

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Spannungsanalysen im Stahlbau am Beispiel eines Fachwerkknotens und dem Schweißnahtdetail einer Trogbücke

An analysis of stresses in steel structures as demonstrated in the junction of a truss bridge
and a weld seam of a trough bridge

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter
der Leitung von

Univ. Prof. DI Dr. techn. Josef Fink

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ. Ass. DI Werner Vogl

am

E212 - Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lukas Juen

0325623

Marchfeldstraße 16-18 / 2 / 5 / 16

A – 1200 Wien

Wien, im Oktober 2008

.....
(Lukas Juen)

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am Institut für Tragkonstruktionen Fachrichtung Stahlbau an der Technischen Universität Wien.

Das Thema ist die Analyse von Spannungszuständen in Stahlkonstruktionen und deren Modellbildung anhand von zwei ausgesuchten Beispielen des Stahlbaus.

Die Arbeit ist in zwei Abschnitte gegliedert:

- A) Knotendetail einer Fachwerkbrücke
- B) Spannungsanalysen eines Schweißnahtdetails

Im ersten Teil wird ein Knotendetail einer Fachwerkbrücke analysiert. Es wird eine zirka fünfzig Meter lange und zehn Meter breite Straßenbrücke für dieses Beispiel herangezogen. Untersucht wird der zweite Obergurtnoten in Brückenlängsrichtung. Dabei werden die Ergebnisse, die aus einer ingenieurmäßigen Berechnung der Spannungen entlang der maßgebenden Schnitte des Knotens resultieren, den Resultaten aus Finite Elementen Untersuchungen gegenübergestellt und verglichen. Von besonderem Interesse sind dabei Übereinstimmungen und Abweichungen hinsichtlich der auftretenden maximalen Spannungen. Bei größeren Differenzen wird versucht, mittels einfacher und plausibler Modelle, die Ergebnisse aus der FE-Berechnung anzunähern. Diese Modelle resultieren aus dem auftretenden Spannungszustand im Knoten und können bei ähnlicher Belastungssituation und Knotenausbildung auch auf andere Fachwerkbrücken umgelegt werden.

Die Untersuchungen am Fachwerkknoten werden in drei Arbeitsschritten durchgeführt. Zuerst werden nur die Spannungen zufolge Normalkraftbeanspruchung ermittelt. In einem zweiten Abschnitt wird der Einfluss von Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchungen analysiert. Diese treten bei Fachwerken aufgrund von Zwängungen durch Abweichungen vom idealen Fachwerk und infolge Querbelastungen auf. Zuletzt erfolgt die Überlagerung der separat untersuchten Einwirkungen.

Der zweite Abschnitt der Diplomarbeit befasst sich mit Spannungsanalysen eines Schweißnahtdetails. Es werden drei unterschiedliche Regelquerschnitte von Trogbriicken, die für verschiedene Spannweiten geeignet sind, untersucht. Des Weiteren werden für jede Brücke drei verschiedene Schweißnahtgeometrien analysiert. Die Spannungsermittlung erfolgt auch bei diesem Beispiel auf Basis der Finiten Elemente Methode. Vergleiche mit ingenieurmäßigen Berechnungen sind im Fugbereich nicht oder nur beschränkt möglich. Dies liegt daran, dass über die Fuge hinweg nur Druckspannungen, jedoch keine Zug- oder Schubspannungen übertragen werden können und somit kein homogener Querschnitt vorliegt. Um die Ergebnisse trotzdem plausibilisieren zu können, werden die Spannungen in den an die Fuge angrenzenden Regelbereichen ermittelt und verglichen.

Summary

This master thesis was written at the Institute for Steel Structures at the Technical University of Vienna. The main topic is the analysis of stresses in steel constructions and their modelling.

My thesis consists of two parts

- a junction of a truss bridge
- an analysis of stresses in the weld seam of a trough bridge

The first part includes the analysis of a junction of a truss bridge. For my investigations I have chosen a bridge with a length of fifty metres and a width of ten metres. Two different calculation methods are used to analyse the truss junction. The first method is based on the Euler-Bernoulli beam theory. This procedure leads to simple equations which can often be solved by hand. The only problem is that the adherence to the limitations of this method of computation cannot be ensured. This is the reason why a second calculation method, which uses the finite element approach, is necessary to compare the results. The focus is on varieties between the maximum existing stresses. If there are big differences it will be searched for better models to ensure the correlation between the calculation results.

The calculation in part A is subdivided into three parts. First only the normal forces are loaded on the structure. After that also the bending moments and the shear forces are taken into consideration. Finally the steel structure is loaded with all the different loads.

The second part of my thesis covers the analysis of stresses in the weld seam of a trough bridge. Three different bridges are analysed. Each of them is adapted to a different span. For each bridge the effects of three different weld seam geometries are investigated. The calculations are based on the methods of finite elements. The difficulty of modelling these structures is the fact that the joint can only transfer pressure stresses but no tensile or shear stresses. To ensure plausible results the tensions next to the joint are calculated with the Euler-Bernoulli beam theory and compared with the results of the computation with the finite element method.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ. Prof. DI Dr. techn. Josef Fink für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen, für fachliche Ratschläge und für die Bereitstellung des für meine Berechnungen erforderlichen Computerprogramms.

Weiters danke ich meinem Betreuer Herrn Univ. Ass. DI Werner Vogl für die fachliche Unterstützung sowie zahlreichen Anregungen, die wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich immer unterstützten.

Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Marie-Theres, die mich im Bezug auf diese Arbeit, wie auch sonst in Studium und Alltag, stets motiviert hat und immer für mich da war.

Inhaltsverzeichnis

A) Knotendetail einer Fachwerkbrücke	8
1) Einleitung	8
1.1) Allgemeines	8
1.2) Berechnung mittels Ingenieurmodell	8
1.3) Finite Elemente Berechnung	9
2) System und Belastung	11
2.1) Gesamtsystem in Längsrichtung	11
2.2) Technische Beschreibung	11
A1) Normalkraftbeanspruchung	13
1) Knotendetail	13
2) Einwirkende Schnittgrößen	14
3) Modell und Randbedingungen	14
4) Berechnung	15
4.1) Schnitt 1-1	15
4.2) Schnitt 2-2	27
4.3) Schnitt 3-3	34
A2) Biegemoment- und Querkraftbeanspruchung	41
1) Knotendetail	41
2) Einwirkende Schnittgrößen	42
3) Modell und Randbedingungen	42
4) Berechnung	43
4.1) Schnitt 1-1	43
4.2) Schnitt 2-2	54
4.3) Schnitt 3-3	60

5) Einzeleinflüsse von Moment und Querkraft	65
5.1) Allgemeines	65
5.2) Modell und Randbedingungen	65
5.3) Schnitt 1-1	66
5.4) Schnitt 2-2	71
5.5) Schnitt 3-3	77
A3) Kombinierte Beanspruchung mit M, N und V	82
1) Knotendetail	82
2) Einwirkende Schnittgrößen	83
3) Modell und Randbedingungen	83
4) Berechnung	84
4.1) Schnitt 1-1	84
4.2) Schnitt 2-2	88
4.3) Schnitt 3-3	92
A4) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	96
1) Allgemeines	96
2) Untersuchte Schnitte	96
2.1) Schnitt 1-1	96
2.2) Schnitt 2-2	98
2.3) Schnitt 3-3	100
A5) Verzeichnisse	102
1) Literaturverzeichnis	102
2) Tabellenverzeichnis	102
3) Abbildungsverzeichnis	103

B) Spannungsanalysen eines Schweißnahtdetails	106
1) Allgemeines.....	106
2) Querschnitte.....	106
3) Modellbildung	107
3.1) Randbedingungen, System und Belastung	107
3.2) Erfassung der Fugensituation	107
4) Schweißnähte	111
B1) Regelquerschnitt 1	112
1) Geometrie	112
2) Berechnung.....	113
2.1) Ingenieurmodell	113
2.2) Fall a	115
2.3) Fall b.....	120
2.4) Fall c	125
2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung.....	130
B2) Regelquerschnitt 2	132
1) Geometrie	132
2) Berechnung.....	133
2.1) Ingenieurmodell	133
2.2) Fall a	135
2.3) Fall b.....	140
2.4) Fall c	145
2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung.....	150

B3) Regelquerschnitt 3	152
1) Geometrie	152
2) Berechnung.....	153
2.1) Ingenieurmodell	153
2.2) Fall a	155
2.3) Fall b.....	160
2.4) Fall c	165
2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung.....	170
B4) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	172
1) Allgemeines.....	172
2) Untersuchte Modelle	172
2.1) Berechnungsmodell.....	172
2.2) Referenzmodell	173
2.3) Ingenieurmodell	173
3) Ergebnisse	174
B5) Verzeichnisse.....	177
1) Literaturverzeichnis	177
2) Tabellenverzeichnis	177
3) Abbildungsverzeichnis	177

A) Knotendetail einer Fachwerkbrücke

1) Einleitung

1.1) Allgemeines

Im Abschnitt A der vorliegenden Arbeit wird der Spannungszustand eines Fachwerkknotens analysiert. Die Brückenabmessungen und technischen Daten sind im Unterpunkt 2.2, der technischen Beschreibung, ersichtlich. Die Berechnung der auftretenden Spannungen erfolgt mittels zweier unterschiedlicher Berechnungsverfahren, die im Folgenden näher erläutert werden.

1.2) Berechnung mittels Ingenieurmodell

Bei der ingenieurmäßigen Analyse des Knotens werden die Normal- und Schubspannungen in den maßgebenden Schnitten ermittelt. Bei der vorhandenen Knotenausbildung müssen bei ingenieurmäßiger Betrachtung für die Dimensionierung der Knotenbleche drei Schnitte untersucht werden.

Der erste Schnitt verläuft horizontal an der schmalsten Stelle des Knotenbleches. Der zweite liegt parallel dazu auf Höhe der Unterseite des Obergurtes. An dieser Stelle ist ein größerer Querschnitt als bei Schnitt 1-1 vorhanden. Allerdings müssen, zusätzlich zu den Belastungen infolge der anschließenden Diagonalenstäbe, auch die Normalkräfte aus der Haupttragwirkung des Obergurtes berücksichtigt werden. Diese haben einen starken Einfluss auf die Vergleichsspannung nach Huber, Mises Hencky. Der dritte und letzte maßgebende Schnitt ist ein Vertikalschnitt durch den Knoten im Schnittpunkt der Diagonalenachsen.

Das Ingenieurmodell liefert die Normal-, Schub- und Vergleichsspannung in den betrachteten Schnitten. Aufgrund der konzentrierten Krafteinleitung gerät man im Knotenbereich an die Anwendungsgrenzen der technischen Biegelehre oder überschreitet diese. Aus diesem Grund werden die analytischen Ergebnisse mit der Finiten Elemente Berechnung verglichen und deren Plausibilität geprüft. Der Vorteil des Ingenieurmodells liegt in der Einfachheit, die schnelle Kontrollrechnungen von Einzelwerten mit Handrechnung zulässt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgt die Berechnung meist in tabellarisch unter Angabe der erforderlichen Gleichungen.

1.3) Finite Elemente Berechnung

Die Finite Elemente Methode unterliegt nicht denselben strengen Anwendungsgrenzen wie die technische Biegelehre. Die Grundidee besteht darin ein System mit einer unendlichen Anzahl von Freiheitsgraden, durch Diskretisierung in ein System mit einer endlichen Zahl von vorerst unbekanntem Knotenpunktverschiebungen überzuführen. Dies geschieht dadurch, dass die Struktur mit Hilfe eines FE-Netzes diskretisiert wird.

Für die Berechnung der unbekanntem Knotenpunktverschiebungen ist die Eingabe der Randbedingungen, der Belastungen und der Materialparameter erforderlich. Die Spannungs- und Verzerrungsverläufe zwischen den einzelnen Knoten werden durch sogenannte Interpolationsfunktionen angenähert.

Das Berechnungsverfahren ist so konzipiert, dass mit zunehmend feinerer Diskretisierung die potentielle Energie des Systems monoton gegen den wahren Wert strebt. Die Genauigkeit der Berechnung ist also hauptsächlich von der Feinheit des gewählten FE-Netzes abhängig. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Grad der verwendeten Interpolationsfunktionen zu steigern. Es gibt eine Vielzahl von Arten unterschiedlicher Finite Elemente. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Dreiecks- und Viereckselemente verwendet.

Die Berechnung des Systems mittels der Finiten Elemente Methode erfolgt mit dem Programm SSD – Sofistik Structural Desktop Vers. 10.75 – 23. Der Fachwerkknoten wird als dreidimensionales Flächentragwerk modelliert. Bei der Berechnung werden sowohl Platten-, als auch Scheiben und Rotationsanteile berücksichtigt. Die Diskretisierung erfolgt mit Viereckselementen. Den Berechnungen wird ein ebener Spannungszustand zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse werden dem Ingenieurmodell gegenübergestellt und verglichen. Dabei soll vor allem überprüft werden, ob die vereinfachenden Annahmen des Ingenieurmodells Ergebnisse auf der sicheren Seite liefern. Dies muss nicht über den gesamten Verlauf der verschiedenen Schnitte gewährleistet sein. Die Maximalwerte der Spannungen sollten allerdings abgedeckt werden. Ist dies nicht der Fall, so werden möglichst einfache Modelle gesucht, die Spannungen auf der sicheren Seite liefern.

Beispielsweise kann es vorkommen, dass ein einwirkendes Moment aufgrund einer geringen Steifigkeit nicht auf den gesamten Querschnitt eines Schnittes wirkt. In diesem Fall wird untersucht, ob es einen geeigneten Ersatzquerschnitt gibt, der bessere Ergebnisse liefert.

2) System und Belastung

2.1) Gesamtsystem in Längsrichtung

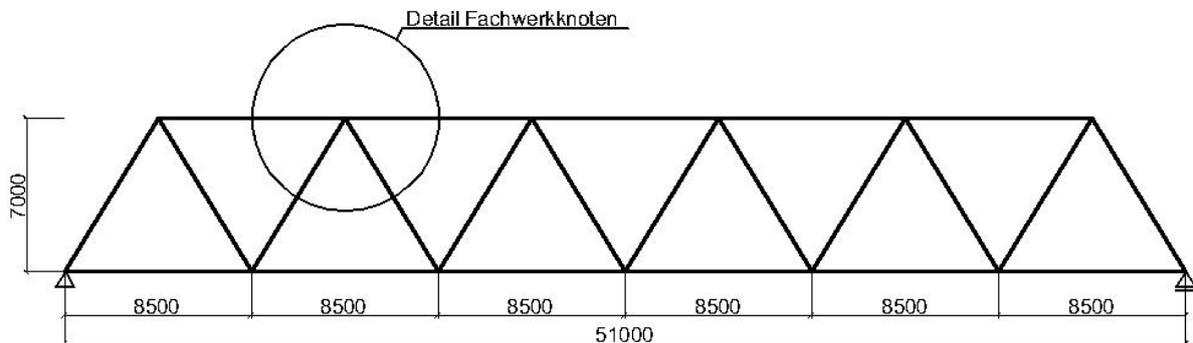


Abbildung A-01: Statisches System in Brückenlängsrichtung (Maße in mm)

In Abbildung A-01 ist das statische System in Brückenlängsrichtung ersichtlich. Für die weiteren Untersuchungen wird der zweite Obergurtnode in Brückenlängsrichtung herangezogen.

2.2) Technische Beschreibung

Bei der zu analysierenden Konstruktion handelt es sich um eine Straßenbrücke mit einer Spannweite von 51 m. Diese ist in Längsrichtung als Fachwerk konzipiert. Die Gesamtbreite beträgt 10 m, wobei an den beiden Rändern jeweils ein Randstreifen mit einer Breite von 1,25 m vorgesehen ist.

Das Eigengewicht wird für die Berechnung, mit einer für Brücken dieser Spannweite und Konstruktionsart sinnvollen Flächenlast von 3 kN/m^2 abgeschätzt. Die Verkehrslasten werden gemäß EN 1991-2:2003 (D) angesetzt. Diese Lastannahmen bilden die Grundlage für die Berechnung der maßgebenden Normalkräfte des zweiten Obergurtnodes in Systemlängsrichtung mit Hilfe eines Stabwerksprogramms. Die resultierenden Normalkräfte werden im Abschnitt A1 berücksichtigt, um die Spannungen im Fachwerkknoten zufolge Normalkraftbeanspruchung zu untersuchen. Um die Auswertung im FE-Modell zu ermöglichen, wird mit zugehörigen Schnittgrößen gearbeitet.

Nach der Analyse des Knotens unter Einwirkung der Normalkräfte folgen die Untersuchungen unter Biegemomentenbeanspruchung. In Fachwerken auftretende Biegemomente entstehen durch Abweichungen des realen vom idealen Fachwerk, oder durch Querbelastrung der Stäbe. Die Größe der angesetzten Momentenbeanspruchung wird mit der Zielsetzung gewählt, realitätsnahe Verhältnisse zwischen den Spannungen infolge Normalkraft und jenen infolge Biegung zu erhalten. Die durch die angesetzten Biegemomente hervorgerufenen Spannungsmaximalwerte ergeben zwanzig Prozent der aus den Normalkräften resultierenden Spannungen und damit einen sinnvollen Wert.

Für die Abschätzung der anzusetzenden Biegemomente werden nur die Regelbereiche der Stäbe betrachtet.

$$\sigma_{N,i} = \frac{N_i}{A_i}$$
$$\sigma_{M,i} = 0,20 \cdot \sigma_{N,i} = \frac{M_i}{W_i} \Rightarrow M_i$$

Als ausreichende Näherung werden die Ergebnisse auf die im Abschnitt „A2) Biegemomentenbeanspruchung“ verwendeten Werte gerundet.

Die zugehörigen Querkräfte werden mit Hilfe der folgenden Annahme ermittelt:

$$V_i = \frac{2 \cdot M_i}{l_i} \quad \text{Der Index „i“ bezieht sich jeweils auf den betrachteten Stab.}$$

Abbildung A-02 zeigt das betrachtete Knotendetail und die angreifenden Normalkräfte sowie das gewählte Koordinatensystem und die maßgebenden Schnittführungen. Zusätzlich sind die gewählten Stabbezeichnungen und die Laufrichtung des Winkels α , der in die folgende Tabelle A-01 eingeht, eingetragen. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um Baustahl S 355 J0.

2) Einwirkende Schnittgrößen

$$F_x = N \cdot \cos \alpha$$

$$F_z = N \cdot \sin \alpha$$

Bez.	α [°]	N [kN]	F _x [kN]	F _z [kN]
OG 1	180,0	-2013	2013	0
OG 2	0,0	-3488	-3488	0
DIA 1	121,3	-1421	737,5	-1215
DIA 2	58,7	1421	737,5	1215

Tabelle A-01: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten

Die Kräfte F_x und F_z stellen den Anteil der Normalkraft in x bzw. z-Richtung dar.

3) Modell und Randbedingungen

Die angreifenden Normalkräfte werden mit Hilfe von Linienlasten gleichmäßig in die Konstruktion eingeleitet. Als Randbedingung wurde die Einspannung von Obergurt OG 2 am rechten Rand gewählt. Diese wurde durch Festhaltung der Knoten in alle drei Raumrichtungen realisiert. Die Normalspannung des rechten Obergurtstabes ergibt sich als resultierende Auflagerreaktion.

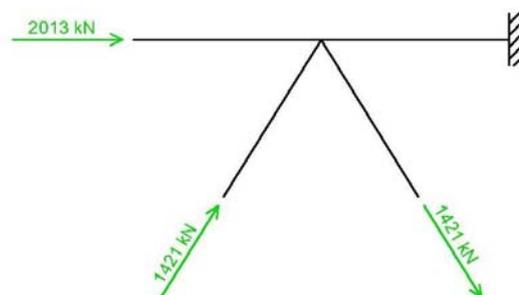


Abbildung A-03: Schematische Darstellung der verwendeten Randbedingungen

4) Berechnung

4.1) Schnitt 1-1

Nachweis des Knotenbleches an der schmalsten Stelle.

Ingenieurmodell 1

Bei diesem Modell werden die geschnittenen Stegbleche der Diagonalen berücksichtigt.

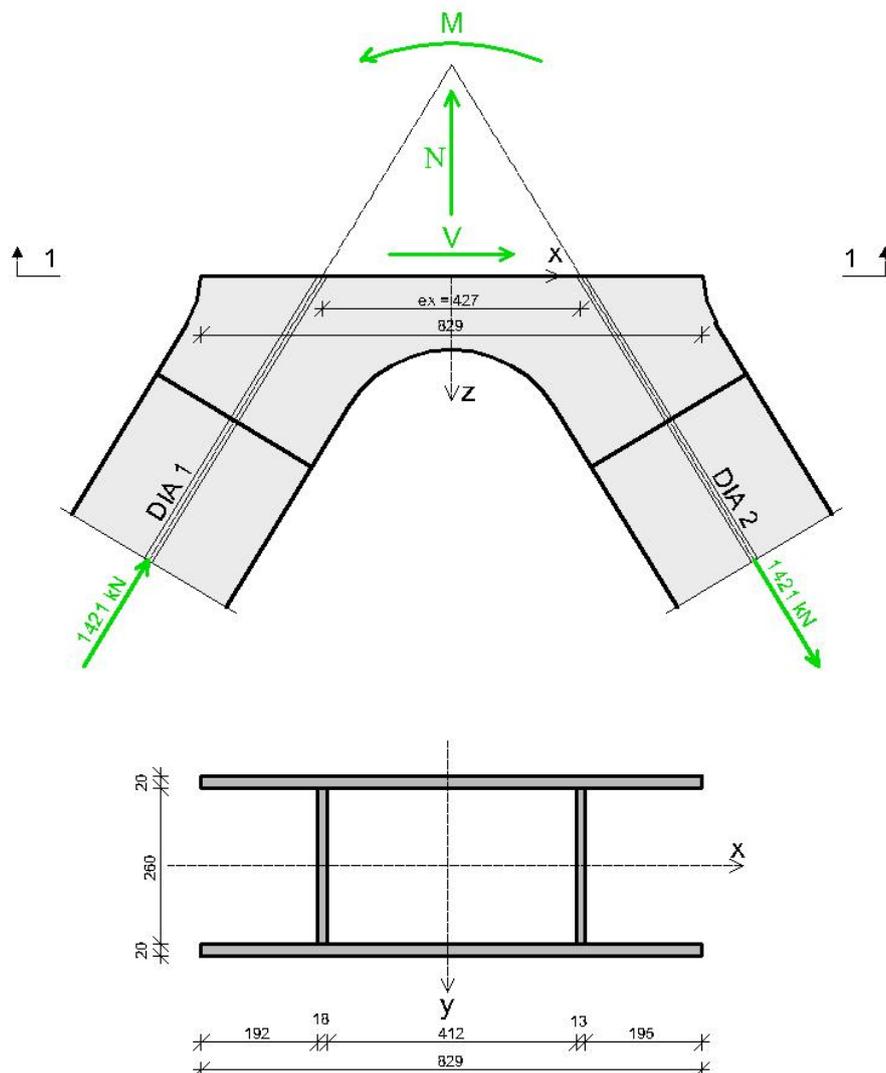


Abbildung A-04: Darstellung der Geometrie für Schnitt 1-1

In Abbildung A-04 ist der für das Ingenieurmodell 1 im Schnitt 1-1 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls eingetragen.

Ermittlung der Querschnittswerte

Schwerpunktsermittlung

Der Koordinatenursprung der x-Achse liegt am linken Rand von Schnitt 1-1.

i	bx [cm]	by [cm]	Ai [cm ²]	xi [cm]	Ai*xi
1	82,92	2,00	165,85	41,46	6876,32
2	82,92	2,00	165,85	41,46	6876,32
3	1,75	26,00	45,62	20,10	916,89
4	1,29	26,00	33,46	62,83	2102,16
Ges			410,78		16771,70

Tabelle A-02: Schwerpunktsermittlung Schnitt 1-1

$$x_s = \frac{\sum_i A_i \cdot x_i}{\sum_i A_i} = 40,8 \text{ cm}$$

Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

i	bx [cm]	by [cm]	Ai [cm ²]	xsi [cm]	Ai*xsi ²	Izsi
1	82,92	2,00	165,85	0,63	66,40	95034,92
2	82,92	2,00	165,85	0,63	66,40	95034,92
3	1,75	26,00	45,62	-20,73	19611,50	11,71
4	1,29	26,00	33,46	22,00	16191,62	4,62
Ges			410,8		35936	190086

Tabelle A-03: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

$$I_{ys} = 190086 + 359356 = 226022 \text{ cm}^4$$

$$x_{\max} = 42,1 \text{ cm}$$

$$W_y = 226022 / 42,1 = 5369 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen

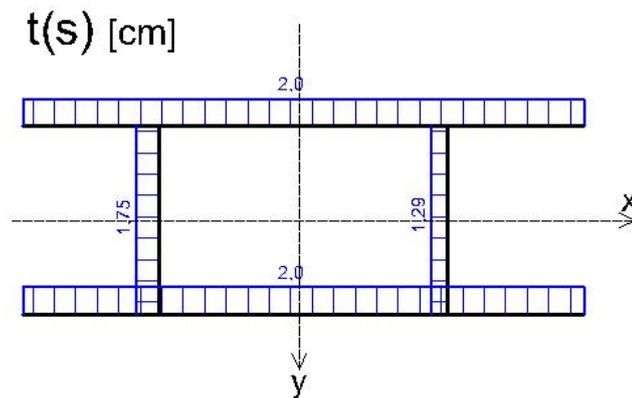
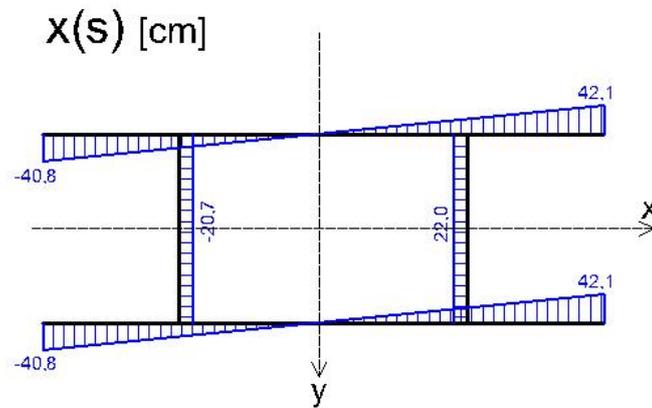
$$F_{z,\text{DIA1}} = -F_{z,\text{DIA2}} \Rightarrow N = 0$$

$$V_x = F_{x,\text{DIA1}} + F_{x,\text{DIA2}} = 737,50 + 737,50 = 1475 \text{ kN}$$

$$M_y = F_{z,\text{DIA1}} \cdot e_x = 1215 \cdot 42,7 = 51905 \text{ kNcm}$$

Ermittlung der Spannungen

Ermittlung des statischen Moments



Integrationsrichtung & Punktbezeichnung

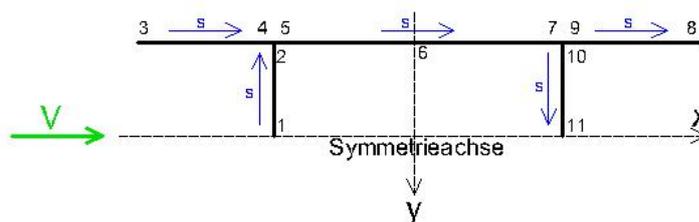


Abbildung A-05: Vorwerte zur Berechnung des Statischen Momentes

In Abbildung A-05 sind die Verläufe der Querschnittsparameter x und der jeweiligen Blechstärke t abgebildet. Die eingetragenen Blechstärken entsprechen (als Teil der Modellbildung) den wahren, sich durch die schräge Schnittführung ergebenden Dicken. Unten sind die für die Berechnung des statischen Momentes verwendete Integrationsrichtung und die Punktbezeichnung dargestellt.

Quantitative Ermittlung des statischen Momentenverlaufes

$$Ax,1 = 0$$

$$Ax,2 = -20,7 \cdot 1,75 \cdot 14 = -507,15 \text{ cm}^3$$

$$Ax,3 = 0$$

$$Ax,4 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot [(-40,8) + (-20,7)] \cdot 20,1 = -1236,15 \text{ cm}^3$$

$$Ax,5 = Ax,2 + Ax,4 = -1743,30 \text{ cm}^3$$

$$Ax,6 = -1743,30 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (-20,7) \cdot 20,7 = -2171,79 \text{ cm}^3$$

$$Ax,7 = -2171,79 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 22,0^2 = -1687,79 \text{ cm}^3$$

$$Ax,8 = 0$$

$$Ax,9 = -\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (42,1 + 22,0) \cdot 20,1 = -1288,41 \text{ cm}^3$$

$$Ax,10 = Ax,7 - Ax,9 = -399,38 \text{ cm}^3$$

$$Ax,11 = -399,38 + 1 \cdot 22,0 \cdot 1,29 \cdot 14 = 0$$

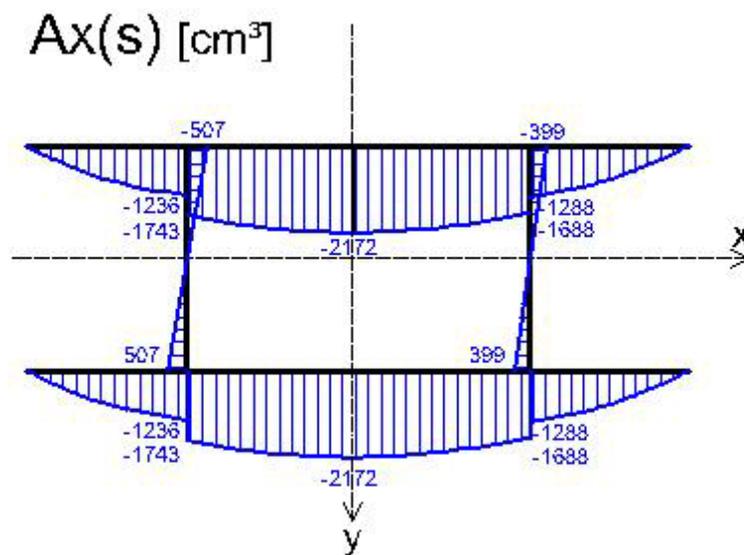


Abbildung A-06: Verlauf des Statischen Momentes

Schubspannungsermittlung

$$T = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys}} \quad \tau = \frac{T}{t}$$

Pkt.	Ax [cm ³]	t [cm]	T [N/mm]	τ [N/mm ²]
1	0,00	1,75	0,00	0,00
2	-507,15	1,75	330,96	18,86
3	0,00	2,00	0,00	0,00
4	-1236,15	2,00	806,70	40,34
5	-1743,30	2,00	1137,66	56,88
6	-2171,79	2,00	1417,29	70,86
7	-1687,79	2,00	1101,44	55,07
8	0,00	2,00	0,00	0,00
9	-1288,41	2,00	840,81	42,04
10	-399,38	1,29	260,63	20,25
11	0,00	1,29	0,00	0,00

Tabelle A-04: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes

Ermittlung von Normal- und Vergleichsspannung

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} \cdot x$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Pkt.	x	σ [N/mm ²]	σ _v [N/mm ²]
1	-20,70	-47,54	47,54
2	-20,70	-47,54	57,68
3	-40,80	-93,70	93,70
4	-20,70	-47,54	84,50
5	-20,70	-47,54	109,39
6	0,00	0,00	122,74
7	22,00	50,52	107,94
8	42,10	96,68	96,68
9	22,00	50,52	88,63
10	22,00	50,52	61,51
11	22,00	50,52	50,52

Tabelle A-05: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes

Grafische Darstellung der Ergebnisse von Ingenieurmodell 1

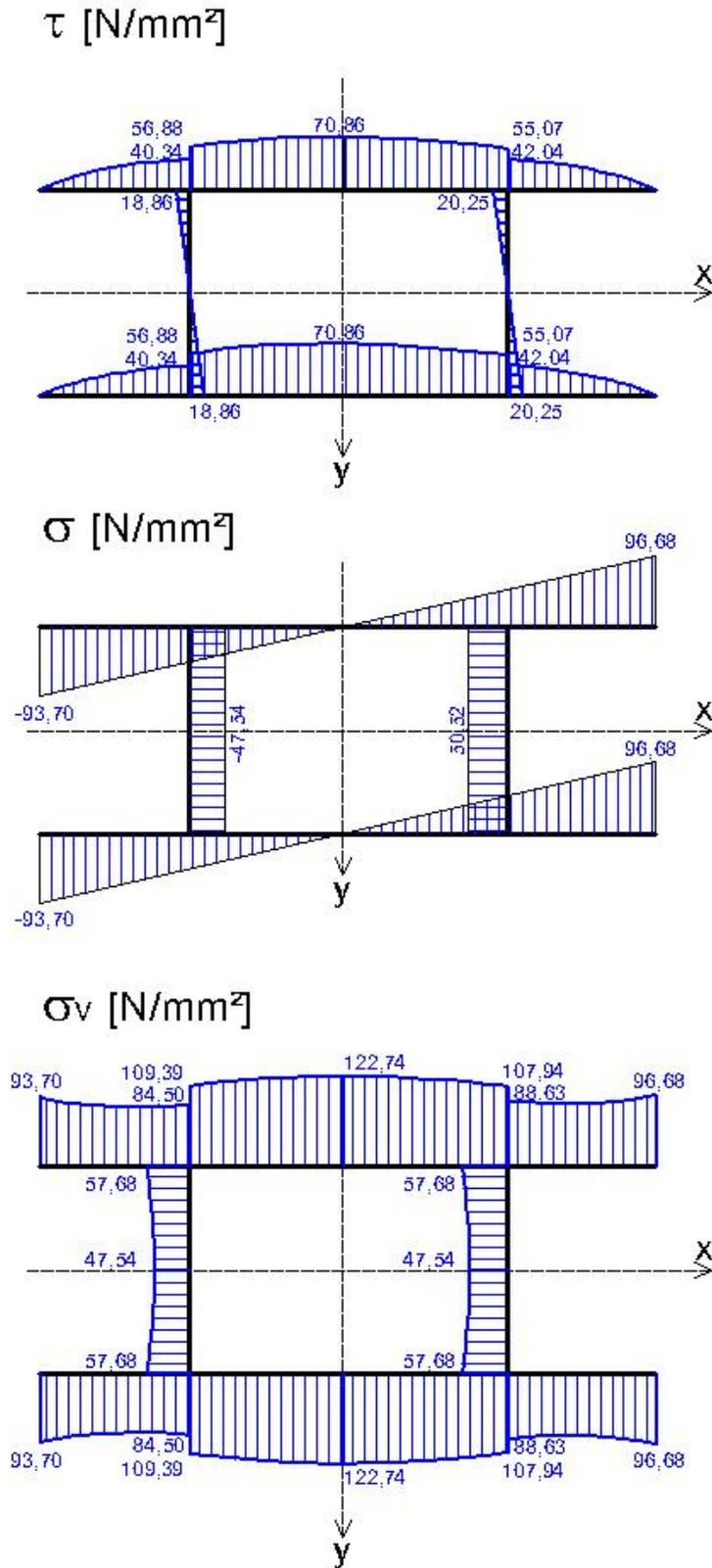


Abbildung A-07: Ergebnisse von Ingenieurmodell 1

Ingenieurmodell 2

Im Gegensatz zu Modell 1 werden die geschnittenen Stege der Diagonalen nicht berücksichtigt. Dieser vereinfachende Ansatz muss aufgrund des geringeren Querschnittes zu höheren Normalspannungen führen. Diese liegen damit auf der sicheren Seite.

