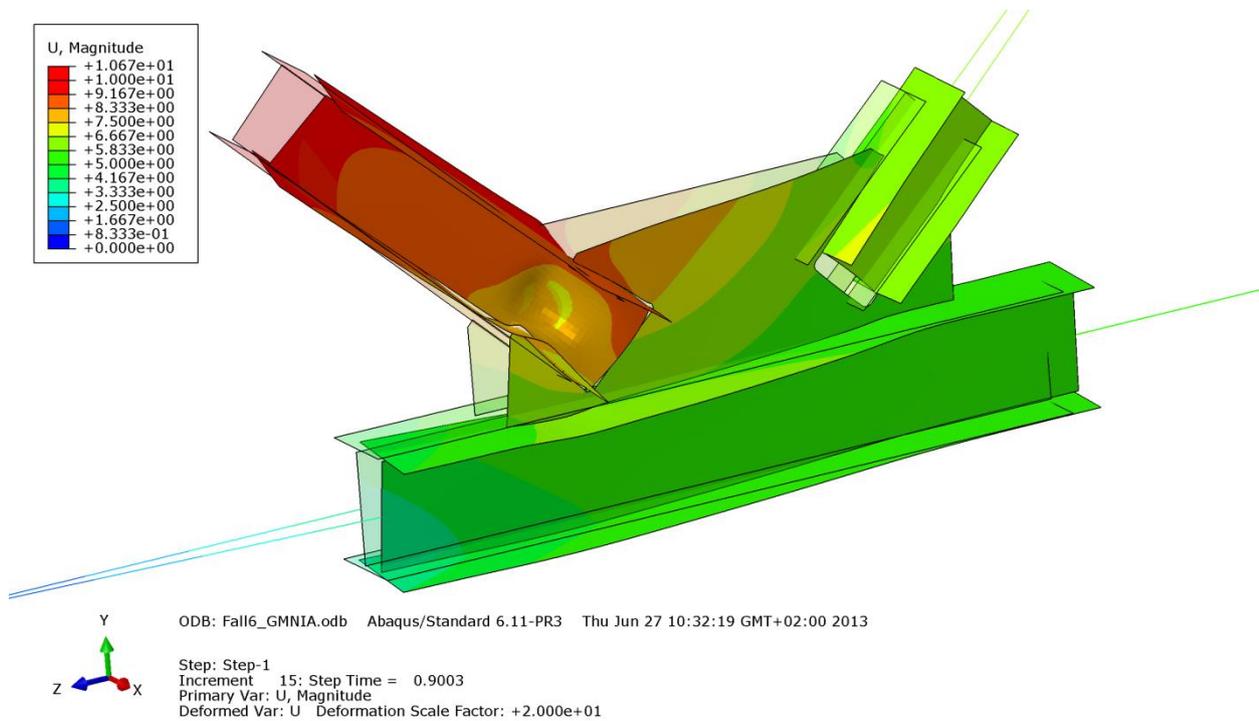


Abbildung B.254 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 7.2.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: 1,0·b_{UG} = 300mm

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung mit kombinierter Verdrehung der Druckdiagonale und durch Ausweichen des Untergurtstabes, wie die Abbildungen B.255 bis B.258 zeigen. Druckstrebe und Knotenblech plastizieren in großen Bereichen. Das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

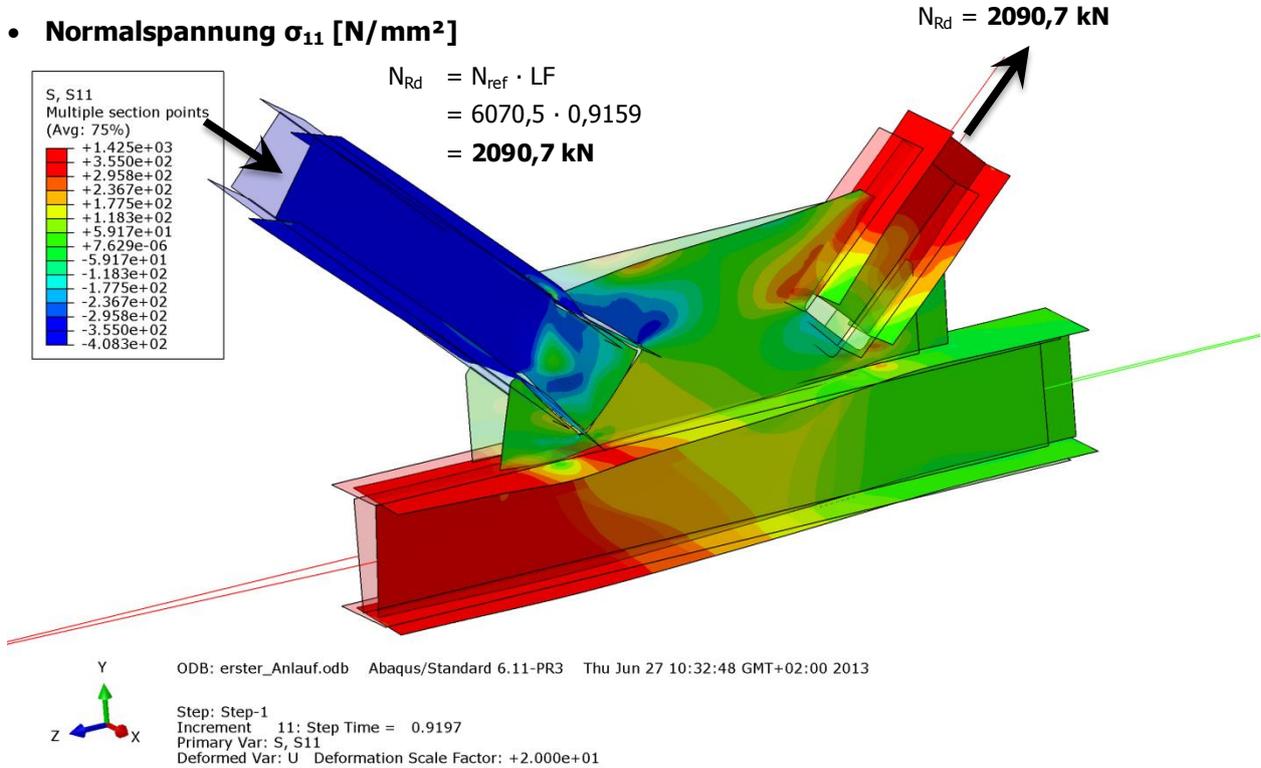


Abbildung B.255 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

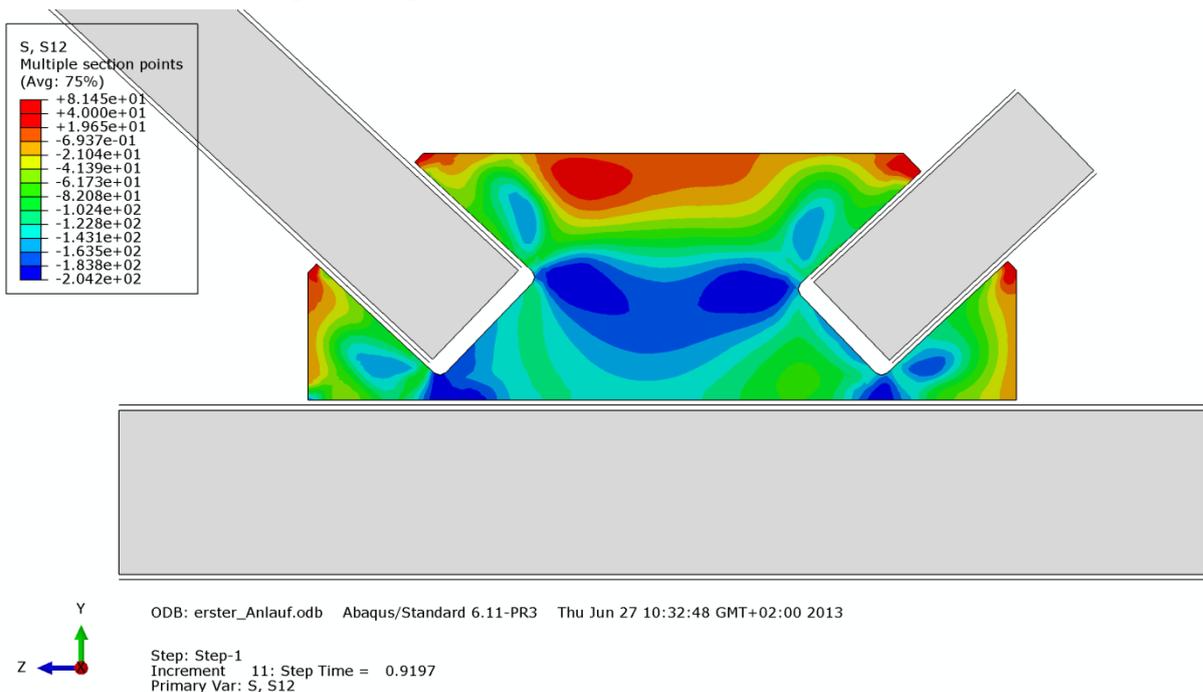


Abbildung B.256 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

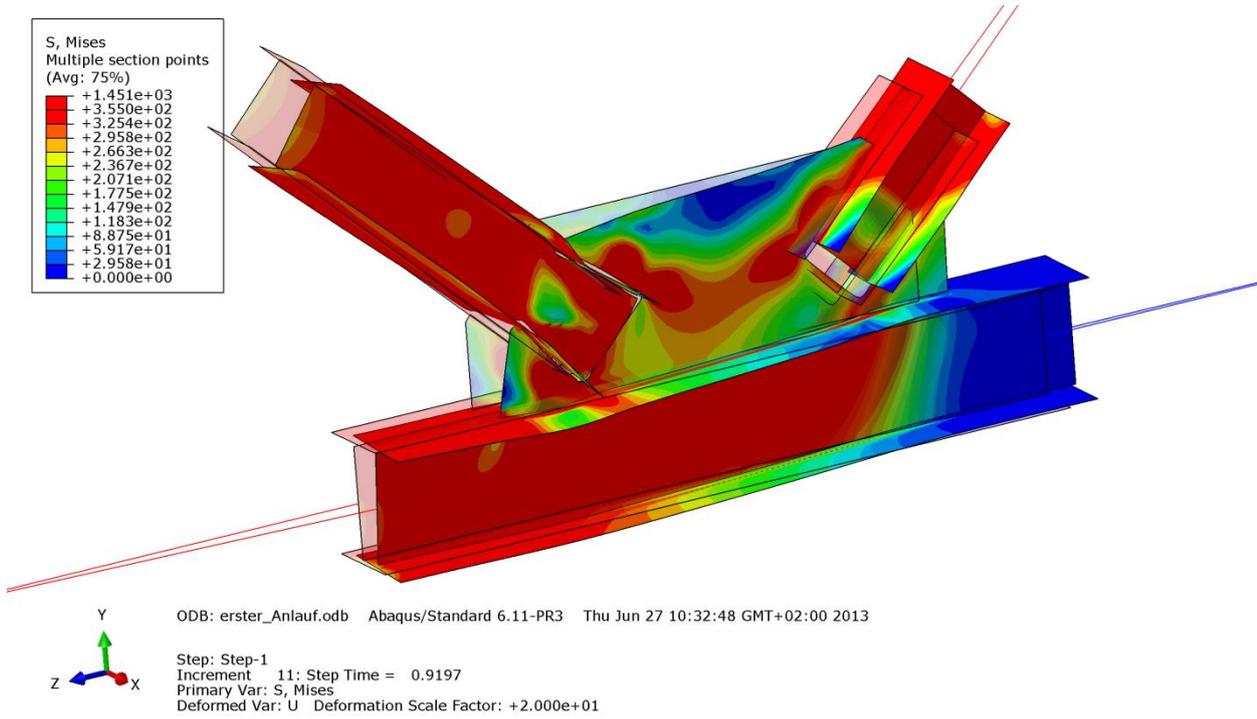


Abbildung B.257 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

• **Verformung [mm]**

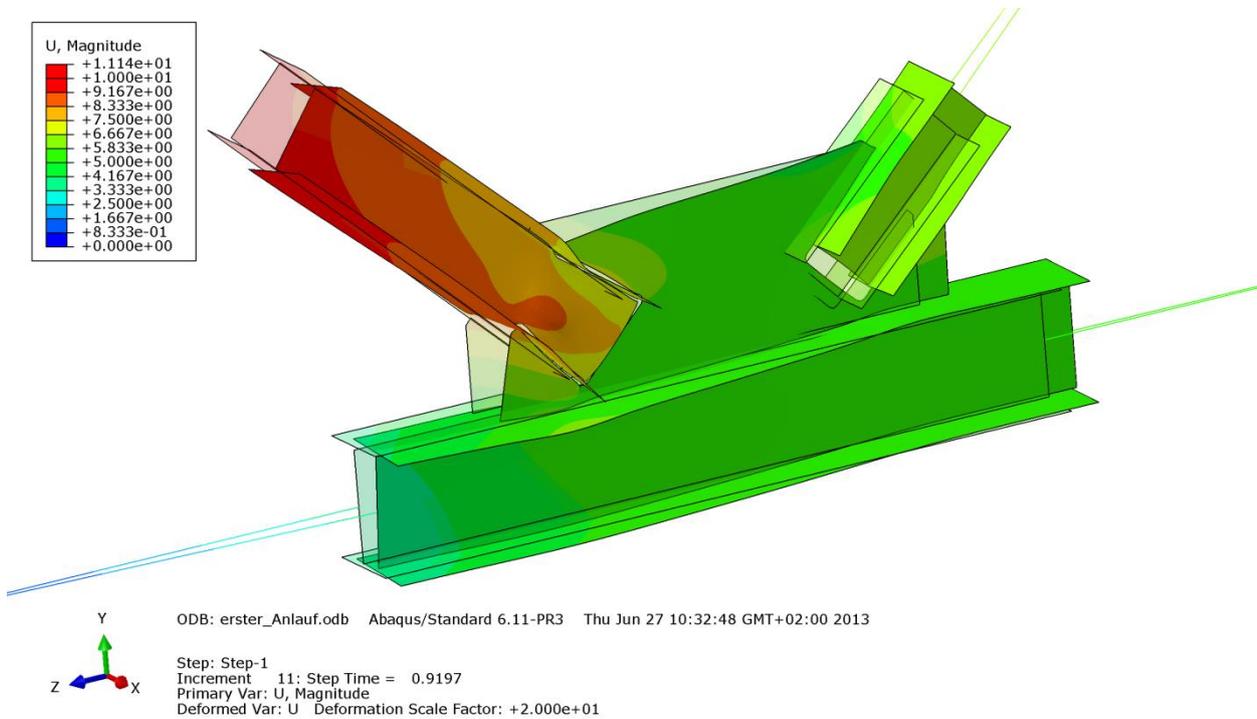


Abbildung B.258 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

B - 7.2.2.4 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Ausknicken mit kombinierter Verdrehung der Druckdiagonale und durch Ausweichen des Untergurtstabes, wie die Abbildungen B.259 bis B.262 zeigen. Druckstrebe und Knotenblech plastizieren in großen Bereichen, das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

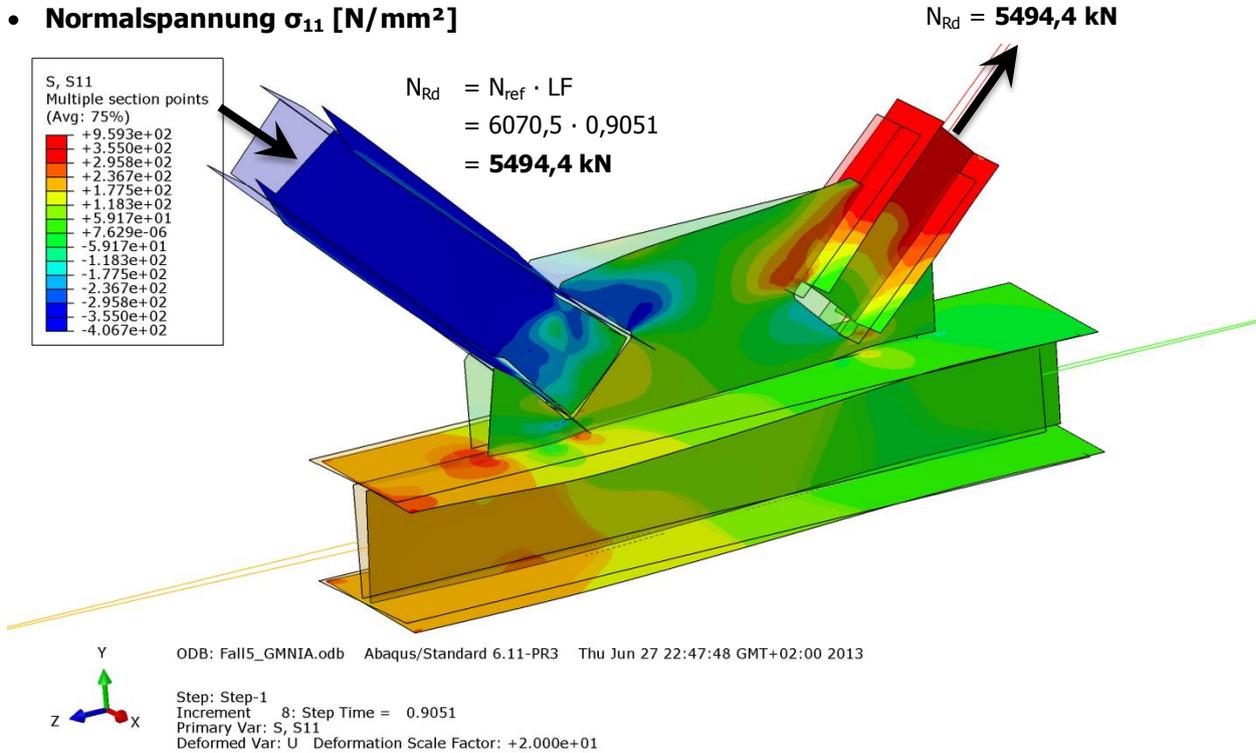


Abbildung B.259 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

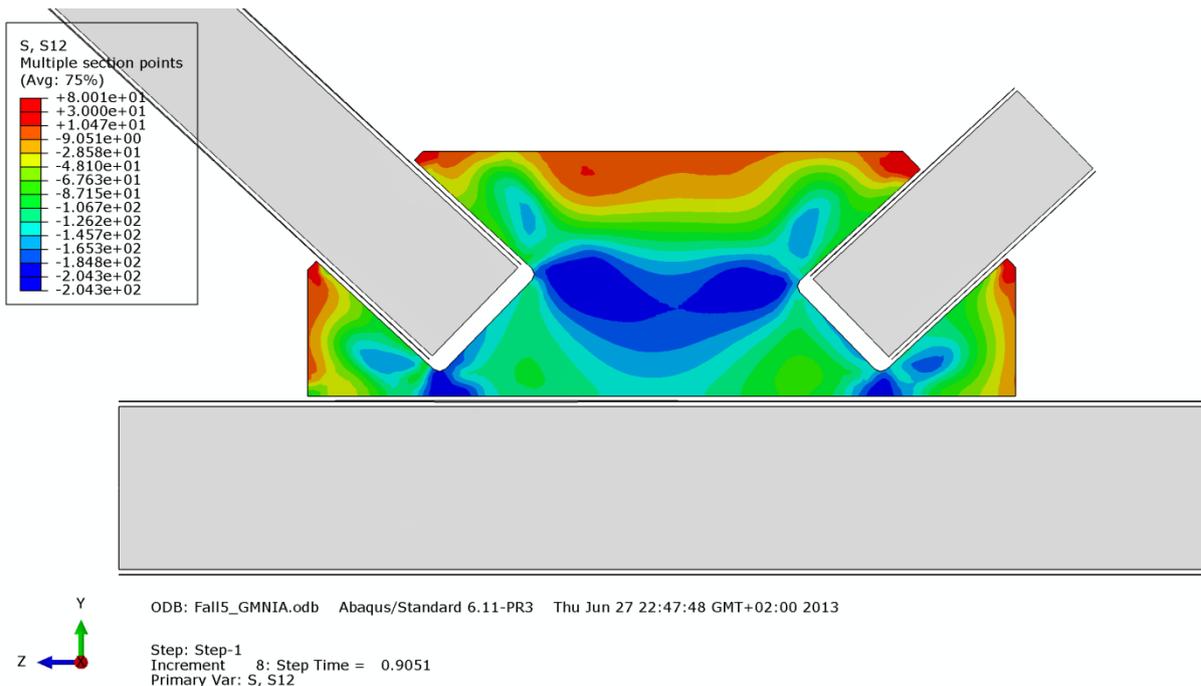


Abbildung B.260 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

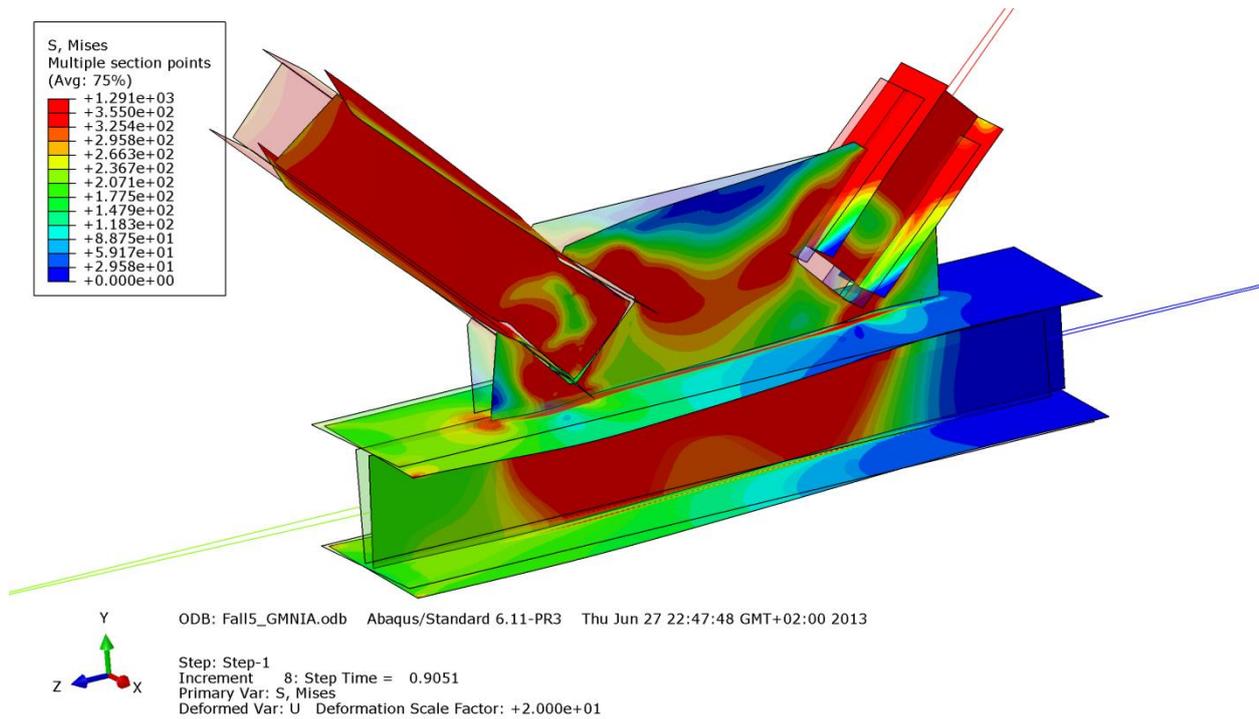


Abbildung B.261 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

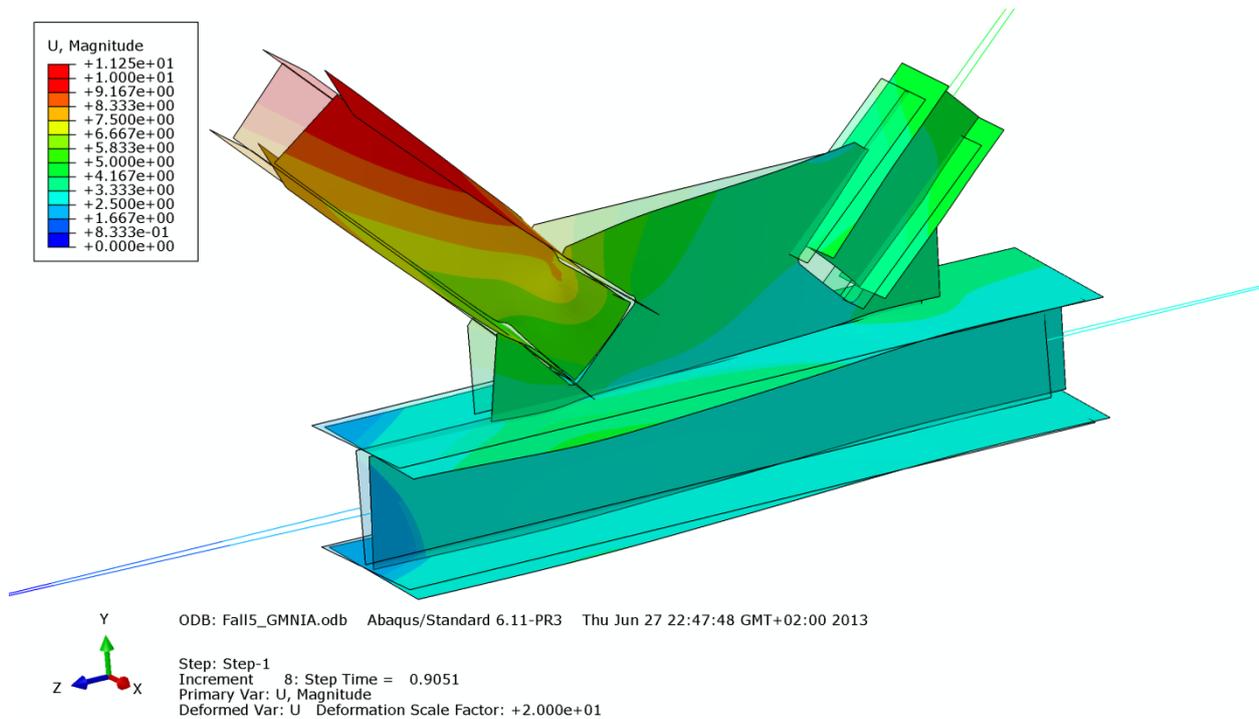


Abbildung B.262 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.2.2.5 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe mit kombinierter Verdrehung, wie die Abbildungen B.263 bis B.266 zeigen. Der Steg des Untergurtstabes unterhalb des Knotenbleches und das Knotenblech selbst plastizieren in großen Bereichen. Versagen tritt im Einbindebereich der Druckdiagonale in das Knotenblech auf.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

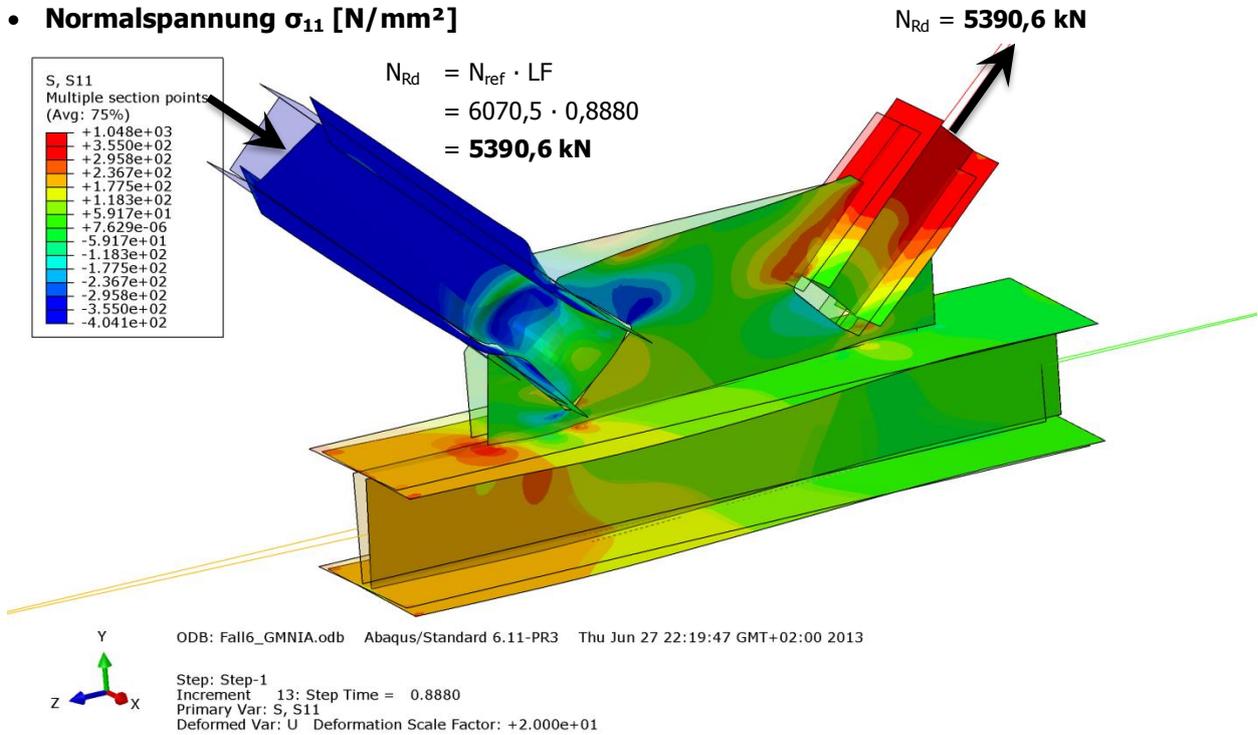


Abbildung B.263 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

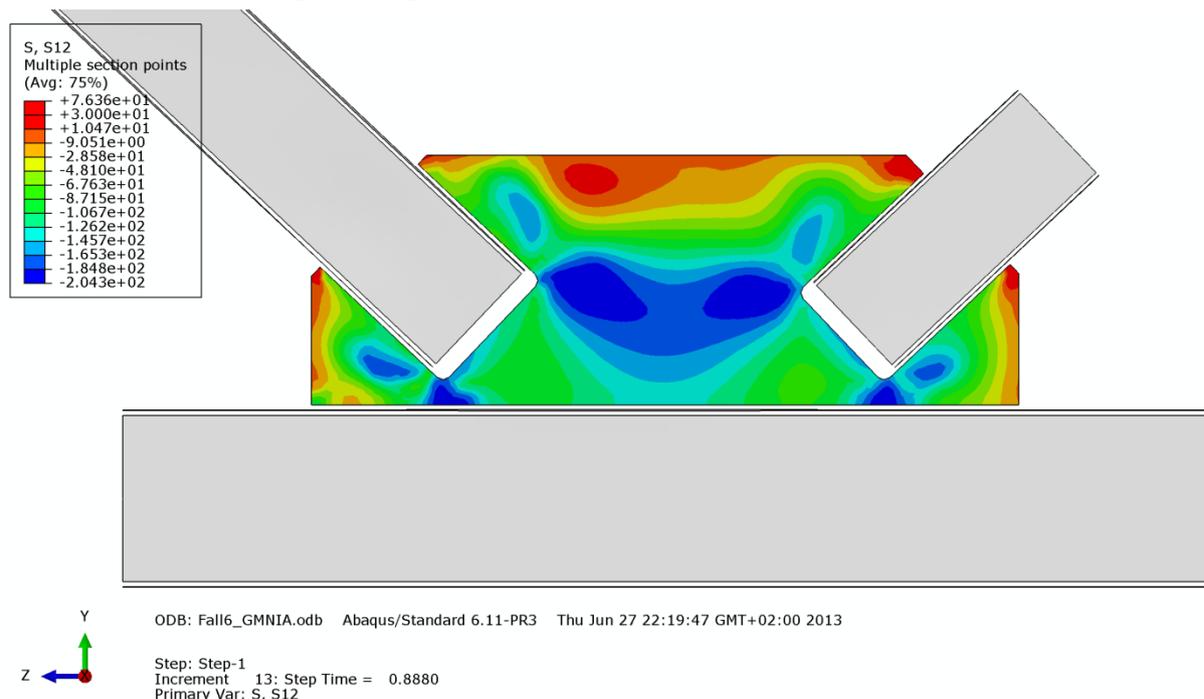


Abbildung B.264 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

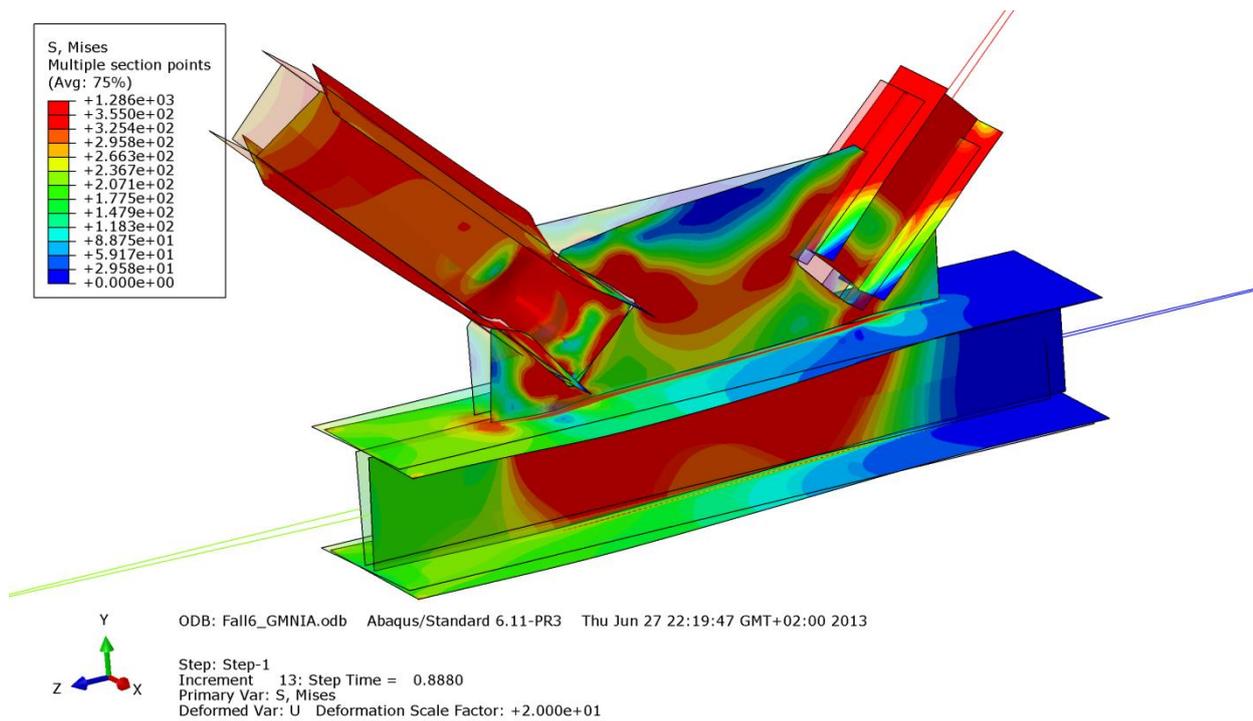


Abbildung B.265 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

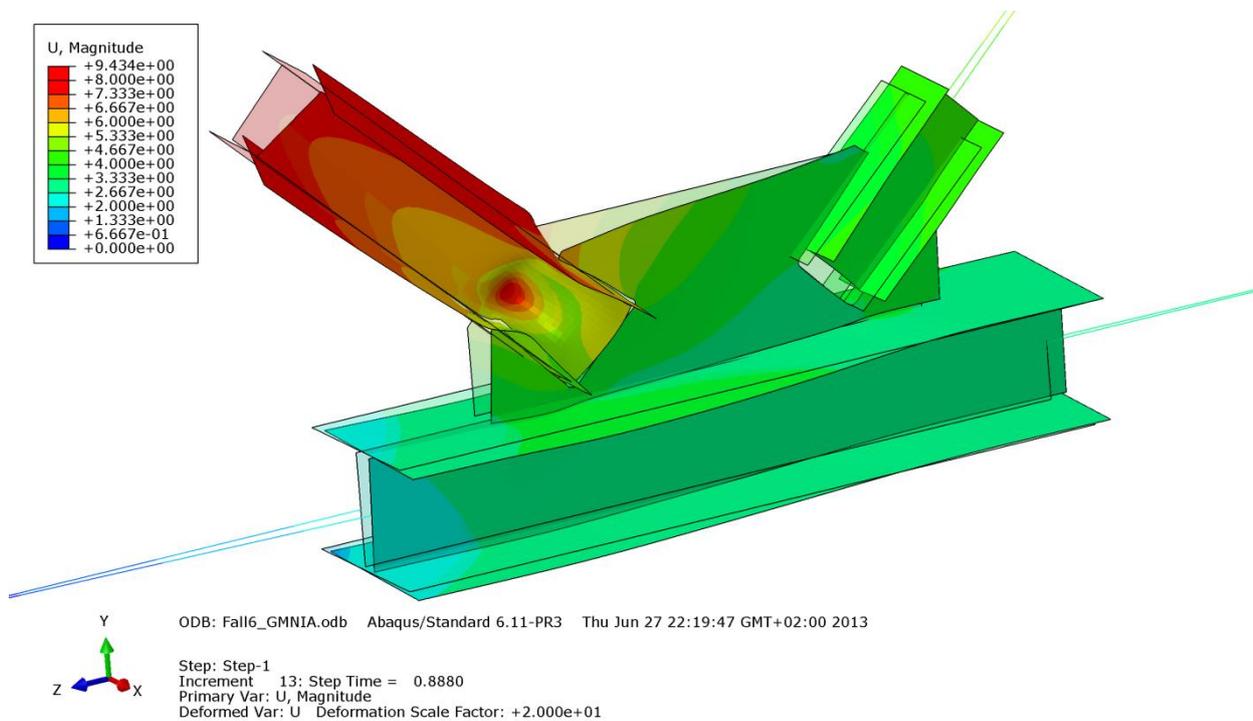


Abbildung B.266 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.2.2.6 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe mit kombinierter Verdrehung, wie die Abbildungen B.267 bis B.270 zeigen. Der Steg des Untergurtstabes unterhalb des Knotenbleches und das Knotenblech selbst plastizieren in großen Bereichen. Versagen tritt im Einbindebereich der Druckdiagonale in das Knotenblech auf.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

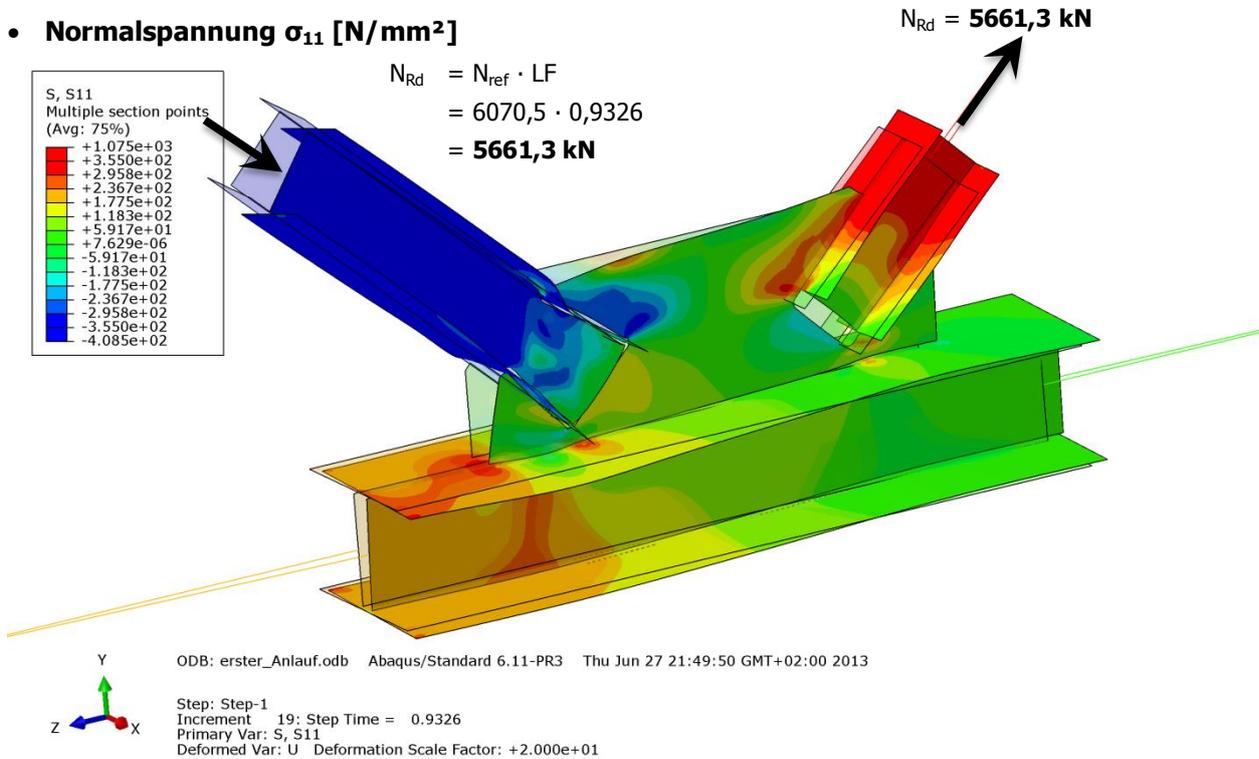


Abbildung B.267 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

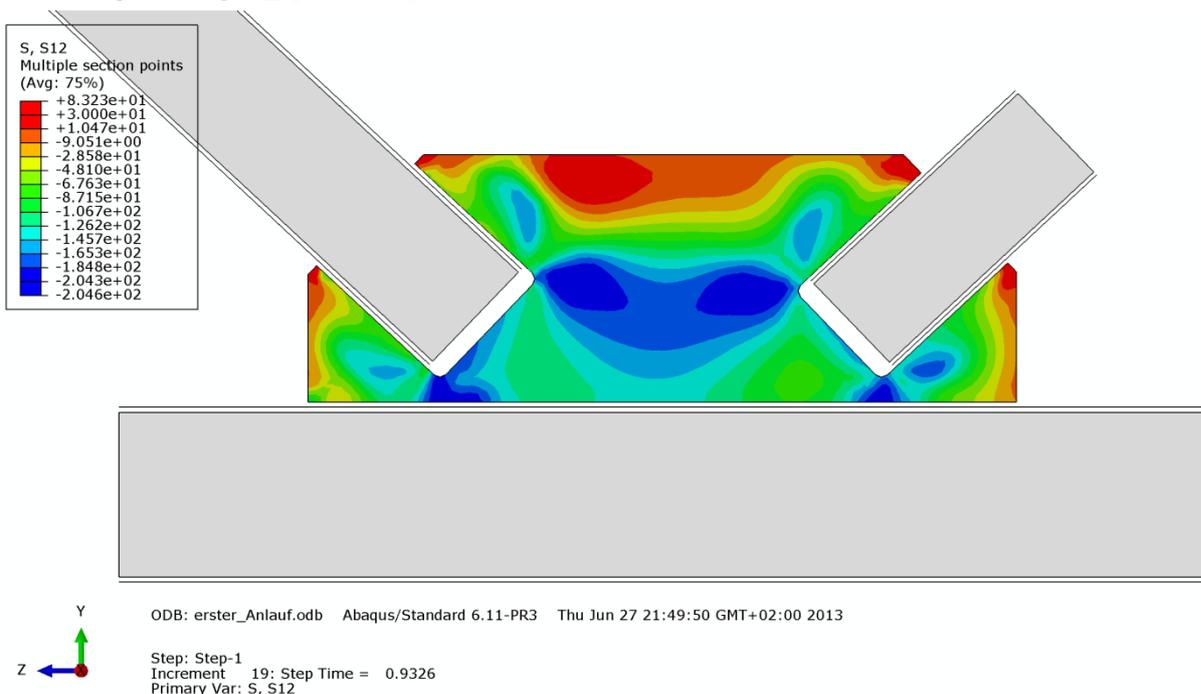


Abbildung B.268 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

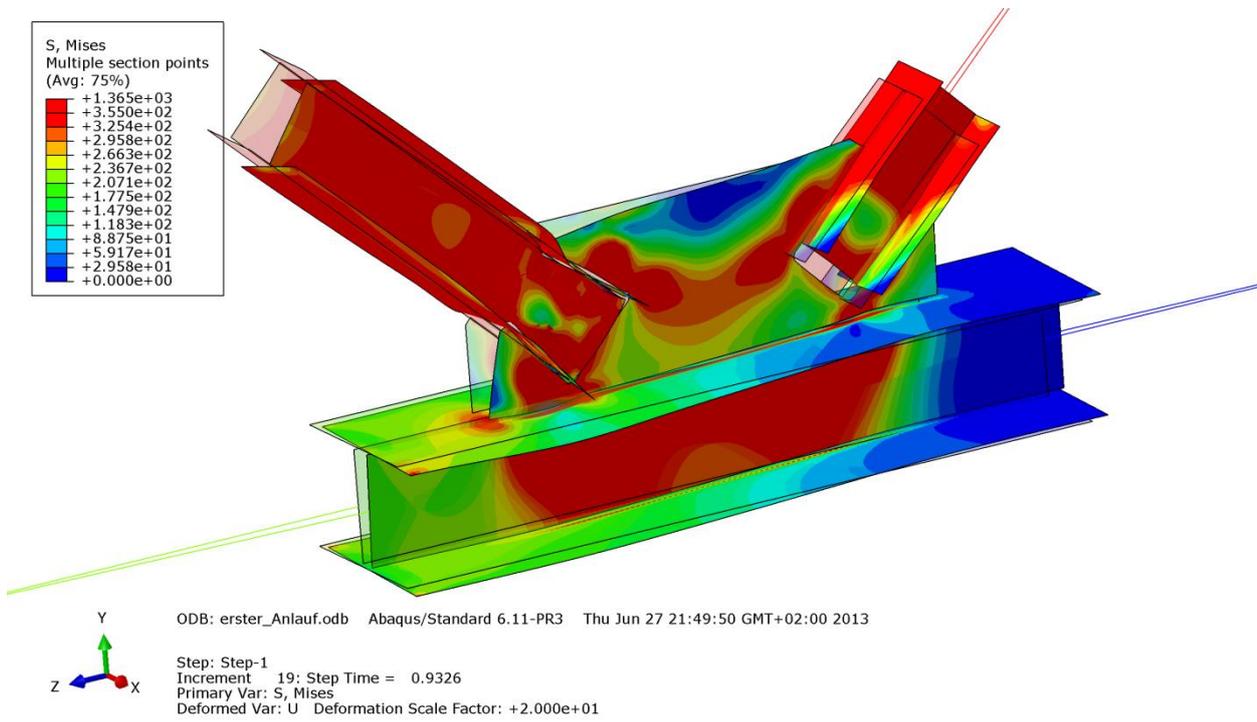


Abbildung B.269 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

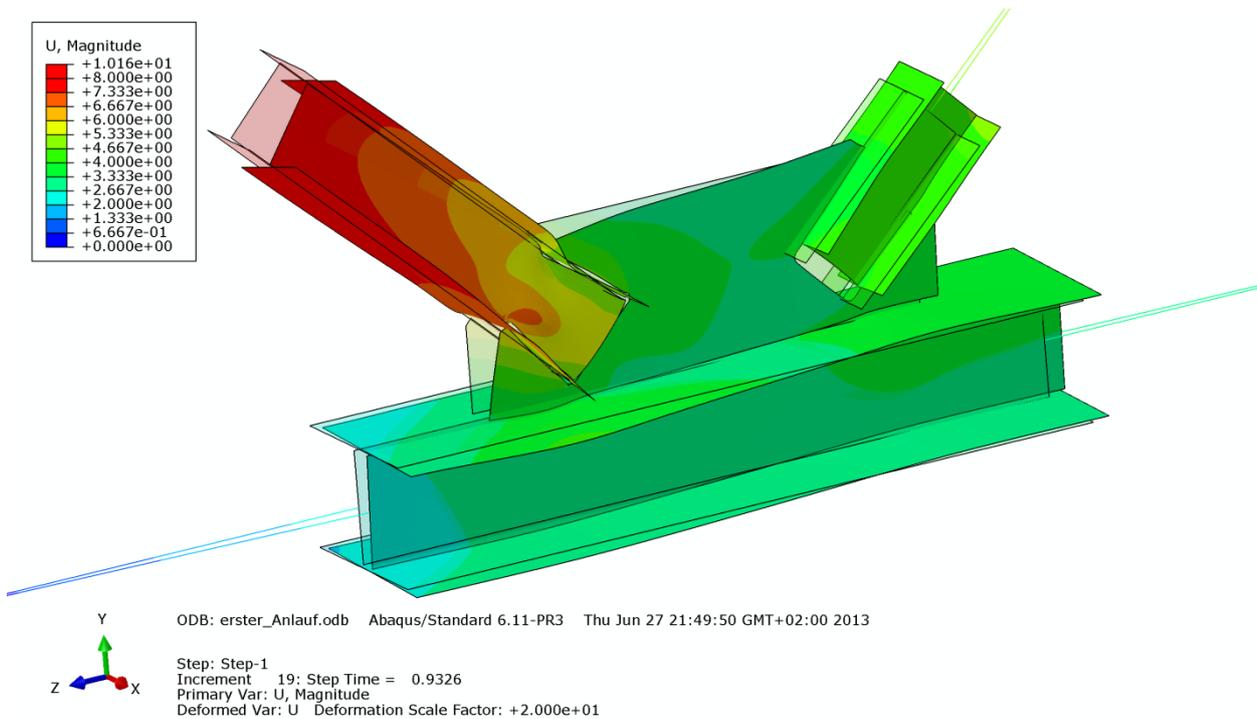


Abbildung B.270 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.2.2.7 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch das Biegedrillknicken des Untergurtstabes und das Ausweichen mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe, wie die Abbildungen B.271 bis B.274 zeigen. Die Druckstrebe und das Knotenblech plastizieren in großen Bereichen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

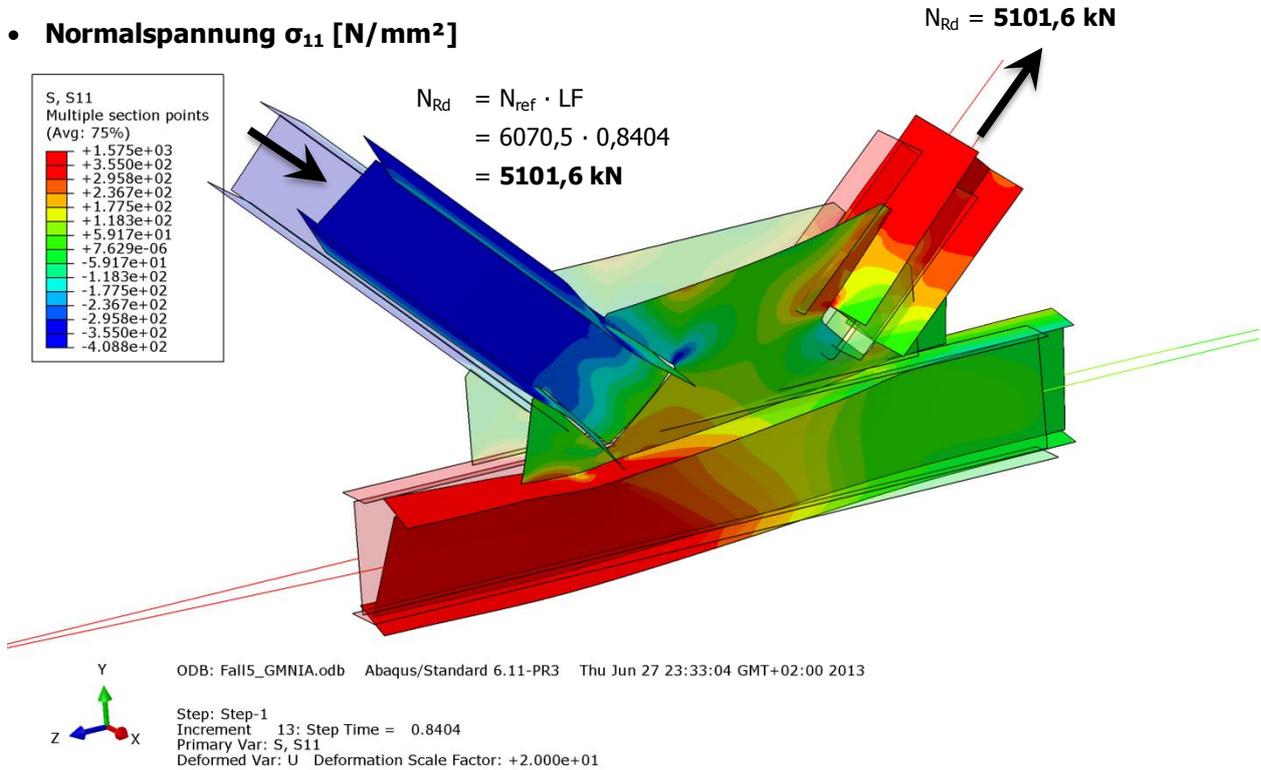


Abbildung B.271 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

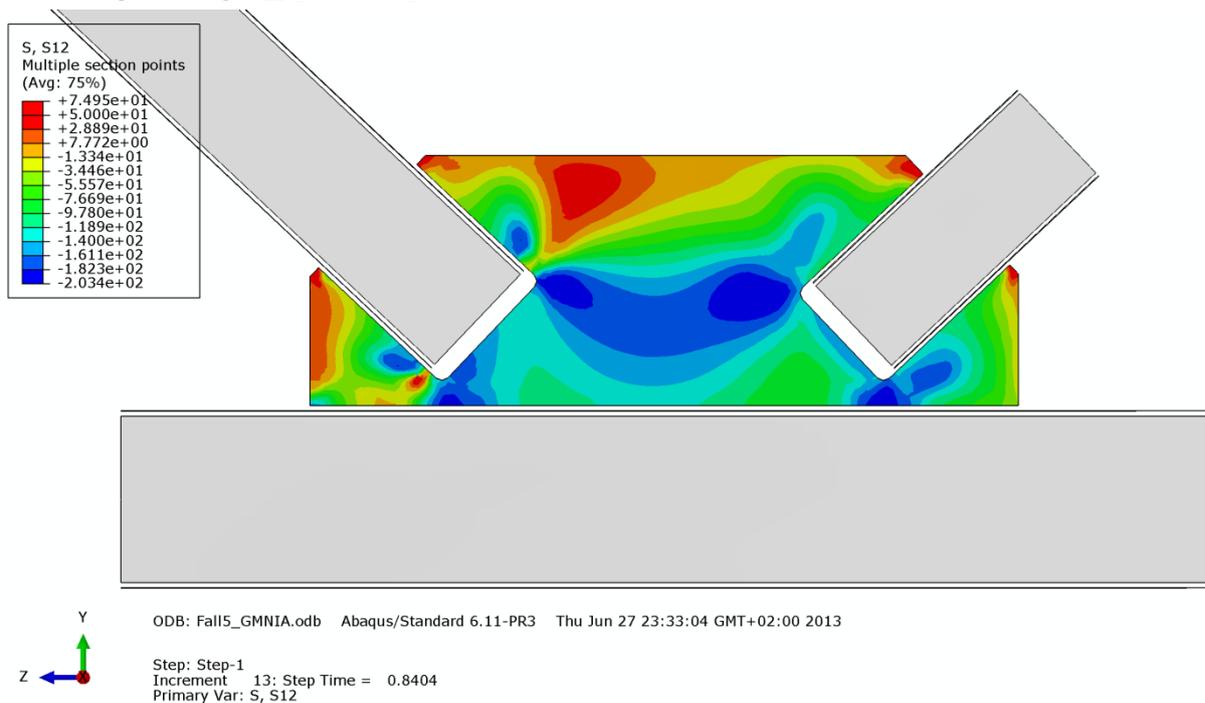


Abbildung B.272 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

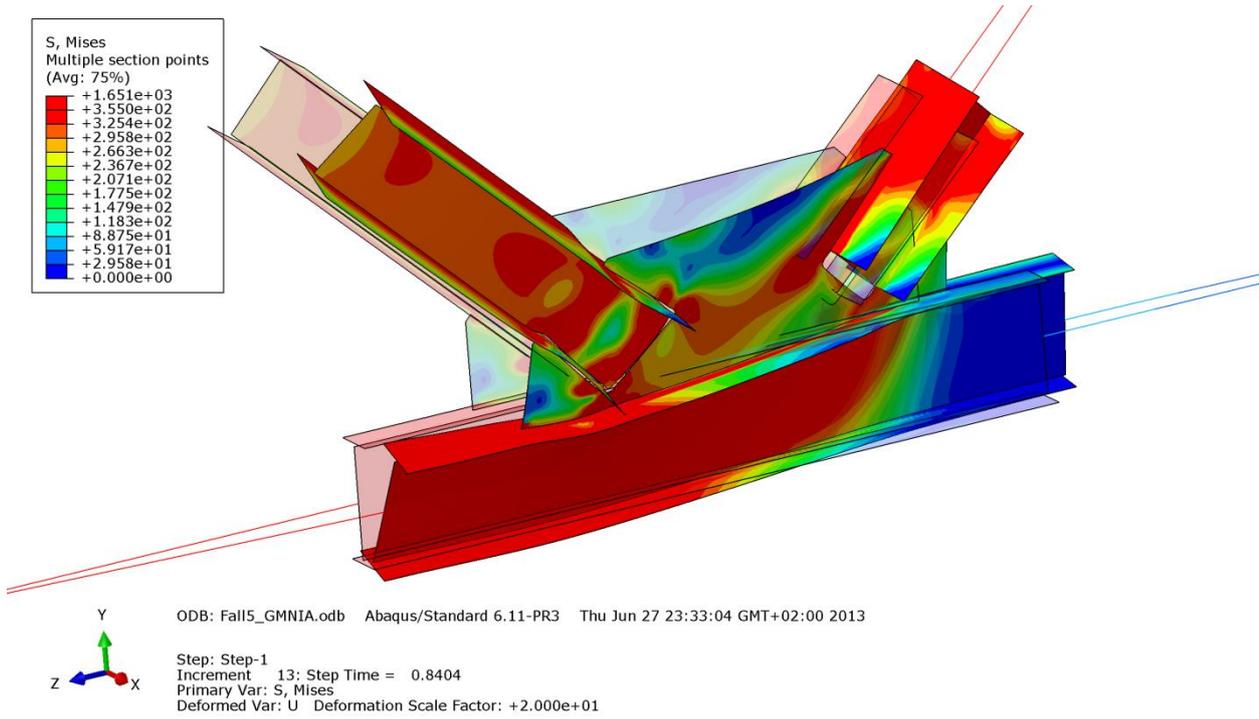


Abbildung B.273 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

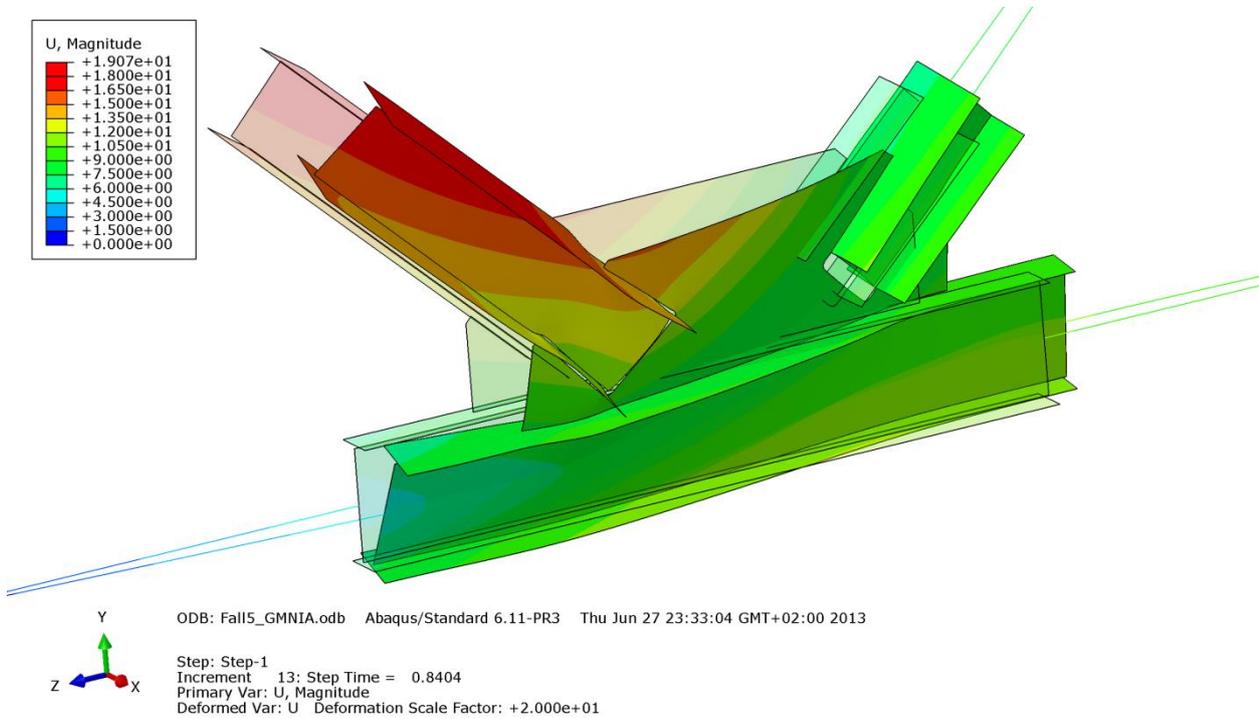


Abbildung B.274 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.2.2.8 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Biegedrillknicken des Untergurtstabes und gleichzeitigem Ausknicken des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.275 bis B.278 zeigen. Die Druckdiagonale und das Knotenblech plastizieren in großen Bereichen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

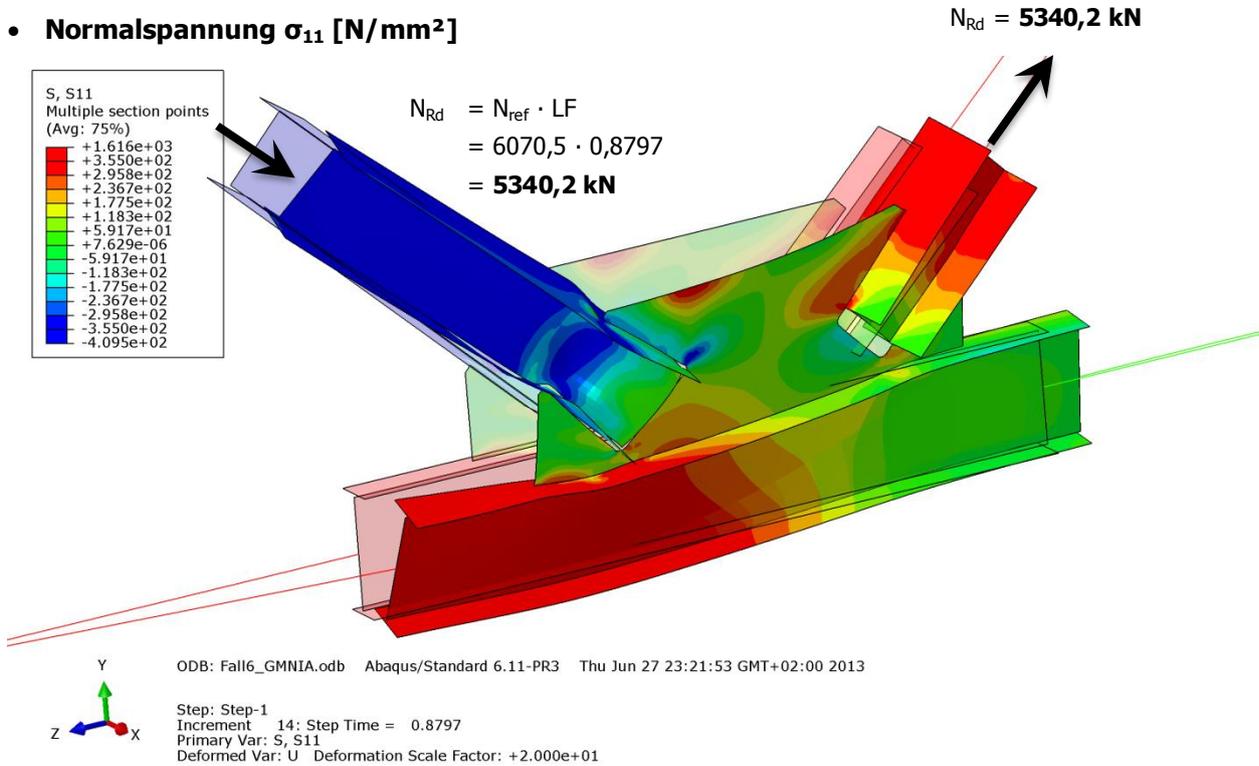


Abbildung B.275 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

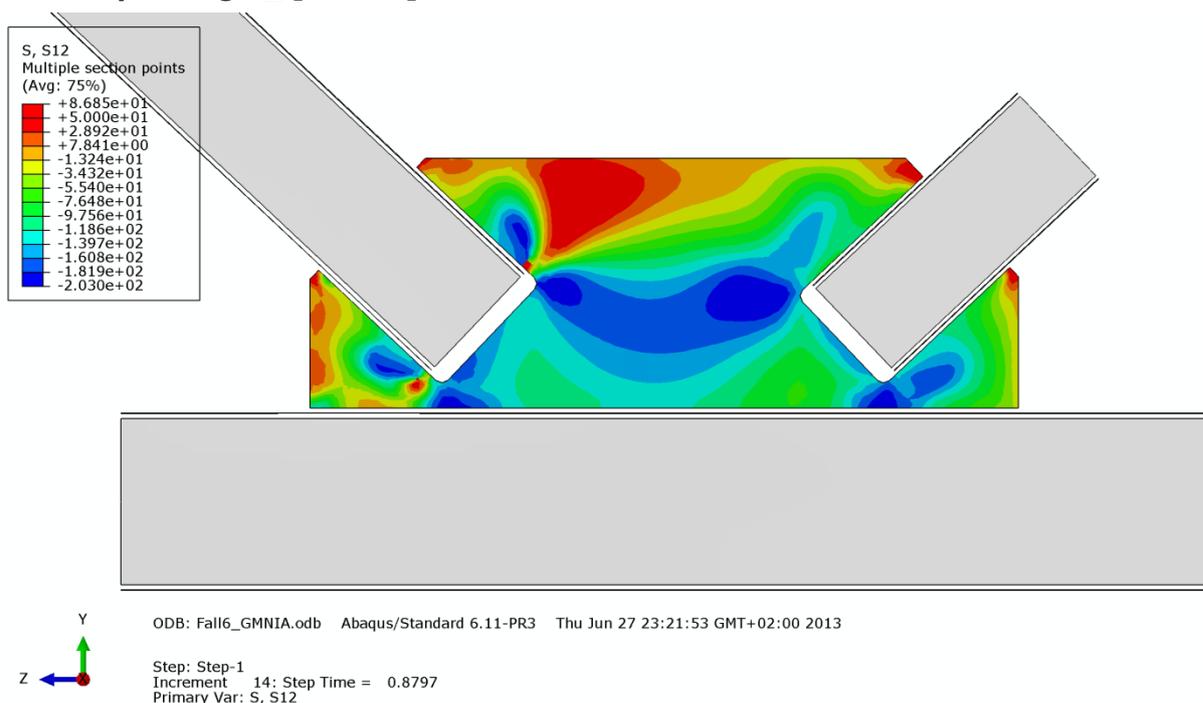


Abbildung B.276 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

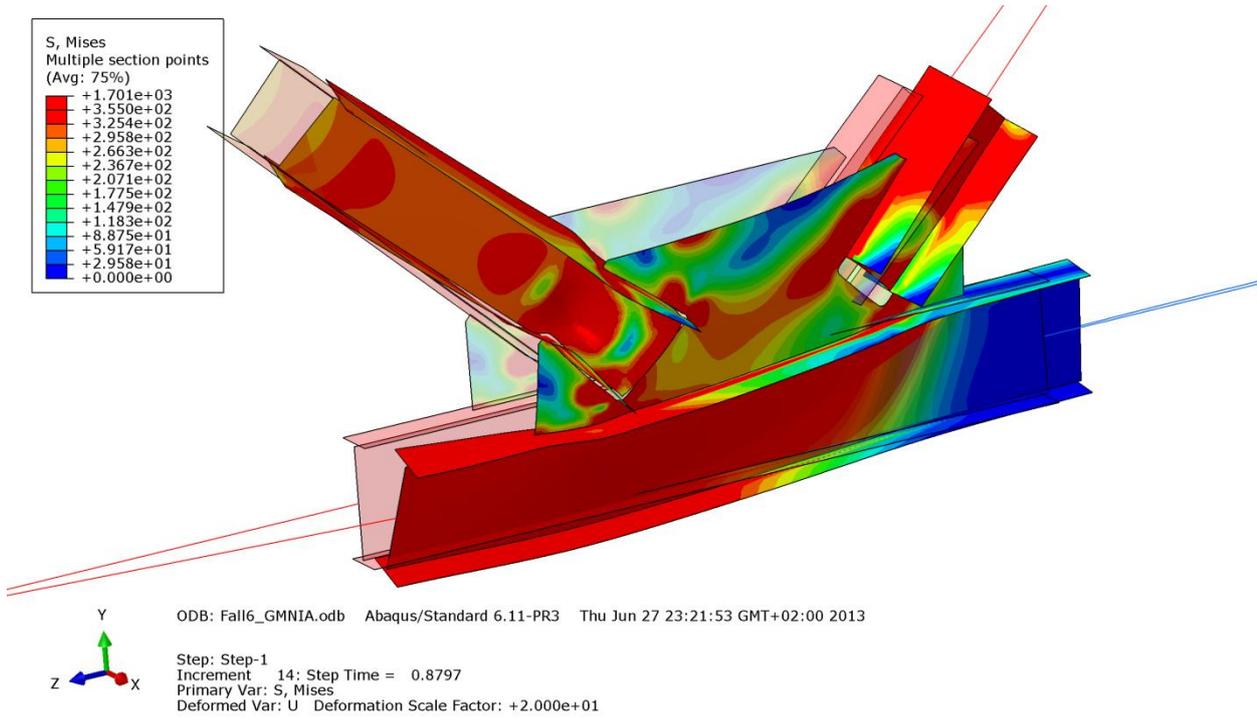


Abbildung B.277 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

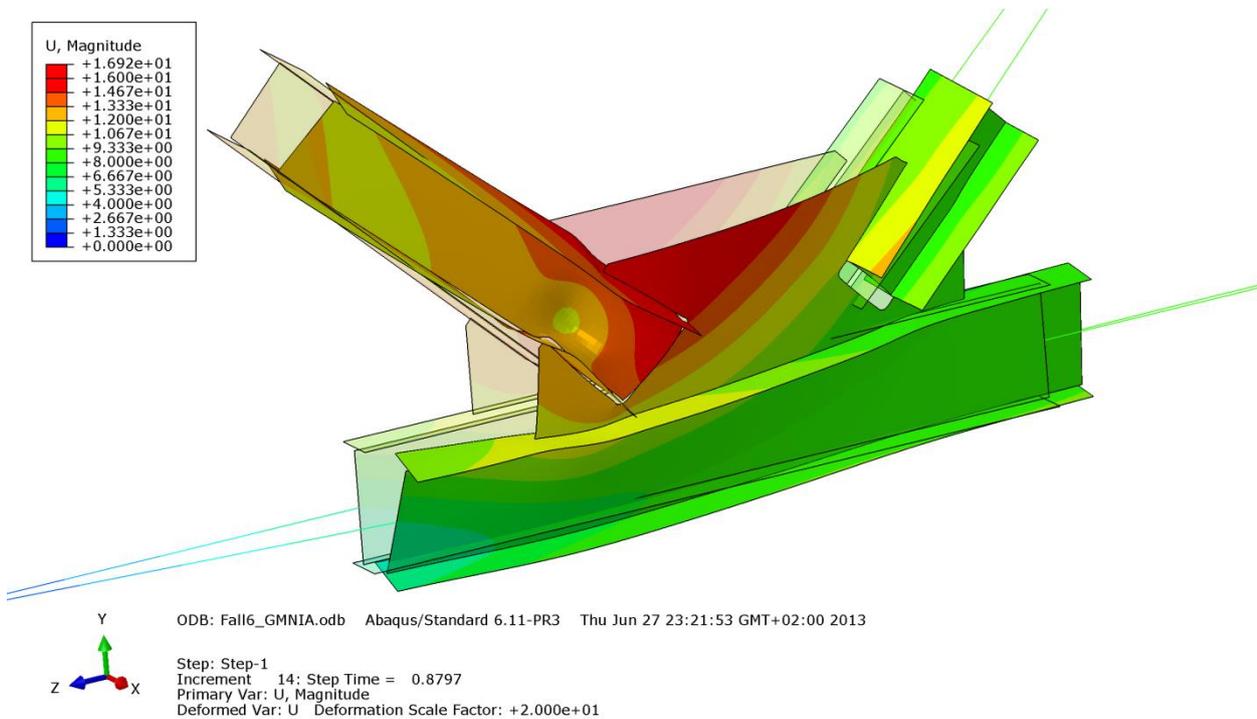


Abbildung B.278 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.2.2.9 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Biegedrillknicken des Untergurtstabes und einer Längsverschiebung mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe. Das Knotenblech knickt unter der Druckkraft aus, wie die Abbildungen B.279 bis B.282 zeigen. Die Druckstrebe und das Knotenblech plastizieren.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

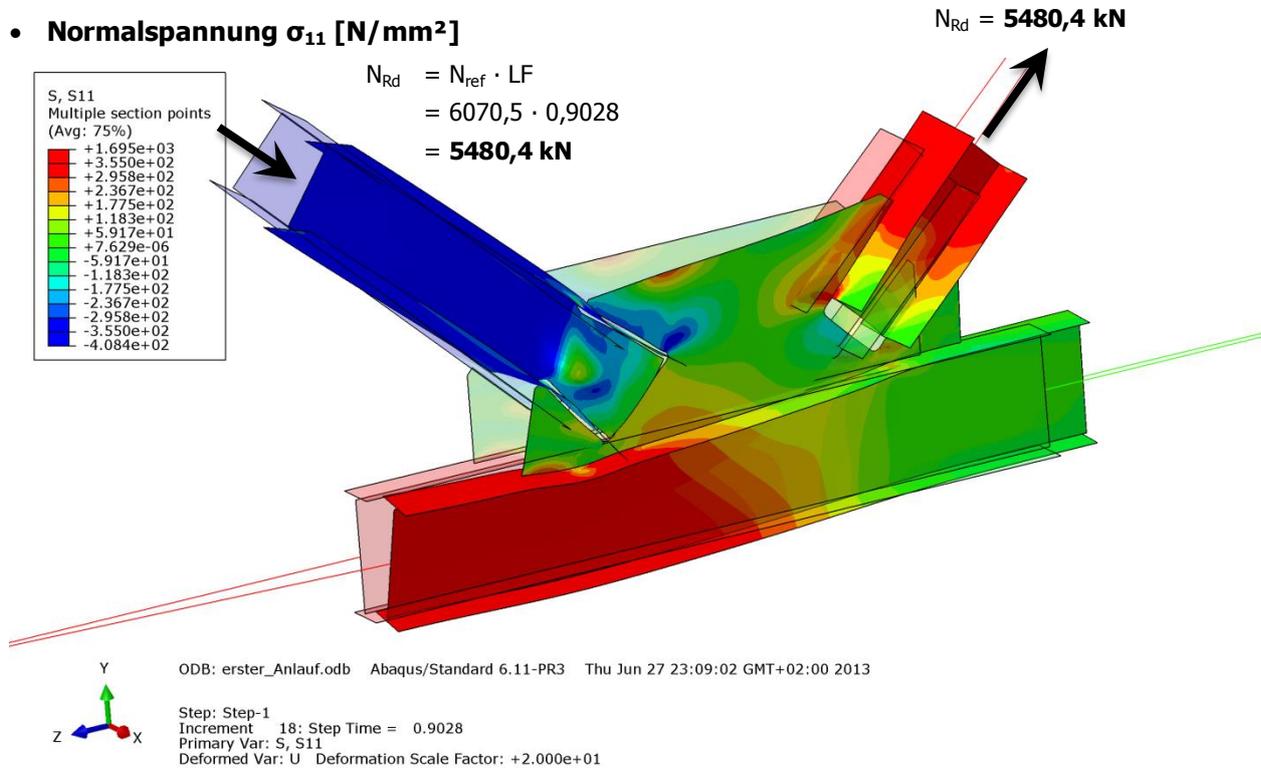


Abbildung B.279 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

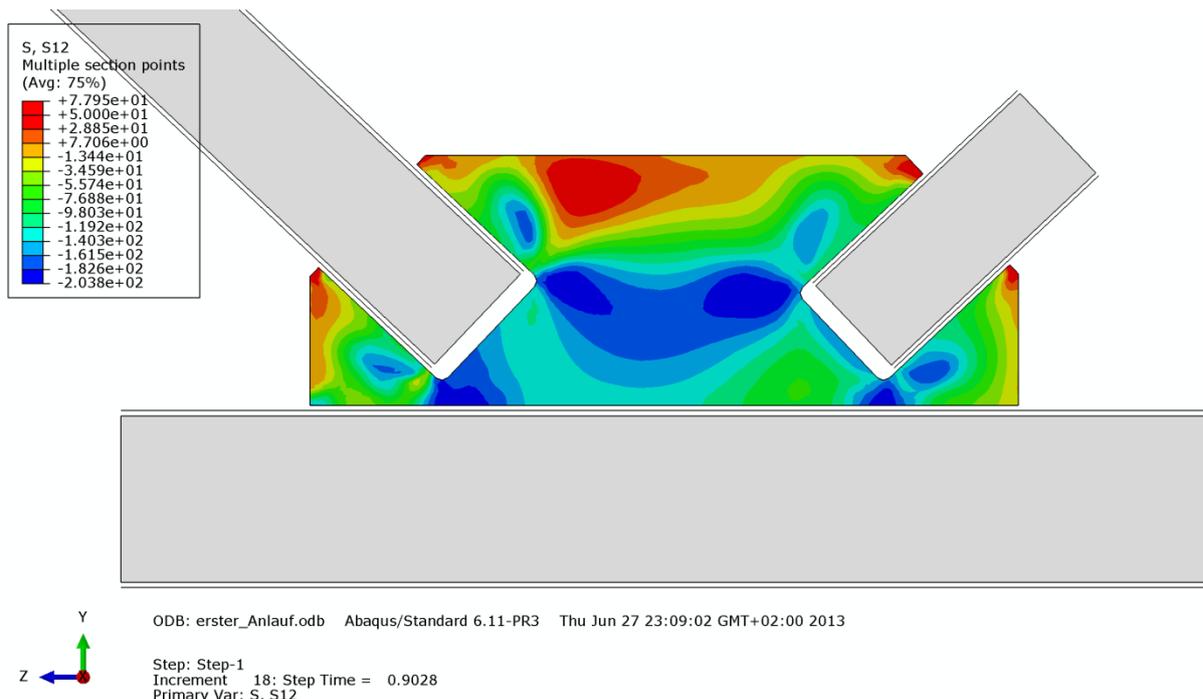


Abbildung B.280 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

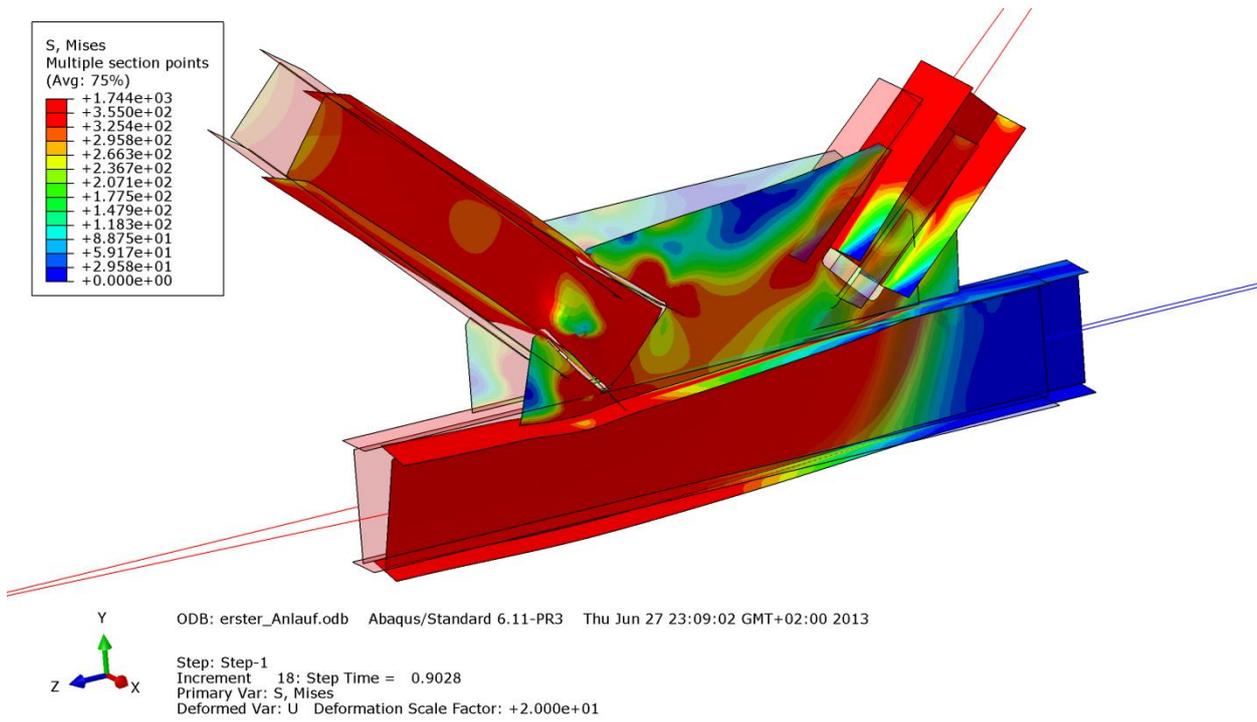


Abbildung B.281 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

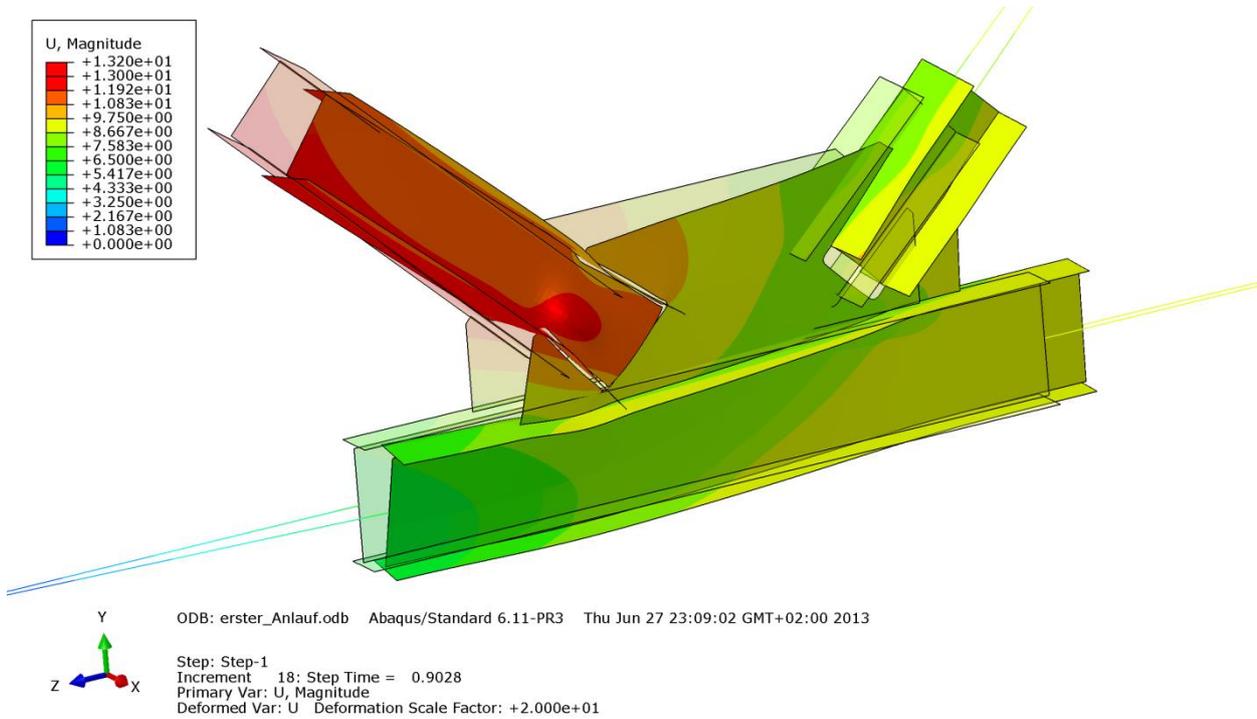


Abbildung B.282 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

B - 7.2.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite

Die Tabelle B.47 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit verschiedenen Untergurtbreiten, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. mit der Imperfektion als Knotenblechschiefstellung gegenüber:

- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 300\text{mm}$ mit linear elastisch – ideal plastischer Materialmodellierung des gesamten Systems (aus Abschnitt B - 5.3)
- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 300\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Doppelte Untergurtbreite $b_{UG} = 600\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Halbe Untergurtbreite $b_{UG} = 150\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge $L^* =$	4303mm
Material	S355	$\lambda_{Z,0,L^*} =$	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3648mm
$t_{\text{Knotenblech}} =$	45mm	$\lambda_{Z,0,L_{ges}} =$	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 300mm (plastisch)		
$LF = 0,8346$	$LF = 0,8344$	$LF = 0,8344$
$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5066,4 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5065,2 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5065,2 kN
UG: Breite 300mm (Zugstr. und UG elastisch)		
$LF = 0,8941$	$LF = 0,9003$	$LF = 0,9197$
$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5427,6 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5465,3 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5583,0 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG elastisch)		
$LF = 0,9051$	$LF = 0,8880$	$LF = 0,9326$
$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5494,4 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5390,6 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5661,3 kN
UG: Breite 150mm (Zugstr. und UG elastisch)		
$LF = 0,8404$	$LF = 0,8797$	$LF = 0,9028$
$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5101,6 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5340,2 kN	$LF \cdot N_{ref} = N_{Rd} =$ 5480,4 kN
$N_{pl} - \text{Druckstrebe} =$		5844,7 kN
$N_{pl} - \text{Zugstrebe} =$		5505,5 kN
$N_{ref} =$		6070,5 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>		

Tabelle B.47 – Ergebnisse Gruppe 1 – Variation der Untergurtbreite

Die Abbildung B.283 lässt erkennen, dass bei der linear elastischen – ideal plastischen Materialmodellierung ein Versagen durch Plastizierung des Untergurtes eintritt (N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ limitiert die Traglast) und dadurch die Tragfähigkeit des Fachwerkknotens durch ein rein elastisches Untergurt- und Zugstrebenverhalten gesteigert werden kann.