Ermittlung der Querschnittswerte:

$$I_{ys} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 82,9^3}{12} = 190069 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 82,9^2}{6} = 4584 \text{ cm}^3$$

$$A_{x,\max} = -2 \cdot \frac{2 \cdot 82,9^2}{8} = -3438 \text{ cm}^2$$

Ermittlung der Schnittgrößen

Ermittlung siehe Modell 1

$$N = 0$$

$$V_x = 1475 \text{ kN}$$

$$|M_y| = 51905 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{51905 \cdot 10^4}{4584 \cdot 10^3} = \pm 113,23 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$t = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}$$

$$\tau_{xz,\max} = -\frac{1475 \cdot 10^3 \cdot (-3438160)}{190069 \cdot 10^4 \cdot 40} = 66,70 \text{ N/mm}^2$$

Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten

$$b_x = 829\text{mm}$$

$$t = 40\text{mm}$$

$$A_x = -t \cdot \left(x + \frac{b_x}{2}\right) \cdot \left(\frac{b_x - 2 \cdot x}{4}\right)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$\sigma_z = \frac{M_y}{I_{ys}} \cdot x$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

x	Ax [cm ³]	τ [N/mm ²]	σ_z [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
-41,46	0,00	0,00	-113,23	113,23
-31,10	-1504,20	29,18	-84,92	98,82
-20,73	-2578,62	50,03	-56,61	103,50
-10,37	-3223,28	62,53	-28,31	111,95
0,00	-3438,16	66,70	0,00	115,53
10,37	-3223,28	62,53	28,31	111,95
20,73	-2578,62	50,03	56,61	103,50
31,10	-1504,20	29,18	84,92	98,82
41,46	0,00	0,00	113,23	113,23

Tabelle A-06: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten

Grafische Darstellung der Ergebnisse von Ingenieurmodell 2

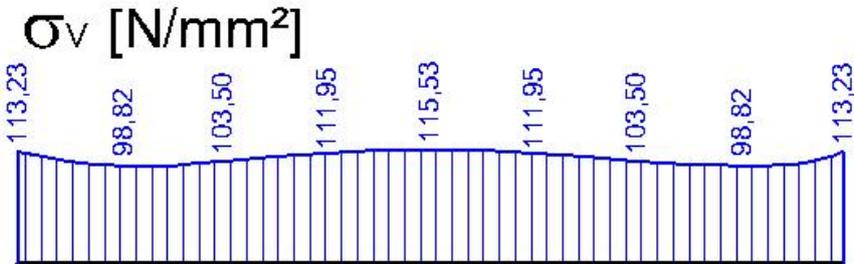
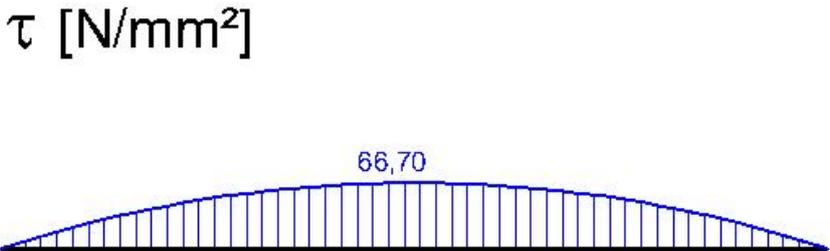
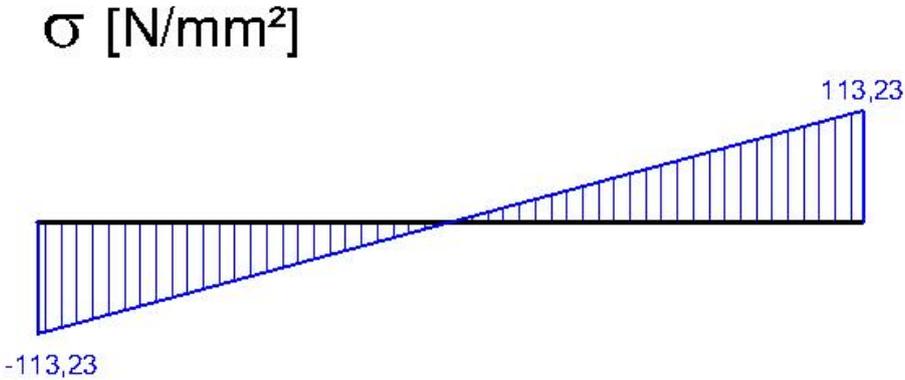


Abbildung A-08: Ergebnisse von Ingenieurmodell 2

**Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung
Vergleich mit Ingenieurmodell 1**

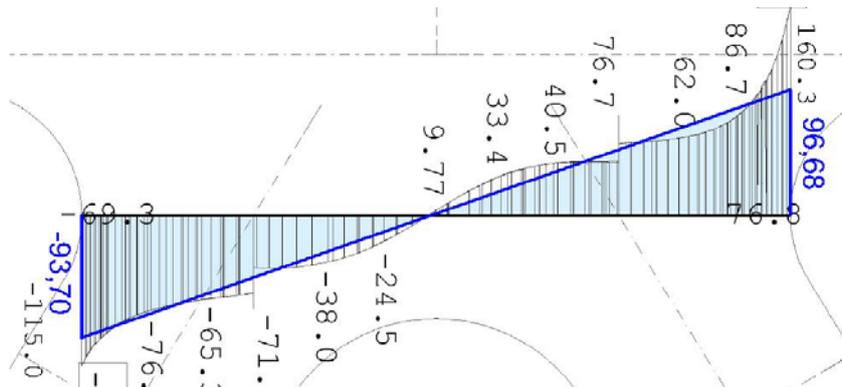


Abbildung A-09: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

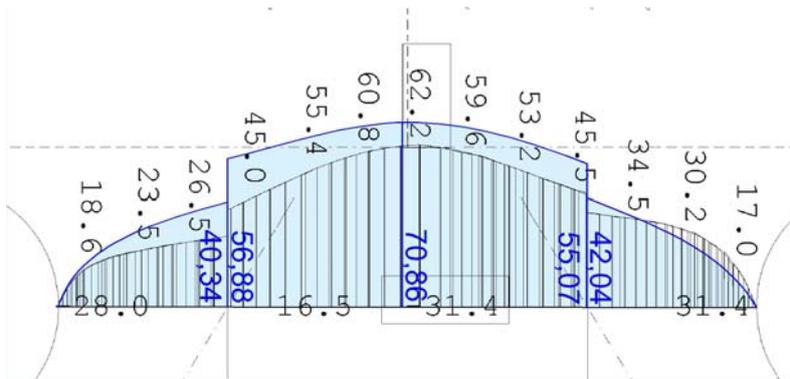


Abbildung A-10: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

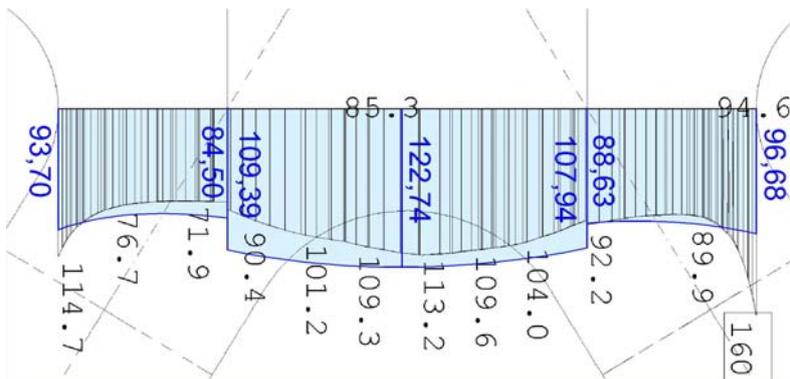


Abbildung A-11: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

- Ergebnisse des Ingenieurmodells
- Ergebnisse der FE-Berechnung

Abbildung A-12: Legende

Vergleich mit Ingenieurmodell 2

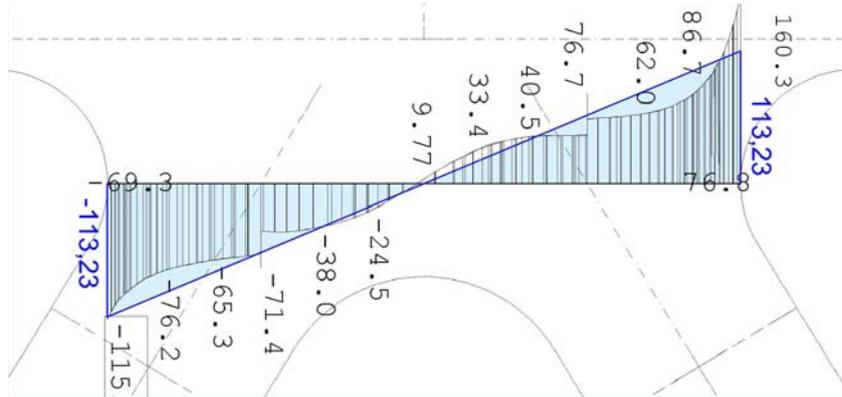


Abbildung A-13: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

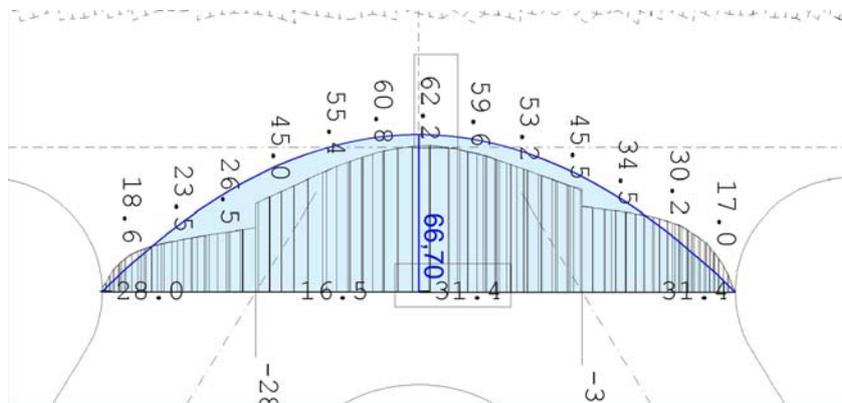


Abbildung A-14: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

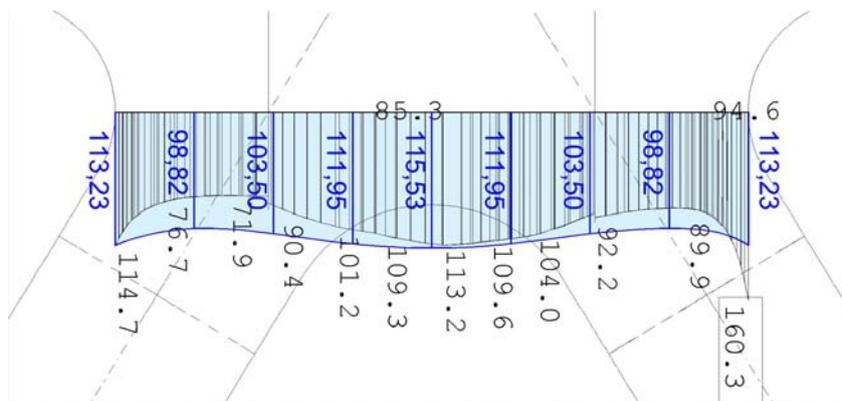


Abbildung A-15: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

- Ergebnisse des Ingenieurmodells
- Ergebnisse der FE-Berechnung

Abbildung A-16: Legende

Interpretation der Ergebnisse

In den Abbildungen A-09 bis A-16 kann man erkennen, dass beide vereinfachten Ingenieurmodelle die sich bei der FE-Berechnung ergebenden Spannungsverläufe über große Bereiche von Schnitt 1-1 sehr gut annähern. Nur im Hinblick auf den Maximalwert der auftretenden Normal- und Vergleichsspannungen kommt es an den Rändern zu größeren Abweichungen. Die Spannungsspitzen aus der FE-Analyse werden bei der vereinfachten Berechnung nicht komplett abgedeckt. Das stärker vereinfachte Ingenieurmodell 2 liefert sogar bessere Ergebnisse, da sich höhere Spannungen am Rand ergeben.

Die Abweichung der Vergleichsspannung am Rand des Schnittes 1-1 beträgt bei Ingenieurmodell 1 rund 40% und bei Ingenieurmodell 2 etwa 30% vom Spannungsmaximum der FE-Berechnung. Der Verlauf der Schubspannungen wird mit beiden Modellen hinreichend genau abgedeckt.

4.2) Schnitt 2-2

Nachweis des Knotenbleches mit Druckspannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes.

Ingenieurmodell

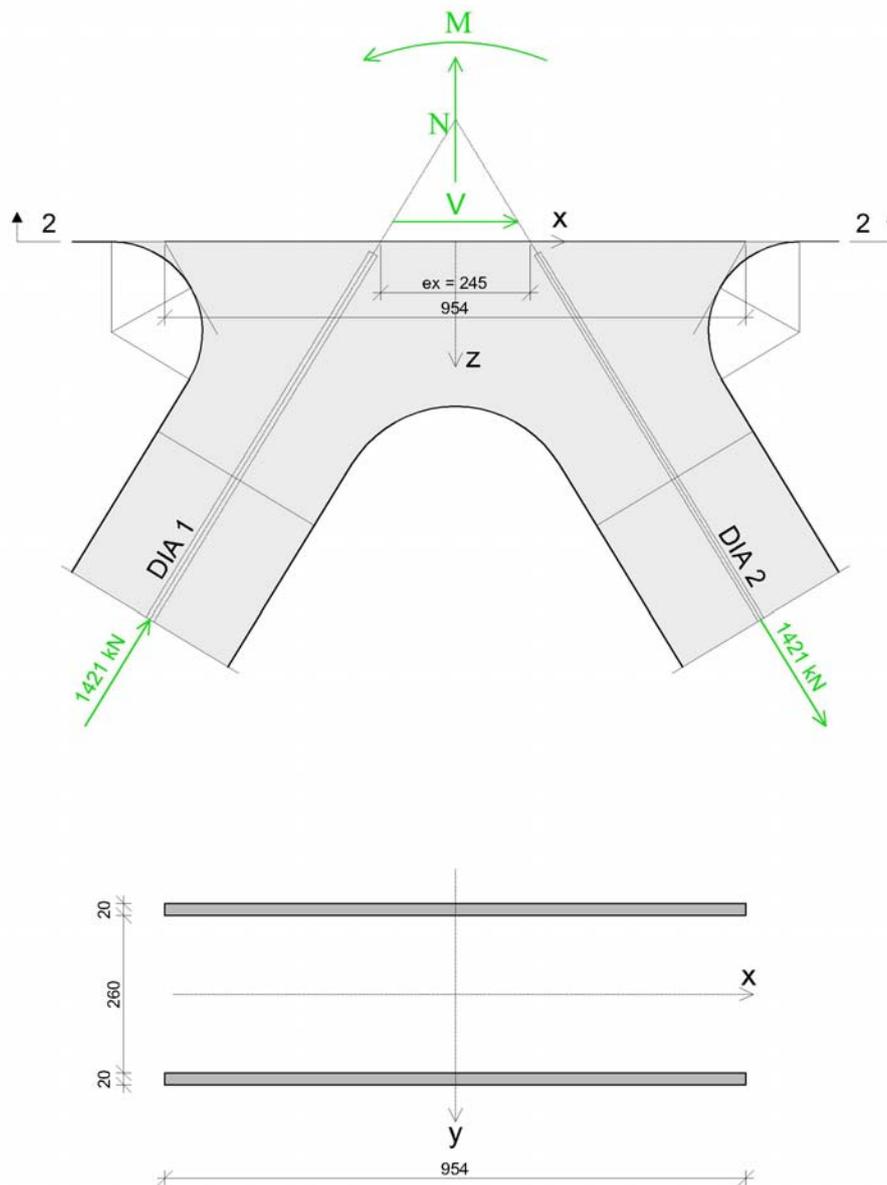


Abbildung A-17: Darstellung der Geometrie für Schnitt 2-2

In Abbildung A-17 ist der für den Schnitt 2-2 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls eingetragen.

Konstruktion von Schnitt 2-2

Schnitt 2-2 liegt an der Unterseite des Obergurtes. In Abbildung A-17 ist die geometrische Konstruktion angedeutet, die notwendig ist, um die angegebenen Querschnittsabmessungen zu erhalten. Dazu wird die Winkelsymmetrale zwischen Obergurt und Diagonalen eingezeichnet. Da der Mittelpunkt des Ausrundungskreises auf dieser Winkelsymmetralen liegt, lässt sich lotrecht auf diese eine Tangente an den Ausrundungskreis zeichnen. Diese Tangente hat einen Schnittpunkt mit der Schnittführung 2-2. Dieser Schnittpunkt bildet auf beiden Seiten das rechnerische Ende der Schnittführung. Es ergibt sich eine Querschnittsbreite von 95,4 cm.

Bei dieser Vorgehensweise handelt es sich um ein übliches Verfahren zur Dimensionierung des vorliegenden Knotenpunktes.

Ermittlung der Querschnittswerte:

$$I_{ys} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 95,4^3}{12} = 289251 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 95,4^2}{6} = 6065 \text{ cm}^3$$

$$A_{x,\max} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 95,4^2}{8} = 4548,8 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen

$$F_{z,\text{DIA1}} = - F_{z,\text{DIA2}} \Rightarrow N = 0$$

$$V_x = F_{x,\text{DIA1}} + F_{x,\text{DIA2}} = 737,50 + 737,50 = 1475 \text{ kN}$$

$$|M_y| = F_{z,\text{DIA1}} \cdot e_x = 1215 \cdot 24,5 = 29760 \text{ kNcm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{zz} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{29760 \cdot 10^4}{6065 \cdot 10^3} = \pm 49,07 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xz} = - \frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$t = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}$$

$$\tau_{xz,\max} = \frac{1475 \cdot 10^3 \cdot 4548,84}{289251 \cdot 10^4 \cdot 40} = 57,99 \text{ N/mm}^2$$

Aus der Haupttragwirkung des Obergurtes resultieren Normalspannungen in x-Richtung, die für die Ermittlung der Vergleichsspannung zu berücksichtigen sind.

Vereinfachte Annahmen zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung:

Es werden die Spannungen zufolge der einwirkenden Obergurtnormalkräfte ermittelt. Dazu wird der Obergurtquerschnitt mit den Blechstärken des Knotenbereichs herangezogen. Die Vergrößerung der Steghöhe innerhalb des Knotenbereichs wird vernachlässigt. Da OG1 und OG2 jeweils unterschiedliche Normalkraftbeanspruchung aufweisen, wird zwischen den beiden sich ergebenden Spannungswerten links und rechts von Knoten linear interpoliert.

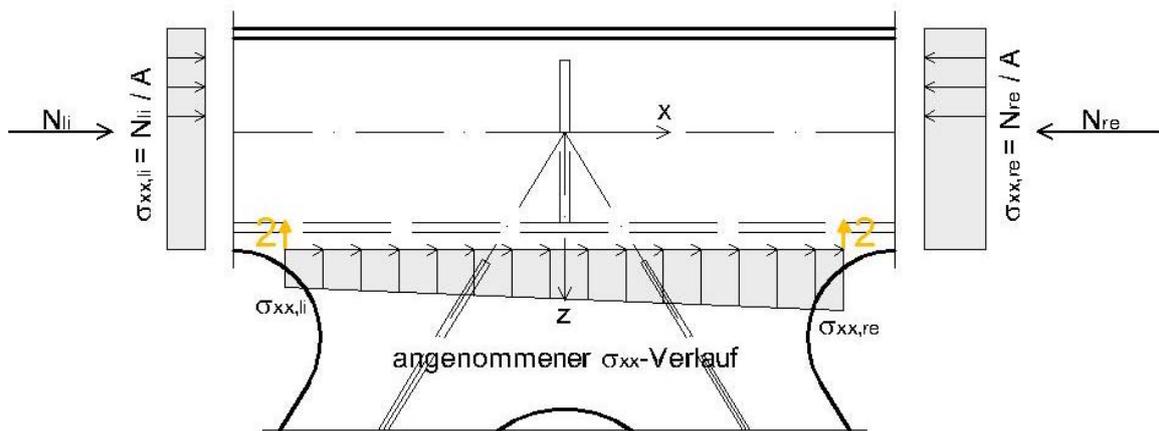


Abbildung A-18: Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes

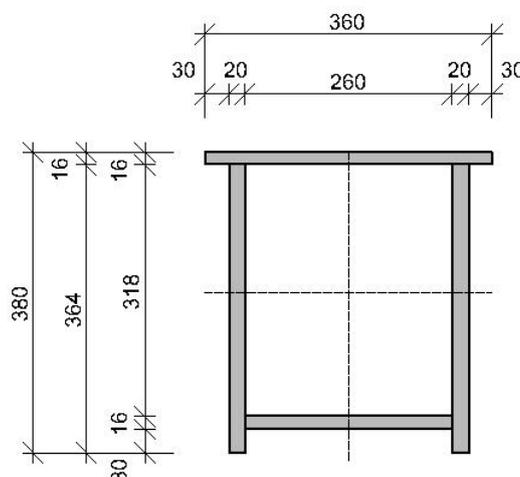


Abbildung A-19: Querschnitt zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung

$$A = 36 \cdot 1,6 + 2 \cdot 2 \cdot 36,4 + 26 \cdot 1,6 = 244,80 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{xx,li} = \frac{N_{li}}{A} = \frac{-2013}{244,80} \cdot 10 = -82,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{xx,re} = \frac{N_{re}}{A} = \frac{-3488}{244,80} \cdot 10 = -142,5 \text{ N/mm}^2$$

Ermittlung der Spannungsverläufe in den Achtelpunkten

$$b_x = 954 \text{ mm}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$A_x = -t \cdot \left(x + \frac{b_x}{2}\right) \cdot \left(\frac{b_x - 2 \cdot x}{4}\right)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{M_y}{I_{ys}} \cdot x$$

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot x + b_x}{2 \cdot b_x} \cdot (\sigma_{xx,re} - \sigma_{xx,li}) + \sigma_{xx,li}$$

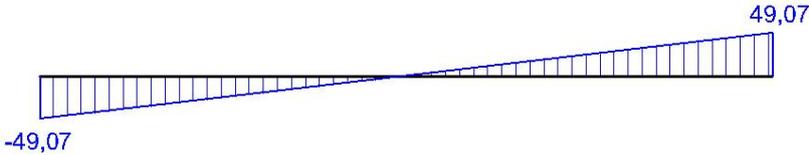
$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{zz} + 3 \cdot \tau_{xz}^2}$$

x	Ax [cm ³]	τ_{xz} [N/mm ²]	σ_{zz} [N/mm ²]	σ_{xx} [N/mm ²]	σ_V [N/mm ²]
-47,69	0,00	0,00	-49,07	-82,24	71,66
-35,77	-1990,12	25,37	-36,80	-89,77	89,67
-23,85	-3411,63	43,49	-24,53	-97,30	115,57
-11,92	-4264,54	54,37	-12,27	-104,83	136,83
0,00	-4548,84	57,99	0,00	-112,36	150,71
11,92	-4264,54	54,37	12,27	-119,89	157,68
23,85	-3411,63	43,49	24,53	-127,43	160,13
35,77	-1990,12	25,37	36,80	-134,96	162,68
47,69	0,00	0,00	49,07	-142,49	172,34

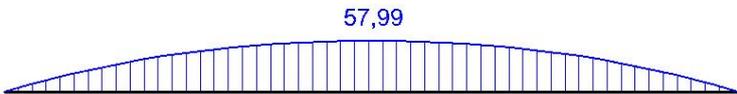
Tabelle A-07: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf

Grafische Darstellung der Ergebnisse

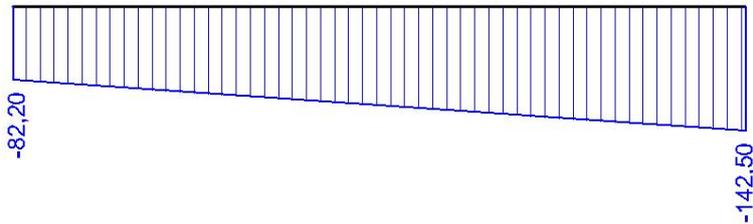
σ_z [N/mm²]



τ_{xz} [N/mm²]



σ_x [N/mm²]



σ_v [N/mm²]

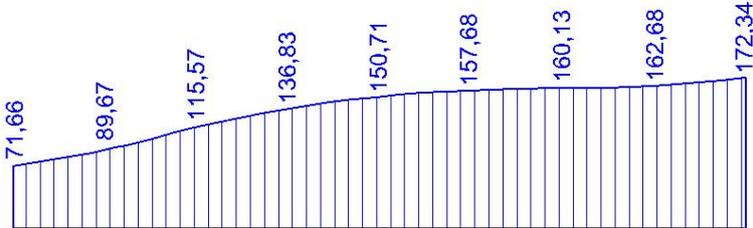


Abbildung A-20: Ergebnisse des Ingenieurmodells

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

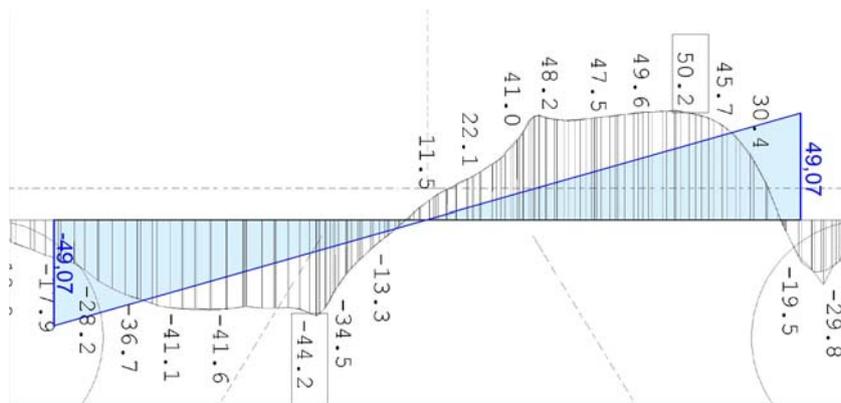


Abbildung A-21: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

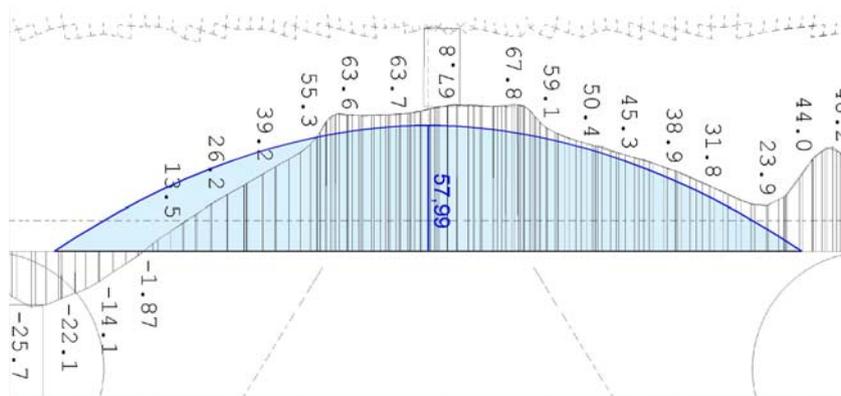


Abbildung A-22: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

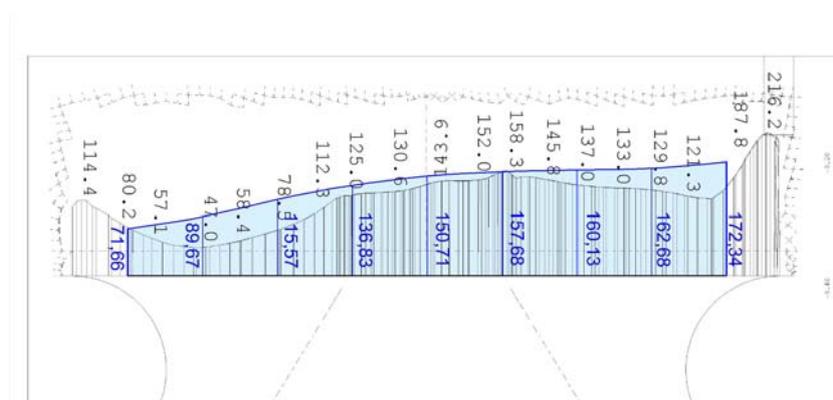


Abbildung A-23: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

- Ergebnisse des Ingenieurmodells
- Ergebnisse der FE-Berechnung

Abbildung A-24: Legende

Interpretation der Ergebnisse

In den Abbildungen A-21 bis A-24 sieht man, dass der Verlauf der Spannungen zufolge des Ingenieurmodells vom wirklichkeitsnäheren Ergebnis zufolge FE-Analyse, über den Verlauf des Schnittes 2-2 mitunter stärker abweicht als bei Schnitt 1-1. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache, dass der Spannungszustand durch die Haupttragwirkung des Obergurtes beeinflusst wird.

Trotz den Abweichungen in den Verläufen, liegen die Maximalwerte der beiden Berechnungsmethoden nahe zusammen. Der Maximalwert der Normalspannungen deckt sich fast genau. Die Schubspannungen zufolge der FE-Berechnung sind ungefähr 15% größer als jene zufolge der analytischen Ergebnisse. Der Extremwert der Vergleichsspannung liegt innerhalb der angesetzten Breite des Schnittes 2-2 auf der sicheren Seite. Außerhalb des Schnittes ergeben sich größere Abweichungen hinsichtlich der Schub- und Vergleichsspannung. Die dort im FE-Modell auftretenden Schubspannungen resultieren aus der Geometrie der Ausrundung und können durch das Ingenieurmodell nicht vollständig erfasst werden.

4.3) Schnitt 3-3

Vertikalschnitt durch den Knoten

Ingenieurmodell

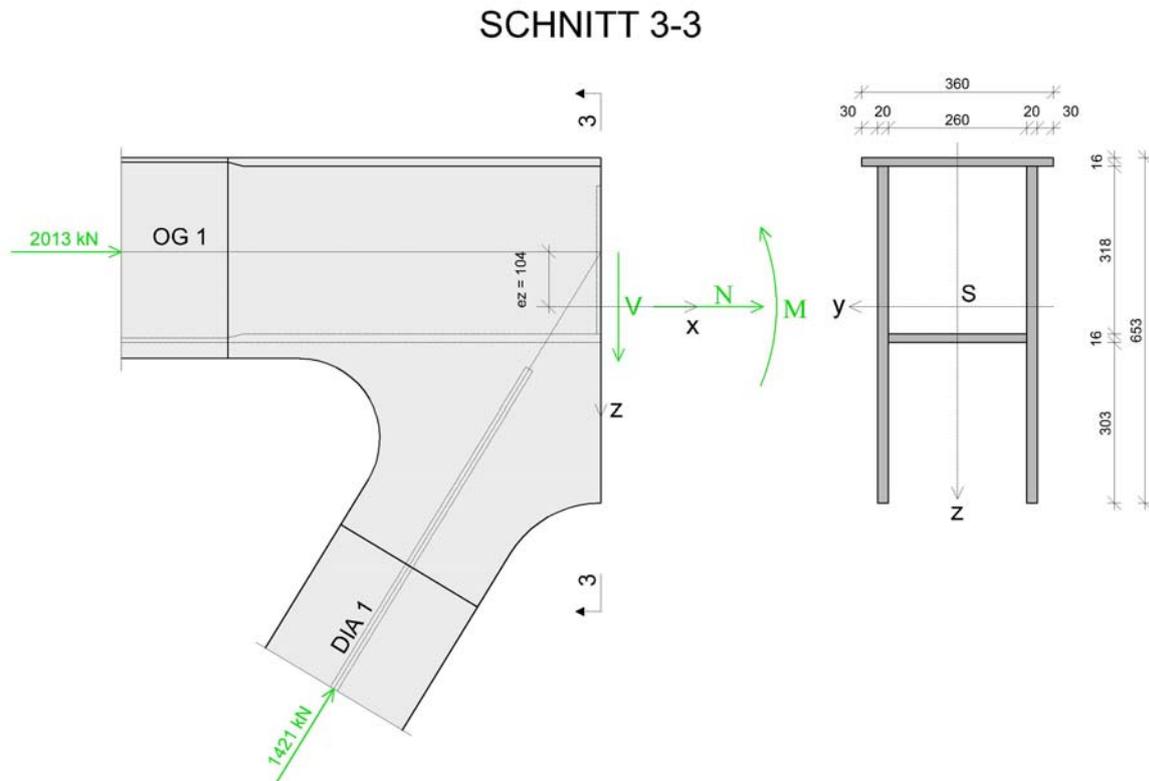


Abbildung A-25: Darstellung der Geometrie für Schnitt 3-3

In Abbildung A-25 ist der für den Schnitt 3-3 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls ersichtlich.

Ermittlung der Querschnittswerte

Schwerpunktsermittlung

Der Koordinatenursprung der z-Achse liegt an der Obergurtoberkante.

i	A _i [cm ²]	z _i [cm]	A _i * z _i [cm ³]
Flansch o.	57,60	0,80	46,08
Steg li.	127,40	33,45	4261,53
Steg re.	127,40	33,45	4261,53
Flansch u.	41,60	34,20	1422,72
Summe	354,00		9991,86

Tabelle A-08: Schwerpunktsermittlung Schnitt 3-3

$$z_s = \frac{\sum_i A_i \cdot z_i}{\sum_i A_i} = 28,2 \text{ cm}$$

Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

i	A _i [cm ²]	z _s [cm]	A _i * z _s ² [cm ⁴]	I _{ys} [cm ⁴]
Flansch o.	57,60	-27,43	43324,60	12,29
Steg li.	127,40	5,22	3477,31	43079,14
Steg re.	127,40	5,22	3477,31	43079,14
Flansch u.	41,60	5,97	1484,85	8,87
Summe	354,0		51764	86179

Tabelle A-09: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

$$I_{ys} = 51764 + 86179 = 137943 \text{ cm}^4$$

$$z_{\max} = 37,02 \text{ cm}$$

$$W_{z,\text{unten}} = 137943 / 37,02 = 3726 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen

$$N = -F_{x,OG1} - F_{x,DIA1} = -2013 - 737,50 = -2750,5 \text{ kN}$$

$$V = -F_{z,DIA1} = 1215 \text{ kN}$$

$$|M| = F_{x,OG1} * e_z = 2750,5 * 10,4 = 28607 \text{ kNcm}$$

Ermittlung der Spannungen

Ermittlung des statischen Moments

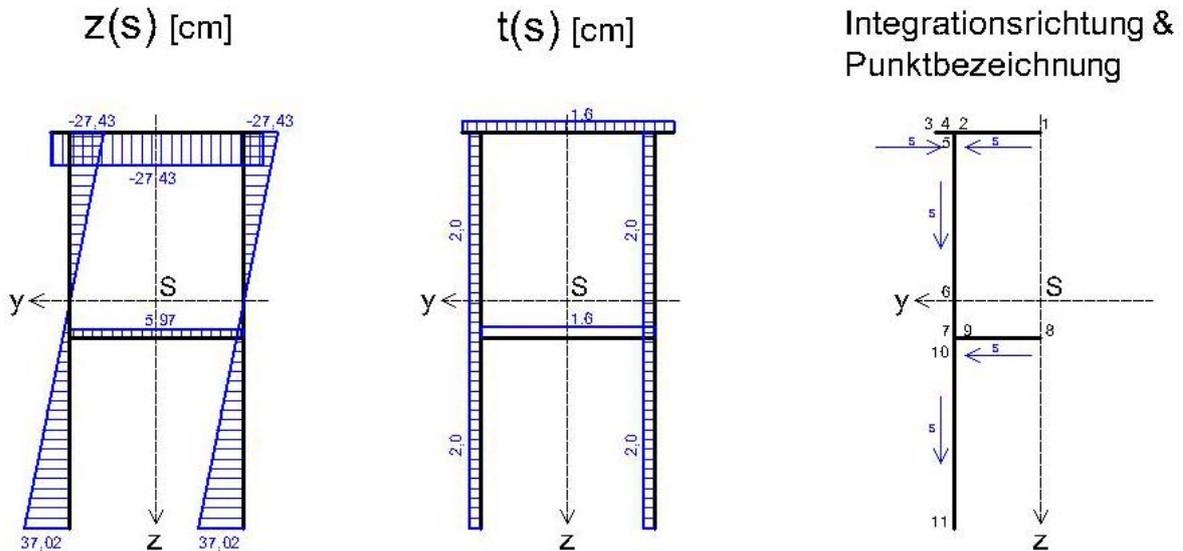


Abbildung A-26: Vorwerte zur Berechnung des Statischen Momentes

In Abbildung A-26 sind die Verläufe der Querschnittsparameter z und der jeweiligen Blechstärke t abgebildet. Daneben sind die für die Berechnung des statischen Momentes verwendete Integrationsrichtung und die Punktbezeichnung dargestellt.

$$A_{z,1} = 0$$

$$A_{z,2} = -27,43 \cdot 1,6 \cdot 14 = -614,43 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,3} = 0$$

$$A_{z,4} = -27,43 \cdot 1,6 \cdot 3,0 = -131,66 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,5} = A_{z,2} + A_{z,4} = -746,10 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,6} = -746,10 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (-27,43) \cdot 27,43 = -1498,50 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,7} = -1498,50 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 5,97^2 = -1462,86 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,8} = 0$$

$$A_{z,9} = 5,97 \cdot 1,6 \cdot 14 = 133,73 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,10} = A_{z,7} + A_{z,9} = -1329,13 \text{ cm}^3$$

$$A_{z,11} = A_{z,10} + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (5,97 + 37,02) \cdot 31,05 = 0$$

Az(s) [cm]

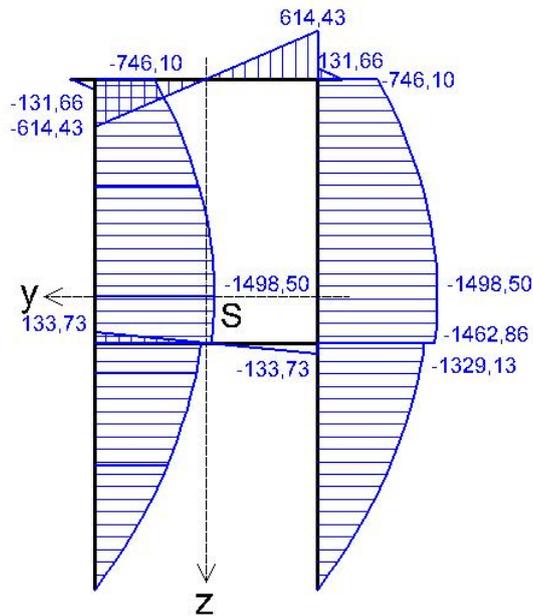


Abbildung A-27: Verlauf des statischen Momentes

Schubspannungsermittlung

$$T = -\frac{V_z \cdot A_z}{I_y} \quad \tau = \frac{T}{t}$$

Pkt.	Az [cm ³]	t [cm]	T [N/mm]	τ [N/mm ²]
1	0,00	1,60	0,00	0,00
2	-614,43	1,60	541,06	33,82
3	0,00	1,60	0,00	0,00
4	-131,66	1,60	115,94	7,25
5	-746,10	2,00	657,00	32,85
6	-1498,50	2,00	1319,56	65,98
7	-1462,86	2,00	1288,17	64,41
8	0,00	1,60	0,00	0,00
9	133,73	1,60	-117,76	-7,36
10	-1329,13	2,00	1170,41	58,52
11	0,00	2,00	0,00	0,00

Tabelle A-10: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes

Ermittlung von Normal- und Vergleichsspannung

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Pkt.	z	σ [N/mm ²]	σ_V [N/mm ²]
1	-27,43	-134,59	134,59
2	-27,43	-134,59	146,78
3	-27,43	-134,59	134,59
4	-27,43	-134,59	135,17
5	-27,43	-134,59	146,12
6	0,00	-77,70	138,19
7	5,97	-65,32	129,28
8	5,97	-65,32	65,32
9	5,97	-65,32	66,55
10	5,97	-65,32	120,59
11	37,02	-0,93	0,93

Tabelle A-11: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes

Grafische Darstellung der Ergebnisse

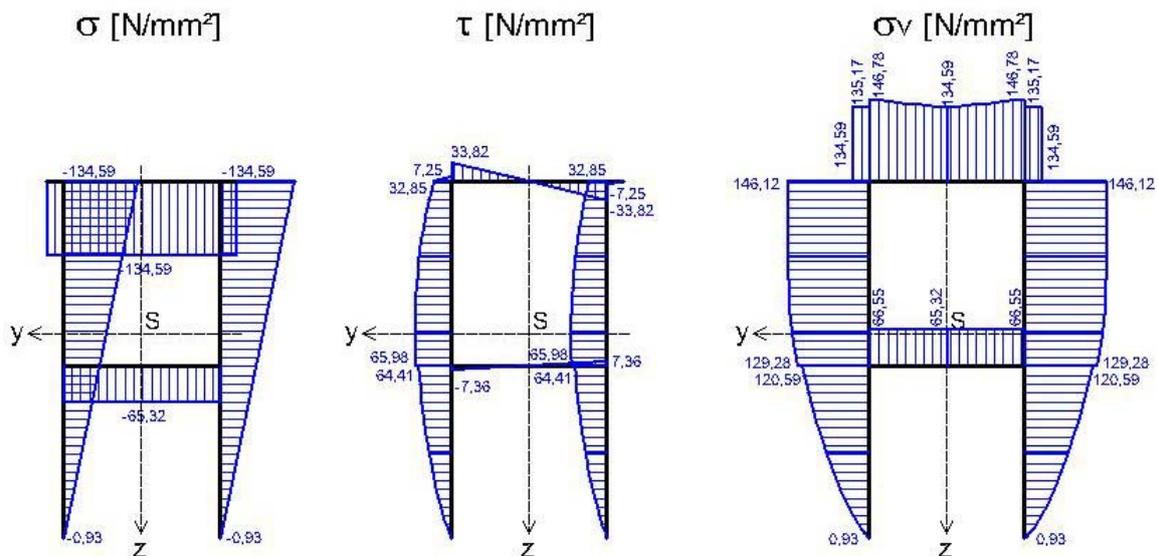


Abbildung A-28: Ergebnisse des Ingenieurmodells

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

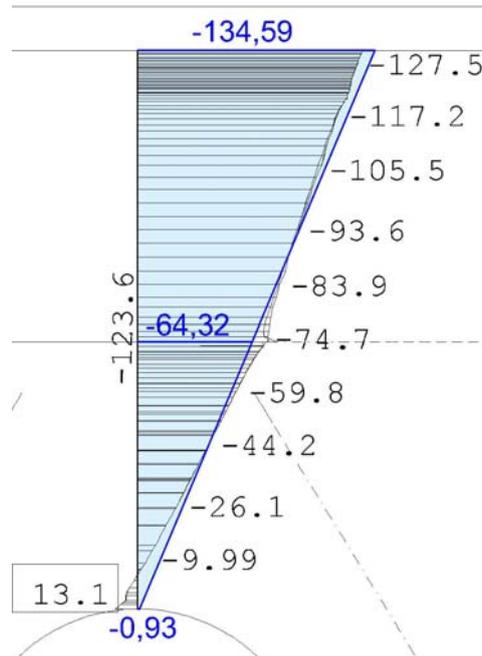


Abbildung A-29: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

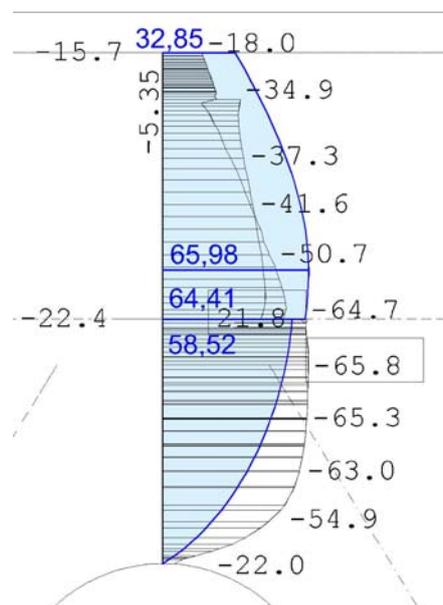


Abbildung A-30: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

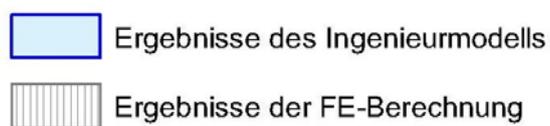


Abbildung A-31: Legende

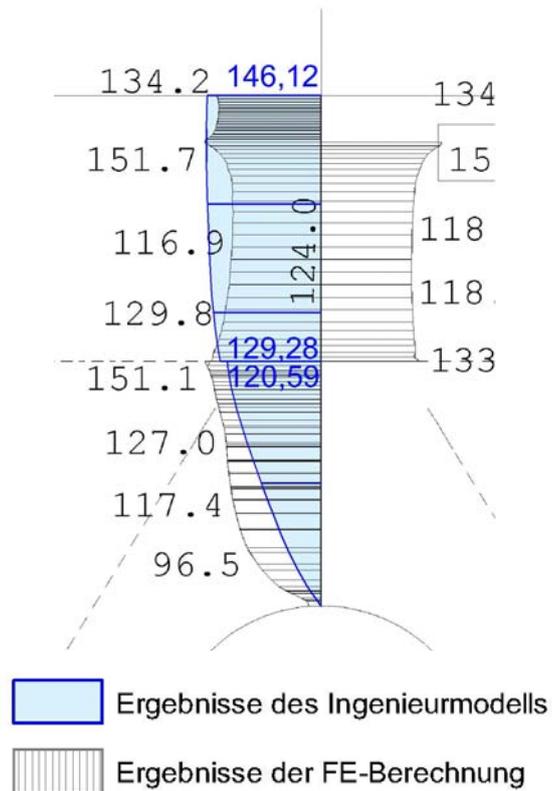


Abbildung A-32: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

In den Abbildungen A-29 bis A-32 kann man erkennen, dass die beiden Berechnungsmethoden für Schnitt 3-3 gut übereinstimmende Ergebnisse liefern. Lediglich bei Betrachtung der Schubspannungen sind größere Unterschiede im Ergebnisverlauf ersichtlich. Die Ergebnisabweichungen hinsichtlich der Maximalwerte für die einzelnen Spannungen liegen im Bereich von 10%.

A2) Biegemoment- und Querkraftbeanspruchung

1) Knotendetail

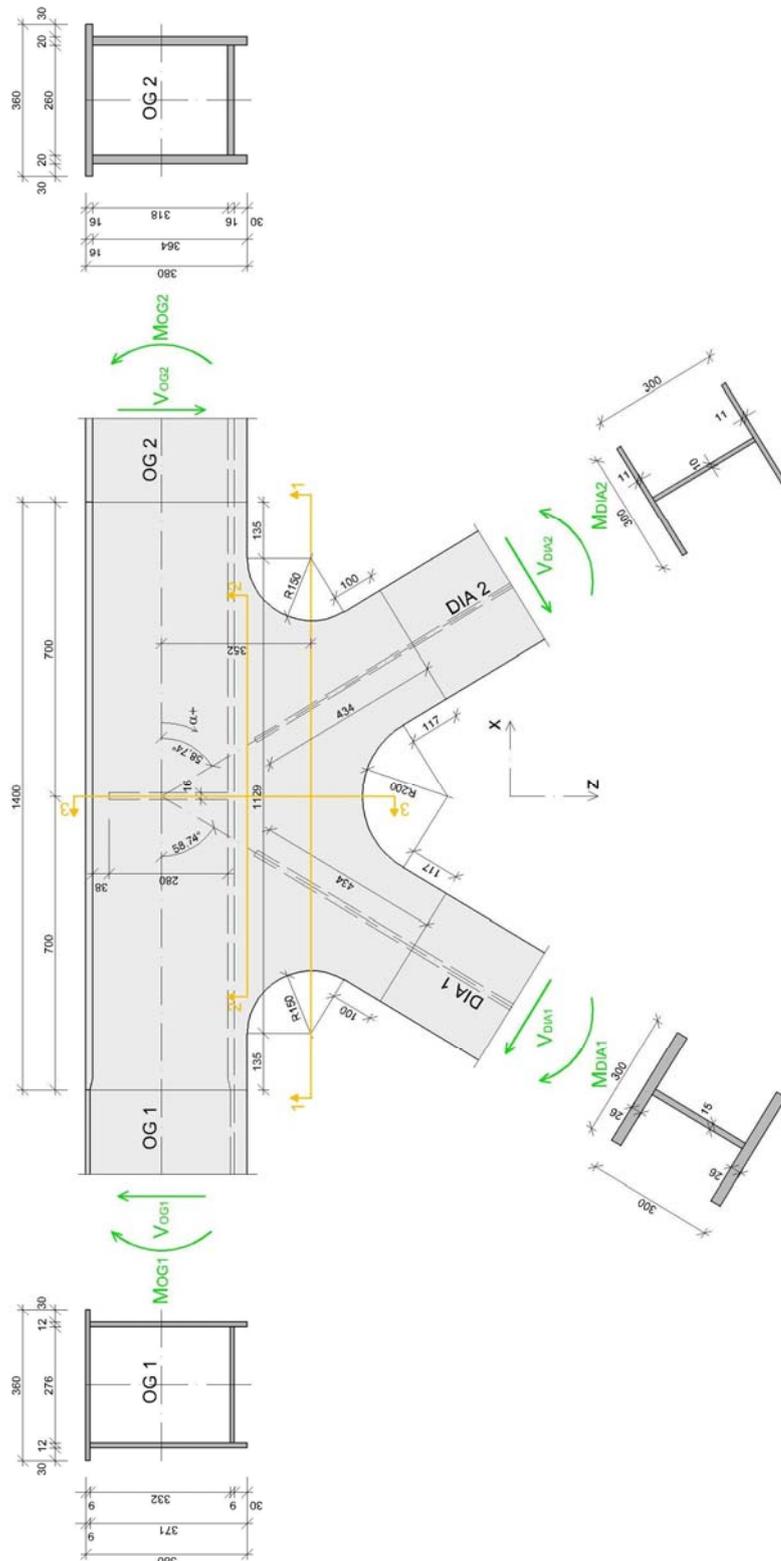


Abbildung A-33: Knotendetail mit Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung

Abbildung A-33 zeigt das betrachtete Knotendetail und die angreifenden Momente und Querkräfte, sowie das gewählte Koordinatensystem und die maßgebenden Schnittführungen. Zusätzlich sind die gewählten Stabbezeichnungen und die Laufrichtung des Winkels α , der in die folgende Tabelle A-12 eingeht, eingetragen. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um Baustahl S 355 J0.

2) Einwirkende Schnittgrößen

$$F_x = V \cdot \cos(\alpha + 90^\circ) + N \cdot \cos \alpha$$

$$F_z = V \cdot \sin(\alpha + 90^\circ) + N \cdot \sin \alpha$$

Bez.	α [°]	M [kNm]	V [kN]	N [kN]	F _x [kN]	F _z [kN]
OG 1	180,00	40,00	9,41	0,00	0,00	-9,41
OG 2	0,00	-20,00	9,41	-12,53	-12,53	9,41
DIA 1	121,26	-30,00	-7,33	0,00	6,26	3,80
DIA 2	58,74	30,00	-7,33	0,00	6,26	-3,80

Tabelle A-12: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten

Die Kräfte F_x und F_z stellen den Anteil der Normal- und Querkräfte in x bzw. z-Richtung dar.

3) Modell und Randbedingungen

Die angreifenden Momente und Querkräfte werden mit Hilfe von Linienlasten gleichmäßig in die Konstruktion eingeleitet. Als Randbedingung wird die Einspannung von Obergurt OG 2 am rechten Rand gewählt. Diese wird durch Festhaltung der Knoten in alle drei Raumrichtungen realisiert. Die Beanspruchung des rechten Obergurtstabes ergibt sich als resultierende Auflagerreaktion.

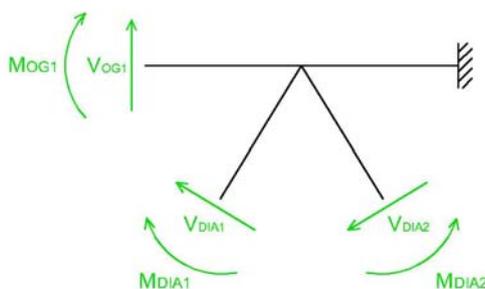


Abbildung A-34: Schematische Darstellung der Randbedingungen

4) Berechnung

Die Berechnung der Spannungen erfolgt in denselben Schnitten, wie bei der Analyse des normalkraftbeanspruchten Bauteils. Demzufolge können sämtliche Querschnittswerte den vorangegangenen Berechnungen entnommen werden.

4.1) Schnitt 1-1

Nachweis des Knotenbleches an der schmalsten Stelle. Aufgrund der geringen einwirkenden Querkkräfte und der guten Übereinstimmung unter Normalkraftbeanspruchung wird nur Ingenieurmodell 2 bei der Berechnung behandelt.

Ingenieurmodell

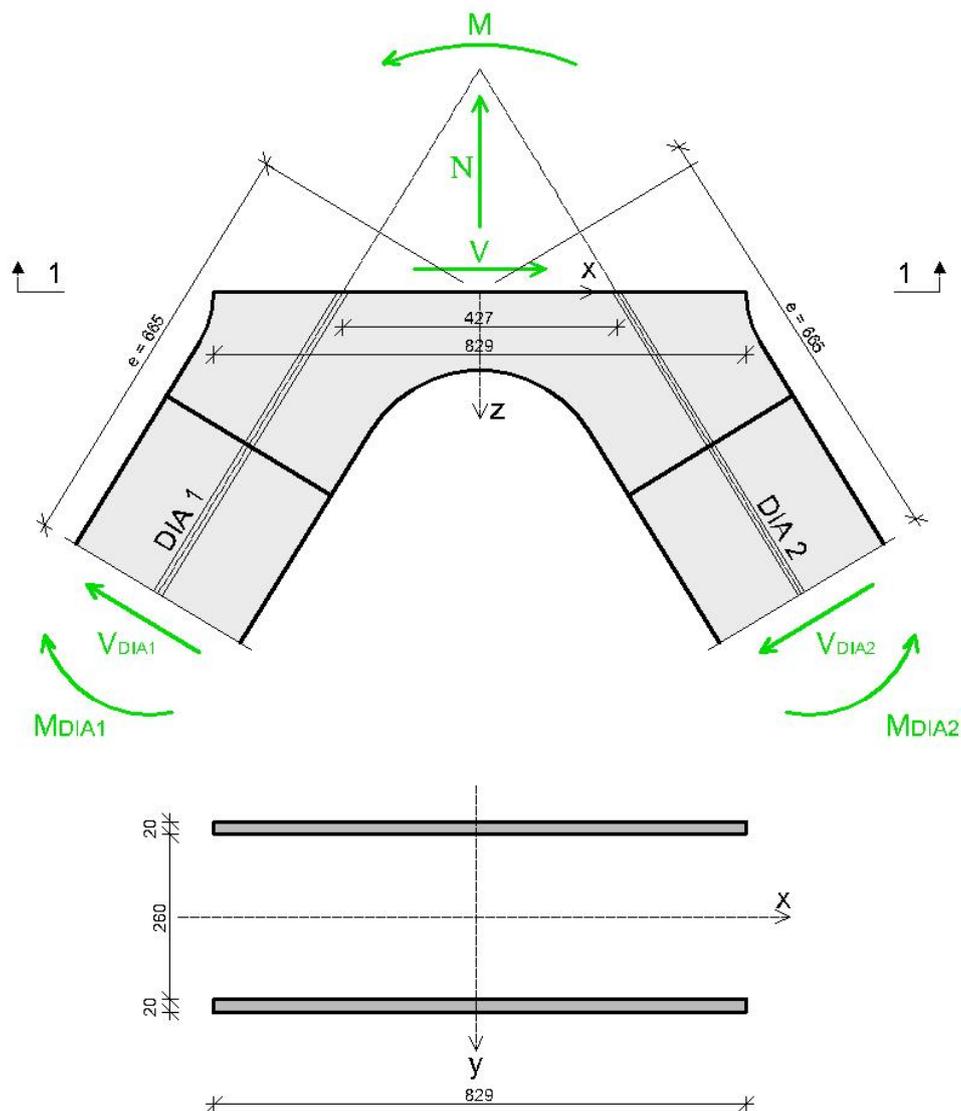


Abbildung A-35: Darstellung der Geometrie für Schnitt 1-1

In Abbildung A-35 ist der für das gewählte Ingenieurmodell im Schnitt 1-1 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls eingetragen.

Ermittlung der Querschnittswerte

$$I_{ys} = 190069 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 4584 \text{ cm}^3$$

$$A_{x,\max} = 3438,1 \text{ cm}^2$$

Ermittlung der Schnittgrößen

$$F_{z,\text{DIA1}} = -F_{z,\text{DIA2}} \Rightarrow N = 0$$

$$V_x = F_{x,\text{DIA1}} + F_{x,\text{DIA2}} = 6,26 + 6,26 = 12,52 \text{ kN}$$

Normalabstand Querkraft – Querschnittsschwerpunkt: $e = 66,5 \text{ cm}$

$$M_y = M_{\text{DIA1}} - M_{\text{DIA2}} + (V_{\text{DIA1}} + V_{\text{DIA2}}) \cdot e = -30 - 30 - 2 \cdot 7,33 \cdot 0,665 = -69,75 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{6975 \cdot 10^4}{4584 \cdot 10^3} = \pm 15,21 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$\tau_{xz,\max} = \frac{12,52 \cdot 10^3 \cdot 3438160}{190069 \cdot 10^4 \cdot 40} = 0,57 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Ermittlung der Spannungsverläufe in den Achtelpunkten

$$b_x = 829\text{mm}$$

$$t = 40\text{mm}$$

$$A_x = -t \cdot \left(x + \frac{b_x}{2}\right) \cdot \left(\frac{b_x - 2 \cdot x}{4}\right)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$\sigma_z = \frac{M_y}{I_{ys}} \cdot x$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

x	Ax [cm ³]	τ [N/mm ²]	σ_z [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
-41,46	-0,00	0,00	15,21	15,21
-31,10	-1504,20	0,25	11,41	11,42
-20,73	-2578,62	0,42	7,61	7,64
-10,37	-3223,28	0,53	3,80	3,91
0,00	-3438,16	0,57	0,00	0,98
10,37	-3223,28	0,53	-3,80	3,91
20,73	-2578,62	0,42	-7,61	7,64
31,10	-1504,20	0,25	-11,41	11,42
41,46	-0,00	0,00	-15,21	15,21

Tabelle A-13: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf

Grafische Darstellung der Ergebnisse

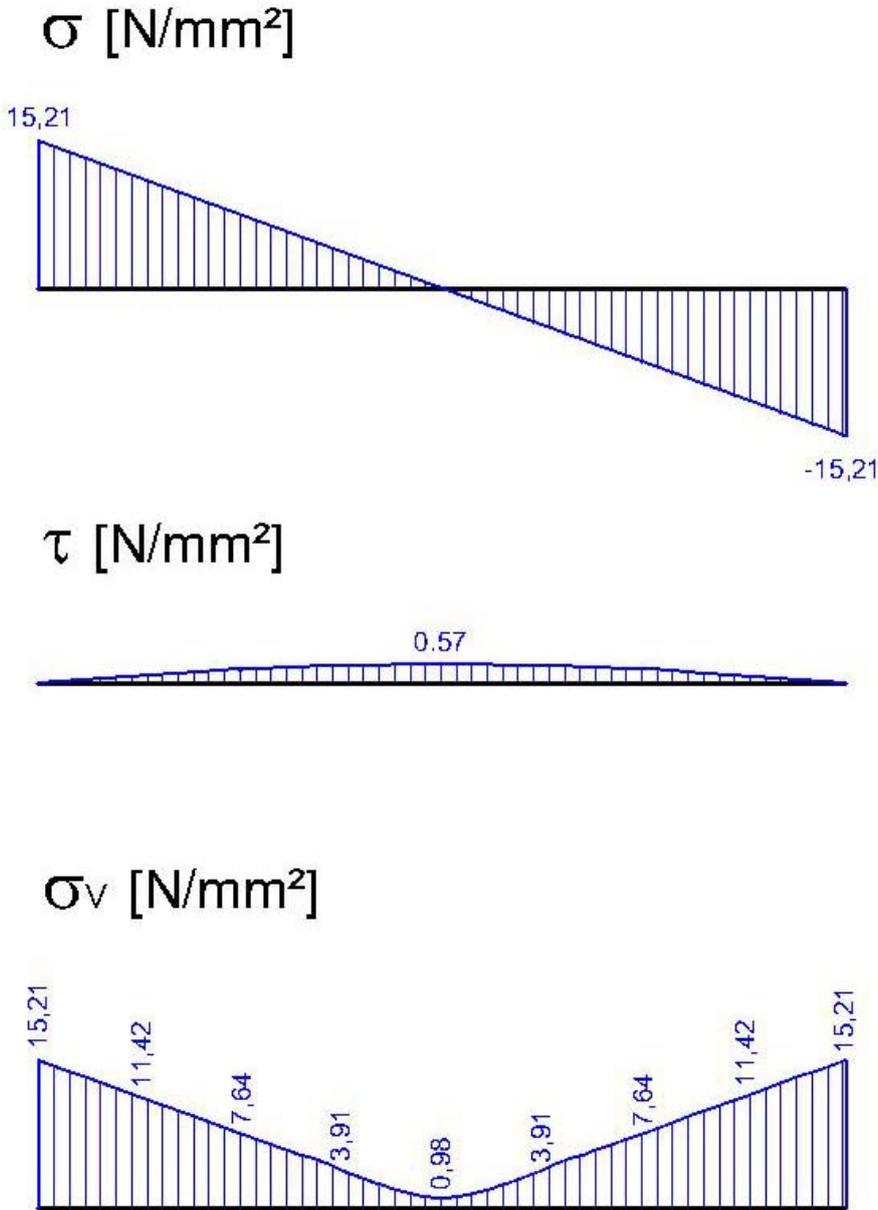


Abbildung A-36: Ergebnisse des Ingenieurmodells

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

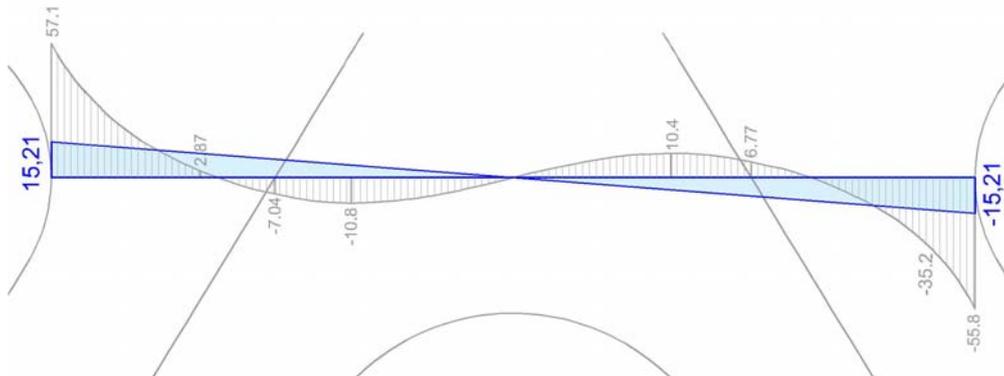


Abbildung A-37: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

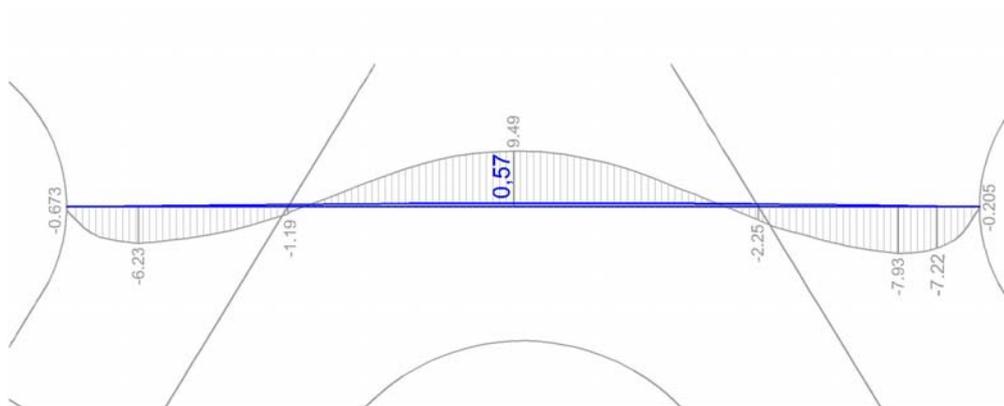


Abbildung A-38: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

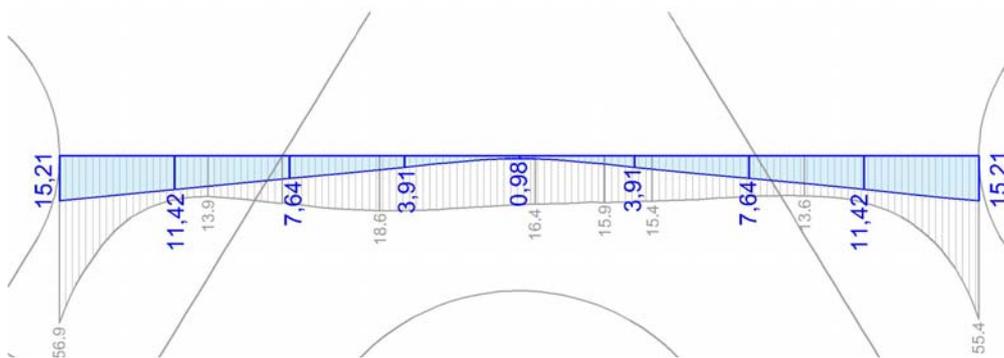


Abbildung A-39: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

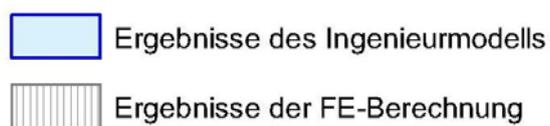
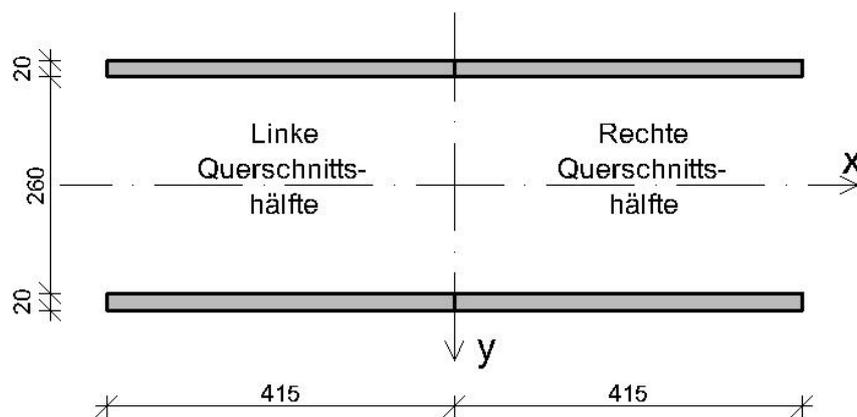


Abbildung A-40: Legende

Interpretation der Ergebnisse

In den Abbildungen A-37 bis A-40 ist ersichtlich, dass große Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Berechnungsmethoden bestehen. Aufgrund dessen wird ein zusätzliches Modell untersucht. Da das System offensichtlich zu „weich“ ist, um die Beanspruchung der Diagonalen bis zum Schnitt 1-1 ausreichend auf den Gesamtquerschnitt zu verteilen, wird der Querschnitt für die Ermittlung der Normalspannung in der Mitte geteilt und zwei Einzelquerschnitte betrachtet.



Einwirkungen



Abbildung A-41: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand

Ermittlung der Schnittgrößen

Linke Querschnittshälfte

$$N = F_{z,DIA1} = 3,80 \text{ kN}$$

$$M_y = 6975 / 2 = 3487,5 \text{ kNcm}$$

Rechte Querschnittshälfte

$$N = F_{z,DIA2} = -3,80 \text{ kN}$$

$$M_y = 6975 / 2 = 3487,5 \text{ kNcm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte

$$A = 166 \text{ cm}^2$$

$$I_{ys} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 41,5^3}{12} = 23824 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 41,5^2}{6} = 1148 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Spannungen

Linke Querschnittshälfte

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{166 \cdot 10^2} + \frac{3487,5 \cdot 10^4}{1148 \cdot 10^3} = 30,66 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{166 \cdot 10^2} - \frac{3487,5 \cdot 10^4}{1148 \cdot 10^3} = -30,20 \text{ N/mm}^2$$

Rechte Querschnittshälfte

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{166 \cdot 10^2} + \frac{3487,5 \cdot 10^4}{1148 \cdot 10^3} = 30,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{166 \cdot 10^2} - \frac{3487,5 \cdot 10^4}{1148 \cdot 10^3} = -30,66 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

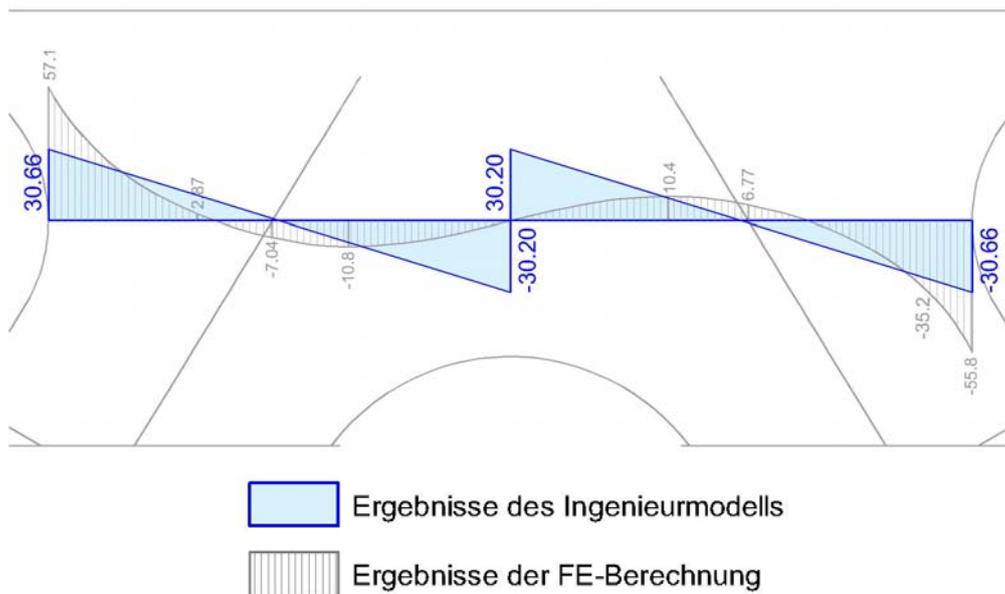
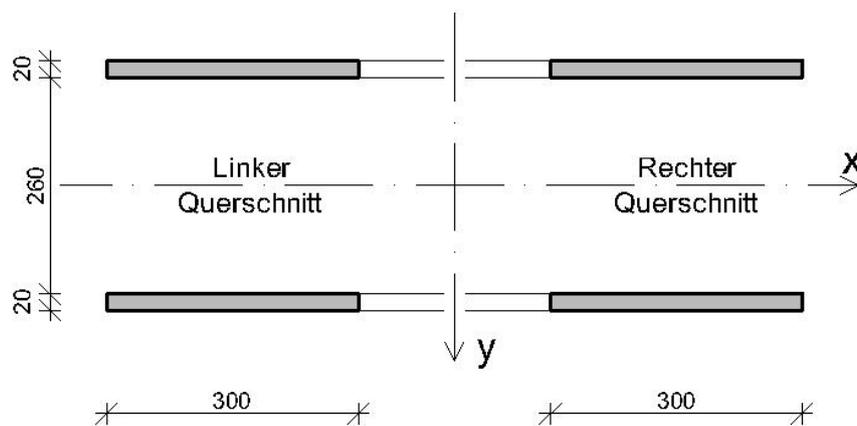


Abbildung A-42: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Sogar bei dieser vorsichtigen Annahme liegen die Randspannungen laut FE-Analyse oberhalb der Ergebnisse zufolge der ingenieurmäßigen Berechnung. Es zeigt sich, dass die Randspannungen kaum durch die Querschnittsaufweitung abgebaut werden können. Nur in der Querschnittsmitte kommt es zu einem Spannungsausgleich.

Aus den bisherigen Untersuchungen ergibt sich ein erweitertes Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand, indem man die auf die jeweilige Querschnittsseite wirkende Belastung auf einen Querschnitt mit der Gurtbreite der Diagonalen bezieht. Dies wird als drittes Modell untersucht.