Für die Knotenausführung der Gruppe 1 zeigt sich, dass eine Verbreiterung der Untergurtflansche zur Steigerung der Verdrehsteifigkeit des Untergurtes, nahezu keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Fachwerkknotensystems hat. Am sensibelsten auf eine Verringerung der Breite des Untergurtes reagiert der Fall mit Imperfektion affin zur ersten Eigenform. Bei einer Halbierung der Untergurtbreite laut Profiltabelle von 300mm auf 150mm sinkt die Tragfähigkeit um rund 6%. Es ist für die Gruppe 1 zu erkennen, dass die Tragfähigkeitsdifferenz zwischen $b_{UG} = 150\text{mm}$ und $b_{UG} = 600\text{mm}$ von etwa 7% (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) sehr gering ist, wenn man bedenkt, dass sich die Untergurtflanschbreite um den Faktor 4 ändert.

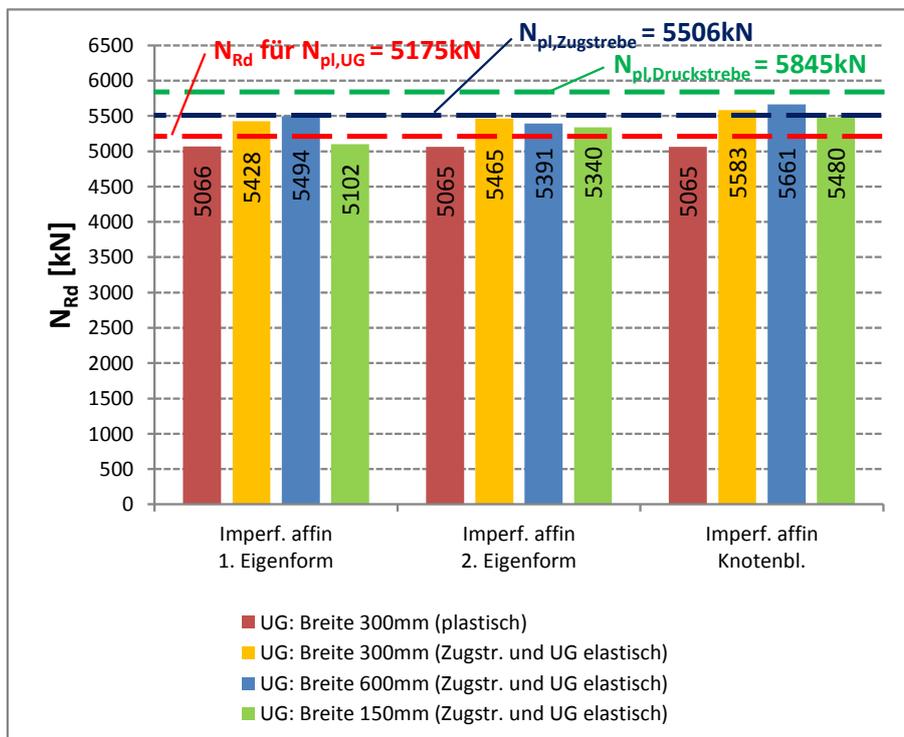


Abbildung B.283 – Ergebnisse Gruppe 1 – Variation der Untergurtbreite

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben, sowie die Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft (für die reguläre Untergurtflanschbreite von 300mm) notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 7.3 Gruppe 5

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 5 zu charakterisieren sind in Tabelle B.48 zusammengefasst.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge L^* =	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4085mm
$t_{Knotenblech}$ =	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.48 – FE-Eingangsdaten Gruppe 5

B - 7.3.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestellten Knotenblech angenommen. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die doppelte und die halbe Untergurtbreite gezeigt. Die erste und zweite Knickeigenform für die Nennuntergurtbreite war bereits in Kapitel B - 4.6.1 in den Abbildungen B.103 und B.104 dargestellt.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

- **Untergurt-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$**

Die erste Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.6.1 in der Abbildung B.103 gezeigt.

- **Untergurt-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.284 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$).

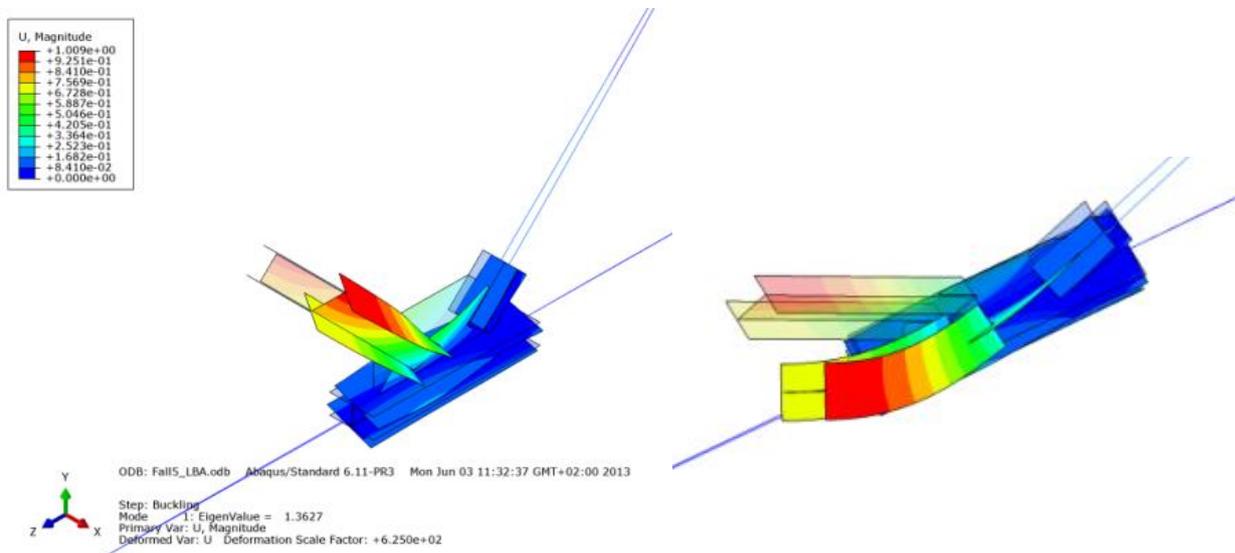


Abbildung B.284 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.285 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$).

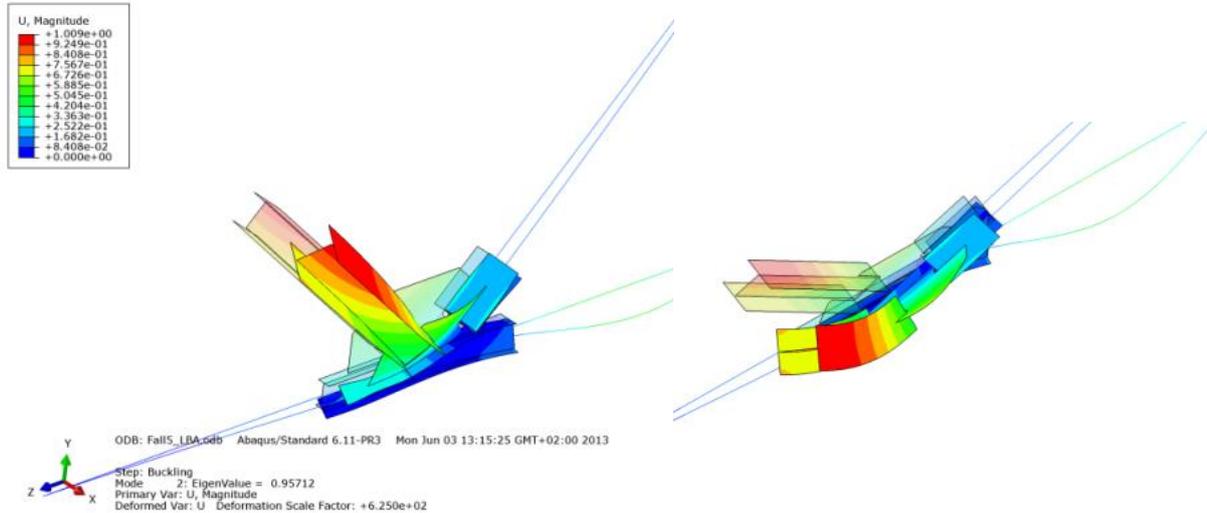


Abbildung B.285 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – erste Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

– **Untergurt-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$**

Die zweite Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.6.1 in der Abbildung B.104 gezeigt.

– **Untergurt-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.286 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$).

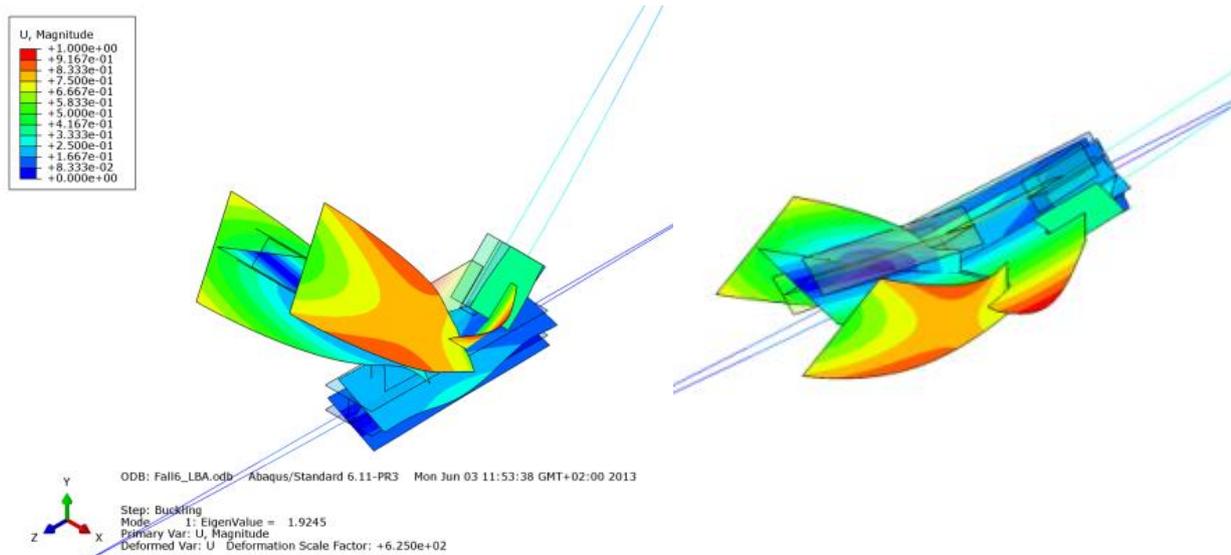


Abbildung B.286 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$.
Abbildung B.287 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$).

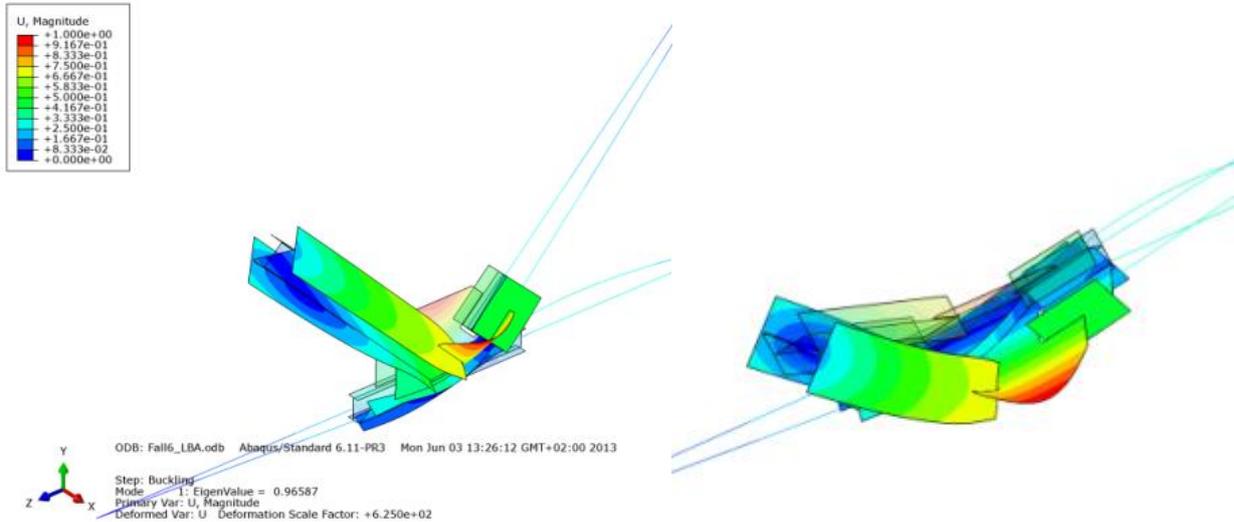


Abbildung B.287 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – zweite Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 2,8\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 2,4\text{mm}$), wie der Abbildung B.288 entnommen werden kann. Für jede Untergurtbreite ($1,0 \cdot b_{UG}$, $2,0 \cdot b_{UG}$, $0,5 \cdot b_{UG}$) wurde eine Traglastberechnung mit Knotenblechschiefstellung als Imperfektion durchgeführt.

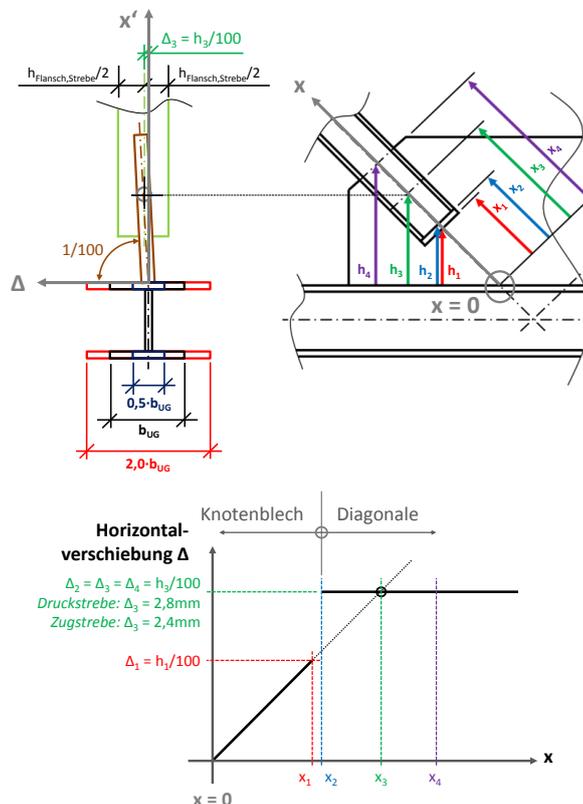


Abbildung B.288 – Eigenform der Gruppe 5 – Imperfektion im Knotenblech mit variierten Untergurtbreiten

B - 7.3.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 7.3.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch Ausweichen der Druckstrebe sowie des Untergurtstabes, wie die Abbildungen B.289 bis B.292 zeigen. Die Druckstrebe auf der Biegedruckseite und das Knotenblech plastizieren in großen Bereichen. Zuzolge der Druckbeanspruchung knickt das Knotenblech aus.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

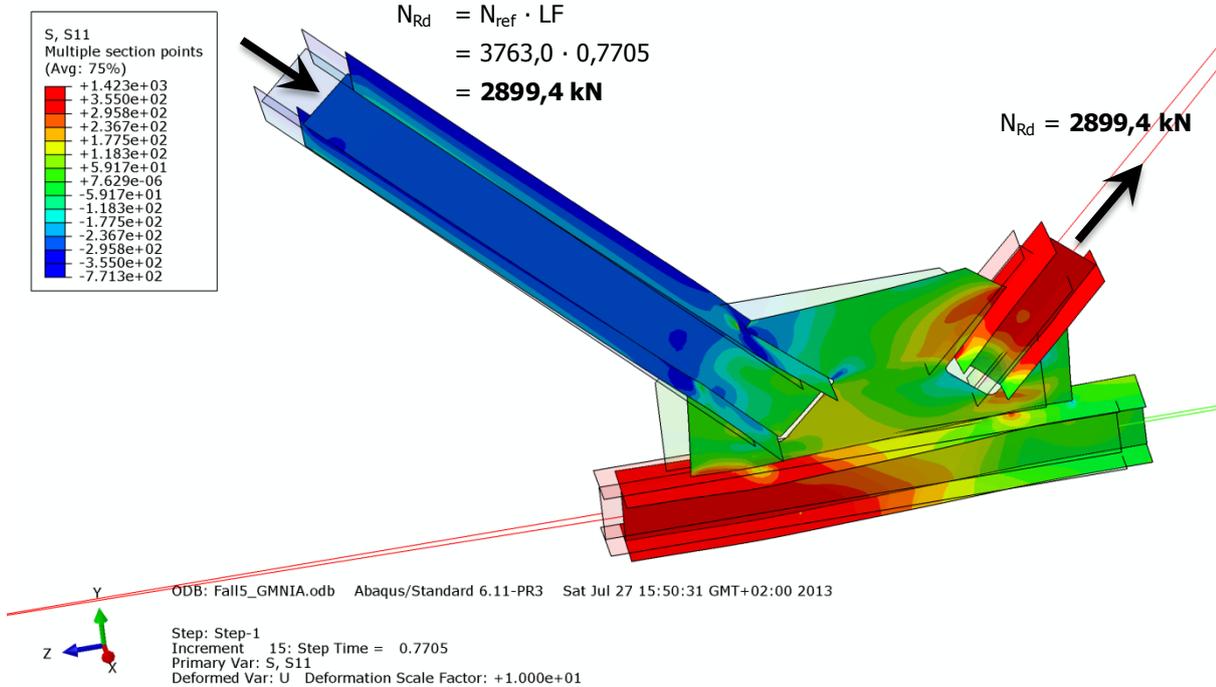


Abbildung B.289 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

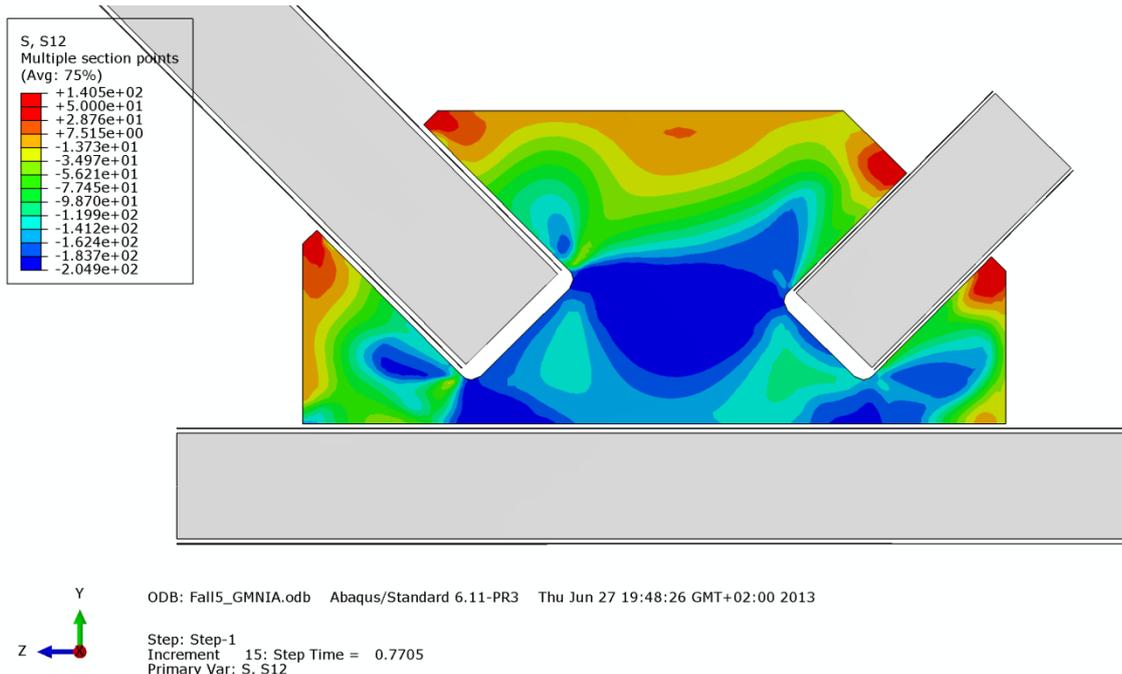


Abbildung B.290 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

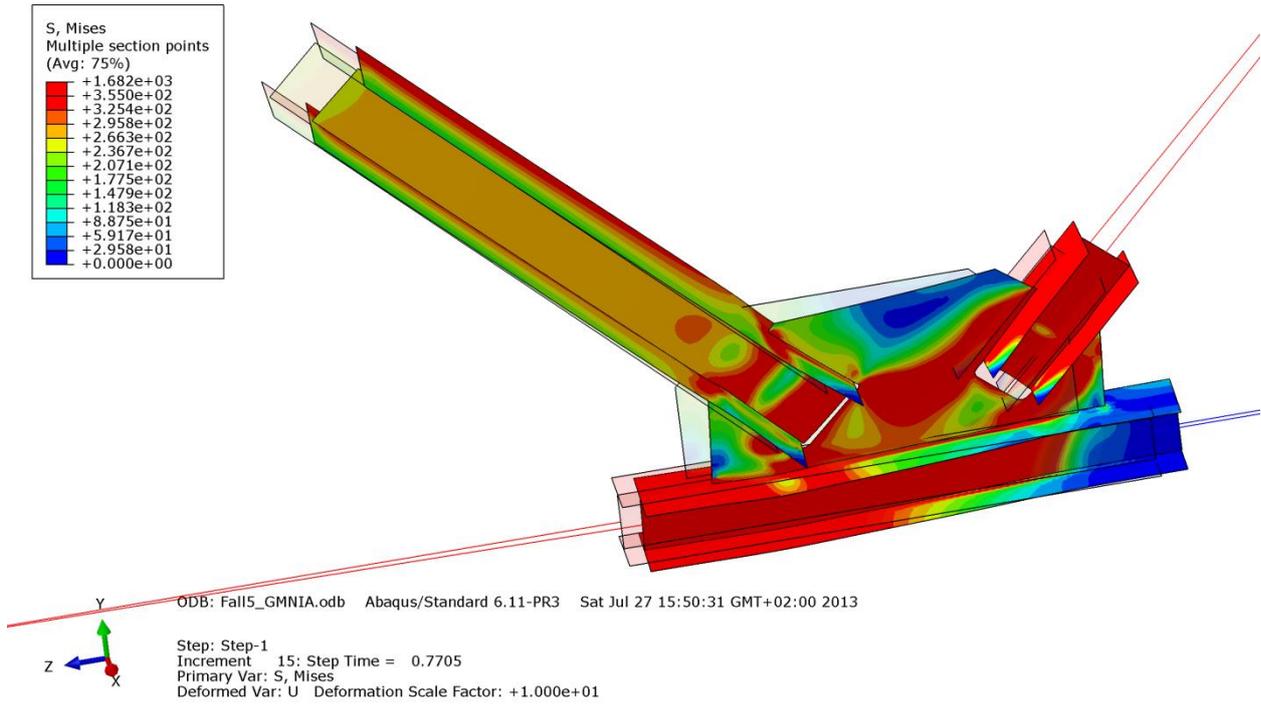


Abbildung B.291 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

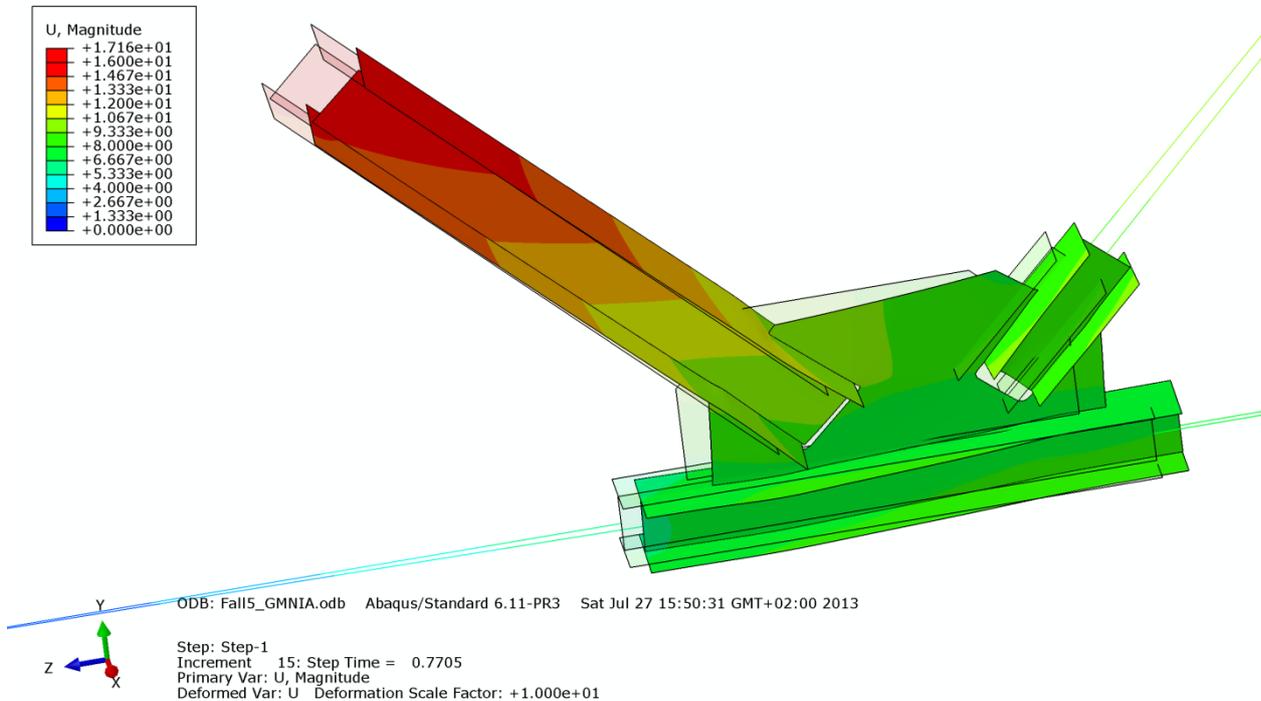


Abbildung B.292 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

B - 7.3.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: 1,0·b_{UG} = 200mm

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe sowie durch Ausweichen des Untergurtstabes, wie in den Abbildungen B.293 bis B.296 deutlich zu erkennen ist. Zuzufolge des Steifigkeitsverlustes durch Plastizierung knickt das Knotenblech aus und versagt in Kombination mit der Druckstrebe.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

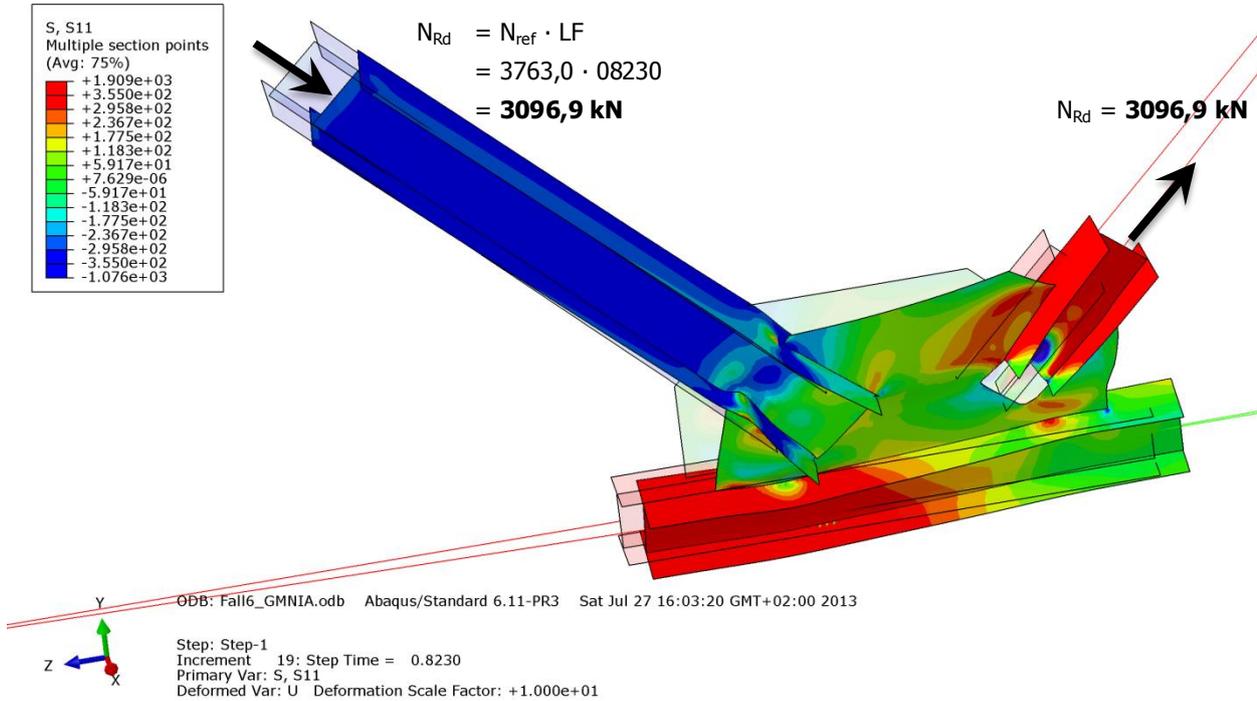


Abbildung B.293 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

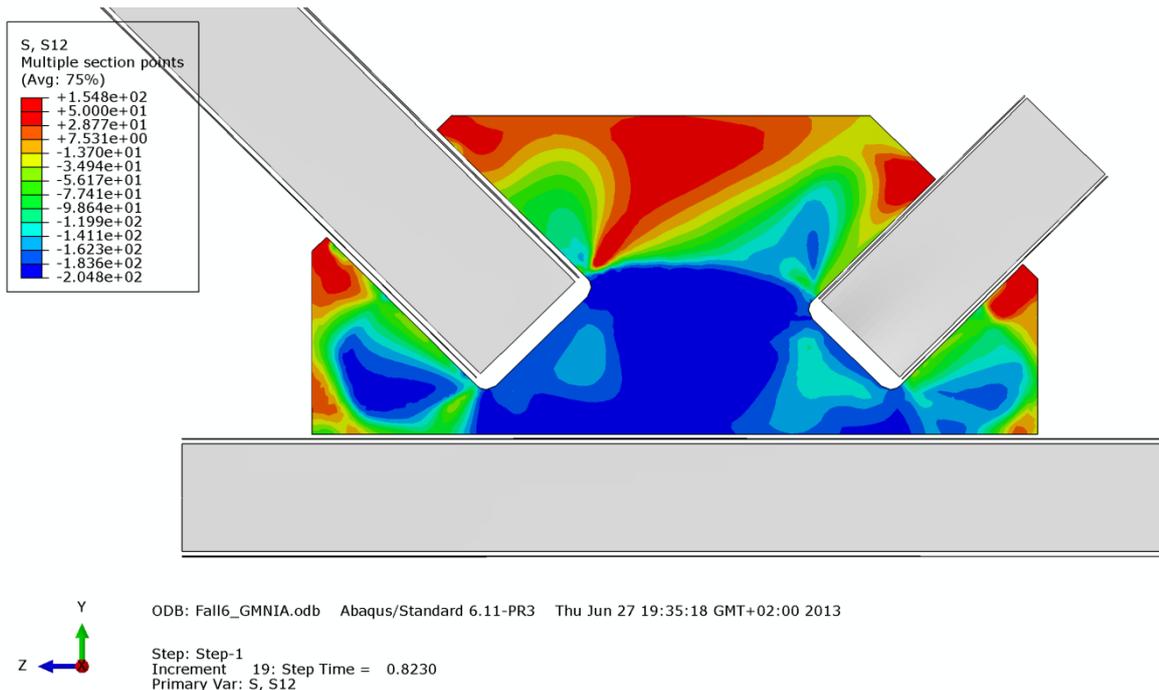


Abbildung B.294 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]

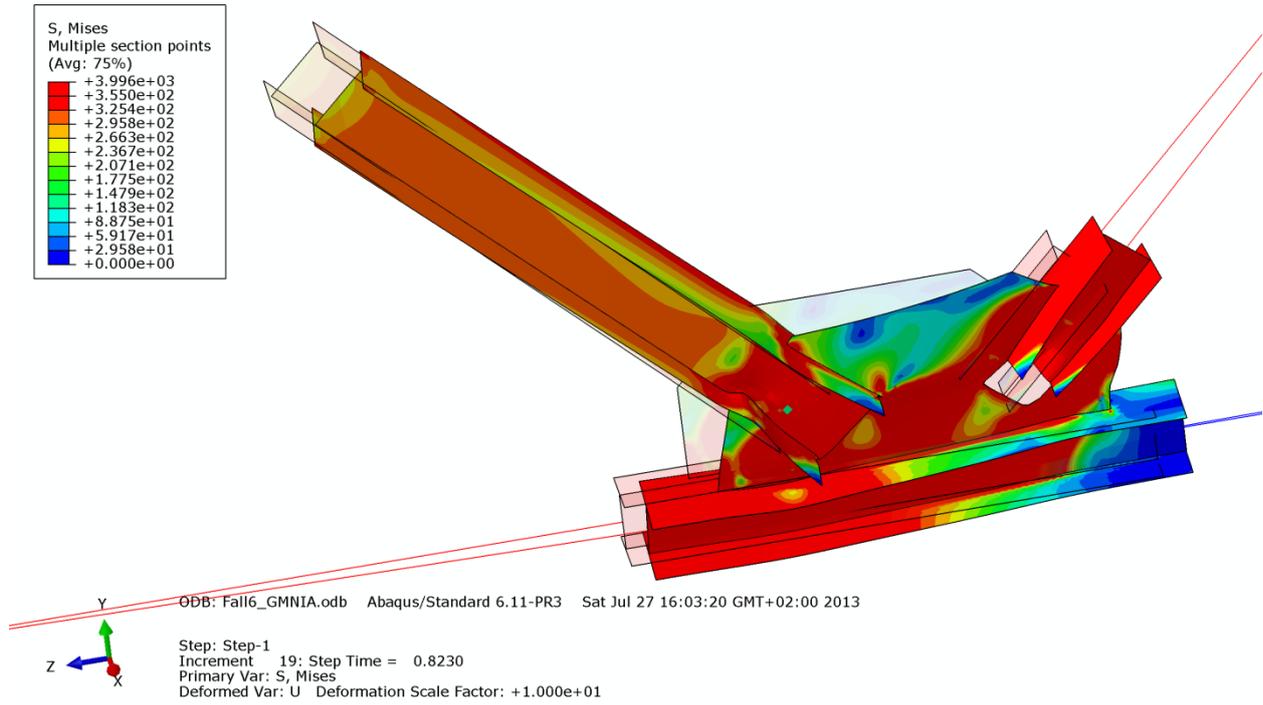


Abbildung B.295 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• Verformung [mm]

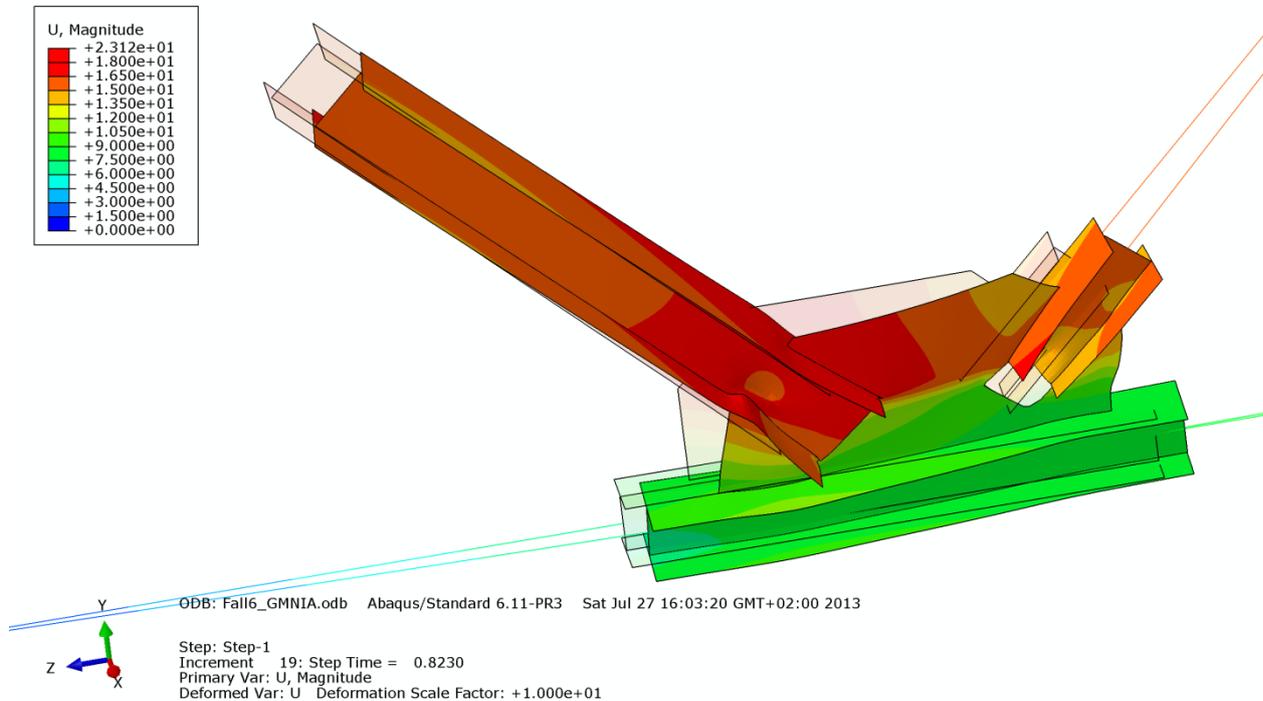


Abbildung B.296 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 7.3.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 200\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist gekennzeichnet durch eine Längsverschiebung mit Verdrehung der Druckstrebe sowie dem Ausweichen des Untergurtes, wie die Abbildungen B.297 bis B.300 zeigen. Zuzufolge des Steifigkeitsverlustes durch Plastizierung knickt das Knotenblech aus. Auch der Steg der Druckdiagonale im Einbindebereich ist voll durchplastiziert.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

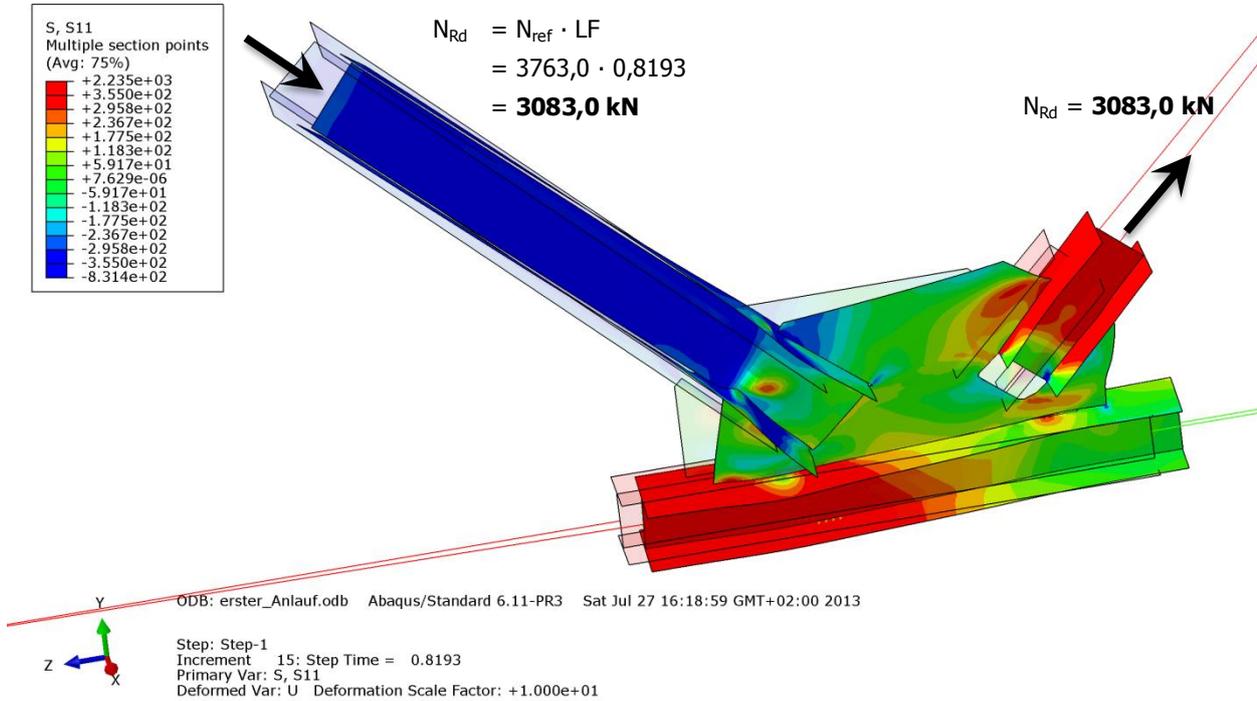


Abbildung B.297 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

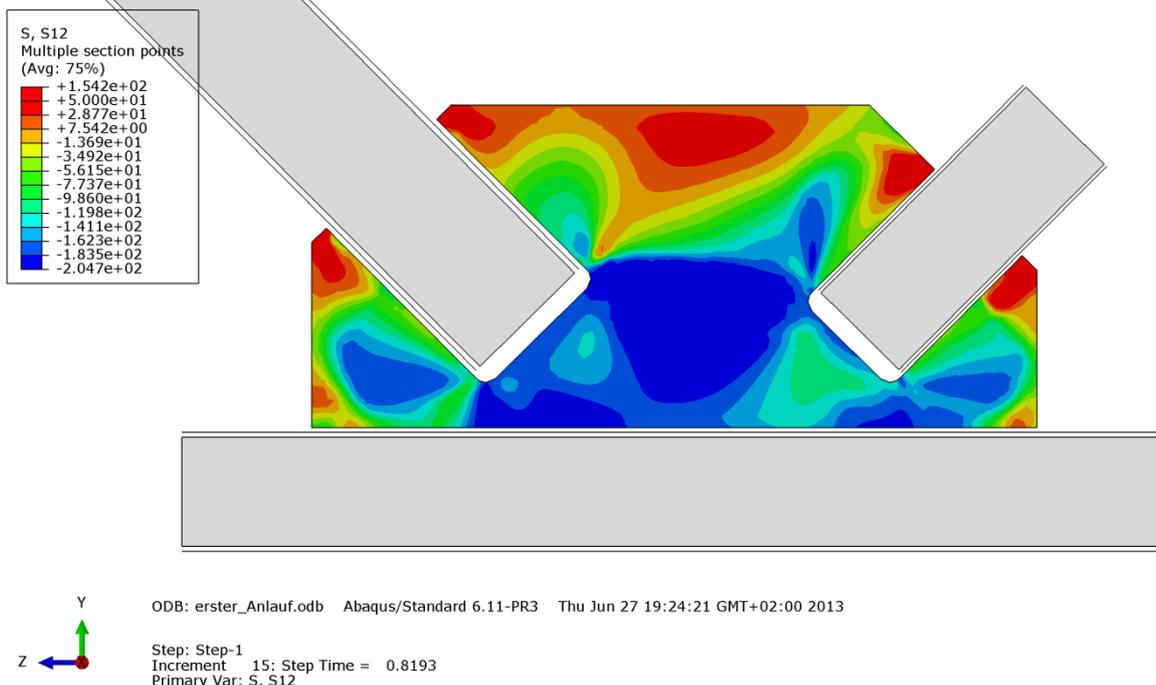


Abbildung B.298 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

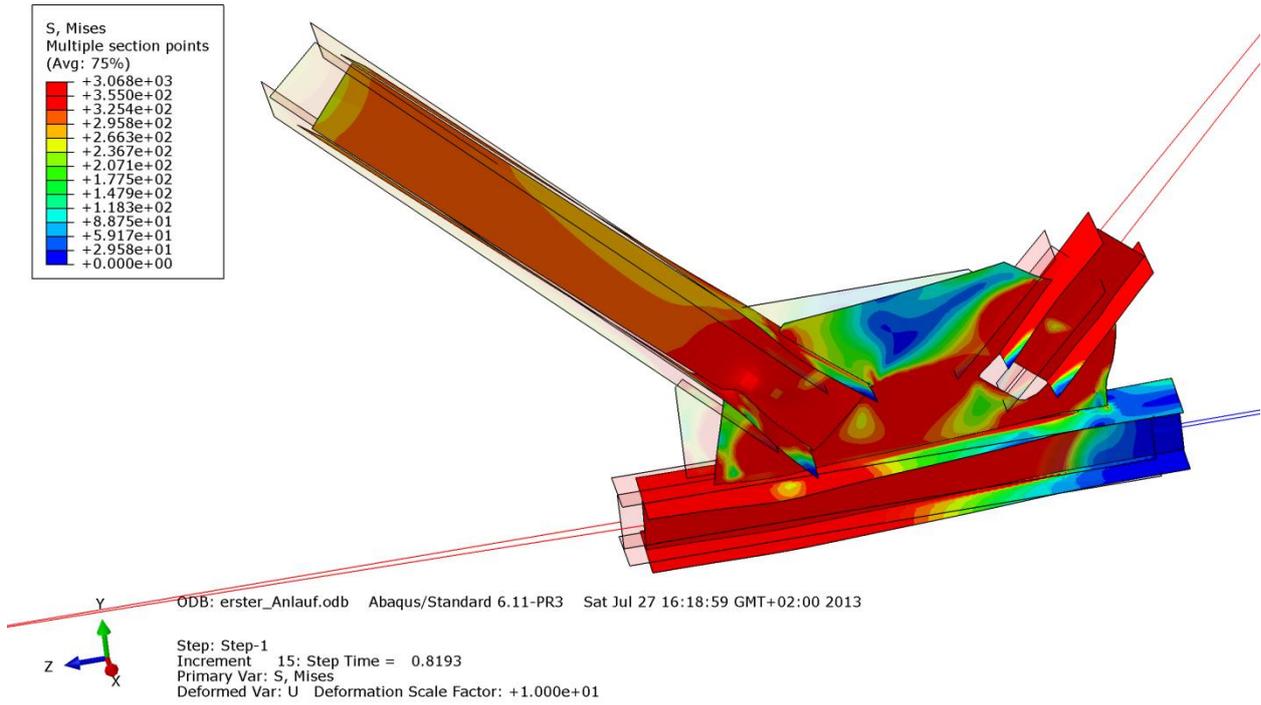


Abbildung B.299 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

• **Verformung [mm]**

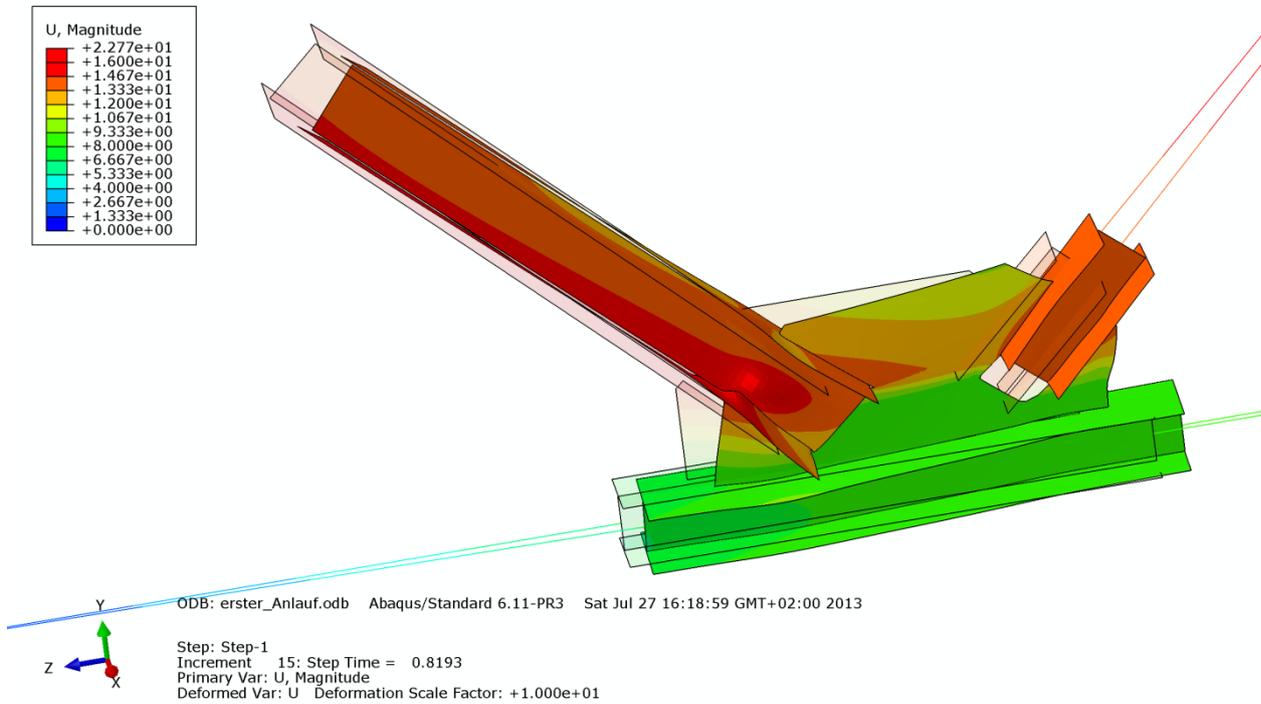


Abbildung B.300 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung

B - 7.3.2.4 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Abbildungen B.301 bis B.304 zeigen, dass die Versagensform durch den Steifigkeitsverlust des Knotenbleches durch Plastizierung des Werkstoffes geprägt ist. Das Knotenblech ist im Bereich der Kraftumlenkung voll durchplastiziert und knickt aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

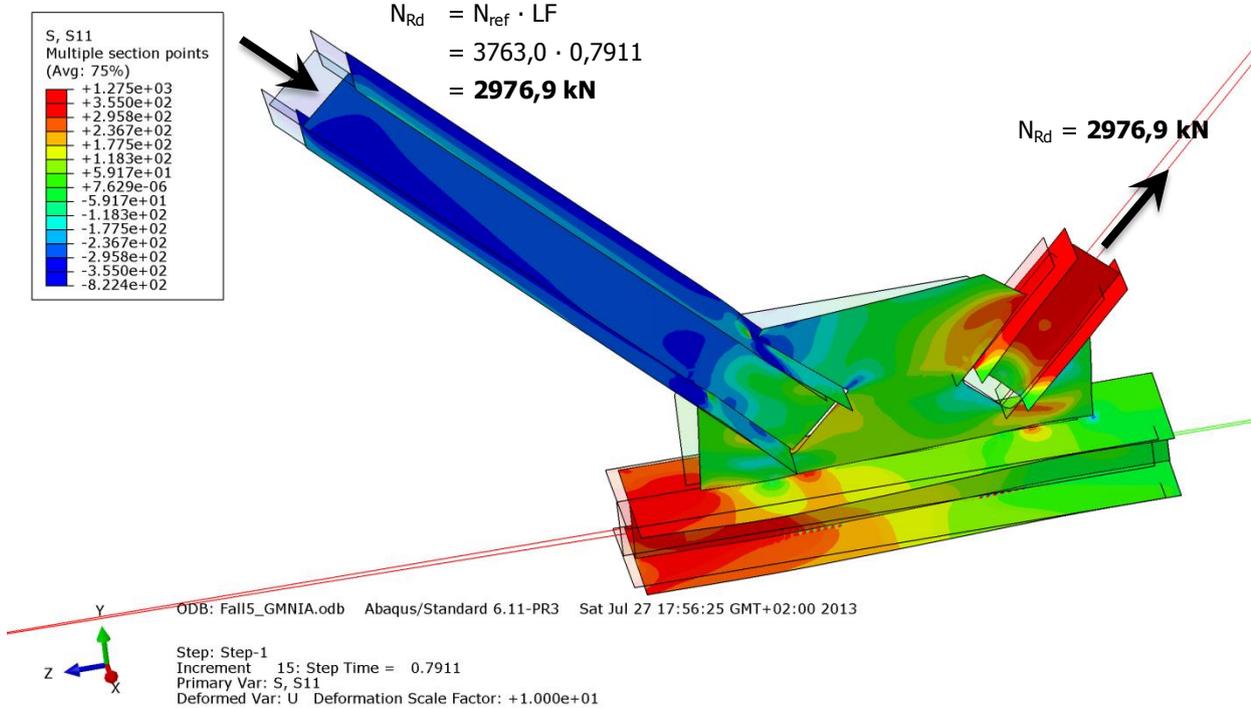


Abbildung B.301 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

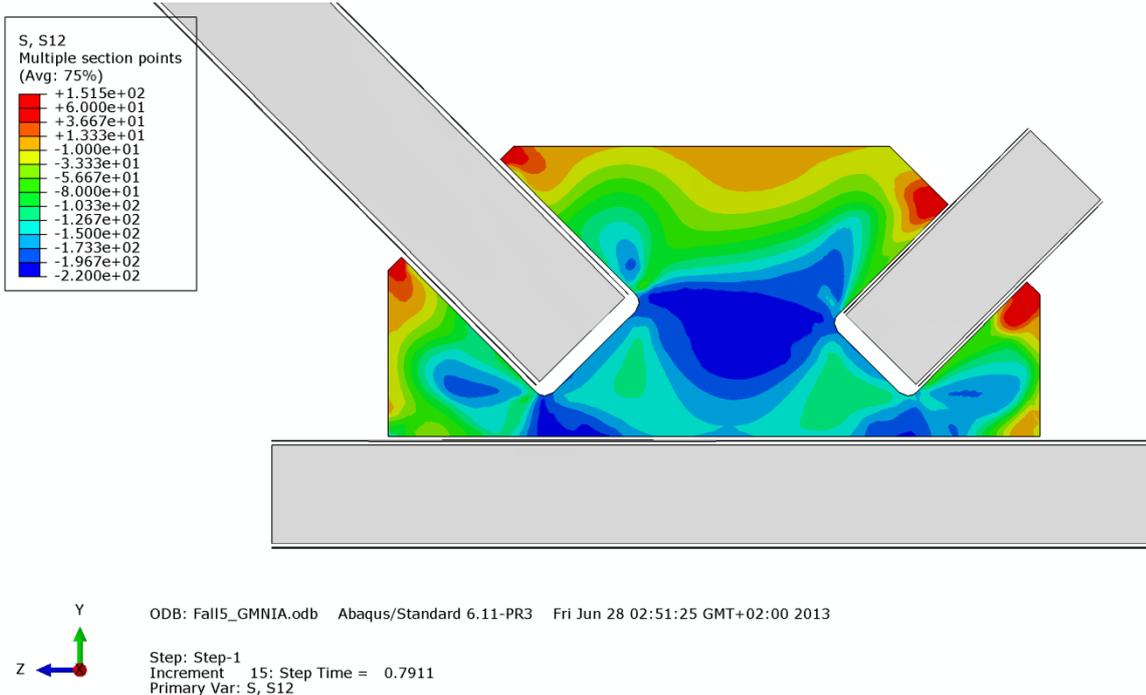


Abbildung B.302 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

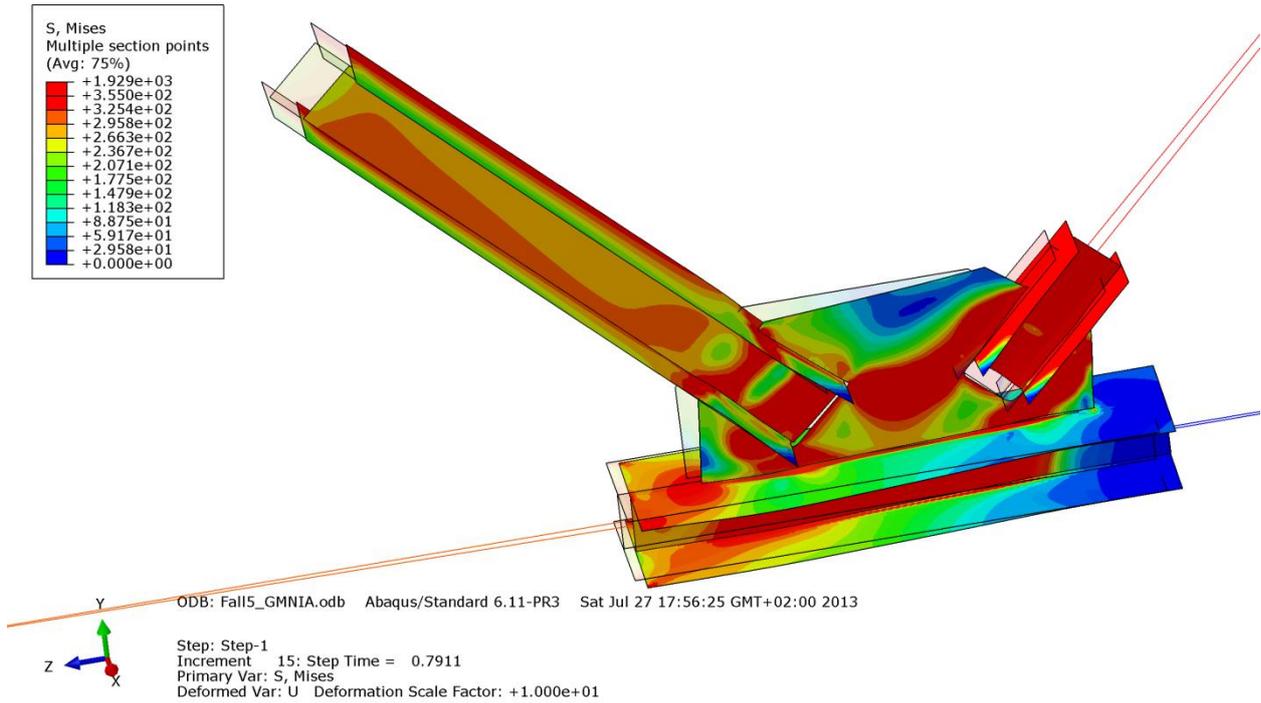


Abbildung B.303 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

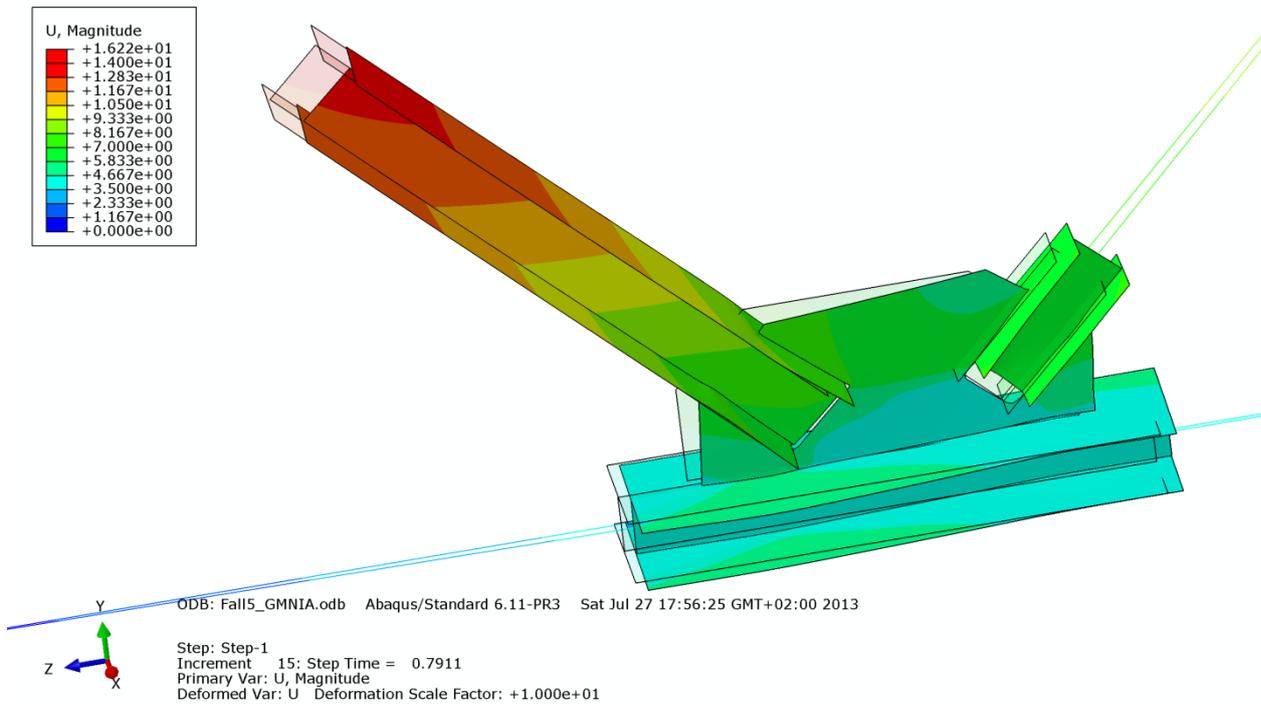


Abbildung B.304 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.3.2.5 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: 2,0·b_{UG} = 400mm

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die nachfolgenden Abbildungen B.305 bis B.308 zeigen, dass die Versagensform durch Längsverschiebung mit gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe geprägt ist. Der Einbindebereich der Druckstrebe in das Knotenblech ist durchplastiziert und versagt zufolge der Druckkraft der Strebe. Während der Untergurt sich kaum verdreht knickt das Knotenblech aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

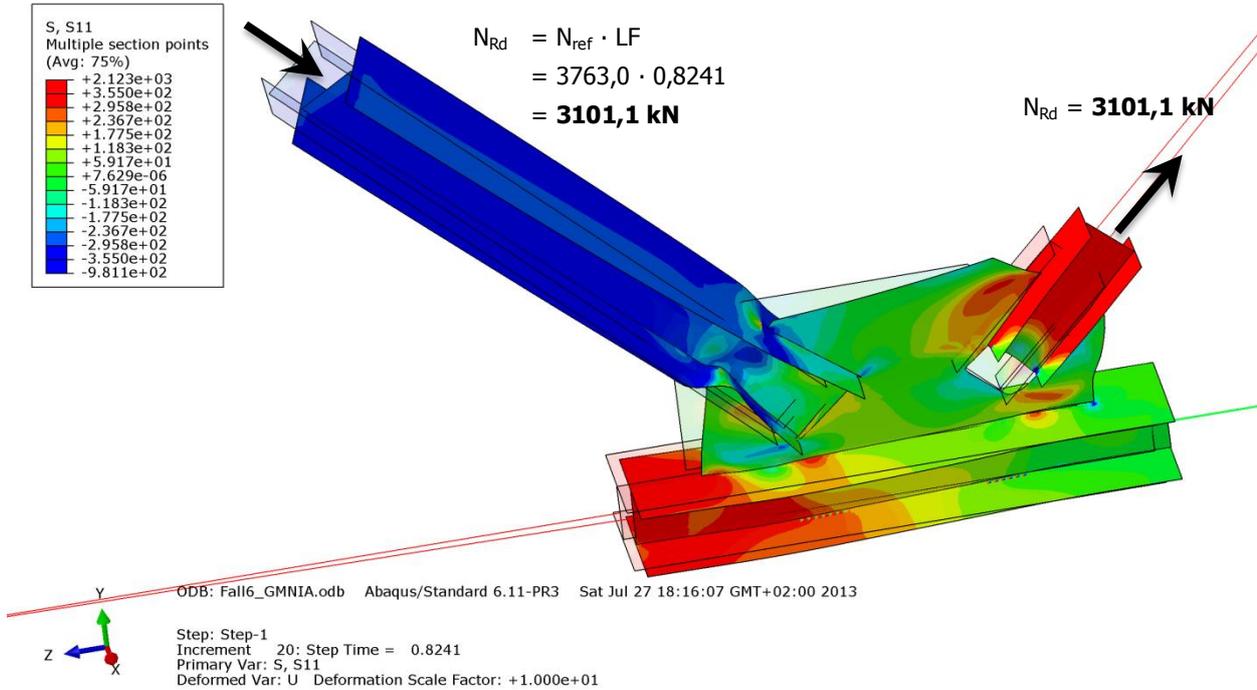


Abbildung B.305 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

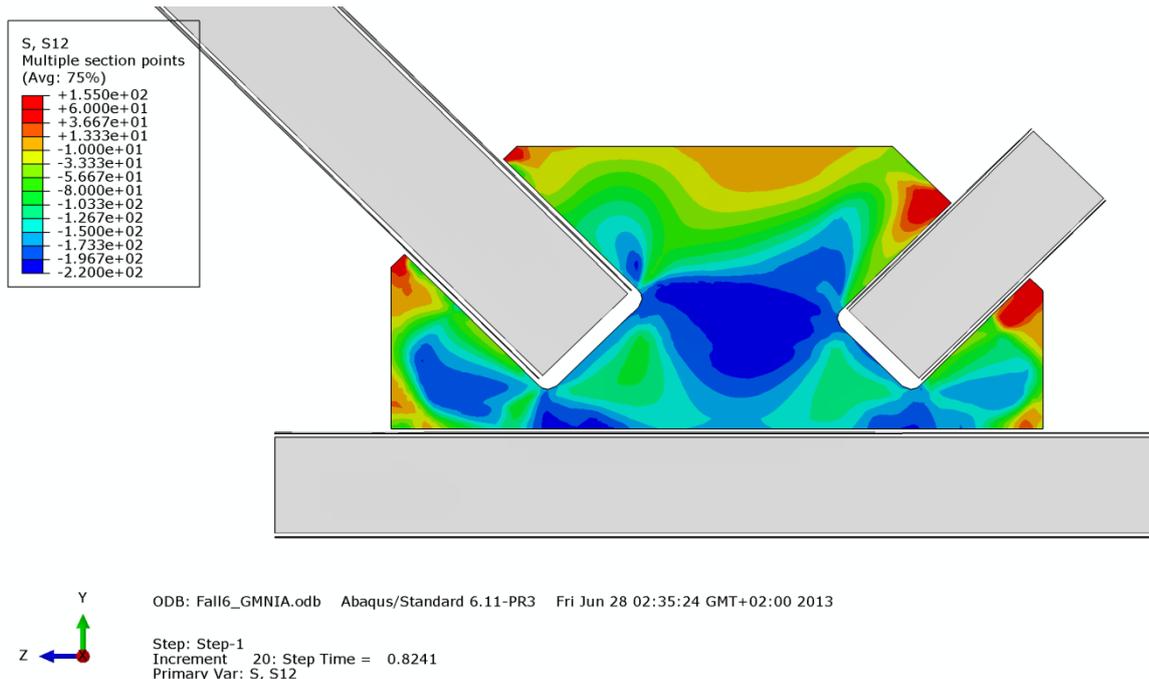


Abbildung B.306 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

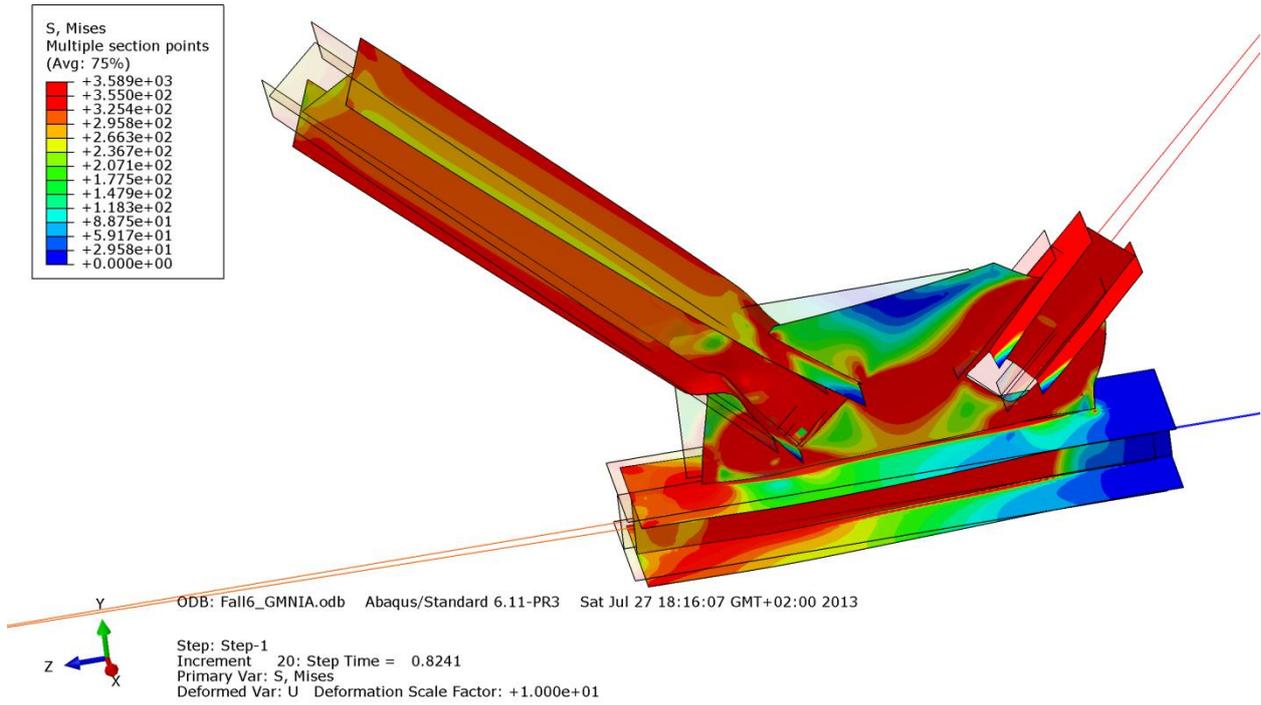


Abbildung B.307 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

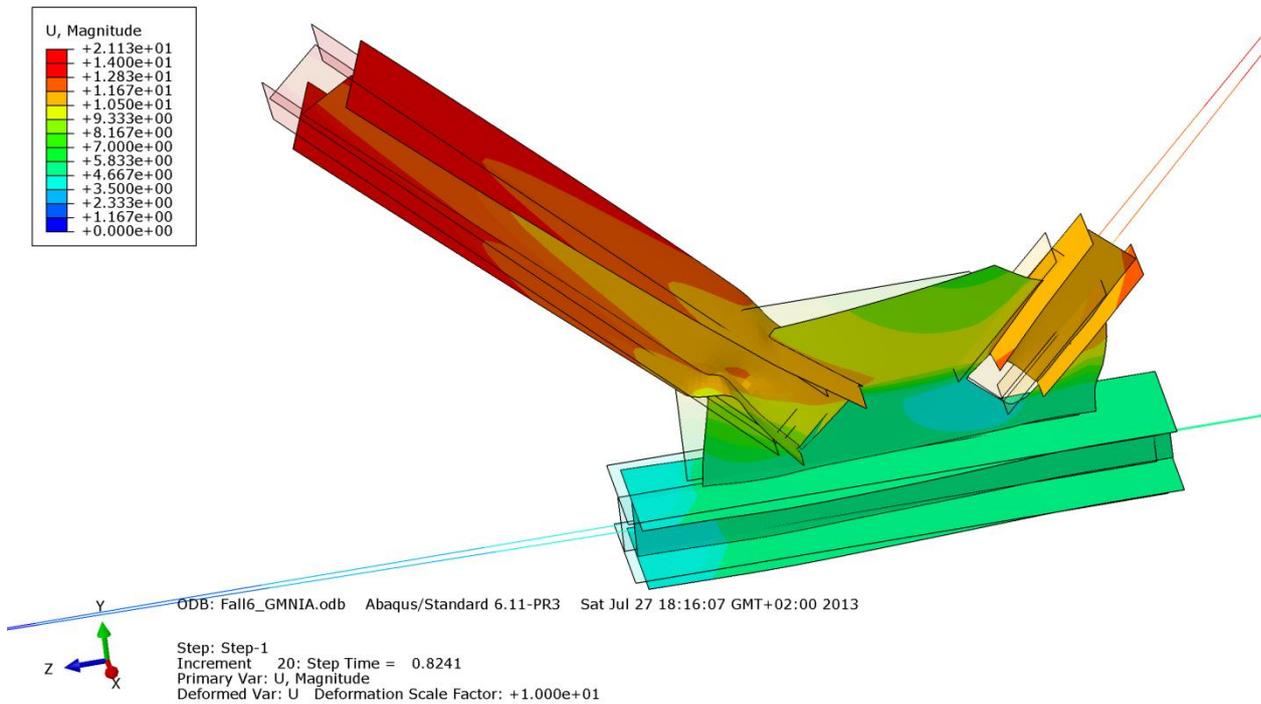


Abbildung B.308 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.3.2.6 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die nachfolgenden Abbildungen B.309 bis B.312 lassen erkennen, dass die Versagensform durch eine Längsverschiebung mit Verdrehung der Druckstrebe geprägt ist. Der Einbindebereich der Druckstrebe in das Knotenblech ist durchplastiziert und versagt zufolge der Druckkraft der Strebe. Während der Untergurt sich kaum verdreht knickt das Knotenblech aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

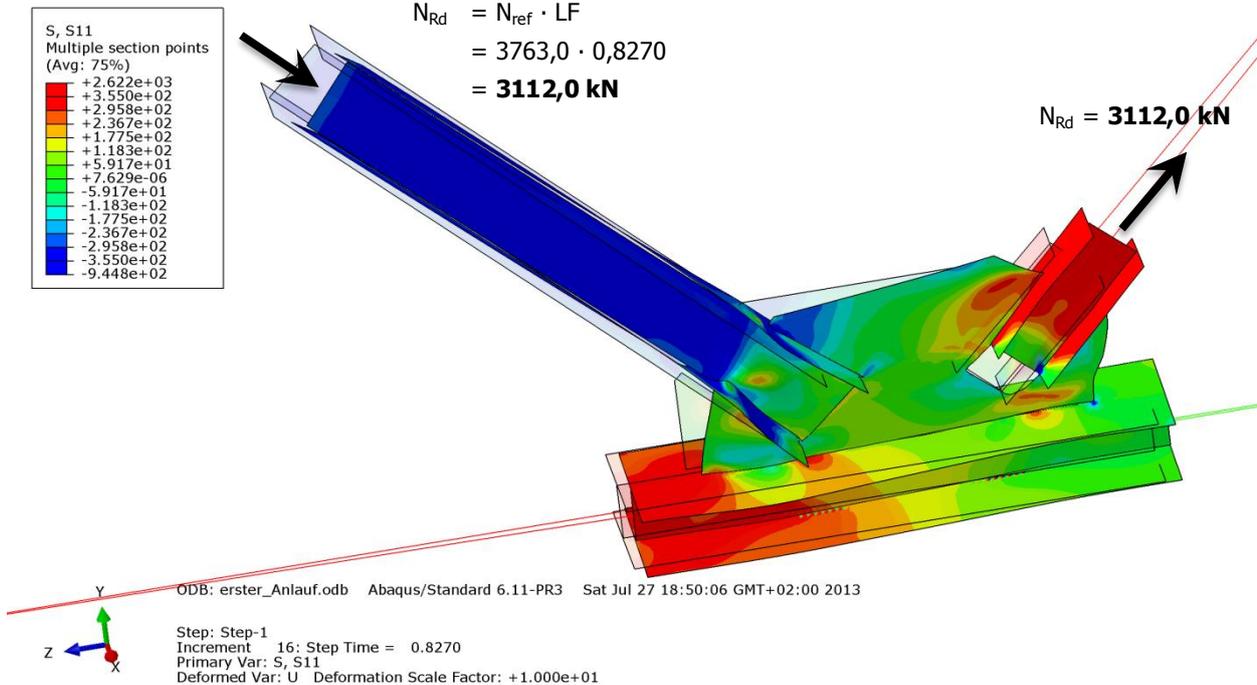


Abbildung B.309 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

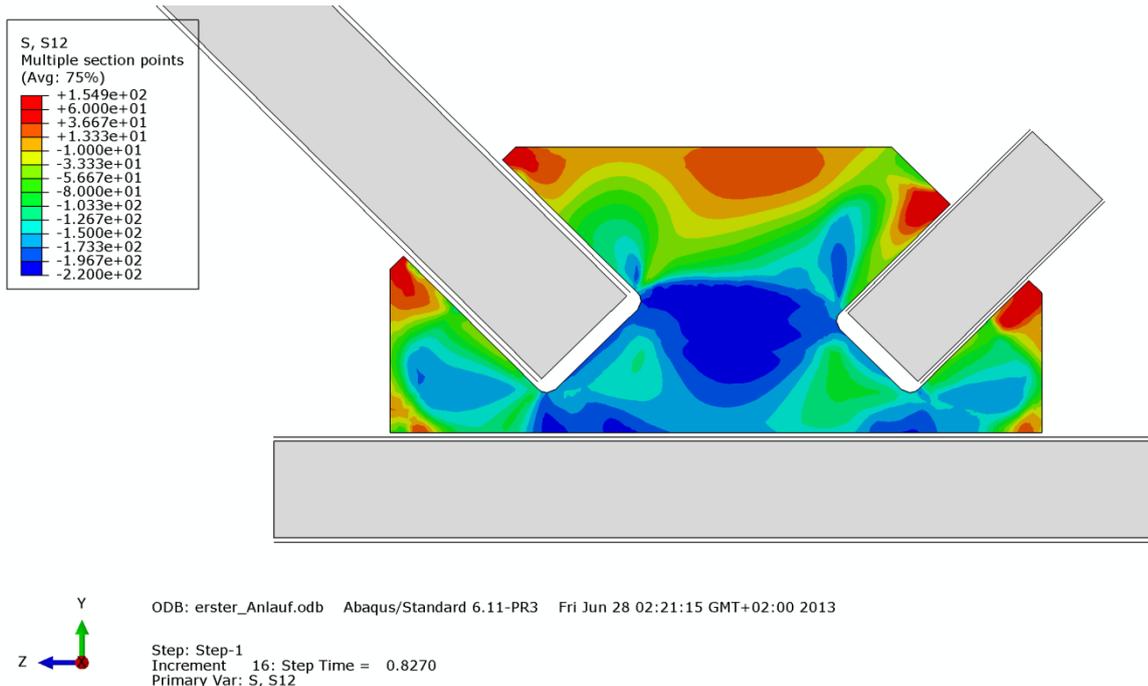


Abbildung B.310 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

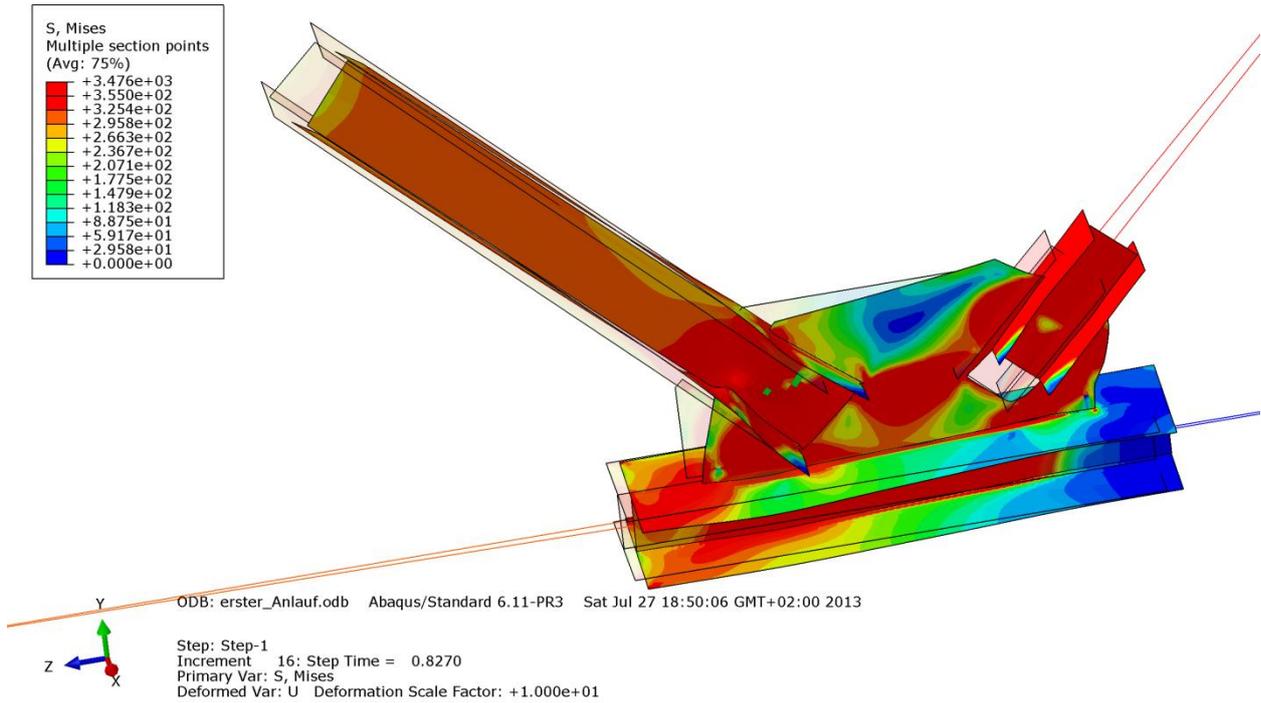


Abbildung B.311 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

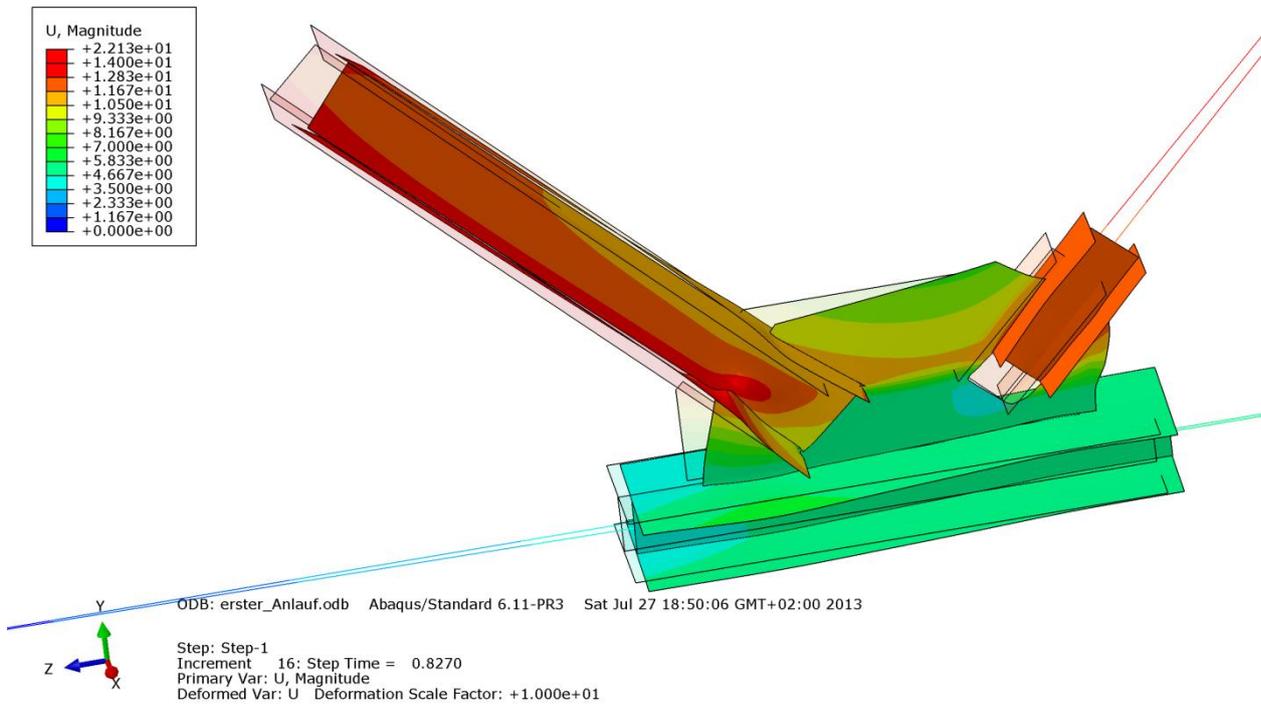


Abbildung B.312 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.3.2.7 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch ein Ausknicken bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe, wie die Abbildungen B.313 bis B.316 erkennen lassen. Durch die großen Verformungen aufgrund der geringen Steifigkeit des schmalen Untergurtes versagt das System. Das Knotenblech plastiziert und knickt unter der Beanspruchung aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

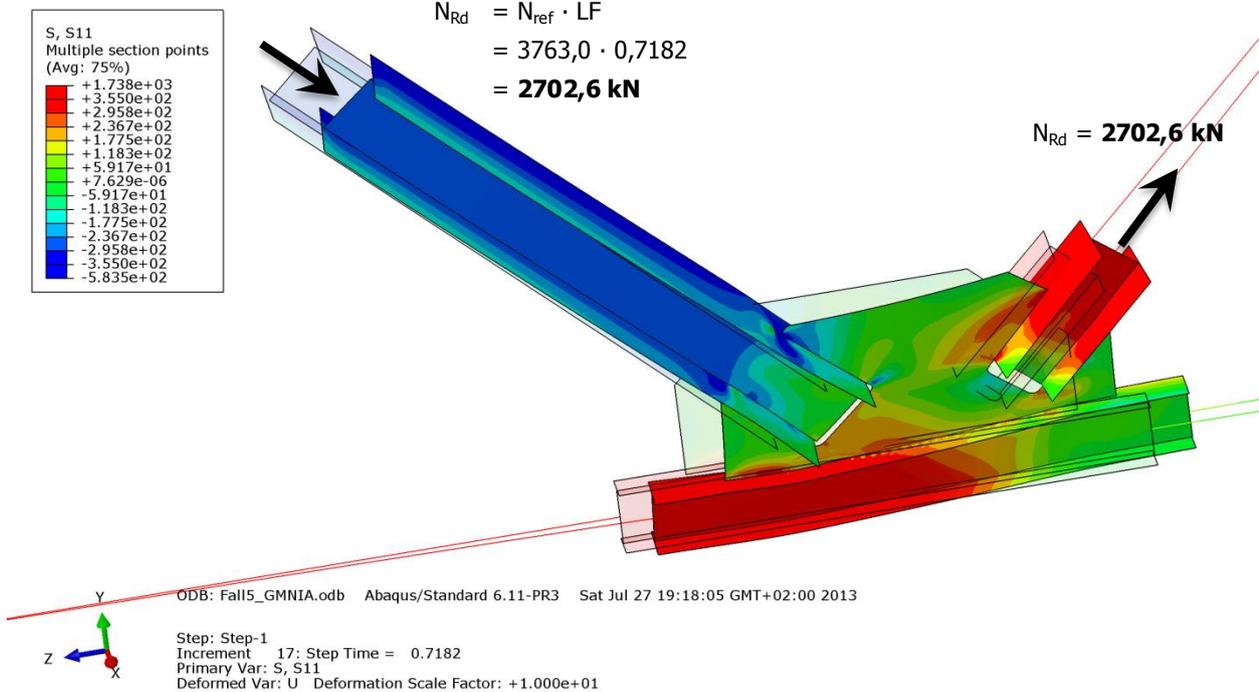


Abbildung B.313 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Schubspannungen σ_{12} [N/mm²]**

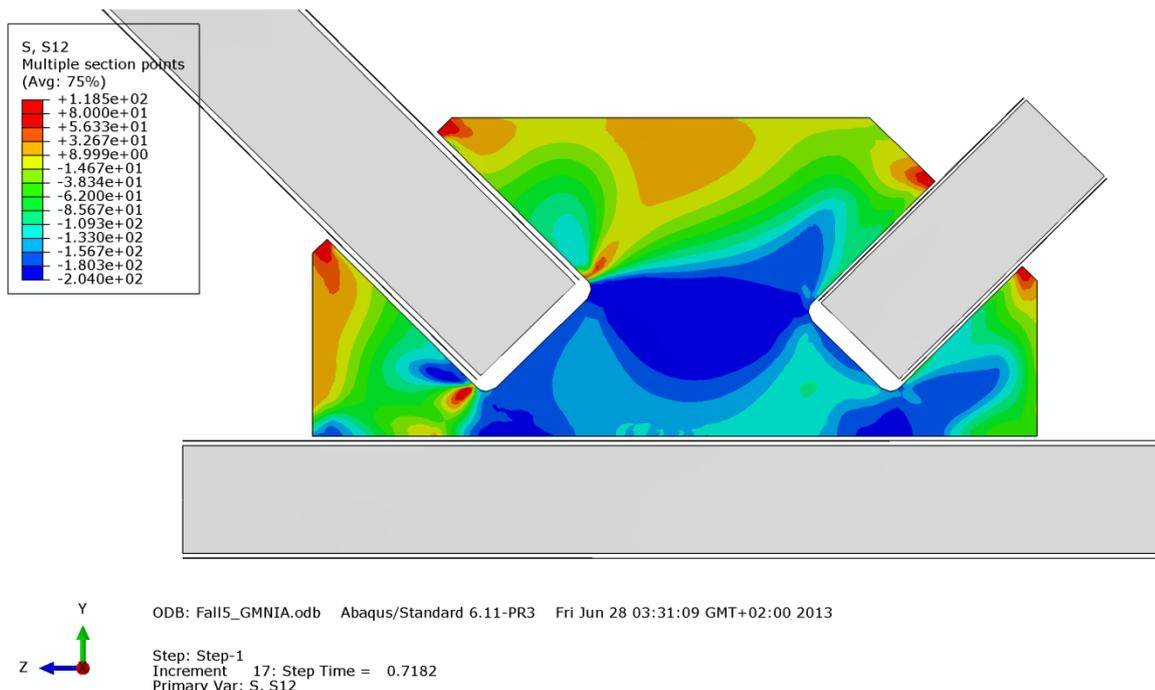


Abbildung B.314 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

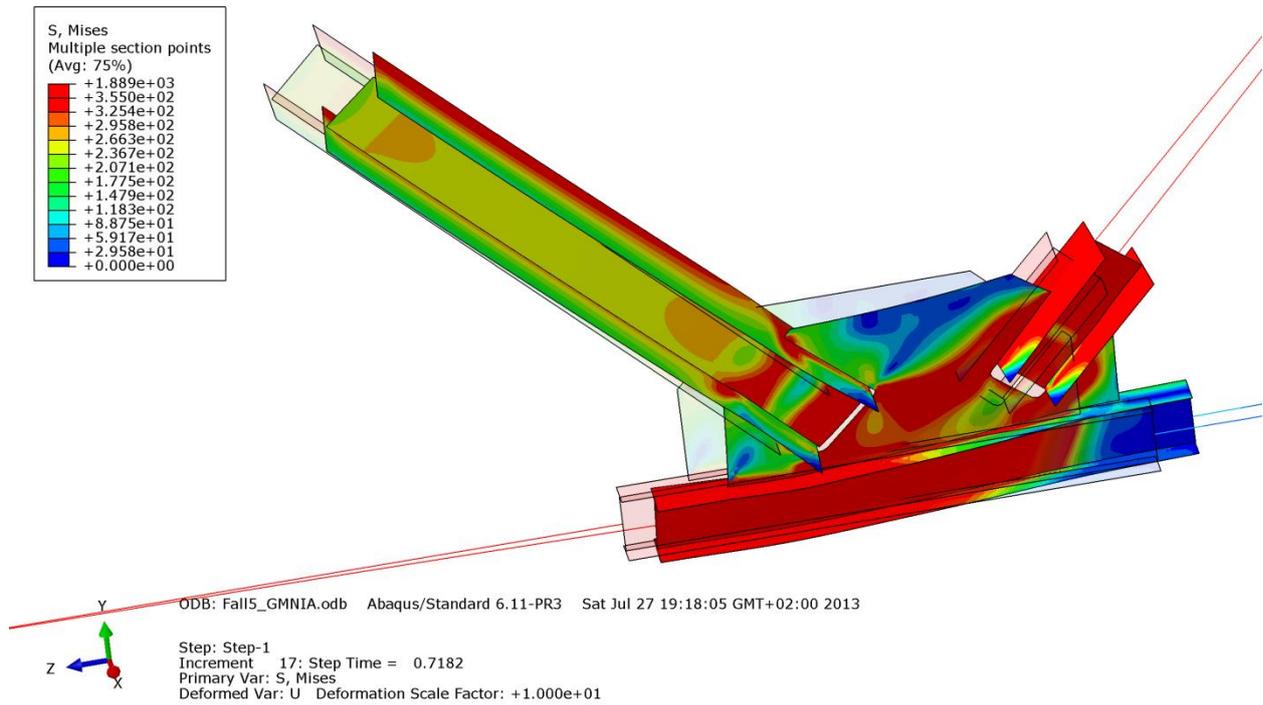


Abbildung B.315 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

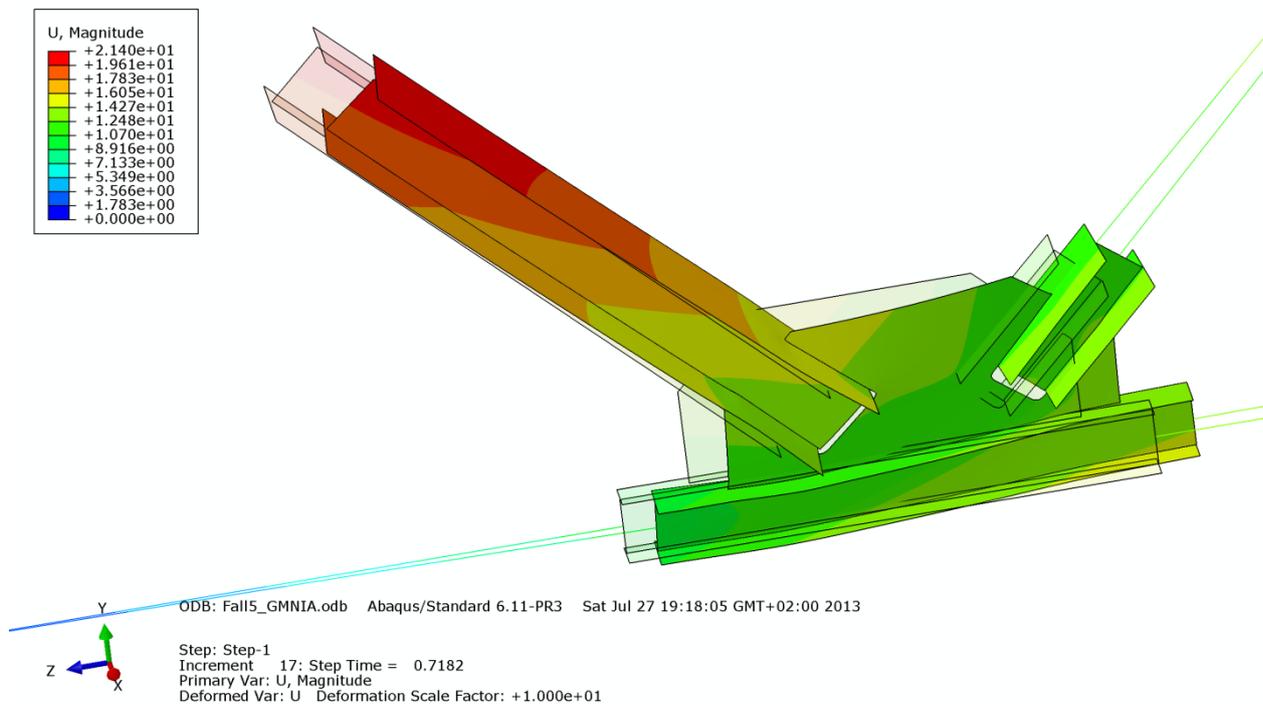


Abbildung B.316 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.3.2.8 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch eine Längsverschiebung mit kombinierter Verdrehung der Druckstrebe bei gleichzeitigem Biegedrillknicken des Untergurtstabes. Das Knotenblech knickt aus, da der Untergurtstab keine nennenswerte Stützung bieten kann, wie die Abbildungen B.317 bis B.320 zeigen.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

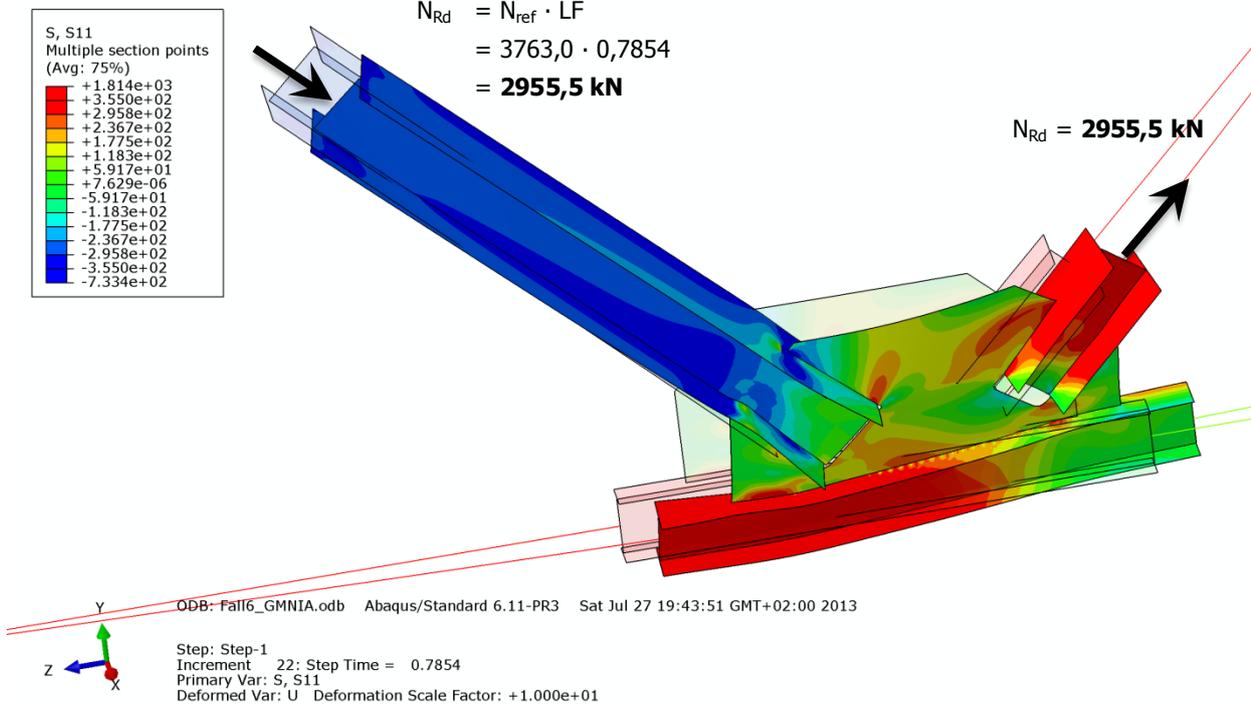


Abbildung B.317 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

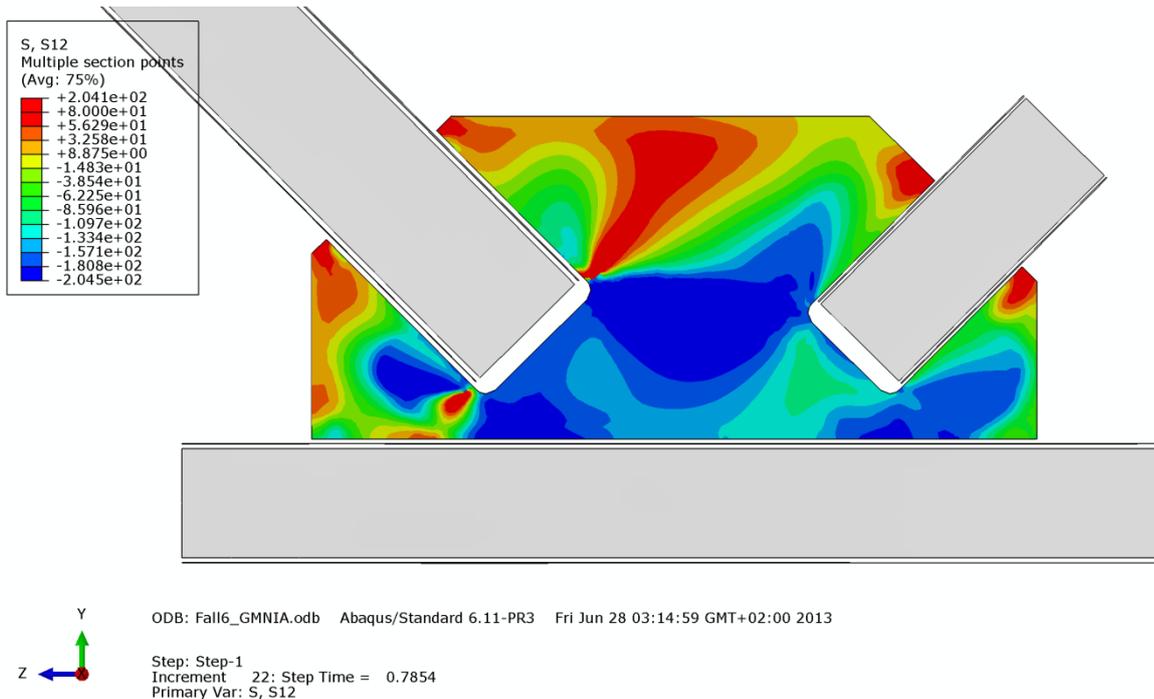


Abbildung B.318 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

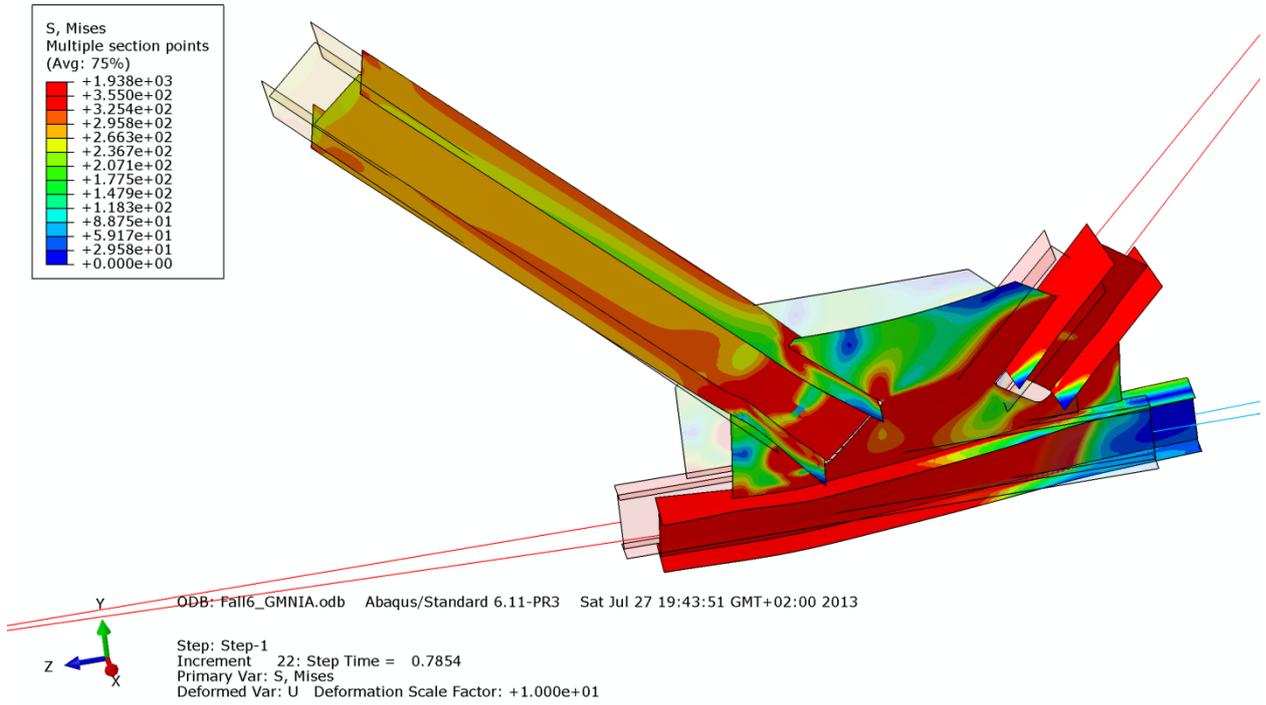


Abbildung B.319 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

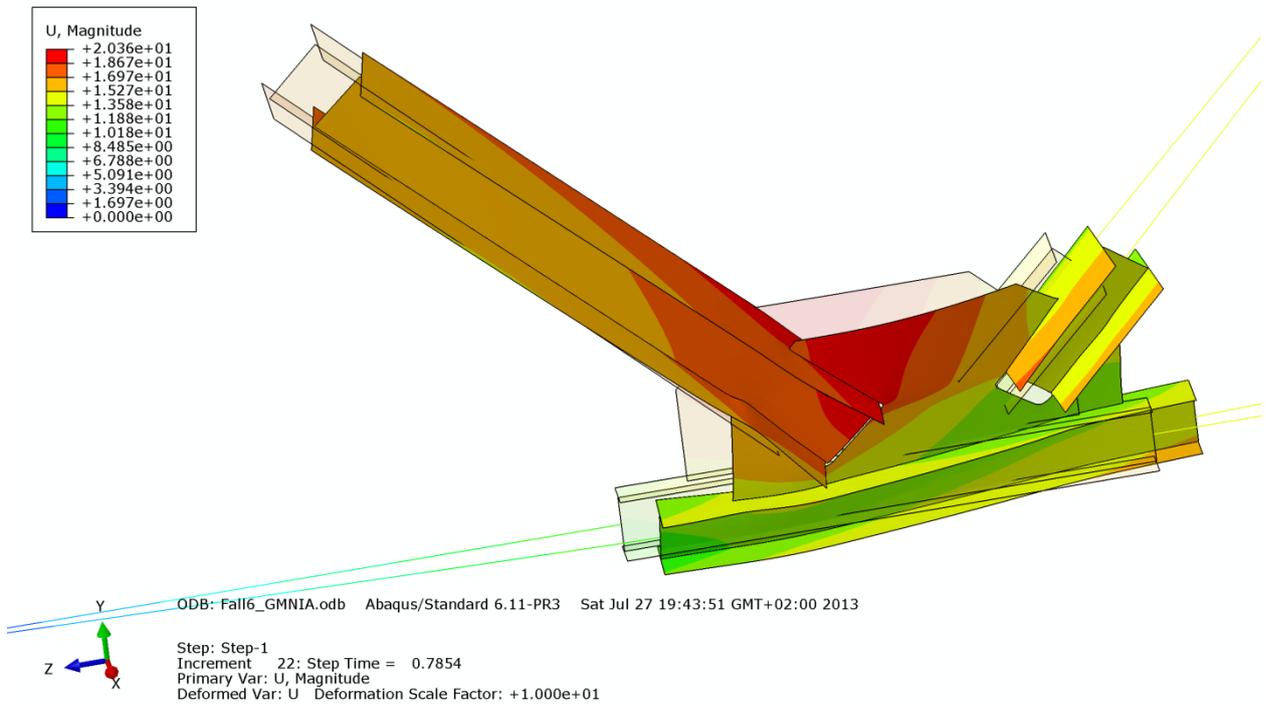


Abbildung B.320 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.3.2.9 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 100\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.321 bis B.324 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe bei gleichzeitigem Biegedrillknicken des Untergurtstabes. Das Knotenblech ist nahezu vollkommen durchplastiziert.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

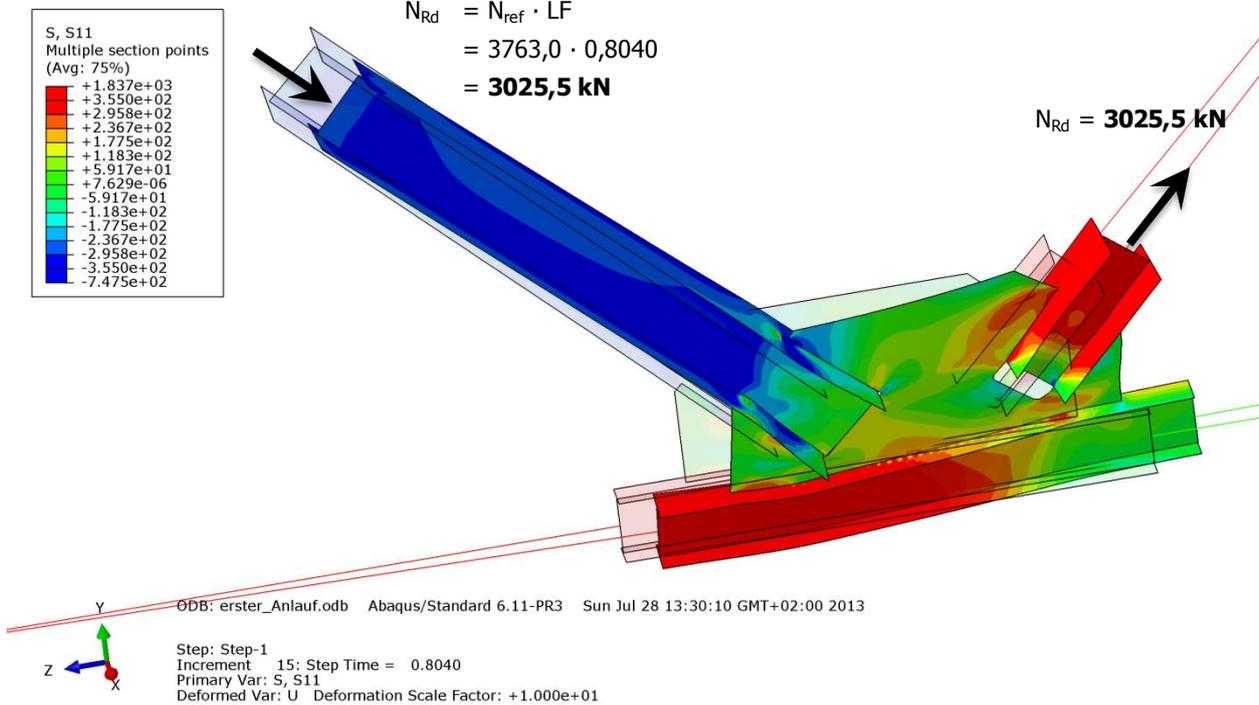


Abbildung B.321 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Schubspannungen σ_{12} [N/mm²]**

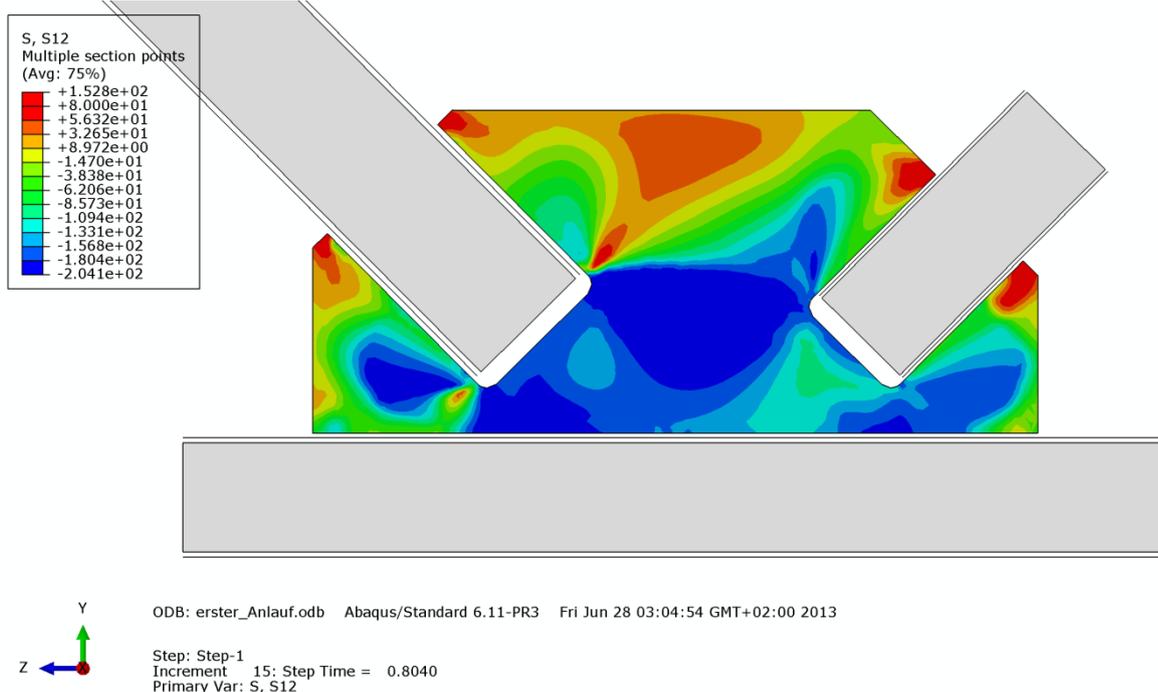


Abbildung B.322 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

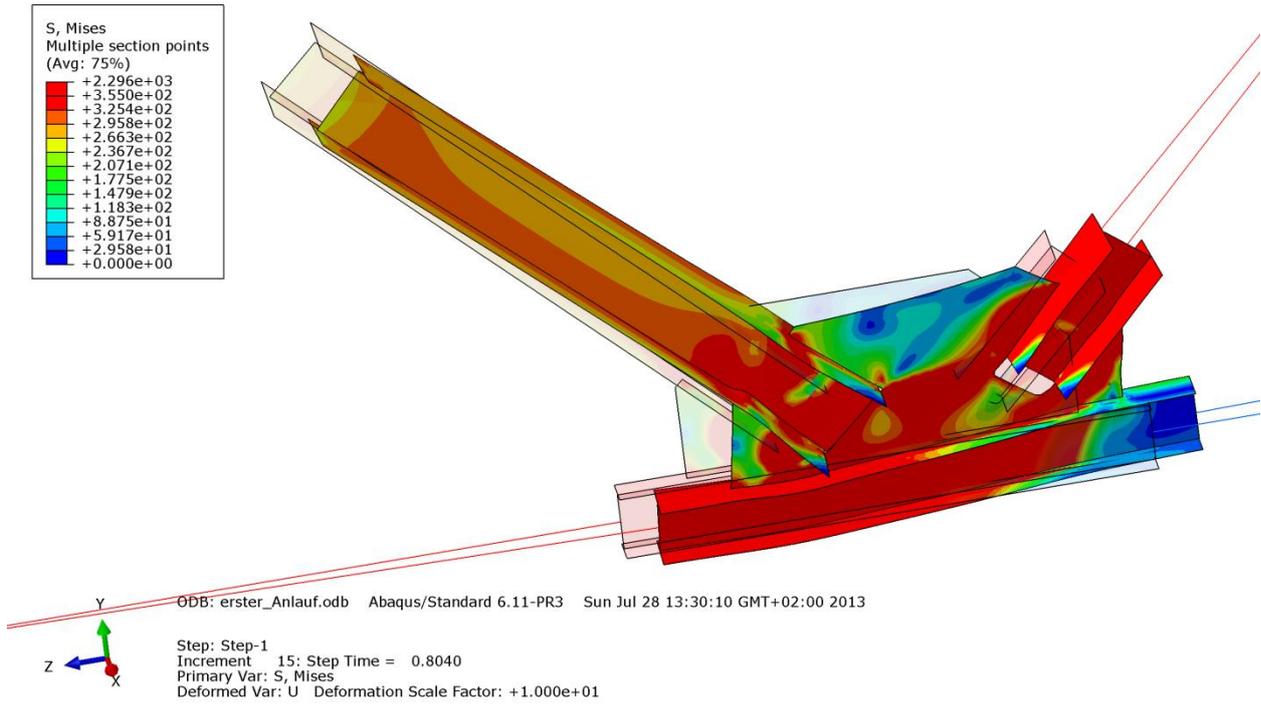


Abbildung B.323 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

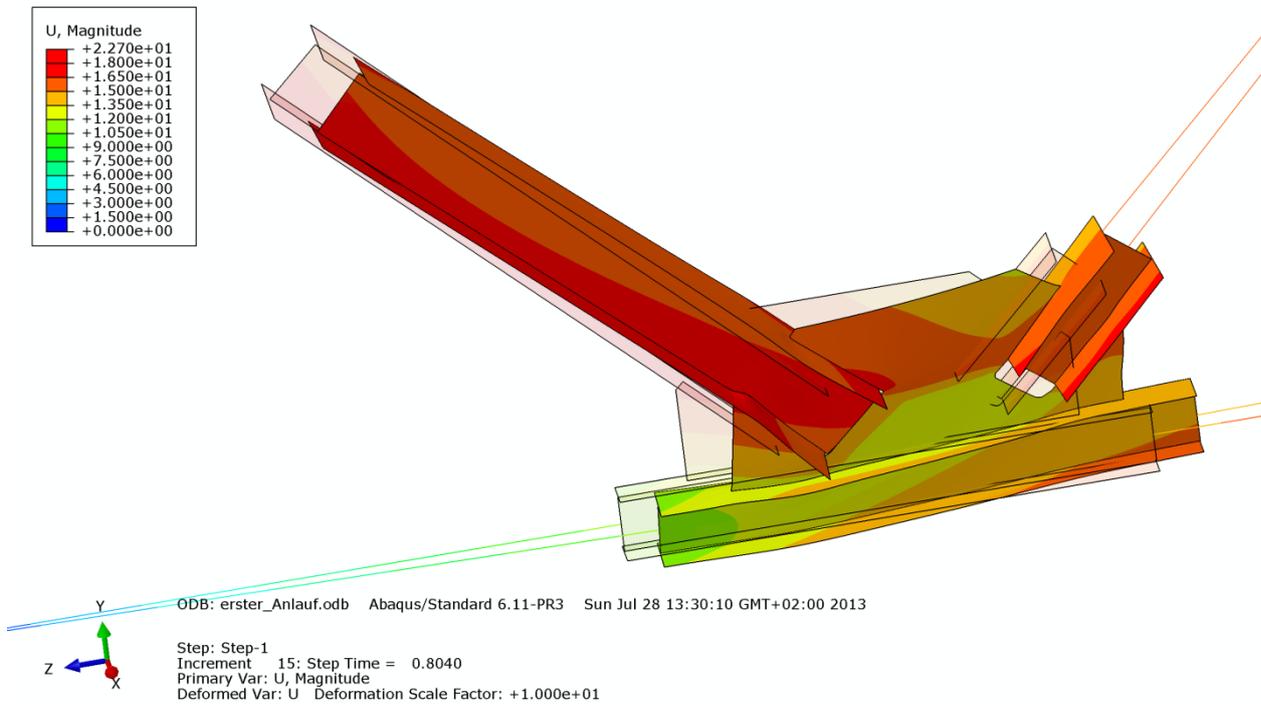


Abbildung B.324 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

B - 7.3.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite

Die Tabelle B.49 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit verschiedenen Untergurtbreiten, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. mit der Imperfektion als Knotenblechschieflung gegenüber:

- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 200\text{mm}$ mit linear elastisch – ideal plastischer Materialmodellierung des gesamten Systems (aus Abschnitt B - 5.7)
- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 200\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Doppelte Untergurtbreite $b_{UG} = 400\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Halbe Untergurtbreite $b_{UG} = 100\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge $L^* =$	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L} =$	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	4085mm
$t_{\text{knotenblech}} =$	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 200mm (plastisch)		
LF = 0,4802 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,0 kN	LF = 0,4813 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1811,1 kN	LF = 0,4803 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1807,4 kN
UG: Breite 200mm (Zugstr. und UG elastisch)		
LF = 0,7705 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2899,4 kN	LF = 0,8230 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3096,9 kN	LF = 0,8193 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3083,0 kN
UG: Breite 400mm (Zugst. und UG elastisch)		
LF = 0,7911 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2976,9 kN	LF = 0,8241 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3101,1 kN	LF = 0,8270 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3112,0 kN
UG: Breite 100mm (Zugst. und UG elastisch)		
LF = 0,7182 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2702,6 kN	LF = 0,7854 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2955,5 kN	LF = 0,8040 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3025,5 kN
N_{pl} - Druckstrebe =		3628,1 kN
N_{pl} - Zugstrebe =		1812,3 kN
N_{ref} =		3763,0 kN
<small>(N_{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>		

Tabelle B.49 – Ergebnisse Gruppe 5 – Variation der Untergurtbreite

Nachfolgende Abbildung B.325 zeigt, dass durch eine rein elastische Materialmodellierung von Zugstrebe und Untergurtstab die Tragfähigkeit gegenüber der linear elastisch – ideal plastischen Modellierung des gesamten Systems deutlich gesteigert werden kann. Diese Annahme kann getroffen werden, da primär die Drucktragfähigkeit des Fachwerkknotens hinsichtlich Druckstrebe und Knotenblech untersucht werden soll. Ansonsten gilt für die Gruppe 5 die gleiche Ergebnisinterpretation wie für die Gruppe 1 unter Kapitel B - 7.2.3 beschrieben. Eine Verbreiterung der Untergurtflansche zur Steigerung der Verdrehsteifigkeit des Untergurtes hat nahezu keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Fachwerkknotensystems. Am sensibelsten auf eine Verringerung der Breite des Untergurtes reagiert der Fall mit Imperfektion affin zur ersten Eigenform. Bei einer Halbierung der Untergurtbreite laut Profiltabelle von 200mm auf 100mm sinkt die Tragfähigkeit um rund 7%. Es ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeitsdifferenz zwischen $b_{UG} = 100\text{mm}$ und $b_{UG} = 400\text{mm}$ von etwa 10% (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform) sehr gering ist, wenn man bedenkt, dass sich die Untergurtflanschbreite um den Faktor 4 ändert. Daraus folgt, dass die große Breite der Untergurtflansche in erster Linie nicht für die Tragfähigkeit des Systems in Hinblick auf eine hohe Verdrehsteifigkeit des Gurtes benötigt wird, sondern als Fläche, um der durch die Zugnormalkraft im Untergurt (aufgrund der Horizontalkomponenten der Diagonalkräfte) hervorgerufenen Plastizierung entgegenzuwirken und demzufolge die Kraft N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ von 1898kN (berechnet für die reguläre Untergurtflanschbreite von 200mm) anzuheben.

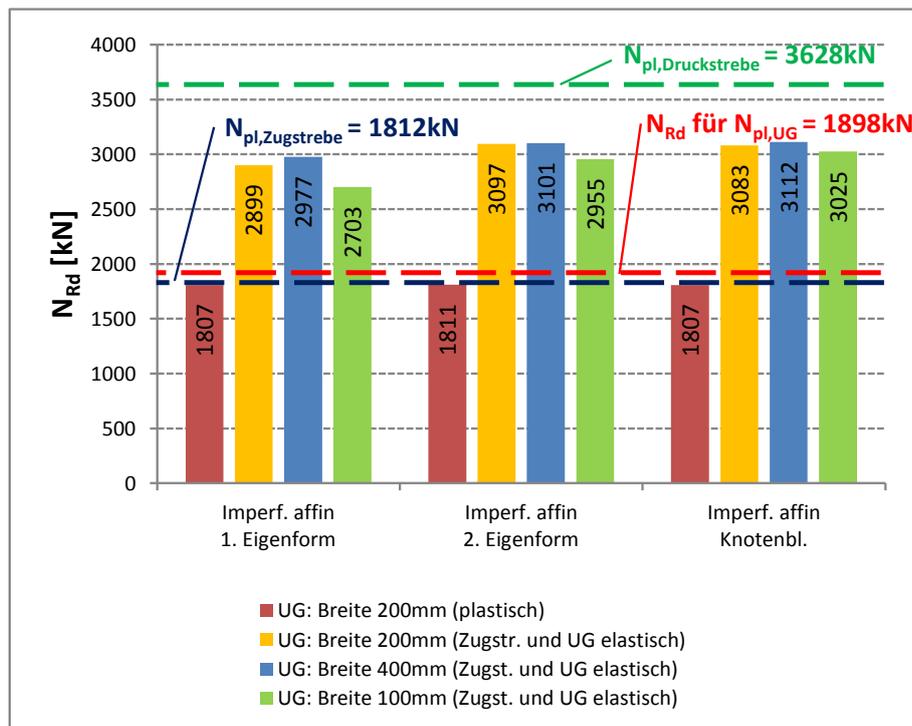


Abbildung B.325 – Ergebnisse Gruppe 5 – Variation der Untergurtbreite

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben, sowie die Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft (für die reguläre Untergurtflanschbreite von 200mm) notwendig ist, ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

B - 7.4 Gruppe 6b

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6b zu charakterisieren sind in Tabelle B.50 zusammengefasst.

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{res} =	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	4750mm

Tabelle B.50 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6b

B - 7.4.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestellten Knotenblech angenommen. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die doppelte und die halbe Untergurtbreite gezeigt. Die erste und zweite Knickeigenform für die Nennuntergurtbreite war bereits in Kapitel B - 4.8.1 in den Abbildungen B.137 und B.138 dargestellt.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform**

- **Untergurt-Breite: 1,0· b_{UG} = 300mm**

Die erste Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.8.1 in der Abbildung B.137 gezeigt.

- **Untergurt-Breite: 2,0· b_{UG} = 600mm**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.326 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

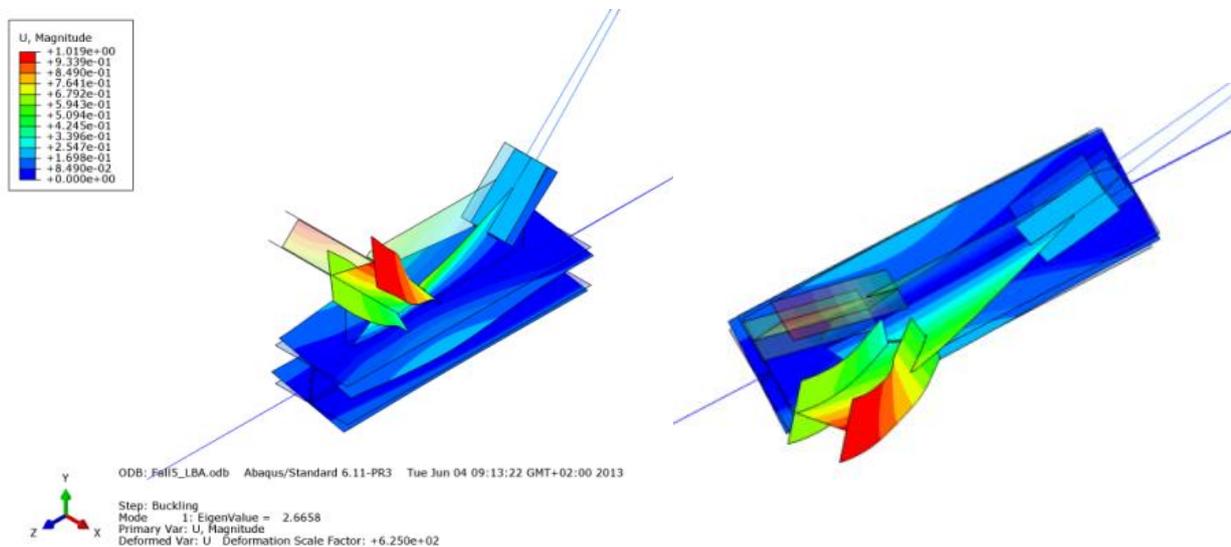


Abbildung B.326 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.327 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$).

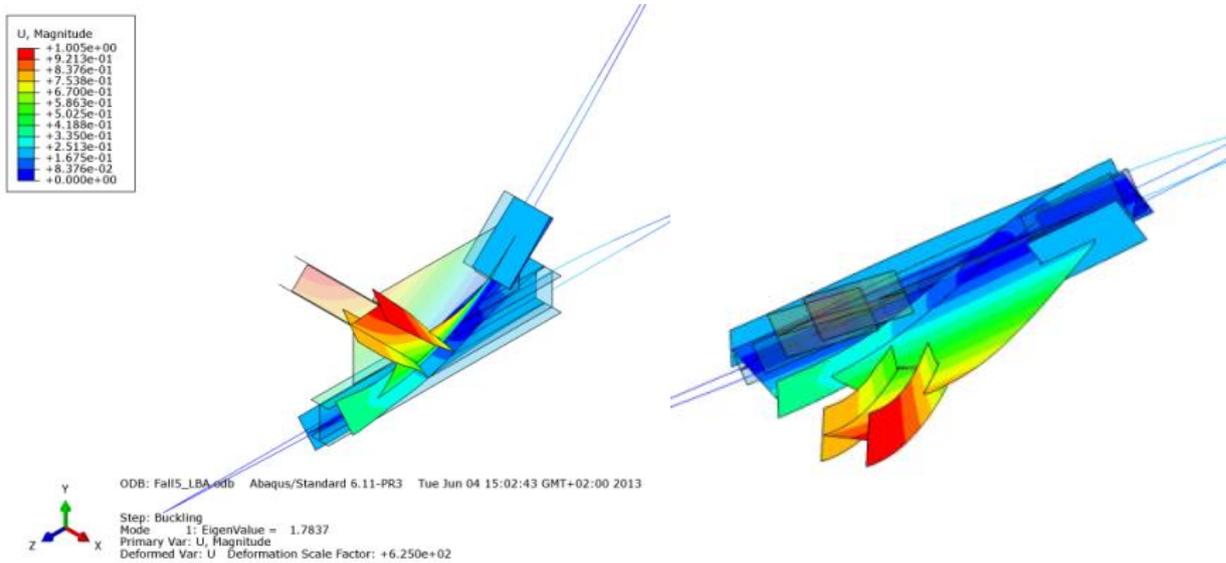


Abbildung B.327 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – erste Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform**

– **Untergurt-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$**

Die zweite Eigenform des Knotens mit der Nennbreite des Untergurtprofils ist im Kapitel B - 4.8.1 in der Abbildung B.138 gezeigt.

– **Untergurt-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.328 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

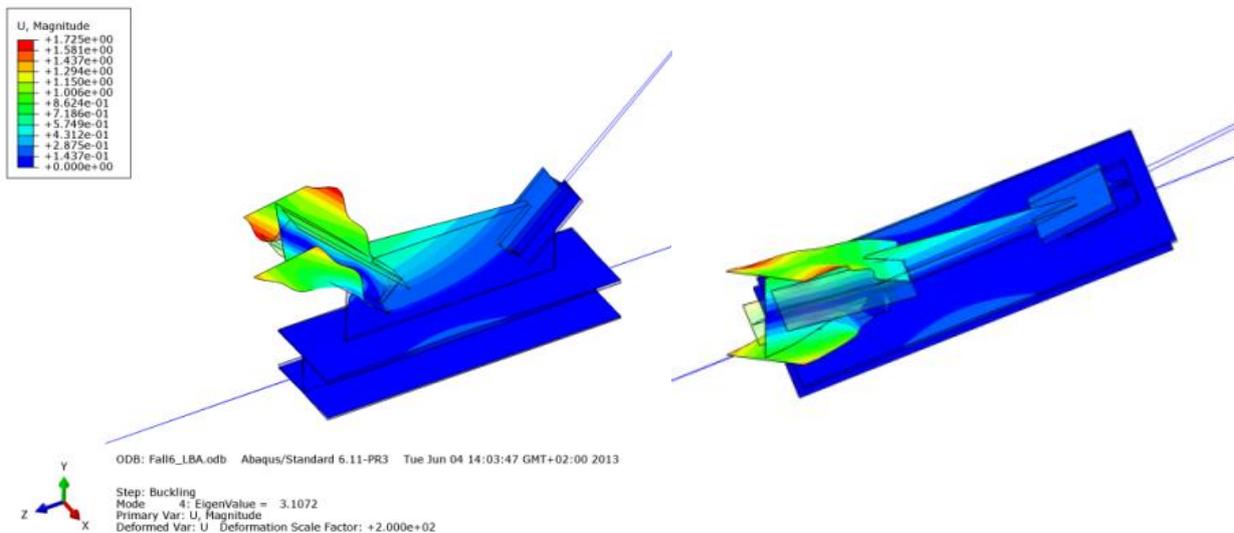


Abbildung B.328 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

– **Untergurt-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.329 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit halber Untergurtbreite ($0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$).

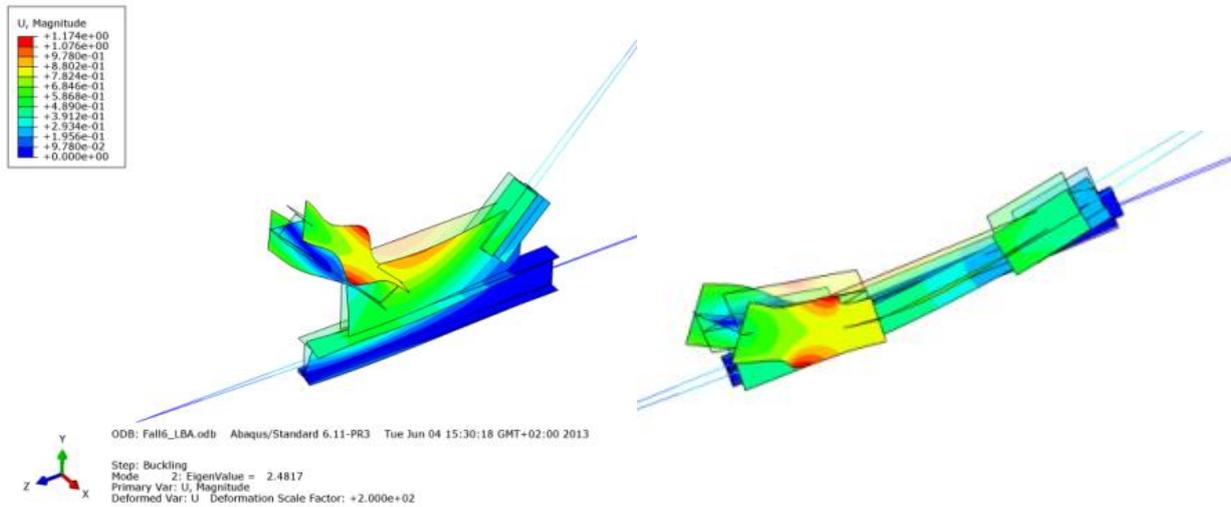


Abbildung B.329 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – zweite Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe und die Zugstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,75\text{mm}$), wie der Abbildung B.330 entnommen werden kann. Für jede Untergurtbreite ($1,0 \cdot b_{UG}$, $2,0 \cdot b_{UG}$, $0,5 \cdot b_{UG}$) wurde eine Traglastberechnung mit Knotenblechschiefstellung als Imperfektion durchgeführt.

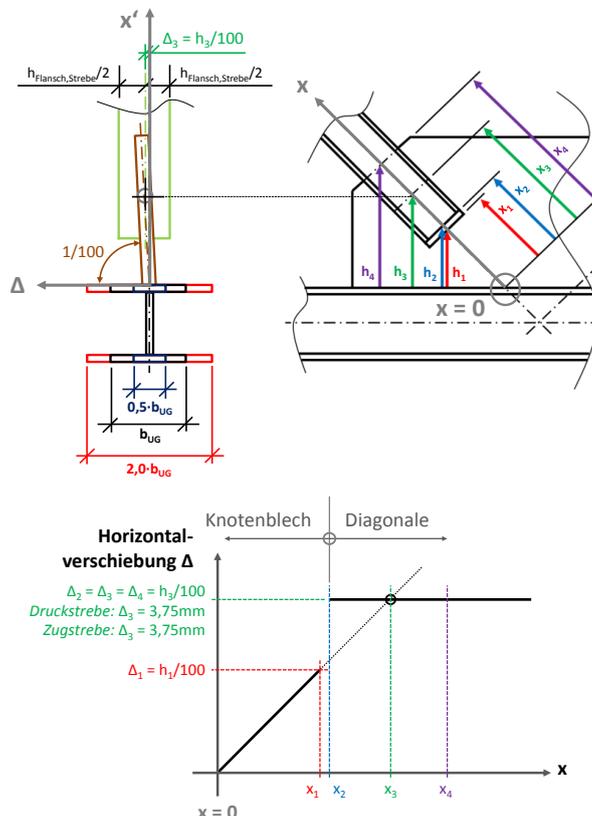


Abbildung B.330 – Eigenform der Gruppe 6b – Imperfektion im Knotenblech mit variierten Knotenblechbreiten

B - 7.4.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 7.4.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.331 bis B.334 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch das Ausknicken bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe und dem Ausknicken des Knotenbleches. Die Druckstrebe ist weitgehend durchplastiziert. Im Bereich des Kraftausgleiches von Druck und Zug im Steg des Gurtes können hohen Spannungen festgestellt werden.

• Normalspannung σ_{11} [N/mm²]

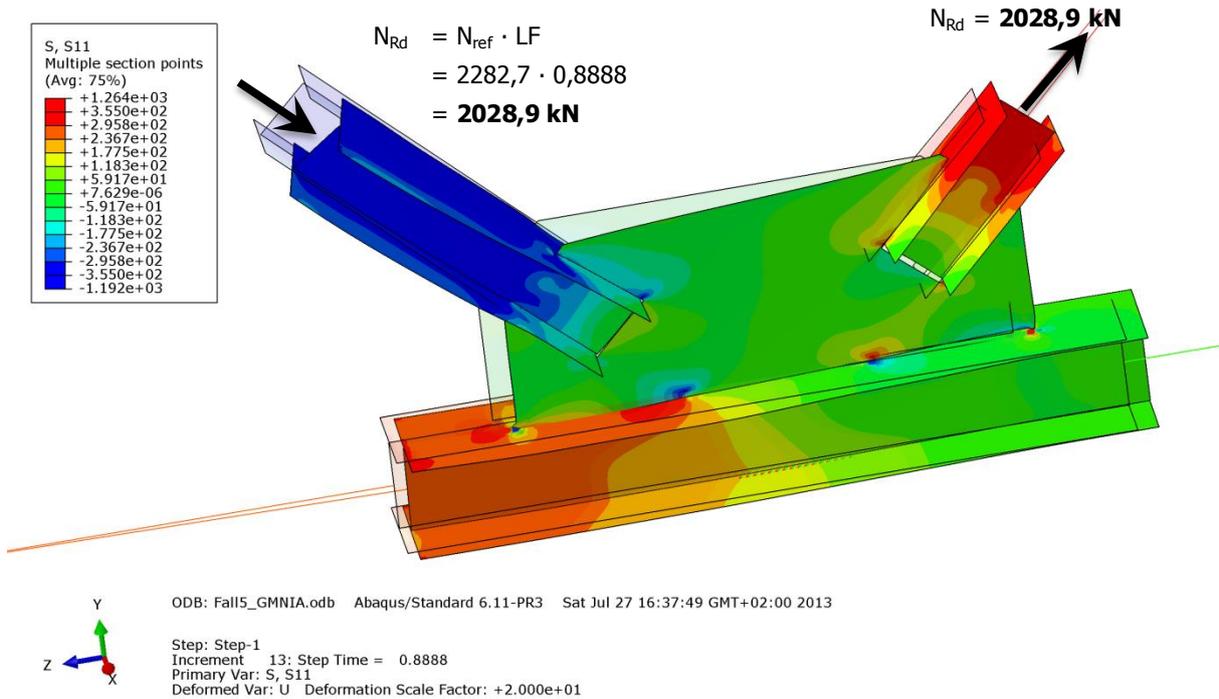


Abbildung B.331 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• Schubspannung σ_{12} [N/mm²]

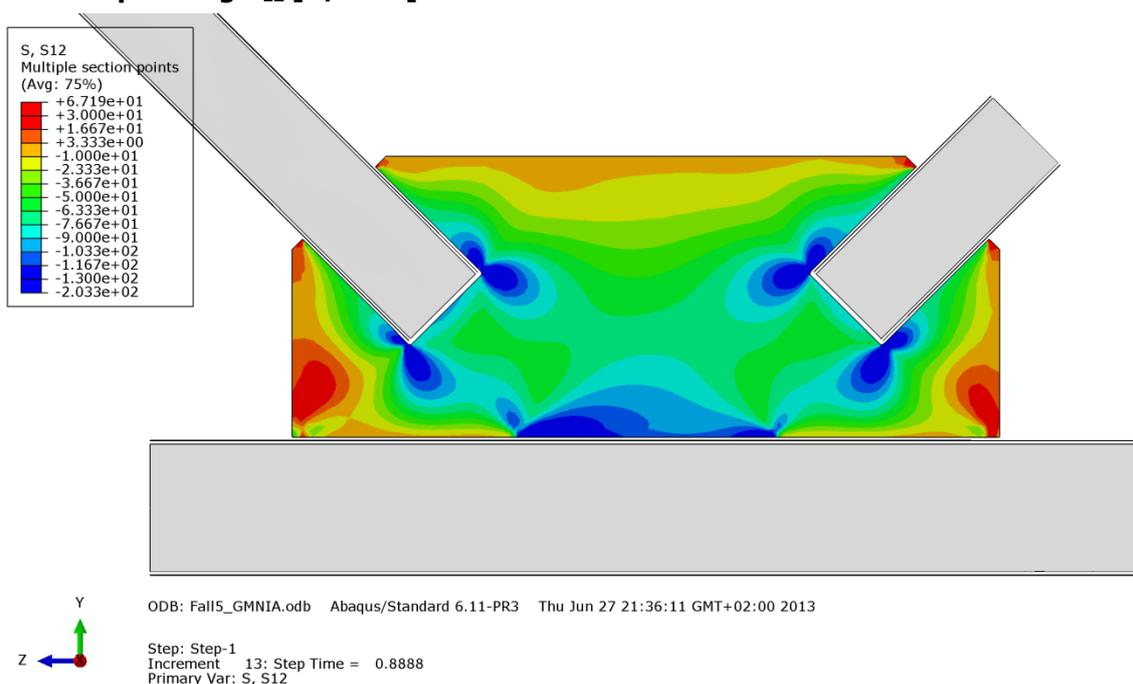


Abbildung B.332 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

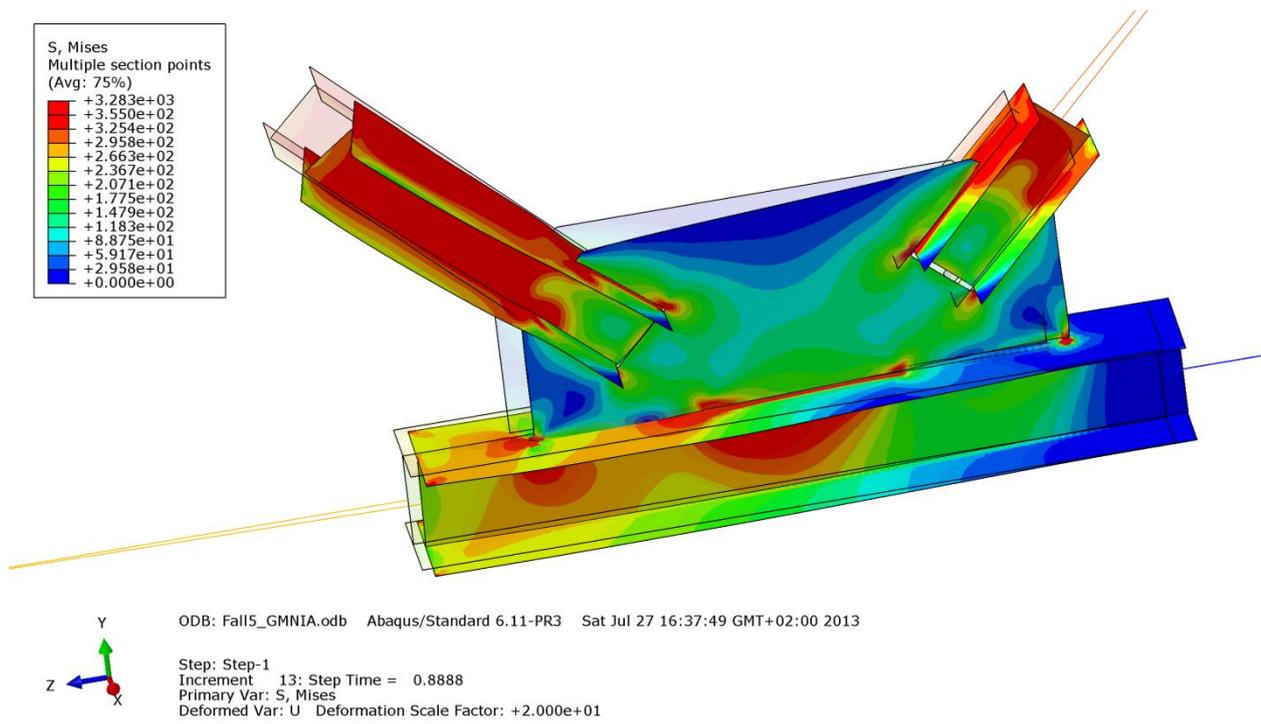


Abbildung B.333 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

• **Verformung [mm]**

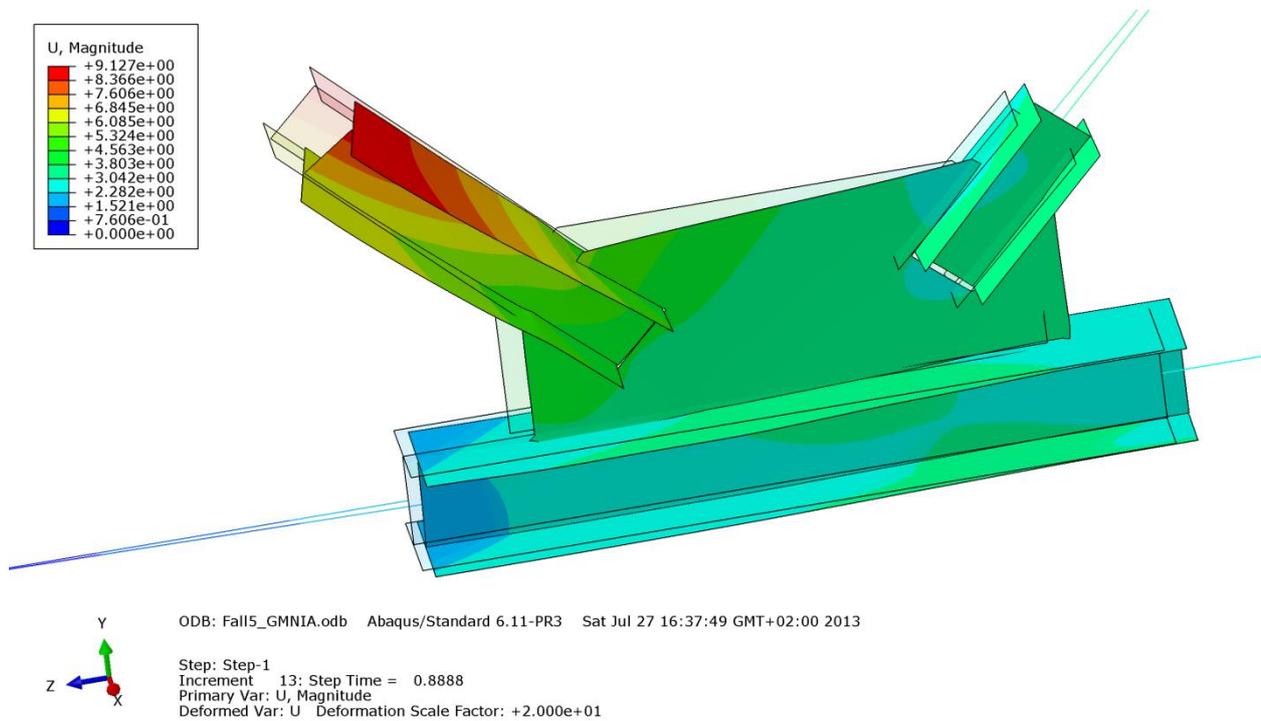


Abbildung B.334 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knick eigenform

B - 7.4.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $1,0 \cdot b_{UG} = 300\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch eine Längsverschiebung mit Verdrehung der Druckstrebe und dem Ausknicken des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.335 bis B.338 zeigen. Die Flansche der weitgehend durchplastizierten Druckstrebe weisen lokales Beulen auf.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