Einwirkungen



Abbildung A-43: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand

Ermittlung der Schnittgrößen:

$$N = \pm 3,80 \text{ kN}$$

$$M_y = \frac{6975}{2} = 3487,5 \text{ kNcm}$$

Ermittlung der Querschnittswerte:

$$A = 2 \cdot 2 \cdot 30 = 120 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 30^3}{12} = 9000 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 30^2}{6} = 600 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Spannungen

Linker Querschnitt

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} + \frac{3487,5 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = 58,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} - \frac{3487,5 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = -57,81 \text{ N/mm}^2$$

Rechter Querschnitt

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} + \frac{3487,5 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = 57,81 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} - \frac{3487,5 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = -58,44 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

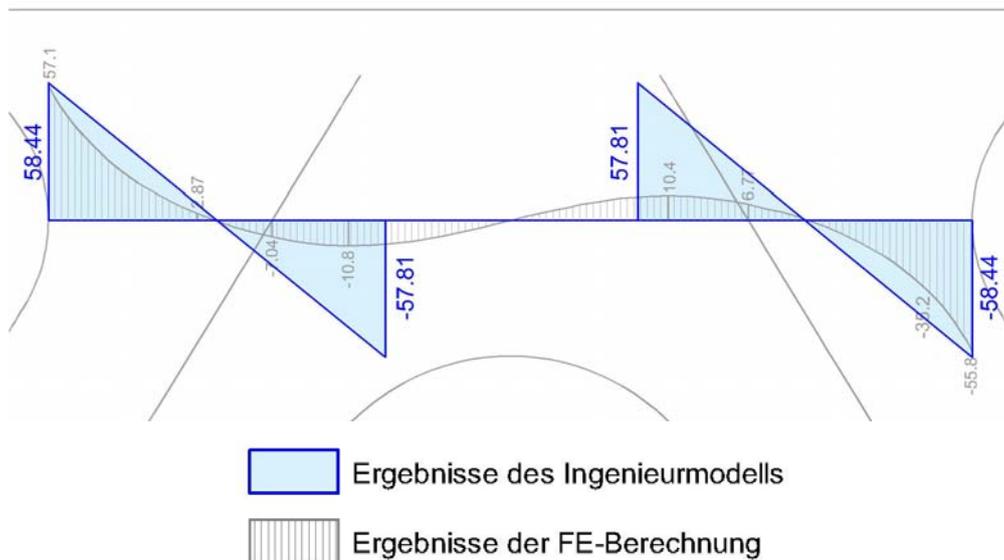


Abbildung A-44: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Der Maximalwert der Normalspannungen kann durch dieses Modell sehr gut abgeschätzt werden. Die Schubspannungen sind vernachlässigbar klein. Somit entspricht die maximale Vergleichsspannung dem Extremwert der Normalspannung.

Hauptspannungen und Plausibilisierung des gewählten Modells

Zuerst erfolgt die näherungsweise Ermittlung der Zugzonenbreite aus den Hauptspannungstrajektorien.

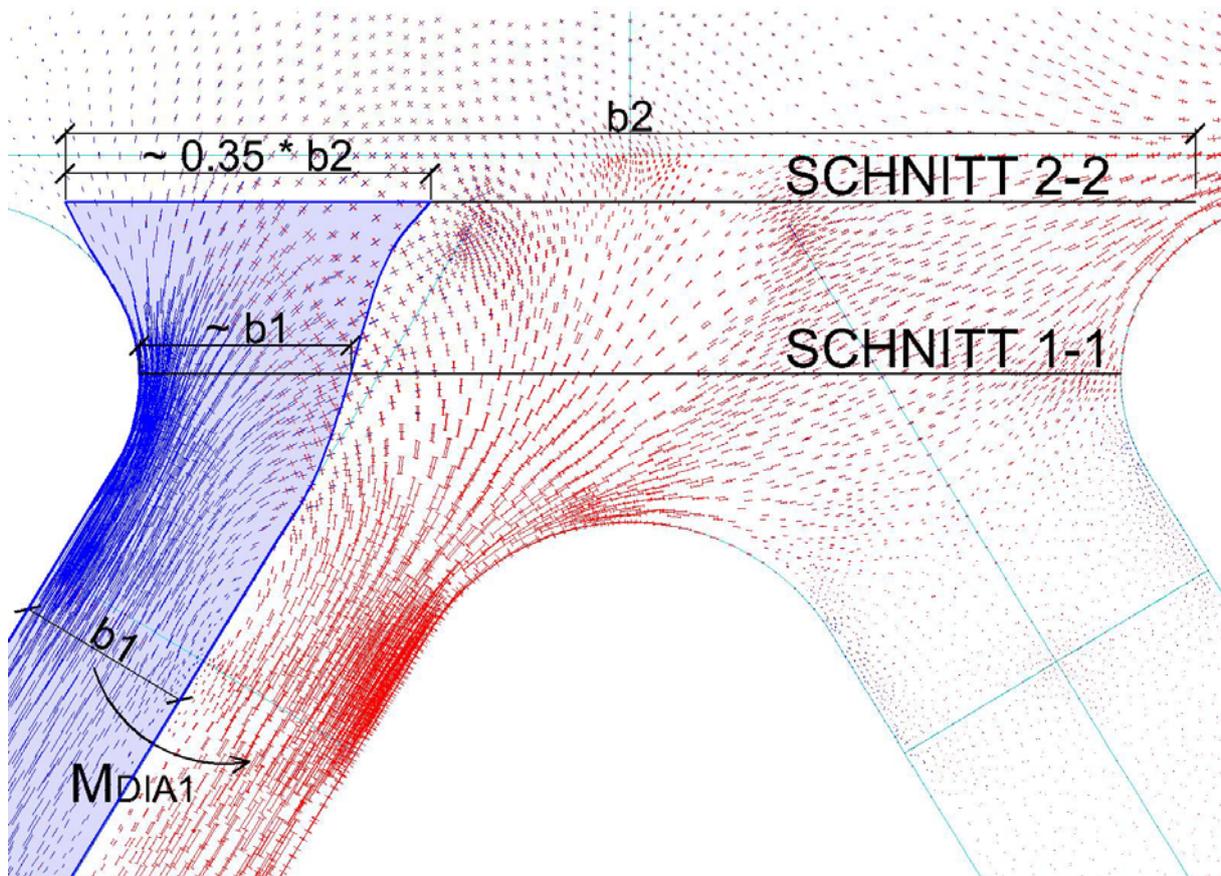


Abbildung A-45: Hauptspannungen und Zugzone bei Wirkung von M_{DIA1}

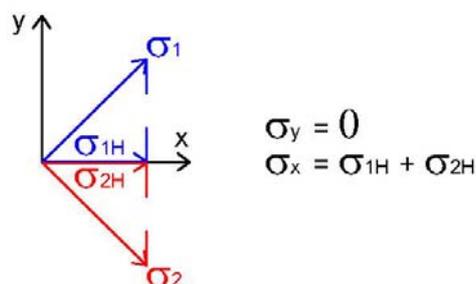


Abbildung A-46: Aufhebung der Spannungskomponente in y-Richtung

Jene Punkte der Konstruktion für die sich die Spannungskomponente in y-Richtung analog Abbildung A-46 annähernd aufhebt werden mit grünen Kreisen (siehe Abbildung A-47) markiert. Anschließend wird eine Ausgleichskurve durch die markierten Punkte gelegt und so die jeweilige Zugzonenbreite bestimmt.

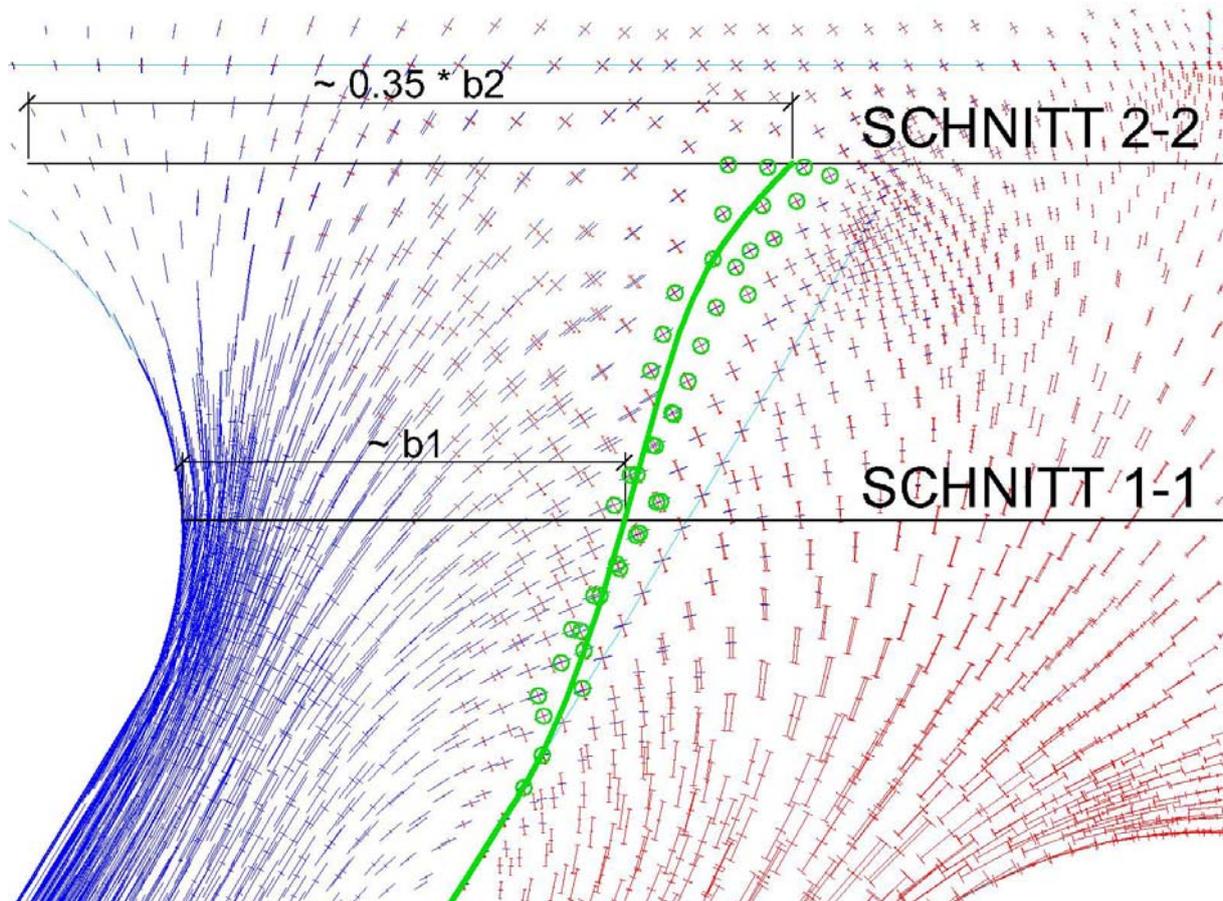


Abbildung A-47: Ermittlung der Zugzonenbreite

Bei Betrachtung der Hauptspannungstrajektorien zeigt sich, dass die Randspannungen bis zu Schnitt 1-1 kaum abgebaut werden können. Die Zugspannungen wirken auf eine etwa konstante Breite b_1 , die halbe Diagonalenbreite. Durch Verdoppelung der ermittelten Zugzonenbreite erhält man den für die Berechnungen herangezogenen Querschnitt mit der Breite der Diagonale. Dieses Modell liegt auf der sicheren Seite, da die Querschnittsaufweitung zu keiner Spannungserhöhung führen wird. Erst bis Schnitt 2-2 ergibt sich eine Verteilung auf größere Querschnittsbereiche.

4.2) Schnitt 2-2

Nachweis des Knotenbleches mit Druckspannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes.

Ingenieurmodell

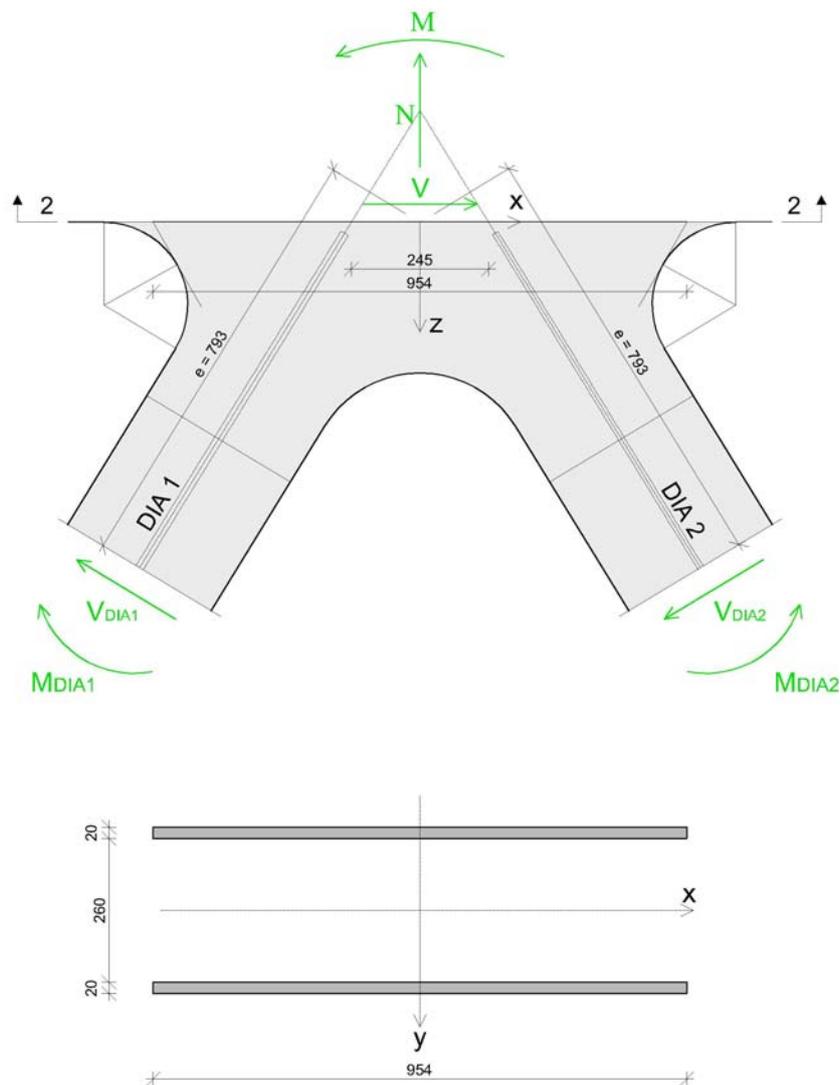


Abbildung A-48: Darstellung der Geometrie für Schnitt 2-2

In Abbildung A-48 ist der für das gewählte Ingenieurmodell im Schnitt 2-2 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls eingetragen. Die Konstruktion der Querschnittsbreite wurde bereits in Abschnitt „B1) Normalkraftbeanspruchung - Unterpunkt 4.2“ erläutert.

Ermittlung der Querschnittswerte

$$I_{ys} = 289251 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 6065 \text{ cm}^3$$

$$A_{x,\max} = 4548,8 \text{ cm}^2$$

Ermittlung der Schnittgrößen

$$F_{z,\text{DIA1}} = -F_{z,\text{DIA2}} \Rightarrow N = 0$$

$$V_x = F_{x,\text{DIA1}} + F_{x,\text{DIA2}} = 6,26 + 6,26 = 12,52 \text{ kN}$$

Normalabstand Querkraft – Querschnittsschwerpunkt: $e = 79,3 \text{ cm}$

$$M_y = M_{\text{DIA1}} - M_{\text{DIA2}} + (V_{\text{DIA1}} + V_{\text{DIA2}}) \cdot e = -30 - 30 - 2 \cdot 7,33 \cdot 0,793 = -71,63 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{7163 \cdot 10^4}{6065 \cdot 10^3} = \pm 11,81 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$\tau_{xz,\max} = \frac{12,52 \cdot 10^3 \cdot 454800}{289251 \cdot 10^4 \cdot 40} = 0,49 \text{ N/mm}^2$$

Vereinfachte Annahmen zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung:

Es werden die Spannungen zufolge der einwirkenden Obergurtmomente auf Höhe von Schnitt 2-2 ermittelt. Dazu wird der Obergurtquerschnitt mit den Blechstärken des Knotenbereichs herangezogen. Die Vergrößerung der Steghöhe innerhalb des Knotenbereichs wird vernachlässigt. Da OG1 und OG2 jeweils unterschiedliche Biegemomentenbeanspruchung aufweisen, wird zwischen den beiden sich ergebenden Spannungswerten links und rechts von Knoten linear interpoliert.

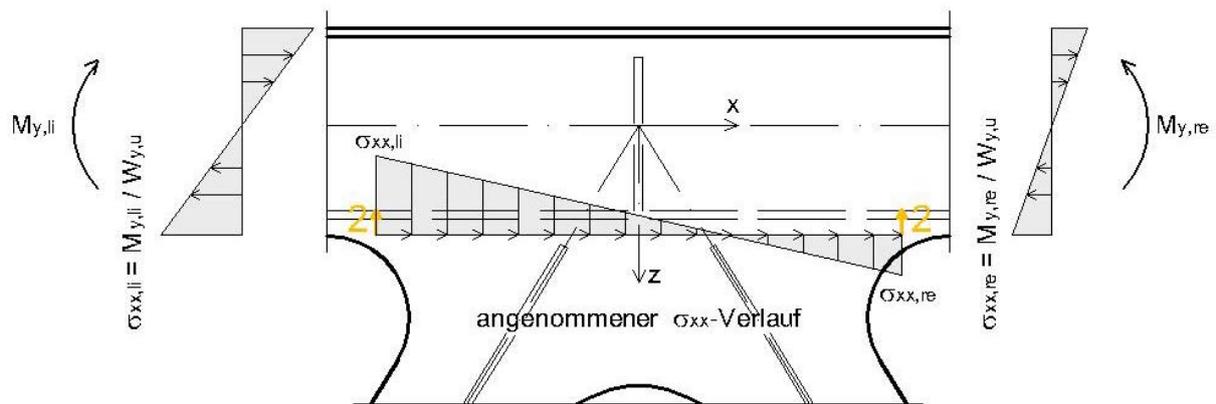


Abbildung A-49: Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes

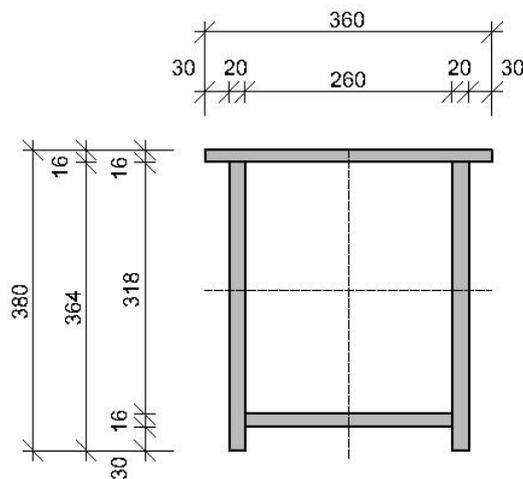


Abbildung A-50: Querschnitt zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung

Schwerpunktsermittlung

Der Koordinatenursprung der z-Achse liegt am oberen Querschnittsrand.

Bez	A _i	z _i	A _i · z _i
Flansch o.	57,60	0,80	46,08
Steg li.	72,80	19,80	1441,44
Steg re.	72,80	19,80	1441,44
Flansch u.	41,60	34,20	1422,72
Summe	244,80	0,00	4351,68

Tabelle A-14: Schwerpunktsermittlung

$$z_s = \frac{\sum_i A_i \cdot z_i}{\sum_i A_i} = 17,78 \text{ cm}$$

Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

Bez	Ai	zsi	Ai * zi ²	Iyi
Flansch o.	57,60	-16,98	16600,35	12,29
Steg li.	72,80	2,02	298,09	8038,09
Steg re.	72,80	2,02	298,09	8038,09
Flansch u.	41,60	16,42	11220,86	8,87
Summe	244,80	0,00	28417,40	16097,34

Tabelle A-15: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment

$$I_{ys} = 28417,40 + 16097,34 = 44514 \text{ cm}^4$$

$$z_{\max} = 20,2 \text{ cm}$$

$$W_{y,\text{unten}} = 44514 / 20,2 = 2201 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{xx,li} = \frac{M_{y,li}}{W_{y,u}} = \frac{4000}{2201} \cdot 10 = 18,17 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{xx,re} = \frac{M_{y,re}}{W_{y,u}} = \frac{-2000}{2201} \cdot 10 = -9,09 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{zz} + 3 \cdot \tau_{xz}^2}$$

Ermittlung der Spannungsverläufe in den Achtelpunkten

$$b_x = 954 \text{ mm}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$A_x = -t \cdot \left(x + \frac{b_x}{2}\right) \cdot \left(\frac{b_x - 2 \cdot x}{4}\right)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{V_x \cdot A_x}{I_{ys} \cdot t}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{M_y}{I_{ys}} \cdot x$$

$$\sigma_{xx} = \frac{2 \cdot x + b_x}{2 \cdot b_x} \cdot (\sigma_{xx,re} - \sigma_{xx,li}) + \sigma_{xx,li}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{zz} + 3 \cdot \tau_{xz}^2}$$

x	Ax [cm ³]	τ_{xz} [N/mm ²]	σ_{zz} [N/mm ²]	σ_{xx} [N/mm ²]	σ_V [N/mm ²]
-47,69	-0,00	0,00	11,81	18,17	15,97
-35,77	-1990,12	0,22	8,86	14,76	12,88
-23,85	-3411,63	0,37	5,90	11,36	9,86
-11,92	-4264,54	0,46	2,95	7,95	7,00
0,00	-4548,84	0,49	0,00	4,54	4,62
11,92	-4264,54	0,46	-2,95	1,13	3,74
23,85	-3411,63	0,37	-5,90	-2,28	5,20
35,77	-1990,12	0,22	-8,86	-5,68	7,78
47,69	0,00	0,00	-11,81	-9,09	10,71

Tabelle A-16: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf

Grafische Darstellung der Ergebnisse

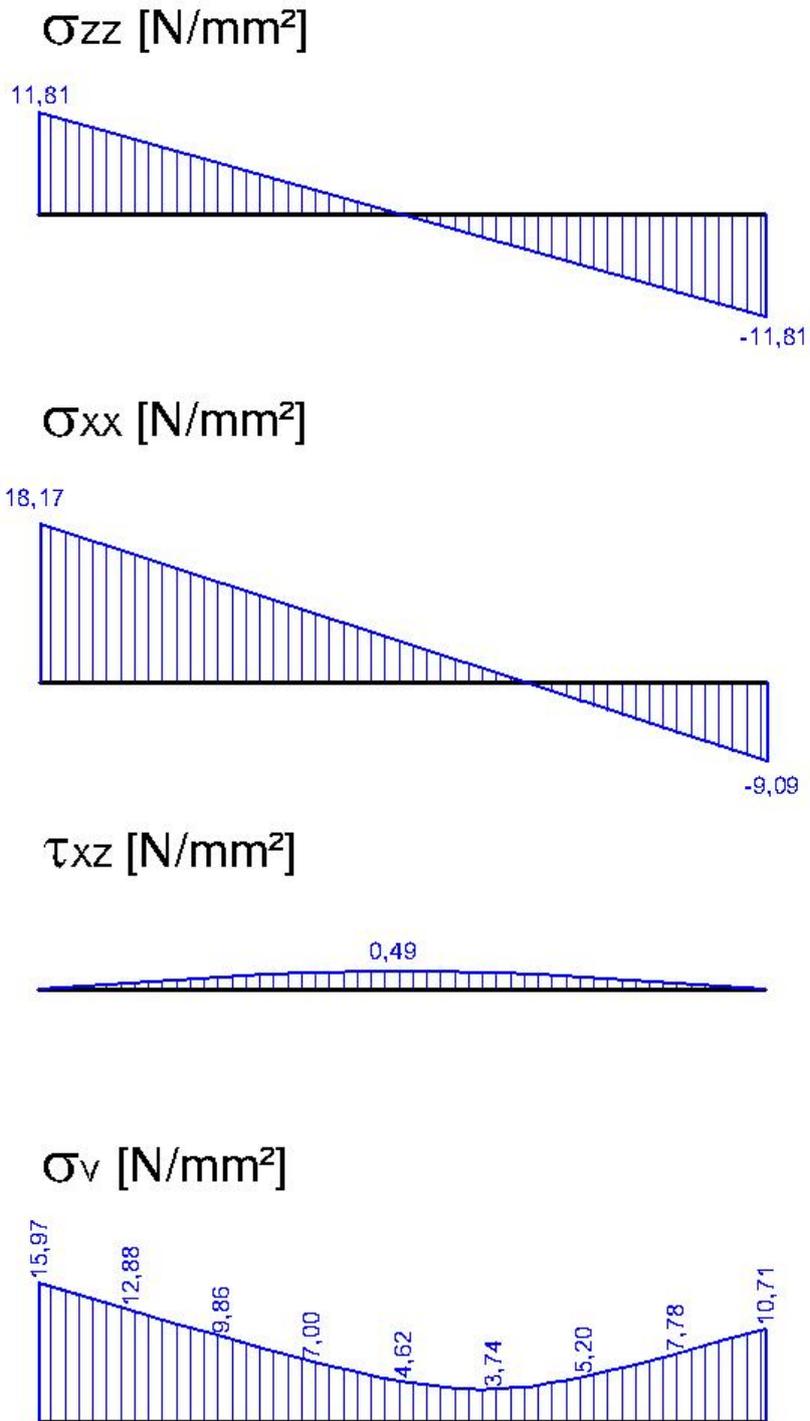


Abbildung A-51: Ergebnisse des Ingenieurmodells

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

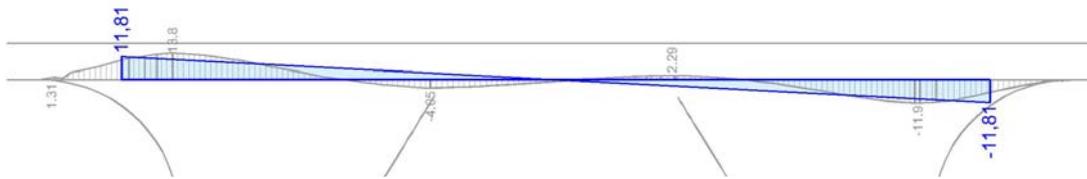


Abbildung A-52: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

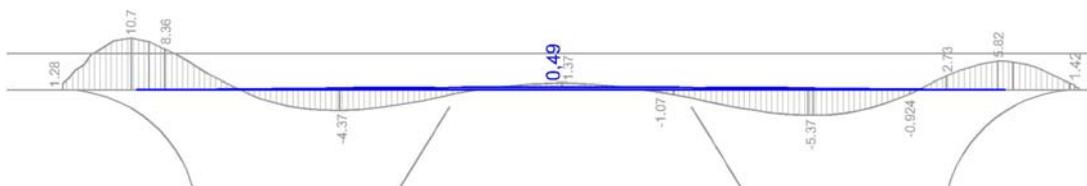


Abbildung A-53: Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

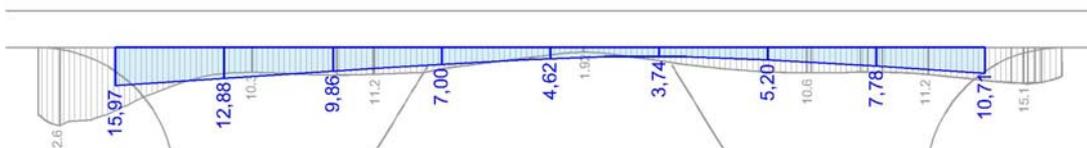


Abbildung A-54: Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

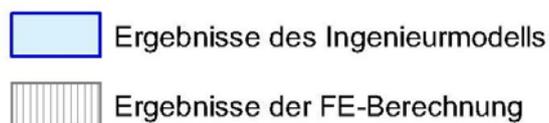


Abbildung A-55: Legende

Interpretation der Ergebnisse

Der Verlauf der Normalspannungen wird durch das gewählte Ingenieurmodell sehr gut angenähert. Im Gegensatz dazu kann der Verlauf der Schubspannungen mit den Methoden der technischen Biegelehre nicht erfasst werden. Für die Vergleichsspannungen ergeben sich an den beiden Enden der Schnittführung lokal größere Abweichungen von bis zu 50%. Im Bereich außerhalb des Schnittes 2-2 steigen die Vergleichsspannungen noch weiter an. Die dort im FE-Modell auftretenden Schubspannungen resultieren aus der Geometrie der Ausrundung und können durch das Ingenieurmodell nicht vollständig erfasst werden.

4.3) Schnitt 3-3

Vertikalschnitt durch den Knoten

Ingenieurmodell

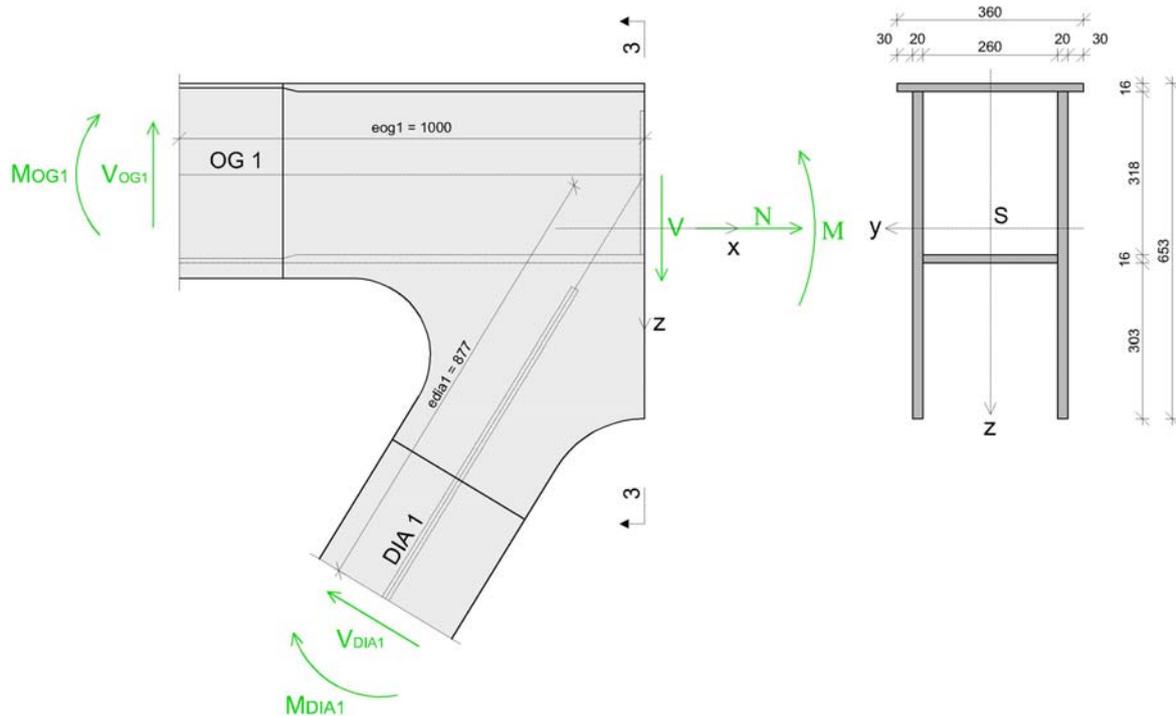


Abbildung A-56: Darstellung der Geometrie für Schnitt 3-3

In Abbildung A-56 ist der für das gewählte Ingenieurmodell im Schnitt 3-3 zur Berechnung herangezogene Querschnitt dargestellt. Weiters sind die Wirkungsrichtungen der angreifenden inneren Kräfte definiert. Die äußeren Kräfte sowie die Koordinatenachsen sind ebenfalls eingetragen.

Ermittlung der Querschnittswerte

$$A = 354\text{cm}^2$$

$$I_{ys} = 137943\text{cm}^4$$

$$W_y = 3726\text{cm}^3$$

$$A_{z,\max} = 1498,5\text{cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen

$$N = -F_{x,DIA1} = -6,26 \text{ kN}$$

$$V_z = V_{OG1} - F_{z,DIA1} = 9,41 - 3,80 = 5,61 \text{ kN}$$

Normalabstände Querkraft – Querschnittsschwerpunkt:

$$e_{OG1} = 100 \text{ cm}, e_{DIA1} = 87,7 \text{ cm}$$

$$M_y = M_{OG1} + M_{DIA1} + V_{OG1} \cdot e_{OG1} + V_{DIA1} \cdot e_{DIA1} = \\ = 40 - 30 + 9,41 \cdot 1,00 - 7,33 \cdot 0,877 = 12,98 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{x,unten} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z = \frac{-6,26}{354} + \frac{1298}{137943} \cdot 37,02 = 0,331 \text{ kN/cm}^2 = 3,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,oben} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z = \frac{-6,26}{354} + \frac{1298}{137943} \cdot (-27,43) = -0,276 \text{ kN/cm}^2 = -2,76 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{xz,max} = -\frac{V_z \cdot A_z}{I_y \cdot b} = -\frac{5,61 \cdot (-1498,5)}{137943 \cdot 2} \cdot 10 = 0,30 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Schubspannungsermittlung

Die Punktbezeichnung gilt analog dem Abschnitt „A1) Normalkraftbeanspruchung“.

$$T = -\frac{V_z \cdot A_z}{I_y} \quad \tau = \frac{T}{t}$$

Pkt.	Ax [cm ³]	t [cm]	T [N/mm]	τ [N/mm ²]
1	0,00	1,60	0,00	0,00
2	-614,43	1,60	2,50	0,16
3	0,00	1,60	0,00	0,00
4	-131,66	1,60	0,54	0,03
5	-746,10	2,00	3,03	0,15
6	-1498,50	2,00	6,09	0,30
7	-1462,86	2,00	5,95	0,30
8	0,00	1,60	0,00	0,00
9	133,73	1,60	-0,54	-0,03
10	-1329,13	2,00	5,41	0,27
11	0,00	2,00	0,00	0,00

Tabelle A-17: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes

Ermittlung der Normal- und Vergleichsspannung

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Pkt.	z	σ [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
1	-27,43	-2,76	2,76
2	-27,43	-2,76	2,77
3	-27,43	-2,76	2,76
4	-27,43	-2,76	2,76
5	-27,43	-2,76	2,77
6	0,00	-0,18	0,56
7	5,97	0,38	0,64
8	5,97	0,38	0,38
9	5,97	0,38	0,39
10	5,97	0,38	0,61
11	37,02	3,31	3,31

Tabelle A-18: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes

Grafische Darstellung der Ergebnisse

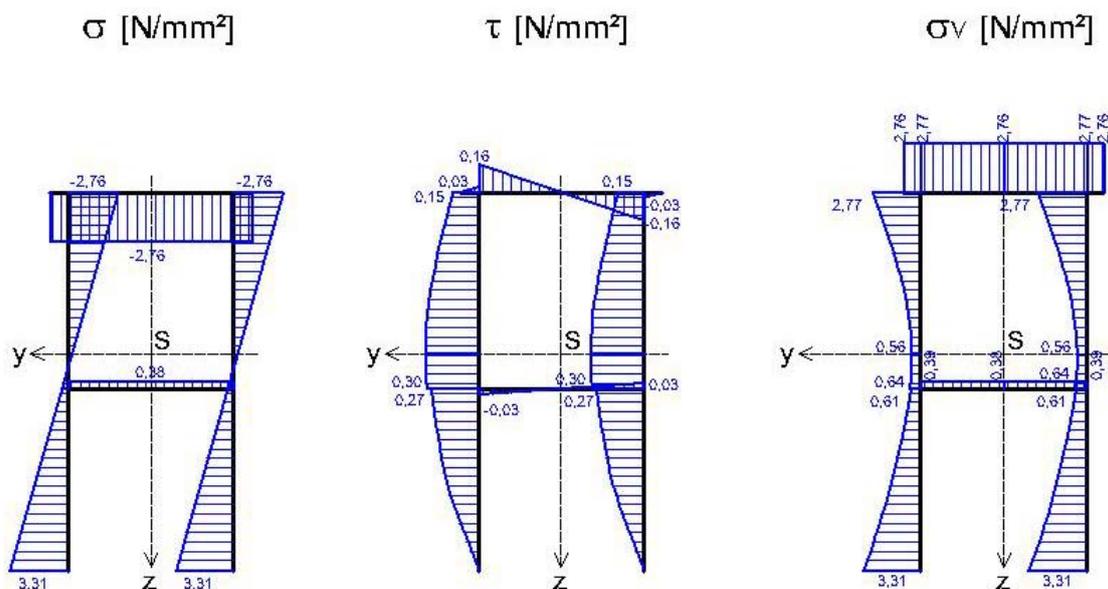


Abbildung A-57: Ergebnisse des Ingenieurmodells

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

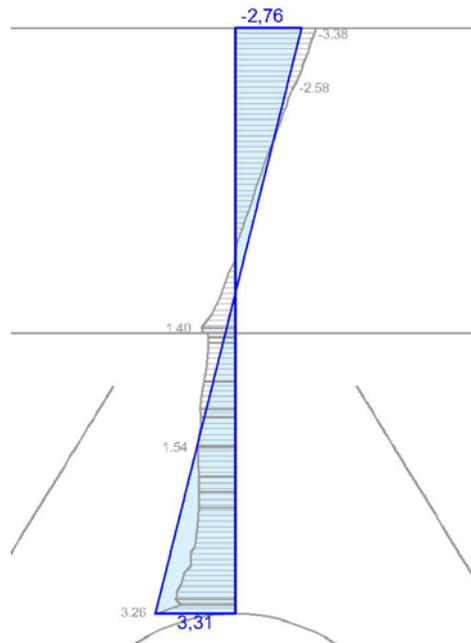


Abbildung A-58: Ergebnisverlauf - Verlauf der Normalspannungen [N/mm²]

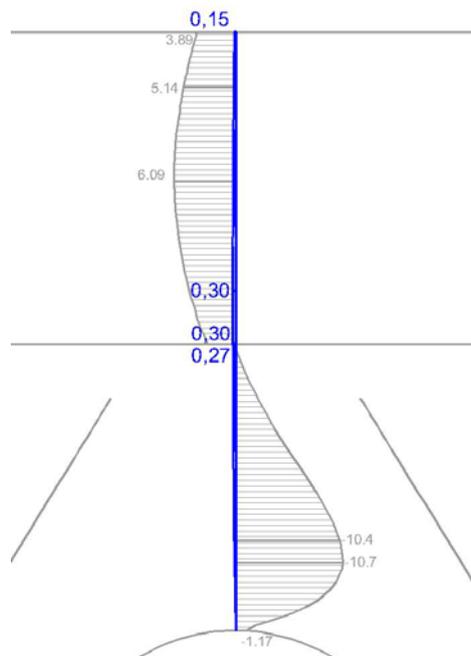


Abbildung A-59: Ergebnisverlauf - Verlauf der Schubspannungen [N/mm²]

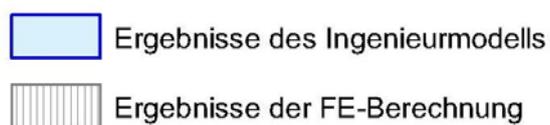


Abbildung A-60: Legende

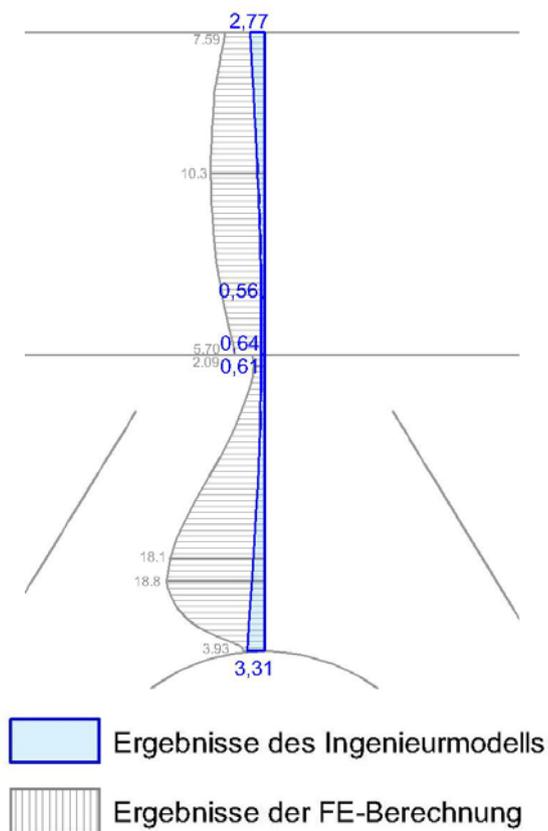


Abbildung A-61: Ergebnisverlauf - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Beim Vergleich des Normalspannungsverlaufes zwischen dem gewählten Ingenieurmodell und der FE-Berechnung, stellt man sehr gute Übereinstimmungen hinsichtlich der maximalen Normalspannung fest. Bei den Schubspannungen und damit auch bei der Vergleichsspannung gibt es große Abweichungen. Dies liegt daran, dass beim Ingenieurmodell aufgrund der geringen Querkraft kaum Schubspannungen vorhanden sind.

In der FE-Analyse treten sowohl betragsmäßig große positive, als auch negative Schubspannungen auf, die sich, summiert man sie über den Querschnitt, nahezu aufheben. Aufgrund dieser Tatsache ist es kaum möglich mit den Mitteln der technischen Biegelehre vereinfachend die Schubspannungen abzuschätzen. Da jedoch unter Normalkraftbeanspruchung des Knotens keine derartig großen Abweichungen auftreten, und diese den wesentlich größeren Anteil der Spannungen bewirken, ist die Berechnung bei einer gemeinsamen Betrachtung der verschiedenen Einwirkungen trotzdem hinreichend genau.

5) Einzeleinflüsse von Moment und Querkraft

5.1) Allgemeines

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der einzelnen Beanspruchungen auf die Normalspannungsverläufe in den verschiedenen Schnitten untersucht. Es werden nur die Ergebnisse der Normalspannungen erneut dokumentiert, da es im Ingenieurmodell, aufgrund der niedrigen Querkräfte kaum Schubspannungen gibt. Dies wird durch die Ergebnisse aus der FE-Analyse nicht bestätigt. Trotz den Abweichungen von der FE-Berechnung können die Extrema der Normal- und Vergleichsspannungen gut abgeschätzt werden, da im Bereich der maximalen Normalspannungen am Rand die Schubspannungen null werden.

5.2) Modell und Randbedingungen

Die angreifenden Momente und Querkräfte werden mit Hilfe von Linienlasten gleichmäßig in die Konstruktion eingeleitet. Als Randbedingung für alle folgenden Lastfälle wird, wie auch bei den bisherigen Berechnungen, die Einspannung von Obergurt OG 2 am rechten Rand gewählt. Diese wird durch Festhaltung der Knoten in alle drei Raumrichtungen realisiert. Die Beanspruchung des rechten Obergurtstabes ergibt sich als resultierende Auflagerreaktion.

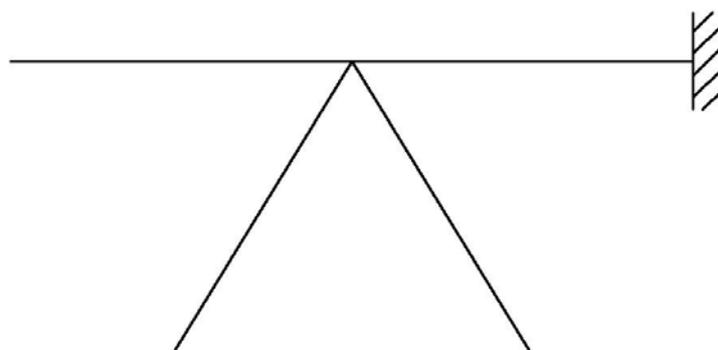


Abbildung A-62: Schematische Darstellung der Randbedingungen

5.3) Schnitt 1-1

Im ersten Berechnungsschritt wird nur das Moment von Diagonale 1 angesetzt. Die Ergebnisse der FE-Berechnung werden mit jenem analytischen Modell verglichen, bei dem die wirkende Querschnittsbreite der Breite der Diagonale entspricht. Anschließend werden die Spannungen zufolge der alleinigen Wirkung der Querkraft in Diagonale 1 ermittelt.

Für Diagonale 2 wird die Spannungsermittlung bei alleiniger Momenten- bzw. Querkraftbeanspruchung nicht eigens durchgeführt. Es müssen sich näherungsweise die gleichen Spannungen wie bei Beanspruchung von Diagonale 1 ergeben, da der Knoten abgesehen von geringfügig unterschiedlichen Blechstärken symmetrisch ist.

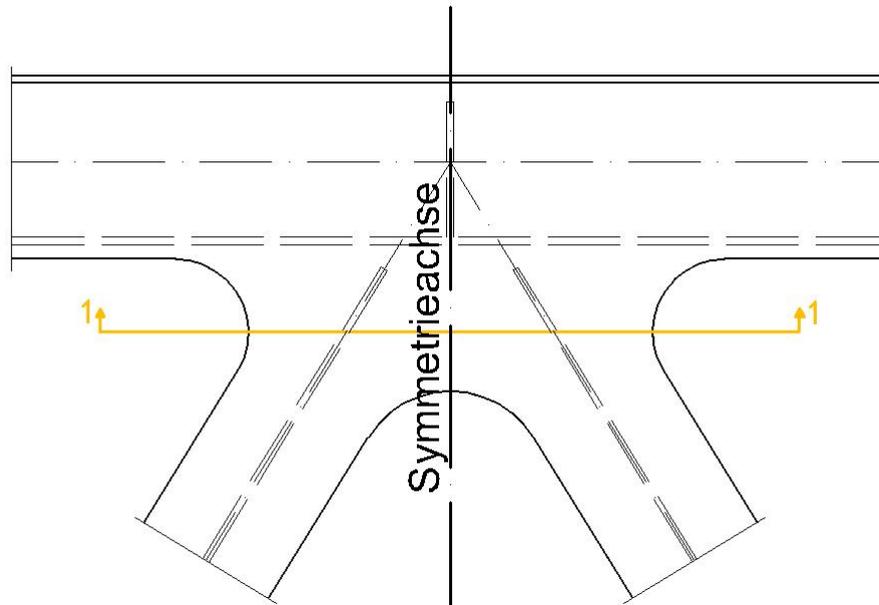


Abbildung A-63: Näherungsweise Knotensymmetrie

Ermittlung der Querschnittswerte:

$$A = 120\text{cm}^2$$

$$I_y = 9000\text{cm}^4$$

$$W_y = 600\text{cm}^4$$

Biegemoment in Diagonale 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = -30kNm$$

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{3000 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = \pm 50,00 N / mm^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

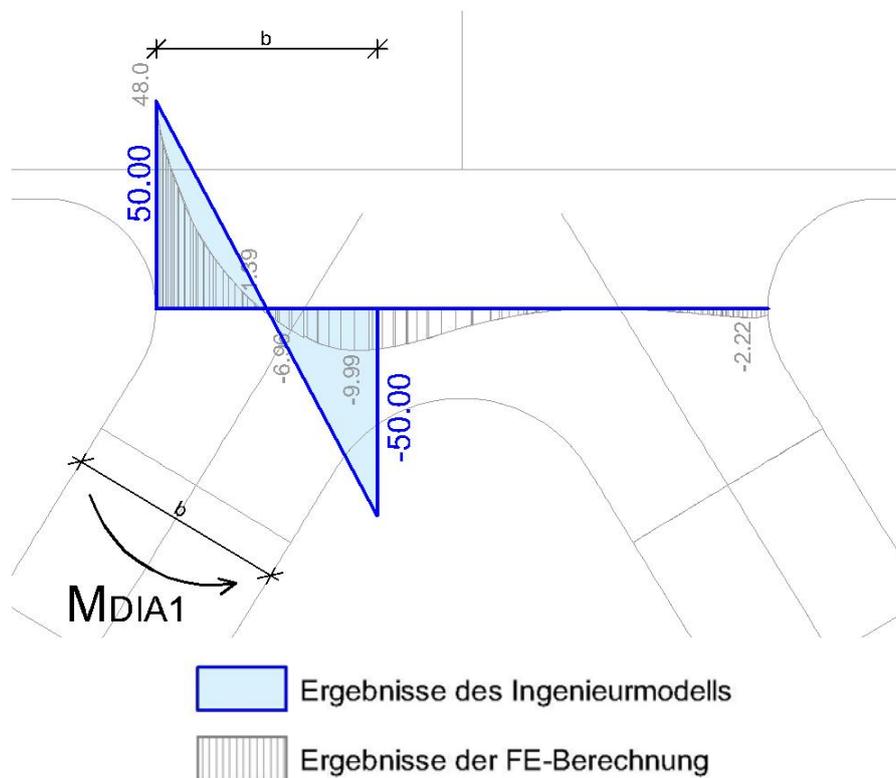


Abbildung A-64: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm^2]

Interpretation der Ergebnisse

Die Spannungsspitzen am Rand werden durch dieses Modell auch bei einwirkendem Moment optimal abgebildet.

Querkraft in Diagonale 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = V_{\text{DIA1}} \cdot e = -7,33 \cdot 0,665 = -4,87 \text{ kNm}$$

$$N = \pm 3,80 \text{ kN}$$

Spannungen auf der linken Querschnittsseite

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} + \frac{487 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = 8,43 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{+3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} - \frac{487 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = -7,80 \text{ N/mm}^2$$

Spannungen auf der rechten Querschnittsseite

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} + \frac{487 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = 7,80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{-3,80 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^2} - \frac{487 \cdot 10^4}{600 \cdot 10^3} = -8,43 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

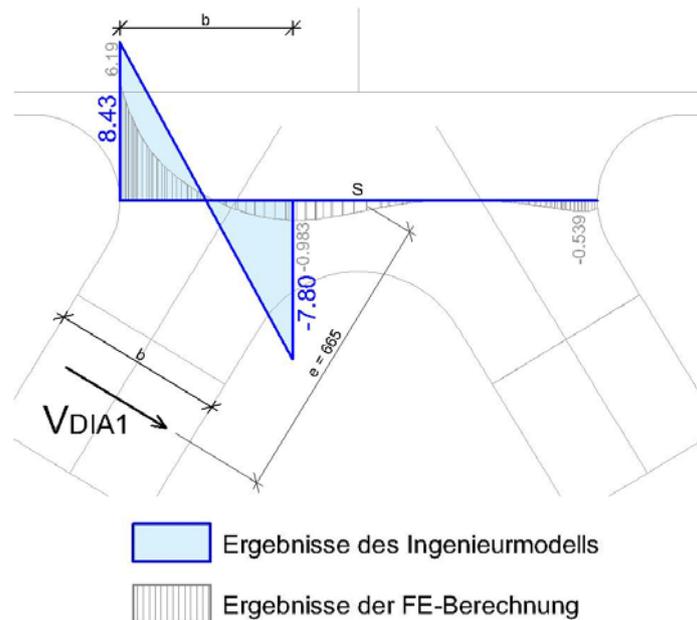


Abbildung A-65: Normalspannungsverlauf bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse liegen auf der sicheren Seite. Der Extremwert der Beanspruchung am Rand kann auch bei Querkraftbeanspruchung relativ genau abgeschätzt werden.

Gleichsinniges Moment in Diagonale 1 und 2

Als nächstes werden nun noch die Spannungsverläufe zufolge zweier gleichzeitig wirkender Momente von 30kNm in Diagonale 1 beziehungsweise Diagonale 2 untersucht.

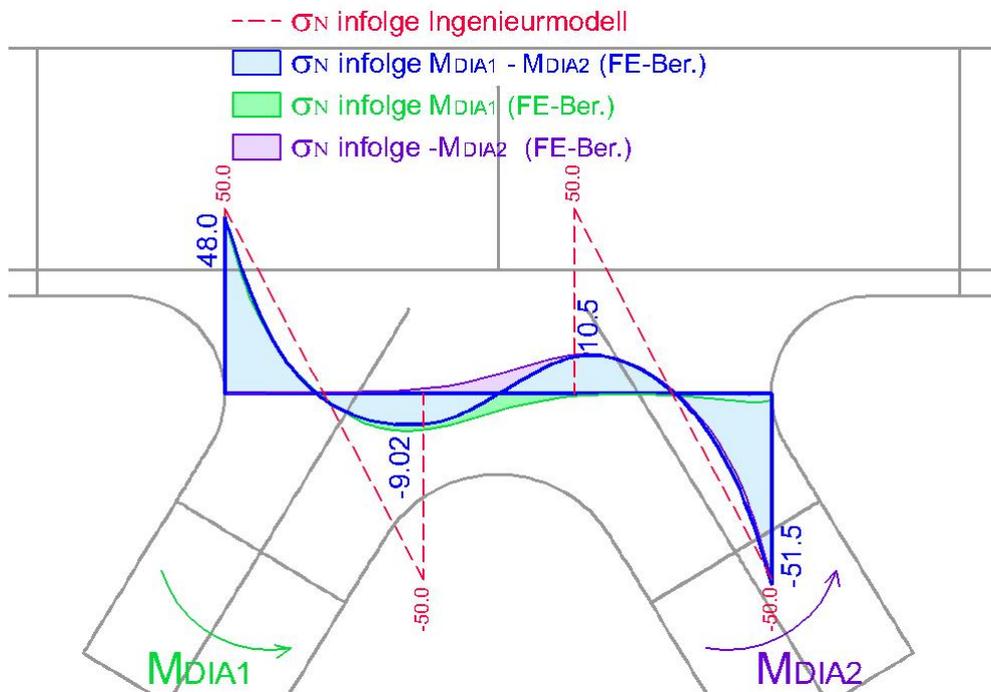


Abbildung A-66: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} + M_{DIA2}$ [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

In Abbildung A-66 sieht man die Ergebnisse der FE-Berechnung bei Wirkung der beiden gleichsinnig drehenden Momente M_{DIA1} und M_{DIA2} . Die Normalspannungsverläufe im Schnitt 1-1 sind für beide Momente separat in grün beziehungsweise violett dargestellt. Die Überlagerung der beiden Momente ergibt den blau dargestellten Verlauf.

Als Vergleich sind die sich ergebenden Spannungen des entsprechenden Ingenieurmodells strichliert eingetragen. Man sieht, dass die Ergebnisse für die Randspannung hinreichend genau übereinstimmen.

Gegensinniges Moment in Diagonale 1 und 2

In diesem Abschnitt wird das Vorzeichen des Momentes M_{DIA2} geändert, um den Spannungszustand im Schnitt 1-1 bei gegensinniger Wirkung der beiden Diagonalenmomente untersuchen zu können.

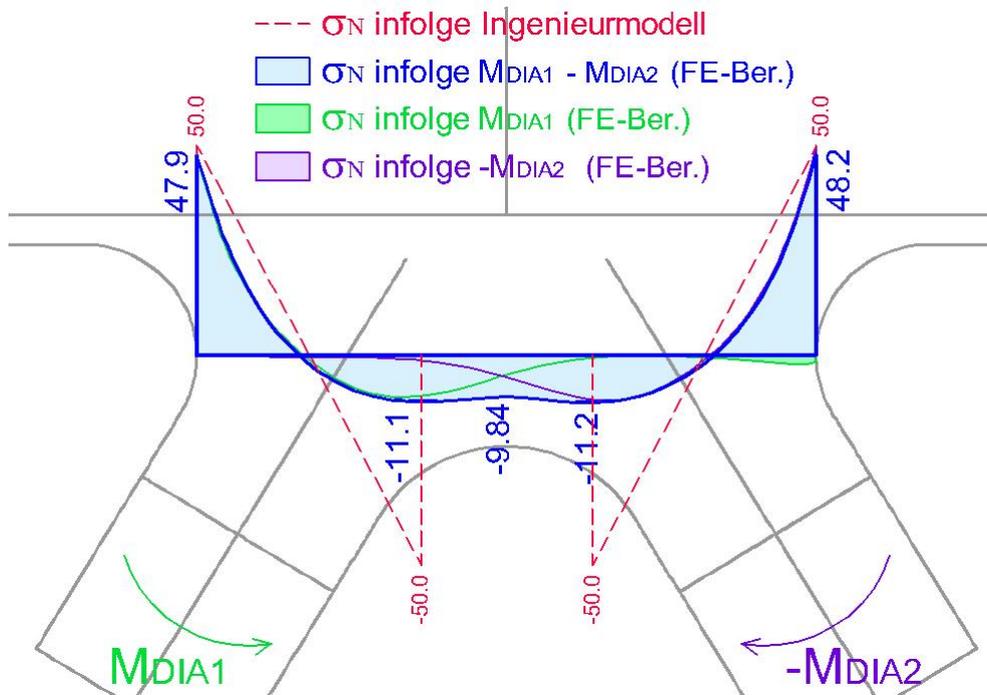


Abbildung A-67: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} - M_{DIA2}$ [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

In Abbildung A-67 sieht man die Ergebnisse der FE-Berechnung bei gegensinniger Wirkung der beiden Momente M_{DIA1} und M_{DIA2} . Die Normalspannungsverläufe im Schnitt 1-1 sind für beide Momente separat in grün beziehungsweise violett dargestellt. Die Überlagerung der beiden Momente ergibt den blau dargestellten Verlauf.

Als Vergleich sind die sich ergebenden Spannungen der entsprechenden Ingenieurmodells strichliert eingetragen. Auch hier stimmen die Ergebnisse der Randspannungen sehr gut überein. Das Modell liefert Ergebnisse auf der sicheren Seite.

5.4) Schnitt 2-2

Bei Schnitt 2-2 wird analog zu Schnitt 1-1 vorgegangen. Es werden die Spannungen zufolge der einwirkenden Momente auf Diagonale 1 untersucht.

Wahl der wirksamen Querschnittsbreite

Zieht man die gesamte Schnittfläche zur Übertragung der Spannungen heran erhält man zu niedrige Spannungswerte. Mit Hilfe der FE-Analyse wurde eine wirkende Breite von 70% der Gesamtbreite abgeschätzt. Alternativ könnte auch das Widerstandsmoment auf die Hälfte reduziert werden.

Hauptspannungen und Plausibilisierung des gewählten Modells

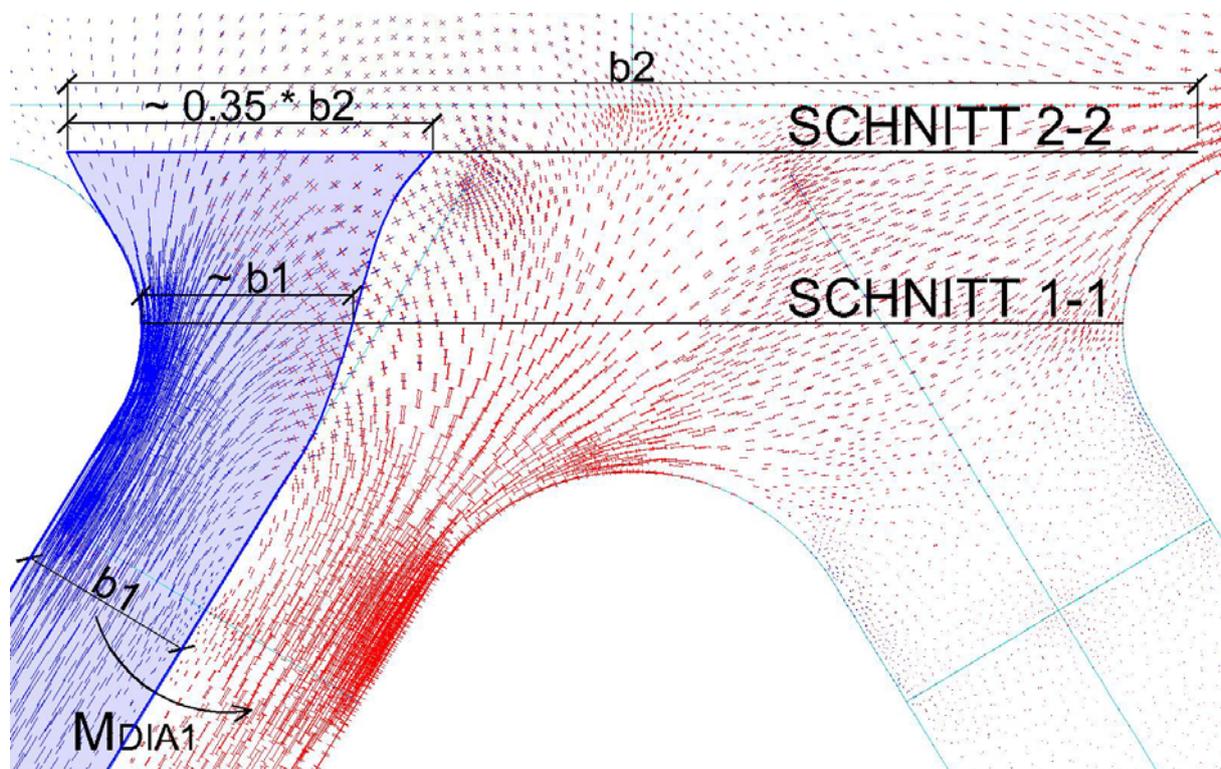


Abbildung A-68: Hauptspannungen bei Wirkung von M_{DIA1}

Die Konstruktion der vorhandenen Zugzonenbreite wurde bereits im Abschnitt 4.1 dieses Kapitels erläutert und ist in Abbildung A-47 ersichtlich. Bei der Analyse der Ergebnisse der FE-Berechnung ergibt sich, wie in Abbildung A-68 dargestellt, eine Verteilung der Zugspannungen auf eine Breite von etwas weniger als 35% der Querschnittsbreite auf Höhe von Schnitt 2-2. Durch Verdoppelung der ermittelten Zugzonenbreite erhält man den für die Berechnungen herangezogenen Querschnitt.

Um die maßgebenden Zugspannungen in den Randbereichen zu erfassen, können die Spannungen im Ingenieurmodell somit an einem Querschnitt mit einer Breite von 70% der Gesamtbreite relativ genau abgeschätzt werden.

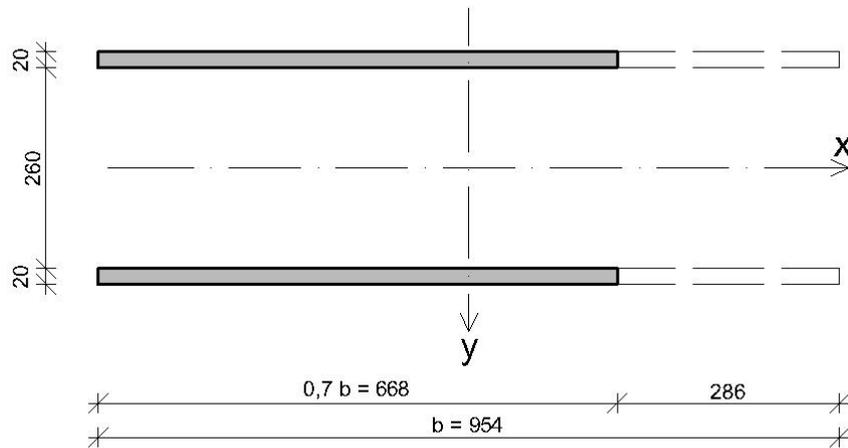


Abbildung A-69: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand

Ermittlung der Querschnittswerte

$$b = 0,70 \cdot 95,4 = 66,8 \text{ cm}$$

$$A = 2 \cdot 2 \cdot 66,8 = 267,2 \text{ cm}^2$$

$$I_{ys} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 66,8^3}{12} = 99359 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2975 \text{ cm}^3$$

Biegemoment in Diagonale 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = -30 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{3000 \cdot 10^4}{2975 \cdot 10^3} = \pm 10,08 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

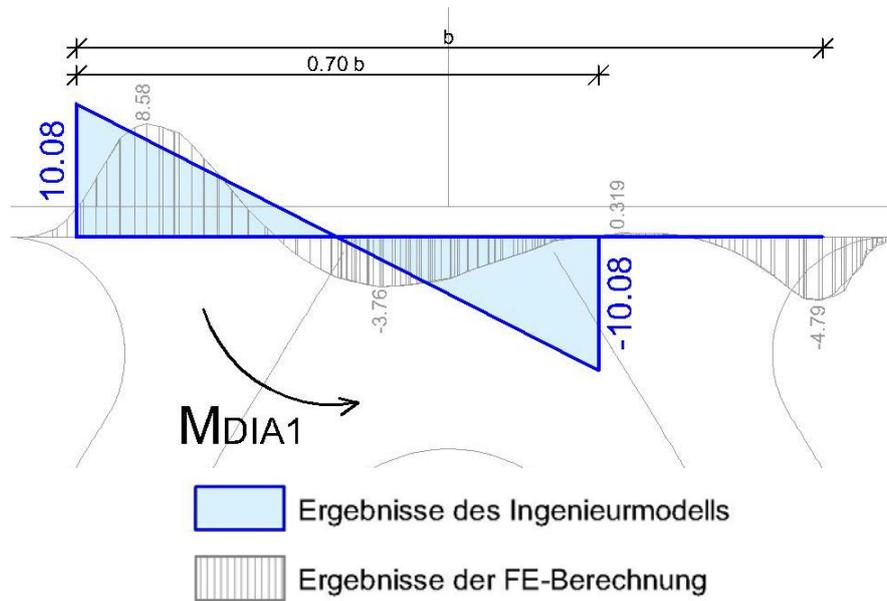


Abbildung A-70: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Die Spannungsspitzen am Rand können durch dieses Modell gut erfasst werden.

Querkraft in Diagonale 1

Einwirkenden Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = V_{\text{DIA1}} \cdot e = -7,33 \cdot 0,793 = -5,81 \text{ kNm}$$

$$N = 3,80 \text{ kN}$$

$$\sigma_{z,li} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{267,2 \cdot 10^2} + \frac{581 \cdot 10^4}{2975 \cdot 10^3} = 2,10 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,re} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{3,80 \cdot 10^3}{267,2 \cdot 10^2} - \frac{581 \cdot 10^4}{2975 \cdot 10^3} = -1,81 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

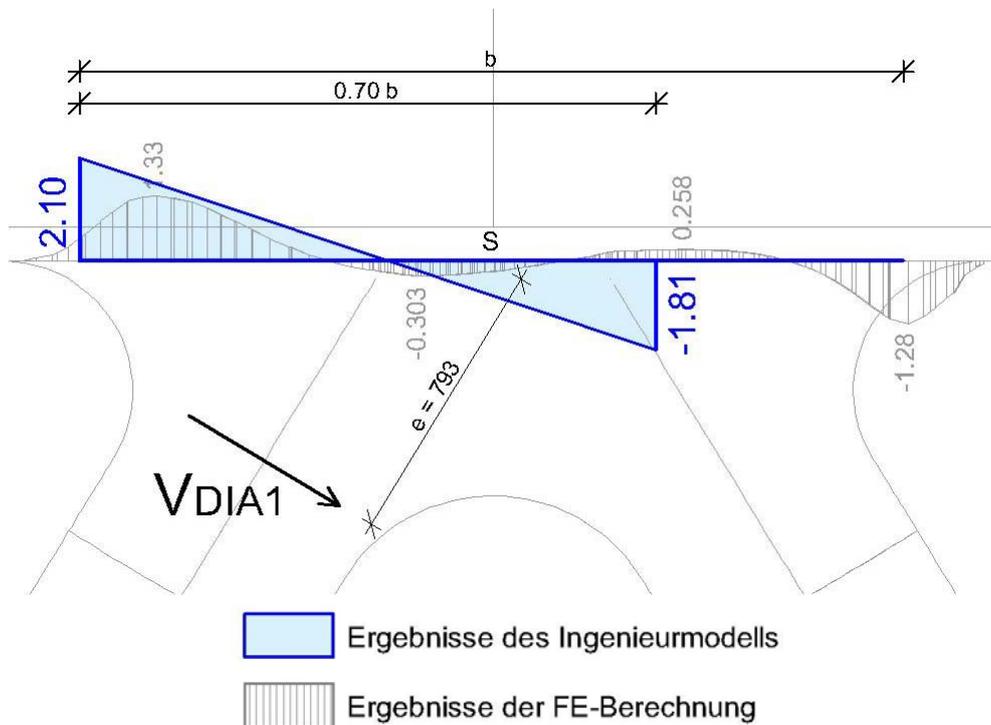


Abbildung A-71: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm^2]

Interpretation der Ergebnisse

Auch hier werden die Spannungsspitzen am Rand abgedeckt.

Gleichsinniges Moment in Diagonale 1 und 2

Wieder werden nun noch die Spannungsverläufe zufolge zweier gleichzeitig wirkender Momente von 30kNm in Diagonale 1 beziehungsweise Diagonale 2 untersucht.

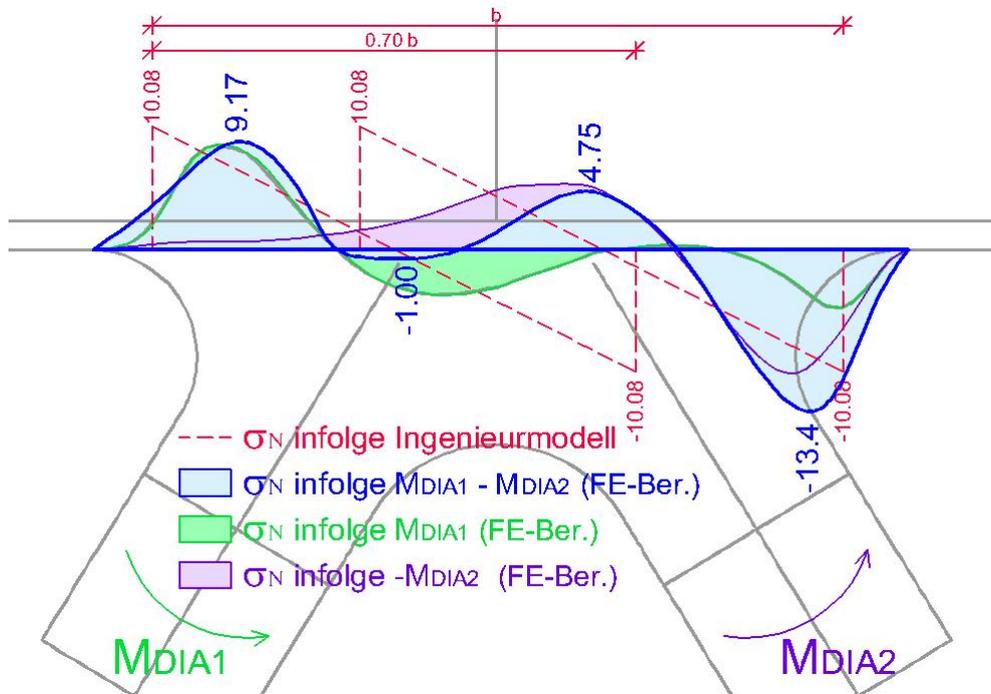


Abbildung A-72: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} + M_{DIA2}$ [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

In Abbildung A-72 sieht man die Ergebnisse der FE-Berechnung bei Wirkung der beiden gleichsinnig drehenden Momente M_{DIA1} und M_{DIA2} . Die Normalspannungsverläufe im Schnitt 2-2 sind für beide Momente separat in grün beziehungsweise violett dargestellt. Die Überlagerung der beiden Momente ergibt den blau dargestellten Verlauf.

Als Vergleich sind die sich ergebenden Spannungen des entsprechenden Ingenieurmodells strichliert eingetragen. Die Ergebnisse zufolge der Modellbildung liegen auch bei diesem Beispiel nahe an der FE-Berechnung. Der Einfluss des Momentes in Diagonale 1 auf die Normalspannungen auf der rechten Seite von Schnitt 2-2 ergibt sich durch die Lagerung des rechten Obergurtes und wird durch das Ingenieurmodell nicht erfasst. Dadurch kommt es am rechten Rand zu Abweichungen von etwa 30%.

Gegensinniges Moment in Diagonale 1 und 2

In diesem Abschnitt wird das Vorzeichen des Momentes M_{DIA2} geändert, um den Spannungszustand im Schnitt 2-2 bei gegensinniger Wirkung der beiden Diagonalenmomente untersuchen zu können.

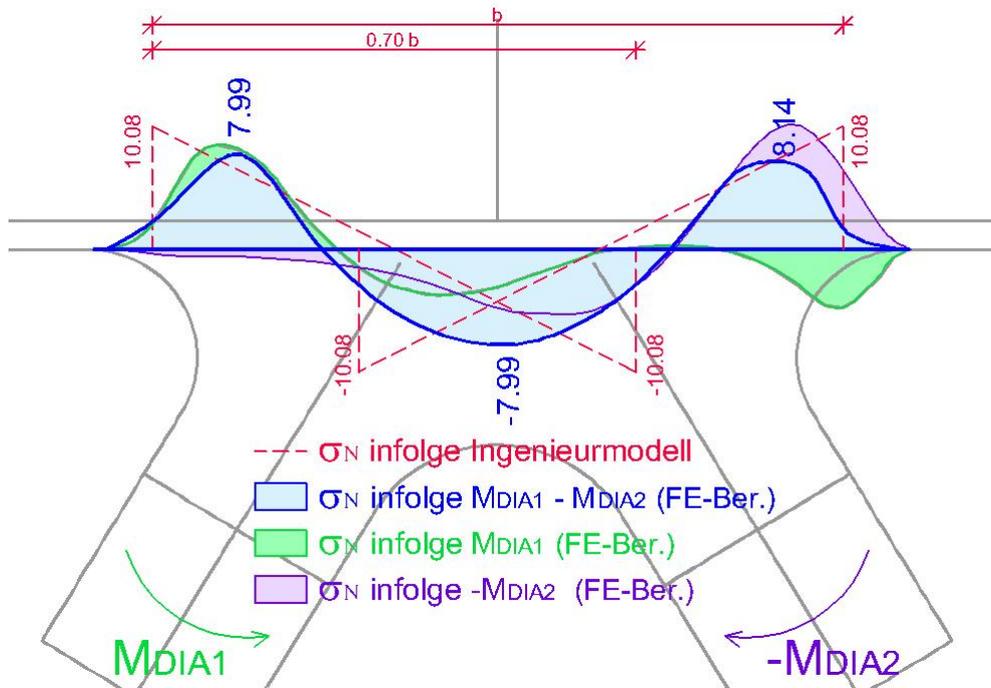


Abbildung A-73: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} - M_{DIA2}$ [N/mm^2]

Interpretation der Ergebnisse

In Abbildung A-73 sieht man die Ergebnisse der FE-Berechnung bei Wirkung der beiden gegensinnig drehenden Momente M_{DIA1} und M_{DIA2} . Die Normalspannungsverläufe im Schnitt 2-2 sind für beide Momente separat in grün beziehungsweise violett dargestellt. Die Überlagerung der beiden Momente ergibt den blau dargestellten Verlauf.