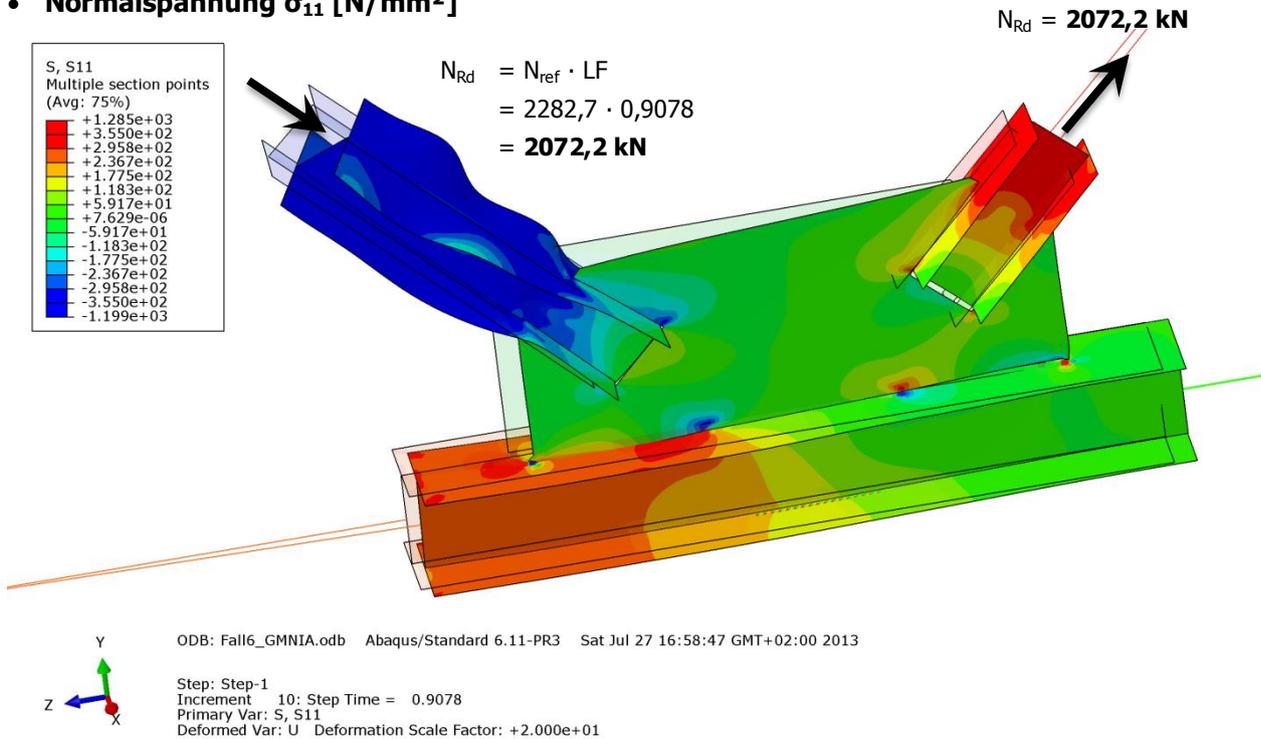


Abbildung B.335 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

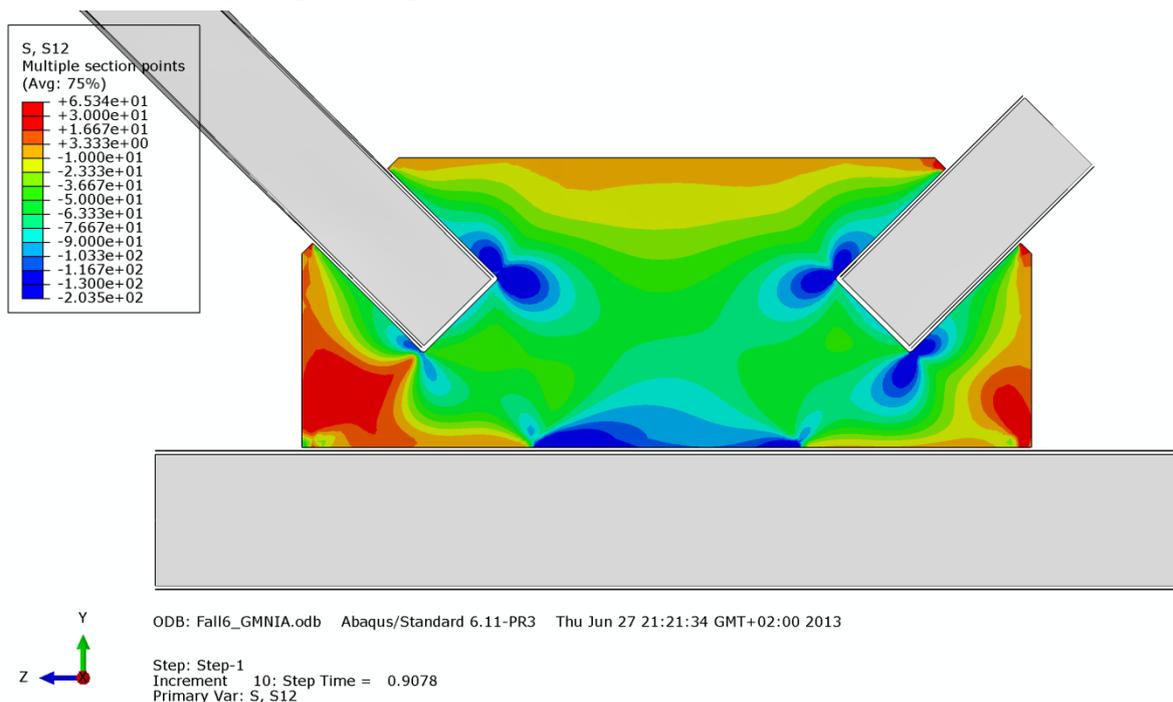


Abbildung B.336 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

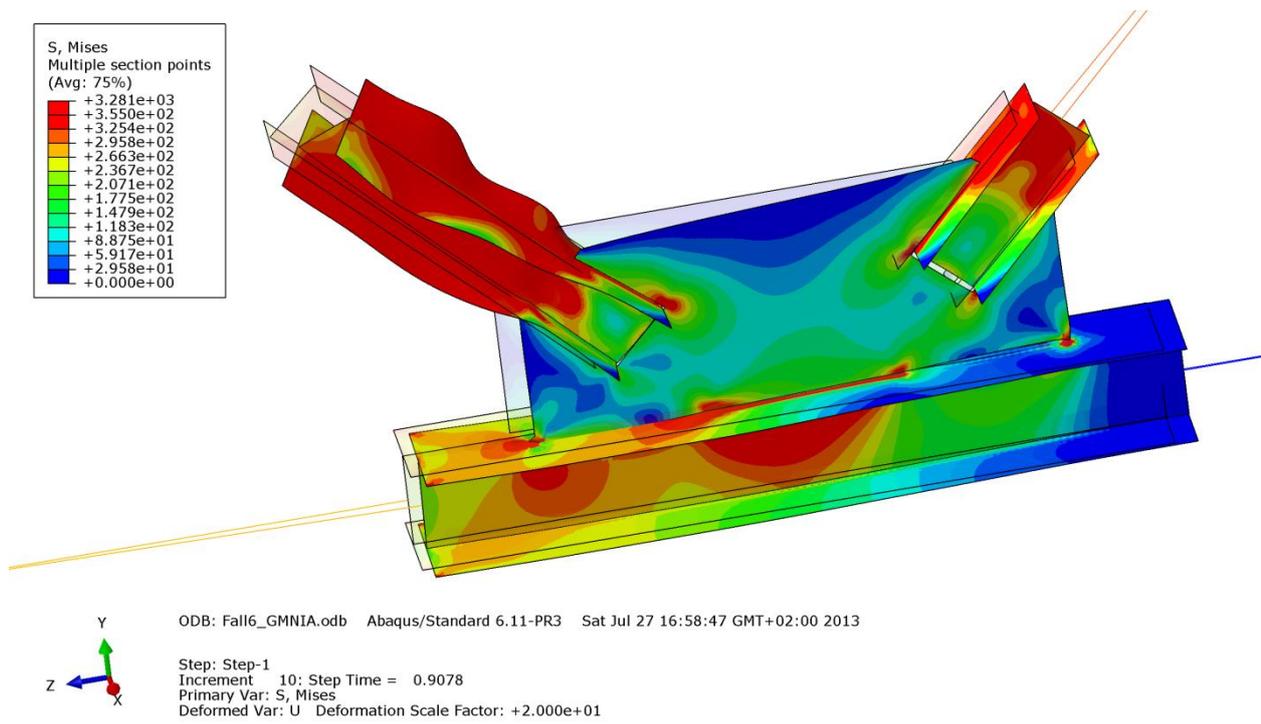


Abbildung B.337 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

• **Verformung [mm]**

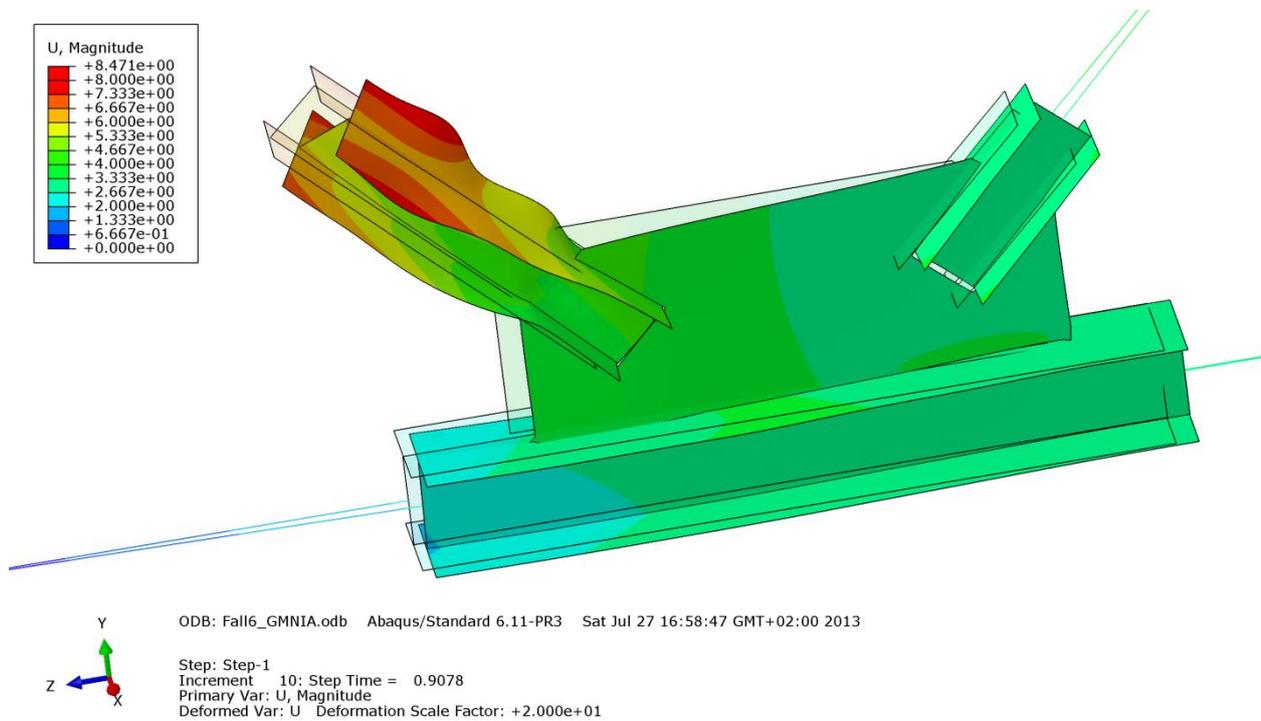


Abbildung B.338 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform

B - 7.4.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: 1,0·b_{UG} = 300mm

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Die Versagensform ist geprägt durch eine Längsverschiebung der Druckstrebe und dem Ausknicken des Knotenbleches, wie in den Abbildungen B.339 bis B.342 zu erkennen ist. Die Druckstrebe ist weitgehend durchplastiziert. Im Steg des Gurtes kann am Mises-Vergleichsspannungsbild (Abbildung B.341) die Kraftumlenkung zwischen Druck- und Zugseite durch lokal erhöhte Spannungen festgestellt werden.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

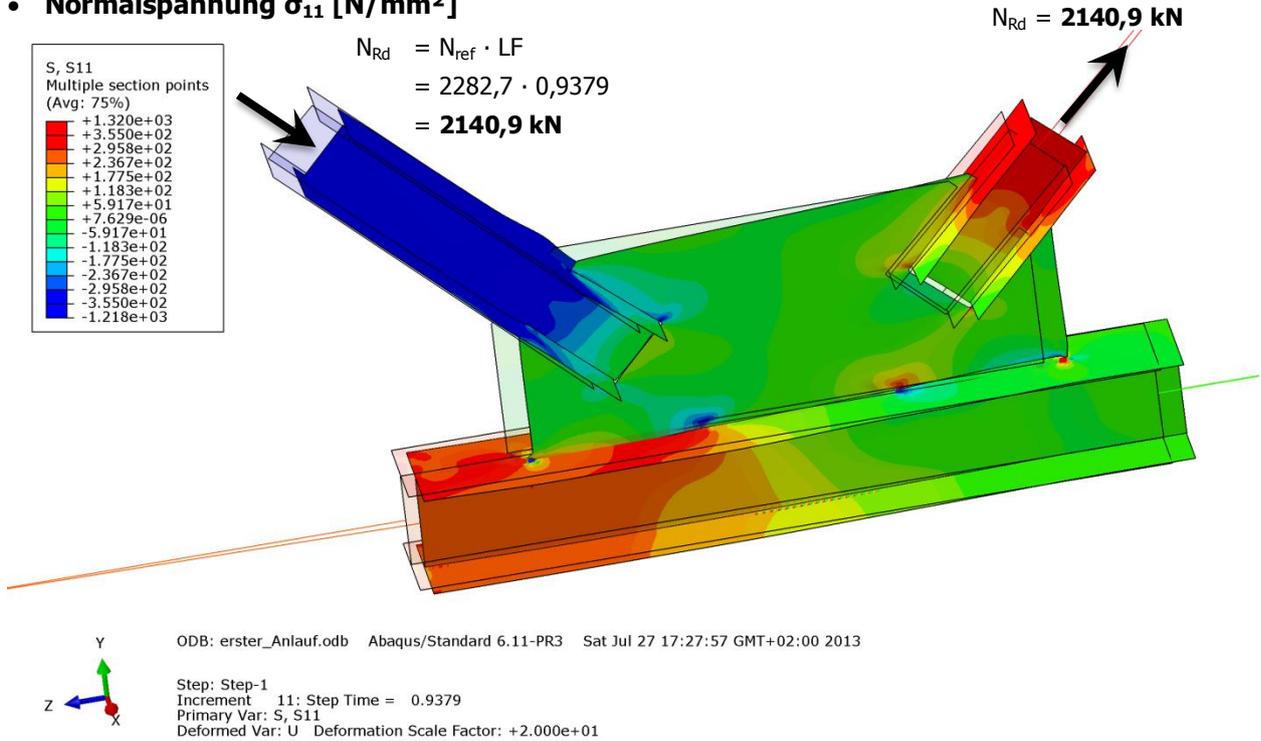


Abbildung B.339 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

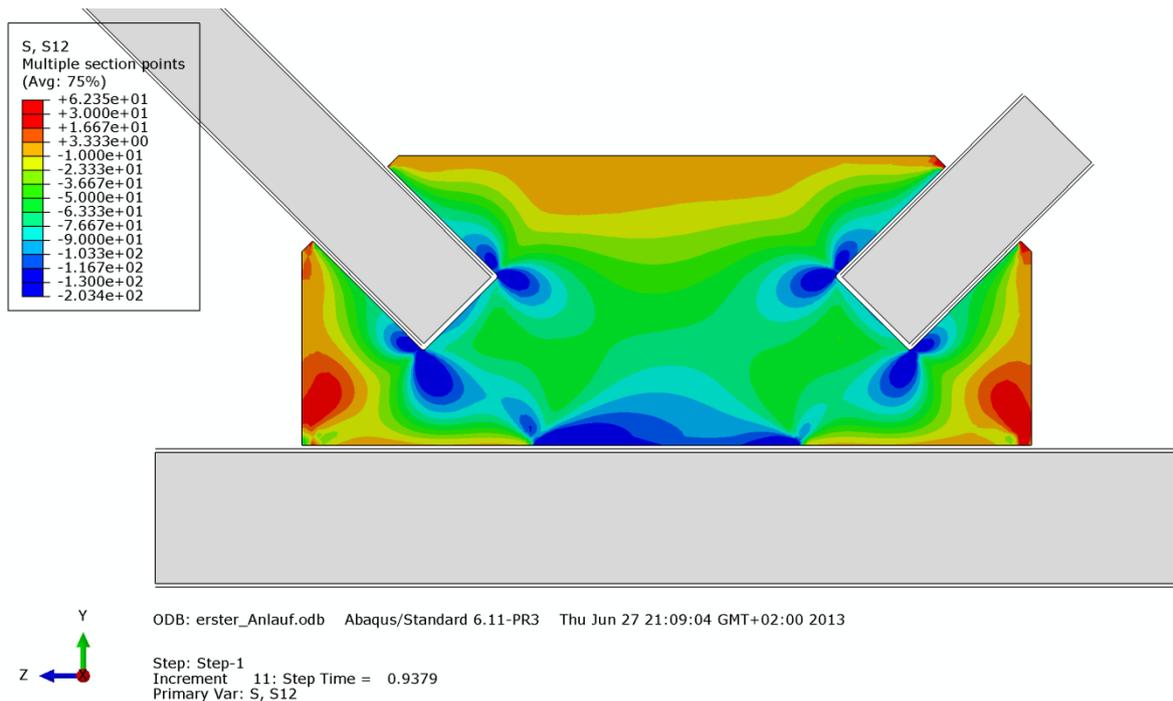


Abbildung B.340 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

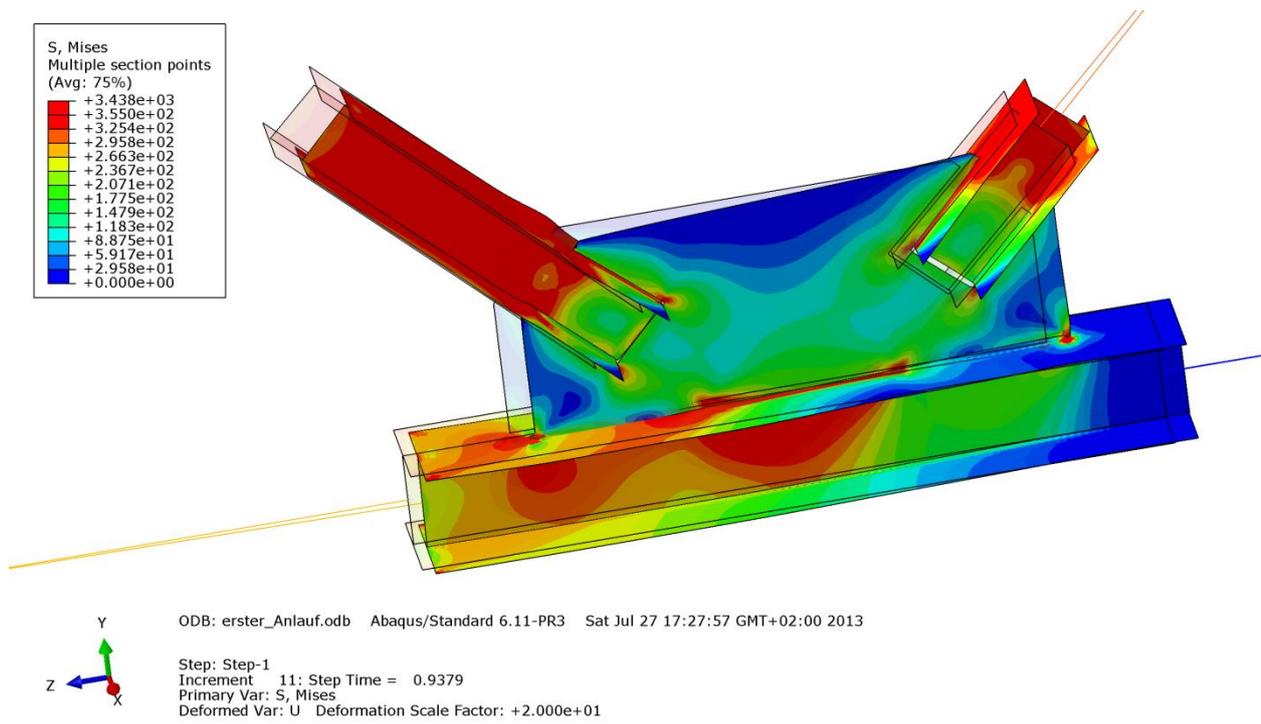


Abbildung B.341 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

• **Verformung [mm]**

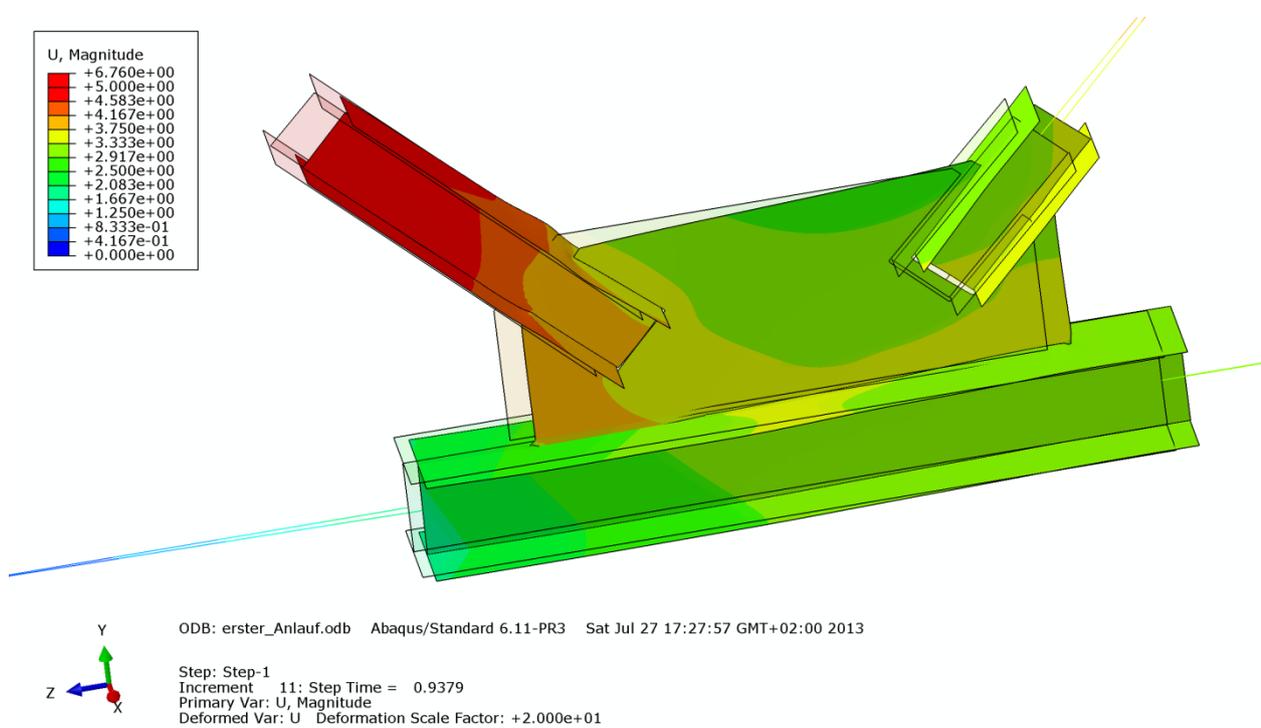


Abbildung B.342 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung

B - 7.4.2.4 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.343 bis B.346 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund Ausknicken bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist, in Kombination mit Ausknicken des Knotenbleches.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

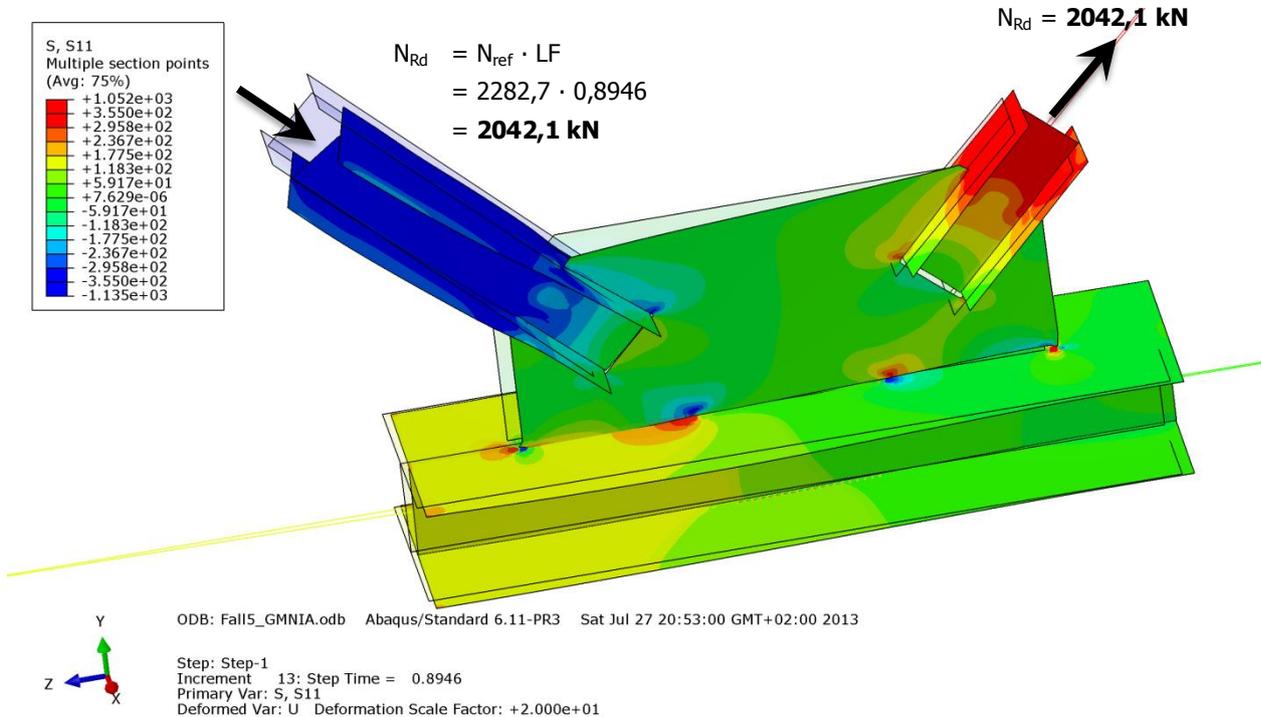


Abbildung B.343 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

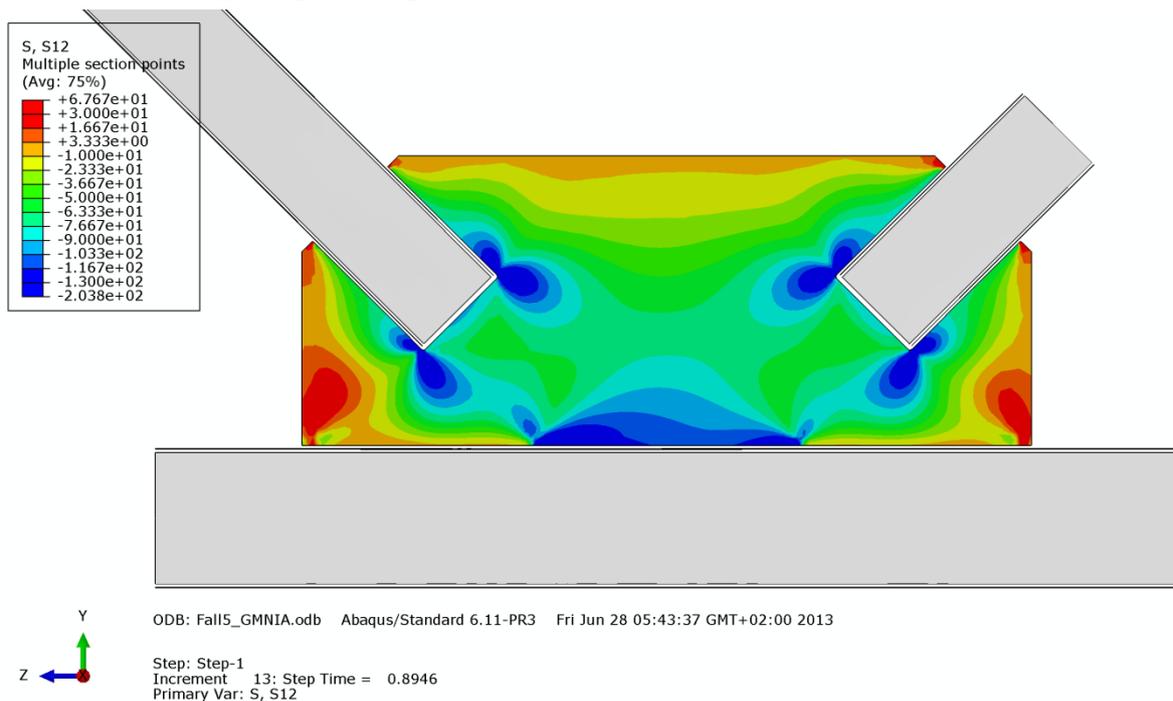


Abbildung B.344 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

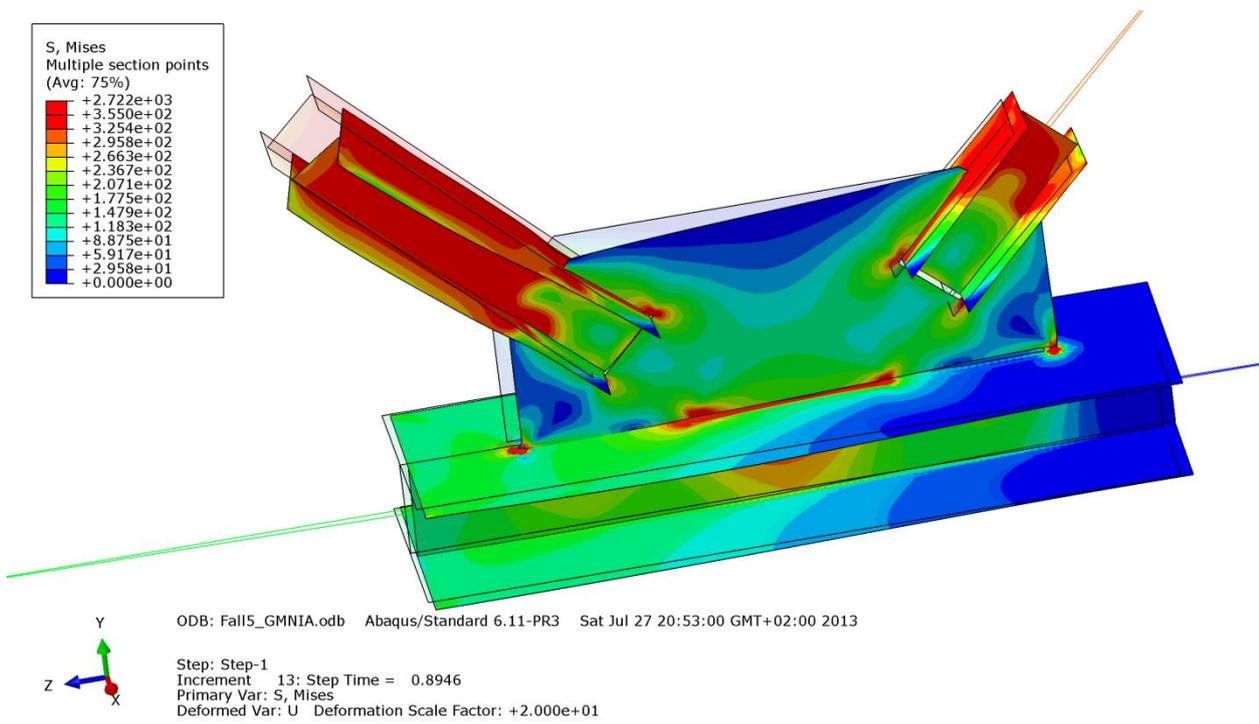


Abbildung B.345 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

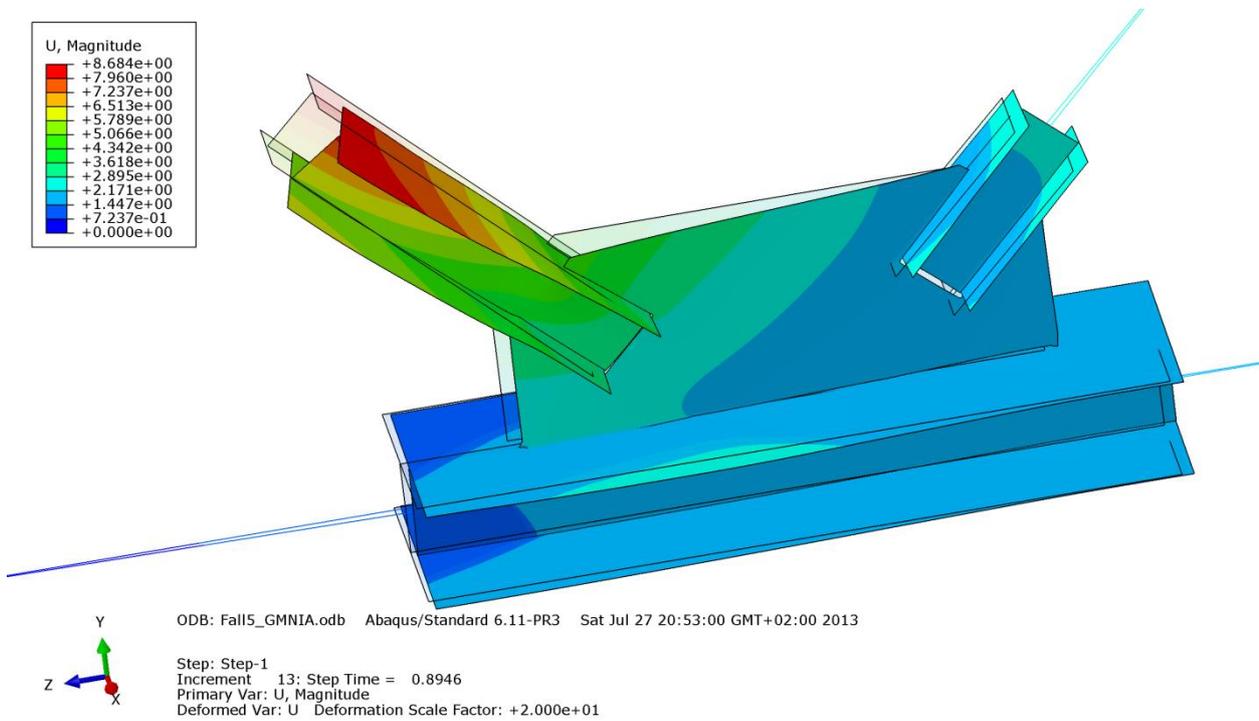


Abbildung B.346 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.4.2.5 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund der Längsverschiebung bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist. Die Flansche der Druckstrebe beulen lokal, der Untergurtstab verdreht sich nicht und auch das Knotenblech knickt nicht aus, wie die Abbildungen B.347 bis B.350 zeigen.

• Normalspannung σ_{11} [N/mm²]

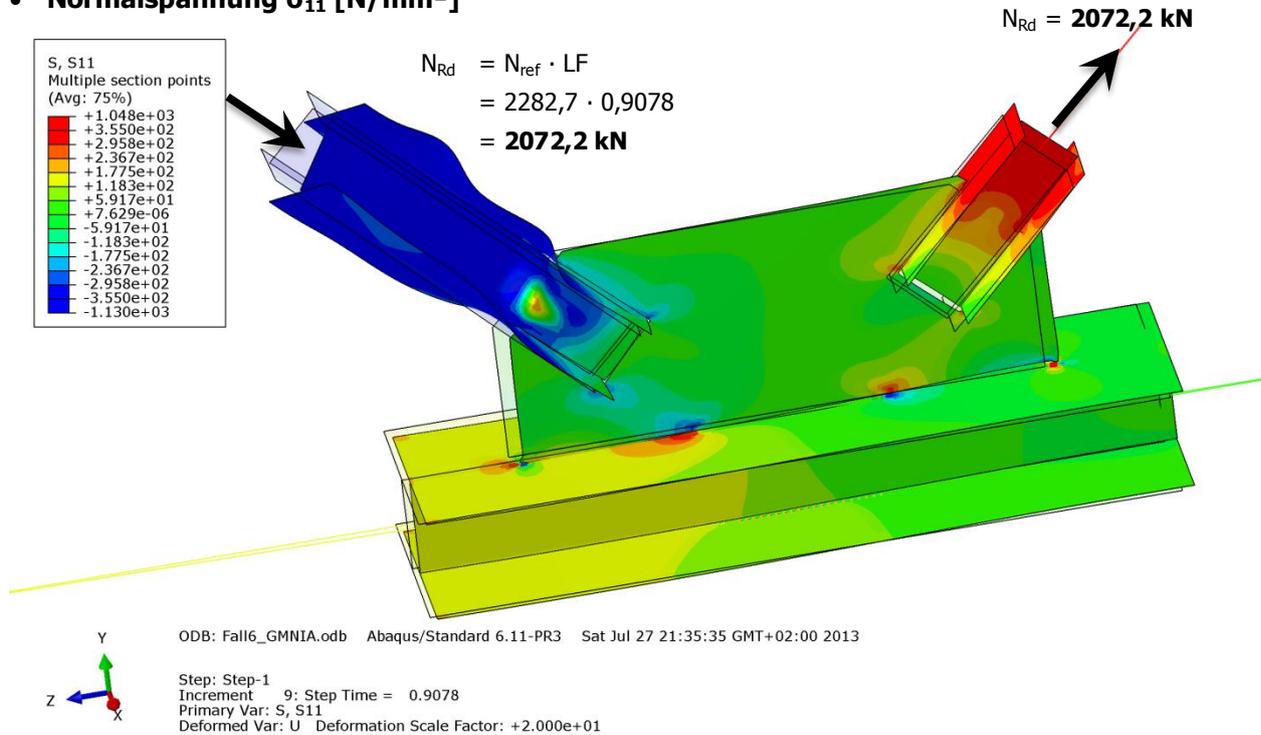


Abbildung B.347 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• Schubspannung σ_{12} [N/mm²]

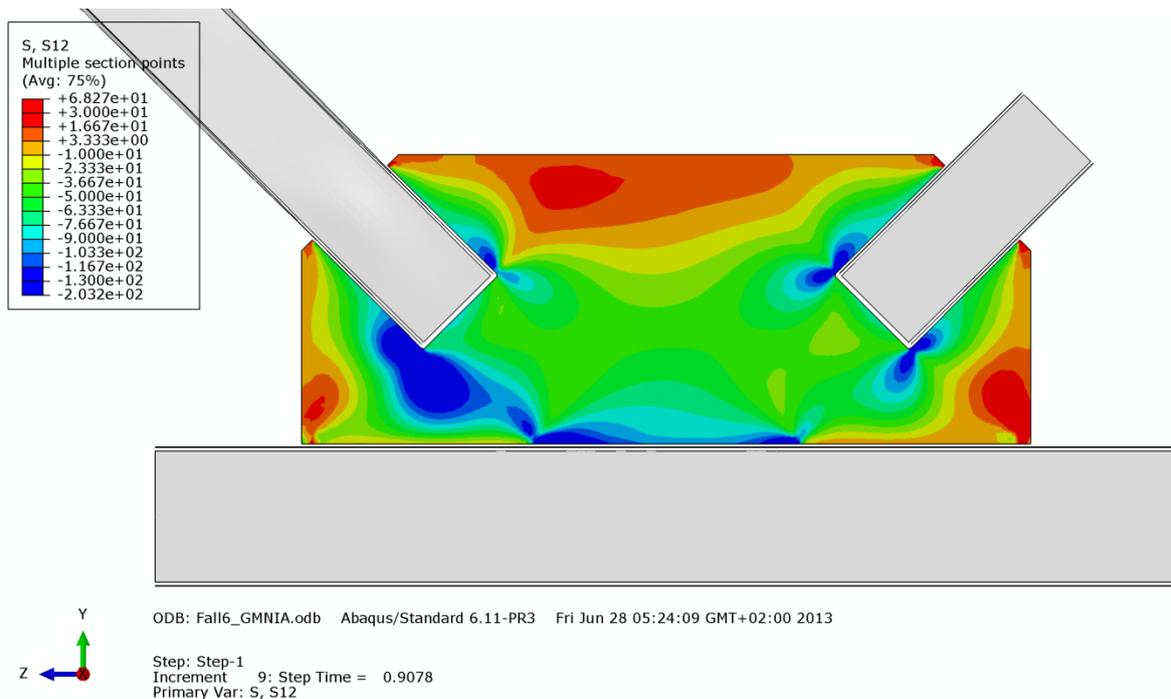


Abbildung B.348 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

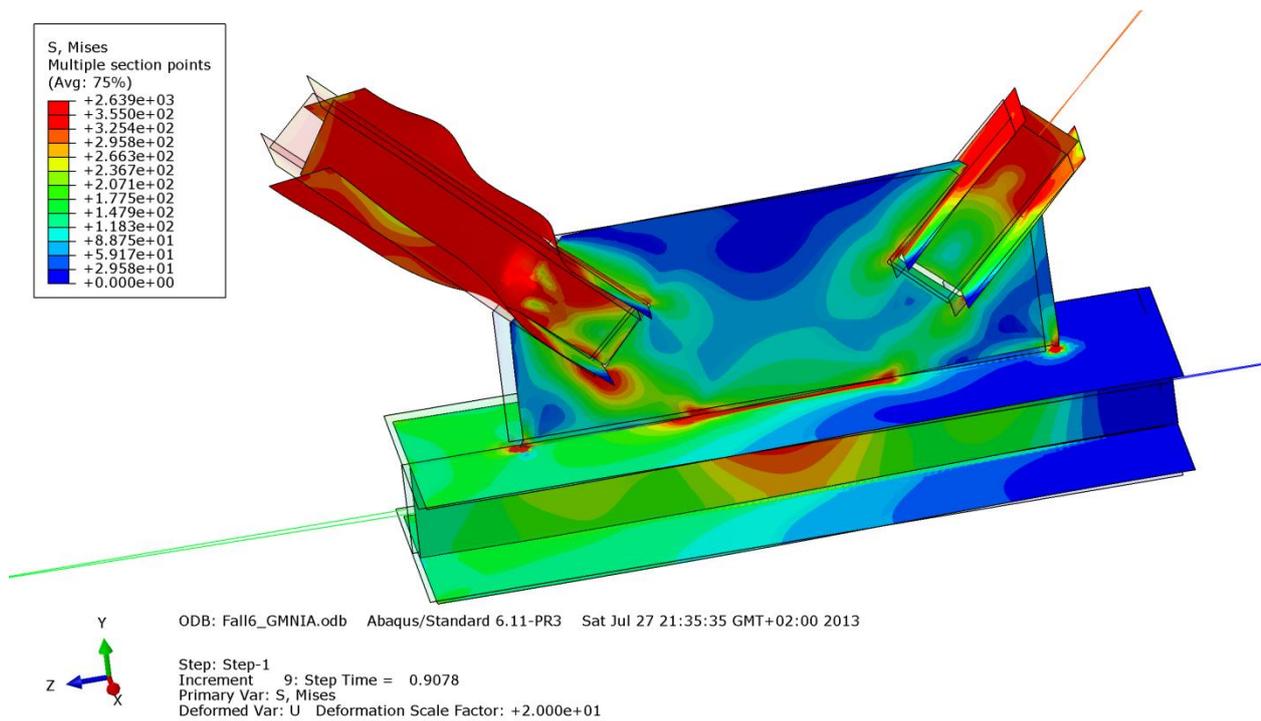


Abbildung B.349 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

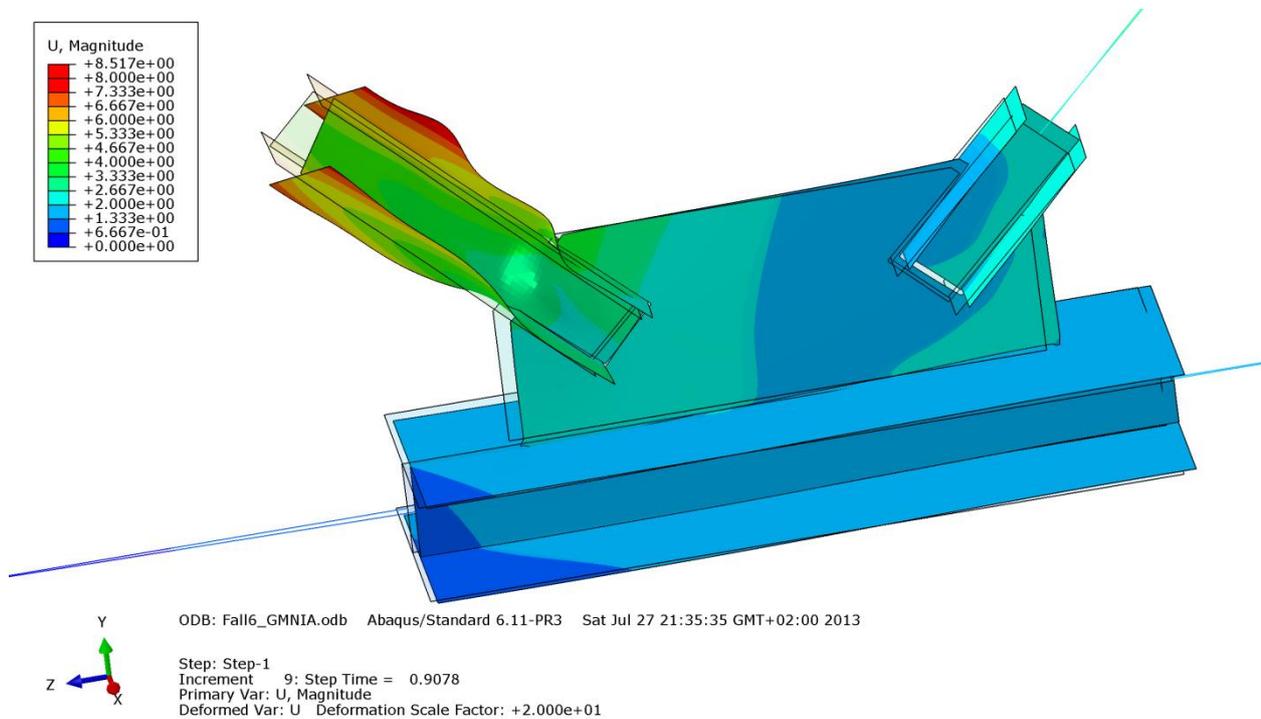


Abbildung B.350 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.4.2.6 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund der Längsverschiebung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist. Das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus, wie auf den Abbildungen B.351 bis B.354 deutlich zu erkennen ist.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

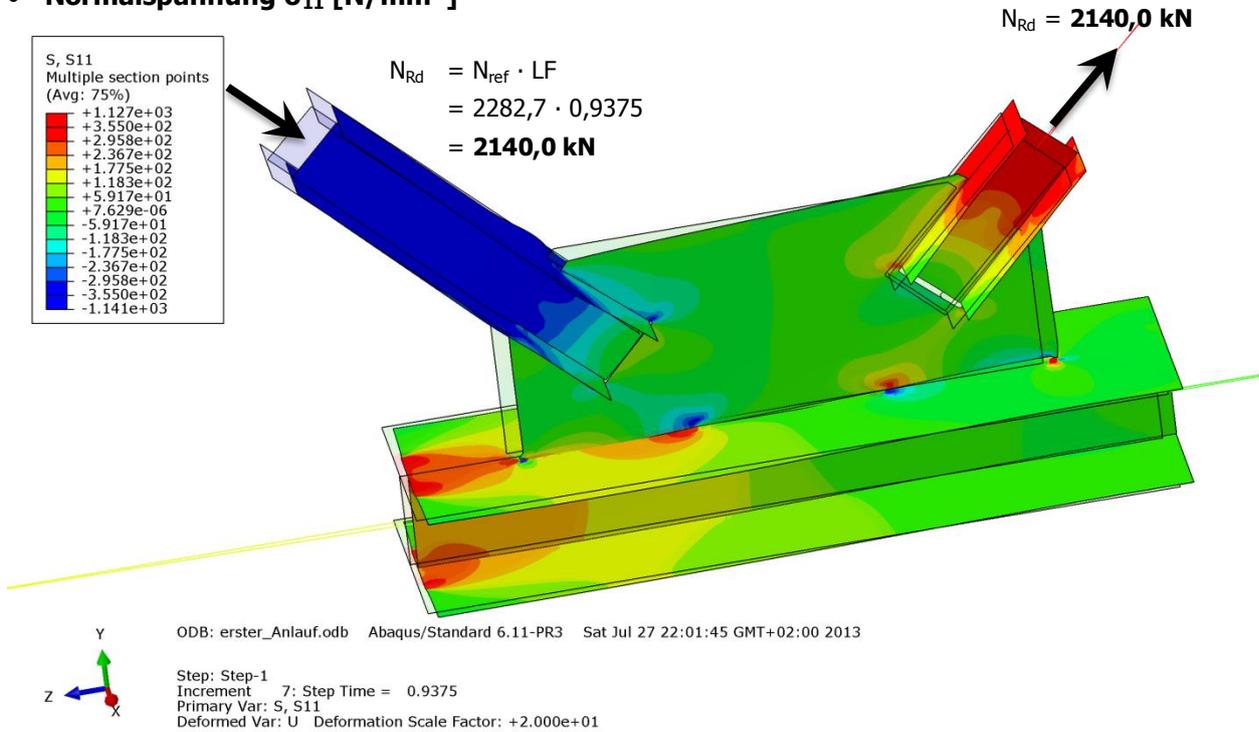


Abbildung B.351 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

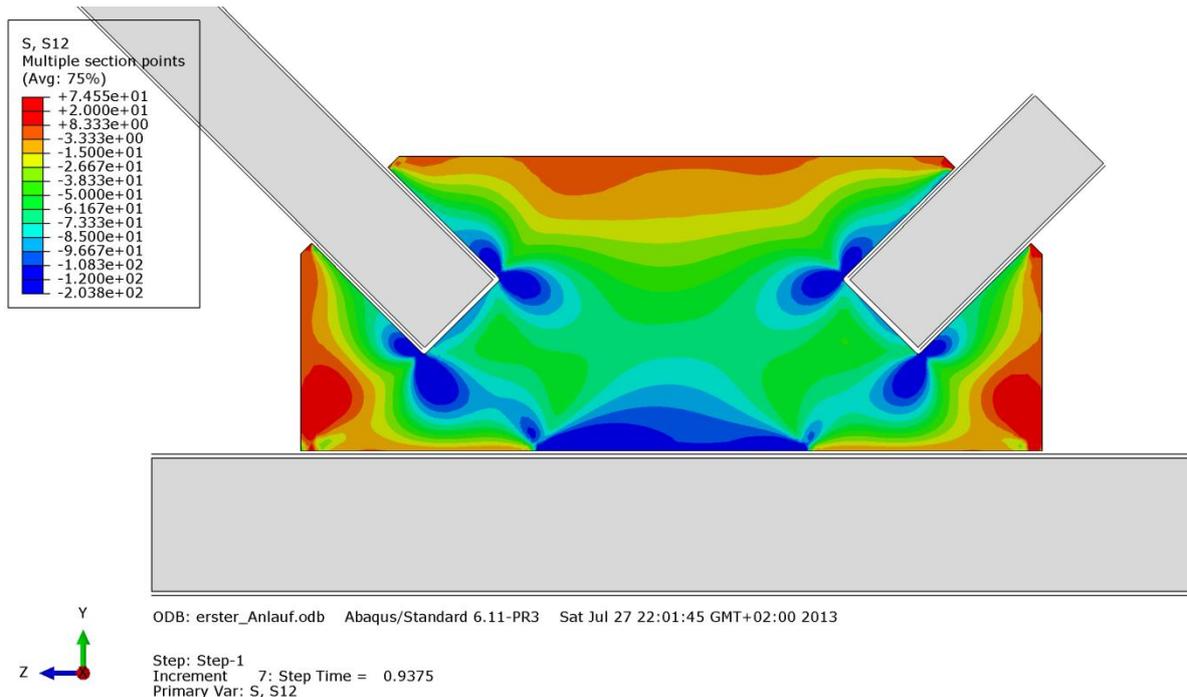


Abbildung B.352 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

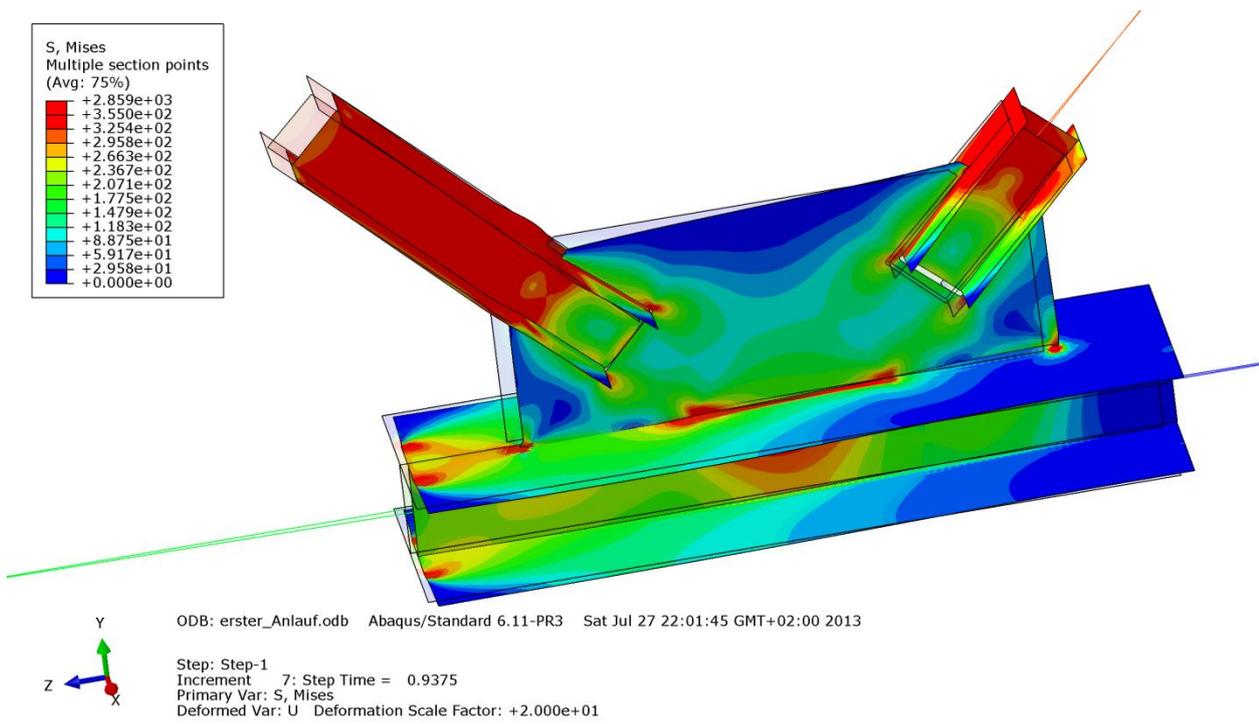


Abbildung B.353 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

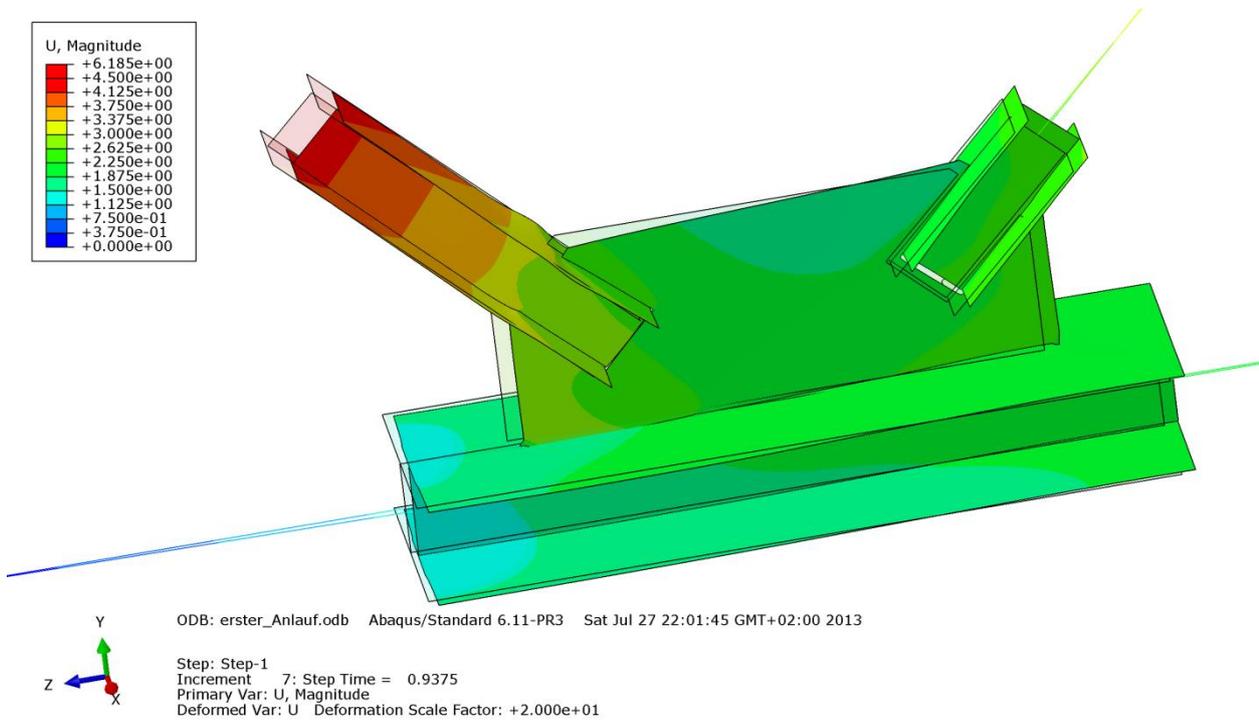


Abbildung B.354 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite

B - 7.4.2.7 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.355 bis B.358 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund Ausknicken bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist. Das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus. Der schmale Untergurtstab weicht seitlich aus. Das Knotenblech bleibt weitgehend elastisch.

• Normalspannung σ_{11} [N/mm²]

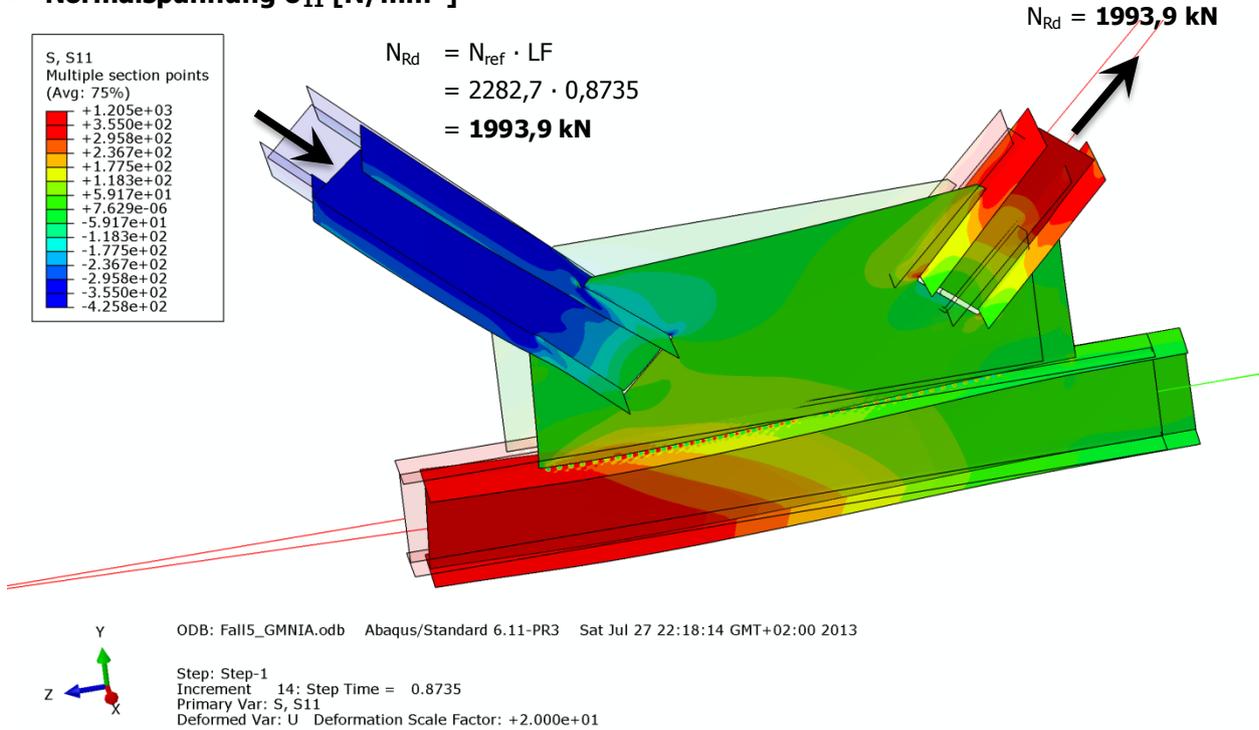


Abbildung B.355 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• Schubspannung σ_{12} [N/mm²]

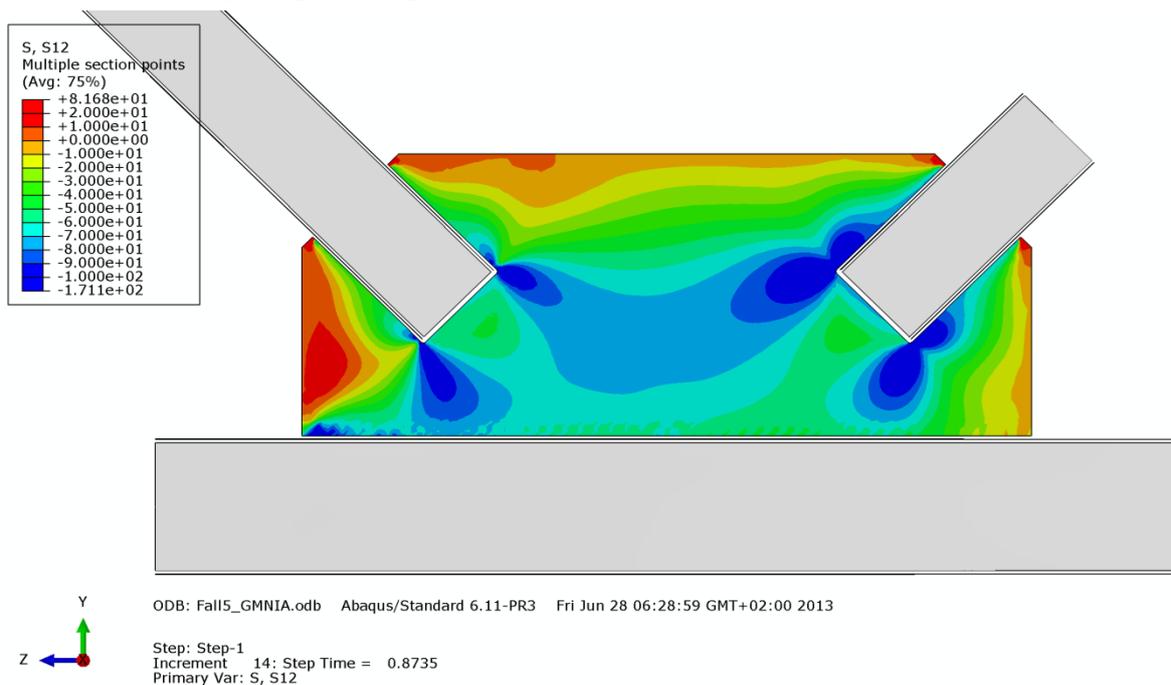


Abbildung B.356 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

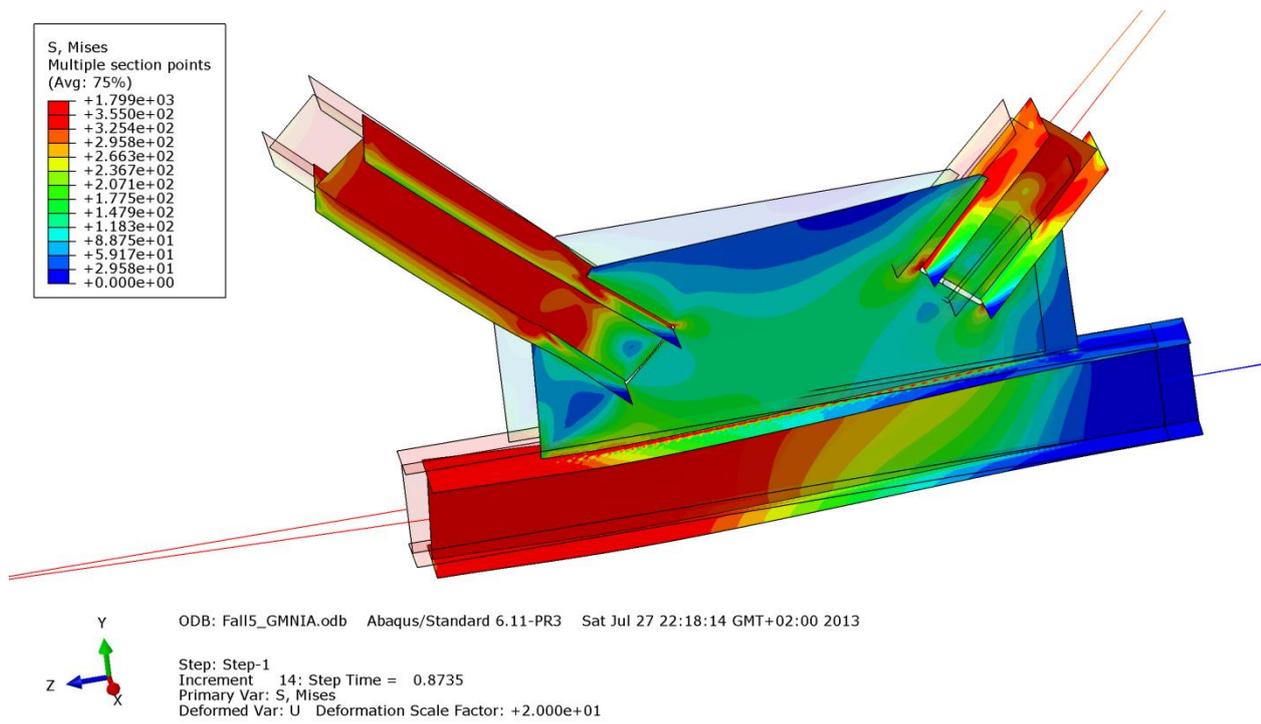


Abbildung B.357 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

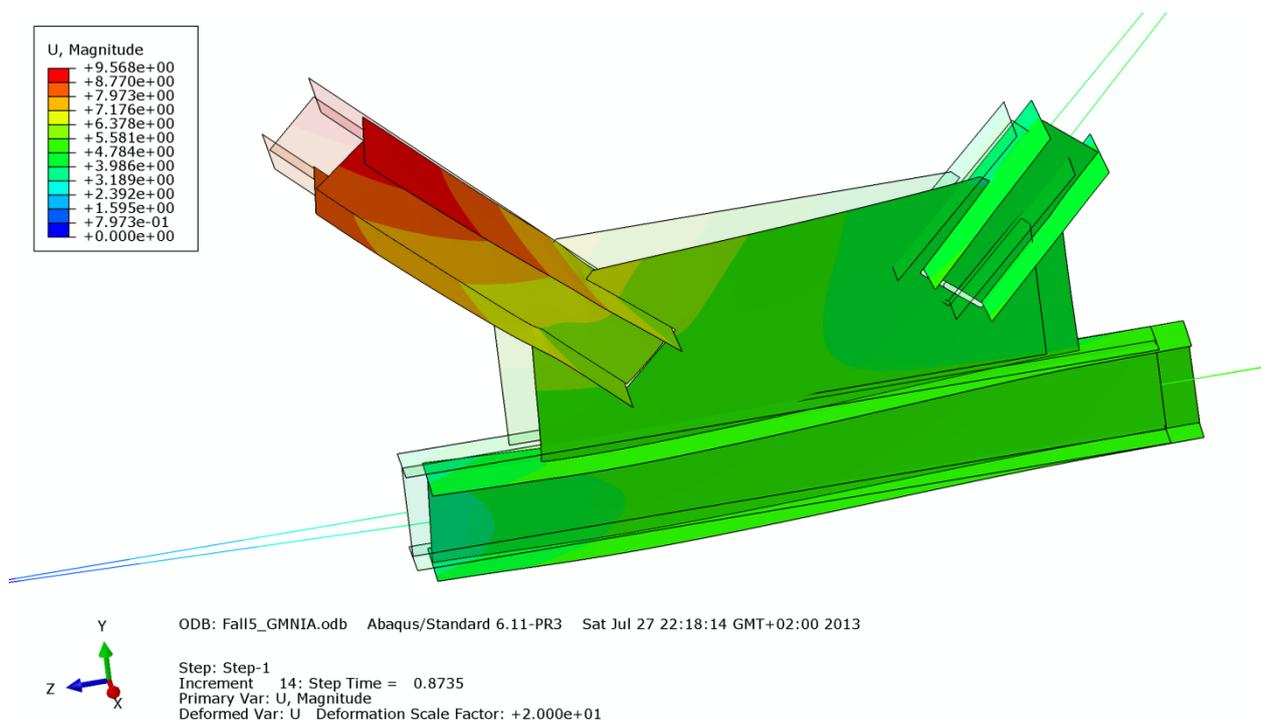


Abbildung B.358 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.4.2.8 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund einer Längsverschiebung bei gleichzeitiger Verdrehung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist. Das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus, wie die Abbildungen B.359 bis B.362 zeigen. Das Knotenblech bleibt weitgehend elastisch. Der schmale Untergurtstab weicht seitlich aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

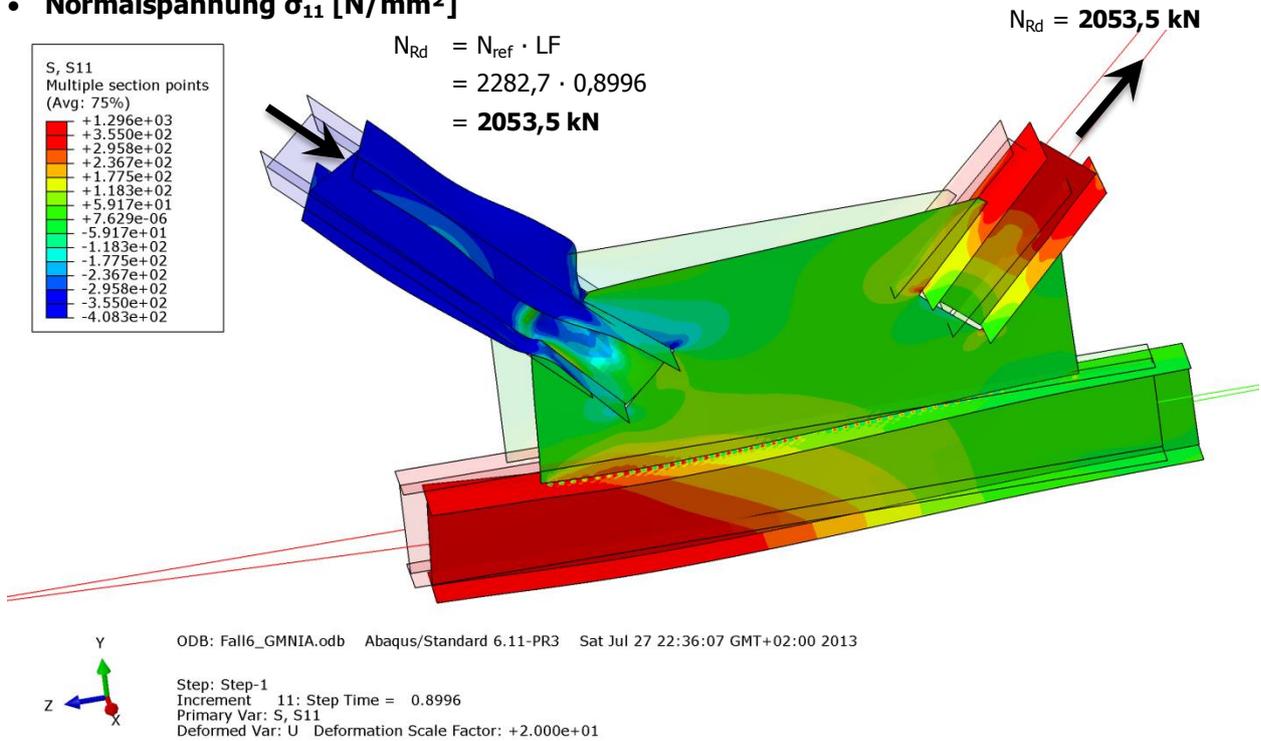


Abbildung B.359 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

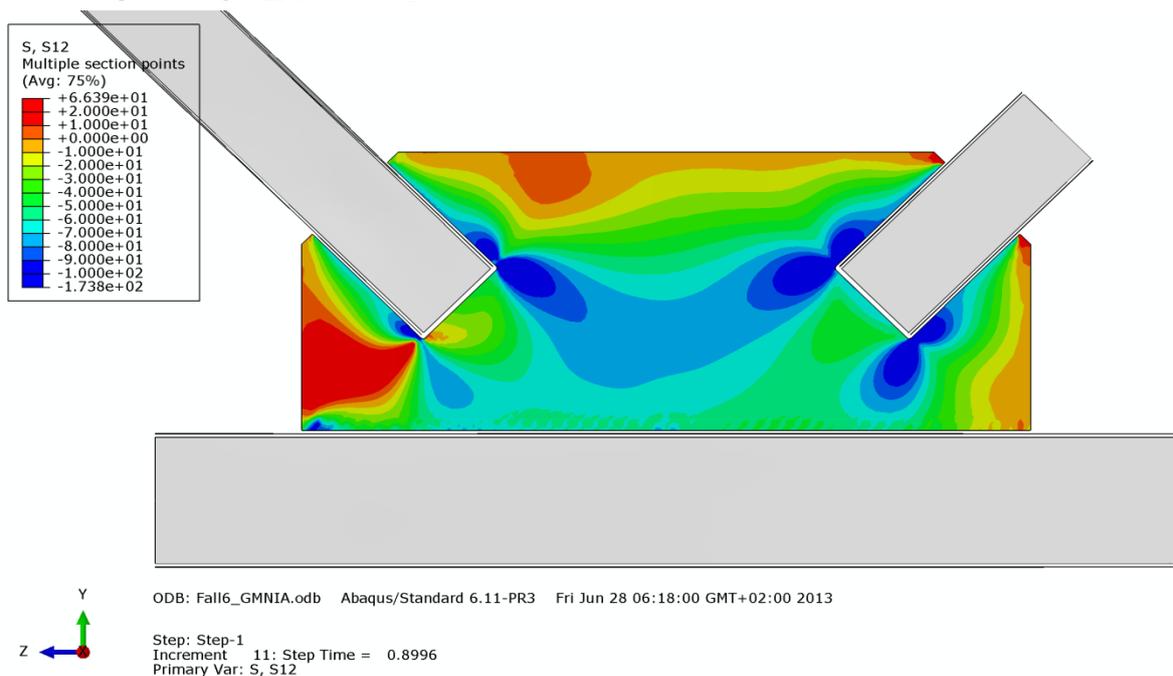


Abbildung B.360 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

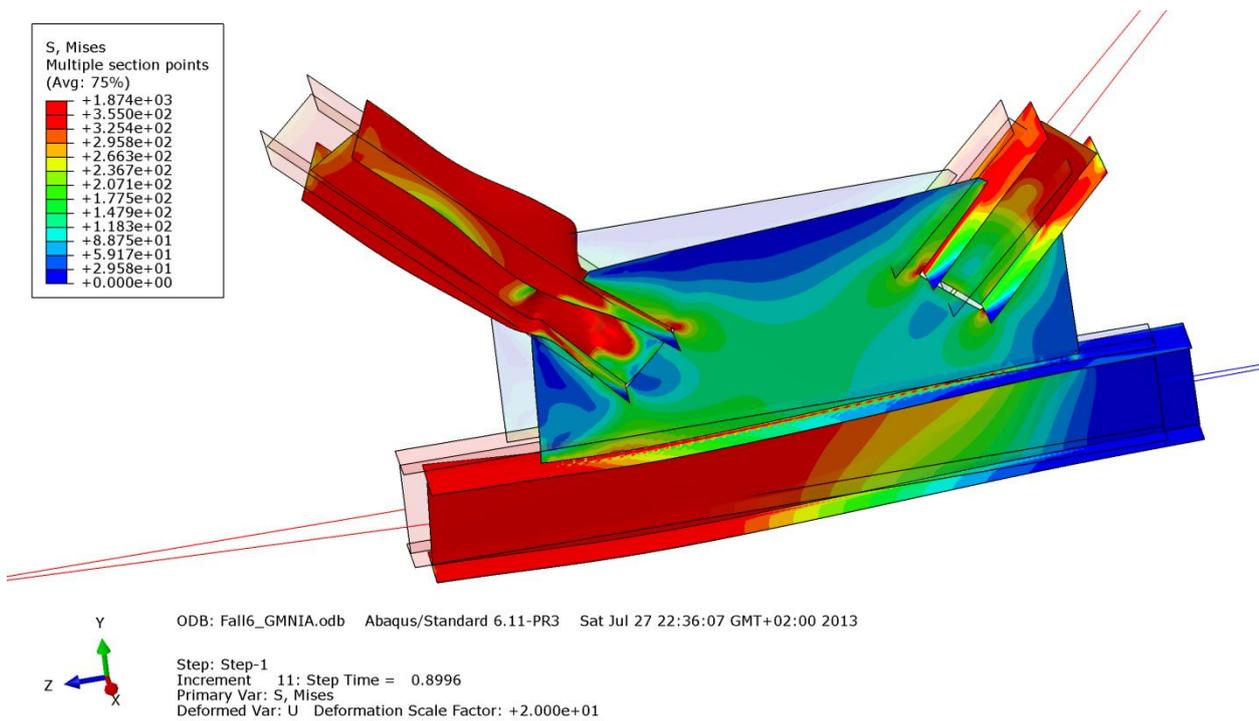


Abbildung B.361 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

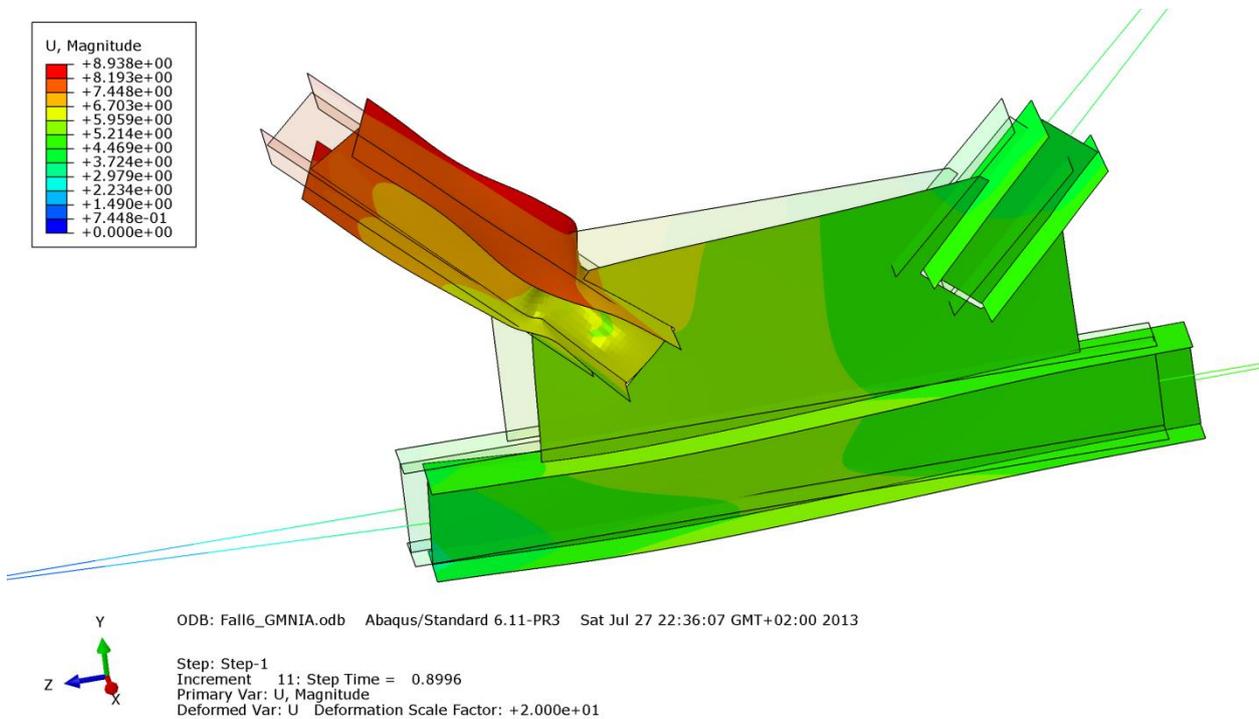


Abbildung B.362 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit halber Untergurtbreite

B - 7.4.2.9 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung – UG-Breite: $0,5 \cdot b_{UG} = 150\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Das System versagt aufgrund einer Längsverschiebung der Druckstrebe, welche weitgehend durchplastiziert ist. Das Knotenblech knickt zufolge der Druckbeanspruchung aus. Das Knotenblech bleibt weitgehend elastisch. Der schmale Untergurtstab weicht seitlich aus, wie auf den Abbildungen B.363 bis B.366 deutlich zu erkennen ist.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

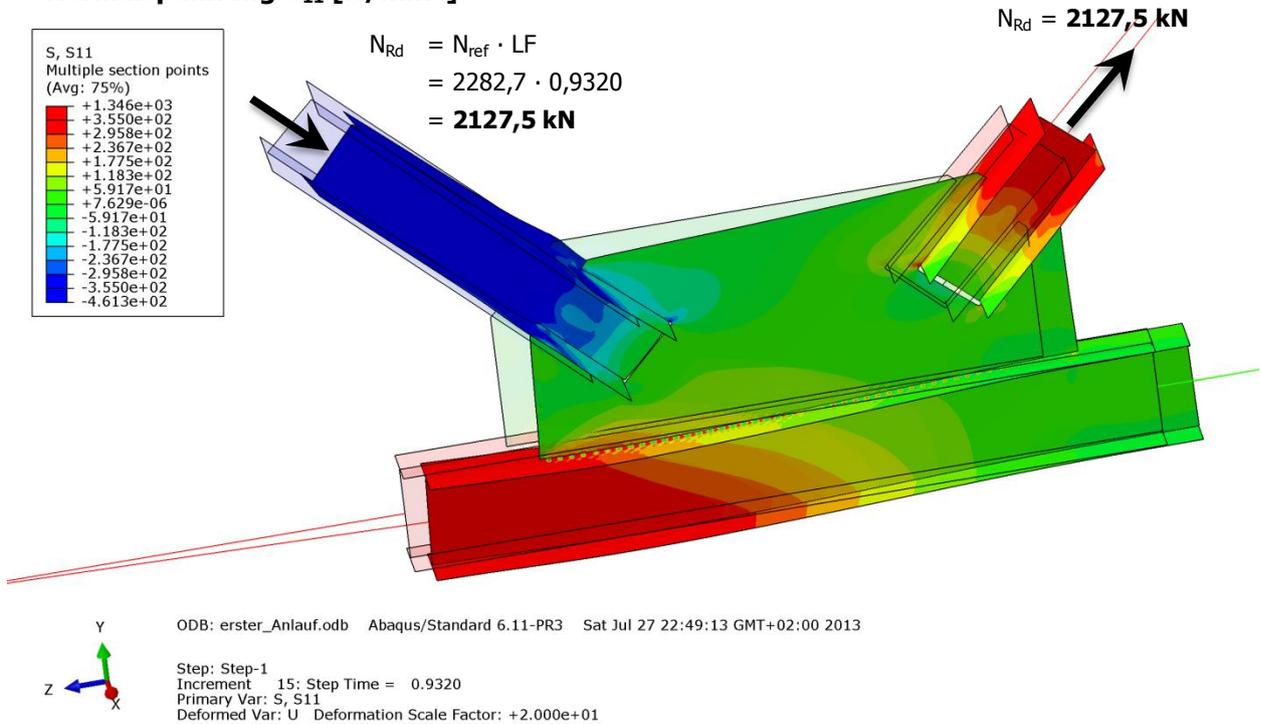


Abbildung B.363 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

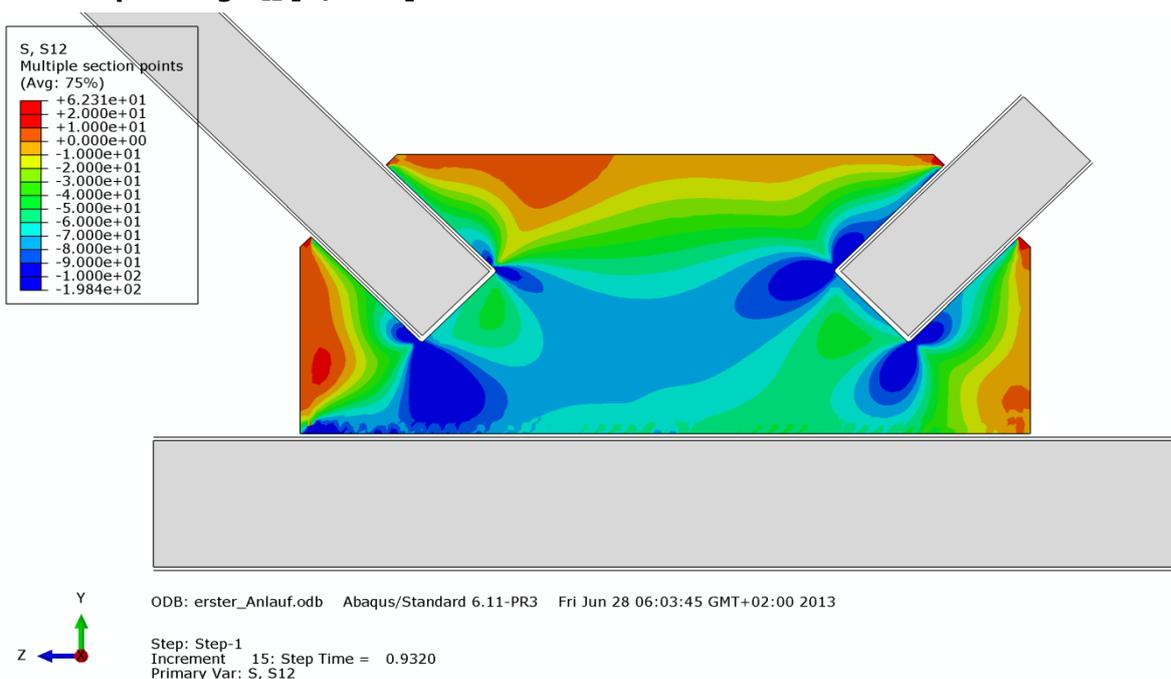


Abbildung B.364 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

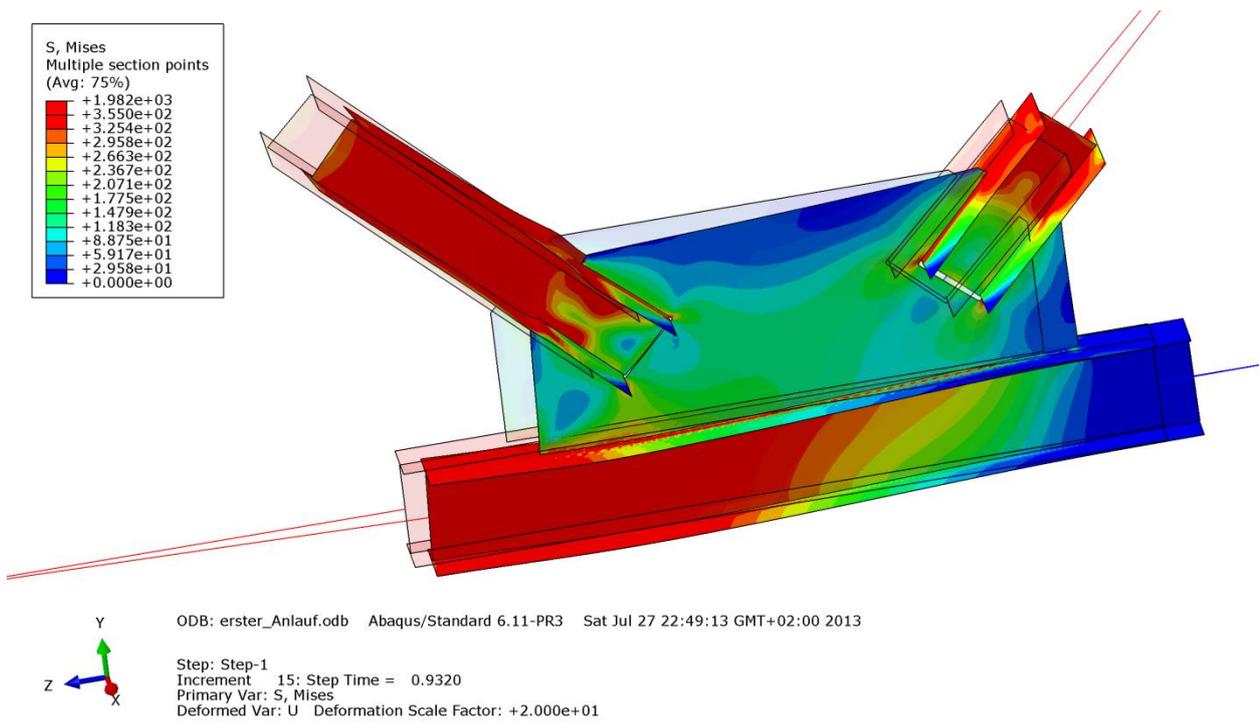


Abbildung B.365 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

• **Verformung [mm]**

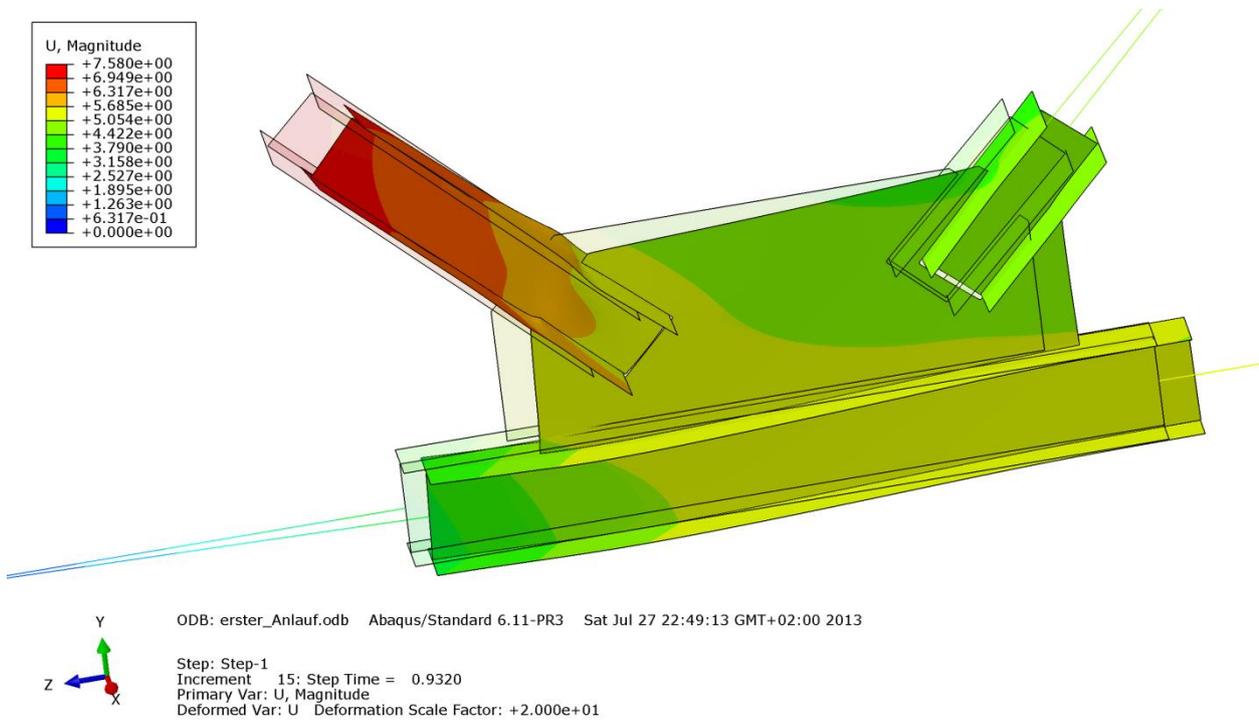


Abbildung B.366 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit halber Untergurtbreite

B - 7.4.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Untergurtbreite

Die Tabelle B.51 zeigt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit verschiedenen Untergurtbreiten, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. mit der Imperfektion als Knotenblechschiefstellung gegenüber:

- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 300\text{mm}$ mit linear elastisch – ideal plastischer Materialmodellierung des gesamten Systems (aus Abschnitt B - 5.9)
- Untergurtbreite lt. Profiltabelle $b_{UG} = 300\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Doppelte Untergurtbreite $b_{UG} = 600\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes
- Halbe Untergurtbreite $b_{UG} = 150\text{mm}$ mit rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe und des Untergurtstabes

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	3355mm
Material	S355	$\lambda_{z,0,L} =$	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	2945mm
$t_{\text{Knotenblech}} =$	40mm	$\lambda_{z,0,L_{ges}} =$	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge $L_{UG} =$	4750mm

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 300mm (plastisch)		
LF = 0,8836	LF = 0,9062	LF = 0,9366
LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2017,0 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2068,6 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2138,0 kN
UG: Breite 300mm (Zugstr. und UG elastisch)		
LF = 0,8888	LF = 0,9078	LF = 0,9379
LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2028,9 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2072,2 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2140,9 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG elastisch)		
LF = 0,8946	LF = 0,9078	LF = 0,9375
LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2042,1 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2072,2 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2140,0 kN
UG: Breite 150mm (Zugstr. und UG elastisch)		
LF = 0,8735	LF = 0,8996	LF = 0,9320
LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1993,9 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2053,5 kN	LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2127,5 kN
N_{pl} - Druckstrebe =		2185,4 kN
N_{pl} - Zugstrebe =		2185,4 kN
N_{ref} =		2282,7 kN
<small>(N_{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>		

Tabelle B.51 – Ergebnisse Gruppe 6b – mit Variation der Untergurtbreite

Abbildung B.367 lässt deutlich erkennen, dass es bei der Gruppe 6b nahezu keinen Einfluss auf die maximale Traglast des Fachwerkknotens in Abhängigkeit der untersuchten Untergurtflanschbreiten gibt. Die Tragfähigkeitsdifferenz zwischen $b_{UG} = 150\text{mm}$ und $b_{UG} = 600\text{mm}$ ist verschwindend klein, obwohl sich die Untergurtflanschbreite wie bei den vorher behandelten Gruppen um den Faktor 4 ändert. Es ist also ausreichend Steifigkeit um die schwache Achse, auch bereits bei 150mm Flanschbreite, vorhanden. Lediglich die verminderte Fläche bei 150mm Untergurtbreite würde zu wenig plastische Normalkraft bieten, um die Tragfähigkeit hoch zu halten: N_{Rd} für $N_{pl,UG}$ bei 150mm beträgt 1613,6kN. Somit würde der Untergurt bei linear elastisch – ideal plastischer Modellierung und halber Breite die Traglast limitieren.

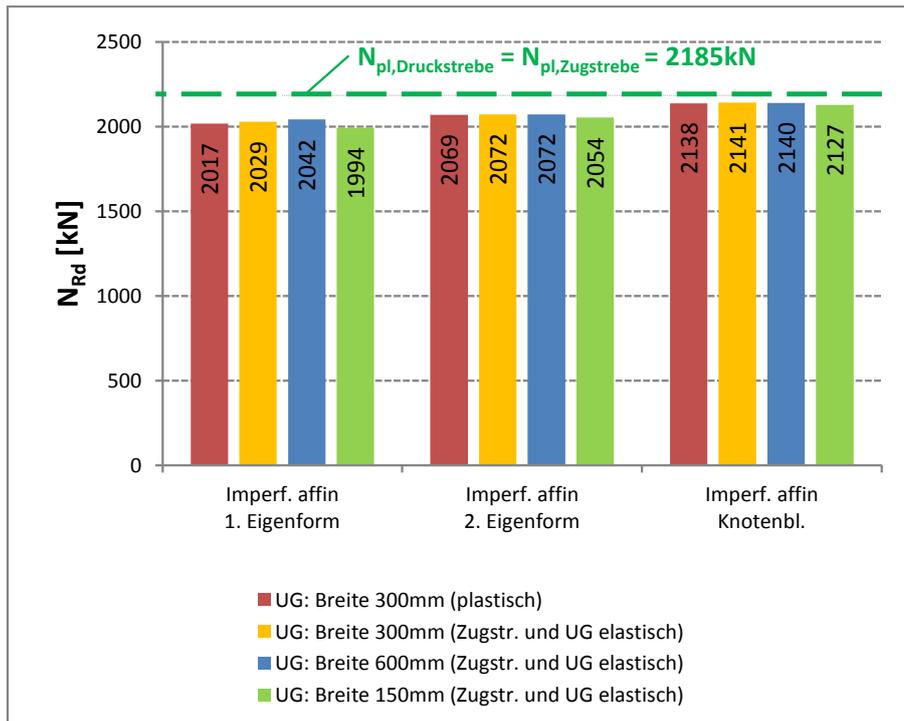


Abbildung B.367 – Ergebnisse Gruppe 6b – mit Variation der Untergurtbreite

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen sind die plastischen Normalkräfte der Streben ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Die Diagonalkraft, die zur Erreichung der plastischen Untergurtnormalkraft notwendig ist, beträgt 2668kN (für die reguläre Untergurtbreite von 300mm). Sie kann nicht erreicht werden, da die Druckstrebe bereits bei geringeren Traglasten die Tragfähigkeit des Fachwerkknotens limitiert. Somit kann Untergurtstabplastizieren nicht maßgebend werden.

B - 8 Variation der Knotenblechdicke

B - 8.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Knotenblechdicke (Biegesteifigkeit aus der Fachwerkebene) an der Tragfähigkeit des Fachwerkausschnittes bestimmen zu können, wurden im Zuge der Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

zusätzliche Traglastberechnungen mit der halben Knotenblechdicke durchgeführt. Um den Effekt der Untergurtverdrehung möglichst gering zu halten, erfolgten die Berechnungen mit der doppelten Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG}$). Es wurden drei Fälle untersucht: Zwei mit Imperfektion in der Druckdiagonale (erste und zweite Knickeigenform), sowie einer mit der Imperfektion im Knotenblech (Knotenblechschiefstellung).

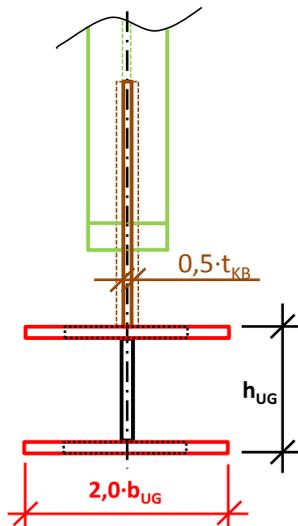


Abbildung B.368 – Variation der Knotenblechdicke

Die Tabelle B.52 zeigt die doppelten Breiten der Untergurtprofile, sowie die Werte der halben Knotenblechdicken als Eingangsgrößen für die FE-Rechnungen.

Gruppe	Profil des Untergurtstabes	Breite UG = $2,0 \cdot b_{UG}$	t_{KB}	$0,5 \cdot t_{KB}$
		[mm]	[mm]	[mm]
1	HEB 450	600	45	22,5
5	HEB 200	400	30	15
6b	HEA 300	600	40	20

Tabelle B.52 – Untergurt- und Knotenblechbreiten

Um keinen, die Traglast des Knotens mindernden Steifigkeitsverlust des Untergurtstabes durch Plastisierungseffekte zu erhalten, wurde in den folgenden Rechnungen, Abschnitt B - 8.2 bis B - 8.4, ein rein elastisches Materialverhalten des Untergurtstabes modelliert. Des Weiteren gilt dies auch für die Zugstrebe, um die Traglast für das System Druckstrebe-Knotenblech herausarbeiten zu können. Auch wurde, um dem Steifigkeitsverlust des Knotenblechs durch Plastizieren entgegenzuwirken, eine weitere Traglastrechnung mit elastischem Materialverhalten im Knotenblech durchgeführt (Untergurtstab und Zugstrebe sind weiterhin elastisch).

B - 8.2 Gruppe 1

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 1 zu charakterisieren sind in Tabelle B.53 zusammengefasst.

Gruppe 1 - $0,5 \cdot t_{KB}$			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge $L^* =$	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3648mm
$0,5 \cdot t_{Knotenblech} = 0,5 \cdot 45mm =$	22,5mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450		

Tabelle B.53 – FE-Eingangsdaten Gruppe 1

B - 8.2.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5mm$) bei doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600mm$) gezeigt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestelltem Knotenblech angenommen.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600mm$ u. $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5mm$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303mm/750 = 5,7mm$. Abbildung B.369 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5mm$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600mm$).

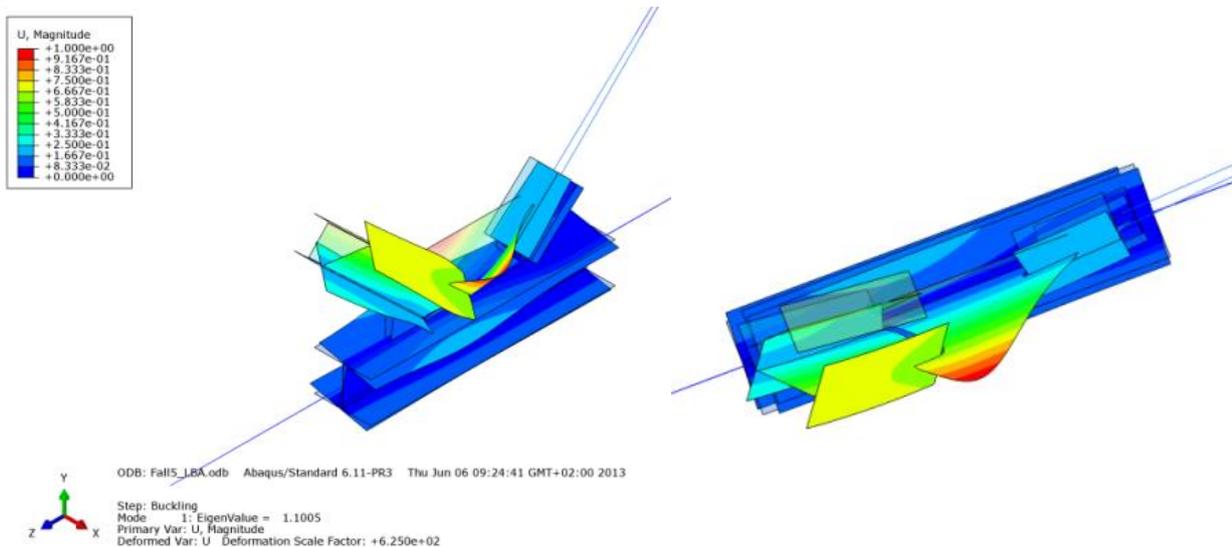


Abbildung B.369 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4303\text{mm}/750 = 5,7\text{mm}$. Abbildung B.370 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

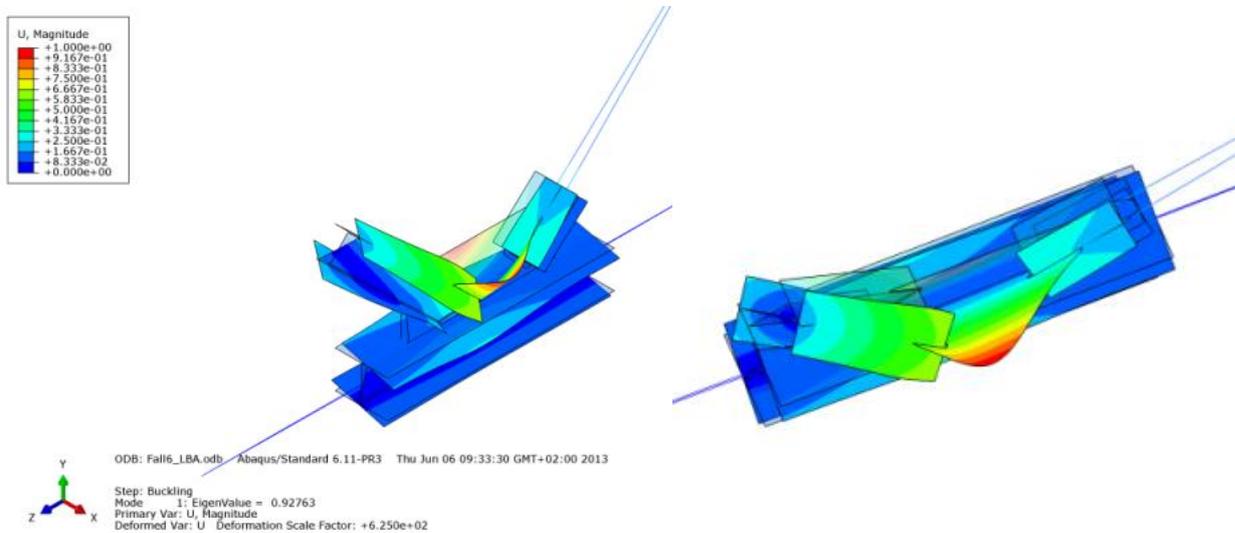


Abbildung B.370 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,3\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 3,2\text{mm}$), wie der Abbildung B.371 entnommen werden kann. Es wurde eine Traglastberechnung mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) für die Imperfektion im Knotenblech durchgeführt.

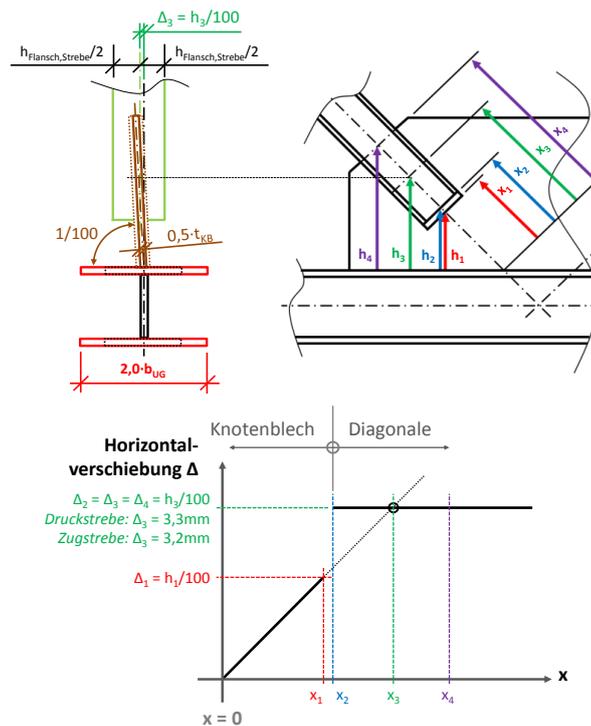


Abbildung B.371 – Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion Knotenblech

B - 8.2.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 8.2.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt im Knotenblech. Dieses ist voll durchplastiziert und beult aus, wie die Abbildungen B.372 bis B.375 zeigen.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

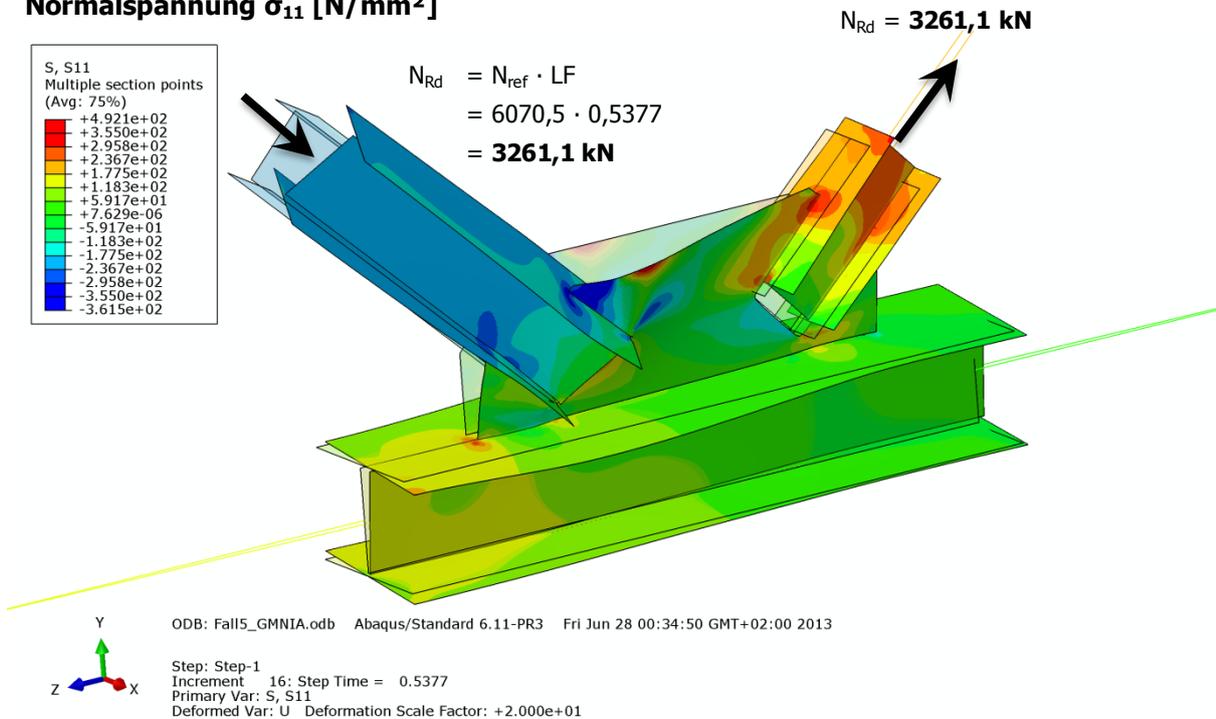


Abbildung B.372 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

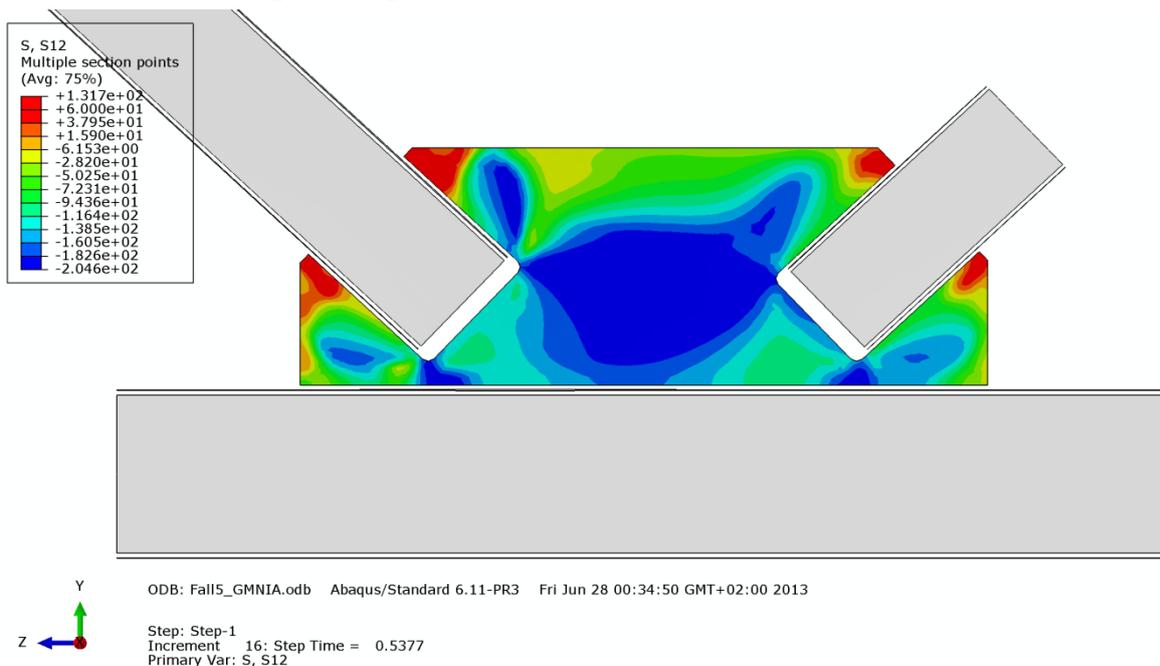


Abbildung B.373 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

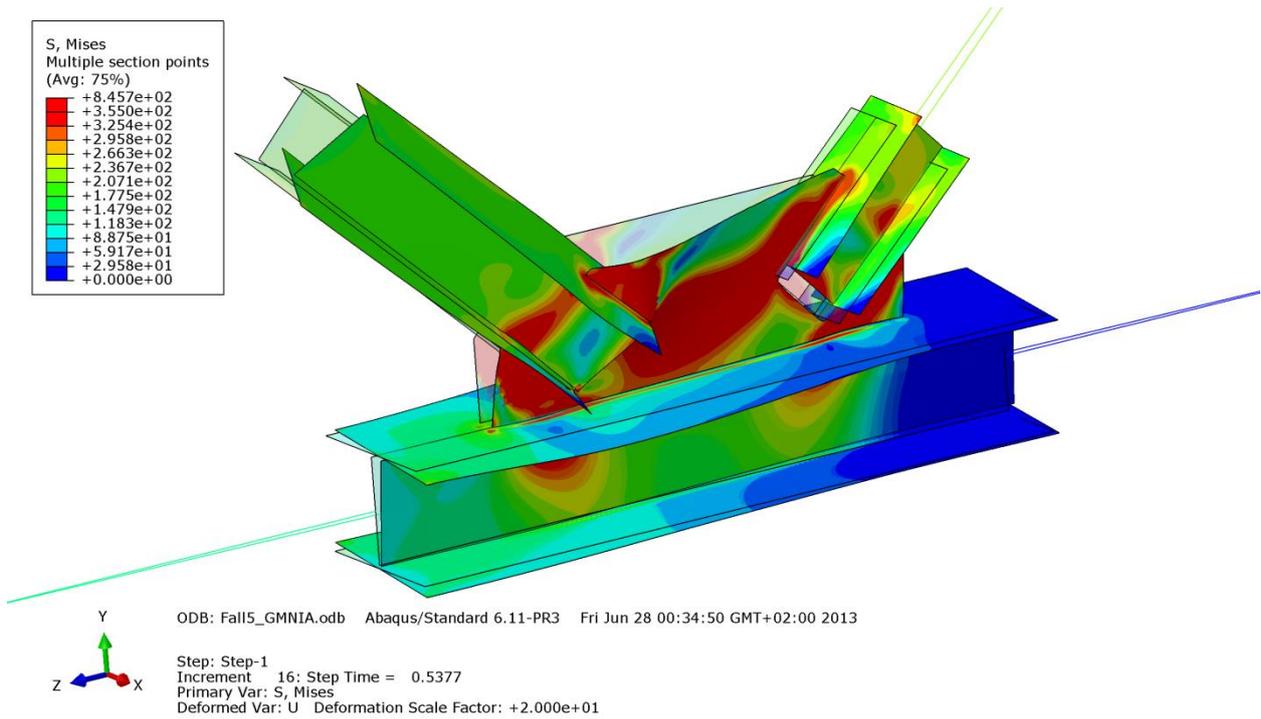


Abbildung B.374 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

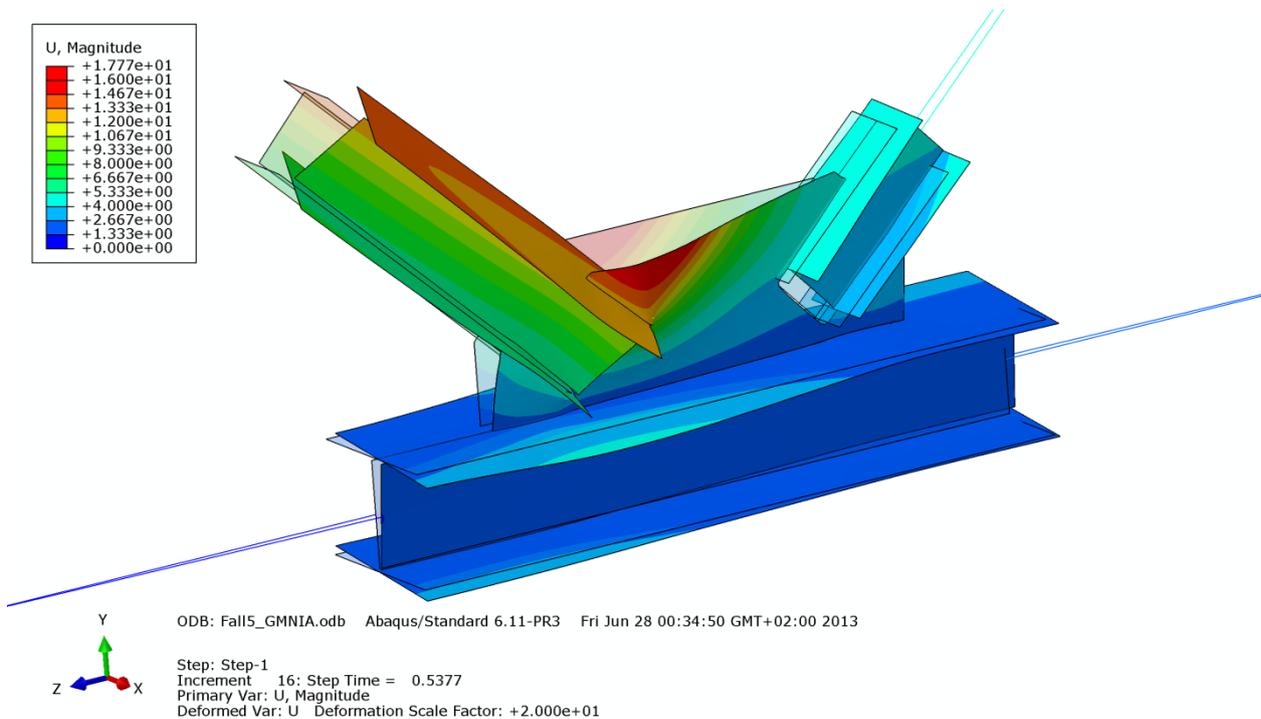


Abbildung B.375 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.2.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt im Knotenblech. Dieses ist voll durchplastiziert und beult aus, wie die nachfolgenden Abbildungen B.376 bis B.379 deutlich erkennen lassen.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

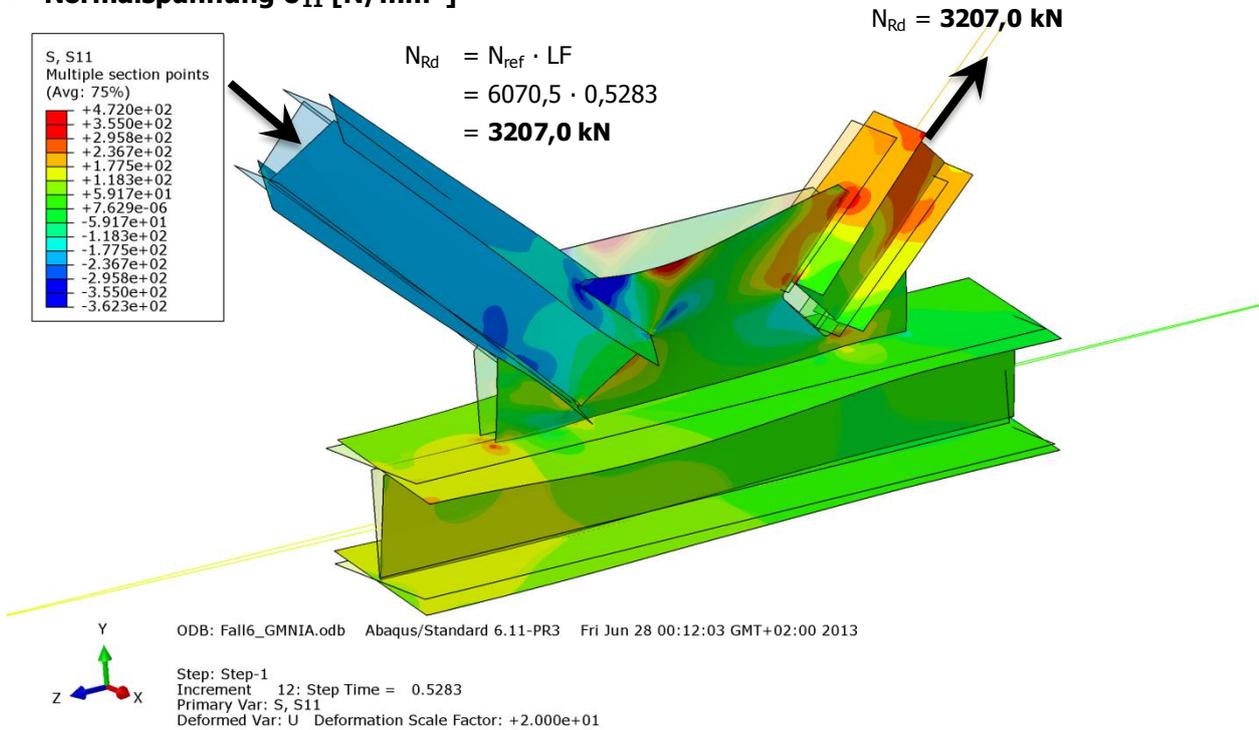


Abbildung B.376 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

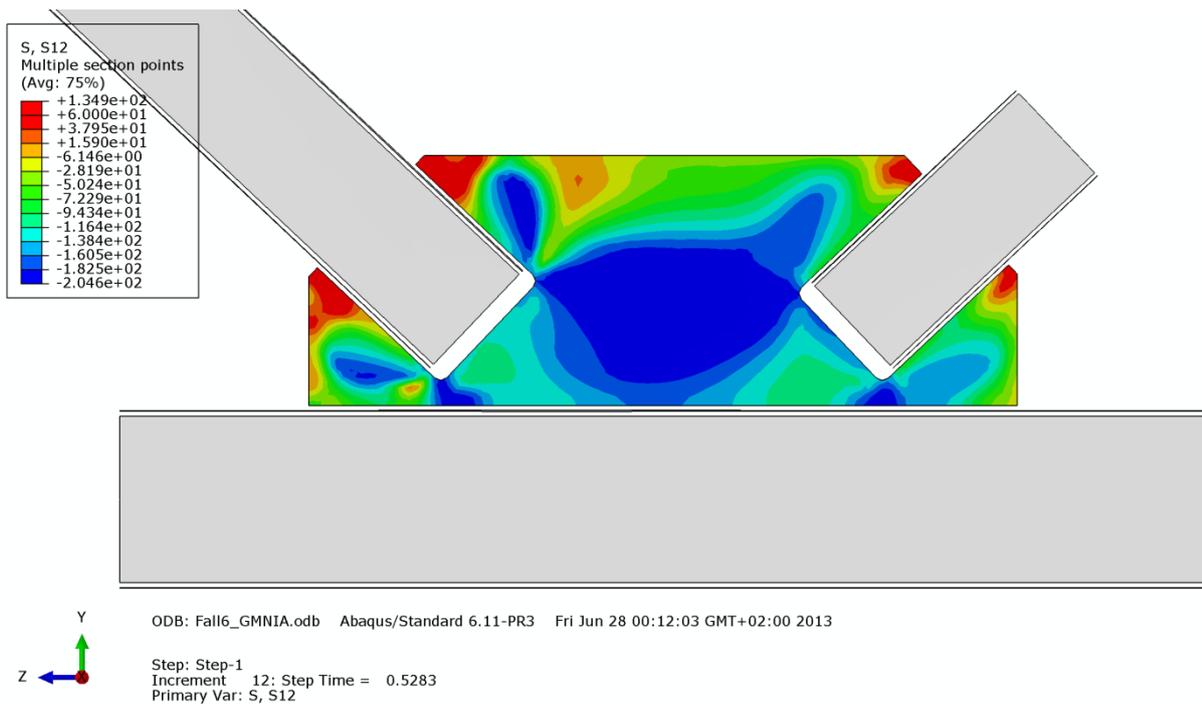


Abbildung B.377 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

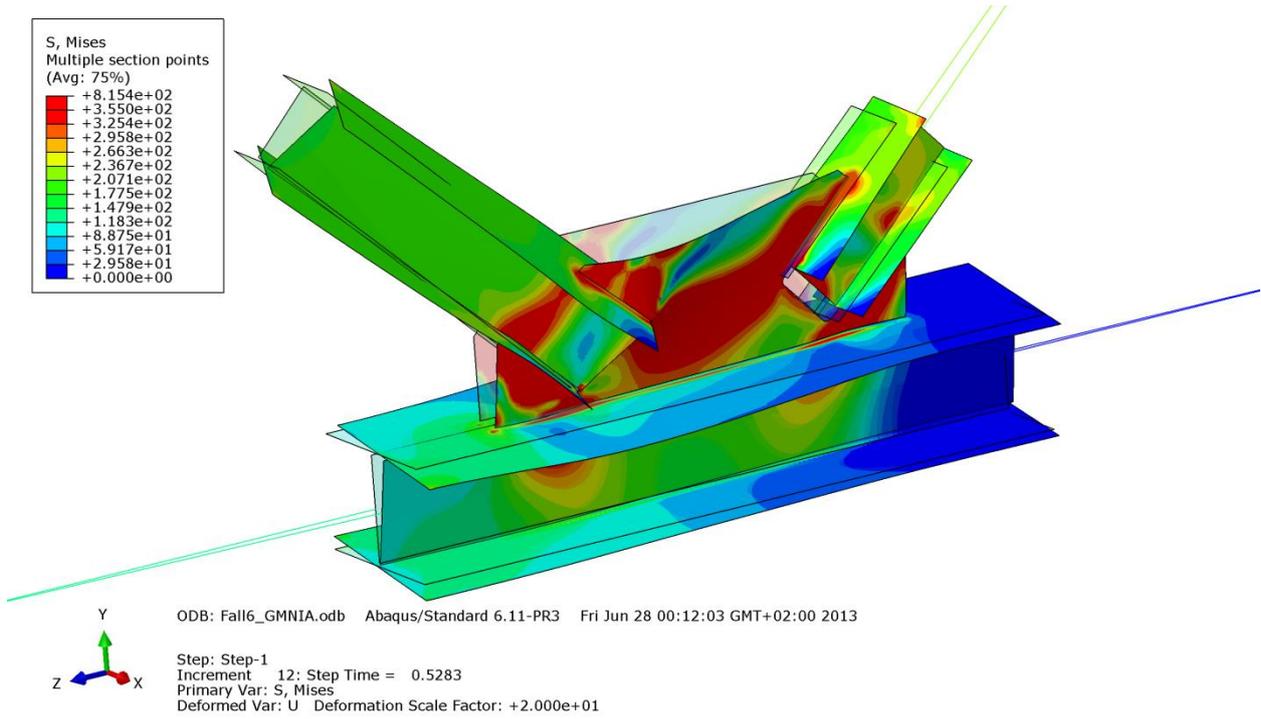


Abbildung B.378 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

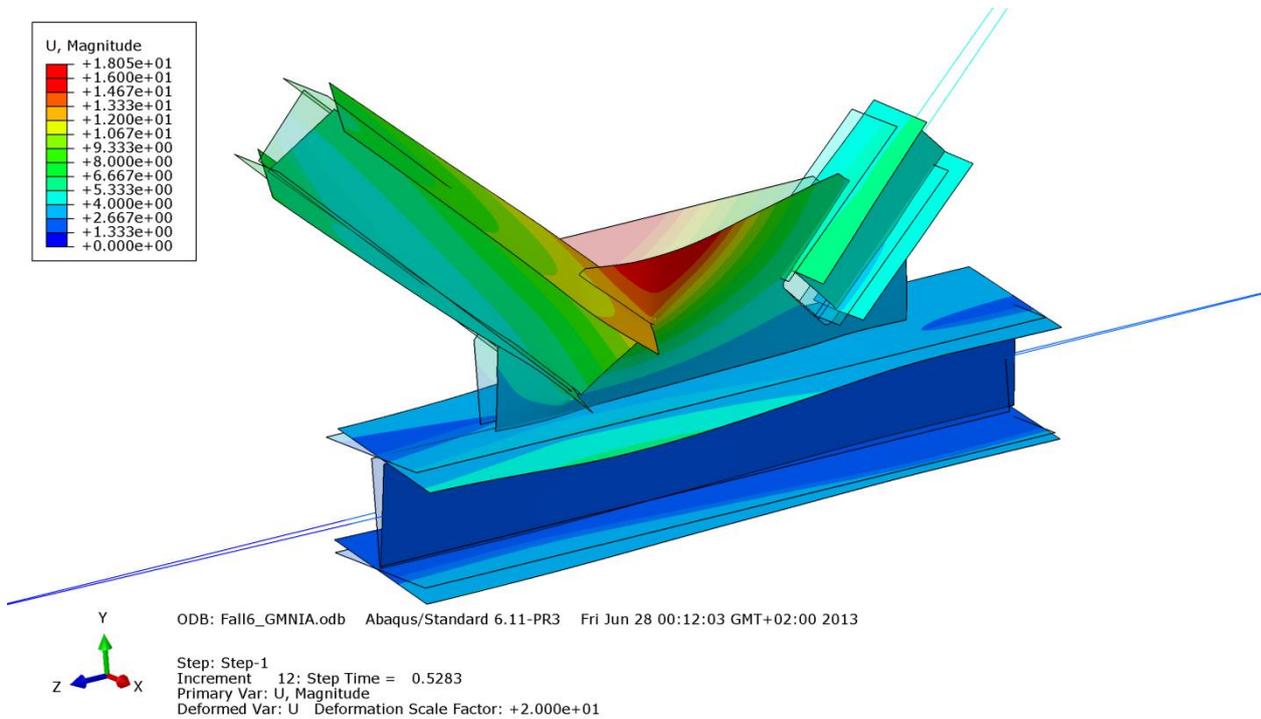


Abbildung B.379 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.2.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.380 bis B.383 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt im Knotenblech. Dieses ist voll durchplastiziert und beult aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

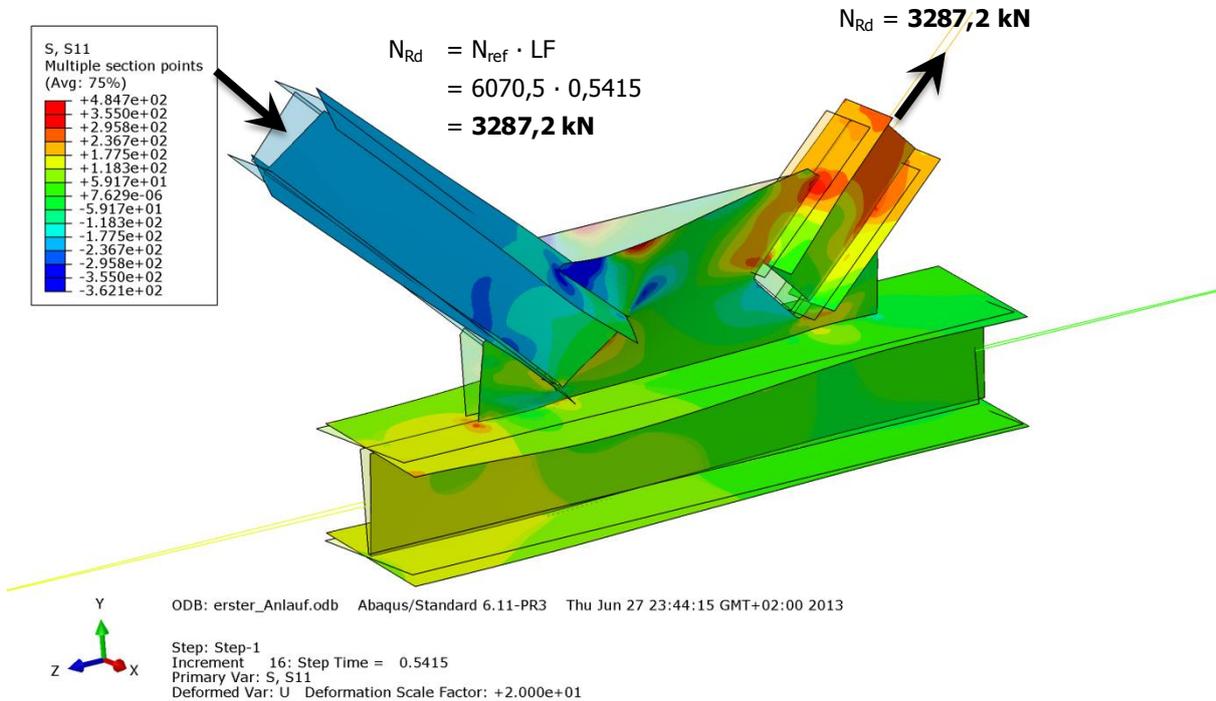


Abbildung B.380 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

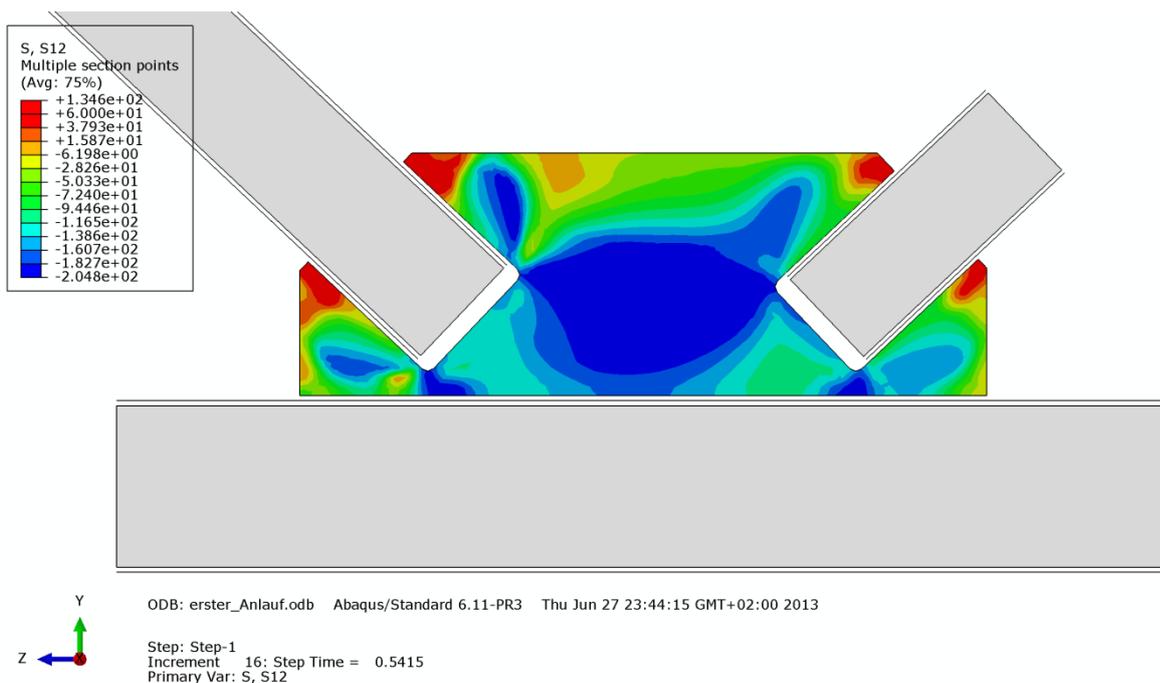


Abbildung B.381 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

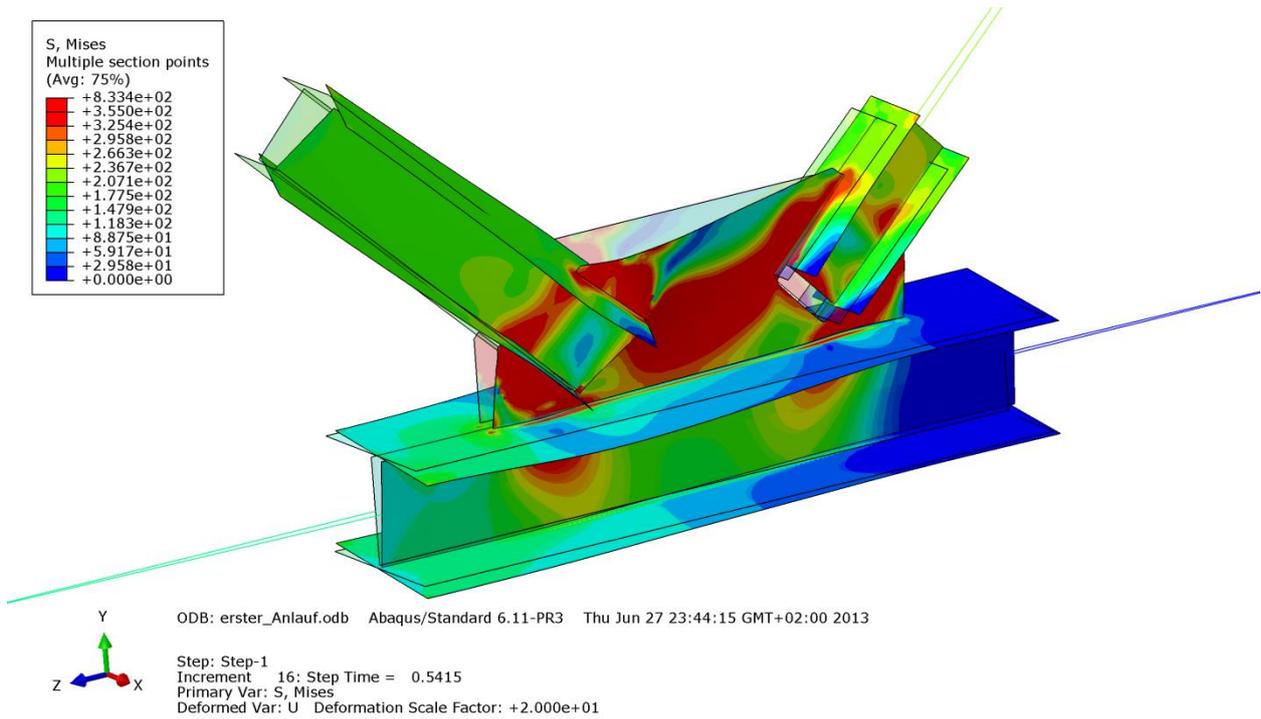


Abbildung B.382 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

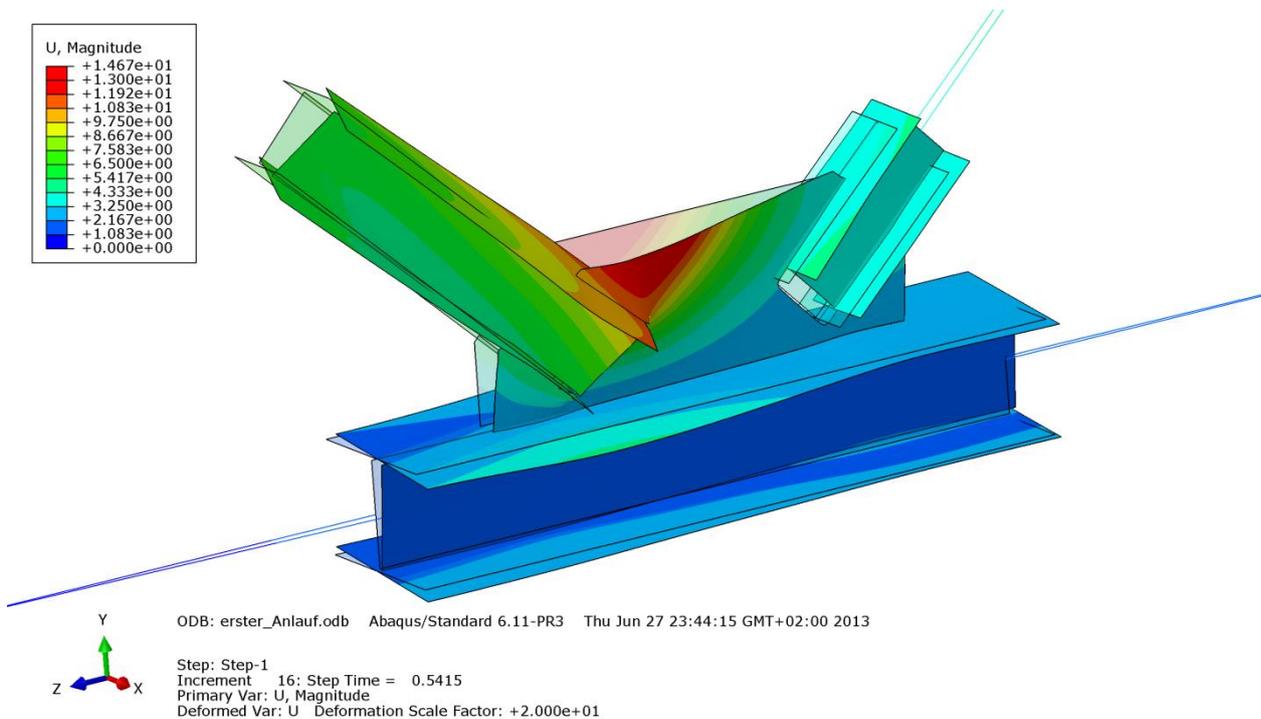


Abbildung B.383 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion mit Knotenblechschieflstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.2.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke

Die Tabelle B.54 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit halber Knotenblechdicke und doppelter Untergurtbreite, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung gegenüber:

- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes
- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe, des Untergurtstabes sowie des Knotenbleches

Am Beginn werden zum Vergleich die Ergebnisse aus Kapitel B - 7.2.3 für die

- reguläre Knotenblechdicke ($t_{KB} = 45\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes wiederholt.

Gruppe 1 - $0,5 \cdot t_{KB}$			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge $L^* =$	4303mm
Material	S355	$\lambda_{z,0,L^*} =$	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3648mm
$0,5 \cdot t_{Knotenblech} = 0,5 \cdot 45\text{mm} =$	22,5mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450		

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG el.)		
LF = 0,9051 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5494,4 kN	LF = 0,8880 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5390,6 kN	LF = 0,9326 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5661,3 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,5377 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3264,1 kN	LF = 0,5283 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3207,0 kN	LF = 0,5415 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3287,2 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr., UG und KB el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,9028 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5480,4 kN	LF = 0,9139 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5547,8 kN	LF = 0,9241 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 5609,7 kN
		N _{pl} - Druckstrebe = 5844,7 kN
		N _{pl} - Zugstrebe = 5505,5 kN
		N _{ref} = 6070,5 kN
(N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)		

Tabelle B.54 – Ergebnisse Gruppe 1 – mit Variation der Knotenblechdicke

Der Ergebnisvergleich der Systemberechnungen in Abbildung B.384 von Gruppe 1 mit regulärer ($t_{KB} = 45\text{mm}$) und halber ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) Knotenblechdicke verdeutlicht den Tragfähigkeitsabfall bei einer reduzierter Blechstärke. Bei einer Reduktion dieser um die Hälfte fällt die Traglast um etwa 40% ab, da zufolge der geringeren Fläche das Knotenblech bereits bei geringen Lasten zu Plastizieren beginnt und deutlich an Steifigkeit verliert (bezogen auf Berechnung mit Zugstrebe und Untergurt rein elastisch berechnet).

Um diesen Effekt auszuschalten, wurde eine Berechnung durchgeführt, in welcher neben dem Untergurt- und dem Zugstrebenmaterial auch der Knotenblechwerkstoff rein elastisch modelliert wurde. Somit tritt kein Steifigkeitsverlust des Knotenbleches aufgrund Plastizierung ein, wodurch die Traglasten des Systems mit halber Knotenblechdicke wieder die Niveaus jener Tragfähigkeiten mit regulärer Stärke erreichen. Das bedeutet, dass der Fachwerkknoten im Knotenblech bei halber Dicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 22,5\text{mm}$) versagt.

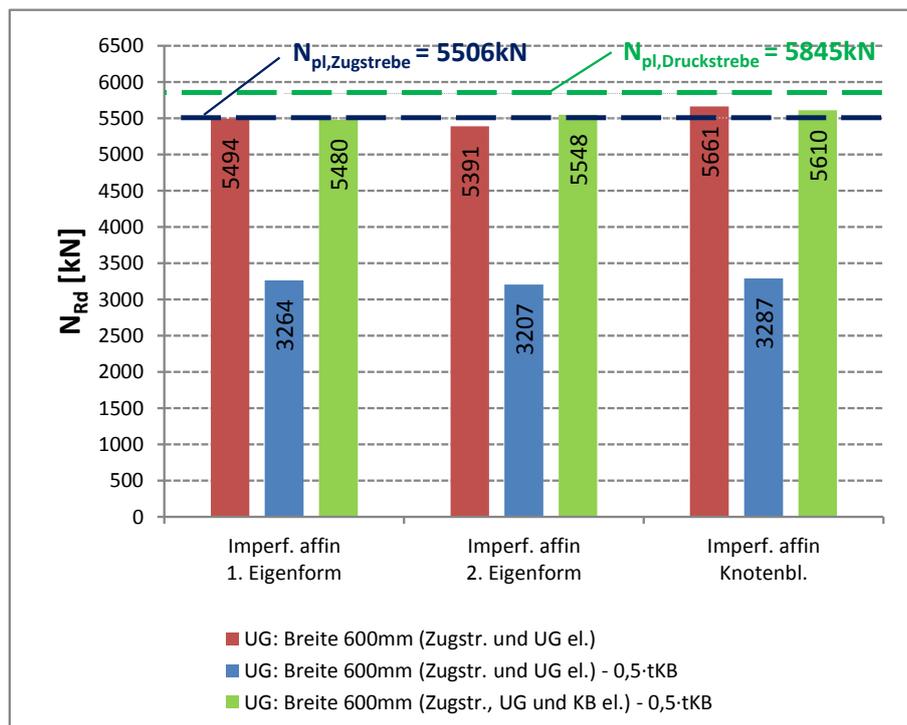


Abbildung B.384 – Ergebnisse Gruppe 1 – mit Variation der Knotenblechdicke

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

B - 8.3 Gruppe 5

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 5 zu charakterisieren sind in Tabelle B.55 zusammengefasst.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge L^* =	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	L_{ges} =	4085mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.55 – FE-Eingangsdaten Gruppe 5

B - 8.3.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) bei doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) gezeigt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestelltem Knotenblech angenommen.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.385 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$).

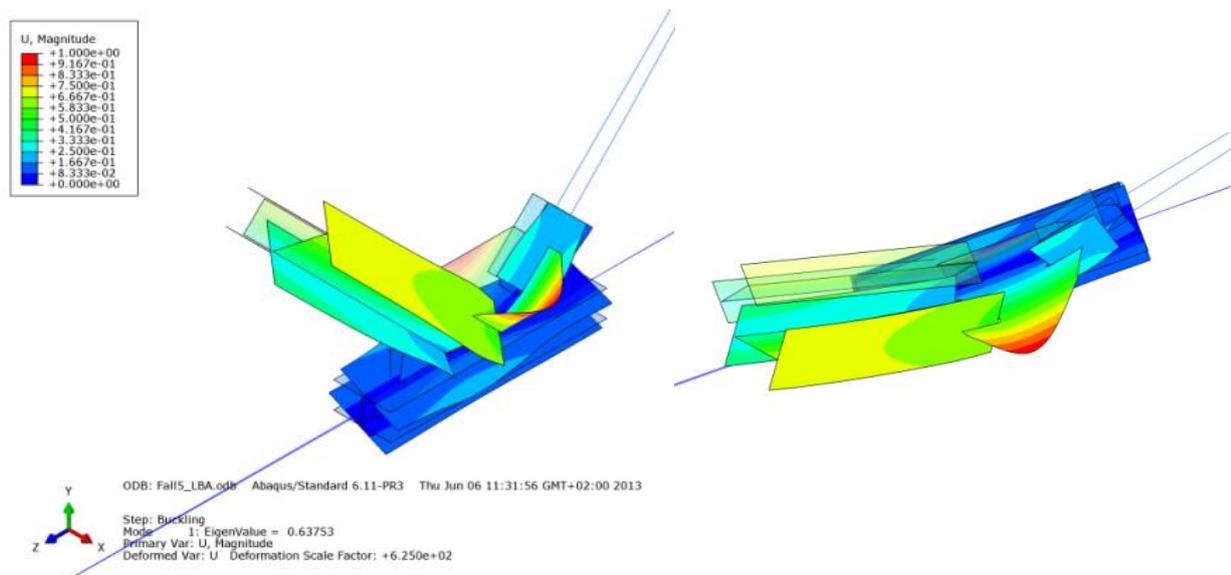


Abbildung B.385 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Antimetrie – zweite Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 4423\text{mm}/750 = 5,9\text{mm}$. Abbildung B.386 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$).

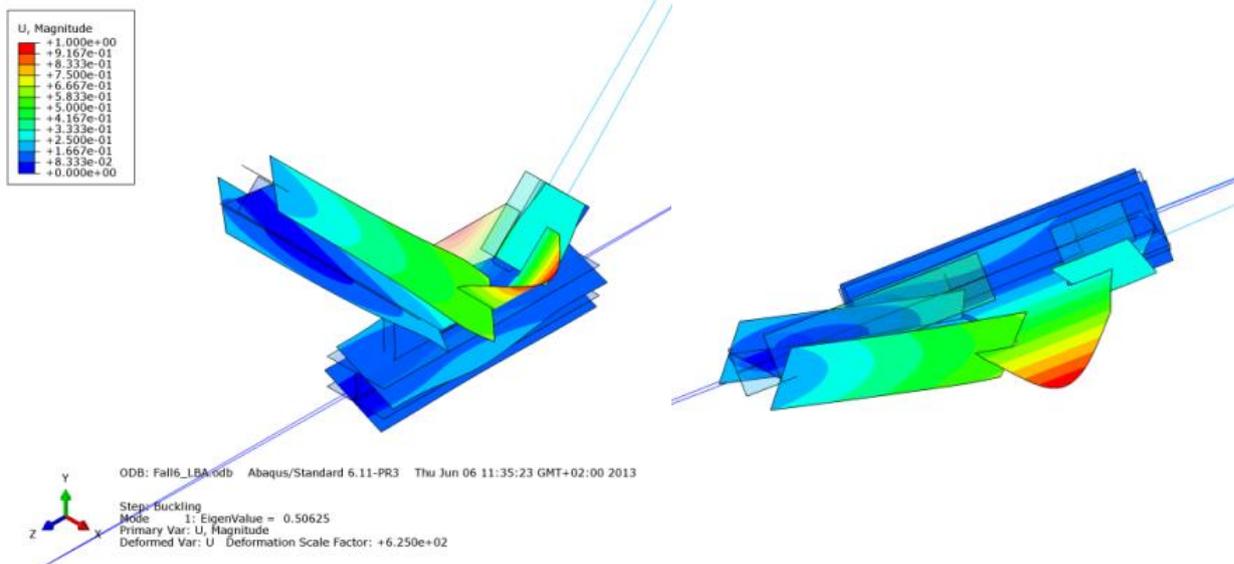


Abbildung B.386 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 5 – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 2,8\text{mm}$ und die Zugstrebe um $\Delta_3 = 2,4\text{mm}$), wie der Abbildung B.387 entnommen werden kann. Es wurde eine Traglastberechnung mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) für die Imperfektion im Knotenblech durchgeführt.

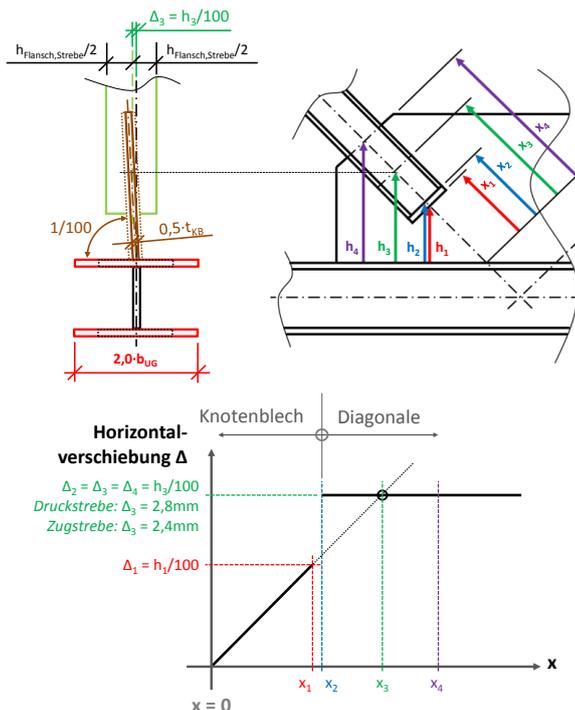


Abbildung B.387 – Eigenform der Gruppe 5 – Imperfektion Knotenblech

B - 8.3.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 8.3.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.388 bis B.391 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknickens des nahezu durchplastizierten Knotenbleches.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

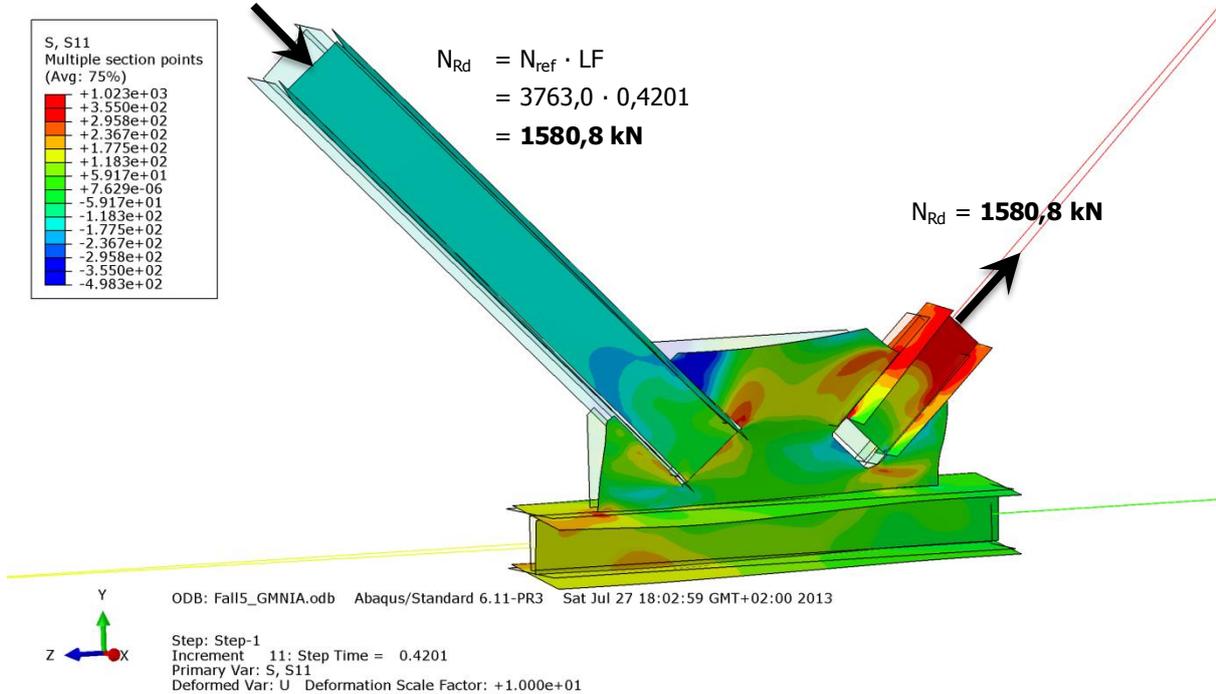


Abbildung B.388 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

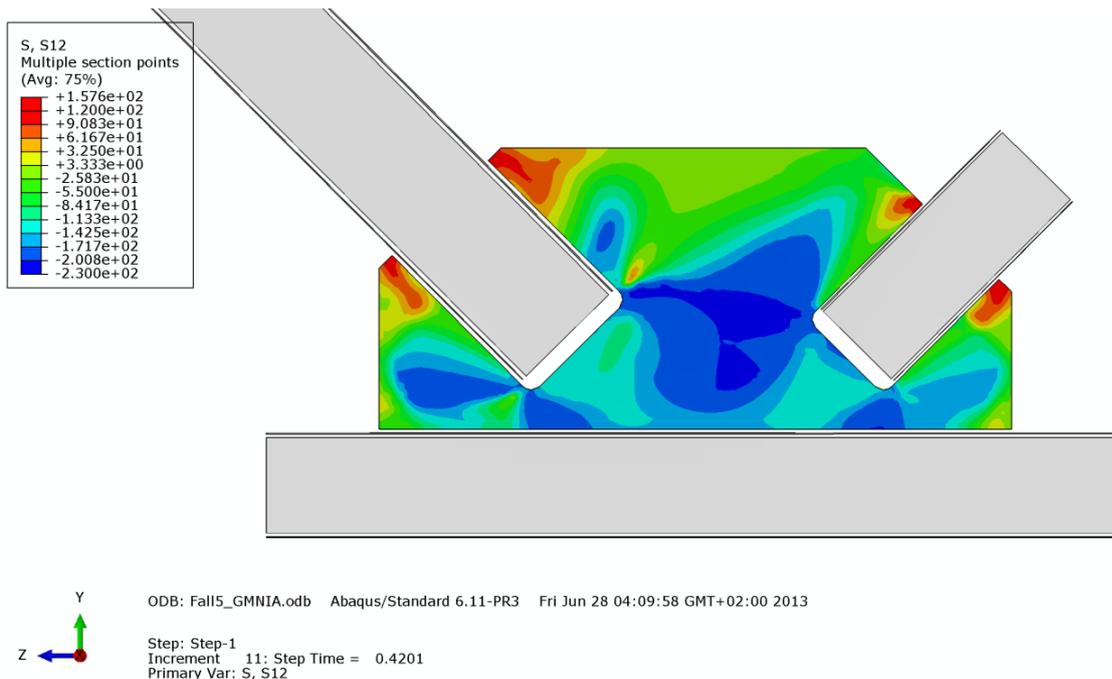


Abbildung B.389 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

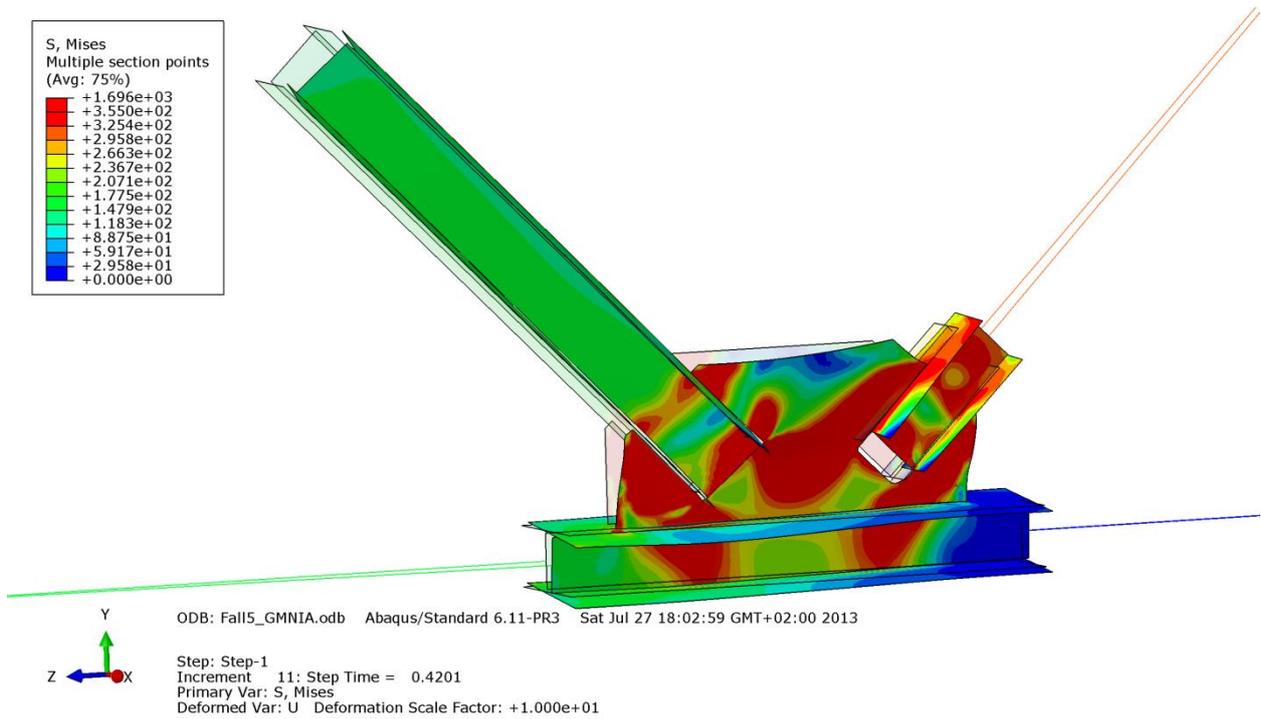


Abbildung B.390 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

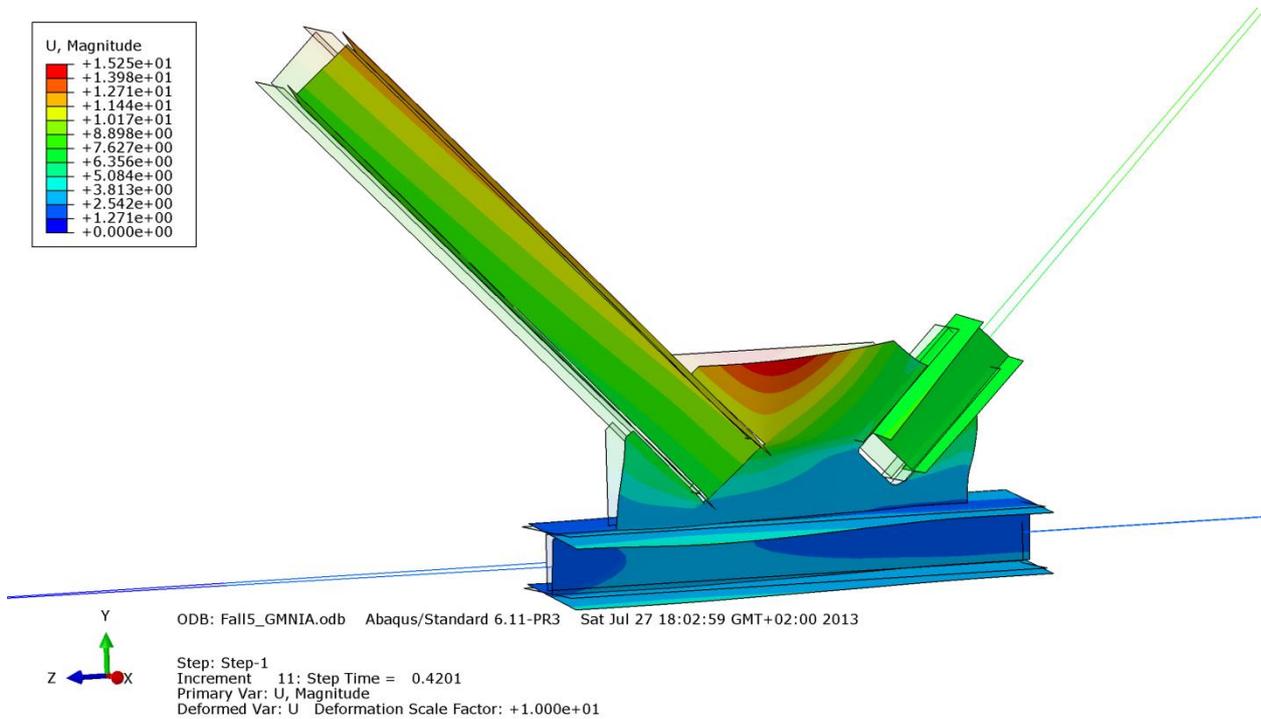


Abbildung B.391 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.3.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.392 bis B.395 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknickens des nahezu durchplastizierten Knotenbleches. Im Steg des Untergurtstabes treten hohe Spannungen auf (siehe Abbildung B.394).