Als Vergleich sind die sich ergebenden Spannungen des entsprechenden Ingenieurmodells strichliert eingetragen. Die Ergebnisse zufolge der Modellbildung liegen sehr nahe an der FE-Berechnung. Der Einfluss des Momentes in Diagonale 1 auf die Normalspannungen auf der rechten Seite von Schnitt 2-2 erweist sich in diesem Fall als günstig. Die maximalen Spannungen werden durch das Modell abgedeckt.

5.5) Schnitt 3-3

Bei Schnitt 3-3 werden zusätzlich zu den Einwirkungen auf Diagonale 1 und 2 auch die Normalspannungen zufolge Moment und Querkraft auf Obergurt 1 untersucht.

Ermittlung der Querschnittswerte

$$\begin{aligned} A &= 354 \text{ cm}^2 & z_u &= 37,02 \text{ cm} \\ I_{ys} &= 137943 \text{ cm}^4 & z_o &= -27,43 \text{ cm} \end{aligned}$$

Biegemoment in Diagonale 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = -30 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,\text{unten}} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_u = \frac{-3000 \cdot 10}{137943} \cdot 37,02 = -8,05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,\text{oben}} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_o = \frac{-3000 \cdot 10}{137943} \cdot (-27,43) = 5,97 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

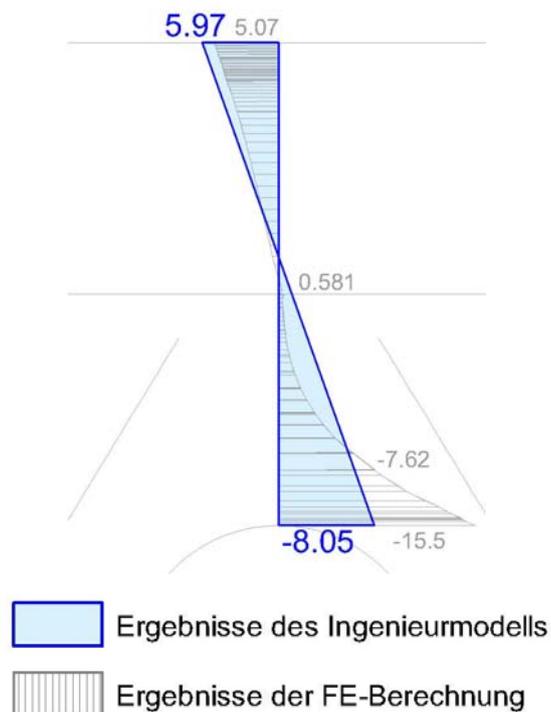


Abbildung A-74: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm^2]

Querkraft in Diagonale 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$N = -F_{x,DIA1} = -6,26 \text{ kN}$$

$$V_z = F_{z,DIA1} = -3,80 \text{ kN}$$

$$\text{Normalabstände Querkraft – Querschnittsschwerpunkt: } e_{DIA1} = 87,7 \text{ cm}$$

$$M_y = V_{DIA1} \cdot e_{DIA1} = -7,33 \cdot 0,877 = -6,42 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,unten} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z_u = \frac{-6,26}{354} \cdot 10 + \frac{-642 \cdot 10}{137943} \cdot 37,02 = -1,90 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,oben} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z_o = \frac{-6,26}{354} \cdot 10 + \frac{-642 \cdot 10}{137943} \cdot (-27,43) = 1,09 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

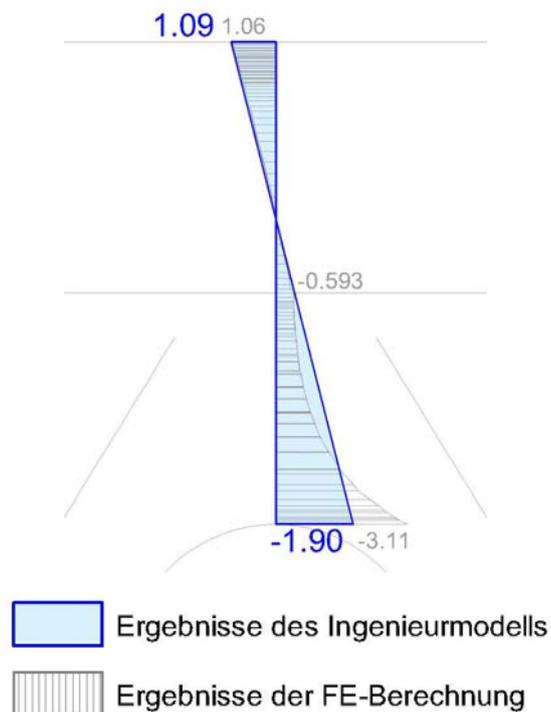


Abbildung A-75: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Die Druckspannungen zufolge FE-Analyse werden an der Unterseite unterschätzt. Die Ursache dafür liegt in der Rundung und dem dadurch erzwungenen Verlauf der Spannungstrajektorien. Dadurch kommt es in der FE-Berechnung zu einem stärkeren Anwachsen der Normalspannungen im Randbereich.

Biegemoment und Querkraft in Diagonale 2

Diese Einwirkungen bewirken für Schnitt 3-3 des Ingenieurmodells keine Spannungen. Bei der FE-Analyse ergeben sich folgende Normalspannungen:

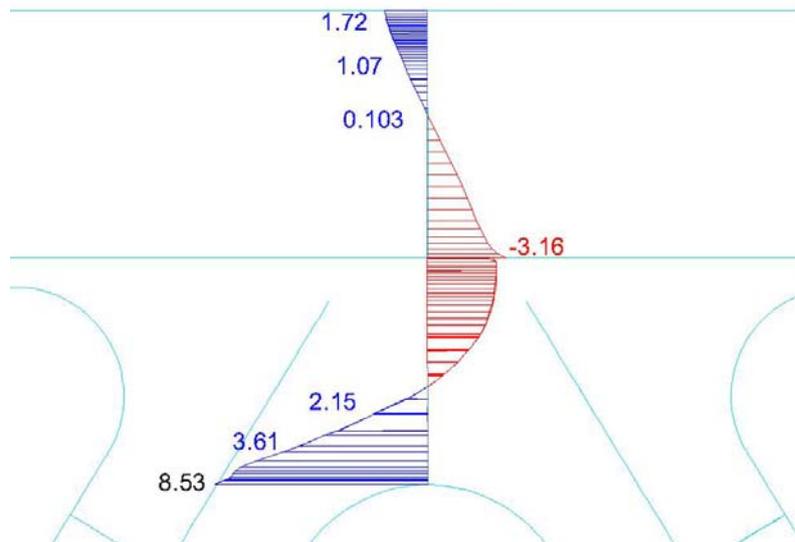


Abbildung A-76: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA2} [N/mm^2]

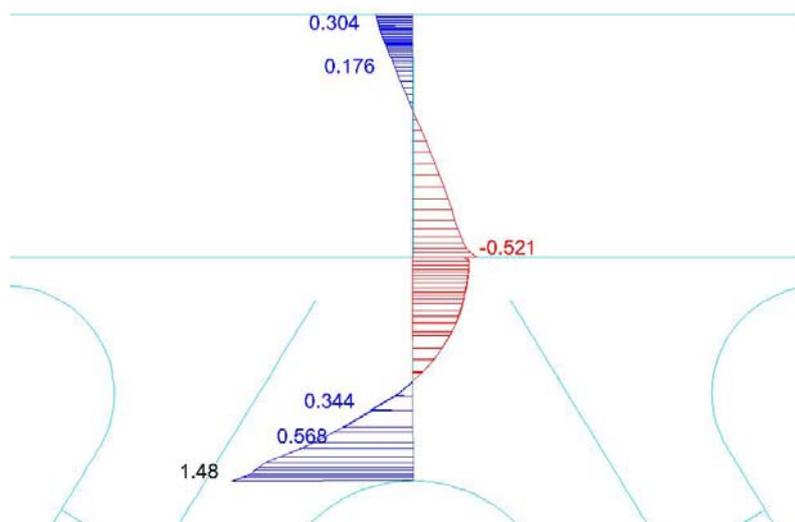


Abbildung A-77: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA2} [N/mm^2]

Interpretation der Ergebnisse

Im Gegensatz zu den Ergebnissen zufolge Beanspruchung von Diagonale 1 werden hier die Zugspannungen an der Unterseite unterschätzt. Dies führt dazu dass die Ergebnisse bei gleichzeitiger Wirkung von den beiden Momenten M_{DIA1} und M_{DIA2} relativ genau übereinstimmen (siehe Abbildung A-74 bis A-77).

Biegemoment in Obergurt 1

Einwirkende Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = 40kNm$$

$$\sigma_{x,unten} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_u = \frac{4000 \cdot 10}{137943} \cdot 37,02 = 10,73 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,oben} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_o = \frac{4000 \cdot 10}{137943} \cdot (-27,43) = -7,95 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

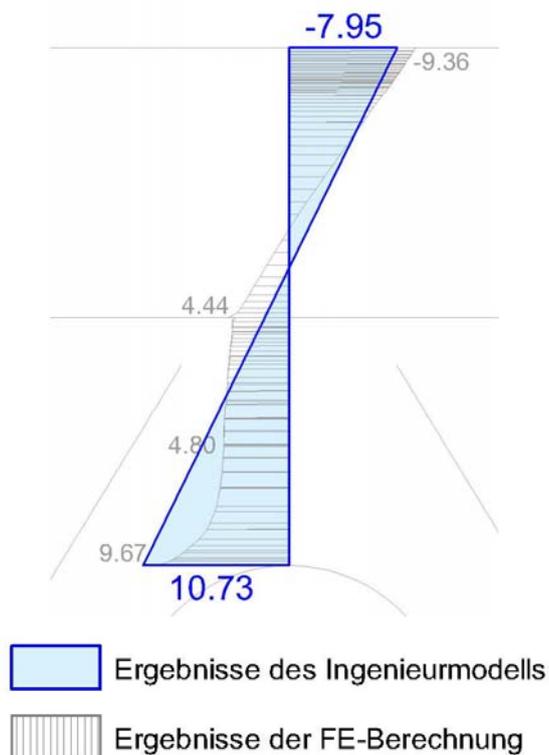


Abbildung A-78: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{OG1} [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Wie in Abbildung A-78 ersichtlich stimmen die Ergebnisse der beiden Berechnungsverfahren sehr gut überein.

Querkraft in Obergurt 1

Einwirkenden Schnittgrößen und Spannungen

$$M_y = 9,41 \cdot 1,0 = 9,41 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{x,unten} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_u = \frac{941 \cdot 10}{137943} \cdot 37,02 = 2,53 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,oben} = \frac{M_y}{I_y} \cdot z_o = \frac{941 \cdot 10}{137943} \cdot (-27,43) = -1,87 \text{ N/mm}^2$$

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

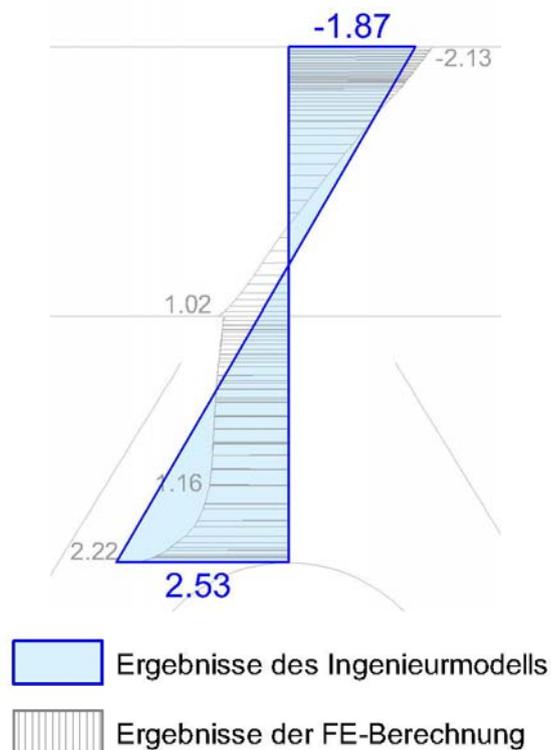


Abbildung A-79: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{OG1} [N/mm²]

Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse stimmen hinsichtlich der Extremwerte sehr gut überein. Auch der Verlauf der Normalspannungen wird durch das Ingenieurmodell gut abgebildet.

A3) Kombinierte Beanspruchung mit M, N und V

1) Knotendetail

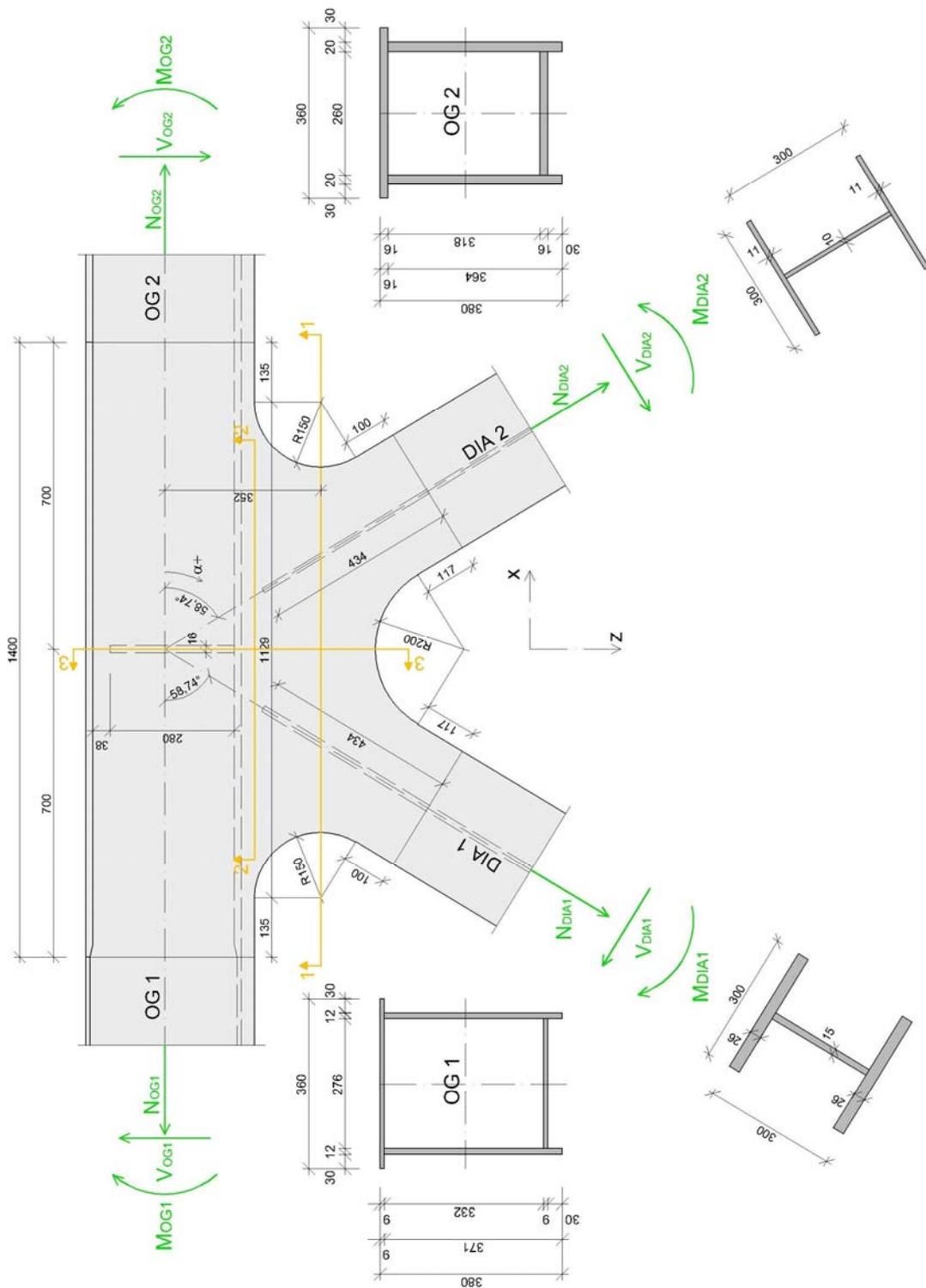


Abbildung A-80: Knotendetail mit kombinierter Beanspruchung mit M, N und V

Abbildung A-80 zeigt das betrachtete Knotendetail mit den Beanspruchungen sowie das gewählte Koordinatensystem und die maßgebenden Schnittführungen. Zusätzlich sind die gewählten Stabbezeichnungen und die Laufrichtung des Winkels α , der in die folgende Tabelle A-19 eingeht, eingetragen. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um Baustahl S 355 J0.

2) Einwirkende Schnittgrößen

$$F_x = V \cdot \cos(\alpha + 90^\circ) + N \cdot \cos \alpha$$

$$F_z = V \cdot \sin(\alpha + 90^\circ) + N \cdot \sin \alpha$$

Bez.	α [°]	M [kNm]	V [kN]	N [kN]	F _x [kN]	F _z [kN]
OG 1	180,00	40,00	9,41	-2013	2013	-9
OG 2	0,00	-20,00	9,41	-3501	-3501	9
DIA 1	121,26	-30,00	-7,33	-1421	744	-1211
DIA 2	58,74	30,00	-7,33	1421	744	1211

Tabelle A-19: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten

Die Kräfte F_x und F_z stellen den Anteil der Normalkraft in x bzw. z-Richtung dar.

3) Modell und Randbedingungen

Sämtliche Lasten werden mit Hilfe von Linienlasten gleichmäßig in die Konstruktion eingeleitet. Als Randbedingung wurde die Einspannung von Obergurt OG 2 am rechten Rand gewählt. Diese wurde durch Festhaltung der Knoten in alle drei Raumrichtungen realisiert. Die Beanspruchung des rechten Obergurtstabes ergibt sich als resultierende Auflagerreaktion.

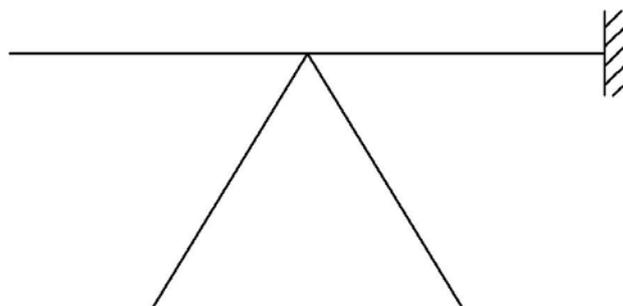


Abbildung A-81: Schematische Darstellung der verwendeten Randbedingungen

4) Berechnung

Die Spannungsermittlung unter kombinierter Beanspruchung erfolgt auf Basis der bisherigen Ergebnisse und unter Anwendung des Superpositionsprinzips. Dabei werden die gewonnen Erkenntnisse angewandt und die besten Modelle verwendet.

4.1) Schnitt 1-1

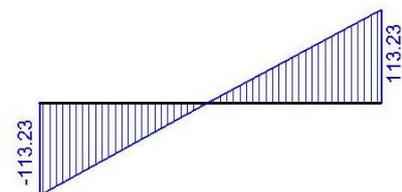
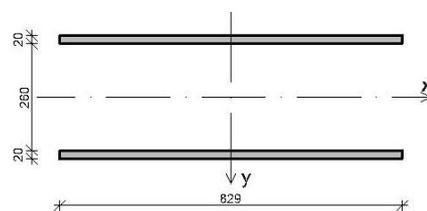
Ermittlung der Normalspannung

Einwirkungen

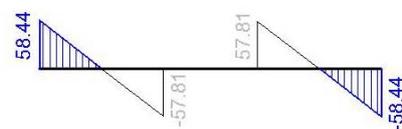
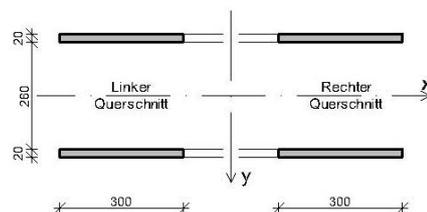
Ingenieurmodell

Spannungen

Normalkraft-
beanspruchung



Querkraft- und
Biegemomenten-
beanspruchung



Kombinierte
Beanspruchung
von M, N und V

Superposition

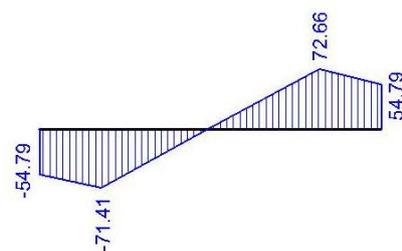


Abbildung A-82: Ermittlung der Normalspannungen unter M-, N- und V- Beanspruchung

In Abbildung A-82 sind die den einzelnen Einwirkungen zugrunde gelegten Modelle und die bereits in den vorigen Abschnitten berechneten Normalspannungen ersichtlich. Unten sieht man den durch Superposition neu ermittelten Spannungsverlauf zufolge kombinierter Beanspruchung aus Moment, Normalkraft und Querkraft.

Ermittlung der Schubspannung

Die Schubspannung wird am vollen Querschnitt von Schnitt 1-1 ermittelt. Es ergibt sich folgendes Maximum als Summe der Beanspruchungen M, N und V. Die Werte sind dem jeweiligen Abschnitt der vorliegenden Arbeit entnommen.

$$\tau_{N,\max} = 66,70 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{MV,\max} = 0,57 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{MNV,\max} = \tau_{N,\max} + \tau_{MV,\max} = 66,3 \text{ N/mm}^2$$

Ermittlung der Vergleichsspannung

Die Ermittlung der Vergleichsspannung erfolgt auf Basis der Normal- und Schubspannungen unter kombinierter Beanspruchung.

Vergleichsspannungsverlauf in den Achtelpunkten

$$\tau_{\max} = 67,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,N} = \pm 113,23 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{z,MV} = \pm 58,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_z = \sigma_{z,N} + \sigma_{z,MV}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

x	τ [N/mm ²]	$\sigma_{z,N}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,MV}$ [N/mm ²]	σ_z [N/mm ²]	σ_V [N/mm ²]
-41,45	0,00	-113,23	58,44	-54,79	54,79
-31,09	29,44	-84,92	18,29	-66,63	83,91
-20,73	50,48	-56,62	-	-56,62	104,16
-10,36	63,09	-28,31	-	-28,31	112,89
0,00	67,30	0,00	-	0,00	116,57
10,36	63,09	28,31	-	28,31	112,89
20,73	50,48	56,62	-	56,62	104,16
31,09	29,44	84,92	-18,28	66,64	83,92
41,45	0,00	113,23	-58,44	54,79	54,79

Tabelle A-20: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten

Die Zwischenwerte für Tabelle A-20 wurden auf Basis folgender Grundlagen ermittelt. Für die Schubspannungen τ wurden die Zwischenwerte für einen parabelförmigen Verlauf mit dem Maximalwert von 67,3 N/mm² berechnet. Die Normalspannungen $\sigma_{z,N}$ wurden zwischen den beiden Randspannungen linear interpoliert. Die Normalspannungen $\sigma_{z,MV}$ ergeben sich durch grafische Ermittlung aus dem Spannungsbild.

Vergleichsspannung zufolge M, N, V

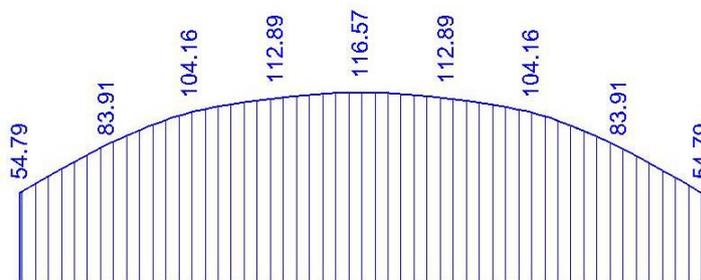


Abbildung A-83: Vergleichsspannungsverlauf unter M-, N- und V- Beanspruchung

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

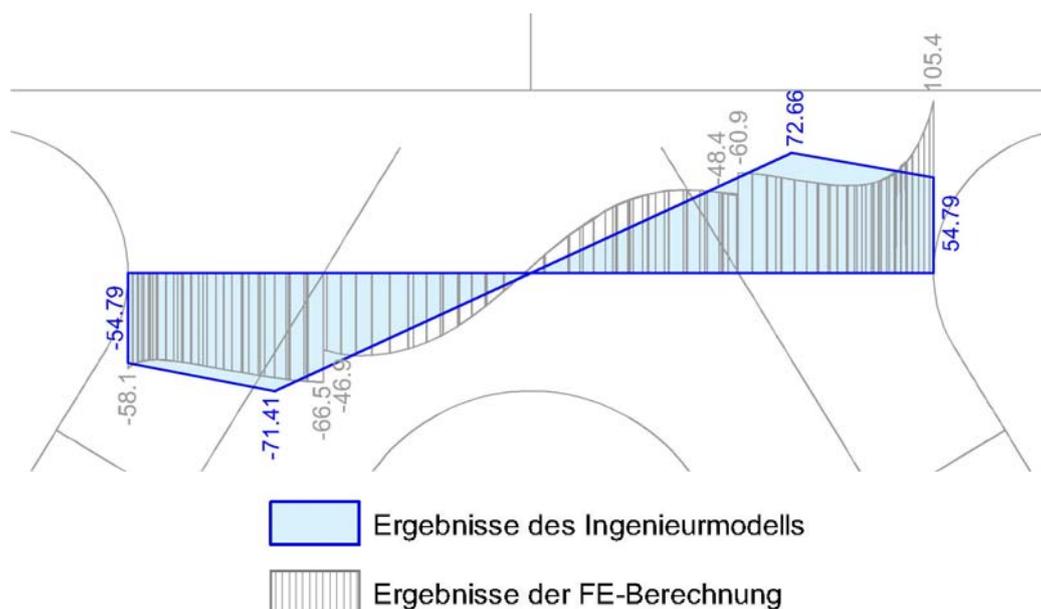


Abbildung A-84: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

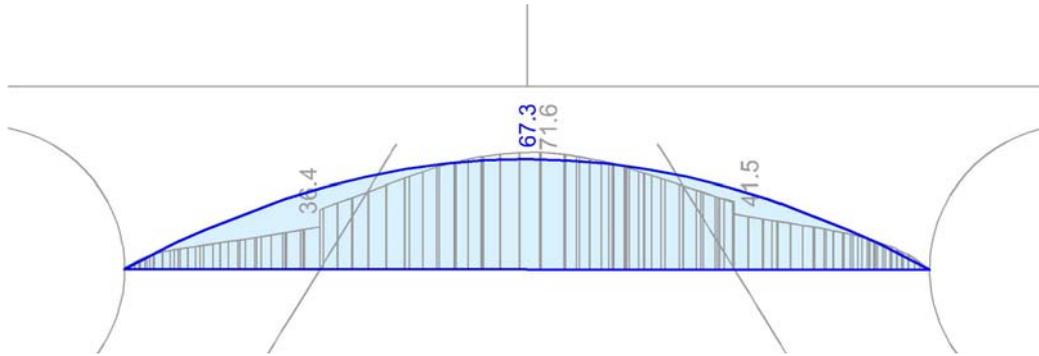


Abbildung A-85: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V- Beanspruchung [N/mm²]

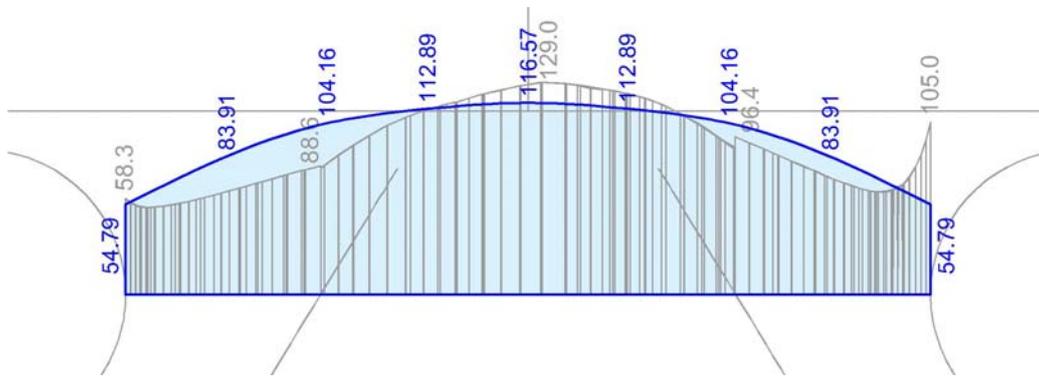


Abbildung A-86: Verlauf der Vergleichsspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

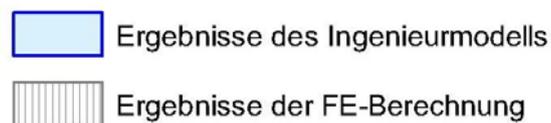


Abbildung A-87: Legende

Interpretation der Ergebnisse

Der Verlauf der Normalspannungen kann durch die verschiedenen Ingenieurmodelle gut abgeschätzt werden. Am Rand kommt es jedoch zu Abweichungen hinsichtlich des Spannungsmaximalwertes. Dieser Unterschied resultiert aus der Normalkraftbeanspruchung, denn schon dort konnten die Spannungsspitzen am Rand mit dem Ingenieurmodell nicht vollständig erfasst werden.

Die Schubspannungen stimmen trotz der Abweichungen unter Biegemomenten- und Normalkraftbeanspruchung in Summe gut überein. Die Maximalwerte werden allerdings auch hier durch das Ingenieurmodell unterschätzt. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Vergleichsspannung wieder.

4.2) Schnitt 2-2

Ermittlung der Normalspannung

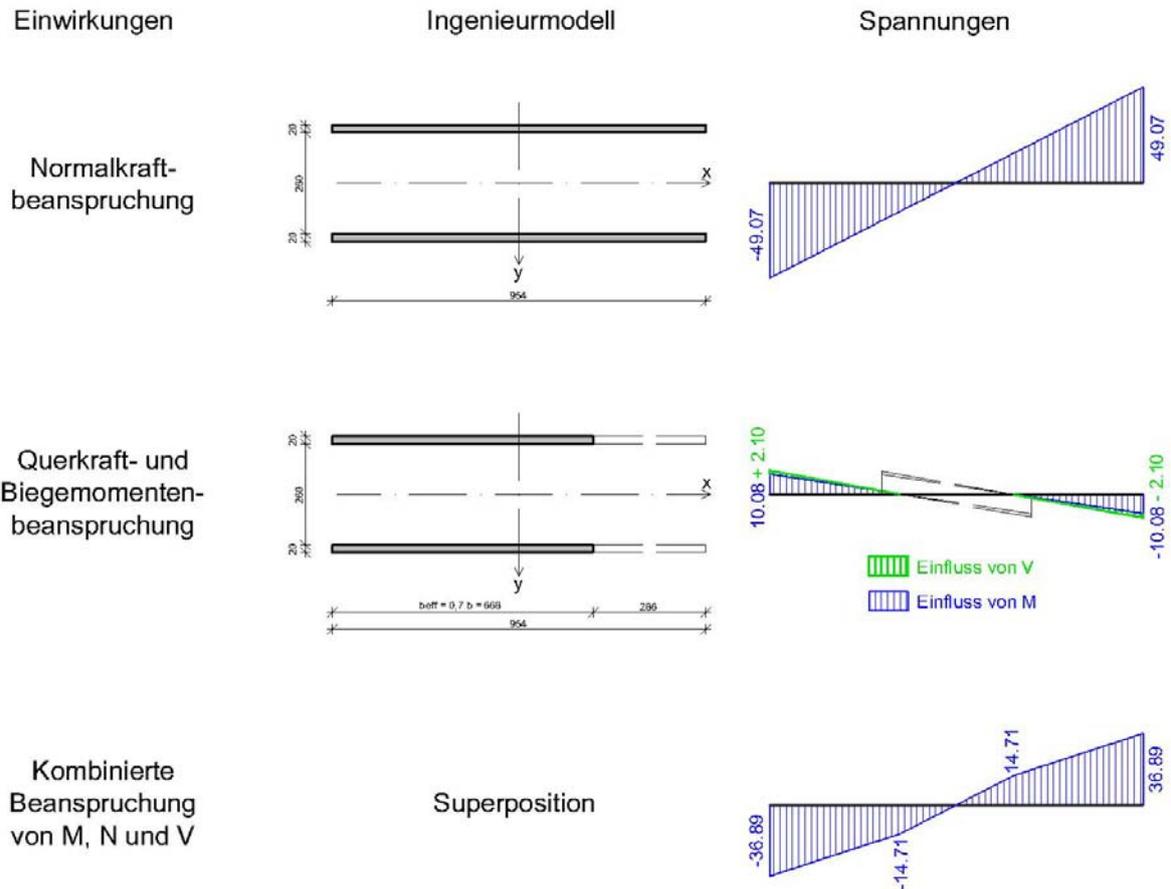


Abbildung A-88: Ermittlung der Schubspannungen unter M-, N- und V- Beanspruchung

In Abbildung A-88 sind die den einzelnen Einwirkungen zugrunde gelegten Modelle und die bereits in den vorigen Abschnitten berechneten Normalspannungen ersichtlich. Unten sieht man den durch Superposition neu ermittelten Spannungsverlauf zufolge kombinierter Beanspruchung aus Moment, Normalkraft und Querkraft.

Ermittlung der Schubspannung

Die Schubspannung wird am vollen Querschnitt von Schnitt 2-2 ermittelt. Es ergibt sich folgendes Maximum als Summe der Beanspruchungen M, N und V. Die Werte sind dem jeweiligen Abschnitt der vorliegenden Arbeit entnommen.

$$\tau_{N,\max} = 57,99 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\tau_{MV,\max} = 0,49 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\tau_{MNV,\max} = \tau_{N,\max} + \tau_{MV,\max} = 58,48 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Ermittlung der Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes

Auch hier werden die Ergebnisse aus den bisherigen Untersuchungen überlagert.

σ_{xx} zufolge Normalkraftbeanspruchung

$$\sigma_{xx,li} = -82,2 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{xx,re} = -142,5 \text{ N} / \text{mm}^2$$

σ_{xx} zufolge Biegemomenten und Querkraftbeanspruchung

$$\sigma_{xx,li} = 18,17 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{xx,re} = -9,09 \text{ N} / \text{mm}^2$$

σ_{xx} zufolge M, N und V- Wirkung

$$\sigma_{xx,li} = -82,2 + 18,17 = -64,03 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{xx,re} = -142,5 - 9,09 = -151,59 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Zwischen den Werten wird ein linearer Spannungsverlauf angenommen.

Ermittlung der Vergleichsspannung

Vergleichsspannungsverlauf in den Achtpunkten

$$\tau_{\max} = 58,48 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{z,N} = \pm 49,07 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_{z,MV} = \pm 10,08 \pm 2,10 = \pm 12,18 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_z = \sigma_{z,N} + \sigma_{z,MV}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{zz} + 3 \cdot \tau_{xz}^2}$$

x	τ_{xz} [N/mm ²]	σ_{zN} [N/mm ²]	σ_{zMV} [N/mm ²]	σ_z [N/mm ²]	σ_{xx} [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
-47,69	0,00	-49,07	12,18	-36,89	-64,03	58,02
-35,77	25,59	-36,80	7,83	-28,97	-74,98	78,61
-23,85	43,86	-24,54	3,48	-21,05	-85,92	107,92
-11,92	54,83	-12,27	-	-12,27	-96,87	131,77
0,00	58,48	0,00	-	0,00	-107,81	147,93
11,92	54,83	12,27	-	12,27	-118,76	157,25
23,85	43,86	24,54	-3,48	21,05	-129,70	162,41
35,77	25,59	36,80	-7,83	28,97	-140,65	168,15
47,69	0,00	49,07	-12,18	36,89	-151,59	181,18

Tabelle A-21: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten

Die Zwischenwerte für Tabelle A-21 wurden auf Basis folgender Grundlagen ermittelt. Für die Schubspannungen τ wurden die Zwischenwerte für einen parabelförmigen Verlauf mit dem Maximalwert von 58,48 N/mm² berechnet. Die Normalspannungen $\sigma_{z,N}$ wurden zwischen den beiden Randspannungen linear interpoliert. Die Normalspannungen $\sigma_{z,MV}$ ergeben sich durch grafische Ermittlung aus dem Spannungsbild. Für die Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes σ_{xx} wird ebenfalls ein linearer Verlauf angesetzt.