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

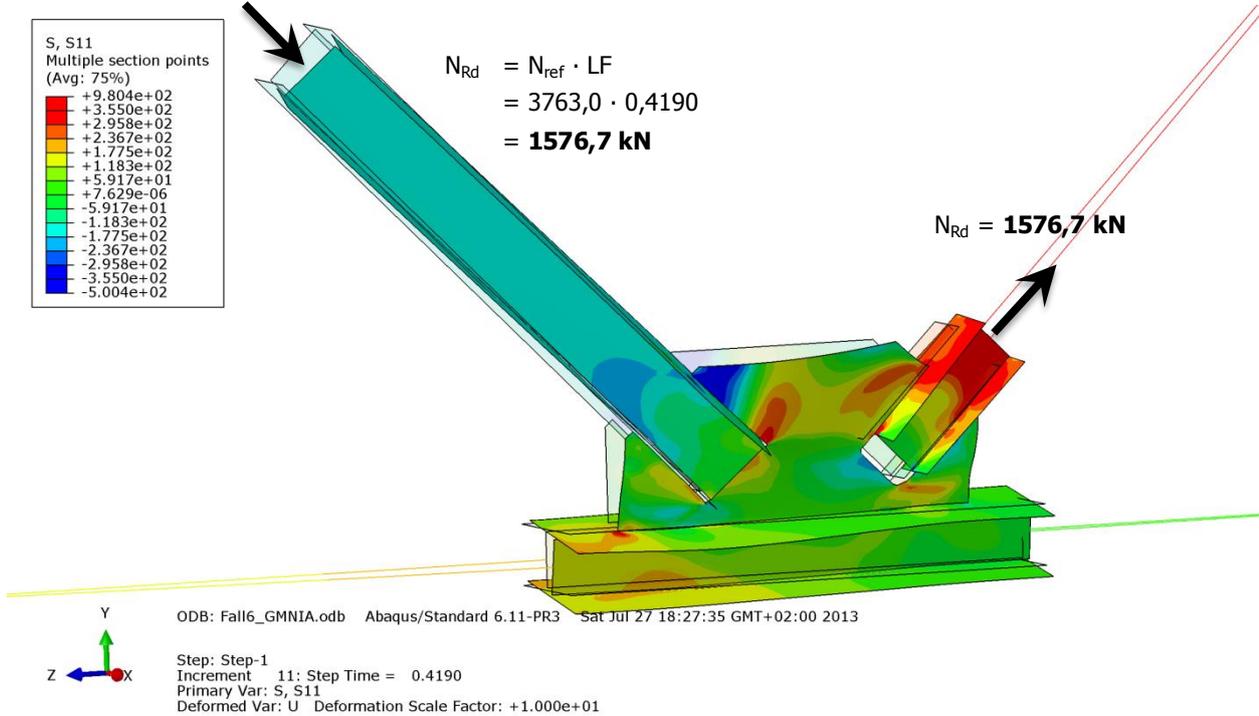


Abbildung B.392 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

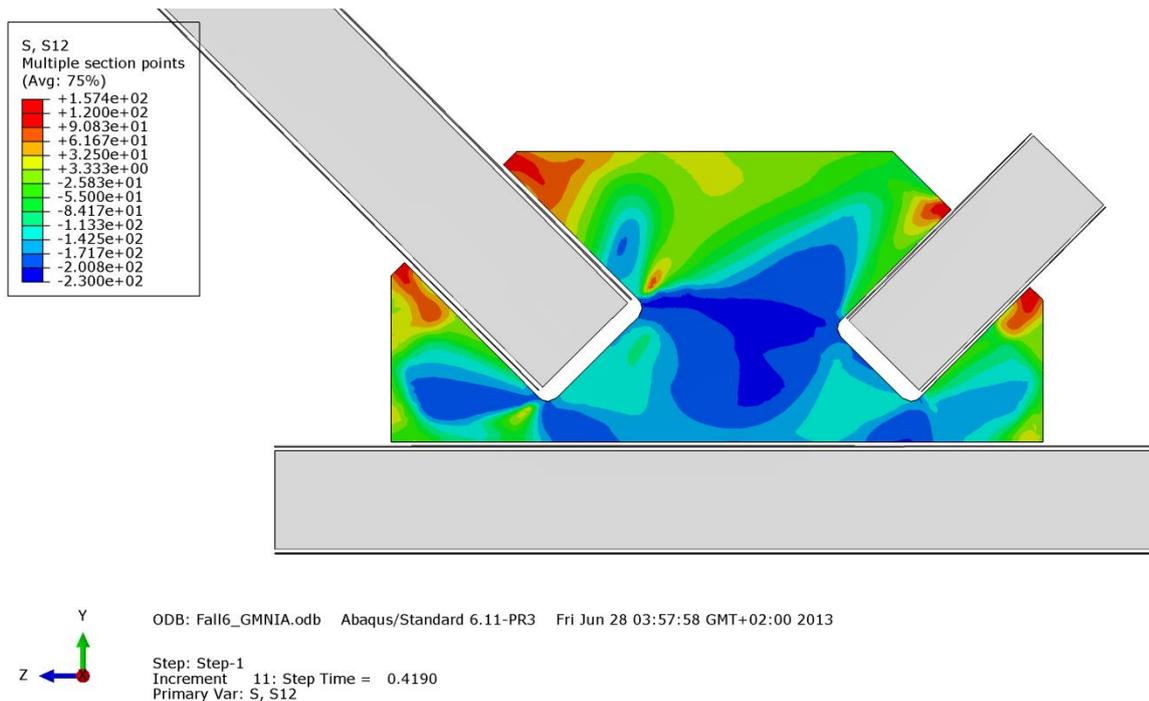


Abbildung B.393 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

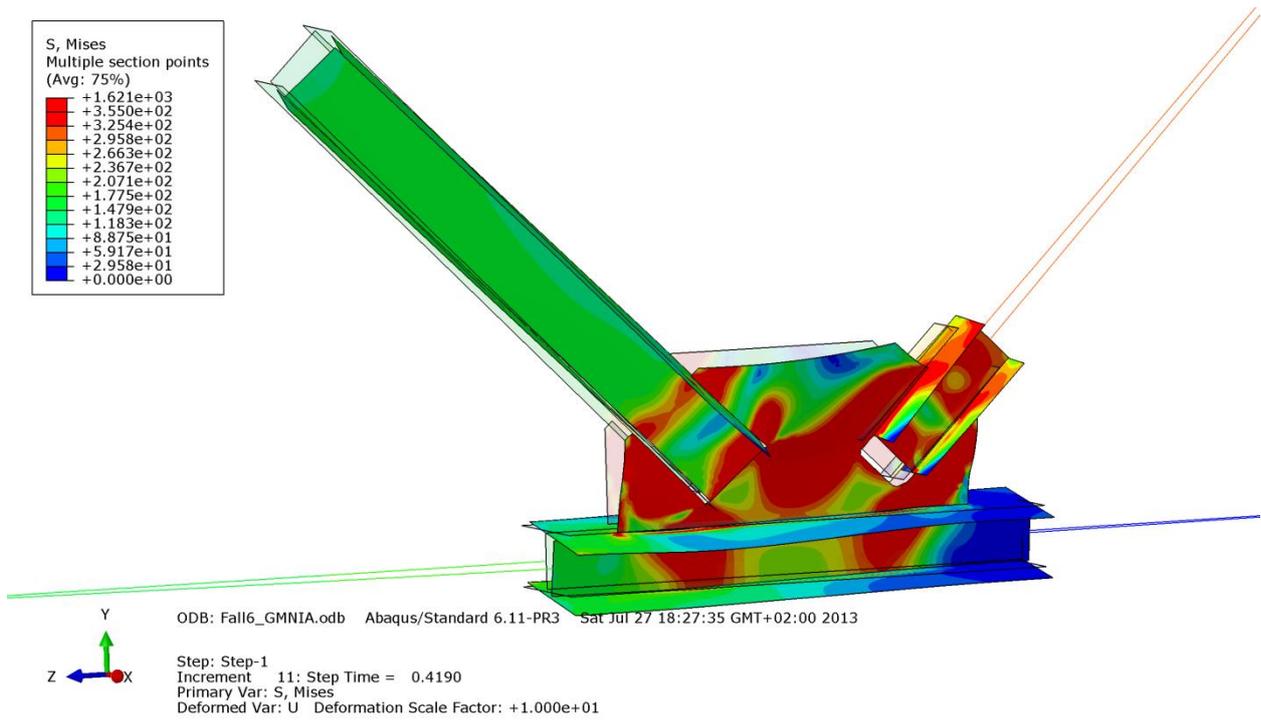


Abbildung B.394 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

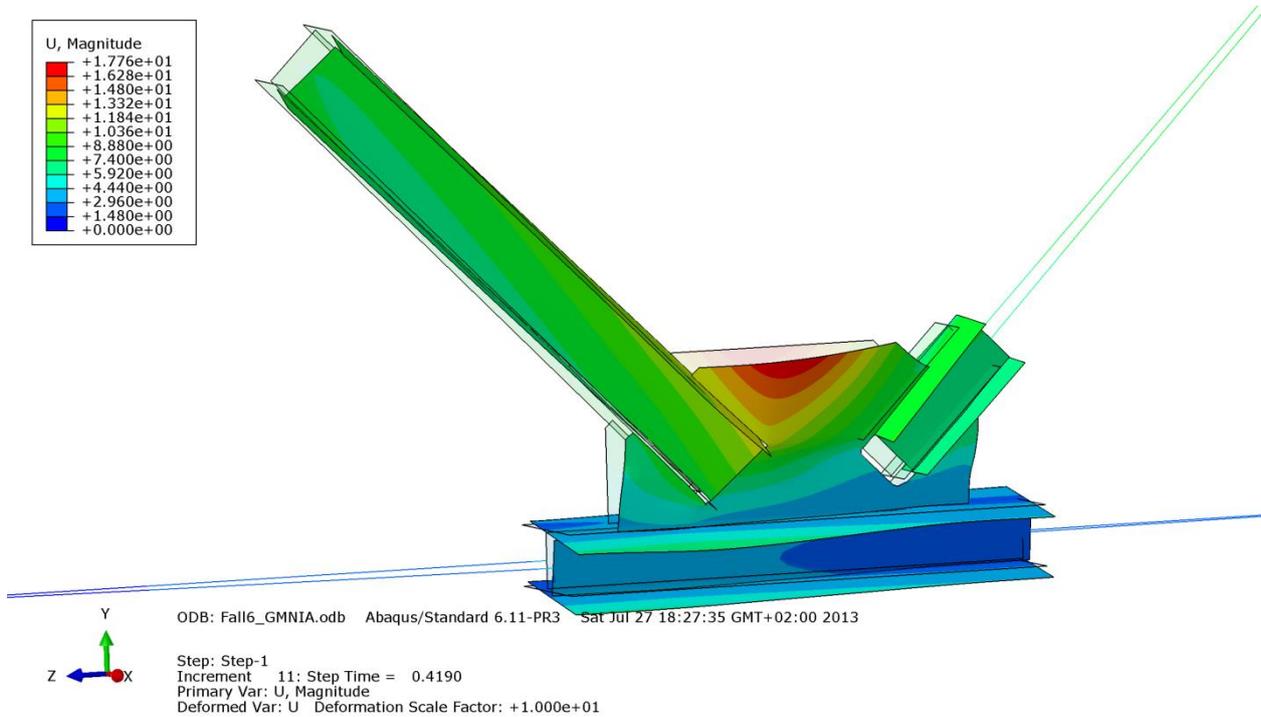


Abbildung B.395 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.3.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.396 bis B.399 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknickens des nahezu durchplastizierten Knotenbleches. Im Steg des Untergurtstabes treten hohe Spannungen auf (siehe Abbildung B.398).

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

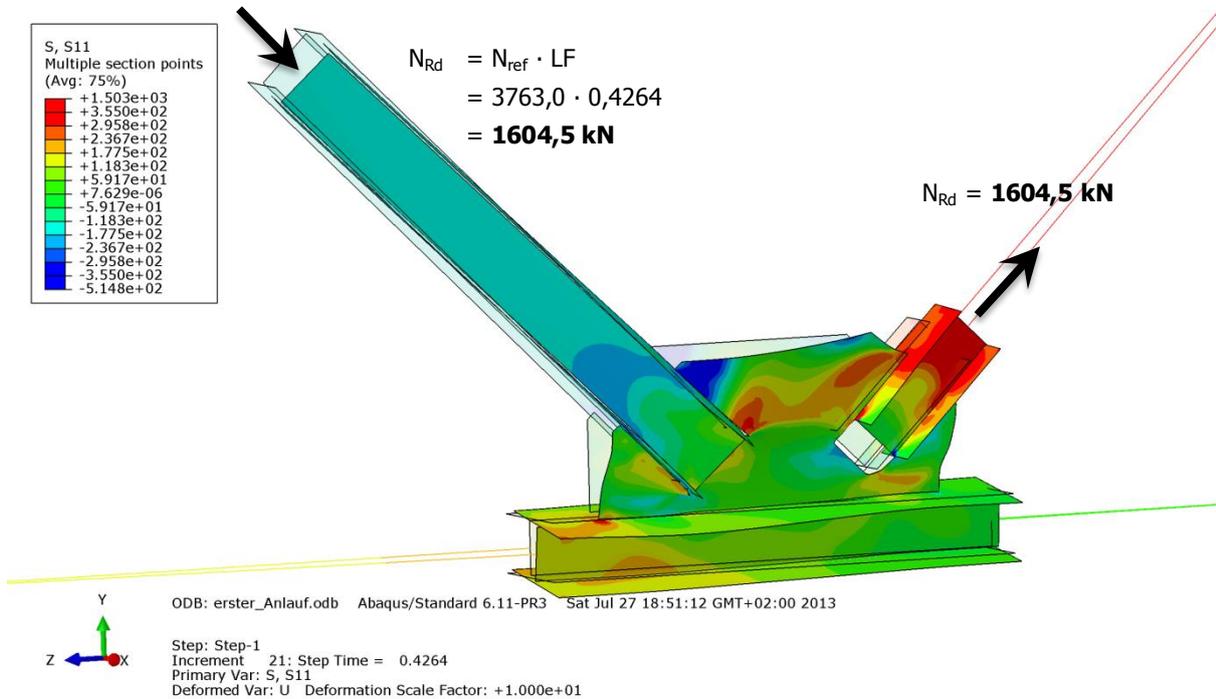


Abbildung B.396 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

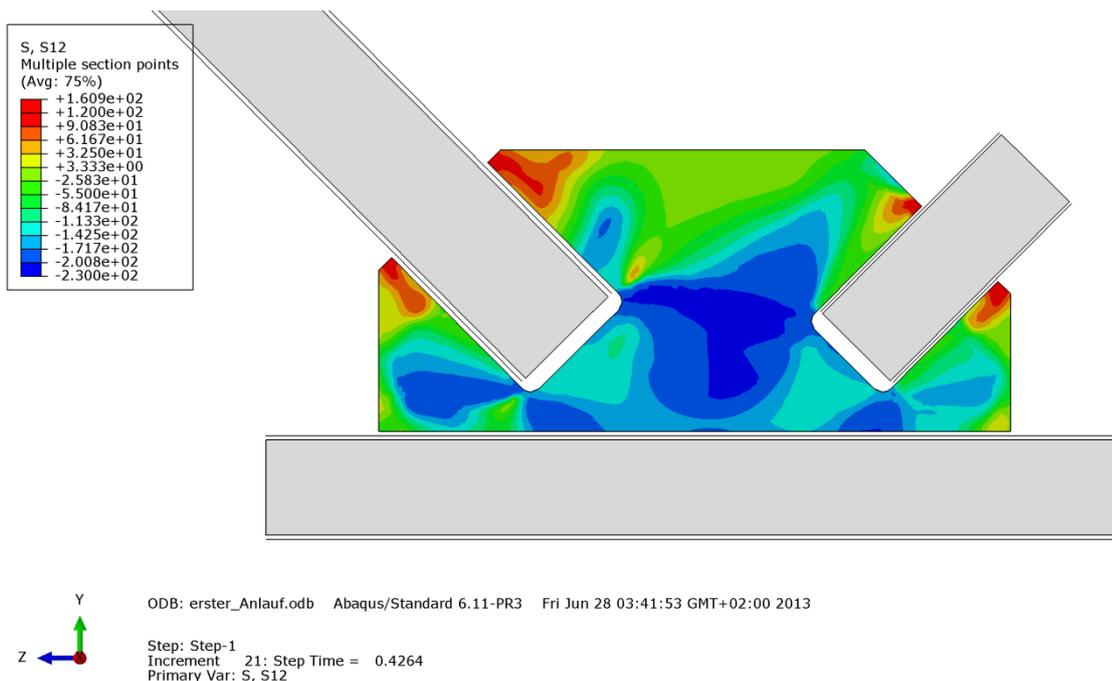


Abbildung B.397 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

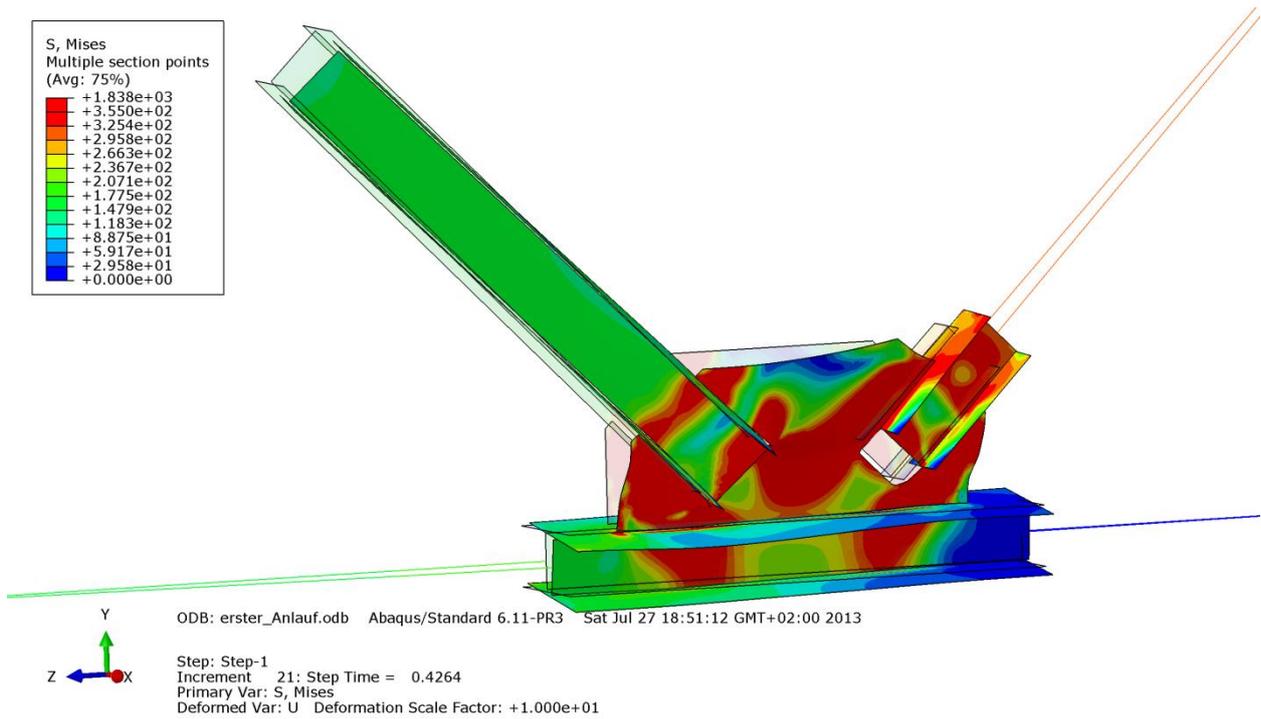


Abbildung B.398 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

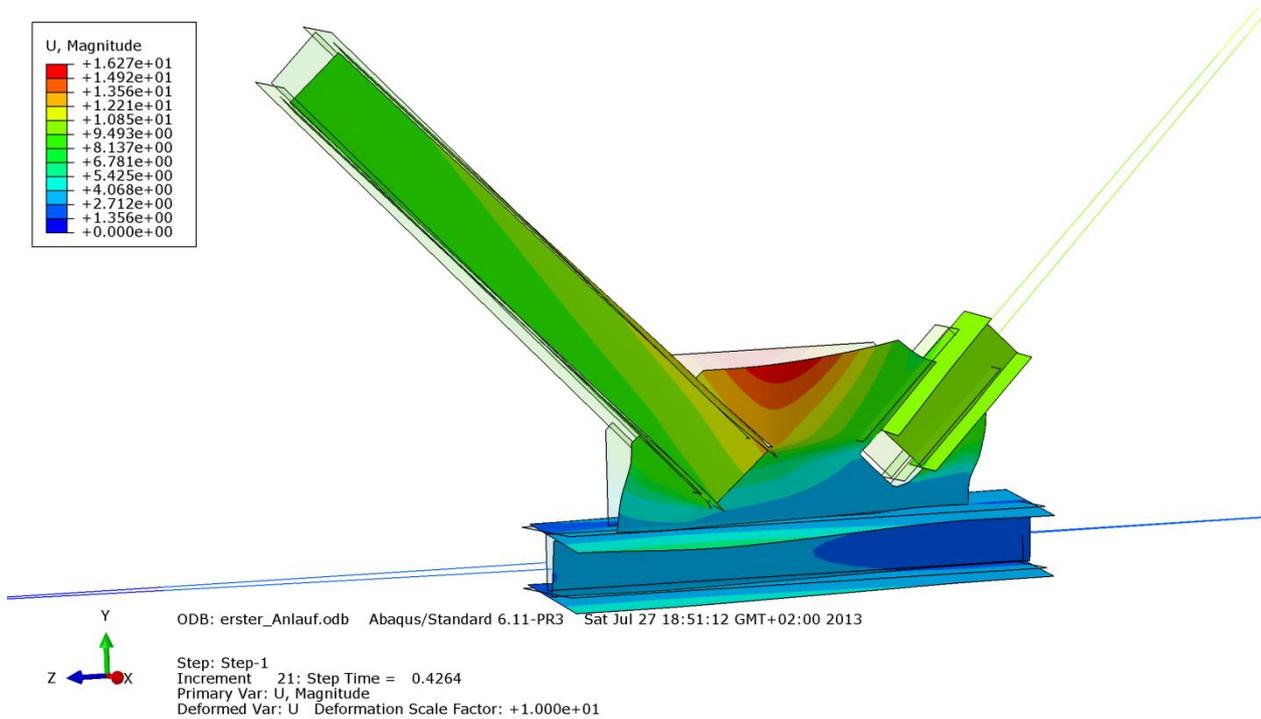


Abbildung B.399 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.3.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke

Die Tabelle B.56 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit halber Knotenblechdicke und doppelter Untergurtbreite, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschieflage gegenüber:

- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes
- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe, des Untergurtstabes sowie des Knotenbleches

Am Beginn werden zum Vergleich die Ergebnisse aus Kapitel B - 7.3.3 für die

- reguläre Knotenblechdicke ($t_{KB} = 30\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 400\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes wiederholt.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge $L^* =$	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	4085mm
$t_{Knotenblech} =$	30mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 400mm (Zugstr. und UG el.)		
LF = 0,7911 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2976,9 kN	LF = 0,8241 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3101,1 kN	LF = 0,8270 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3112,0 kN
UG: Breite 400mm (Zugstr. und UG el.) - 0,5 · t _{KB}		
LF = 0,4201 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1580,8 kN	LF = 0,4190 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1576,7 kN	LF = 0,4264 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1604,5 kN
UG: Breite 400mm (Zugstr., UG und KB el.) - 0,5 · t _{KB}		
LF = 0,7657 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2881,3 kN	LF = 0,8408 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3163,9 kN	LF = 0,8455 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 3181,6 kN
N _{pl} - Druckstrebe =		3628,1 kN
N _{pl} - Zugstrebe =		1812,3 kN
N _{ref} =		3763,0 kN
(N _{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)		

Tabelle B.56 – Ergebnisse Gruppe 5 – mit Variation der Knotenblechdicke

Der Ergebnisvergleich der Systemberechnungen in Abbildung B.400 von Gruppe 5 lässt die gleiche Interpretation wie für die Gruppe 1 in Abschnitt B - 8.3.2 genannt zu. Zwischen regulärer ($t_{KB} = 30\text{mm}$) und halber ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) Knotenblechdicke fällt die Tragfähigkeit um etwa 47% ab, da zufolge der geringeren Fläche das Knotenblech bereits bei geringen Lasten zu Plastizieren beginnt und deutlich an Steifigkeit verliert (bezogen auf Berechnung mit Zugstrebe und Untergurt rein elastisch berechnet).

Die Berechnung, in welcher neben dem Untergurt- und dem Zugstrebenmaterial auch der Knotenblechwerkstoff rein elastisch modelliert wurde, liefert wiederum nahezu gleiche Traglastergebnisse wie die ursprüngliche Rechnung mit Nennknotenblechdicke und elastisch-plastischem Knotenblechwerkstoff, da kein Steifigkeitsverlust des Knotenbleches aufgrund Plastizierung auftritt. Das bedeutet, dass der Fachwerkknoten im Knotenblech bei halber Dicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 15\text{mm}$) versagt. Für die erste Knickeigenform nimmt die Tragfähigkeit um etwa 3% ab (Zugstrebe und Untergurt zu Zugstrebe, Untergurt und Knotenblech elastisch), da das Knotenblech weniger Endeinspannung bietet.

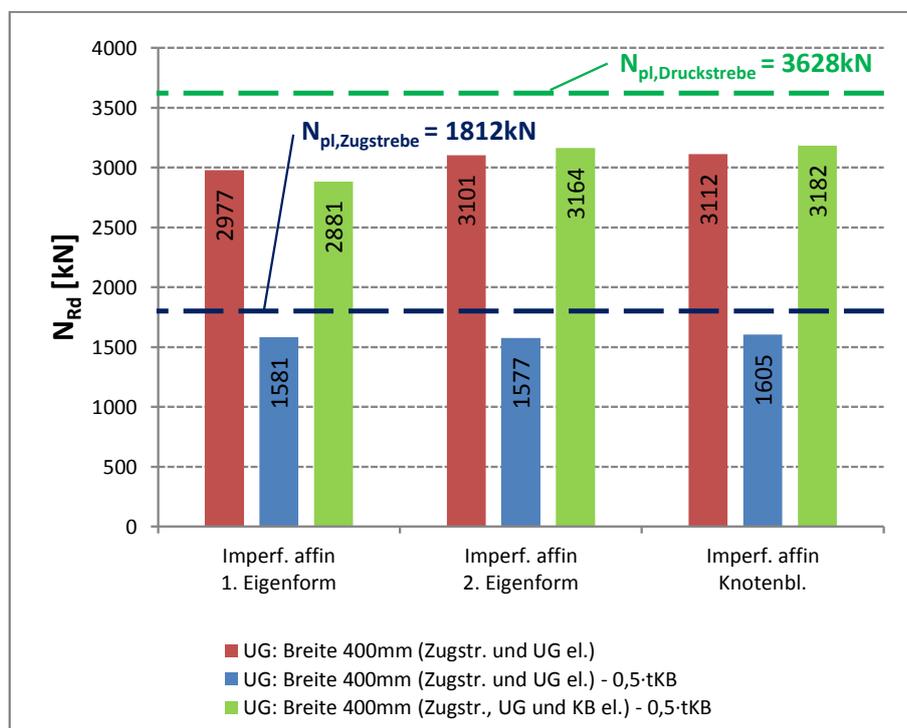


Abbildung B.400 – Ergebnisse Gruppe 5 – mit Variation der Knotenblechdicke

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

B - 8.4 Gruppe 6b

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6b zu charakterisieren sind in Tabelle B.57 zusammengefasst.

Gruppe 6b - 0,5·t _{KB}			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L* =	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,780
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L _{ges} =	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
0,5·t _{Knotenblech} = 0,5 · 20mm =	20mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300		

Tabelle B.57 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6b

B - 8.4.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde die erste bzw. zweite Knickeigenform (siehe Kapitel B - 2.2) als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt. Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die halbe Knotenblechdicke (0,5·t_{KB} = 20mm) bei doppelter Untergurtbreite (2,0·b_{UG} = 600mm) gezeigt. Des Weiteren wurde als dritter Fall auch eine Imperfektionsfigur mit schiefgestelltem Knotenblech angenommen.

- **Eigenform Fall Symmetrie – erste Knickeigenform: 2,0·b_{UG} = 600mm und 0,5·t_{KB} = 20mm**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$. Abbildung B.401 zeigt die erste Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit halber Knotenblechdicke (0,5·t_{KB} = 20mm) und doppelter Untergurtbreite (2,0·b_{UG} = 600mm).

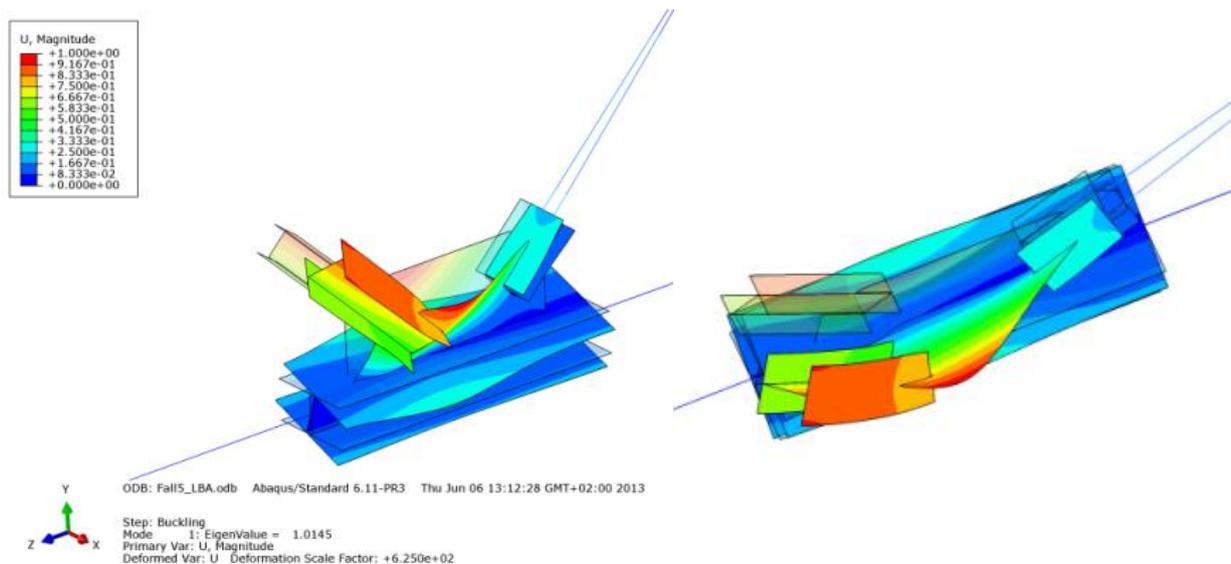


Abbildung B.401 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – erste Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Antimetrie – erste Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der zweiten Knickeigenform beträgt $L^*/750 = 3355\text{mm}/750 = 4,5\text{mm}$.
Abbildung B.402 zeigt die zweite Knickeigenform des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$).

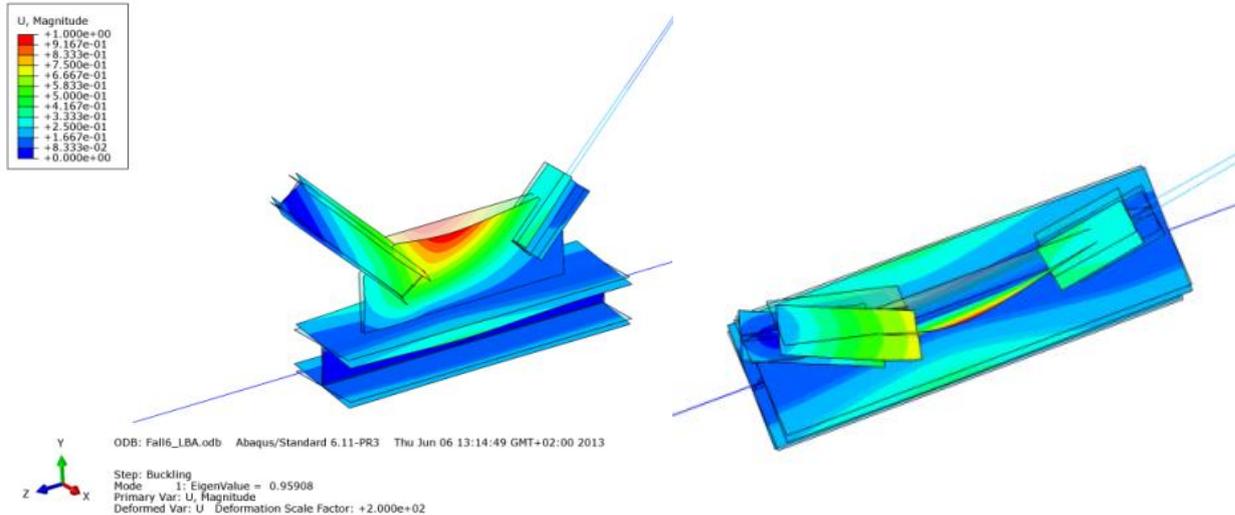


Abbildung B.402 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 6b – zweite Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Eigenform Fall Knotenblech – Imperfektion Knotenblech: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$ und $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$**

Das Knotenblech wurde um $1/100$ mit der Unterkante der Mittelfläche als Rotationsachse schiefgestellt und die Diagonalen im entsprechend Maß horizontal verschoben (die Druckstrebe und die Zugstrebe in der Höhe h_3 um $\Delta_3 = 3,75\text{mm}$), wie der Abbildung B.403 entnommen werden kann. Es wurde eine Traglastberechnung mit halber Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) und doppelter Untergurtbreite ($2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) für die Imperfektion im Knotenblech durchgeführt.

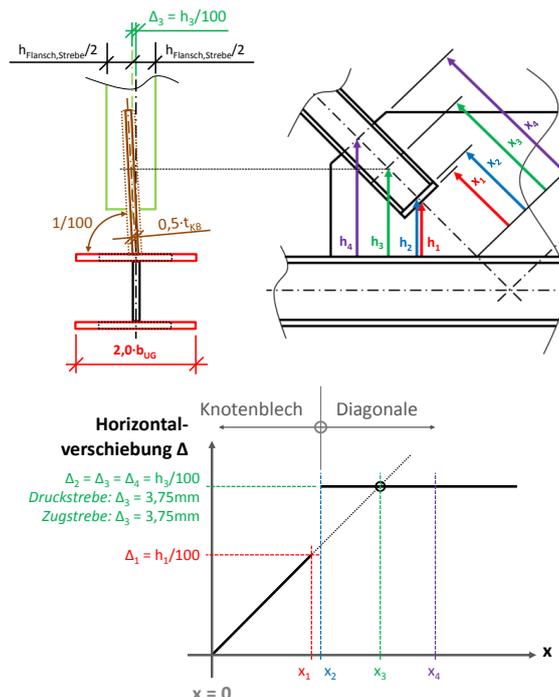


Abbildung B.403 – Eigenform der Gruppe 6b – Imperfektion Knotenblech

B - 8.4.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand

B - 8.4.2.1 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknicken des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.404 bis B.407 zeigen. Dieses plastiziert lokal im Bereich des Kraftausgleiches zwischen Druck- und Zugseite.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

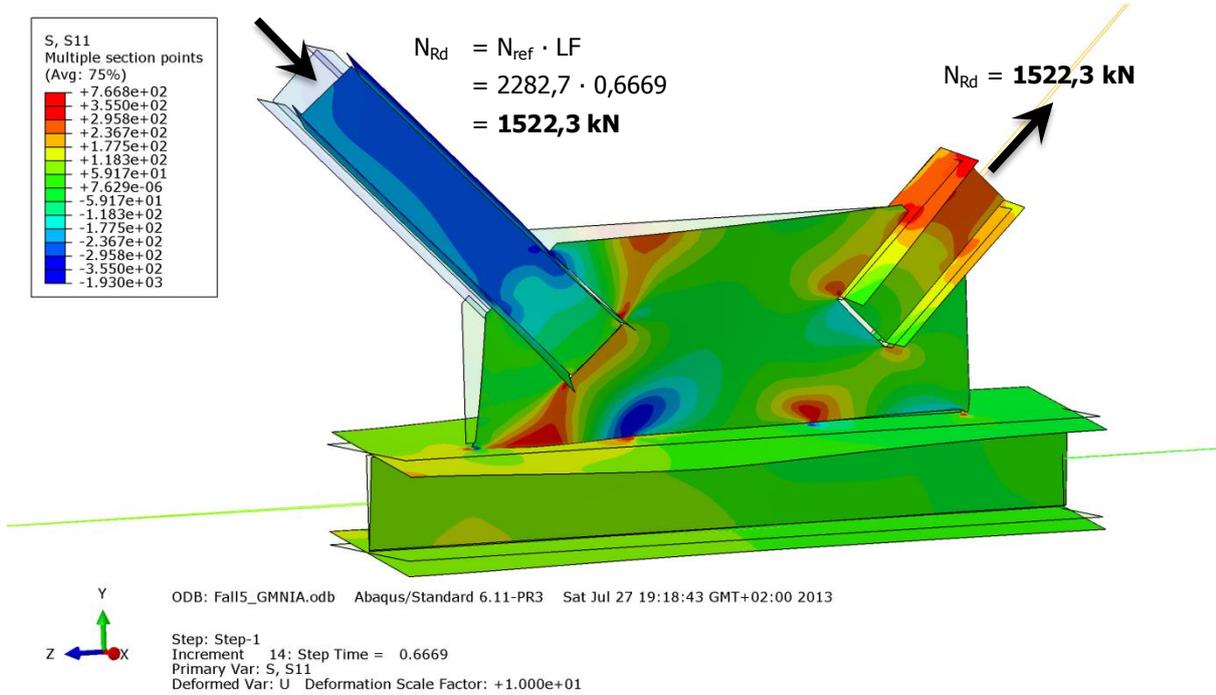


Abbildung B.404 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

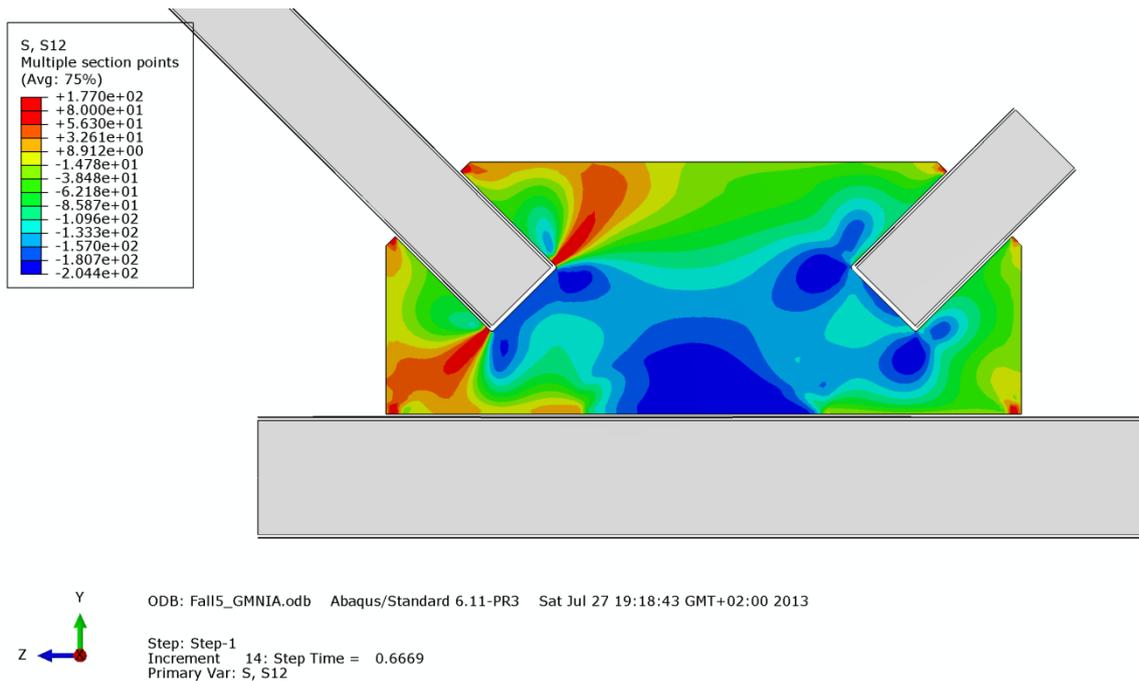


Abbildung B.405 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

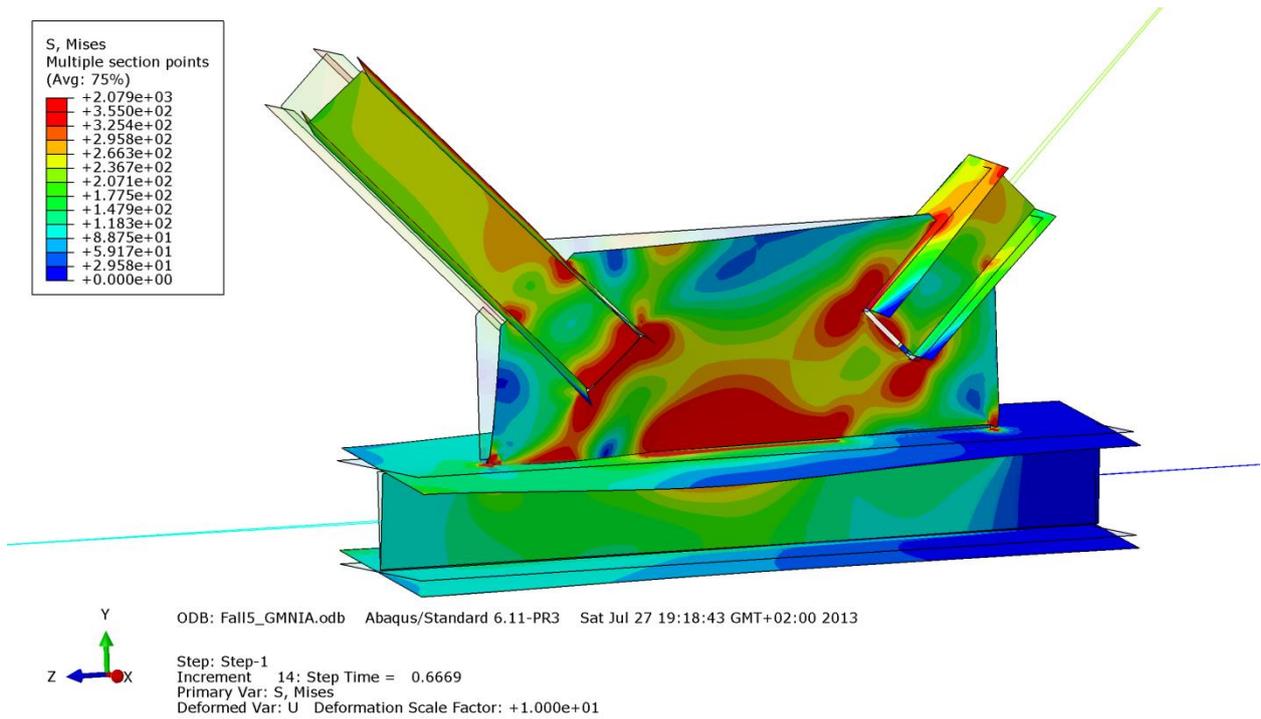


Abbildung B.406 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

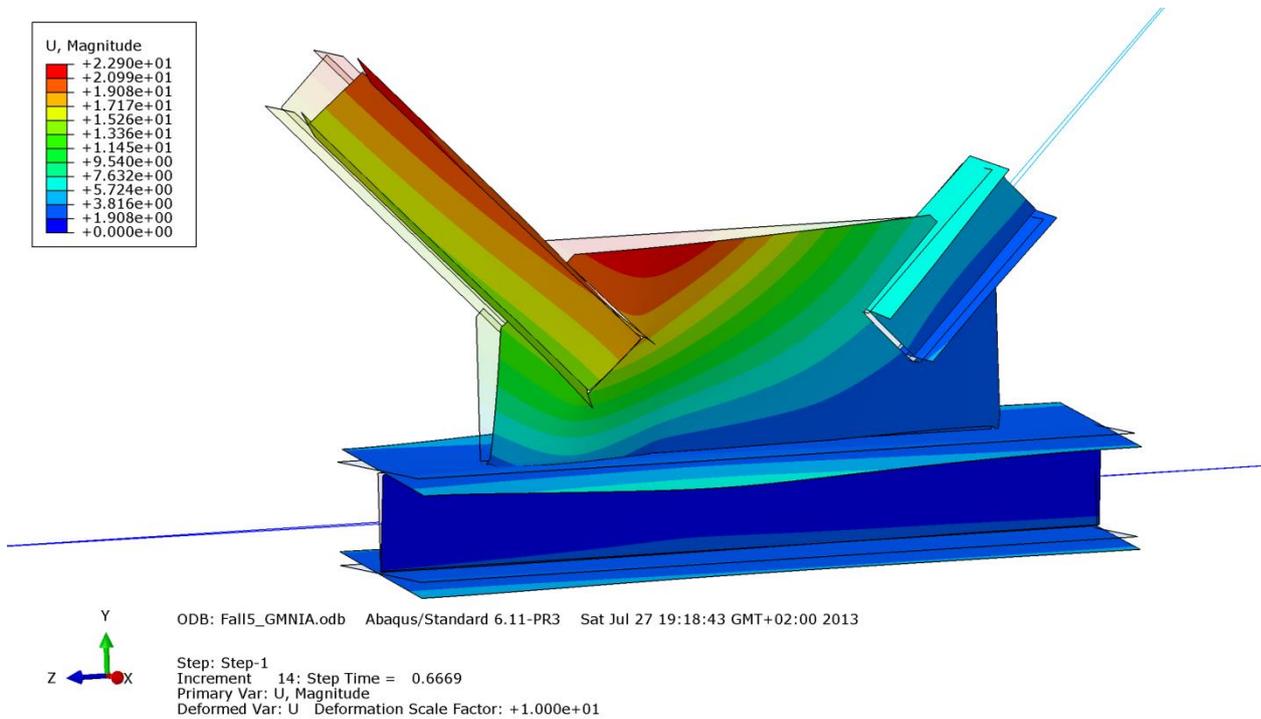


Abbildung B.407 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.4.2.2 Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknicken des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.408 bis B.411 zeigen. Dieses plastiziert lokal im Bereich des Kraftausgleiches zwischen Druck- und Zugseite.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

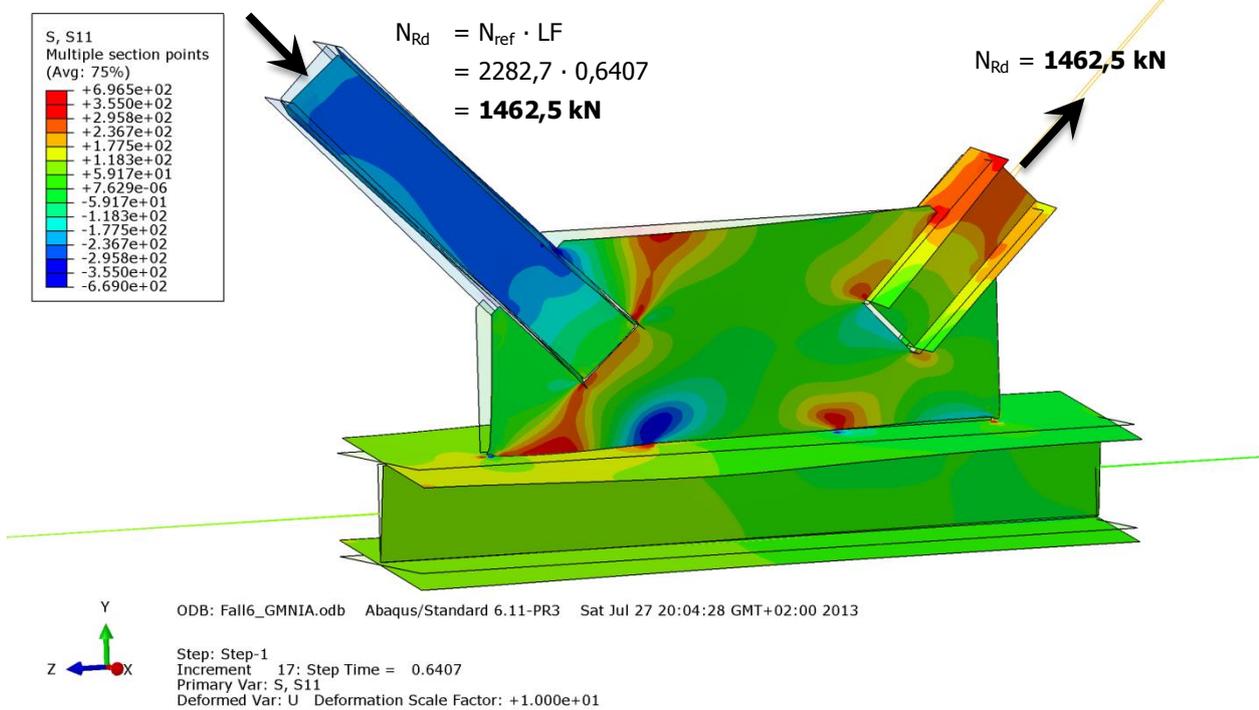


Abbildung B.408 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

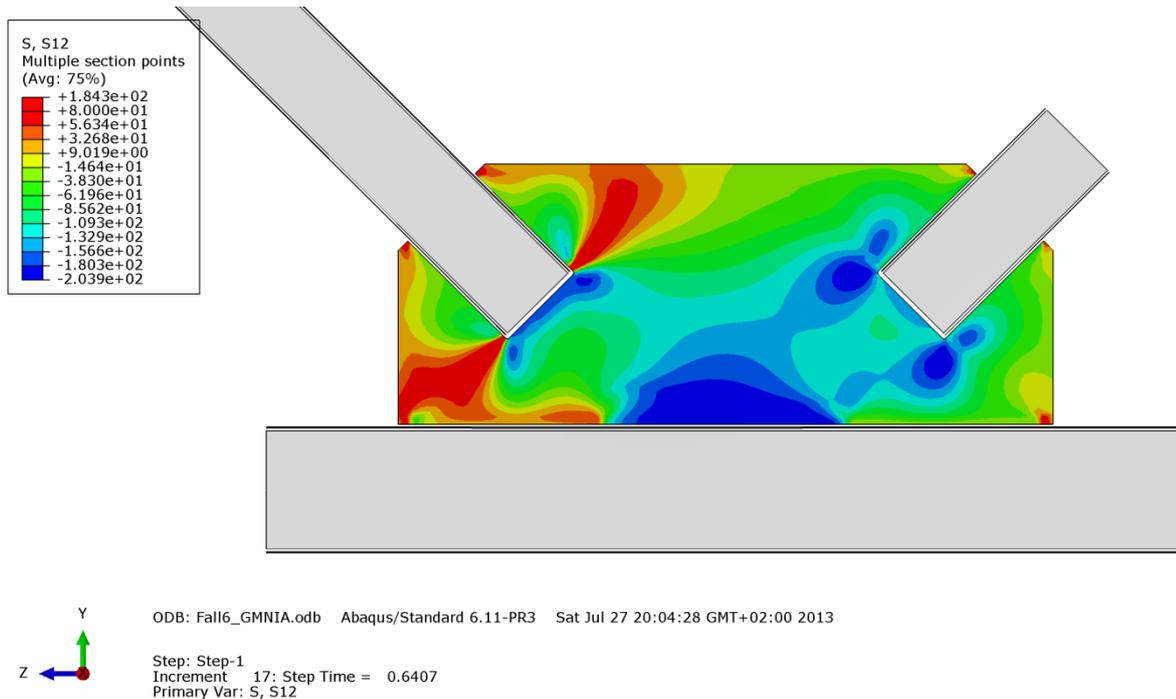


Abbildung B.409 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

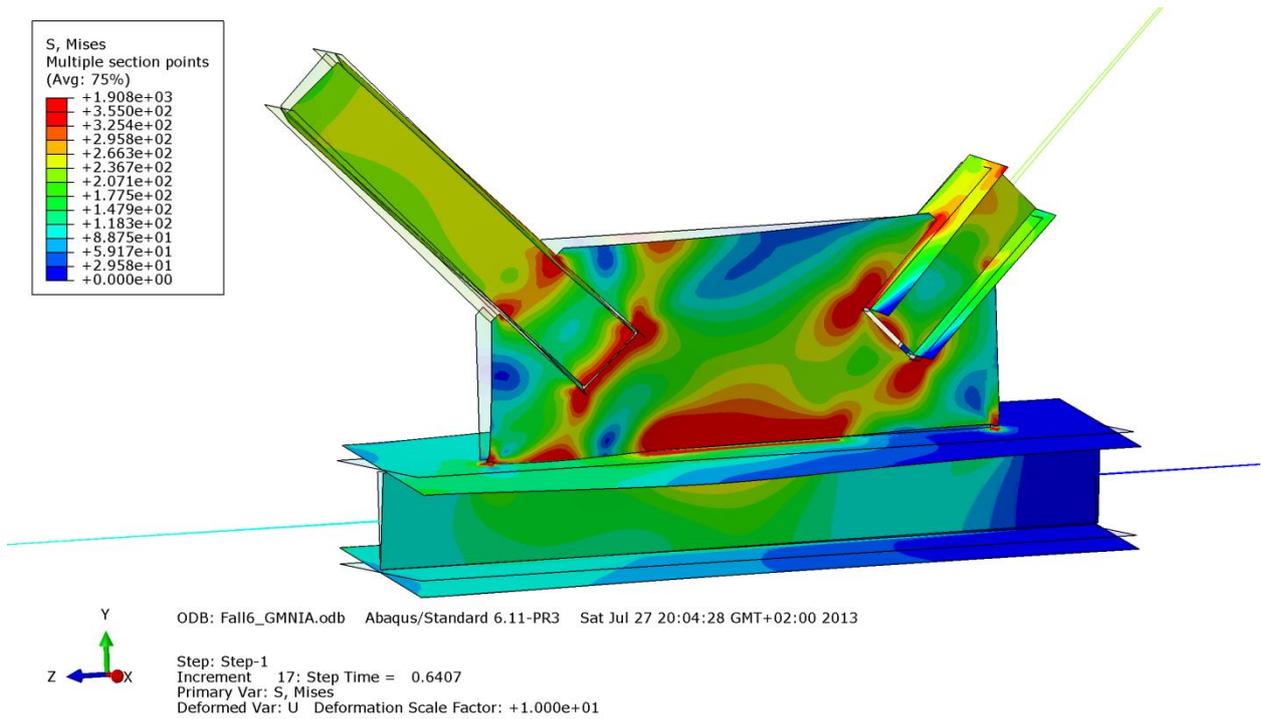


Abbildung B.410 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

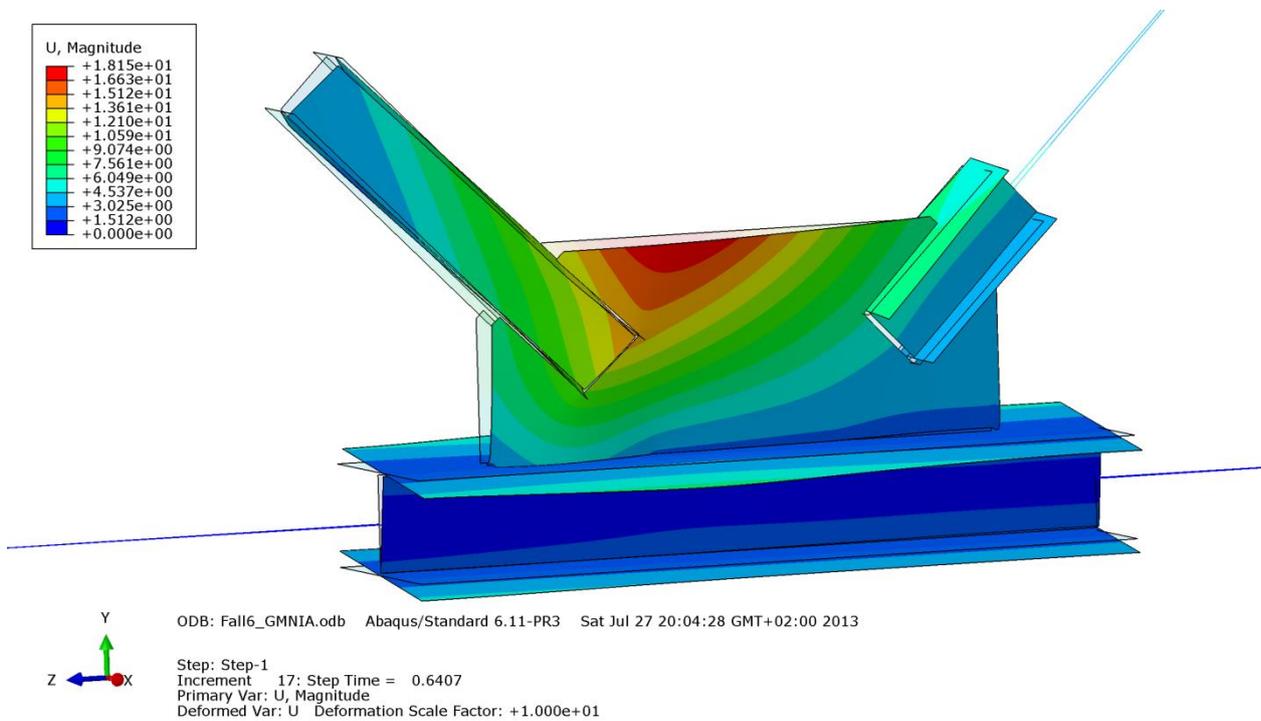


Abbildung B.411 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur zweiten Knickeigenform - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.4.2.3 Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung: $2,0 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$; $0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$

In den nachfolgenden Bildern B.412 bis B.415 wurden Zugstrebe und Untergurtstab rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Ausknicken des Knotenbleches. Dieses plastiziert lokal im Bereich des Kraftausgleiches zwischen Druck- und Zugseite.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

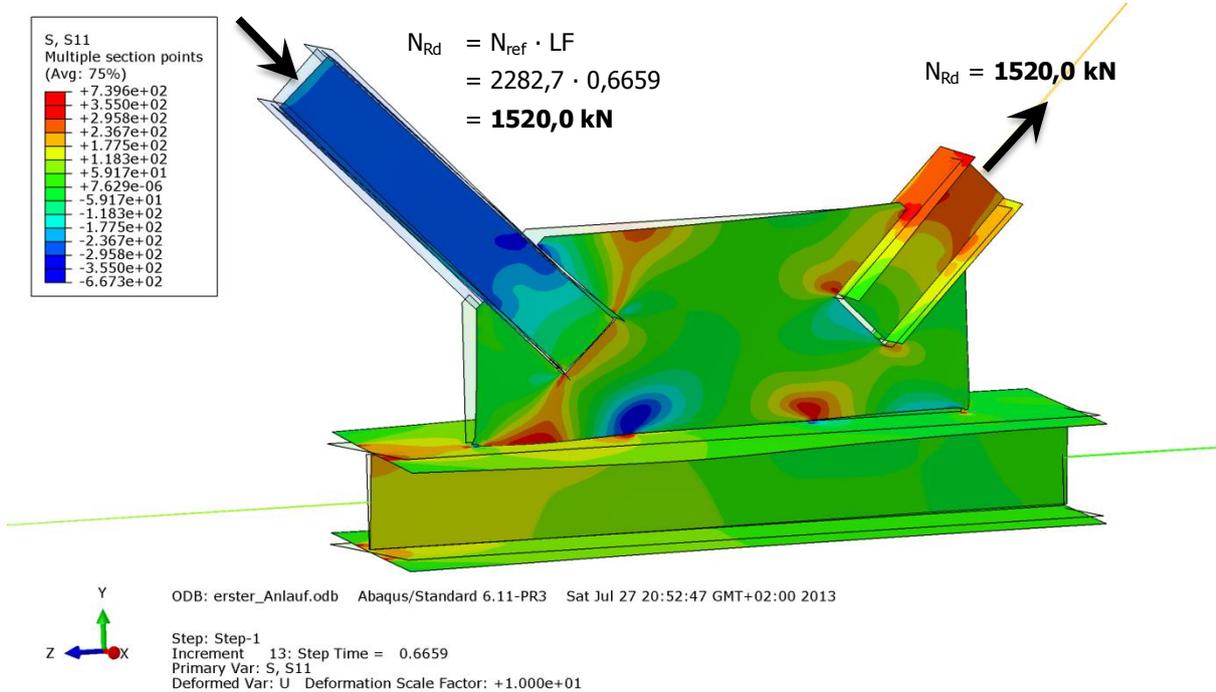


Abbildung B.412 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

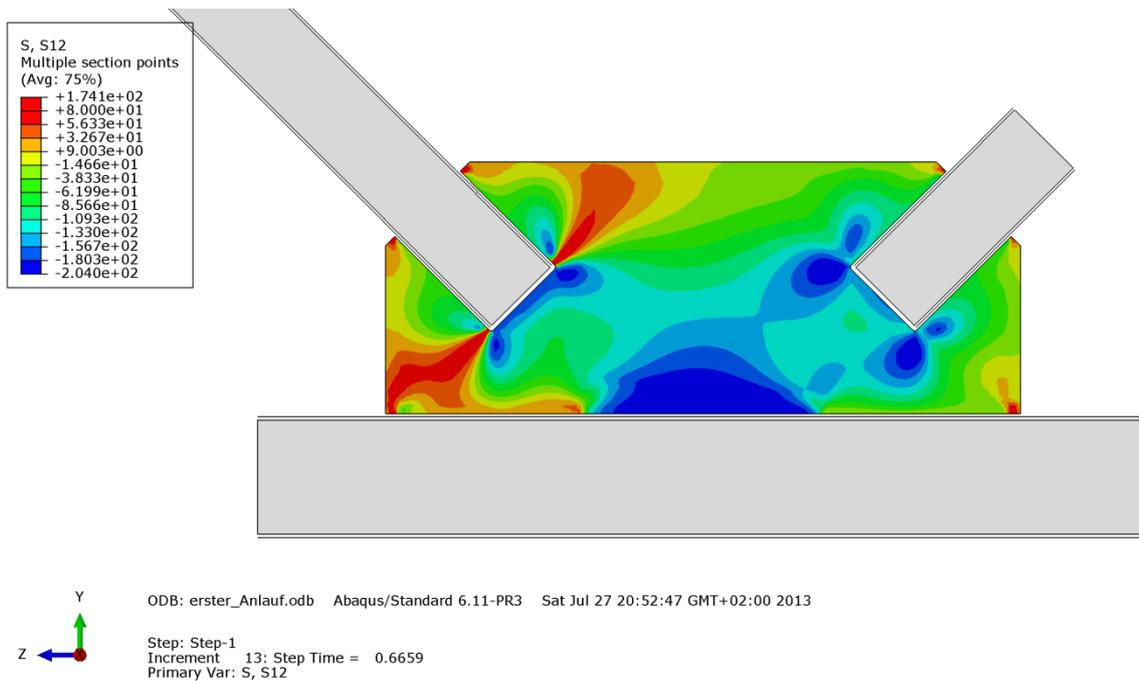


Abbildung B.413 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

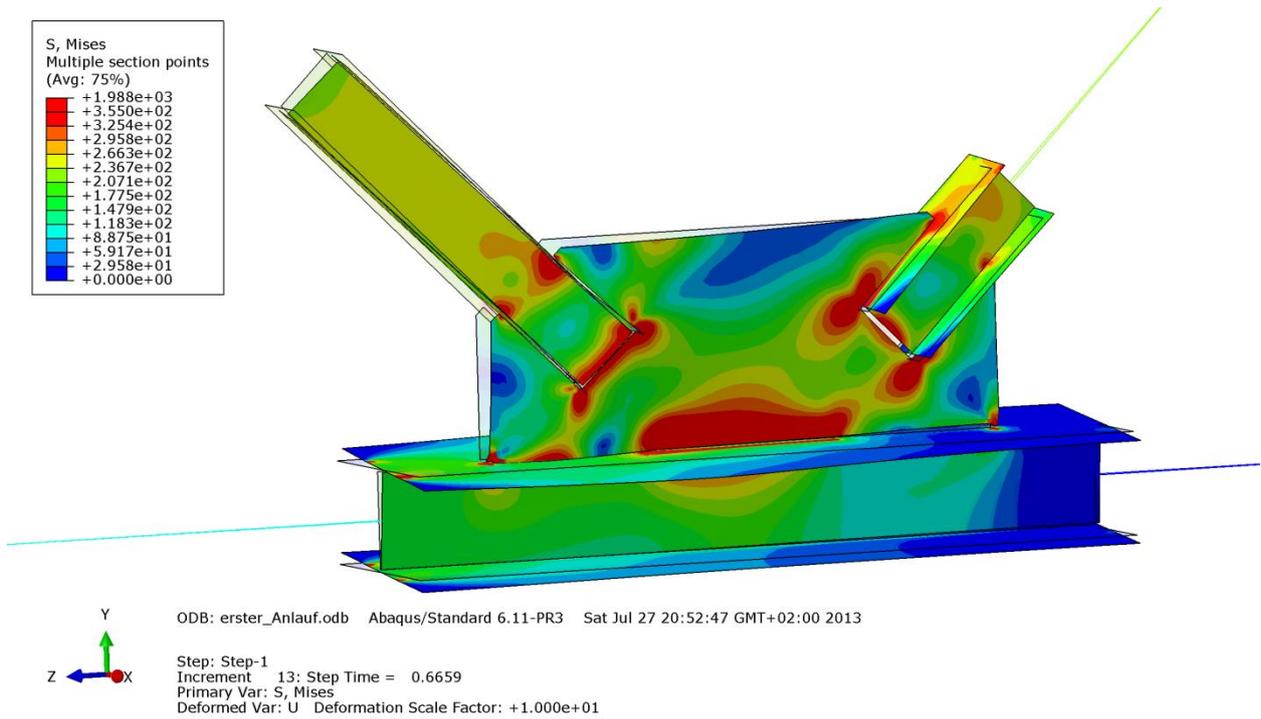


Abbildung B.414 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

• **Verformung [mm]**

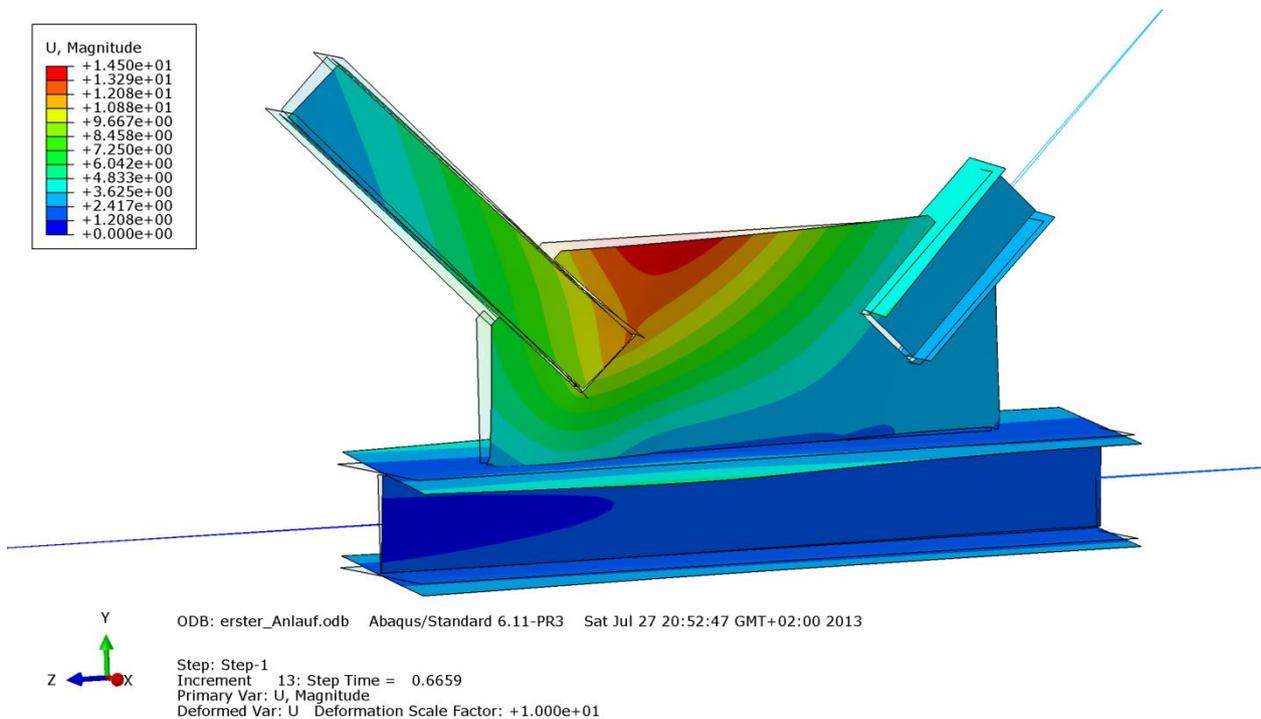


Abbildung B.415 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion mit Knotenblechschiefstellung - mit doppelter Untergurtbreite und halber Knotenblechdicke

B - 8.4.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Knotenblechdicke

Die Tabelle B.58 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnungen des Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit halber Knotenblechdicke und doppelter Untergurtbreite, getrennt für die Fälle mit Imperfektion affin zur ersten und zweiten Knickeigenform bzw. Imperfektion mit Knotenblechschiefe gegenüber:

- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes
- Halbe Knotenblechdicke ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe, des Untergurtstabes sowie des Knotenbleches

Am Beginn werden zum Vergleich die Ergebnisse aus Kapitel B - 7.4.3 für die

- reguläre Knotenblechdicke ($t_{KB} = 40\text{mm}$) mit doppelter Untergurtbreite ($2 \cdot b_{UG} = 600\text{mm}$) und rein elastischer Materialmodellierung der Zugstrebe sowie des Untergurtstabes wiederholt.

Gruppe 6b - $0,5 \cdot t_{KB}$			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	3355mm
Material	S355	$\lambda_{z,0,L^*} =$	0,780
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	2945mm
$0,5 \cdot t_{Knotenblech} = 0,5 \cdot 20\text{mm} =$	20mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300		

Imperf. affin 1. Eigenform	Imperf. affin 2. Eigenform	Imperf. affin Knotenbl.
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG el.)		
LF = 0,8946 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2042,1 kN	LF = 0,9078 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2072,2 kN	LF = 0,9375 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2140,0 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr. und UG el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,6669 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1522,3 kN	LF = 0,6407 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1462,5 kN	LF = 0,6659 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1520,0 kN
UG: Breite 600mm (Zugstr., UG und KB el.) - $0,5 \cdot t_{KB}$		
LF = 0,8334 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 1902,4 kN	LF = 0,8960 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2045,3 kN	LF = 0,9065 LF · N _{ref} = N _{Rd} = 2069,3 kN
N _{pl} - Druckstrebe =		2185,4 kN
N _{pl} - Zugstrebe =		2185,4 kN
N _{ref} =		2282,7 kN
(N _{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)		

Tabelle B.58 – Ergebnisse Gruppe 6b – mit Variation der Knotenblechdicke

Der Ergebnisvergleich der Systemberechnungen in Abbildung B.416 von Gruppe 6b lässt die gleiche Interpretation wie für die Gruppe 1 in Abschnitt B - 8.3.2 genannt zu, außer dass der Traglastabfall bei halber Knotenblechdicke nicht derartig gravierend ist. Zwischen regulärer ($t_{KB} = 40\text{mm}$) und halber ($0,5 \cdot t_{KB} = 20\text{mm}$) Knotenblechdicke fällt die Tragfähigkeit um etwa 25% ab. Der Abfall ist geringer, da das Knotenblechmaterial im Gegensatz zur Gruppe 1 noch nicht voll durchplastiziert ist (bezogen auf die Berechnungen mit elastisch modellierter Zugstrebe und elastisch modelliertem Untergurt).

Die Berechnung, in welcher neben dem Untergurt- und dem Zugstrebenmaterial auch der Knotenblechwerkstoff rein linear-elastisch modelliert wurde, liefert diesmal etwas geringere Traglastergebnisse (rund 7% für die zur ersten Eigenform affine Imperfektion) als die ursprüngliche Rechnung mit Nennknotenblechdicke. Grund dafür ist die geringere Steifigkeit und die nicht vollständige Plastizierung des Knotenbleches im Traglastzustand.

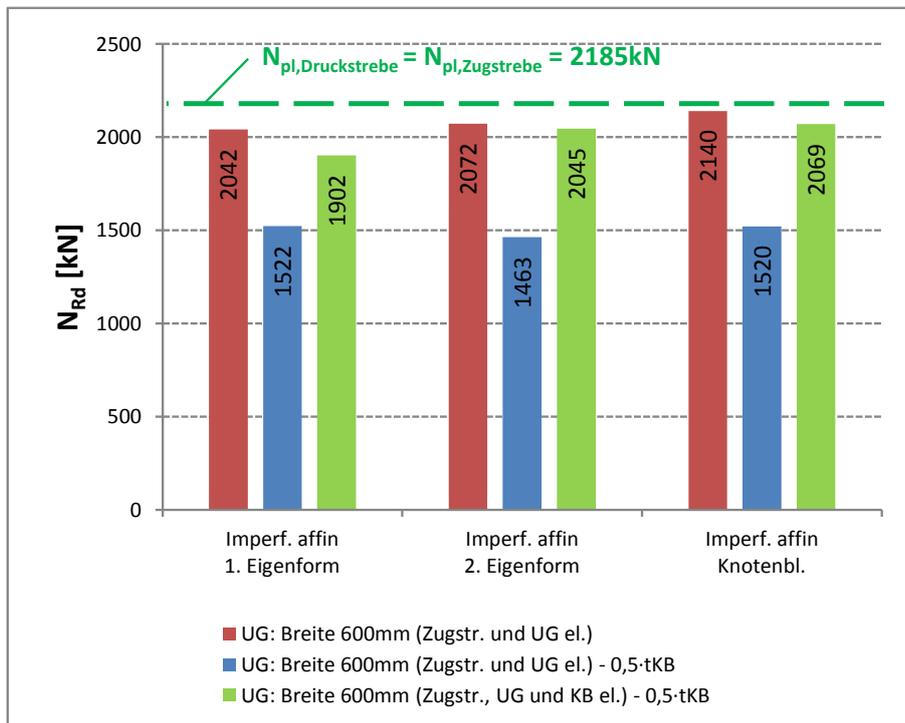


Abbildung B.416 – Ergebnisse Gruppe 6b – mit Variation der Knotenblechdicke

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

B - 9 Variation der Belastungssituation im Untergurt

B - 9.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Normalkraftverhältnisse im Untergurtstab an der Tragfähigkeit des Fachwerkausschnittes bestimmen zu können, wurden im Zuge einer Parameterstudie für drei Gruppen

- Gruppe 1,
- Gruppe 5 und
- Gruppe 6b

Traglastberechnungen mit verschiedenen großen externen Kräften N_{appl} durchgeführt, siehe Abbildung B.417. Neben dem bisher betrachteten Fall ohne externer Untergurtkraft wurde nun am verschieblichen Auflager eine Kraft N_{appl} aufgebracht. Bislang existierte nur die Normalkraft N_H als horizontale Komponente der Diagonalkräfte N_{Rd} in der gezogenen (linken) Untergurthälfte. Nun können drei weitere Normalkraftsituationen im Untergurt auftreten:

- $N_{appl} < N_H$
- $N_{appl} = N_H$
- $N_{appl} > N_H$

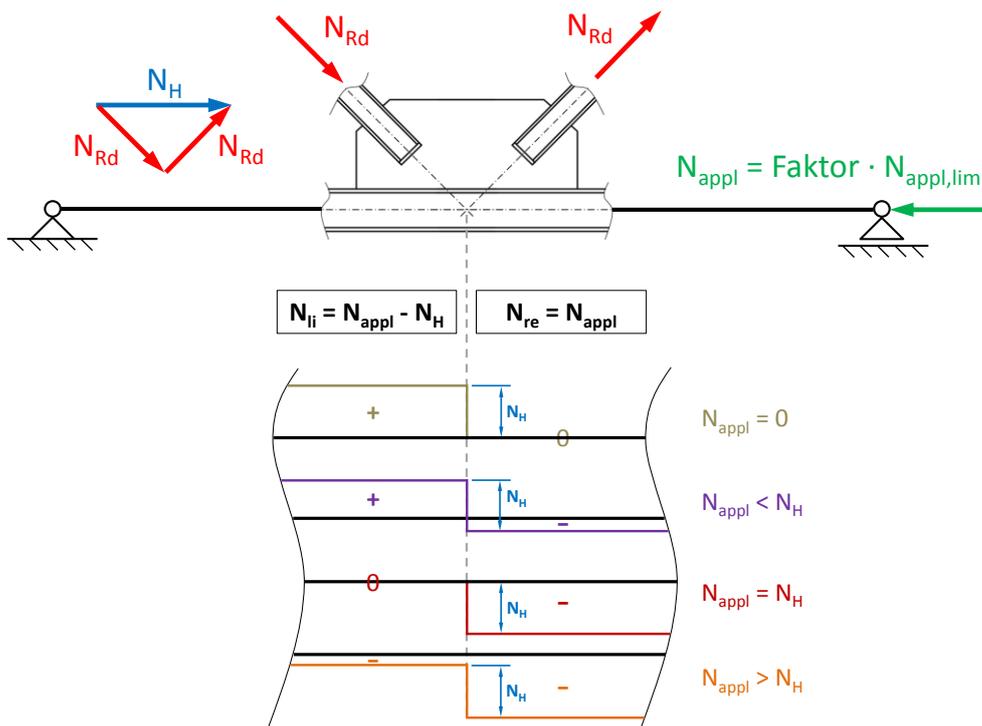


Abbildung B.417 – Normalkraftverlauf im Untergurt in Abhängigkeit von N_{appl}

Für die Wahl der Größe von N_{appl} wurde zuerst die rechnerisch maximal mögliche Kraft $N_{appl,lim}$ des Untergurtstabes bestimmt. Sie entspricht der Knicktragfähigkeit des Untergurtstabes. Ihre Ermittlung ist in den nachfolgenden Kapiteln B - 9.2 bis B - 9.8 für die untersuchten Gruppen beschrieben.

$$N_{appl,lim} = \chi_{zUG} \cdot N_{pl,UG}$$

Der Kraft $N_{appl,lim}$, auf welcher die FE-Parameterstudie der Belastungssituation im Untergurt basiert, wurde ein Multiplikationsfaktor (z.B. 0,25; 0,5; 1,0, usw.) vorgesetzt, um verschiedene Normalkraftverläufe im Untergurtstab zu simulieren.

$$N_{appl} = Faktor \cdot N_{appl,lim}$$

Bei der FE-Traglastberechnung der Gruppen 1 und 5 wurde für die Fälle $N_{appl} < N_{appl,lim}$, bzw. $N_{appl} < 1,1 \cdot N_{appl,lim}$ für die Gruppe 6b, in einem ersten Schritt („Step“) die externe Untergurtkraft N_{appl} aufgebracht und anschließend im Schritt Zwei die Diagonalkraft ($N_{ref} = N_{pl}$ des Druckstrebenprofils mit Ausrundungsradius zwischen Steg und Flansch) bis zur maximalen Grenztragfähigkeit gesteigert (Variante 1), siehe Abbildung B.418. Die Kraft N_{appl} wurde dabei konstant gehalten.

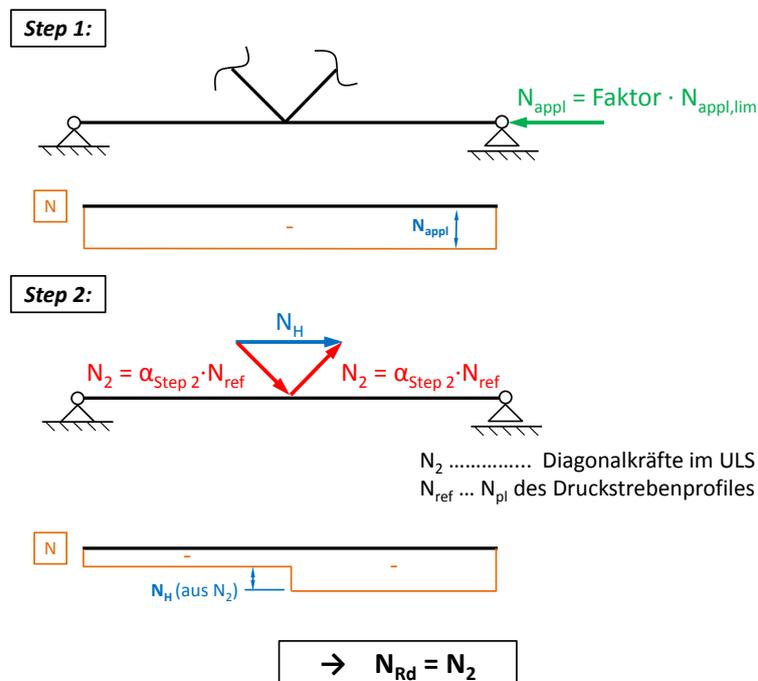


Abbildung B.418 – Variante 1: Aufbringen der Belastung im Knoten für Faktoren $< 1,0$ (1,1)

Bei Faktoren über 1,0 (bzw. 1,1) wurden 60% der Diagonalkraft im ULS (aus der FE-Rechnung mit Imperfektion in der Druckdiagonalen und $N_{appl} = 0\text{kN}$ aus Kapitel B - 5) und die Untergurtkraft N_{appl} im ersten Schritt gemeinsam aufgebracht. Im zweiten Schritt wurden dann die Diagonalkräfte weiter bis zum Erreichen des Traglastzustandes gesteigert (Variante 2). Hierbei wurde N_{appl} konstant gehalten. Diese Vorgehensweise ist nötig, da durch Aufbringen von 60% der Diagonalkräfte bereits im ersten Schritt, ein Teil der Druckkraft N_{appl} in der linken Untergurtstabhälfte (durch die horizontalen Zugkomponenten aus den Diagonalkräften) aufgehoben wird. Somit tritt ein Stabilitätsversagen erst bei höheren externen Kräften N_{appl} auf, der Normalkraftverlauf während der Lastaufbringung wird günstiger.

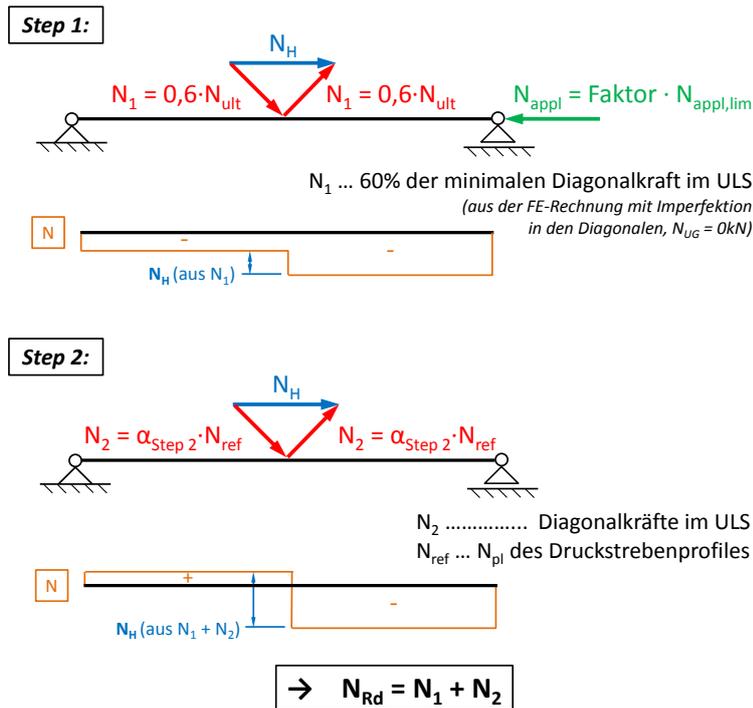


Abbildung B.419 – Variante 2: Aufbringen der Belastung im Knoten für Faktoren $\geq 1,0$ (1,1)

Bei den Berechnungen mit Variation der Belastungssituation (N_{appl}) erfolgte die Annahme eines rein elastischen Materialverhaltens der Zugstrebe, um die Systemtragfähigkeit durch Kombination eines Untergurt-Druckstreben-Knotenblech-Versagens zu erhalten.

B - 9.1.1 Imperfektion für die FE-Rechnung

Für die Traglastberechnungen des Knotens mit der externen Kraft N_{appl} wurde zwischen zwei Imperfektionsformen unterschieden:

- Imperfektion im Untergurtstab mit $L_{\text{UG}}/750$ (siehe Tabelle B.59), oder
- Imperfektion in der Druckdiagonale mit $L^*/750$ (siehe Tabelle B.60)

Daher gibt es für jede gewählte Kraft N_{appl} zwei FE-Ergebnisse für die Tragfähigkeit, abhängig vom Imperfektionsauftritt, des modellierten Fachwerkknotens.

Die beiden nachfolgenden Tabellen zeigen die Größen der Imperfektionsamplituden. Tabelle B.59 zeigt einerseits die Werte $L_{\text{UG}}/750$ für den Fall mit Imperfektion im Untergurtstab.

Gruppe	L_{UG}	$L_{\text{UG}}/750$
	[mm]	[mm]
1	6250	8,3
2	6250	8,3
3	6250	8,3
4	6250	8,3
5	6250	8,3
6a	6530	8,7
6b	4750	6,3

Tabelle B.59 – Größe der Imperfektion $L_{\text{UG}}/750$ für die erste Knickeigenform des Untergurtstabes

Andererseits sind in Tabelle B.60 die Größen $L^*/750$ für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale dargestellt.

Gruppe	L^*	$L^*/750$
	[mm]	[mm]
1	4303	5,7
2	4581	6,1
3	4454	5,9
4	4372	5,8
5	4423	5,9
6a	4618	6,2
6b	3355	4,5

Tabelle B.60 – Größe der Imperfektion $L^*/750$ für die erste Knickeigenform der Druckdiagonale

B - 9.2 Gruppe 1

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 1 zu charakterisieren sind in Tabelle B.61 zusammengefasst.

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge L^* =	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	L_{res} =	3648mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	45mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.61 – FE-Eingangsdaten Gruppe 1

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 450, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 450:} \quad & h = 45 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,6 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,4 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$A = (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w + 2 \cdot t_f \cdot b = (45 - 2 \cdot 2,6) \cdot 1,4 + 2 \cdot 2,6 \cdot 30 = 211,7 \text{ cm}^2$$

$$N_{pl,UG} = A \cdot f_y = 211,7 \cdot 35,5 = 7516,1 \text{ kN}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2.Grades I_z :

$$I_z = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b^3}{12} + \frac{t_w^3 \cdot (h - 2 \cdot t_f)}{12} = 2 \cdot \frac{2,6 \cdot 30^3}{12} + \frac{1,4^3 \cdot (45 - 2 \cdot 2,6)}{12} = 11709,1 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$L_{UG} = 6,25 \text{ m} = 625 \text{ cm}$$

$$N_{cr,min} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{L_{UG}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 11709,1}{625^2} = 6213 \text{ kN}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.3:

$$N_{ult} = 5427,6 \text{ kN (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)}$$

Über den Diagonalenwinkel α kann die horizontale Kraftkomponente aus den Diagonalkräften ermittelt werden, wie die Abbildung B.420 zeigt.

$$\alpha = 43,43^\circ$$

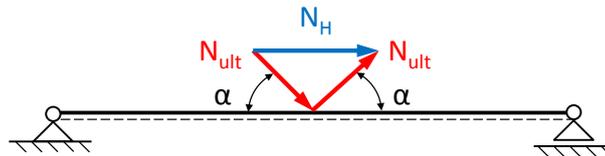


Abbildung B.420 – Der Diagonalenwinkel α

$$N_H = 2 \cdot N_{ult} \cdot \cos(\alpha) = 2 \cdot 5427,6 \cdot \cos(43,43^\circ) = 7883,2 \text{ kN}$$

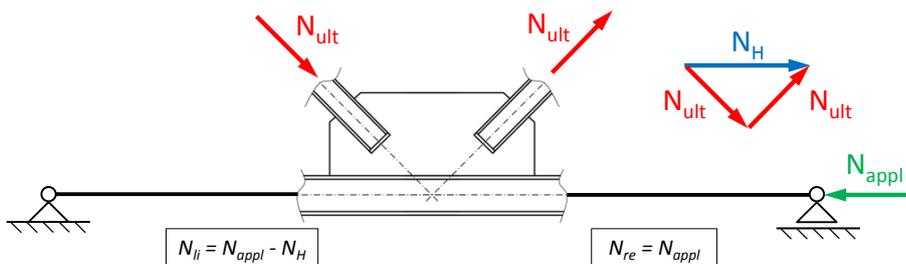


Abbildung B.421 – Kräftebezeichnung am Knoten

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} (siehe Abbildung B.421) zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 1 mit $N_{appl} = 6000 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{appl} = 6000\text{kN}$:

$$N_{re} = N_{appl} = -6000 \text{ kN}$$

$$N_{li} = N_{appl} - N_H = -6000 + 7883,2 = 1883,2 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 2,539 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

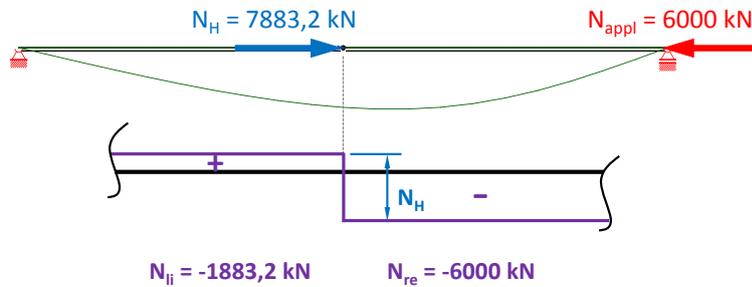


Abbildung B.422 – Ermittlung des Eigenwertes für $N_{appl} = 6000\text{kN}$ – Eigenform der Gruppe 1

$$N_{cr} = \alpha_{cr} \cdot N_{appl} = 2,539 \cdot 6000 = 15234 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl,UG}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{7516,1}{15234}} = 0,702$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

Für die Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z ist es notwendig, die dem Profil entsprechende Knicklinie und den zugehörigen Imperfektionswert α zu bestimmen. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um ein gewalztes I-Profil. Untersucht wird das Knickverhalten um die schwache z-Achse des Profils.

Knicklinie	a	b	c
α	0,21	0,34	0,49

Tabelle B.62 – Imperfektionswerte α [10]

Profil	$t_f \leq 40\text{mm}$	Ausweichen um	S 235 bis S 420
I gewalzt	$h / b > 1,2$	y-y	a
		z-z	b
I gewalzt	$h / b \leq 1,2$	y-y	b
		z-z	c

Tabelle B.63 – Knicklinien für Biegeknicken [10]

Es gilt:

$$t_f = 2,6 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \quad \text{und} \quad \frac{h}{b} = \frac{45}{30} = 1,5 > 1,2 \quad \rightarrow \quad \text{Knicklinie } b: \quad \alpha = 0,34$$

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (0,702 - 0,2) + 0,702^2 \right] = 0,832$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,832 + \sqrt{0,832^2 - 0,702^2}} = 0,782 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.64 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{\text{appl}}/N_{\text{pl}} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{\text{appl}}/N_{\text{pl}} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{\text{re}} =$ N_{appl}	$N_{\text{ii}} =$ $N_{\text{appl}} - N_{\text{H}}$	$N_{\text{ii}} / N_{\text{re}}$	α_{cr}	$N_{\text{cr}} =$ $\alpha_{\text{cr}} \cdot N_{\text{appl}}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	$N_{\text{appl}} / N_{\text{pl}}$
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
1000	-6883,2	-6,883	1008	1008000	0,086	0,484	1,041	0,133
1500	-6383,2	-4,255	25,969	38954	0,439	0,637	0,910	0,200
2000	-5883,2	-2,942	18,156	36312	0,455	0,647	0,904	0,266
2500	-5383,2	-2,153	13,448	33620	0,473	0,658	0,896	0,333
3000	-4883,2	-1,628	10,247	30741	0,494	0,672	0,887	0,399
3500	-4383,2	-1,252	7,902	27657	0,521	0,691	0,875	0,466
4000	-3883,2	-0,971	6,121	24484	0,554	0,714	0,859	0,532
5900	-1983,2	-0,336	2,632	15529	0,696	0,826	0,785	0,785
6000	-1883,2	-0,314	2,539	15234	0,702	0,832	0,782	0,798
7000	-883,2	-0,126	1,859	13013	0,760	0,884	0,749	0,931
7516	-367,2	-0,049	1,626	12221	0,784	0,907	0,734	1,000
8000	116,8	0,015	1,452	11616	0,804	0,926	0,722	1,064
10000	2116,8	0,212	1,000	10000	0,867	0,989	0,682	1,330
12000	4116,8	0,343	0,760	9120	0,908	1,032	0,656	1,597
14000	6116,8	0,437	0,612	8568	0,937	1,064	0,638	1,863
16000	8116,8	0,507	0,512	8192	0,958	1,088	0,624	2,129
20000	12116,8	0,606	0,385	7700	0,988	1,122	0,605	2,661
50000	42116,8	0,842	0,135	6750	1,055	1,202	0,562	6,652
100000	92116,8	0,921	0,065	6500	1,075	1,227	0,550	13,305
	$N_{\text{ii}} / N_{\text{re}}$			$N_{\text{cr,min}}$	λ_{max}		χ_{min}	
	[/]			[kN]	[/]		[/]	
	1,000			6213	1,100		0,484	

Tabelle B.64 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 1

Die unterste Zeile der Tabelle B.64 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{\text{cr,min}}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.423) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,785 \cdot 7516,1 = 5900,1 \text{ kN}$$

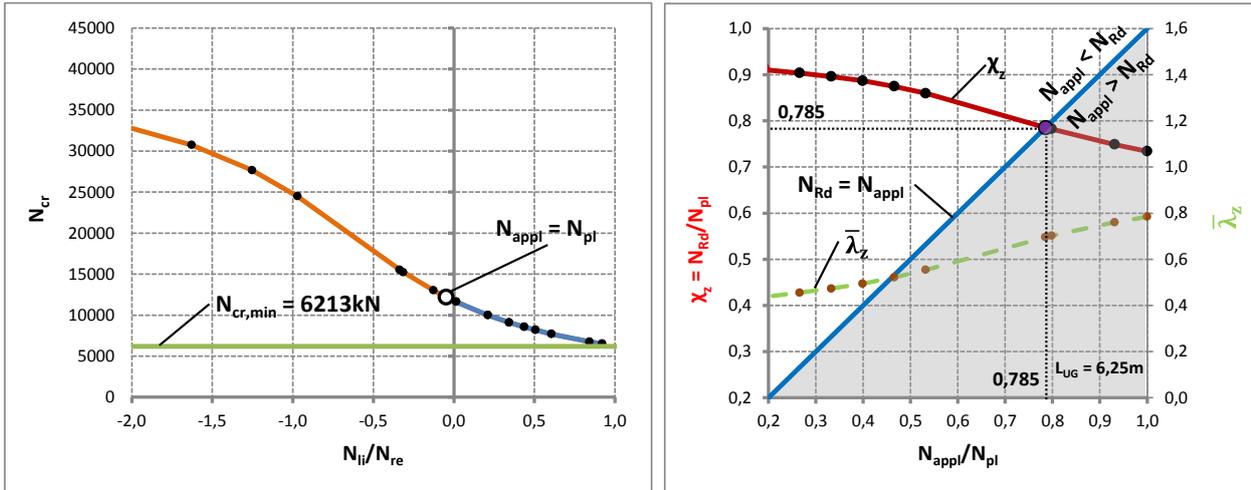


Abbildung B.423 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 1

B - 9.2.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde je einerseits die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab und andererseits die erste Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt (siehe Kapitel B - 2.2). Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die beiden untersuchten Fälle gezeigt.

- **Im Untergurtstab – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L_{UG}/750 = 6250\text{mm}/750 = 8,3\text{mm}$. Abbildung B.424 zeigt die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 1.

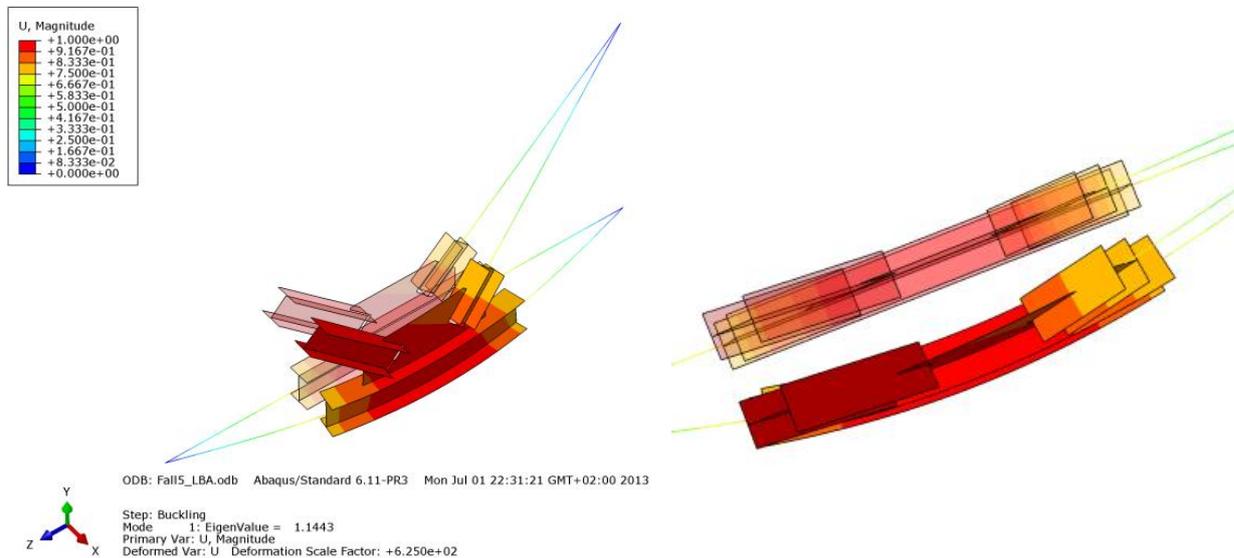


Abbildung B.424 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

- **In der Druckdiagonale – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale**

Die erste Eigenform des Knotens zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale ist im Kapitel B - 4.2.1 in der Abbildung B.35 gezeigt.

B - 9.2.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$

B - 9.2.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl}

In den nachfolgenden Bildern B.425 bis B.428 wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Plastizierens des Steges des Untergurtstabes unterhalb des Knotenbleches, in der Druckstrebe sowie im Einbindebereich der Diagonale in das Knotenblech.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

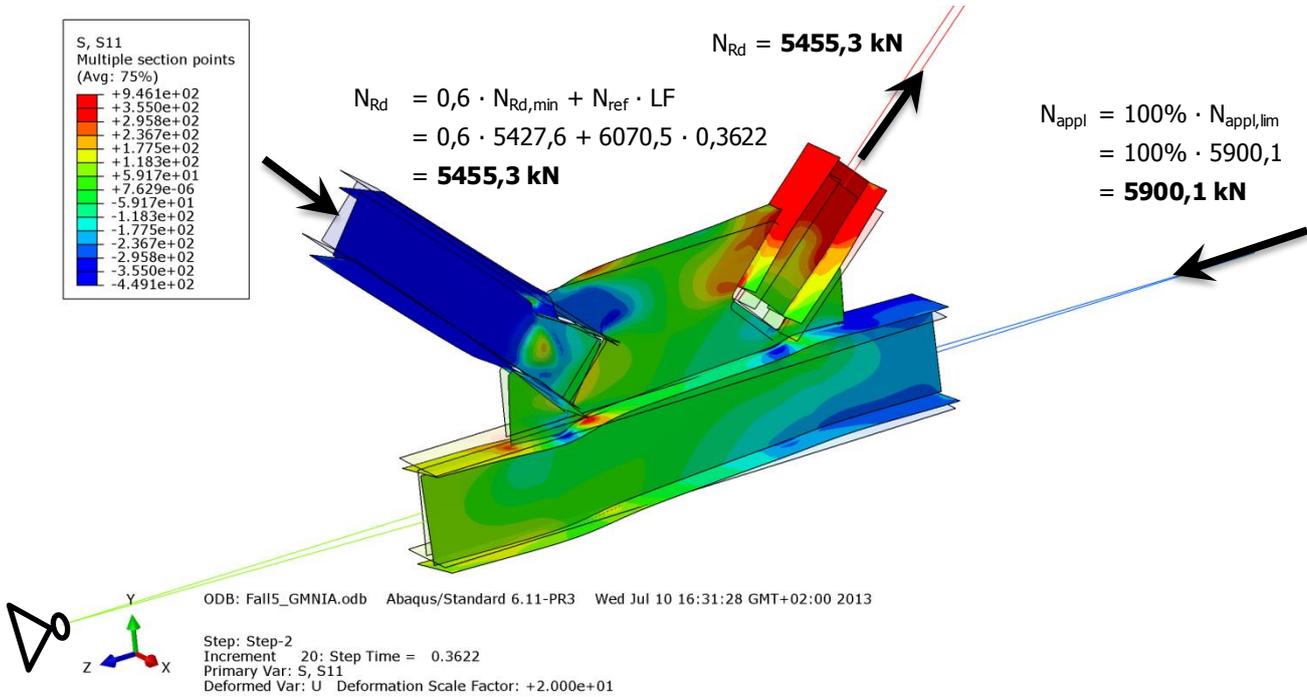


Abbildung B.425 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

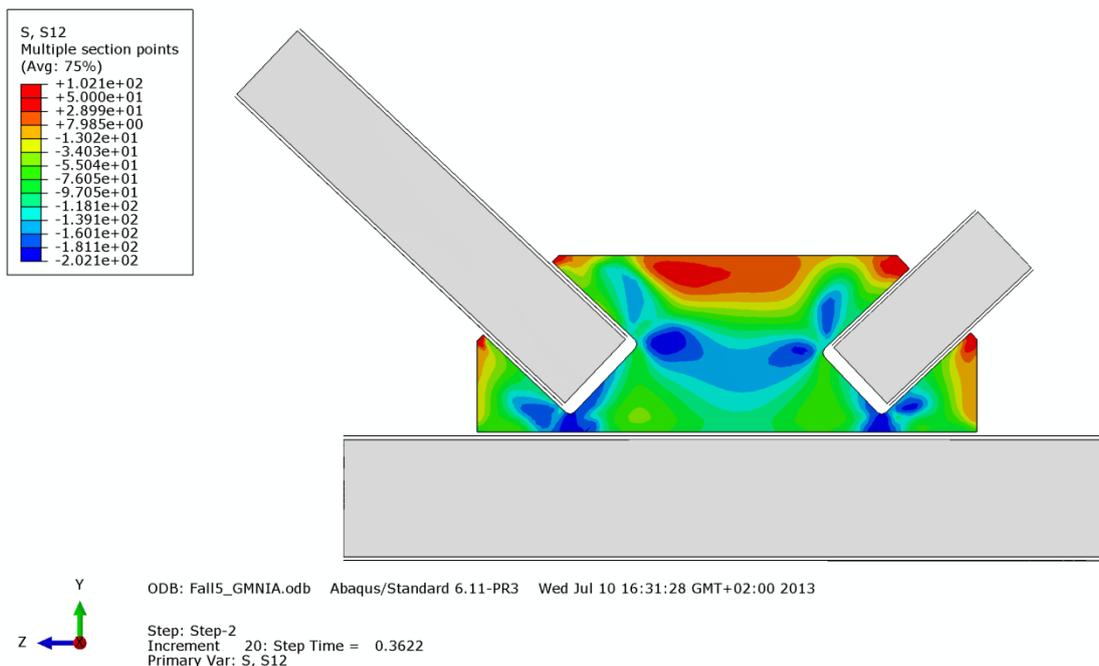


Abbildung B.426 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

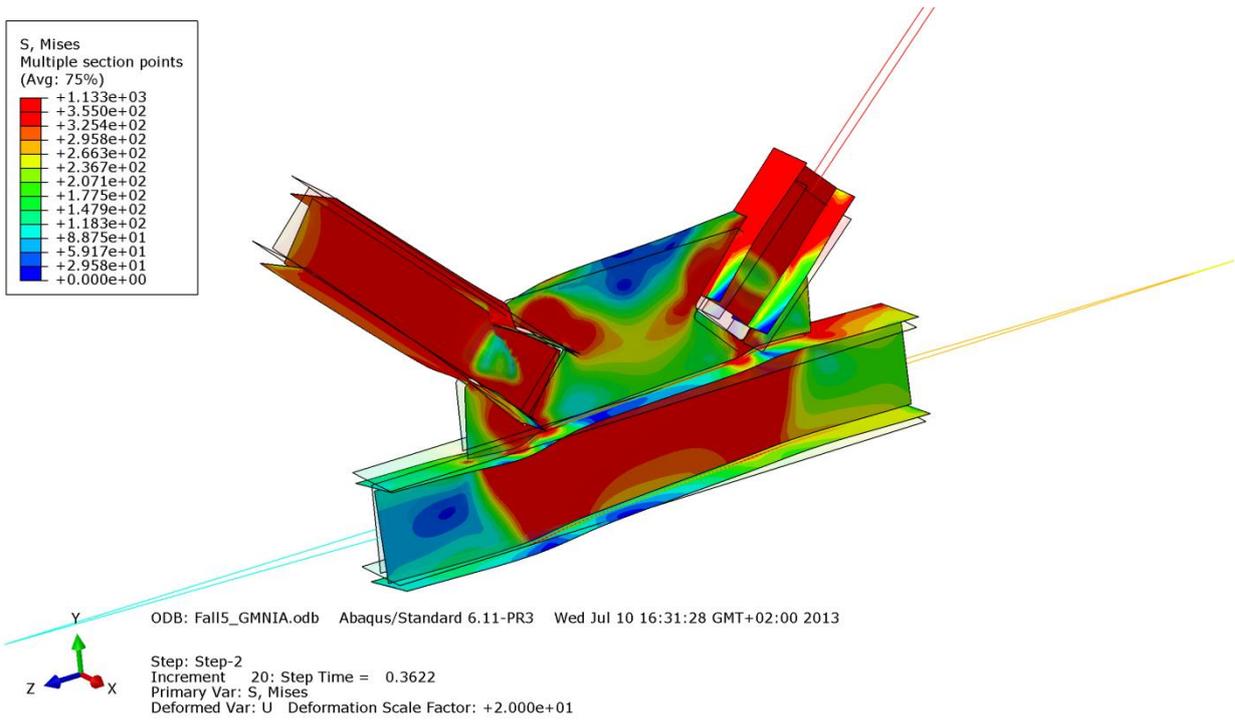


Abbildung B.427 – Mises-Vergleichsspannung σ_{12} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

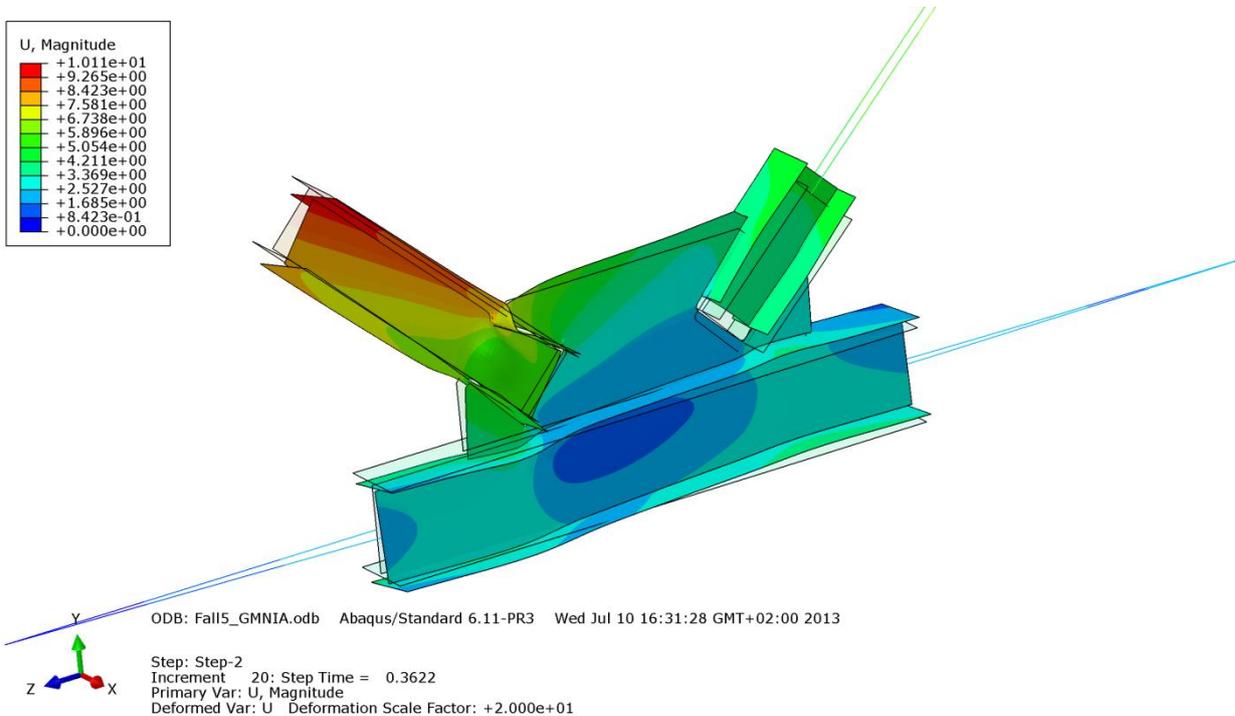


Abbildung B.428 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

B - 9.2.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref}

In den nachfolgenden Bildern wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt durch Ausknicken der Druckstrebe und des Knotenbleches, wie die Abbildungen B.429 bis B.432 zeigen. Es plastiziert der Steg des Untergurtstabes unterhalb des Knotenbleches, die Druckstrebe sowie der Einbindebereich der Diagonale in das Knotenblech.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

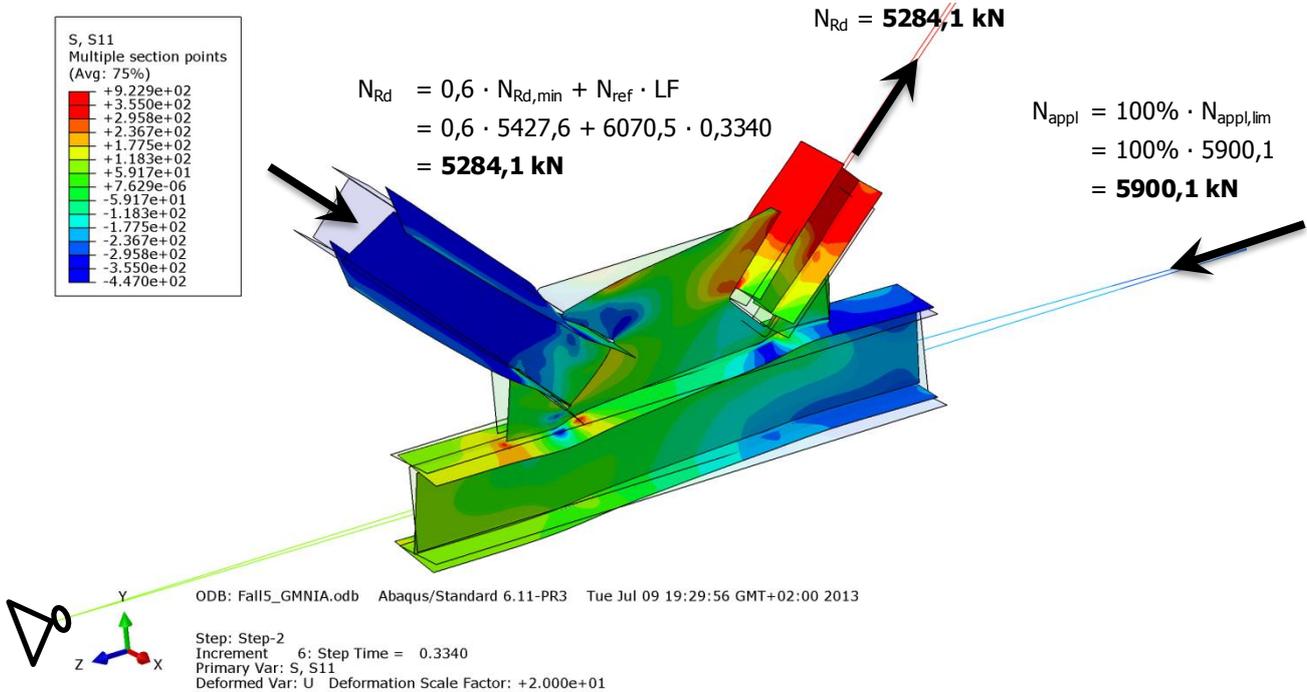


Abbildung B.429 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

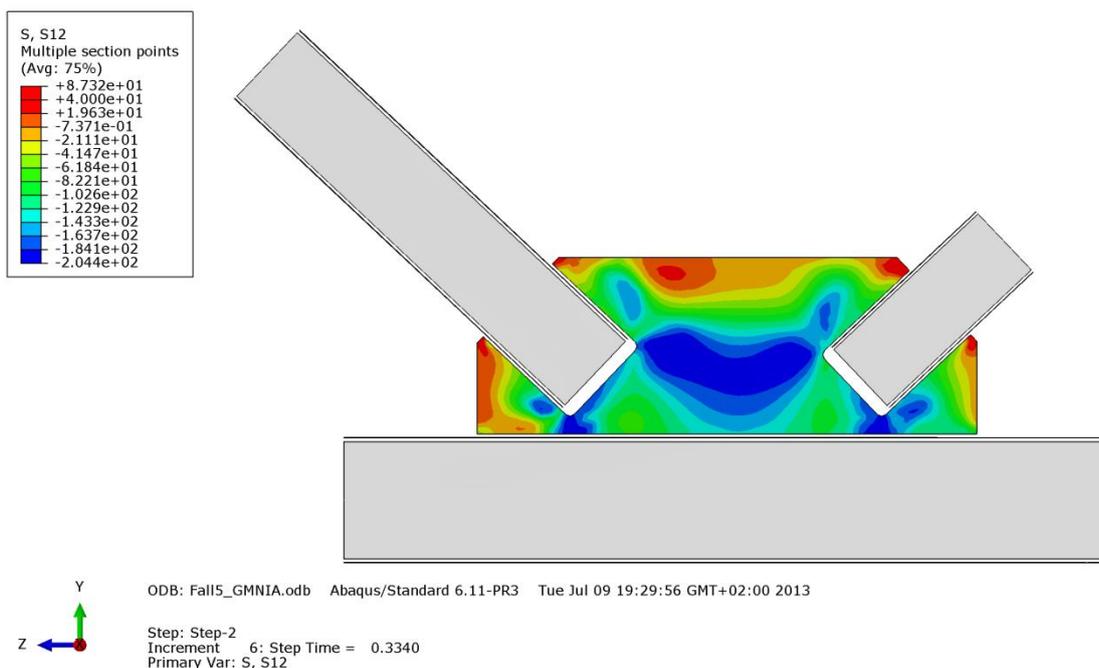


Abbildung B.430 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 1 – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

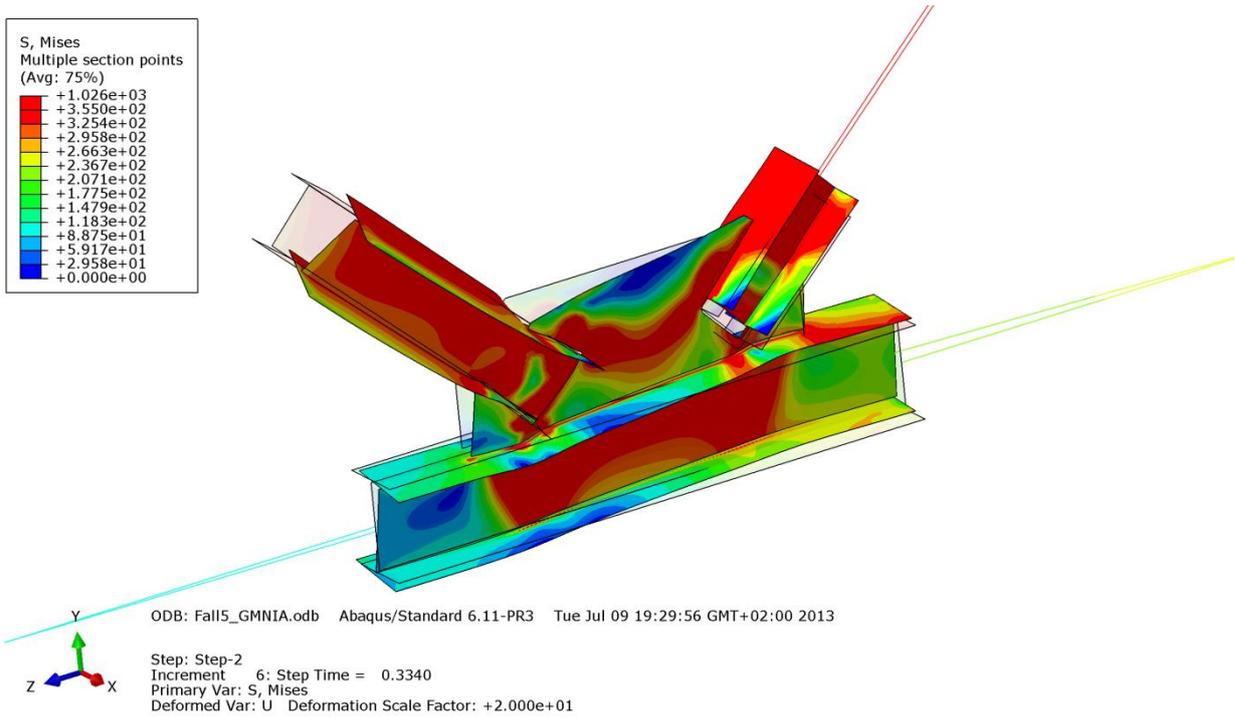


Abbildung B.431 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

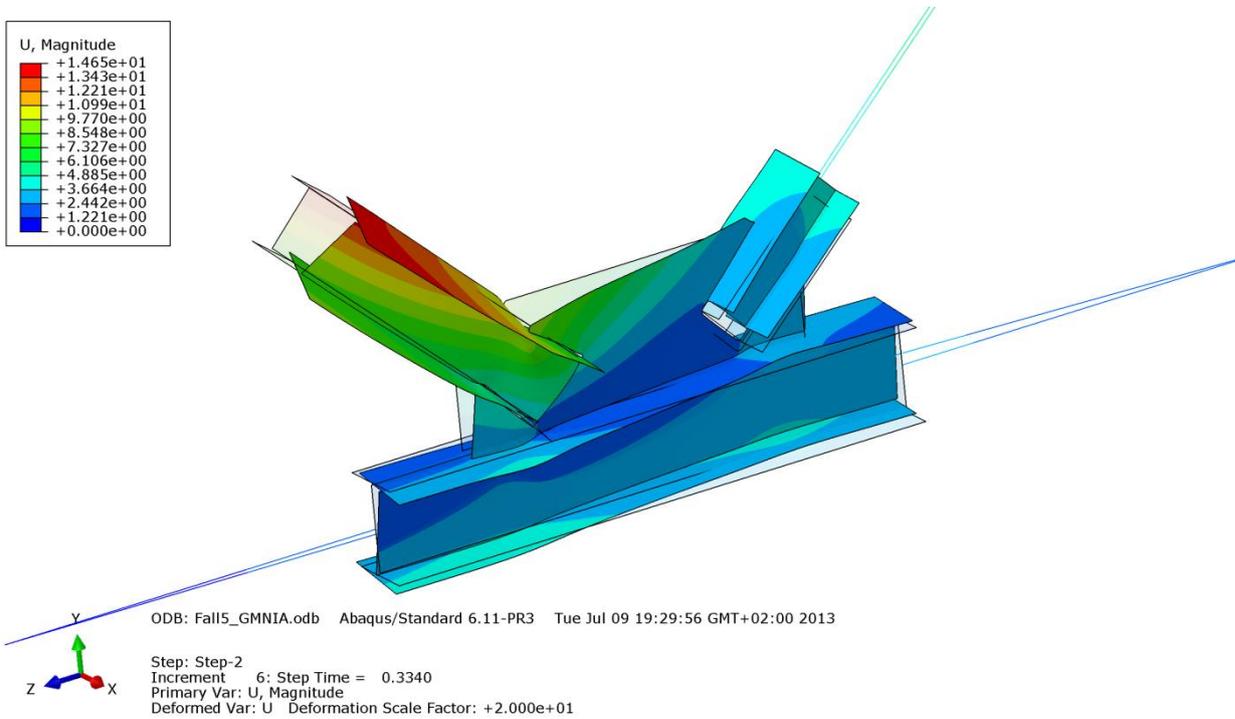


Abbildung B.432 – Verformung U [mm] der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

B - 9.2.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt

Die Tabelle B.65 zeigt für die beiden Imperfektionsarten (einerseits in der Druckdiagonale und andererseits im Untergurtstab) die Traglastergebnisse des Fachwerkknotens der Gruppe 1 mit einer pro Rechnung wertmäßig ansteigenden externen Untergurtkraft N_{appl} in Kombination mit den bis zur Traglastgrenze zu steigernden Diagonalkräften N_{ref} .

Ausgewertet wurden die folgenden ansteigenden Laststufen für die Untergurtkraft N_{appl} :

- 0% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Material der Zugstrebe bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch modelliert
- 25% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 50% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 75% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 83% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 100% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 110% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 115% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 125% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch (nur möglich für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale, beim Fall mit Imperfektion im Untergurt ist das Tragfähigkeitslimit bei 115% $N_{\text{appl,lim}}$ erreicht)

Eine höhere Belastung als 125% $N_{\text{appl,lim}}$ war auch für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale nicht mehr möglich. Ab der Grenze mit 100% $N_{\text{appl,lim}}$ wurde die maximale Traglast mit der in Abschnitt B - 9.1 erläuterten modifizierten Lastaufbringungsmethode (Variante 2) berechnet. Eine Steigerung über den theoretisch maximalen Wert von $N_{\text{appl,lim}}$ war möglich, da bei der Systemrechnung eine gewisse Stützung aus der Fachwerkebene durch die Diagonalen bzw. durch das Knotenblech erfolgt. Diese stabilisierenden Effekte wurden bei der Ermittlung von $N_{\text{appl,lim}}$ nicht berücksichtigt.

Gruppe 1			
Profil der Druckstrebe:	HEB 340	Systemlänge $L^* =$	4303mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*} =$	0,735
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	164,6cm ²	$L_{ges} =$	3648mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech} =$	45mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}} =$	0,623
Profil der Zugstrebe:	HEB 320		
Profil des Untergurtes:	HEB 450	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

$N_{appl,lim} =$	0,785	$\cdot N_{pl,UG}$
$N_{pl,UG} =$	7516,1	kN
$N_{appl,lim} =$	5900,1	kN

Imperfektion:	
in den Diagonalen ($L^*/750 = 5,7\text{mm}$) (erste Knickeigenform)	im Untergurt ($L_{UG}/750 = 8,3\text{mm}$) (erste Knickeigenform)
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)
5113,2 kN	5111,4 kN
Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)
5427,6 kN	5640,1 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1475\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1475\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)
5300,2 kN	5407,0 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2950\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2950\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)
5321,4 kN	5505,3 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 4425\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 4425\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)
5312,9 kN	5512,0 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 4897\text{kN}$ (83% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 4897\text{kN}$ (83% $N_{appl,lim}$)
5305,6 kN	5474,4 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 5900\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 5900\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)
5284,1 kN	5455,3 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 6490\text{kN}$ (110% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 6490\text{kN}$ (110% $N_{appl,lim}$)
5236,2 kN	5409,2 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 6785\text{kN}$ (115% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 6785\text{kN}$ (115% $N_{appl,lim}$)
5169,4 kN	5309,6 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 7375\text{kN}$ (125% $N_{appl,lim}$)	
4374,8 kN	

N_{pl} - Druckstrebe =	5844,7 kN
N_{pl} - Zugstrebe =	5505,5 kN
$N_{ult} =$	5427,6 kN
$N_{ref} =$	6070,5 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>	

Tabelle B.65 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 1

In der grafischen Gegenüberstellung in Abbildung B.434 der Tragfähigkeiten ist erkennbar, wie die maximale Traglast des Knotens durch die aufgebrauchte Untergurtkraft N_{appl} gegenüber der Traglast der Berechnung mit $N_{appl} = 0\text{kN}$ steigt (mit Zugstrebe rein elastisch modelliert):

- für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale von 5113kN auf maximal 5321kN bei 50% $N_{appl,lim}$
- für den Fall mit Imperfektion im Untergurtstab von 5111kN auf maximal 5512kN bei 75% $N_{appl,lim}$

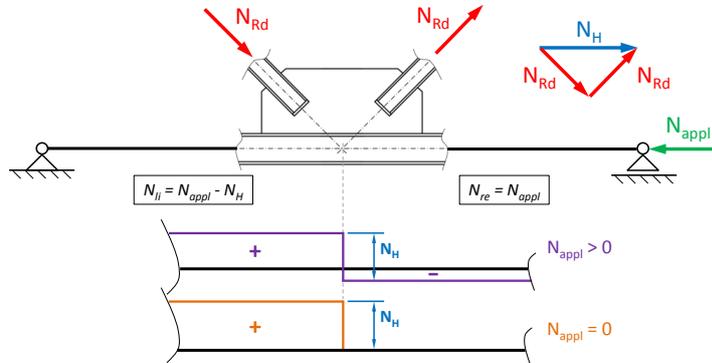


Abbildung B.433 – mögliche Belastungssituation im Untergurt

Dieser Traglasterhöhungseffekt ist dadurch zu erklären, dass die externe Druckkraft N_{appl} die hohe Kraft in der Zugseite des Untergurtes reduziert (linke Hälfte, siehe Abbildung B.433). Zurückzuführen auf plastizierende Zonen im Untergurt kann jedoch bei keiner Laststufe für N_{appl} jene Traglast, die bei der Berechnung mit einer rein elastischen Werkstoffmodellierung des Untergurtes die obere Grenze bildet ($N_{appl} = 0\text{kN}$), erreicht werden. Bis zur theoretischen Grenze von $N_{appl,lim}$ ist kein Abfall der Tragfähigkeit erkennbar. Erst bei einer sehr großen Untergurtkraft N_{appl} ist ein deutlicher Rückgang der Tragfähigkeit zu sehen (siehe Abbildung B.434 für 125% $N_{appl,lim}$ beim Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale).

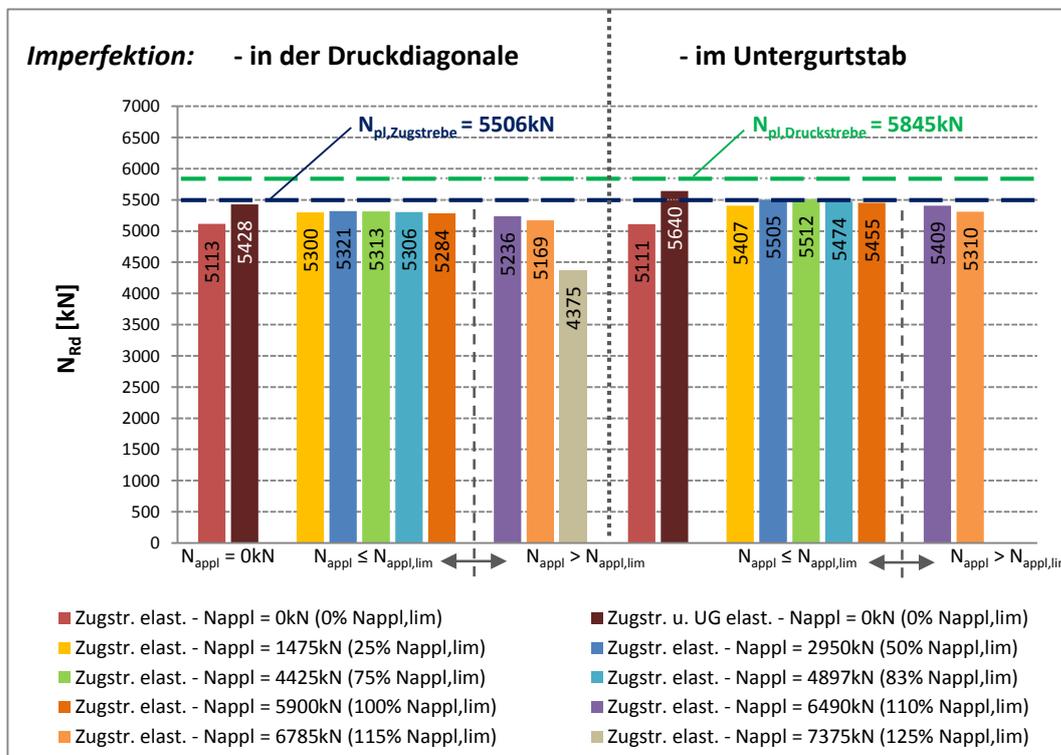


Abbildung B.434 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 1

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

B - 9.3 Gruppe 2

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 2 zu charakterisieren sind in Tabelle B.66 zusammengefasst.

Gruppe 2			
Profil der Druckstrebe:	HEA 140	Systemlänge L^* =	4581mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,670
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	30,1cm ²	L_{ges} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4320mm
$t_{Knotenblech}$ =	12mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,575
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 180	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

Tabelle B.66 – FE-Eingangsdaten Gruppe 2

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 180, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 180:} \quad & h = 17 \text{ cm} \\
 & b = 18 \text{ cm} \\
 & t_f = 0,95 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,6 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 43,3 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 1537,9 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2. Grades I_z :

$$I_z = 923,7 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 6,25 \text{ m} = 625 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 490 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.4:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 418,5 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 46,98^\circ \\
 N_H &= 578,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 2 mit $N_{\text{appl}} = 500 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{\text{appl}} = 500 \text{ kN}$:

$$N_{re} = N_{\text{appl}} = -500 \text{ kN}$$

$$N_{ii} = -500 + 578,2 = 78,2 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 2,105 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 1053 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 1,209$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 1,478$$

$$\chi_z = 0,430 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.67 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{appl}/N_{pl} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{re} =$ N_{appl}	$N_{ii} =$ $N_{appl} - N_H$	N_{ii} / N_{re}	α_{cr}	$N_{cr} =$ $\alpha_{cr} \cdot N_{appl}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	N_{appl} / N_{pl}
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
100	-478,2	-4,782	31,313	3131	0,701	0,868	0,724	0,065
200	-378,2	-1,891	12,766	2553	0,776	0,942	0,677	0,130
300	-278,2	-0,927	6,297	1889	0,902	1,079	0,598	0,195
400	-178,2	-0,445	3,355	1342	1,070	1,286	0,500	0,260
500	-78,2	-0,156	2,105	1053	1,209	1,478	0,430	0,325
594	15,4	0,026	1,529	908	1,302	1,617	0,386	0,386
600	21,8	0,036	1,502	901	1,306	1,624	0,386	0,390
700	121,8	0,174	1,160	812	1,376	1,735	0,358	0,455
800	221,8	0,277	0,941	753	1,429	1,823	0,339	0,520
900	321,8	0,358	0,792	713	1,469	1,890	0,325	0,585
1000	421,8	0,422	0,684	684	1,499	1,943	0,315	0,650
1538	1421,8	0,711	0,392	603	1,597	2,118	0,285	1,000
2000	2421,8	0,807	0,286	572	1,640	2,197	0,273	1,301
3000	3421,8	0,855	0,181	543	1,683	2,279	0,262	1,951
4000	4421,8	0,884	0,132	528	1,707	2,325	0,256	2,601
5000	5421,8	0,904	0,104	520	1,720	2,351	0,253	3,251
6000	7421,8	0,928	0,086	516	1,726	2,364	0,251	3,902
8000	7421,8	0,928	0,064	512	1,733	2,377	0,250	5,202
100000	99421,8	0,994	0,005	500	1,754	2,419	0,245	65,025
500000	499421,8	0,999	0,001	500	1,754	2,419	0,245	325,127
		N_{ii} / N_{re}		$N_{cr,min}$	λ_{max}		χ_{min}	
		[/]		[kN]	[/]		[/]	
		1,000		490	1,771		0,241	

Tabelle B.67 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 2

Die unterste Zeile der Tabelle B.67 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{cr,min}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.435) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,386 \cdot 1537,9 = 593,5 \text{ kN}$$

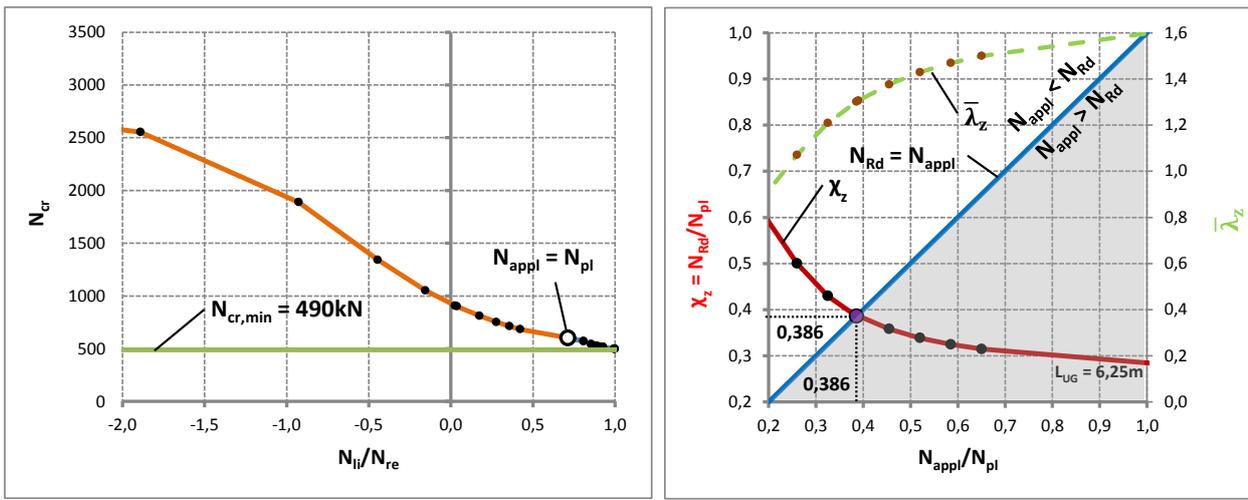


Abbildung B.435 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 2

B - 9.4 Gruppe 3

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 3 zu charakterisieren sind in Tabelle B.68 zusammengefasst.

Gruppe 3			
Profil der Druckstrebe:	HEA 200	Systemlänge $L^* =$	4454mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	1,141
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	51,1cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	4159mm
$t_{Knotenblech} =$	25mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	1,065
Profil der Zugstrebe:	HEA 140		
Profil des Untergurtes:	HEA 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Tabelle B.68 – FE-Eingangsdaten Gruppe 3

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 200:} \quad & h = 19 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,0 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,65 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 51,1 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 1812,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2. Grades I_z :

$$I_z = 1333,7 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 6,25 \text{ m} = 625 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 708 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.5:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 1248,9 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 45,44^\circ \\
 N_H &= 1774,7 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 3 mit $N_{\text{appl}} = 1000 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{\text{appl}} = 1000 \text{ kN}$:

$$N_{re} = N_{\text{appl}} = -1000 \text{ kN}$$

$$N_{ii} = -1000 + 1774,7 = 774,7 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 2,422 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 2422 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 0,865$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

$$\text{Knicklinie c: } \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 1,037$$

$$\chi_z = 0,621 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.69 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{appl}/N_{pl} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{re} =$ N_{appl}	$N_{ii} =$ $N_{appl} - N_H$	N_{ii} / N_{re}	α_{cr}	$N_{cr} =$ $\alpha_{cr} \cdot N_{appl}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	N_{appl} / N_{pl}
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
300	-1474,7	-4,916	15,047	4514	0,634	0,807	0,765	0,166
500	-1274,7	-2,549	7,953	3977	0,675	0,844	0,740	0,276
700	-1074,7	-1,535	4,828	3380	0,732	0,899	0,705	0,386
1000	-774,7	-0,775	2,422	2422	0,865	1,037	0,621	0,552
1082	-692,7	-0,640	2,035	2202	0,907	1,085	0,597	0,597
1200	-574,7	-0,479	1,615	1938	0,967	1,155	0,559	0,662
1500	-274,7	-0,183	1,014	1521	1,092	1,314	0,489	0,828
1600	-174,7	-0,109	0,896	1434	1,124	1,359	0,471	0,883
1812	37,3	0,021	0,715	1296	1,183	1,440	0,442	1,000
2000	225,3	0,113	0,604	1208	1,225	1,501	0,422	1,104
2200	425,3	0,193	0,519	1142	1,260	1,553	0,406	1,214
2400	625,3	0,261	0,453	1087	1,291	1,601	0,393	1,324
3000	1225,3	0,408	0,329	987	1,355	1,701	0,366	1,655
5000	3225,3	0,645	0,171	855	1,456	1,868	0,329	2,759
7500	5725,3	0,763	0,107	803	1,503	1,948	0,314	4,138
10000	8225,3	0,823	0,078	780	1,524	1,986	0,307	5,518
20000	18225,3	0,911	0,037	740	1,565	2,059	0,294	11,036
30000	28225,3	0,941	0,024	720	1,587	2,098	0,288	16,554
		N_{ii} / N_{re}		$N_{cr,min}$	λ_{max}		χ_{min}	
		[/]		[kN]	[/]		[/]	
		1,000		708	1,600		0,284	

Tabelle B.69 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 3

Die unterste Zeile der Tabelle B.69 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{cr,min}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.436) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ij}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,597 \cdot 1812,3 = 1081,9 \text{ kN}$$

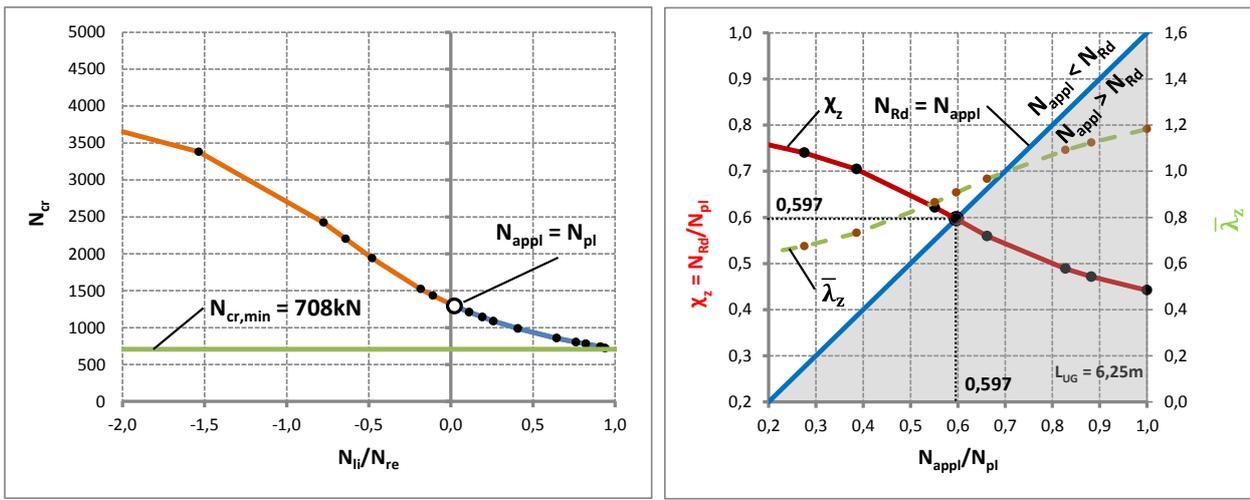


Abbildung B.436 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ij}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 3

B - 9.5 Gruppe 4

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 4 zu charakterisieren sind in Tabelle B.68 zusammengefasst.

Gruppe 4			
Profil der Druckstrebe:	HEB 320	Systemlänge $L^* =$	4372mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,742
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	155,1cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	3872mm
$t_{Knotenblech} =$	50mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,657
Profil der Zugstrebe:	HEA 240		
Profil des Untergurtes:	HEB 360	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Tabelle B.70 – FE-Eingangsdaten Gruppe 4

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 360, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 360:} \quad & h = 36 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 2,25 \text{ cm} \\
 & t_w = 1,25 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 174,4 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 6190,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2. Grades I_z :

$$I_z = 10129,5 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 6,25 \text{ m} = 625 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 5375 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.6:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 5050,8 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 44,38^\circ \\
 N_H &= 7219,8 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtknicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 4 mit $N_{\text{appl}} = 5000 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{\text{appl}} = 5000 \text{ kN}$:

$$N_{re} = N_{\text{appl}} = -5000 \text{ kN}$$

$$N_{li} = -5000 + 7219,8 = 2219,8 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 2,453 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 12265 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 0,710$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,877$$

$$\chi_z = 0,718 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.71 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{appl}/N_{pl} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{re} =$ N_{appl}	$N_{ii} =$ $N_{appl} - N_H$	N_{ii} / N_{re}	α_{cr}	$N_{cr} =$ $\alpha_{cr} \cdot N_{appl}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	N_{appl} / N_{pl}
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
800	-6419,8	-8,025	510,000	408000	0,123	0,489	1,040	0,129
1000	-6219,8	-6,220	114,625	114625	0,232	0,535	0,984	0,162
2000	-5219,8	-2,610	14,391	28782	0,464	0,672	0,863	0,323
3000	-4219,8	-1,407	7,336	22008	0,530	0,722	0,826	0,485
4000	-3219,8	-0,805	3,961	15844	0,625	0,799	0,770	0,646
4587	-2632,7	-0,574	2,938	13477	0,678	0,847	0,741	0,741
5000	-2219,8	-0,444	2,453	12265	0,710	0,877	0,718	0,808
6190	-1029,8	-0,166	1,633	10108	0,783	0,949	0,673	1,000
7000	-219,8	-0,031	1,322	9254	0,818	0,986	0,651	1,131
8000	780,2	0,098	1,066	8528	0,852	1,023	0,630	1,292
9000	1780,2	0,198	0,893	8037	0,878	1,051	0,614	1,454
10129	2909,2	0,287	0,754	7637	0,900	1,077	0,600	1,636
12500	5280,2	0,422	0,567	7088	0,935	1,117	0,579	2,019
15000	7780,2	0,519	0,449	6735	0,959	1,145	0,564	2,423
20000	12780,2	0,639	0,317	6340	0,988	1,181	0,547	3,231
30000	22780,2	0,759	0,199	5970	1,018	1,219	0,529	4,846
40000	32780,2	0,820	0,146	5840	1,030	1,233	0,523	6,462
50000	42780,2	0,856	0,115	5750	1,038	1,243	0,518	8,077
100000	92780,2	0,928	0,055	5500	1,061	1,274	0,505	16,154
		N_{ii} / N_{re}		$N_{cr,min}$	λ_{max}		χ_{min}	
		[/]		[kN]	[/]		[/]	
		1,000		5375	1,073		0,499	

Tabelle B.71 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 4

Die unterste Zeile der Tabelle B.71 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{cr,min}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.437) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{II}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,741 \cdot 6190,3 = 4587,0 \text{ kN}$$

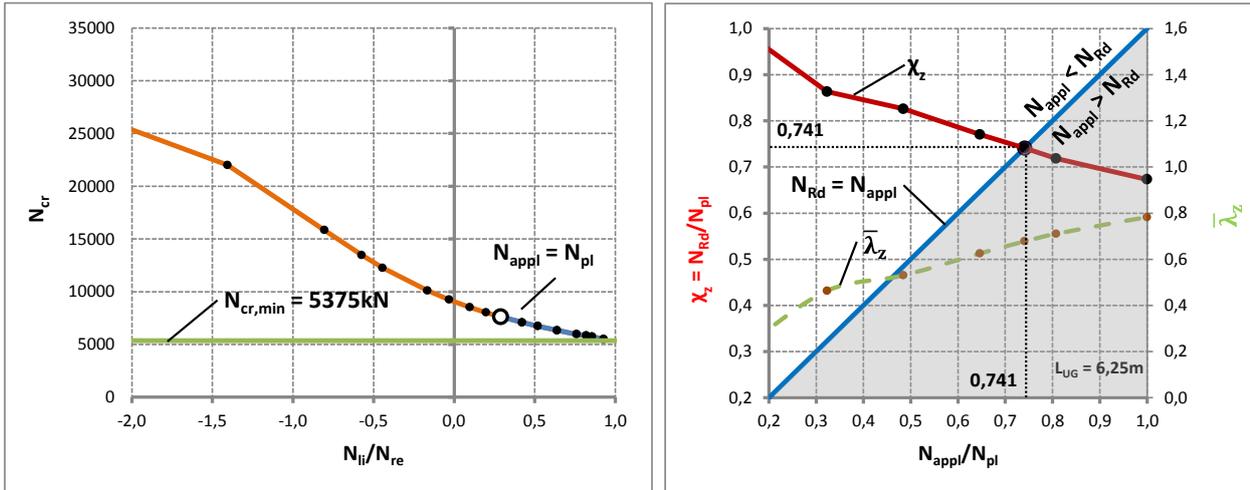


Abbildung B.437 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{II}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 4

B - 9.6 Gruppe 5

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 5 zu charakterisieren sind in Tabelle B.72 zusammengefasst.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge $L^* =$	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,935
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	102,2cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	4085mm
$t_{Knotenblech} =$	30mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge $L_{UG} =$	6250mm

Tabelle B.72 – FE-Eingangsdaten Gruppe 5

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEB 200, ohne Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEB 200:} \quad & h = 20 \text{ cm} \\
 & b = 20 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,5 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,9 \text{ cm} \\
 \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 75,3 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 2673,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2. Grades I_z :

$$I_z = 2001,0 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 6,25 \text{ m} = 625 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 1062 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.7:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 2899,4 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 45,23^\circ \\
 N_H &= 4083,9 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 5 mit $N_{\text{appl}} = 2000 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{\text{appl}} = 2000 \text{ kN}$:

$$N_{re} = N_{\text{appl}} = -2000 \text{ kN}$$

$$N_{ii} = -2000 + 4083,9 = 2083,9 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 1,314 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 2628 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 1,009$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

$$\text{Knicklinie c: } \alpha = 0,49$$

$$\phi_z = 1,207$$

$$\chi_z = 0,535 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.73 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{appl}/N_{pl} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{re} =$ N_{appl}	$N_{li} =$ $N_{appl} - N_H$	N_{li} / N_{re}	α_{cr}	$N_{cr} =$ $\alpha_{cr} \cdot N_{appl}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	N_{appl} / N_{pl}
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
200	-3883,9	-19,419	118,625	23725	0,336	0,590	0,931	0,075
400	-3683,9	-9,210	57,000	22800	0,342	0,594	0,927	0,150
800	-3283,9	-4,105	7,328	5862	0,675	0,844	0,740	0,299
900	-3183,9	-3,538	5,719	5147	0,721	0,887	0,712	0,337
1200	-2883,9	-2,403	3,879	4655	0,758	0,924	0,689	0,449
1400	-2683,9	-1,917	2,867	4014	0,816	0,984	0,652	0,524
1500	-2583,9	-1,723	2,477	3716	0,848	1,019	0,632	0,561
1600	-2483,9	-1,552	2,148	3437	0,882	1,056	0,611	0,599
1623	-2461,3	-1,517	2,082	3378	0,890	1,065	0,607	0,607
1800	-2283,9	-1,269	1,652	2974	0,948	1,133	0,571	0,673
2000	-2083,9	-1,042	1,314	2628	1,009	1,207	0,535	0,748
2200	-1883,9	-0,856	1,080	2376	1,061	1,273	0,506	0,823
2673	-1410,9	-0,528	0,747	1997	1,157	1,404	0,455	1,000
3000	-1083,9	-0,361	0,612	1836	1,207	1,475	0,431	1,122
4000	-83,9	-0,021	0,392	1568	1,306	1,623	0,386	1,496
5000	916,1	0,183	0,287	1435	1,365	1,717	0,363	1,870
10000	5916,1	0,592	0,122	1220	1,480	1,909	0,321	3,741
20000	15916,1	0,796	0,057	1140	1,531	1,999	0,305	7,482
30000	25916,1	0,864	0,037	1110	1,552	2,035	0,298	11,223
40000	35916,1	0,898	0,027	1080	1,573	2,074	0,292	14,964
		N_{li} / N_{re}		$N_{cr,min}$	λ_{max}		χ_{min}	
		[/]		[kN]	[/]		[/]	
		1,000		1062	1,587		0,288	

Tabelle B.73 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 5

Die unterste Zeile der Tabelle B.73 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{cr,min}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.438) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,607 \cdot 2673,2 = 1622,6 \text{ kN}$$

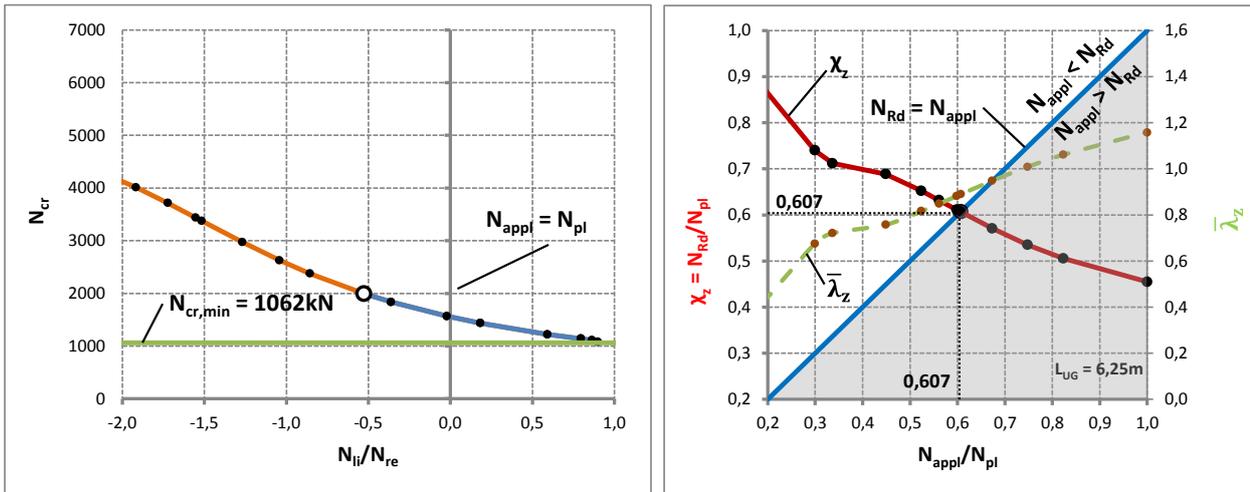


Abbildung B.438 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 5

B - 9.6.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde je einerseits die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab und andererseits die erste Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt (siehe Kapitel B - 2.2). Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die beiden untersuchten Fälle gezeigt.

- **Im Untergurtstab – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L_{UG}/750 = 6250\text{mm}/750 = 8,3\text{mm}$. Abbildung B.439 zeigt die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 5.

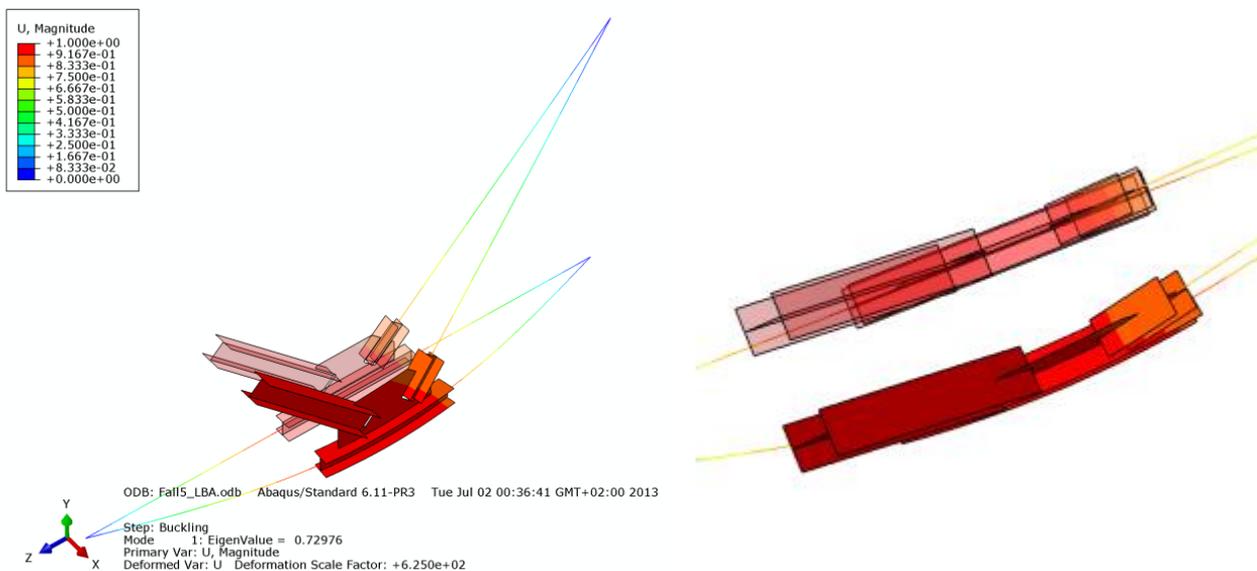


Abbildung B.439 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

- **In der Druckdiagonale – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale**

Die erste Eigenform des Knotens zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale ist im Kapitel B - 4.6.1 in der Abbildung B.103 gezeigt.