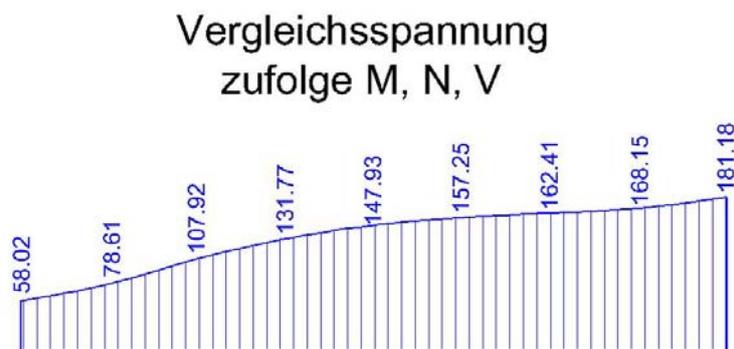


Abbildung A-89: Vergleichsspannungsverlauf unter M-, N- und V- Beanspruchung

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

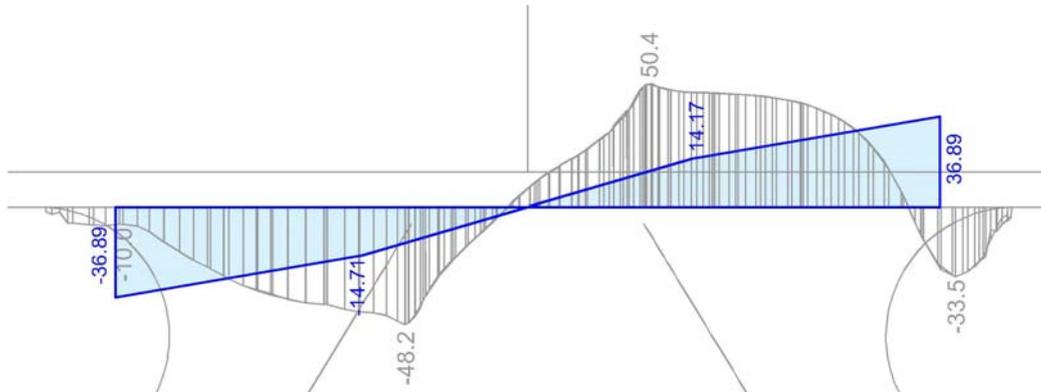


Abbildung A-90: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

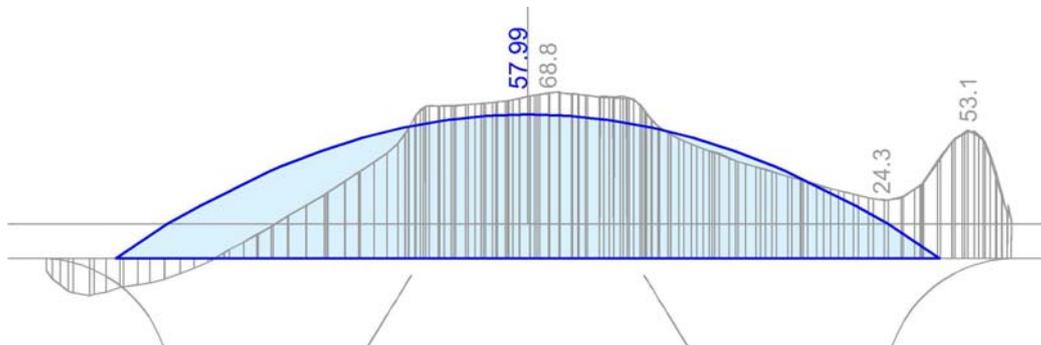


Abbildung A-91: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V- Beanspruchung [N/mm²]

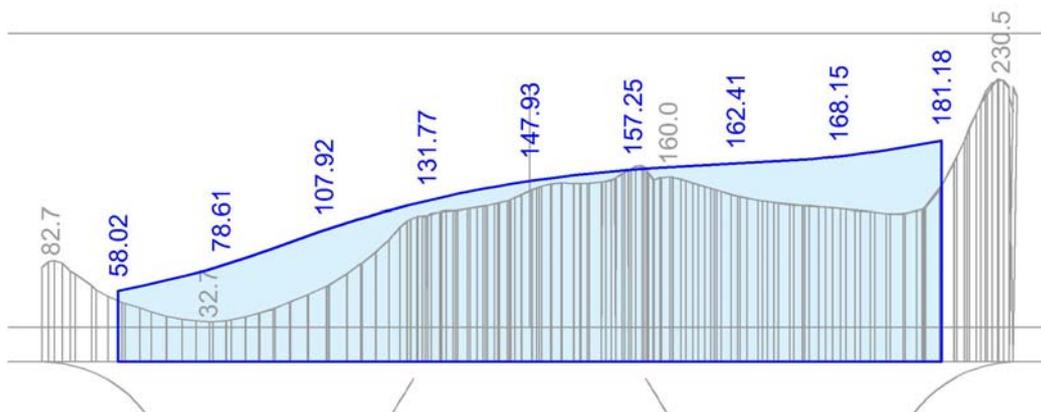


Abbildung A-92: Verlauf der Vergleichsspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

- Ergebnisse des Ingenieurmodells
- Ergebnisse der FE-Berechnung

Abbildung A-93: Legende

Interpretation der Ergebnisse

Der Verlauf der Normalspannungen gemäß FE-Berechnung stimmt mit jenem zufolge des Ingenieurmodells nur sehr schlecht überein. Die Ursache liegt in der Lage des Spannungsmaximums. Durch die zusätzliche Wirkung der Momente und Querkräfte werden die Spannungen am Rand des Schnittes 2-2 zufolge Normalkraftbeanspruchung in beiden Berechnungsmodellen reduziert. Der maßgebende Wert der FE-Berechnung liegt jedoch nicht am Rand und wird praktisch gar nicht abgemindert. Die Schubspannungen stimmen gut überein. Die Maximalwerte werden allerdings auch hier durch das Ingenieurmodell unterschätzt.

Bei der Vergleichsspannung liegt das Ingenieurmodell dank den angesetzten Spannungen infolge der Haupttragwirkung des Obergurtes innerhalb des Schnittes 2-2 auf der sicheren Seite. An den Rändern außerhalb der rechnerischen Breite der Schnittführung kommt es bedingt durch die Geometrie der Ausrundungen zu größeren Abweichungen, die durch das Ingenieurmodell nicht erfasst werden können.

4.3) Schnitt 3-3

Untersuchtes Modell

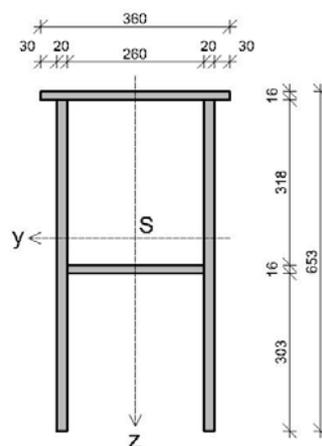


Abbildung A-94: Modell für Schnitt 3-3

Ermittlung der Normalspannung

$$\sigma_{N,o} = -134,59 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{N,u} = -0,93 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{MV,o} = -2,76 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{MV,u} = 3,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{NMV,o} = \sigma_{N,o} + \sigma_{MV,o} = -137,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{NMV,u} = \sigma_{N,u} + \sigma_{MV,u} = 2,38 \text{ N/mm}^2$$

Zwischenwerte innerhalb des Querschnitts ergeben sich durch lineare Interpolation zwischen $\sigma_{NMV,o}$ und $\sigma_{NMV,u}$.

Ermittlung der Schubspannung

$$\tau_{NMV} = \tau_N + \tau_{MV}$$

Pkt.	τ_N [N/mm ²]	τ_{MV} [N/mm ²]	τ_{NMV} [N/mm ²]
1	0,00	0,00	0,00
2	33,82	0,16	33,97
3	0,00	0,00	0,00
4	7,25	0,03	7,28
5	32,85	0,15	33,00
6	65,98	0,30	66,28
7	64,41	0,30	64,71
8	0,00	0,00	0,00
9	-7,36	-0,03	-7,39
10	58,52	0,27	58,79
11	0,00	0,00	0,00

Tabelle A-22: Ermittlung der Schubspannungen

Die Schubspannungen in Tabelle A-22 wurden den Abschnitten Normalkraft-, bzw. Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung entnommen. Auch die Punktbezeichnung für Schnitt 3-3 ist dort definiert.

Ermittlung der Vergleichsspannung

$$\sigma_{NMV} = \sigma_N + \sigma_{MV}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Pkt.	τ [N/mm ²]	σ_{NMV} [N/mm ²]	σ_V [N/mm ²]
1	0,00	-137,34	137,34
2	33,97	-137,34	149,42
3	0,00	-137,34	137,34
4	7,28	-137,34	137,92
5	33,00	-137,34	148,76
6	66,28	-77,88	138,73
7	64,71	-64,94	129,53
8	0,00	-64,94	64,94
9	-7,39	-64,94	66,19
10	58,79	-64,94	120,77
11	0,00	2,38	2,38

Tabelle A-23: Ermittlung der Vergleichsspannung

Gegenüberstellung der analytischen Ergebnisse mit der FE-Berechnung

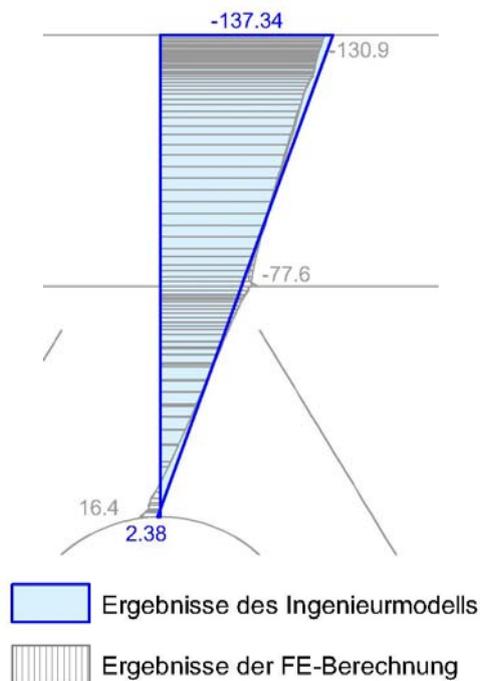


Abbildung A-95: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

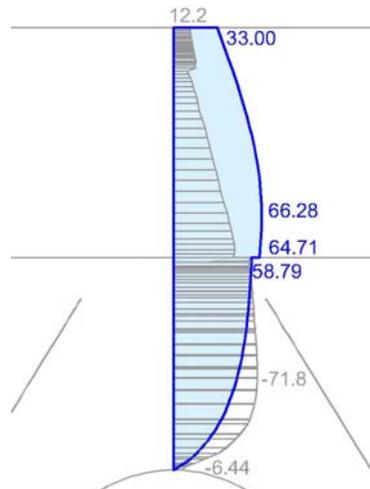


Abbildung A-96: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

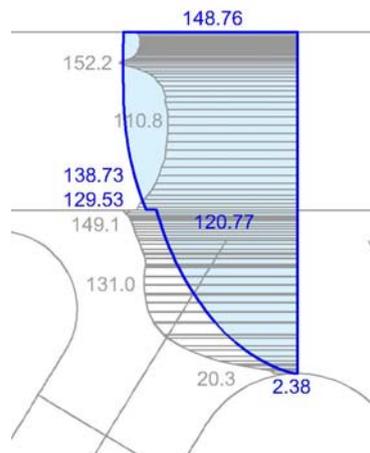


Abbildung A-97: Verlauf der Vergleichsspannung bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm²]

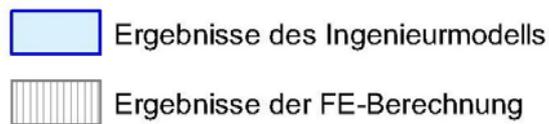


Abbildung A-98: Legende

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert Ergebnisse, die sehr nahe an den Berechnungen der FE-Analyse liegen. Die Normalspannungen stimmen sehr genau überein. Der Maximalwert ist abgedeckt. Die Schubspannungen weisen einen etwas verschobenen Verlauf auf. Trotzdem liegen die Ergebnisse hinsichtlich des Maximalwertes nahe zusammen. Der Extremwert der Vergleichsspannung wird durch das Ingenieurmodell auch sehr gut erfasst.

A4) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1) Allgemeines

Im ersten Teil der Diplomarbeit wird ein Obergurtnoten eines Brückenfachwerks analysiert. Dabei werden die Ergebnisse der gängigen ingenieurmäßigen Berechnungsmodelle mit Ergebnissen aus FE-Berechnungen verglichen.

Die Normalkraftbeanspruchungen der Fachwerkstäbe werden zufolge des konkreten Beispiels einer einundfünfzig Meter langen Straßenbrücke ermittelt. Die Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchungen, die im Fachwerk aus Zwängungen und Querbelastrung der Stäbe resultieren, werden durch realistische Werte abgeschätzt.

Der untersuchte Fachwerkknottcn entspricht dem zweiten Obergurtnottcn in Brückenlängsrichtung. Bei der gewählten Konstruktionsweise sind drei maßgebende Schnitte zur Knottcndimensionierung zu analysieren. Es wurden jeweils die Spannungen zufolge Normalkraftbeanspruchung und jene zufolge Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung separat ermittelt und in einem letzten Schritt die Kombination der verschiedenen Beanspruchungen untersucht.

2) Untersuchte Schnitte

2.1) Schnitt 1-1

Der erste betrachtete Schnitt, ist jener Waagschnitt, an der schmalsten Stelle des Knottcnbleches. An dieser Stelle müssen die Horizontalkomponenten der Diagonalennormalkräfte übertragen werden. Zusätzlich ergibt sich eine Momentenbeanspruchung durch die Exzentrizität der Vertikalkomponenten. Weiters sind an den Stäben angreifende Momente und Querkräfte zu berücksichtigen.

2.1.1) Normalkraftbeanspruchung

Die Untersuchungen unter Normalkraftbeanspruchung haben bestätigt, dass die in diesem Schnitt auftretenden Spannungen gut, durch die dem Stand der Technik entsprechenden Modelle, abgeschätzt werden können. Konkret wurden zwei verschiedene Modelle untersucht. Das erste Modell beinhaltet die geschnittenen Diagonalenstegbleche, während diese beim zweiten Berechnungsansatz vernachlässigt werden.

Sowohl die sich im Ingenieurmodell ergebenden Schubspannungen, als auch die Vergleichsspannungen liegen bei beiden Modellen über den Großteil der Schnittführung nahe an den Ergebnissen der FE-Analyse. Abweichungen ergeben sich jedoch an den Seitenrändern. Dort liefert die FE-Berechnung höhere Spannungen. Aus dem stärker vereinfachten zweiten Ingenieurmodell resultieren sogar besser übereinstimmende Ergebnisse, da dort höhere Randspannungen auftreten.

2.1.2) Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung

Bei Betrachtung der Spannungszustände unter Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung der Fachwerkstäbe ergeben sich größere Abweichungen. Werden ein Diagonalenstab, oder beide, mit einem Biegemoment, oder einer Querkraft beansprucht, so ist es nicht zweckmäßig, die Normalspannungen am gesamten Querschnitt des betrachteten Schnittes zu ermitteln. Dadurch würden die auftretenden Spannungen um ein Vielfaches unterschätzt. Im Zuge der Diplomarbeit wurde versucht ein passendes Modell für diese Belastungssituation zu ermitteln.

Es hat sich gezeigt, dass man für die Ermittlung der maximalen Spannungen im ersten Schnitt am besten nur einen Querschnitt mit der Breite des beanspruchten Diagonalenstabes und der Blechstärke des Knotenblechs heranzieht. Die Ursache dafür liegt in folgendem Zusammenhang. In der Mitte des Querschnittes kommt es entsprechend dem Ingenieurverständnis zu einem Abbau und Ausgleich der Spannungen. Im Gegensatz dazu werden die maßgebenden Randspannungen an der Ausrundung, aufgrund der geringen Steifigkeit des Knotenbleches, so gut wie gar nicht reduziert. Dieser Schluss konnte aus Ergebnisstudien und durch Analyse der Spannungstrajektorien gewonnen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden, die Auswirkungen gleich- und gegensinnig drehender Momente getestet, mit dem Ergebnis, dass das gewählte Modell für beide Situationen treffende Ergebnisse zur Ermittlung der maßgebenden Spannungen liefert.

2.1.3) Kombinierte Beanspruchung

Durch die Summation der Einzeleinwirkungen kann ein Eindruck über den Einfluss der Einzelergebnisse auf die Gesamtsituation gewonnen werden. Es ist von der jeweiligen Beanspruchungsrichtung abhängig, ob sich Abweichungen zwischen den verschiedenen Berechnungsmethoden summieren oder gegenseitig aufheben. In jedem Fall haben allerdings Abweichungen unter Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung aufgrund deren Kleinheit im Vergleich zu den Normalkraftbeanspruchungen einen geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Im konkreten Fall hat sich gezeigt, dass die Spannungsverläufe durch die verhältnismäßig einfachen Ingenieurmodelle gut angenähert werden können. Die Spannungsmaximalwerte werden allerdings sowohl bei der Schub-, Normal- und auch bei der Vergleichsspannung geringfügig unterschätzt. Die höheren Schubspannungen der FE-Berechnung in der Mitte von Schnitt 1-1 resultieren aus dem Einfluss der Biegemomente- und Querkräfte, während die höheren Normalspannungen am rechten Rand durch die Normalkraftbeanspruchung erzeugt werden.

2.2) Schnitt 2-2

Der zweite untersuchte Schnitt, ist der Waagschnitt an der Unterseite des Obergurtes. Dieser Schnitt hat im Ingenieurmodell durch seine geometrische Konstruktion eine geringere rechnerische Breite als im FE-Modell. Es wird somit bei der Ergebnisanalyse zwischen Bereichen innerhalb und außerhalb des Schnittes 2-2 unterschieden. Zusätzlich zur Belastungssituation des ersten Schnittes müssen hier die Beanspruchungen infolge der Haupttragwirkung des Obergurtes berücksichtigt werden.

2.2.1) Normalkraftbeanspruchung

Auch bei diesem Schnitt wurden zuerst die Spannungen unter Normalkraftbeanspruchung analysiert. Die Einflüsse der Druckbeanspruchung des Obergurtes bewirken, dass die Ergebnisse zufolge FE-Analyse und dem Ingenieurmodell über den Schnittverlauf stärker abweichen, als beim ersten betrachteten Schnitt. Im Hinblick auf die Extremwerte der Beanspruchung zeigt sich innerhalb der Grenzen von Schnitt 2-2 allerdings eine sehr gute Übereinstimmung. Das Ingenieurmodell liegt, betrachtet man die Vergleichsspannung, durchwegs auf der sicheren Seite.

Außerhalb des Schnittes 2-2 ergeben sich größere Abweichungen hinsichtlich der Schub- und Vergleichsspannung. Die dort im FE-Modell auftretenden Schubspannungen resultieren aus der Geometrie der Ausrundung und können durch das Ingenieurmodell nicht vollständig erfasst werden.

2.2.2) Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung

Wie schon beim ersten Schnitt, treten auch bei diesem unter Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung größere Abweichungen zwischen den beiden Berechnungsmethoden auf. Ermittelt man die Spannungen unter Berücksichtigung der gesamten Breite des betrachteten Schnittes, erhält man geringere Spannungen als mittels der FE-Berechnung. Dies liegt an der Tatsache, dass die einwirkenden Kräfte aufgrund der fehlenden Steifigkeit nicht auf den Gesamtquerschnitt verteilt werden können.

Die maßgebenden Spannungen können auch hier mit einem einfachen Modell erhalten werden. Man berücksichtigt nur eine wirksame Breite von $b_{\text{eff}} = 0,7 \cdot b$. Dies entspricht in etwa einer Halbierung des Widerstandsmomentes. Die gewählte Breite konnte wiederum durch Analyse der Spannungstrajektorien untermauert werden.

Außerhalb des Schnittes 2-2 können ähnlich große Abweichungen hinsichtlich Schub- und Vergleichsspannung wie unter Normalkraftbeanspruchung beobachtet werden. Wieder ist dies auf die Geometrie der Ausrundung zurückzuführen.

2.2.3) Kombinierte Beanspruchung

Der Verlauf der Normalspannungen gemäß FE-Berechnung stimmt mit jenem zufolge des Ingenieurmodells nur sehr schlecht überein. Die Ursache liegt in der Lage des Spannungsmaximums. Durch die zusätzliche Wirkung der Momente und Querkräfte werden die Spannungen am Rand des Schnittes 2-2 zufolge Normalkraftbeanspruchung in beiden Berechnungsmodellen reduziert. Der maßgebende Wert der FE-Berechnung liegt jedoch nicht am Rand und wird praktisch gar nicht abgemindert.

Die Schubspannungen stimmen gut überein. Die Maximalwerte werden allerdings auch hier durch das Ingenieurmodell unterschätzt. Bei der Vergleichsspannung liegt das Ingenieurmodell innerhalb des Schnittes 2-2 auf der sicheren Seite. An den Rändern außerhalb der rechnerischen Breite der Schnittführung kommt es bedingt durch die Geometrie der Abrundungen zu größeren Abweichungen, die durch das Ingenieurmodell nicht erfasst werden können.

2.3) Schnitt 3-3

Der letzte betrachtete Schnitt ist der Vertikalschnitt durch den Schnittpunkt der Stabachsen des Fachwerks. Durch die Erhöhung des Obergurtquerschnittes im Knotenbereich wird der Schwerpunkt an dieser Stelle nach unten verschoben. Dadurch ergibt sich eine die Exzentrizität der Obergurtnormalkräfte, die zu berücksichtigen ist. Aus der Vertikalkomponente der Diagonale Normalkraft resultiert eine Querkraftbeanspruchung für den Schnitt. Angreifende Biegemomente und Querkräfte sind zusätzlich zu beachten.

2.3.1) Normalkraftbeanspruchung

Das Ingenieurmodell liefert Ergebnisse die sehr nahe an den Berechnungen der FE-Analyse liegen. Die Abweichungen der maximalen Spannungen liegen im Bereich von etwa zehn Prozent.

2.3.2) Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung

Unter Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchungen sind gute Übereinstimmungen der auftretenden Normalspannungen in den Ergebnissen der beiden Berechnungsmethoden aufgetreten. Bei den Schubspannungen und damit auch bei der Vergleichsspannung gibt es große Abweichungen. Dies liegt daran, dass beim Ingenieurmodell aufgrund der geringen Querkraft kaum Schubspannungen vorhanden sind. In der FE-Analyse ergeben sich, sowohl betragsmäßig große positive, als auch negative Schubspannungen, die sich, summiert man sie über den Querschnitt, nahezu aufheben.

2.3.3) Kombinierte Beanspruchung

Bei der Kombinierten Beanspruchung von Moment, Normalkraft und Querkraft ergeben sich gute Übereinstimmungen der Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden. Der Maximalwert der Normalspannung wird durch das Ingenieurmodell knapp übertroffen. Die Extremwerte der Schub- und Vergleichsspannungen werden geringfügig unterschätzt.

A5) Verzeichnisse

1) Literaturverzeichnis

ÖNORM EN 1991-2: *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*, 2003.

ÖNORM EN 1993-2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken*, 2006.

Fink, Josef. *Studienblätter zu Vorlesung Stahlbau 1*. Wien: Technische Universität - Institut für Tragkonstruktionen Stahlbau, 2006.

2) Tabellenverzeichnis

Tabelle A-01: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten	14
Tabelle A-02: Schwerpunktsermittlung Schnitt 1-1	16
Tabelle A-03: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment.....	16
Tabelle A-04: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes.....	19
Tabelle A-05: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes	19
Tabelle A-06: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten	22
Tabelle A-07: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf.....	30
Tabelle A-08: Schwerpunktsermittlung Schnitt 3-3	35
Tabelle A-09: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment.....	35
Tabelle A-10: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes.....	37
Tabelle A-11: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes	38
Tabelle A-12: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten	42
Tabelle A-13: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf.....	45
Tabelle A-14: Schwerpunktsermittlung.....	56
Tabelle A-15: Ermittlung von Trägheits- und Widerstandsmoment.....	57
Tabelle A-16: Ermittlung von Schub-, Normal- und Vergleichsspannungsverlauf.....	57
Tabelle A-17: Ermittlung des Schubspannungsverlaufes.....	61
Tabelle A-18: Ermittlung des Normal- und Vergleichsspannungsverlaufes	62
Tabelle A-19: Einwirkende Schnittgrößen mit Horizontal- und Vertikalkomponenten	83
Tabelle A-20: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten	85
Tabelle A-21: Ermittlung des Vergleichsspannungsverlaufes in den Achtelpunkten	90
Tabelle A-22: Ermittlung der Schubspannungen.....	93
Tabelle A-23: Ermittlung der Vergleichsspannung	94

3) Abbildungsverzeichnis

Abbildung A-01: Statisches System in Brückenlängsrichtung (Maße in mm)	11
Abbildung A-02: Knotendetail mit Normalkraftbeanspruchung.....	13
Abbildung A-03: Schematische Darstellung der verwendeten Randbedingungen.....	14
Abbildung A-04: Darstellung der Geometrie für Schnitt 1-1	15
Abbildung A-05: Vorwerte zur Berechnung des Statischen Momentes.....	17
Abbildung A-06: Verlauf des Statischen Momentes	18
Abbildung A-07: Ergebnisse von Ingenieurmodell 1	20
Abbildung A-08: Ergebnisse von Ingenieurmodell 2	23
Abbildung A-09: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	24
Abbildung A-10: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²].....	24
Abbildung A-11: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²]	24
Abbildung A-12: Legende.....	24
Abbildung A-13: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	25
Abbildung A-14: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²].....	25
Abbildung A-15: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²]	25
Abbildung A-16: Legende.....	25
Abbildung A-17: Darstellung der Geometrie für Schnitt 2-2	27
Abbildung A-18: Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes	29
Abbildung A-19: Querschnitt zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung.....	29
Abbildung A-20: Ergebnisse des Ingenieurmodells.....	31
Abbildung A-21: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	32
Abbildung A-22: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²].....	32
Abbildung A-23: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²]	32
Abbildung A-24: Legende.....	32
Abbildung A-25: Darstellung der Geometrie für Schnitt 3-3	34
Abbildung A-26: Vorwerte zur Berechnung des Statischen Momentes.....	36
Abbildung A-27: Verlauf des statischen Momentes.....	37
Abbildung A-28: Ergebnisse des Ingenieurmodells.....	38
Abbildung A-29: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	39
Abbildung A-30: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²].....	39
Abbildung A-31: Legende.....	39
Abbildung A-32: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²]	40
Abbildung A-33: Knotendetail mit Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung.....	41
Abbildung A-34: Schematische Darstellung der Randbedingungen	42
Abbildung A-35: Darstellung der Geometrie für Schnitt 1-1	43

Abbildung A-36: Ergebnisse des Ingenieurmodells.....	46
Abbildung A-37: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	47
Abbildung A-38: Ergebnisvergleich - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²].....	47
Abbildung A-39: Ergebnisvergleich - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²]	47
Abbildung A-40: Legende.....	47
Abbildung A-41: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand.....	48
Abbildung A-42: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	49
Abbildung A-43: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand.....	50
Abbildung A-44: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	51
Abbildung A-45: Hauptspannungen und Zugzone bei Wirkung von M_{DIA1}	52
Abbildung A-46: Aufhebung der Spannungskomponente in y-Richtung	52
Abbildung A-47: Ermittlung der Zugzonenbreite	53
Abbildung A-48: Darstellung der Geometrie für Schnitt 2-2	54
Abbildung A-49: Spannungen aus der Haupttragwirkung des Obergurtes	56
Abbildung A-50: Querschnitt zur Ermittlung der Normalspannungen in x-Richtung.....	56
Abbildung A-51: Ergebnisse des Ingenieurmodells.....	58
Abbildung A-52: Ergebnisvergleich - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²]	59
Abbildung A-53: Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²]	59
Abbildung A-54: Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²].....	59
Abbildung A-55: Legende.....	59
Abbildung A-56: Darstellung der Geometrie für Schnitt 3-3	60
Abbildung A-57: Ergebnisse des Ingenieurmodells.....	62
Abbildung A-58: Ergebnisverlauf - Verlauf der Normalspannungen [N/mm ²].....	63
Abbildung A-59: Ergebnisverlauf - Verlauf der Schubspannungen [N/mm ²]	63
Abbildung A-60: Legende.....	63
Abbildung A-61: Ergebnisverlauf - Verlauf der Vergleichsspannung [N/mm ²].....	64
Abbildung A-62: Schematische Darstellung der Randbedingungen	65
Abbildung A-63: Näherungsweise Knotensymmetrie	66
Abbildung A-64: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm ²] ..	67
Abbildung A-65: Normalspannungsverlauf bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm ²].....	68
Abbildung A-66: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} + M_{DIA2}$ [N/mm ²]	69
Abbildung A-67: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} - M_{DIA2}$ [N/mm ²].....	70
Abbildung A-68: Hauptspannungen bei Wirkung von M_{DIA1}	71
Abbildung A-69: Modell zur Ermittlung der Normalspannungen am Rand.....	72
Abbildung A-70: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm ²] ..	73
Abbildung A-71: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm ²]...	74
Abbildung A-72: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} + M_{DIA2}$ [N/mm ²]	75

Abbildung A-73: Normalspannungsverlauf zufolge $M_{DIA1} - M_{DIA2}$ [N/mm ²].....	76
Abbildung A-74: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA1} [N/mm ²] ..	77
Abbildung A-75: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA1} [N/mm ²]...	78
Abbildung A-76: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{DIA2} [N/mm ²] ..	79
Abbildung A-77: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{DIA2} [N/mm ²]...	79
Abbildung A-78: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von M_{OG1} [N/mm ²] ..	80
Abbildung A-79: Verlauf der Normalspannungen bei alleiniger Wirkung von V_{OG1} [N/mm ²] ...	81
Abbildung A-80: Knotendetail mit kombinierter Beanspruchung mit M, N und V	82
Abbildung A-81: Schematische Darstellung der verwendeten Randbedingungen.....	83
Abbildung A-82: Ermittlung der Normalspannungen unter M-, N- und V- Beanspruchung	84
Abbildung A-83: Vergleichsspannungsverlauf unter M-, N- und V- Beanspruchung.....	86
Abbildung A-84: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²]	86
Abbildung A-85: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V- Beanspruchung [N/mm ²]	87
Abbildung A-86: Verlauf der Vergleichsspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²].	87
Abbildung A-87: Legende.....	87
Abbildung A-88: Ermittlung der Schubspannungen unter M-, N- und V- Beanspruchung	88
Abbildung A-89: Vergleichsspannungsverlauf unter M-, N- und V- Beanspruchung.....	90
Abbildung A-90: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²]	91
Abbildung A-91: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V- Beanspruchung [N/mm ²]	91
Abbildung A-92: Verlauf der Vergleichsspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²].	91
Abbildung A-93: Legende.....	91
Abbildung A-94: Modell für Schnitt 3-3.....	92
Abbildung A-95: Verlauf der Normalspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²]	94
Abbildung A-96: Verlauf der Schubspannungen bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²]	95
Abbildung A-97: Verlauf der Vergleichsspannung bei M, N, V - Beanspruchung [N/mm ²].....	95
Abbildung A-98: Legende.....	95

B) Spannungsanalysen eines Schweißnahtdetails

1) Allgemeines

Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss unterschiedlicher Schweißnahtgeometrien und Blechstärken auf die Spannungen im Bereich der Schweißnaht einer Trogbrücke zu ermitteln. Des Weiteren wird geprüft, ob ingenieurmäßige Modelle zur Erfassung der Spannungen realitätsnahe Ergebnisse liefern können. Die Berechnung des Systems mittels der Finiten Elemente Methode erfolgt mit dem Programm SSD – Sofistik Structural Desktop Vers. 10.75 – 23. Bei der Modellierung werden aufgrund der dreieckigen Schweißnahtgeometrie Dreieckselemente verwendet. Das System wird als Scheibe zweidimensional berechnet. Dabei wird ein ebener Spannungszustand zugrunde gelegt. Die Dicke der Scheibe in Raumrichtung wird mit 10 cm gewählt.

2) Querschnitte

Es sollen mehrere Querschnitts- und Schweißnahtgeometrien für Trogbrückenquerschnitte für den Stützweitenbereich von etwa 10 bis 25 Metern untersucht werden. Es werden drei charakteristische Geometrien aus Regelplänen ausgewählt und zwar je eine für kleine, mittlere und große Spannweiten. Die Nahtstärken der untersuchten Schweißnaht variieren dabei von 12 bis 16 mm. Der Winkel zwischen Untergurtblech und den Stegen wird einheitlich mit $121,1^\circ$ gewählt. Dies entspricht der Stegblechneigung der Trogbrücke für eine Spannweite zwischen 10 und 13 Metern (Regelquerschnitt 3). Die Vereinheitlichung dient dazu, nicht zu viele Parameter zwischen den untersuchten Modellen zu verändern. Die Materialgüten variieren zwischen den einzelnen Brücken laut Regelplanung. Dies braucht jedoch nicht berücksichtigt werden, da elastisch gerechnet und die Fließgrenze nicht erreicht wird.

Im Bereich der Schweißnaht werden bei den unterschiedlichen Modellen folgende Parameter variiert:

- Stegblechdicke
- Schweißnahtdicke
- Schweißnahtgeometrie

3) Modellbildung

3.1) Randbedingungen, System und Belastung

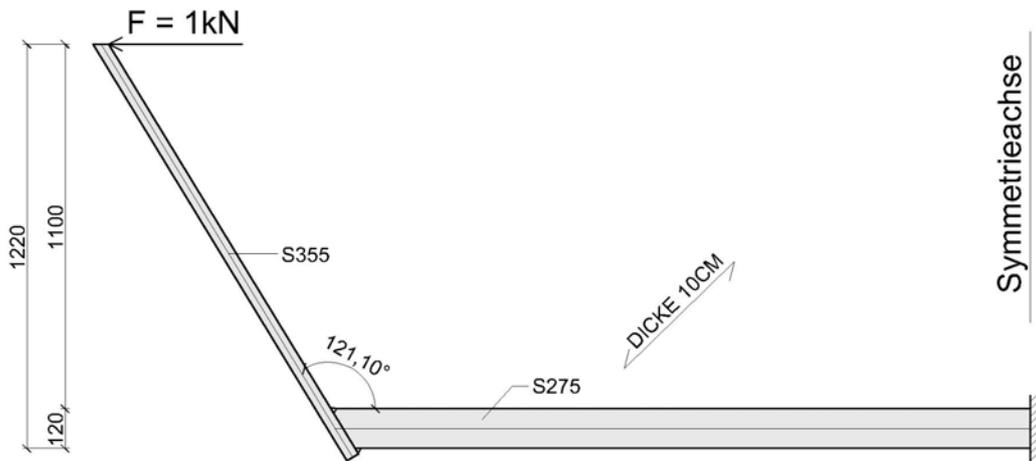


Abbildung B-01: Randbedingungen und Belastung für die FE-Analysen

Die zu untersuchenden Brückenquerschnitte werden in der Symmetrieachse eingespannt gelagert. Der Winkel zwischen Untergurt und Steg ist zur besseren Vergleichbarkeit für alle Berechnungen mit $121,1^\circ$ fixiert. Dies entspricht der tatsächlichen Stegneigung von Regelquerschnitt 3. Die Belastung erfolgt durch eine horizontale Einheitslast von 1 kN, die auf mittlerer Höhe des Brückenobergurtes angreift.

3.2) Erfassung der Fugensituation

Das Hauptaugenmerk bei der Modellbildung liegt auf dem Bereich der Stoßfuge zwischen Steg- und Untergurtblech. Die beiden Einzelquerschnitte von Steg und Untergurt liegen im Fugenbereich plan aneinander. Dadurch können über die Fuge hinweg Druckspannungen, allerdings keine Zugspannungen übertragen werden. Schweißeigenspannungen werden im Rahmen der Modellbildung nicht berücksichtigt. Treten aufgrund der Belastungssituation im Fugenbereich Druckspannungen auf, so könnten infolge des Anpressdrucks geringe Schubspannungen übertragen werden. Diese werden bei der Berechnung, auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.