B - 9.6.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$

B - 9.6.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl}

In den nachfolgenden Bildern B.440 bis B.443 wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt aufgrund Plastizierens des Untergurtstabes mit großen Verformungen zufolge des damit verbundenen Steifigkeitsverlustes.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

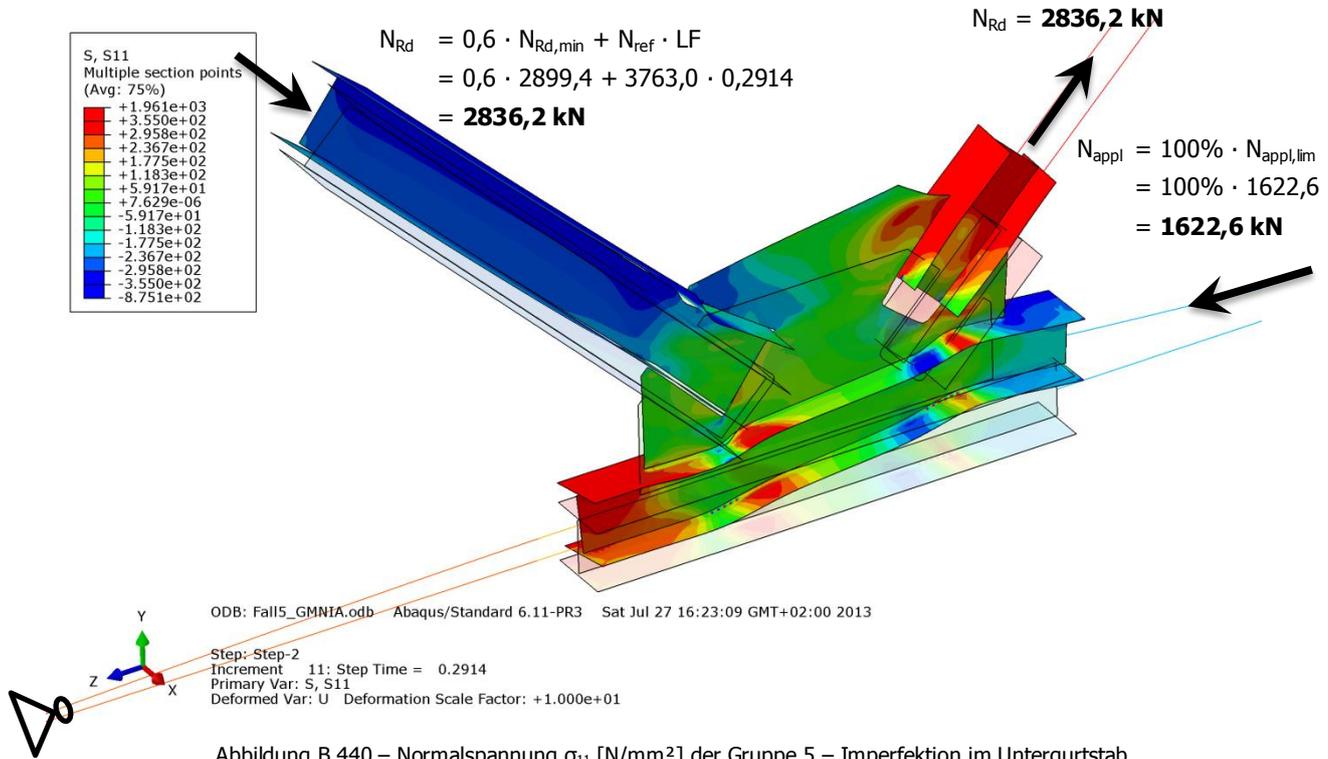


Abbildung B.440 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

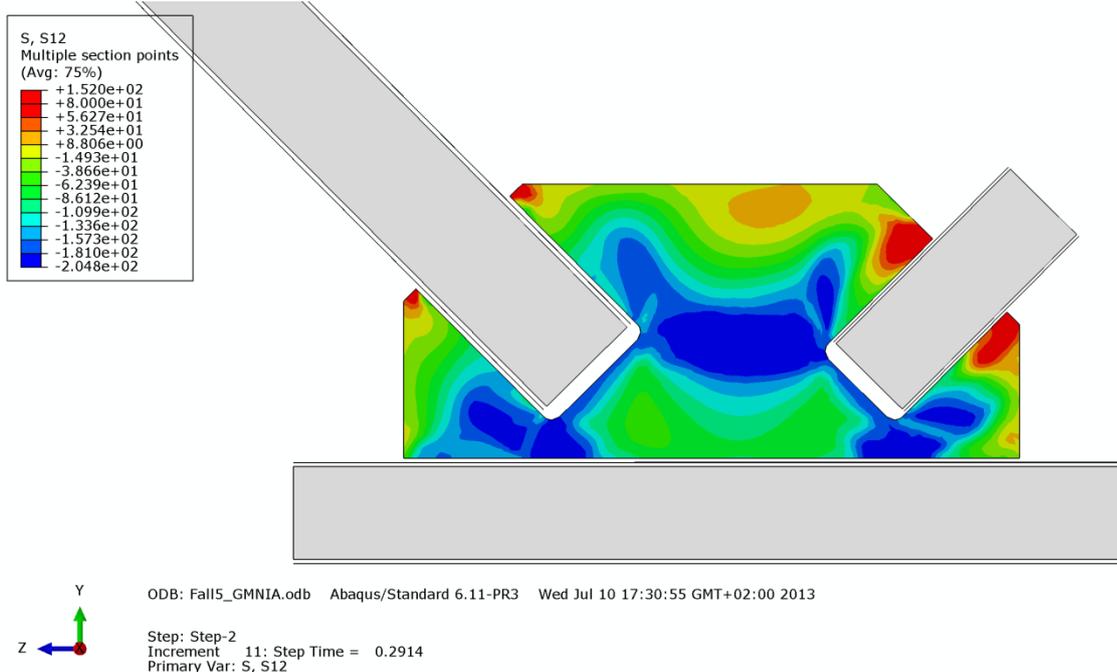


Abbildung B.441 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

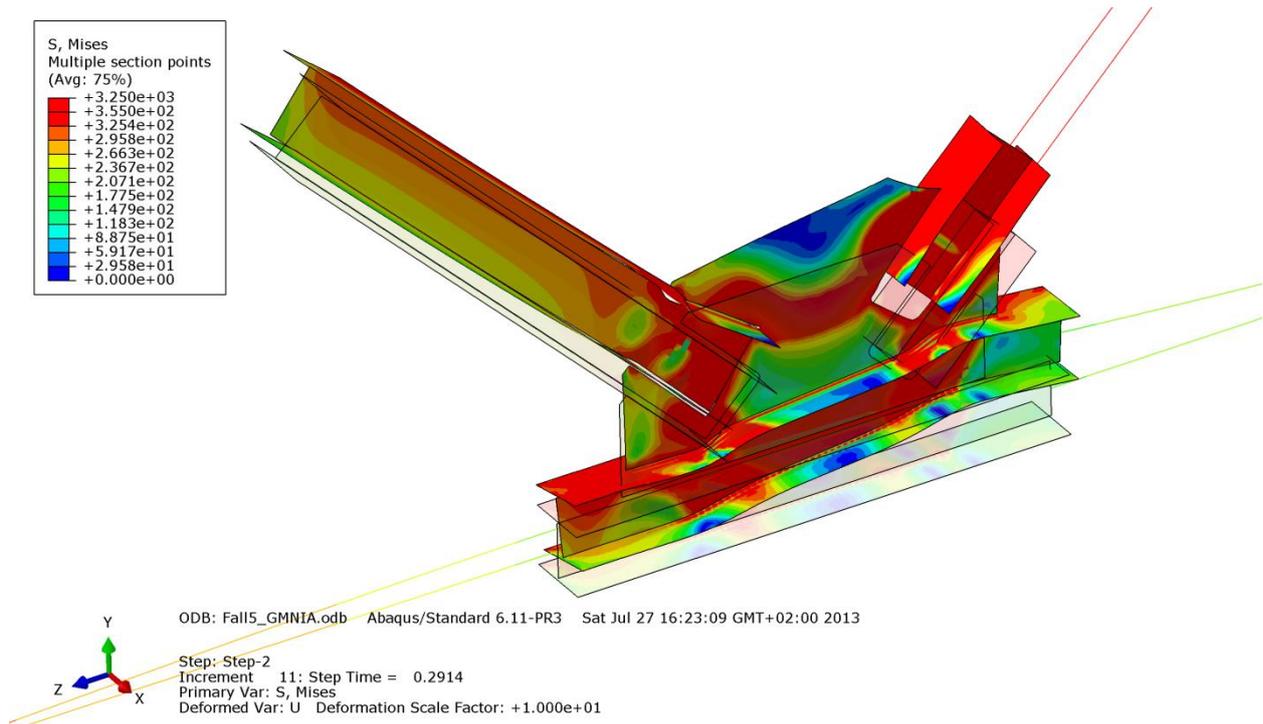


Abbildung B.442 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

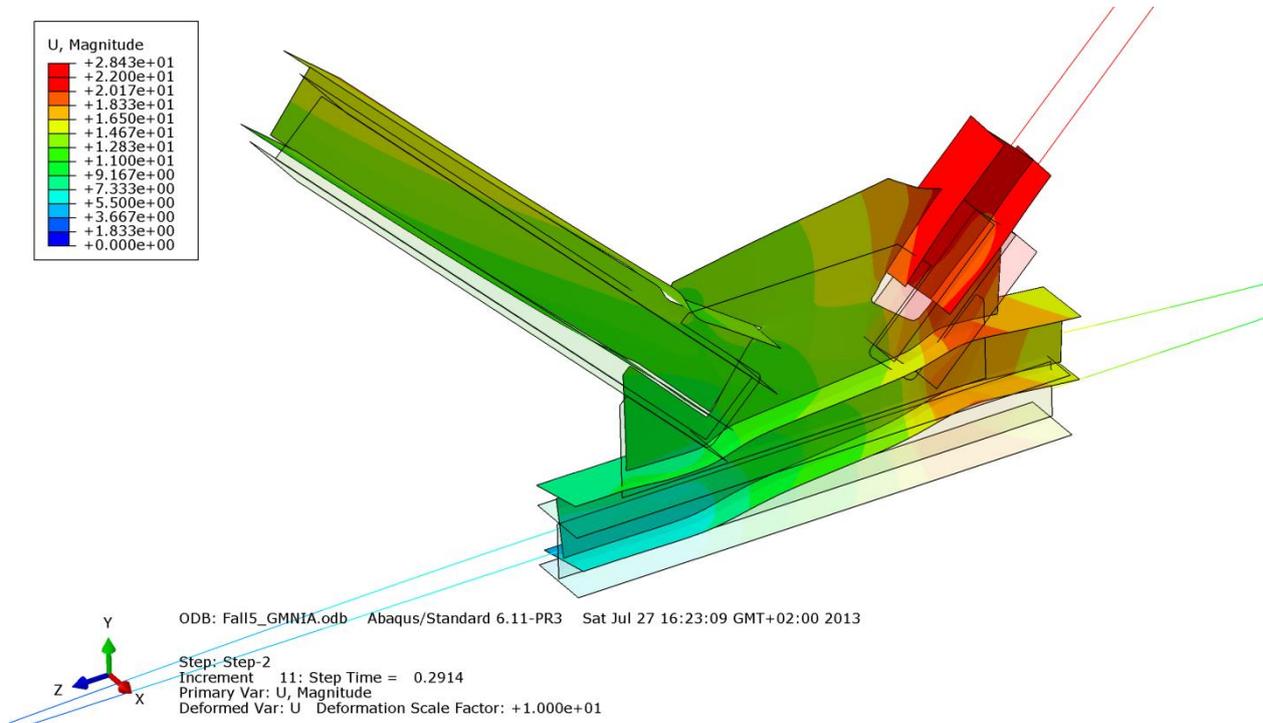
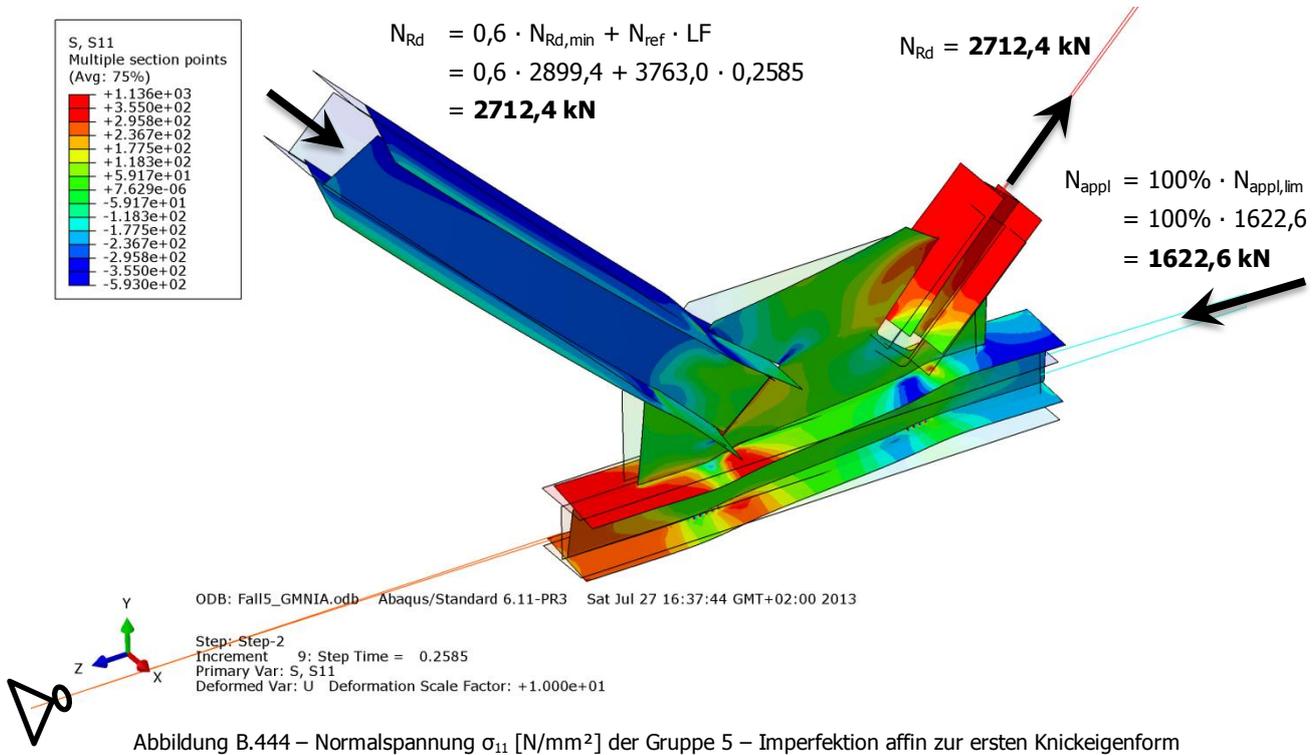


Abbildung B.443 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

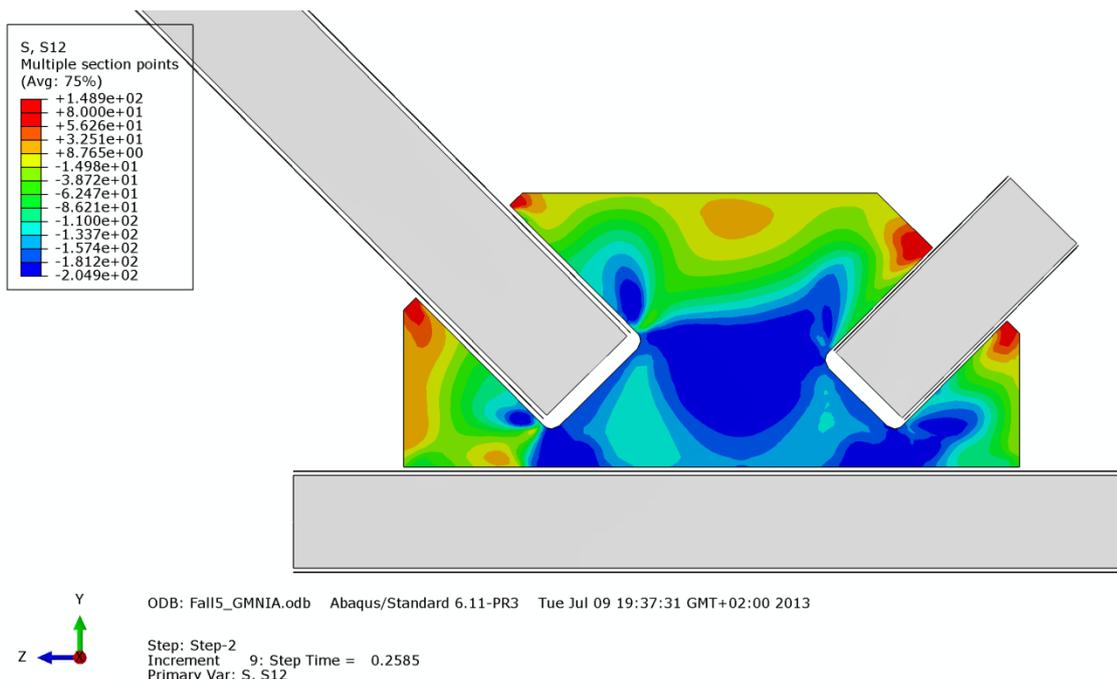
B - 9.6.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref}

In den nachfolgenden Bildern wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt in der Linie aufgrund des merklichen Ausknickens der Druckstrebe, wie die Abbildungen B.444 bis B.447 zeigen. Außerdem tritt ein Versagen im durchplastizierten Untergurt ein. Auch das Knotenblech knickt zufolge der Belastung aus.

• **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**



• **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**



• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

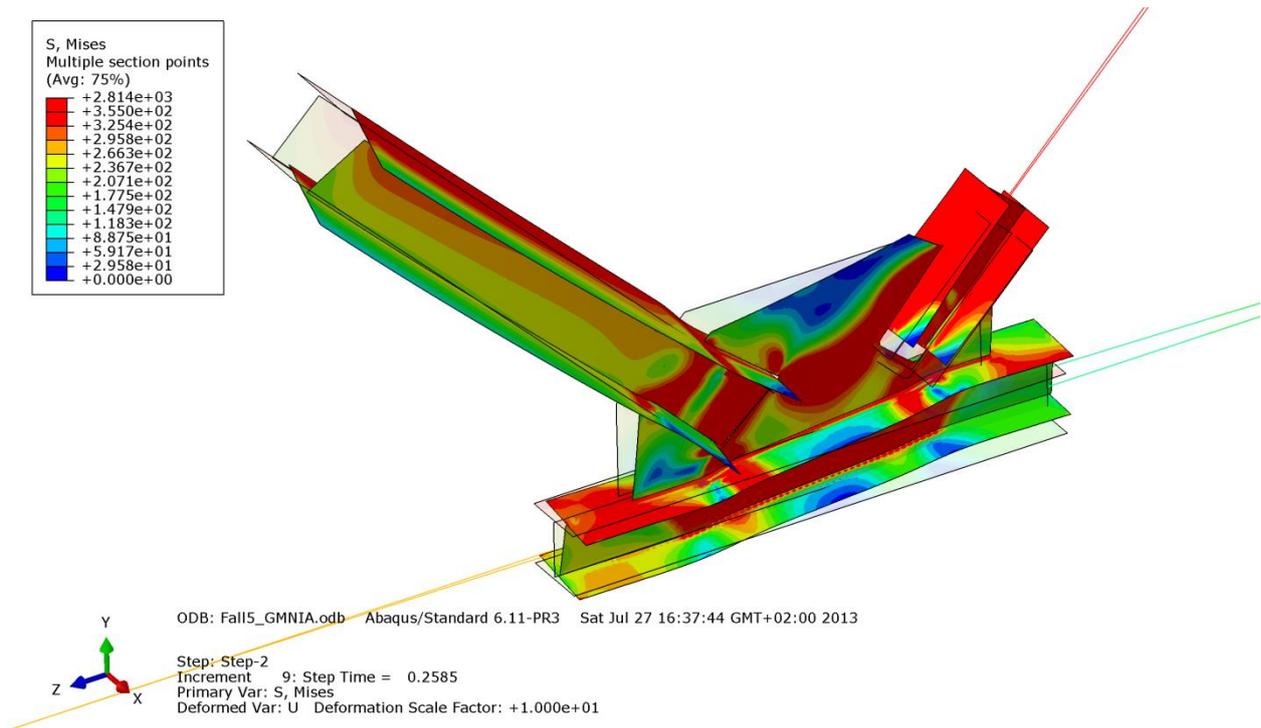


Abbildung B.446 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

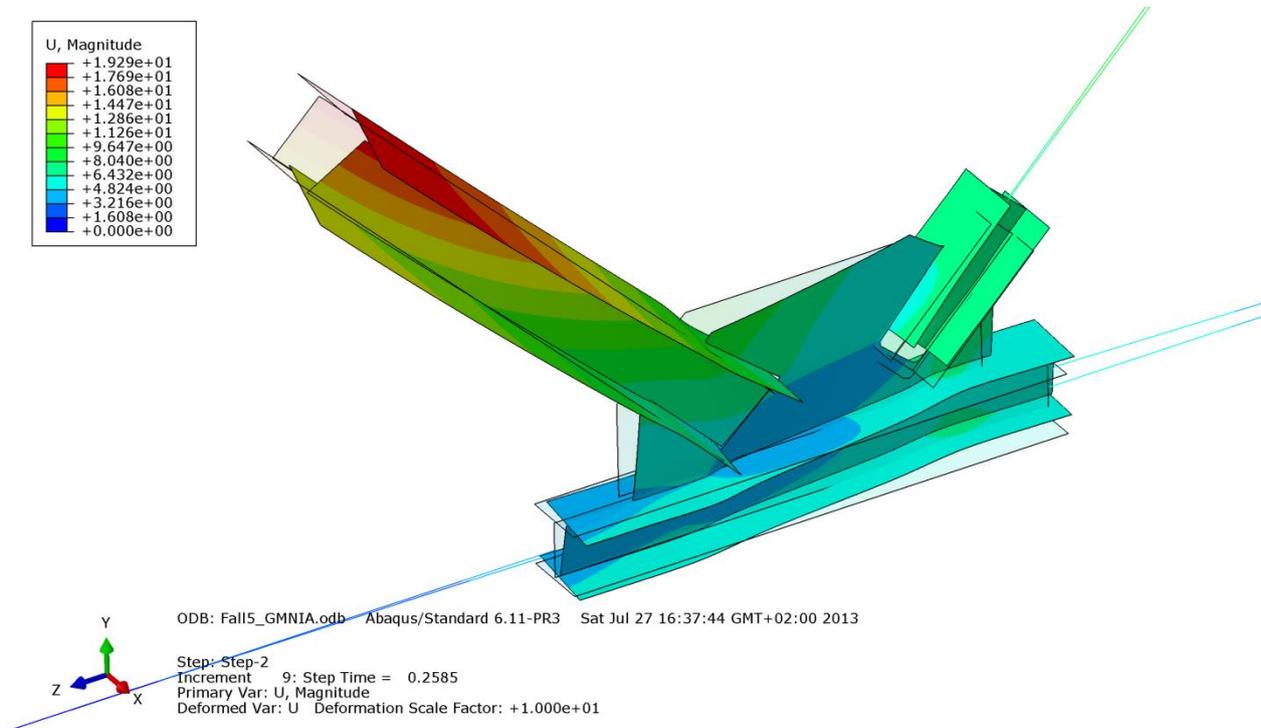


Abbildung B.447 – Verformung U [mm] der Gruppe 5 – Imperfektion im Untergurtstab

B - 9.6.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt

Die Tabelle B.74 zeigt für die beiden Imperfektionsarten (einerseits in der Druckdiagonale und andererseits im Untergurtstab) die Traglastergebnisse des Fachwerkknotens der Gruppe 5 mit einer pro Rechnung wertmäßig ansteigenden externen Untergurtkraft N_{appl} in Kombination mit den bis zur Traglastgrenze zu steigernden Diagonalkräften N_{ref} .

Ausgewertet wurden die folgenden ansteigenden Laststufen für die Untergurtkraft N_{appl} :

- 0% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Material der Zugstrebe bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch modelliert
- 25% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 50% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 75% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 100% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 120% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 130% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 135% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 145% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch (nur möglich für den Fall mit Imperfektion in den Diagonalen, beim Fall mit Imperfektion im Untergurt ist das Tragfähigkeitslimit bei 135% $N_{\text{appl,lim}}$ erreicht)

Eine höhere Belastung als 145% $N_{\text{appl,lim}}$ war auch für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale nicht mehr möglich. Ab der Grenze mit 100% $N_{\text{appl,lim}}$ wurde die maximale Traglast mit der in Abschnitt B - 9.1 erläuterten modifizierten Lastaufbringungsmethode (Variante 2) berechnet. Eine Steigerung über den theoretisch maximalen Wert von $N_{\text{appl,lim}}$ war möglich, da bei der Systemrechnung eine gewisse Stützung aus der Fachwerkebene durch die Diagonalen bzw. das Knotenblech erfolgt. Diese stabilisierenden Effekte wurden bei der Ermittlung von $N_{\text{appl,lim}}$ nicht berücksichtigt.

Gruppe 5			
Profil der Druckstrebe:	HEB 240	Systemlänge L^* =	4423mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{Z,0,L^*}$ =	0,935
Fläche des idealisierten	102,2cm ²	L_{ges} =	4085mm
Profils der FE-Rechnung		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	30mm	$\bar{\lambda}_{Z,0,L_{ges}}$ =	0,864
Profil der Zugstrebe:	HEA 200		
Profil des Untergurtes:	HEB 200	Untergurtlänge L_{UG} =	6250mm

$N_{appl,lim}$ =	0,607	· $N_{pl,UG}$
$N_{pl,UG}$ =	2673,2	kN
$N_{appl,lim}$ =	1622,6	kN

Imperfektion:	
in den Diagonalen ($L^*/750 = 5,9\text{mm}$) (erste Knickeigenform)	im Untergurt ($L_{UG}/750 = 8,3\text{mm}$) (erste Knickeigenform)
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)
1897,3 kN	1863,8 kN
Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0\text{kN}$ (0% $N_{appl,lim}$)
2899,4 kN	3109,0 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 406\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 406\text{kN}$ (25% $N_{appl,lim}$)
2184,8 kN	2136,6 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 811\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 811\text{kN}$ (50% $N_{appl,lim}$)
2472,3 kN	2471,5 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1217\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1217\text{kN}$ (75% $N_{appl,lim}$)
2721,0 kN	2757,2 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1623\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1623\text{kN}$ (100% $N_{appl,lim}$)
2712,4 kN	2836,2 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1947\text{kN}$ (120% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1947\text{kN}$ (120% $N_{appl,lim}$)
2701,1 kN	2840,3 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2109\text{kN}$ (130% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2109\text{kN}$ (130% $N_{appl,lim}$)
2681,5 kN	2831,3 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2191\text{kN}$ (135% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2191\text{kN}$ (135% $N_{appl,lim}$)
2661,9 kN	2816,2 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2353\text{kN}$ (145% $N_{appl,lim}$)	
2474,5 kN	

N_{pl} - Druckstrebe =	3628,1 kN
N_{pl} - Zugstrebe =	1812,3 kN
N_{ult} =	2899,4 kN
N_{ref} =	3763,0 kN
<small>(N_{ref} ... plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>	

Tabelle B.74 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 5

In der grafischen Gegenüberstellung in Abbildung B.448 der Tragfähigkeiten (oben) ist klar erkennbar, wie sich die maximale Traglast des Knotens durch die schrittweise gesteigerte Untergurtkraft N_{appl} gegenüber der Traglast der Berechnung mit $N_{\text{appl}} = 0\text{kN}$ erhöht (mit Zugstrebe rein elastisch modelliert):

- für den Fall mit Imperfektion in den Diagonalen von 1897kN auf maximal 2721kN bei 75% $N_{\text{appl,lim}}$
- für den Fall mit Imperfektion im Untergurtstab von 1864kN auf maximal 2840kN bei 120% $N_{\text{appl,lim}}$

Wie unter Abschnitt B - 9.2.3 erläutert, ist dieser Traglasterhöhungseffekt durch die Kompensation der hohen Zugkraft aufgrund der externen Druckkraft N_{appl} zu erklären. Zurückzuführen auf plastizierende Zonen im Untergurt kann jedoch bei keiner Laststufe für N_{appl} jene Traglast, die bei der Berechnung mit einer rein elastischen Werkstoffmodellierung des Untergurtes die obere Grenze bildet (2899kN für Imperfektion in der Druckdiagonale bzw. 3109kN für Imperfektion im Untergurtstab je mit $N_{\text{appl}} = 0\text{kN}$), erreicht werden.

Bis zur theoretischen Grenze von $N_{\text{appl,lim}}$ ist kein Abfall der Tragfähigkeit erkennbar. Erst bei großen Untergurtkräften N_{appl} ist ein Abfall der Tragfähigkeit zu erkennen (am deutlichsten im Diagramm in Abbildung B.448 oben für 145% $N_{\text{appl,lim}}$ beim Fall mit der Imperfektion in der Druckdiagonale).

Zusätzlich zu den Traglasten N_{Rd} werden die zugehörigen Kräfte N_{ij} in der Zugseite des Untergurtes in einem eigenen Diagramm (Abbildung B.448 unten) abgebildet. Es stellt sich heraus, dass die Normalkräfte N_{ij} der Laststufen von 25% bis 75% $N_{\text{appl,lim}}$ nahezu der plastischen Normalkraft des Untergurtes entsprechen. Das heißt, dass hier ein Versagen in Form von Plastizieren durch N_{ij} im gezogenen (linken) Bereich des Untergurtstabes auftritt. Vor allem an diesen drei Balken sieht man, wie N_{Rd} mit N_{appl} zunimmt.

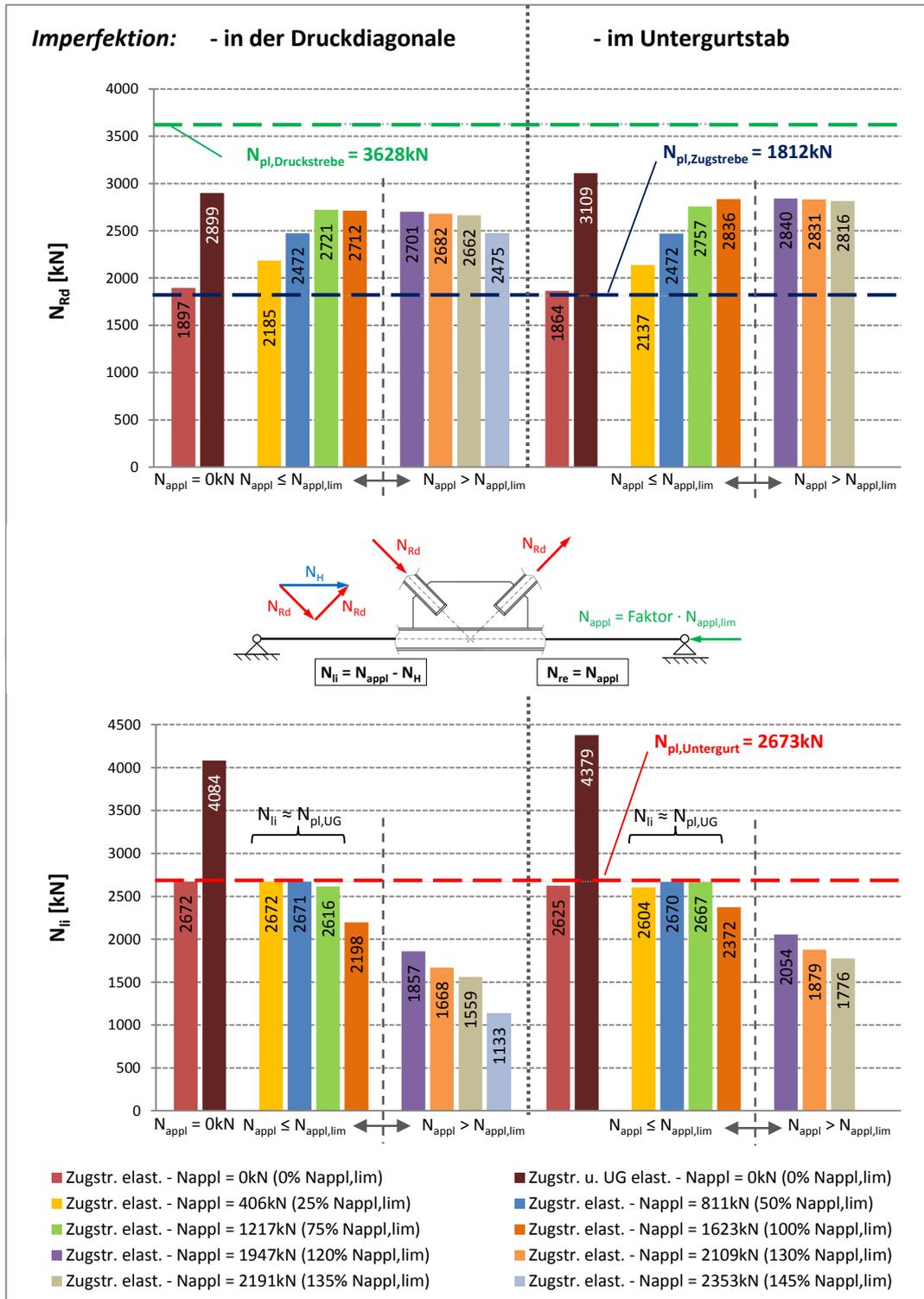


Abbildung B.448 – oben: Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt und unten: Die Zugkraft N_{li} im Untergurt links des Knotens in Abhängigkeit der aufgebracht Kraft N_{appl} – Gruppe 5

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben oben bzw. des Untergurtes unten eingetragen.

B - 9.7 Gruppe 6a

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6a zu charakterisieren sind in Tabelle B.75 zusammengefasst.

Gruppe 6a			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	4618mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	1,073
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{res} = (OK Untergurt - UK Obergurt)	4208mm
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	1,0
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	6530mm

Tabelle B.75 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6a

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 300, ohne Abrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 300:} \quad & h = 29 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 106,3 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 3772,6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2.Grades I_z :

$$I_z = 6301,3 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 6,53 \text{ m} = 653 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 3063 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.8:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 2899,4 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 45,00^\circ \\
 N_H &= 2512,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 6a mit $N_{appl} = 2000\text{kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{appl} = 2000\text{kN}$:

$$N_{re} = N_{appl} = -2000 \text{ kN}$$

$$N_{li} = -2000 + 2512,5 = 512,5 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 3,570 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 7140 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 0,727$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,893$$

$$\chi_z = 0,708 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.76 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{\text{appl}}/N_{\text{pl}} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{\text{appl}}/N_{\text{pl}} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{\text{re}} =$ N_{appl}	$N_{\text{li}} =$ $N_{\text{appl}} - N_{\text{H}}$	$N_{\text{li}} / N_{\text{re}}$	α_{cr}	$N_{\text{cr}} =$ $\alpha_{\text{cr}} \cdot N_{\text{appl}}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	$N_{\text{appl}} / N_{\text{pl}}$
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
300	-2212,5	-7,375	68,848	20654	0,427	0,647	0,883	0,080
400	-2112,5	-5,281	49,530	19812	0,436	0,653	0,878	0,106
500	-2012,5	-4,025	38,001	19001	0,446	0,659	0,873	0,133
700	-1812,5	-2,589	24,827	17379	0,466	0,674	0,862	0,186
850	-1662,5	-1,956	18,940	16099	0,484	0,687	0,852	0,225
1000	-1512,5	-1,513	14,729	14729	0,506	0,703	0,840	0,265
1250	-1262,5	-1,010	9,833	12291	0,554	0,740	0,812	0,331
1500	-1012,5	-0,675	6,678	10017	0,614	0,790	0,777	0,398
1750	-762,5	-0,436	4,744	8302	0,674	0,843	0,741	0,464
2000	-512,5	-0,256	3,570	7140	0,727	0,893	0,708	0,530
2490	-22,6	-0,009	2,325	5789	0,807	0,975	0,660	0,660
2500	-12,5	-0,005	2,323	5808	0,806	0,973	0,658	0,663
3000	487,5	0,162	1,702	5106	0,860	1,031	0,625	0,795
3773	1260,5	0,334	1,198	4520	0,914	1,092	0,592	1,000
5000	2487,5	0,497	0,812	4060	0,964	1,152	0,561	1,325
6000	3487,5	0,581	0,643	3858	0,989	1,182	0,546	1,590
10000	7487,5	0,749	0,350	3500	1,038	1,244	0,518	2,651
20000	17487,5	0,874	0,163	3260	1,076	1,293	0,497	5,301
35000	32487,5	0,928	0,091	3185	1,088	1,310	0,490	9,277
50000	47487,5	0,950	0,063	3150	1,094	1,318	0,487	13,254
		$N_{\text{li}} / N_{\text{re}}$		$N_{\text{cr,min}}$	λ_{max}		χ_{min}	
		[/]		[kN]	[/]		[/]	
		1,000		3063	1,110		0,479	

Tabelle B.76 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 6a

Die unterste Zeile der Tabelle B.76 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{\text{cr,min}}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.449) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,660 \cdot 3772,6 = 2489,9 \text{ kN}$$

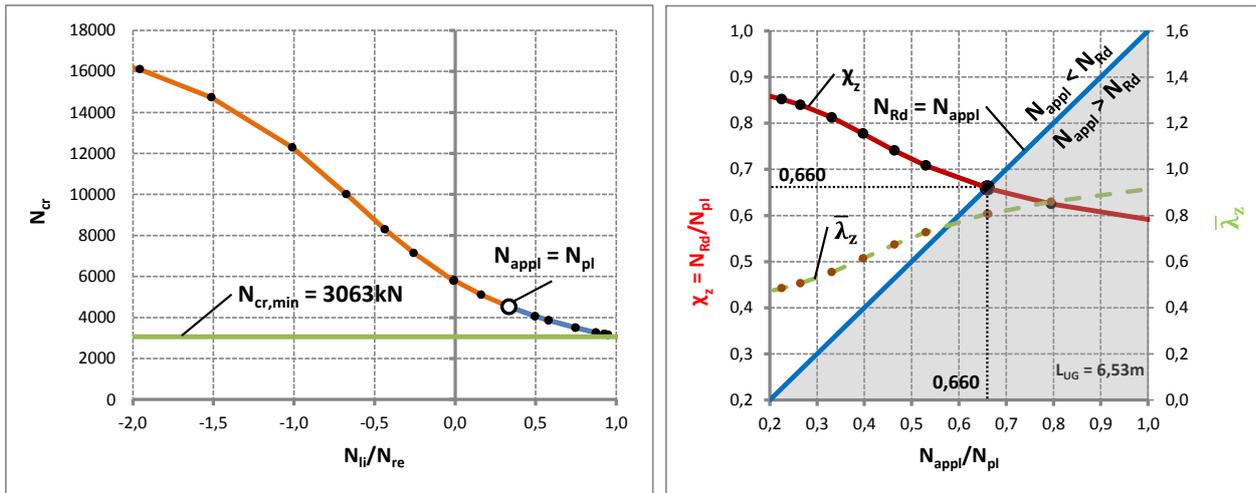


Abbildung B.449 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 6a

B - 9.8 Gruppe 6b

Die wichtigsten Daten um den Fachwerkknoten der Gruppe 6b zu charakterisieren sind in Tabelle B.77 zusammengefasst.

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge L^* =	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*}$ =	0,781
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	L_{res} =	2945mm
		(OK Untergurt - UK Obergurt)	
$t_{Knotenblech}$ =	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}}$ =	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge L_{UG} =	4750mm

Tabelle B.77 – FE-Eingangsdaten Gruppe 6b

Ermittlung der Querschnittswerte des Untergurtstabes:

Berechnungsgrundlage bildet ein Untergurtprofil HEA 300, ohne Abrundungsradien zwischen Flansch und Steg, Material S355:

$$\begin{aligned}
 \text{HEA 300:} \quad & h = 29 \text{ cm} \\
 & b = 30 \text{ cm} \\
 & t_f = 1,4 \text{ cm} \\
 & t_w = 0,85 \text{ cm} \\
 \text{S355:} \quad & f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2 \\
 & E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sind nur die Ergebnisse und Zwischenergebnisse angeführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Abschnitt B - 9.2 angeführt.

Bestimmung der plastischen Normalkraft N_{pl} :

$$\begin{aligned}
 A &= 106,3 \text{ cm}^2 \\
 N_{pl,UG} &= 3772,6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes 2.Grades I_z :

$$I_z = 6301,3 \text{ cm}^4$$

Bestimmung der minimalen kritischen Knicklast $N_{cr,min}$:

$$\begin{aligned}
 L_{UG} &= 4,75 \text{ m} = 475 \text{ cm} \\
 N_{cr,min} &= 5788 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Bestimmung der horizontalen Knotenresultierenden N_H :

Es folgt aus Abschnitt B - 5.9:

$$\begin{aligned}
 N_{ult} &= 2028,9 \text{ kN} \text{ (maßgebend Fall Imperfektion affin zur 1. Knickeigenform)} \\
 \alpha &= 45,00^\circ \\
 N_H &= 2869,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ist es nun möglich, für verschieden große Kräfte N_{appl} zugehörige Abminderungsbeiwerte χ_z für Untergurtnicken um die schwache z-Achse zu ermitteln.

Anhand des Knotens der Gruppe 6b mit $N_{\text{appl}} = 12000 \text{ kN}$ ist der Vorgang zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_z im Anschluss gezeigt.

Beispiel Abminderungsfaktor χ_z für $N_{\text{appl}} = 12000 \text{ kN}$:

$$N_{re} = N_{\text{appl}} = -12000 \text{ kN}$$

$$N_{li} = -12000 + 2869,2 = -9130,2 \text{ kN}$$

Ermittlung des Eigenwertes:

$$\alpha_{cr} = 0,549 \text{ (ermittelt mit dem Programm Ruckzuck [13])}$$

Ermittlung der idealen Verzweigungslast:

$$N_{cr} = 5788 \text{ kN}$$

Ermittlung der Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_z = 0,757$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z :

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,923$$

$$\chi_z = 0,689 \leq 1,0$$

Die gezeigte Prozedur wurde für verschiedene N_{appl} durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle B.78 dargestellt.

Zur besseren Übersicht wurde unter der Zeile mit den Werten für das Verhältnis $N_{appl}/N_{pl} = 1,0$ ein stärkerer Strich gezogen. Die Zeile, in jener $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ gilt, wurde grau hinterlegt. Diese Zeile charakterisiert den Zustand der theoretisch maximal aufnehmbaren Untergurtkraft.

$N_{re} =$ N_{appl}	$N_{li} =$ $N_{appl} - N_H$	N_{li} / N_{re}	α_{cr}	$N_{cr} =$ $\alpha_{cr} \cdot N_{appl}$	$\bar{\lambda}_z$	Φ_z	χ_z	N_{appl} / N_{pl}
[kN]	[kN]	[/]	[/]	[kN]	[/]	[/]	[/]	[/]
500	-2369,2	-4,738	245,750	122875	0,175	0,509	1,013	0,133
1000	-1869,2	-1,869	30,031	30031	0,354	0,601	0,921	0,265
1500	-1369,2	-0,913	14,700	22050	0,414	0,638	0,890	0,398
1625	-1244,2	-0,766	12,396	20144	0,433	0,651	0,880	0,431
1750	-1119,2	-0,640	10,527	18422	0,453	0,664	0,869	0,464
2000	-869,2	-0,435	7,844	15688	0,490	0,691	0,848	0,530
2973	103,6	0,035	3,577	10634	0,596	0,774	0,788	0,788
3000	130,8	0,044	3,523	10569	0,597	0,776	0,787	0,795
3773	903,8	0,240	2,420	9131	0,643	0,815	0,760	1,000
5000	2130,8	0,426	1,609	8045	0,685	0,853	0,734	1,325
6000	3130,8	0,522	1,262	7572	0,706	0,873	0,721	1,590
8000	5130,8	0,641	0,880	7040	0,732	0,898	0,705	2,121
12000	9130,8	0,761	0,549	6588	0,757	0,923	0,689	3,181
15000	12130,8	0,809	0,427	6405	0,767	0,934	0,683	3,976
20000	17130,8	0,857	0,313	6260	0,776	0,943	0,677	5,301
30000	27130,8	0,904	0,203	6090	0,787	0,954	0,670	7,952
50000	47130,8	0,943	0,119	5950	0,796	0,963	0,664	13,254
80000	77130,8	0,964	0,074	5920	0,798	0,965	0,663	21,206
120000	117130,8	0,976	0,049	5880	0,801	0,968	0,662	31,808
1000000	997130,8	0,997	0,006	6000	0,793	0,960	0,667	265,070

N_{li} / N_{re}	$N_{cr,min}$	λ_{max}	χ_{min}
[/]	[kN]	[/]	[/]
1,000	5788	0,807	0,658

Tabelle B.78 – Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_z – Gruppe 6b

Die unterste Zeile der Tabelle B.78 spiegelt den ideal-kritischen Zustand mit der Verzweigungslast $N_{cr,min}$ wider und beschreibt dementsprechend die größte theoretisch auftretende Untergurtschlankheit λ_{max} und den kleinsten Abminderungsbeiwert χ_{min} .

Aus den gewonnenen Daten wurden zwei Diagramme (Abbildung B.450) erstellt. Im Diagramm links ist die kritische Verzweigungslast N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} aufgetragen, sowie die minimale ideal-kritische Verzweigungslast $N_{cr,min}$ aufgetragen.

Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe des Abminderungsbeiwertes χ_z und der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$ im Verhältnis der Kräfte N_{appl}/N_{pl} . Die Gerade $N_{Rd} = N_{appl}$ teilt das Diagramm in die zwei Bereiche $N_{appl} < N_{Rd}$ und $N_{appl} > N_{Rd}$. Der Schnittpunkt der Gerade mit dem χ_z -Verlauf stellt den Punkt $N_{appl}/N_{pl} = \chi_z$ dar, in welchem $N_{appl,lim} = \chi_z \cdot N_{pl}$ gilt.

$$N_{appl,lim} = \chi_{z,UG} \cdot N_{pl,UG} = 0,788 \cdot 3772,6 = 2972,8 \text{ kN}$$

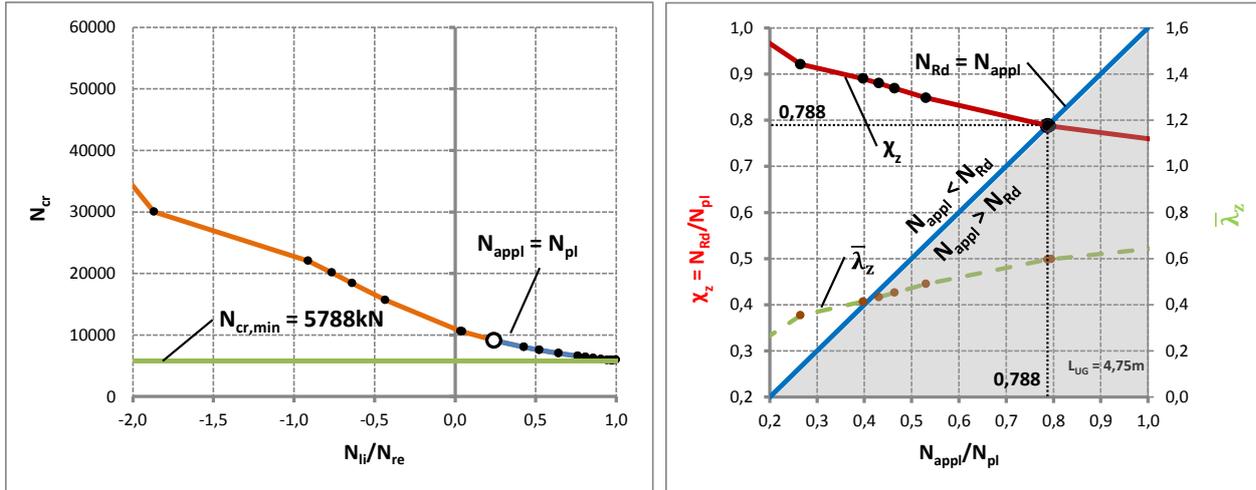


Abbildung B.450 – links: N_{cr} in Abhängigkeit von N_{ii}/N_{re} und rechts: χ_z und $\bar{\lambda}_z$ in Abhängigkeit von N_{appl}/N_{pl} – Gruppe 6b

B - 9.8.1 Imperfektionen für die FE-Rechnung

Den FE-Traglastberechnungen wurde je einerseits die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab und andererseits die erste Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonalen als geometrische Ersatzimperfektion zugrunde gelegt (siehe Kapitel B - 2.2). Die Knickeigenformen werden nachfolgend für die beiden untersuchten Fälle gezeigt.

- **Im Untergurtstab – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab**

Der Amplituden-Skalierungsfaktor der ersten Knickeigenform beträgt $L_{\text{UG}}/750 = 4750\text{mm}/750 = 6,3\text{mm}$. Abbildung B.451 zeigt die erste Knickeigenform zufolge N_{appl} im Untergurtstab des untersuchten Fachwerkknotens der Gruppe 6b.

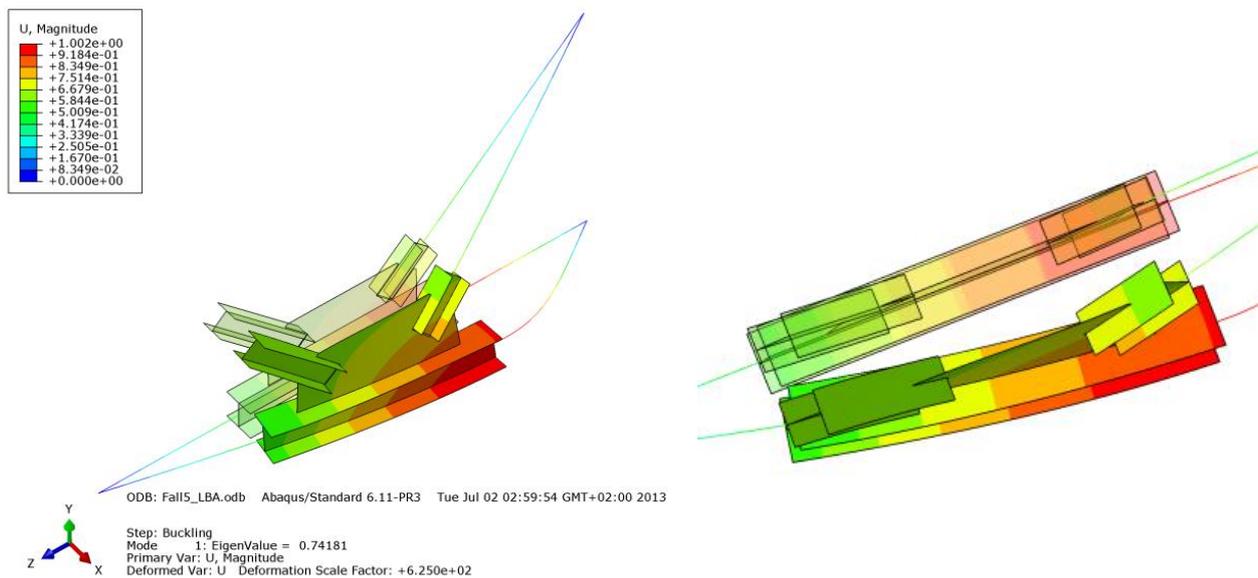


Abbildung B.451 – Zwei Ansichten der Eigenform der Gruppe 1 – Imperfektion im Untergurtstab

- **In der Druckdiagonale – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale**

Die erste Eigenform des Knotens zufolge N_{ref} in der Druckdiagonale ist im Kapitel B - 4.8.1 in der Abbildung B.137 gezeigt.

B - 9.8.2 FE-Ergebnisse im Traglastzustand – $N_{appl} = 100\% N_{appl,lim}$

B - 9.8.2.1 Imperfektion im Untergurtstab – erste Knickeigenform zufolge N_{appl}

In den nachfolgenden Bildern wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt durch Ausknicken der Druckstrebe, wie in den Abbildungen B.452 bis B.455 zu erkennen ist.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

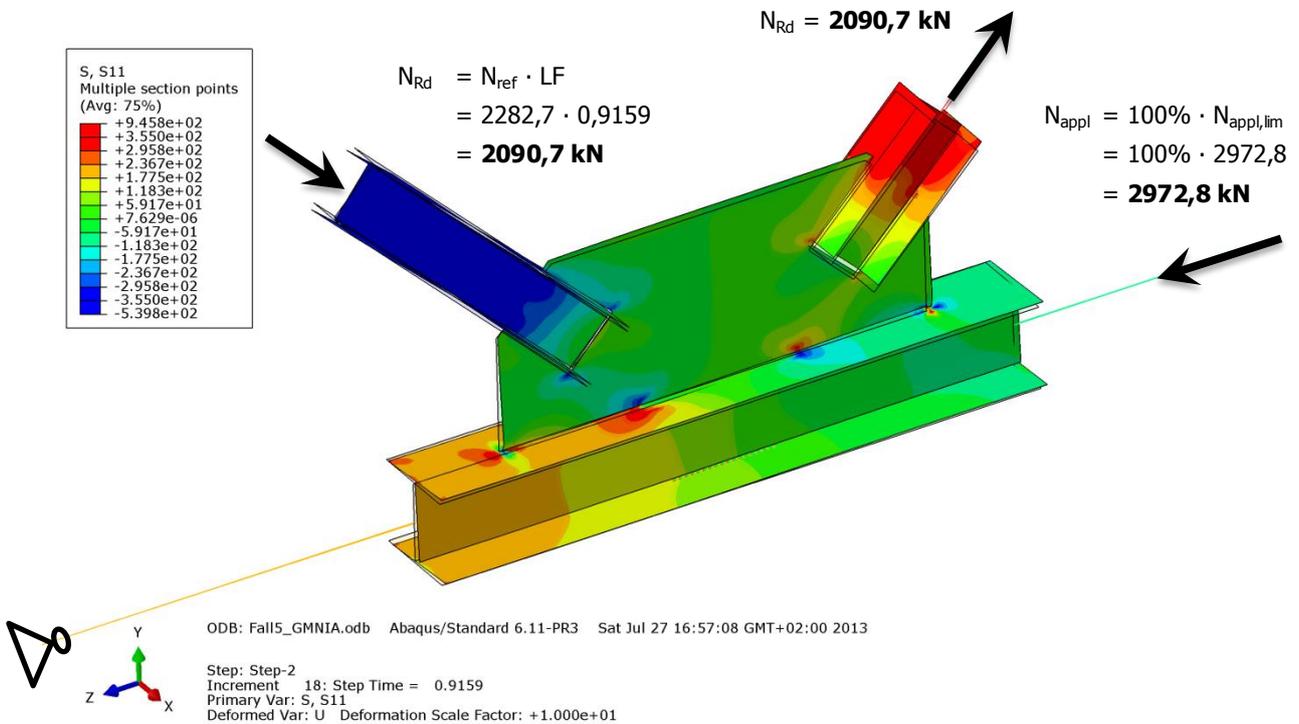


Abbildung B.452 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

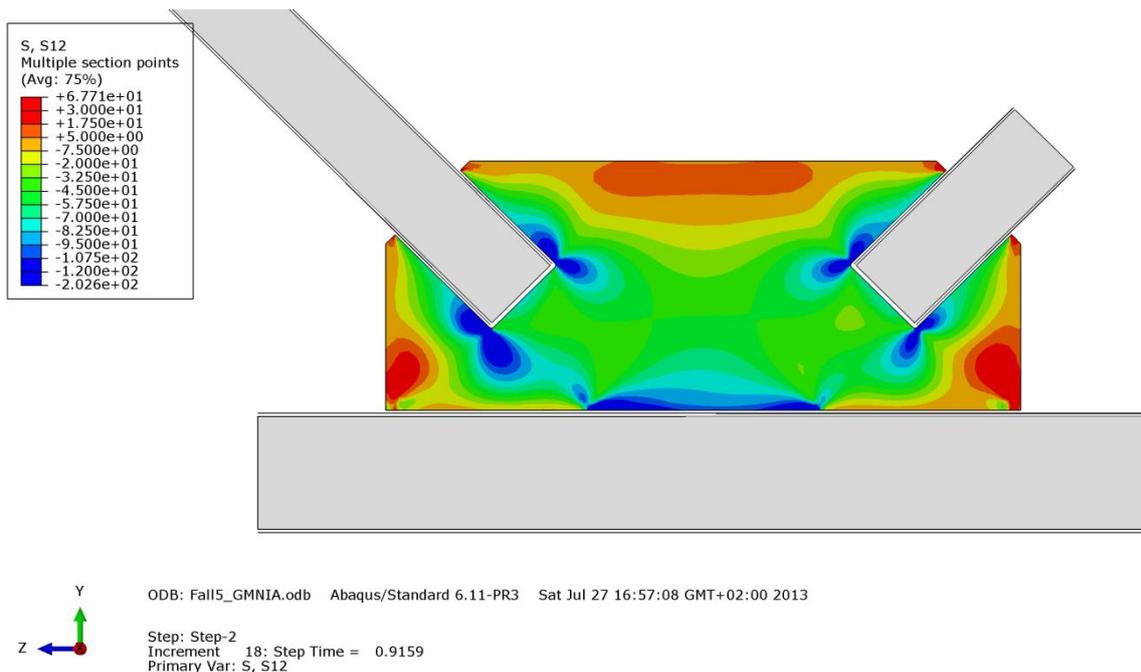


Abbildung B.453 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

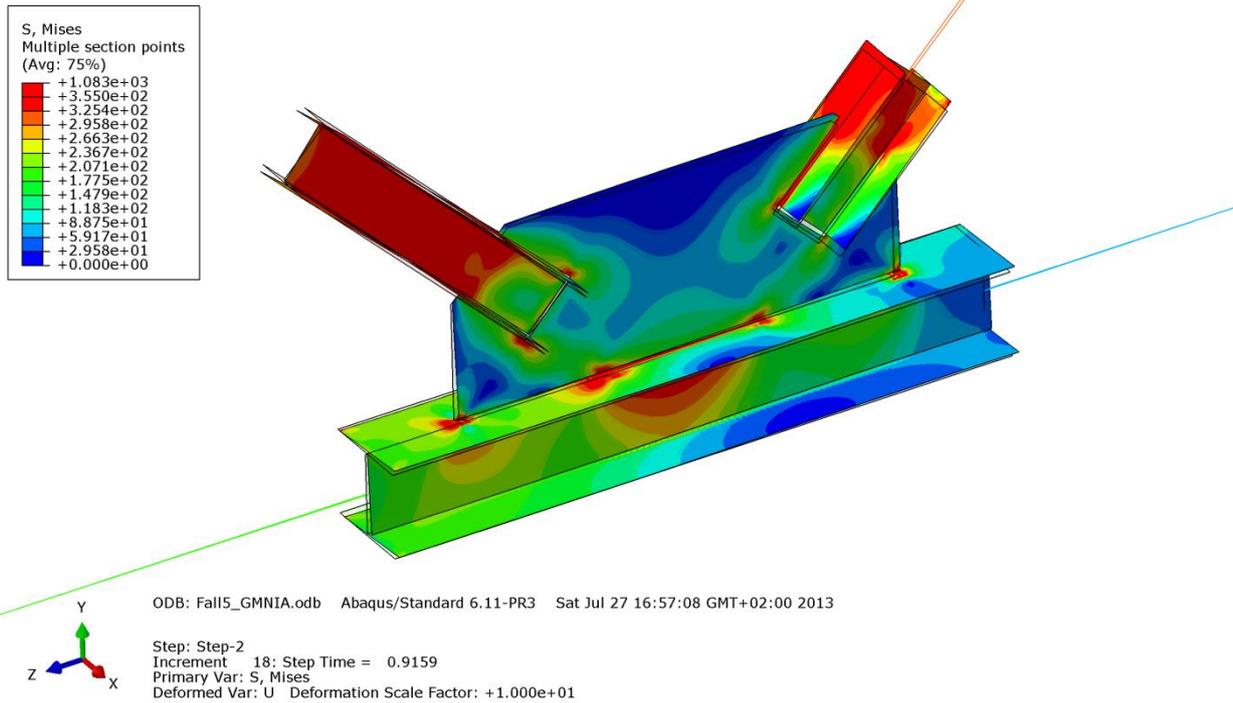


Abbildung B.454 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

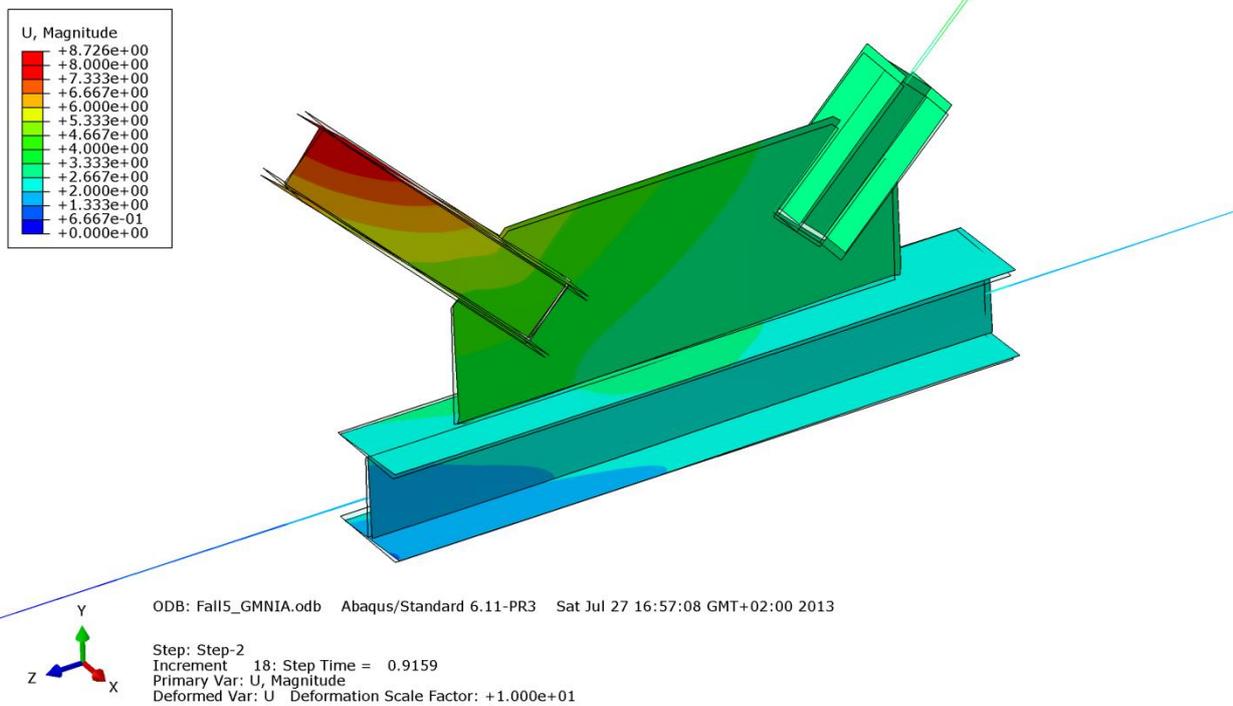


Abbildung B.455 – Verformung U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

B - 9.8.2.2 Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform der Druckstrebe zufolge N_{ref}

In den nachfolgenden Bildern B.456 bis B.459 wurde die Zugstrebe rein elastisch berechnet. Der Fachwerkknoten versagt durch Ausknicken der Druckstrebe. Aufgrund der Imperfektion in der Druckdiagonale weicht die Druckstrebe hier stärker aus wie im Fall mit Imperfektion im Untergurtstab (Kapitel B - 9.8.2.1), obwohl die Traglast mit Imperfektion in der Druckstrebe nur etwas niedriger ist.

- **Normalspannung σ_{11} [N/mm²]**

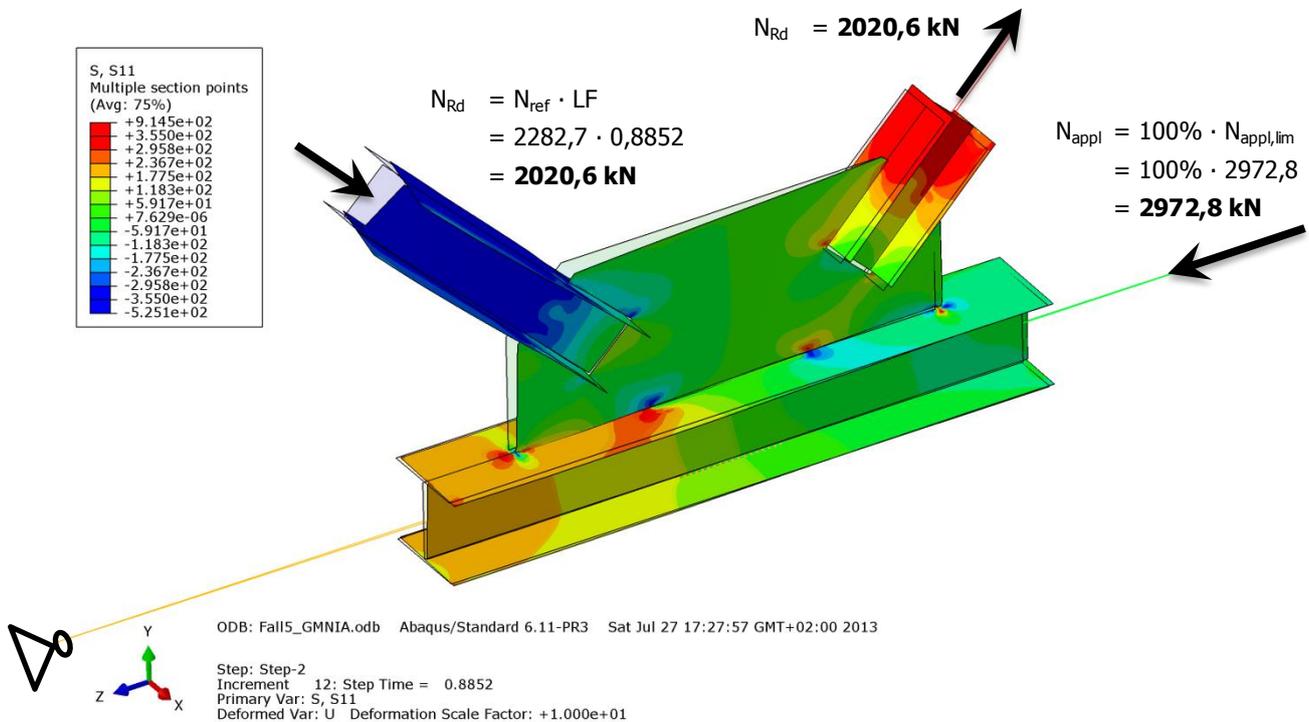


Abbildung B.456 – Normalspannung σ_{11} [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

- **Schubspannung σ_{12} [N/mm²]**

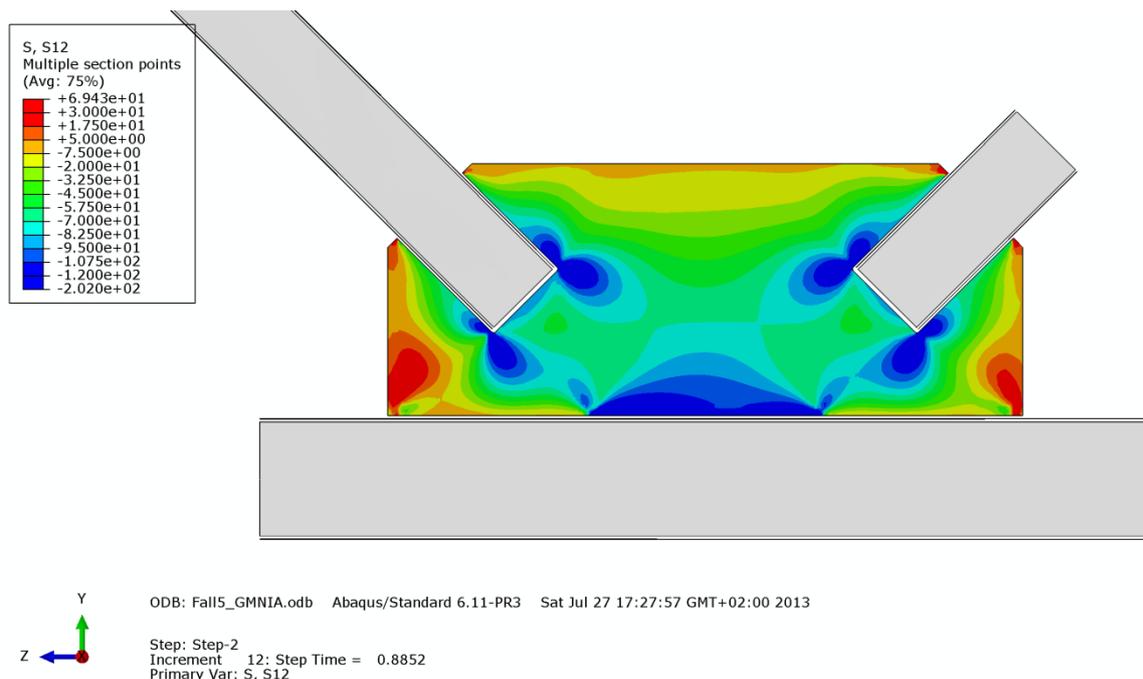


Abbildung B.457 – Schubspannung σ_{12} [N/mm²] im Knotenblech der Gruppe 6b – Imperfektion affin zur ersten Knickeigenform

• **Mises-Vergleichsspannung [N/mm²]**

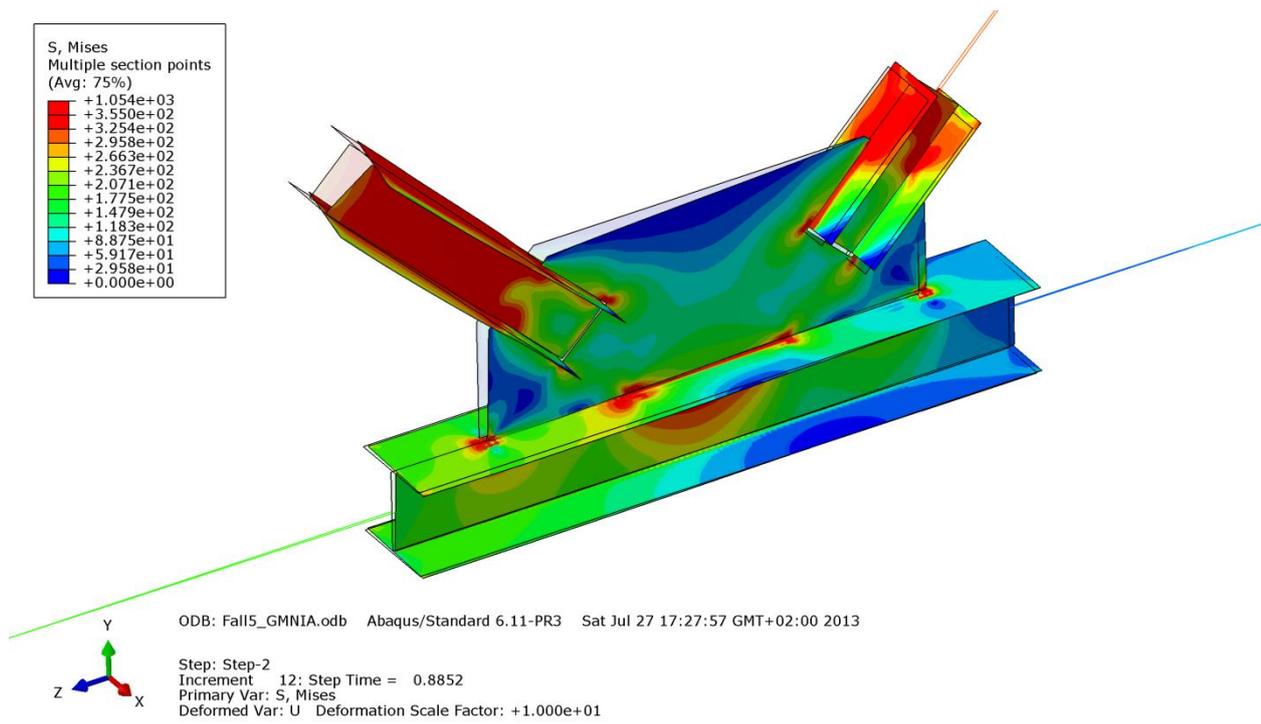


Abbildung B.458 – Mises-Vergleichsspannung [N/mm²] der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

• **Verformung [mm]**

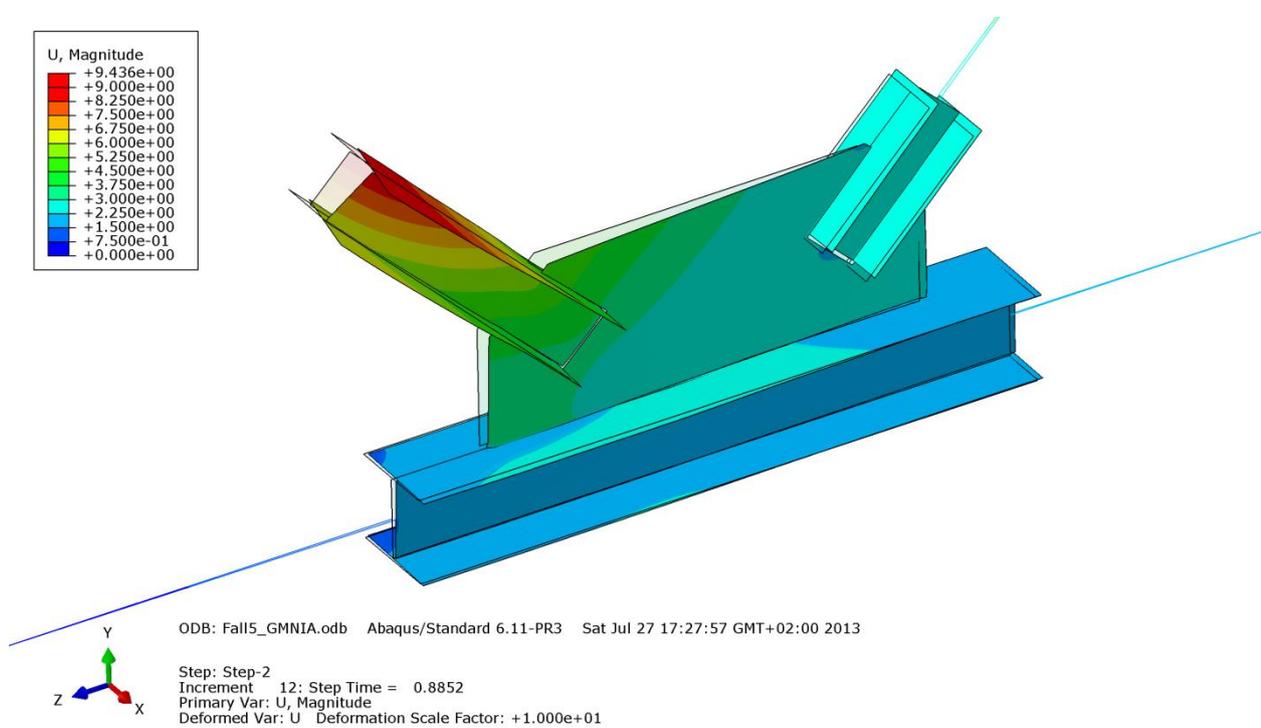


Abbildung B.459 – Verformungen U [mm] der Gruppe 6b – Imperfektion im Untergurtstab

B - 9.8.3 Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt

Die Tabelle B.79 zeigt für die beiden Imperfektionsarten (einerseits in der Druckdiagonale und andererseits im Untergurtstab) die Traglastergebnisse des Fachwerkknotens der Gruppe 6b mit einer pro Rechnung wertmäßig ansteigenden externen Untergurtkraft N_{appl} in Kombination mit den bis zur Traglastgrenze zu steigenden Diagonalkräften N_{ref} .

Ausgewertet wurden die folgenden ansteigenden Laststufen für die Untergurtkraft N_{appl} :

- 0% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Material der Zugstrebe bzw. Zugstrebe und Untergurt rein elastisch modelliert
- 25% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 50% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 75% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 100% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 110% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 114% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch
- 122% $N_{\text{appl,lim}}$ mit Zugstreben-Materialmodellierung rein elastisch (nur möglich für den Fall mit Imperfektion in den Diagonalen, beim Fall mit Imperfektion im Untergurt ist das Tragfähigkeitslimit bei 115% $N_{\text{appl,lim}}$ erreicht)

Eine höhere Belastung als 122% $N_{\text{appl,lim}}$ war auch für den Fall mit Imperfektion in der Druckdiagonale nicht mehr möglich. Ab der Grenze mit 110% $N_{\text{appl,lim}}$ wurde die maximale Traglast mit der in Abschnitt B - 9.1 erläuterten modifizierten Lastaufbringungsmethode (Variante 2) berechnet. Eine Steigerung über den theoretisch maximalen Wert von $N_{\text{appl,lim}}$ war möglich, da bei der Systemrechnung eine gewisse Stützung aus der Fachwerkebene durch die Diagonalen bzw. das Knotenblech erfolgt. Diese stabilisierenden Effekte wurden bei der Ermittlung von $N_{\text{appl,lim}}$ nicht berücksichtigt.

Gruppe 6b			
Profil der Druckstrebe:	HEA 220	Systemlänge $L^* =$	3355mm
Material	S355	$\bar{\lambda}_{z,0,L^*} =$	0,780
Fläche des idealisierten Profils der FE-Rechnung	61,6cm ²	$L_{ges} =$ (OK Untergurt - UK Obergurt)	2945mm
$t_{knotenblech} =$	40mm	$\bar{\lambda}_{z,0,L_{ges}} =$	0,7
Profil der Zugstrebe:	HEA 220		
Profil des Untergurtes:	HEA 300	Untergurtlänge $L_{UG} =$	4750mm

$N_{appl,lim} =$	0,788	$\cdot N_{pl,UG}$
$N_{pl,UG} =$	3772,6	kN
$N_{appl,lim} =$	2972,8	kN

Imperfektion:	
in den Diagonalen ($L^*/750 = 4,5mm$) (erste Knickeigenform)	im Untergurt ($L_{UG}/750 = 6,3mm$) (erste Knickeigenform)
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0kN$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 0kN$ (0% $N_{appl,lim}$)
2020,6 kN	2092,8 kN
Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0kN$ (0% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. u. UG elast. - $N_{appl} = 0kN$ (0% $N_{appl,lim}$)
2028,9 kN	2105,6 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 743kN$ (25% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 743kN$ (25% $N_{appl,lim}$)
2020,6 kN	2090,7 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1486kN$ (50% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 1486kN$ (50% $N_{appl,lim}$)
2019,5 kN	2084,8 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2230kN$ (75% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2230kN$ (75% $N_{appl,lim}$)
2017,7 kN	2074,1 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2973kN$ (100% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 2973kN$ (100% $N_{appl,lim}$)
2020,6 kN	2090,7 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 3270kN$ (110% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 3270kN$ (110% $N_{appl,lim}$)
2001,2 kN	2027,9 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 3389kN$ (114% $N_{appl,lim}$)	Zugstr. elast. - $N_{appl} = 3389kN$ (114% $N_{appl,lim}$)
1987,7 kN	1895,0 kN
Zugstr. elast. - $N_{appl} = 3627kN$ (122% $N_{appl,lim}$)	
1645,3 kN	

N_{pl} - Druckstrebe =	2185,4 kN
N_{pl} - Zugstrebe =	2185,4 kN
N_{ult} =	2028,9 kN
N_{ref} =	2282,7 kN
<small>(N_{ref} ...plastische Normalkraft der Druckstrebe mit Ausrundungsradius)</small>	

Tabelle B.79 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 6b

In der grafischen Gegenüberstellung in Abbildung B.460 der Tragfähigkeiten ist erkennbar, dass die maximale Traglast des Knotens durch die aufgebrauchte Untergurtkraft N_{appl} bis zu 100% $N_{appl,lim}$ keinen Abfall erleidet. Das System ist resistent gegen die externe Kraft, der Untergurt plastiziert nie so stark, dass ein Steifigkeitsverlust des Gurtes der Knoten Tragfähigkeit schadet.

Erst bei einer sehr großen Untergurtkraft (122% $N_{appl,lim}$ für den Fall mit Imperfektion in den Diagonalen bzw. 114% $N_{appl,lim}$ für den Fall mit Imperfektion im Untergurtstab) ist ein merklicher Abfall der Tragfähigkeit zu erkennen. Der Untergurt beginnt zu plastizieren.

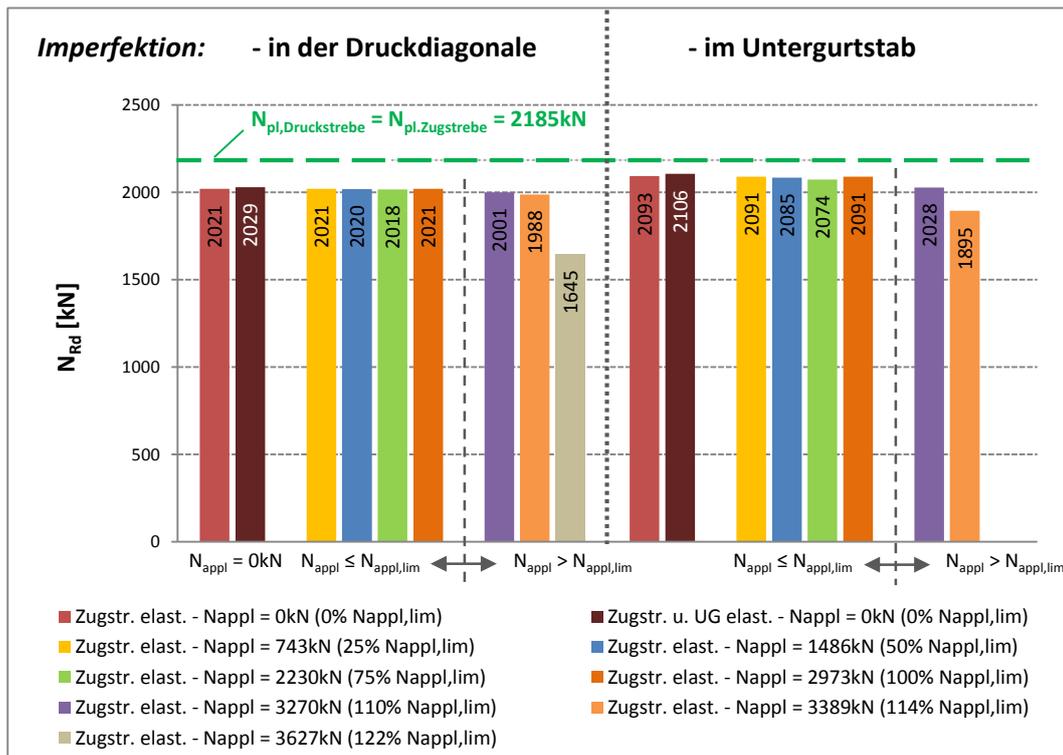


Abbildung B.460 – Vergleich der Traglastberechnungen mit Variation der Belastungssituation im Untergurt – Gruppe 6b

Zur Verdeutlichung der Traglastgrenzen des Fachwerkknotens sind die plastischen Normalkräfte der Streben eingetragen.

8 Quellenverzeichnis

• Literatur

- [1] Suppes A.: Tragverhalten und Optimierungen von ausgeklinkten Knotenblechen in Fachwerkbindern. Darmstadt: Veröffentlichung des Institutes für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt, 1998
- [2] Adam V., Zhang X.: Eine praktische Bemessungsmethode für ausgeschnittene Knotenbleche zum Anschluß von I-Profilen. Berlin: Artikel in: Stahlbau. 63.Jahrgang. hg. von Ernst & Sohn – Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 1994
- [3] Unterweger H., Taras A.: Hohlprofile mit beidseits zentrisch eingeschlitzten Knotenblechen – Druckverhalten und Bemessungsvorschlag. Berlin: Artikel in: Stahlbau. 80.Jahrgang, Heft 11. hg. von Ernst & Sohn – Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2011
- [4] Krapfenbauer T.: Bautabellen. 16. Auflage. Wien: Verlag Jugend & Volk GmbH, 2008
- [5] Klinkenberg A.: Computergestützte plastische Bemessung von Anschlüssen im Stahlbau. Karlsruhe: Artikel in: Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana. 5.Folge – Heft 4. hg. von Blaß H.J., Saal H., 1998
- [6] Lange J., Friemann H., Suppes A.: Tragverhalten und Optimierung von ausgeschnittenen Knotenblechen. Berlin: Artikel in: Stahlbau. 69.Jahrgang. hg. von Ernst & Sohn – Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2000
- [7] Klinkenberg A., Peter W., Saal H.: Berechnungsmodelle für geschweißte Anschlüsse in ausgeschnittenen Knotenblechen. Berlin: Artikel in: Stahlbau. 68.Jahrgang. hg. von Ernst & Sohn – Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 1999
- [8] Vette J., Kindmann R.: Computational Investigations on the Force Transmission of Tension Bars in Gussset Plates. Budapest: Artikel in: Eurosteel 2011, 2011
- [9] Vasarhelyi D.D.: Tests of Gusset Plate Models: Artikel in: Journal of the Structural Division. Vol.97 No.ST2. hg. von Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1971

• Normen

- [10] ÖNORM EN 1993: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2006
- [11] ÖNORM B 1993: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen, 2007
- [12] ÖNORM EN 1990 - 2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken, Juli 2008

• Software

- [13] RuckZuck 6.0, Mursoft Wörgötter, Kump OEG, Studentenversion, 2009
- [14] Abaqus 6.11 – pr3, Dassault Systèmes, 2013