Nach mehreren Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Modellen am Regelquerschnitt 1 konnte ein für die weiteren Berechnungen geeignetes Modell, gefunden werden. Die Schwierigkeit lag in der Definition der Materialparameter im Fugenbereich, sodass weder Zug- noch Schubspannungen übertragen werden konnten. Des Weiteren konnte durch die verschiedenen getesteten Modelle ein Überblick über den Einfluss der Modellbildung auf die ermittelten Spannungen gewonnen werden.

3.2.1) Modelle für Voruntersuchungen

- Modell ohne Berührung der Querschnitte im Fugenbereich

Bei diesem Modell kommt es vor allem im Bereich der unteren Schweißnaht zu großen Abweichungen von den anderen untersuchten Modellen, da neben den Zugspannungen auch die gesamten Druckspannungen über den kleinen Schweißnahtquerschnitt übertragen werden müssen.

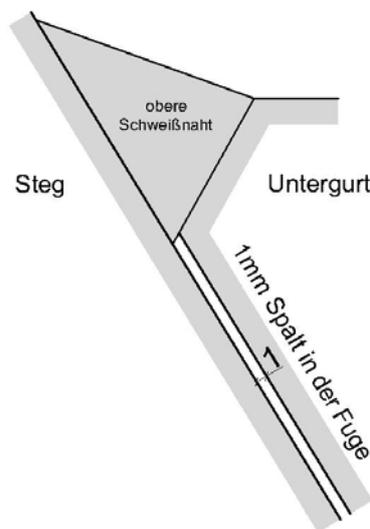


Abbildung B-02: Modell ohne Berührung der Querschnitte im Fugenbereich

- Modell ohne Zugspannungen im Bereich der Fuge

Dieses Modell liegt schon nahe jenem, das für die Berechnungen herangezogen wurde. Allerdings können immer noch Schubspannungen über die Fuge übertragen werden. Das mit Hilfe des Berechnungsprogramms definierte Material im Fugenbereich fällt nur bei Auftreten einer Zugspannung aus. Die Ergebnisse liegen aufgrund der gegebenen Belastung nahe an dem Modell mit durchgehendem Querschnitt im Fugenbereich.

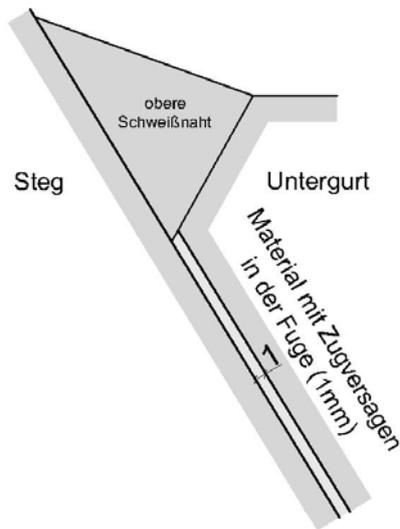


Abbildung B-03: Modell ohne Zugspannungen im Fugenbereich

3.2.2) Referenzmodell

Bei diesem Modell geht der Querschnitt im Bereich der Fuge durch. Die Ergebnisse liegen bei der gegebenen Beanspruchung nicht so weit von der Realität entfernt, wie es im ersten Moment scheint. Dies liegt daran, dass ohnehin ein Großteil der Zugspannungen innerhalb des Querschnittes der oberen Schweißnaht abgebaut werden kann. Im Hinblick auf das Maximum der Vergleichsspannung liefern alle untersuchten Modelle ähnliche Ergebnisse mit Schwankungen im Bereich von ungefähr 10%. Um Referenzergebnisse zu bekommen, wird neben dem Berechnungsmodell, auch dieses Modell ausgewertet.

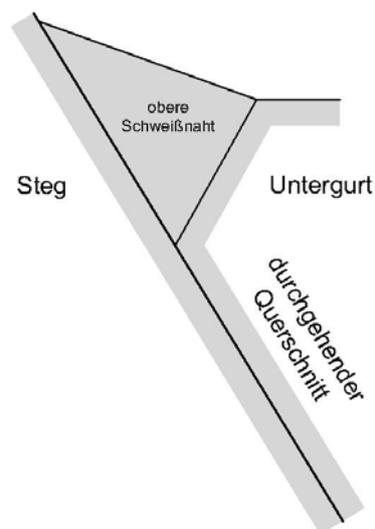


Abbildung B-04: Referenzmodell mit durchgehendem Querschnitt im Fugenbereich

3.2.3) Berechnungsmodell

Bei diesem Modell wurden Federn im Druckbereich der Fuge angeordnet. Zwischen den beiden Schweißnähten wird einen Spalt mit einer Breite von einem Millimeter angenommen. Dieser Spalt wird im Druckbereich durch Federn überbrückt. Die Höhe des Druckbereiches wurde iterativ auf den Millimeter genau ermittelt. Kleine Abweichungen von der tatsächlichen Nulllinienlage liegen innerhalb der Berechnungsgenauigkeit. Das Programm Sofistik Structural Desktop bietet zwar eine Funktion zur Definition einer Risslast, die zum Ausfall der Federn bei Zugbeanspruchung führt. Da allerdings bei den Ergebnissen dennoch mitunter Zugkräfte in den Federn auftraten, wurde im weiteren Arbeitsverlauf auf diese Funktion verzichtet.

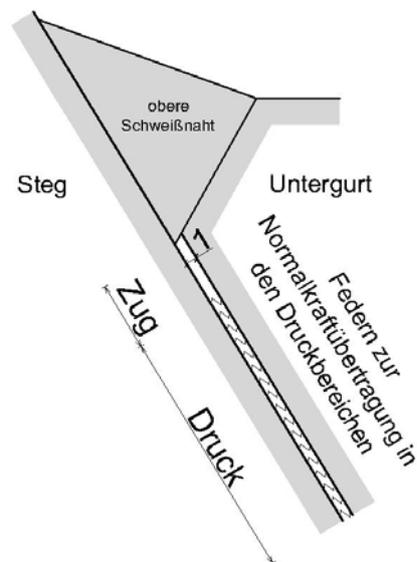


Abbildung B-05: Berechnungsmodell mit Federn im Druckbereich der Fuge

Der genaue Vorgang bei der Modellierung in Sofistik besteht darin, die Strukturlinien beidseits der Fuge zu koppeln. Es werden Bettungswerte für eine axiale Feder definiert. Dabei besteht die Möglichkeit ein Material auszuwählen.

Gewählte Bettungsparameter in Sofistik:

- Material Baustahl S355
- Bettungskonstante normal zur Fuge $2,1 \cdot 10^{11} \text{ kN/m}^3$
(bei einer Spaltbreite von 1mm)
- Keine Querbettung

Durch das Ausschalten der Querbettung wird die Übertragung von Kräften tangential zu Fuge verhindert. Der Ausfall der Querfederkräfte wurde bei den Berechnungsergebnissen überprüft und sichergestellt.

Trotz der Tatsache, dass tangential zur Fuge keine Kräfte übertragen werden, ergeben sich Scheibenschubspannungen beim Schnitt längs der Fuge. Diese treten bei den FE-Berechnungen mitunter auch an anderen freien Rändern auf, obwohl dies nicht den Vorstellungen eines Ingenieurmodells entspricht. Teilweise kann dies durch die nicht exakte Schnitfführung entlang des Fugenrandes begründet werden. Weiters wurde die Geometrie mit dem Programm Sofistik mittels Strukturflächen eingegeben. Diese Strukturflächen werden nach Angabe der maximalen Elementgröße automatisch in ein FE-Modell umgewandelt. Im Zuge dieser automatischen Verfeinerung können an den Rändern geringe Abweichungen von der Ursprungsgeometrie auftreten. Diese kleinen Abweichungen von der Geradheit führen zu scheinbaren Schubspannungen. Ein Zusammenhang zwischen den auftretenden Schubspannungen und der Modellierung der Stoßfuge konnte jedenfalls ausgeschlossen werden.

4) Schweißnähte

Die Geometrie der Schweißnaht an der Unterseite der Trogbrücke wird bei den diversen Untersuchungen nicht variiert. Im Mittelpunkt der Untersuchungen liegt die obere Schweißnaht, da dort aufgrund der Belastung hohe Zugspannungsspitzen auftreten. Diese sind wiederum stark von der Schweißnahtgeometrie abhängig. Die Dicke a der Schweißnähte ist bei den verschiedenen Regelquerschnitten nicht konstant sondern variiert in Abhängigkeit von den Stegblechdicken zwischen 12 und 16 Millimetern. Für alle Schweißnähte kommt Baustahl S355 zum Einsatz.

B1) Regelquerschnitt 1

1) Geometrie

Querschnitt

Diese Querschnittsausbildung ist für einen Stützweitenbereich von 20 bis 25 Metern geeignet.

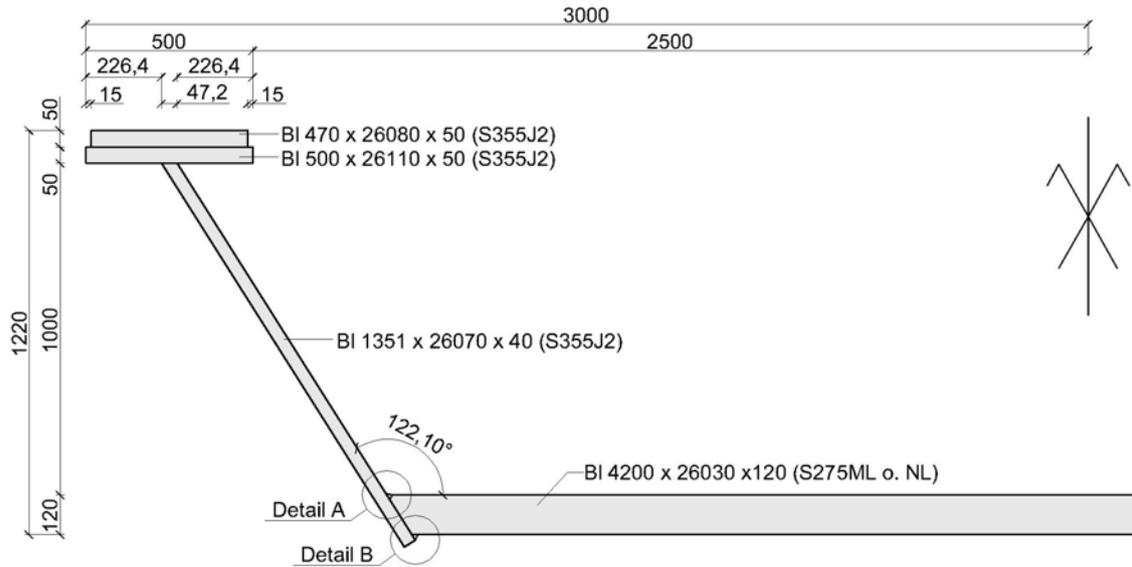


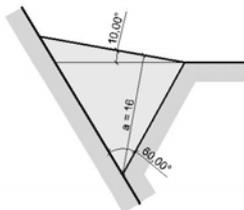
Abbildung B-06: Führungsskizze Regelquerschnitt 1

Die in Abbildung B-06 gekennzeichneten Details sind in Abbildung B-07 dargestellt.

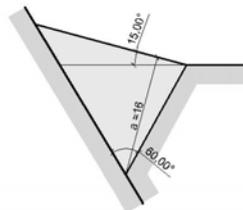
Schweißnähte - Fallunterscheidung

Detail A - Oberseite

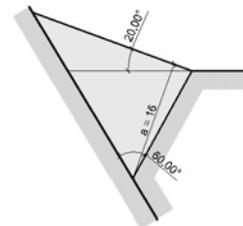
Fall a



Fall b



Fall c



Detail B - Unterseite

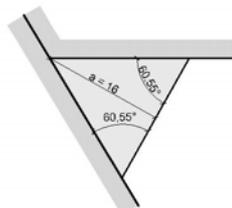


Abbildung B-07: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für a = 16mm

2) Berechnung

2.1) Ingenieurmodell

Spannungen im Regelbereich des Steges

Ermittlung der Querschnittswerte

$$A = 40 \text{ cm}^2$$

$$I_{xs} = \frac{10 \cdot 4^3}{12} = 53,3 \text{ cm}^4$$

$$W_x = \frac{10 \cdot 4^2}{6} = 26,7 \text{ cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen auf Höhe der Untergurt-Oberkante

$$N = 1 \cdot \cos(180 - 121,1) = 0,52 \text{ kN}$$

$$V = 1 \cdot \sin(180 - 121,1) = 0,86 \text{ kN}$$

$$M_x = 1 \cdot 1,10 = 1,10 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{links} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^2} - \frac{110 \cdot 10^4}{26,7 \cdot 10^3} = -41,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{rechts} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^2} + \frac{110 \cdot 10^4}{26,7 \cdot 10^3} = +41,3 \text{ N/mm}^2$$

Bei Vernachlässigung der Schubspannungen entspricht die Normalspannung σ_{rechts} der Vergleichsspannung am oberen Schweißnahtansatz.

Grafische Darstellung der Ergebnisse

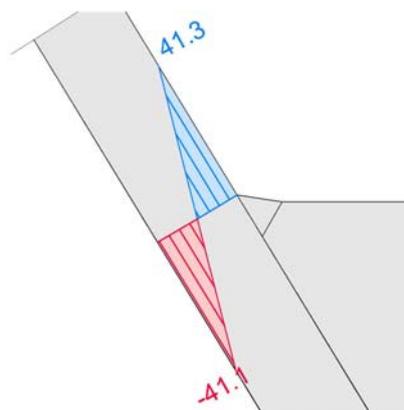


Abbildung B-08: Ergebnisse des Ingenieurmodells [N/mm²]

Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

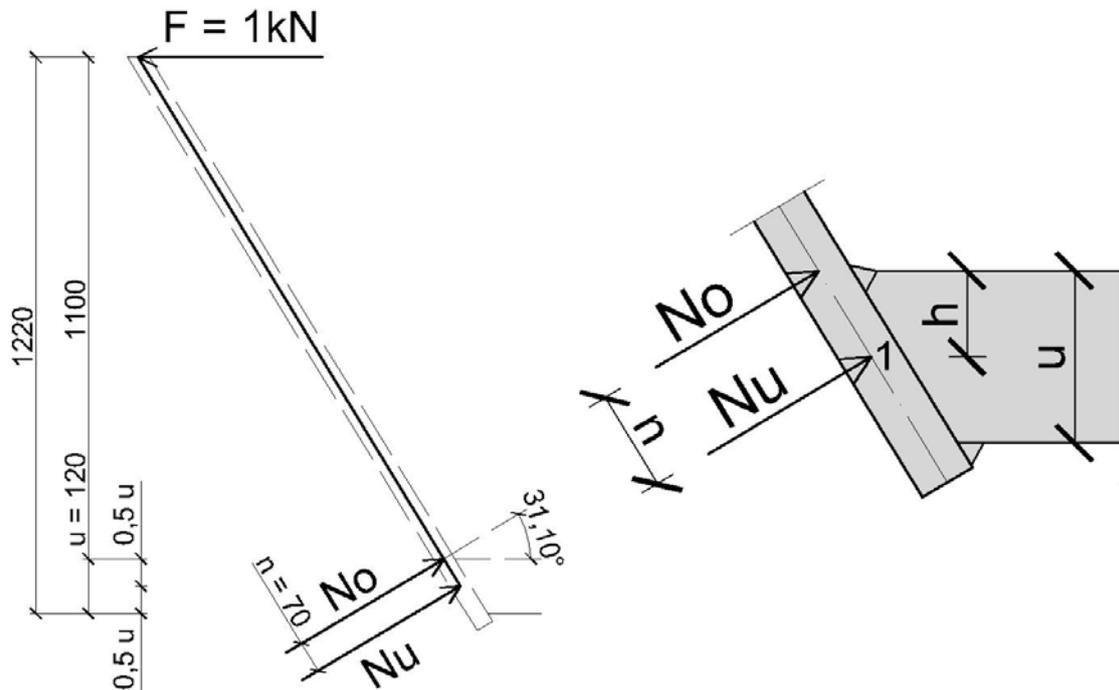


Abbildung B-09: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

Für das Ingenieurmodell wird angenommen, dass die Zugspannungen großteils in der oberen Schweißnaht übertragen werden. Der Angriffspunkt der Zugkraft der oberen Schweißnaht liegt im Modell der Einfachheit halber auf Höhe der Oberkante des Untergurtes und ist damit unabhängig von der Schweißnahtgeometrie. Die Druckspannungen verteilen sich auf den unteren Bereich, sodass der Angriffspunkt der Resultierenden Druckkraft etwa auf halber Höhe des Untergurtes liegt.

Momentengleichgewichtsbedingung um Punkt 1 (Abbildung B-09):

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow N_o = \frac{F \cdot (1,1 + 0,5 \cdot u)}{n} = \frac{1,0 \cdot (1,1 + 0,5 \cdot 0,12)}{0,07} = 16,6 \text{ kN}$$

2.2) Fall a

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 10° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

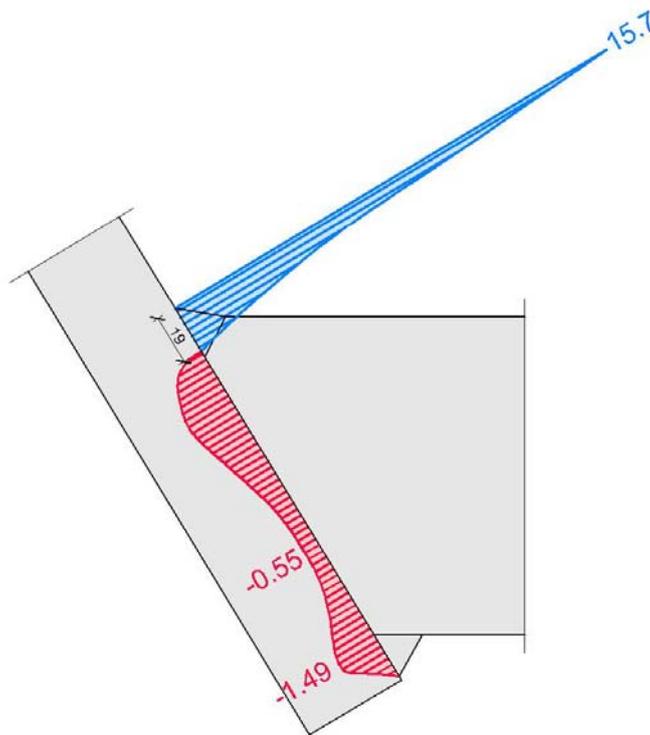


Abbildung B-10: Normalspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 19 mm.

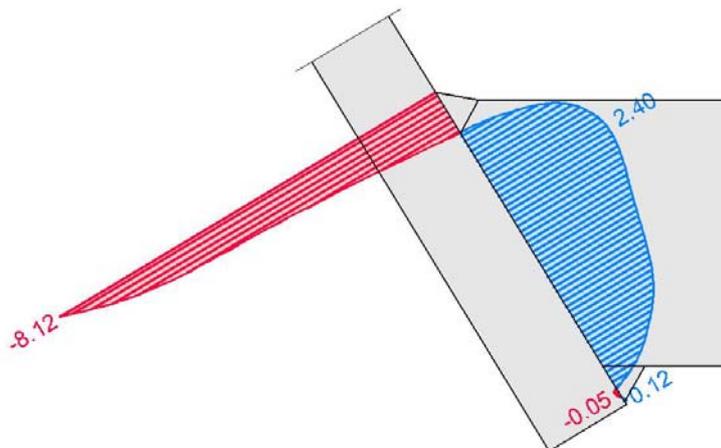


Abbildung B-11: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

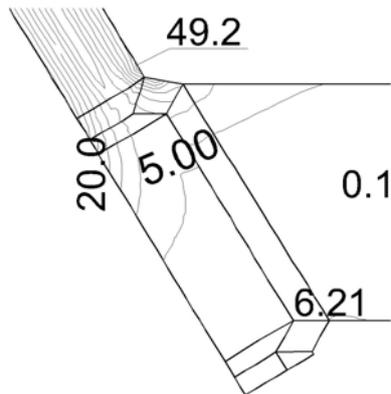


Abbildung B-12: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg knapp oberhalb der Schweißnaht und beträgt 49,2 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

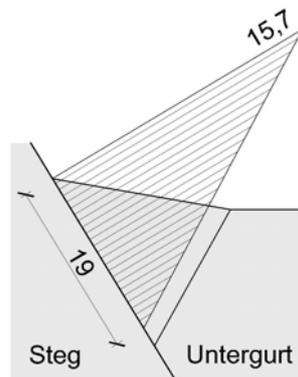


Abbildung B-13: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,9 \cdot 10 = 19 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 19 \cdot \frac{15,7}{2 \cdot 10} = 14,9 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge

Ergebnisse der FE-Berechnung

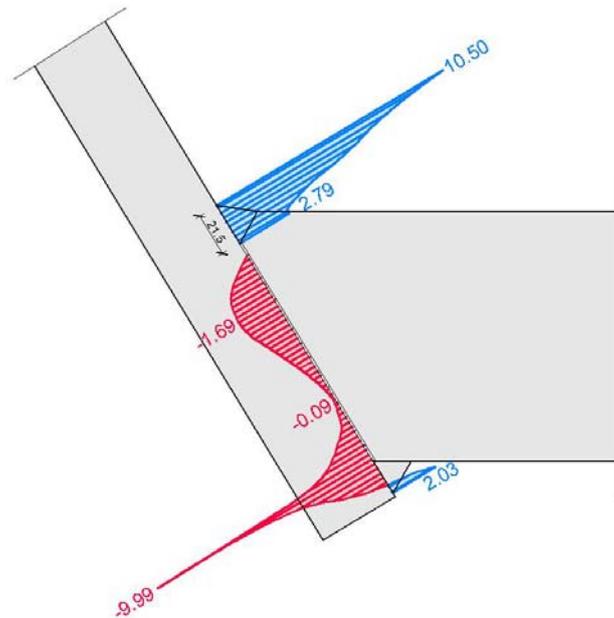


Abbildung B-14: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 21,5 mm.

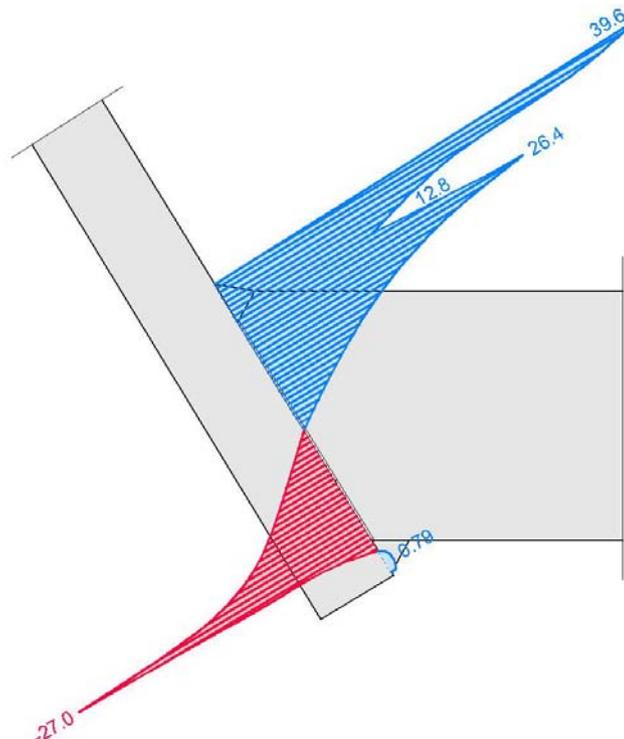


Abbildung B-15: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

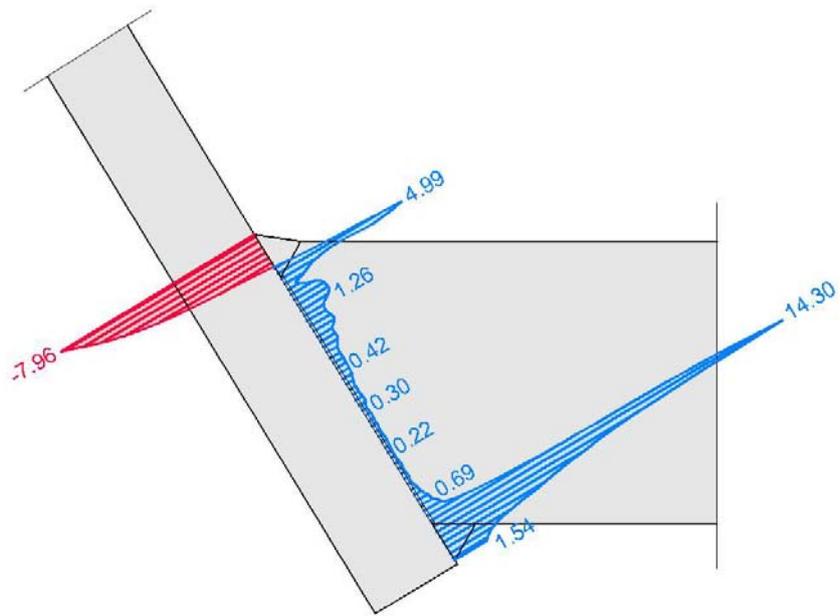


Abbildung B-16: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

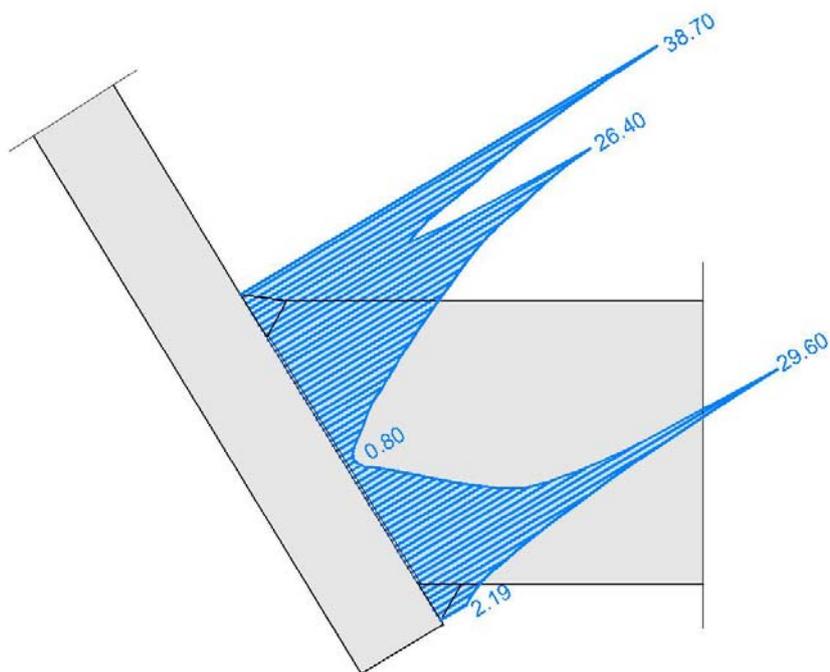


Abbildung B-17: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

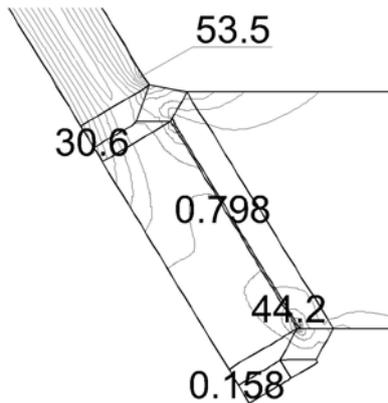


Abbildung B-18: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 53,5 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

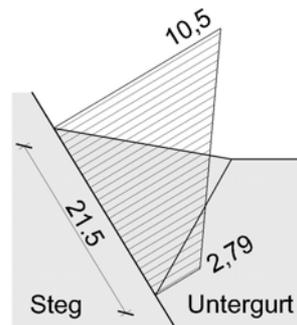


Abbildung B-19: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,15 \cdot 10 = 21,5 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 21,5 \cdot \frac{(10,5 + 2,79)}{2 \cdot 10} = 14,3 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 25% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.3) Fall b

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 15° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

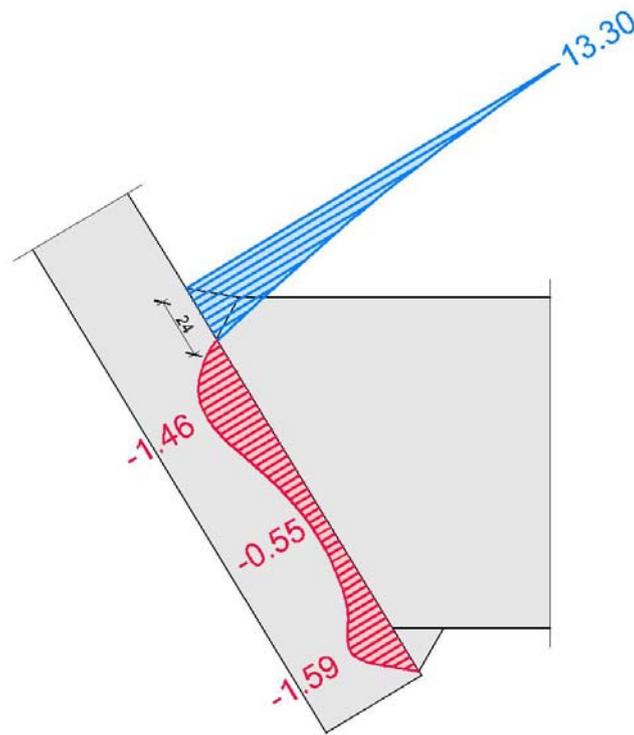


Abbildung B-20: Normalspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 24 mm.

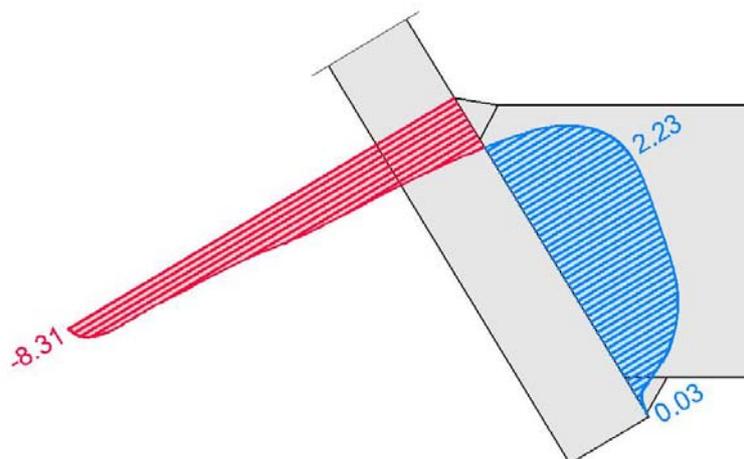


Abbildung B-21: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

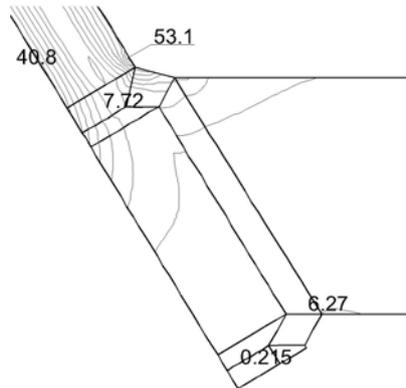


Abbildung B-22: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 53,1 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

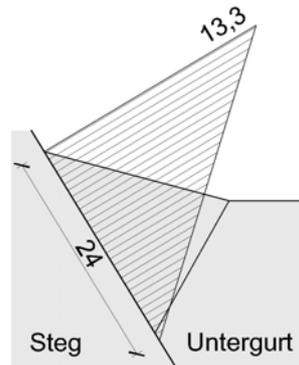


Abbildung B-23: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,4 \cdot 10 = 24 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 24 \cdot \frac{13,3}{2 \cdot 10} = 16,0 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 25% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge

Ergebnisse der FE-Berechnung

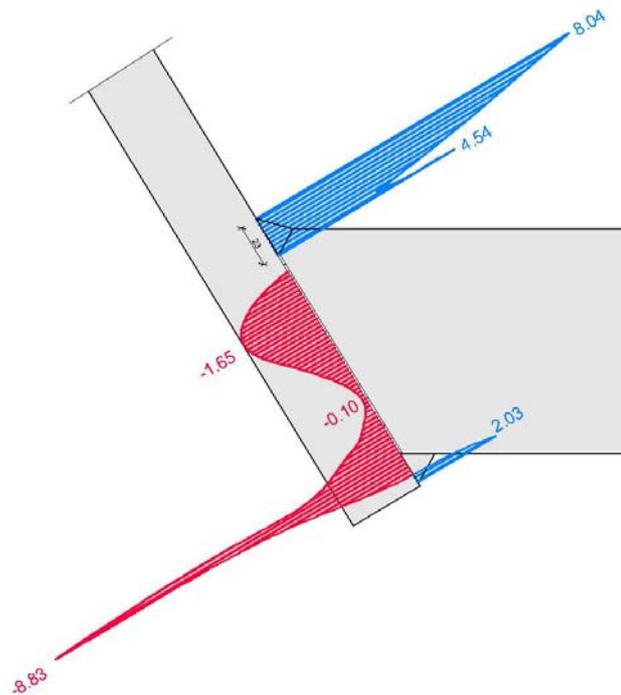


Abbildung B-24: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 23 mm.

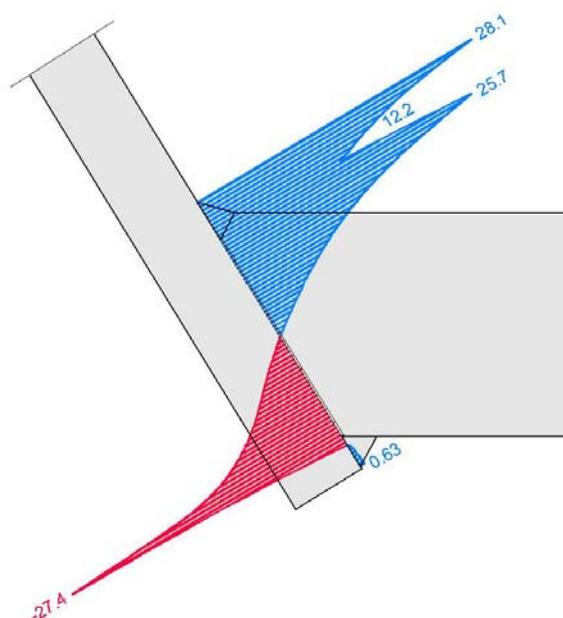


Abbildung B-25: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

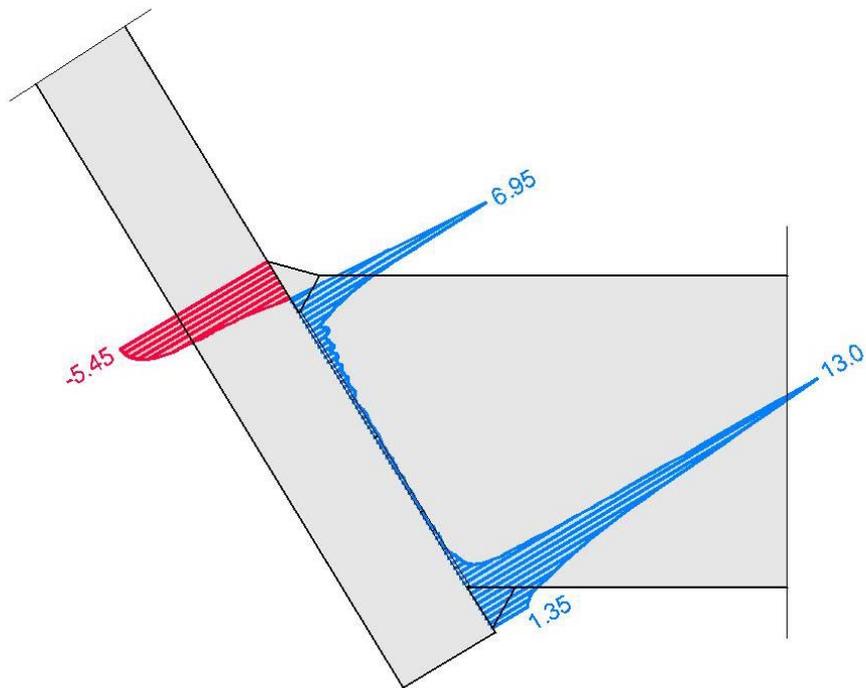


Abbildung B-26: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

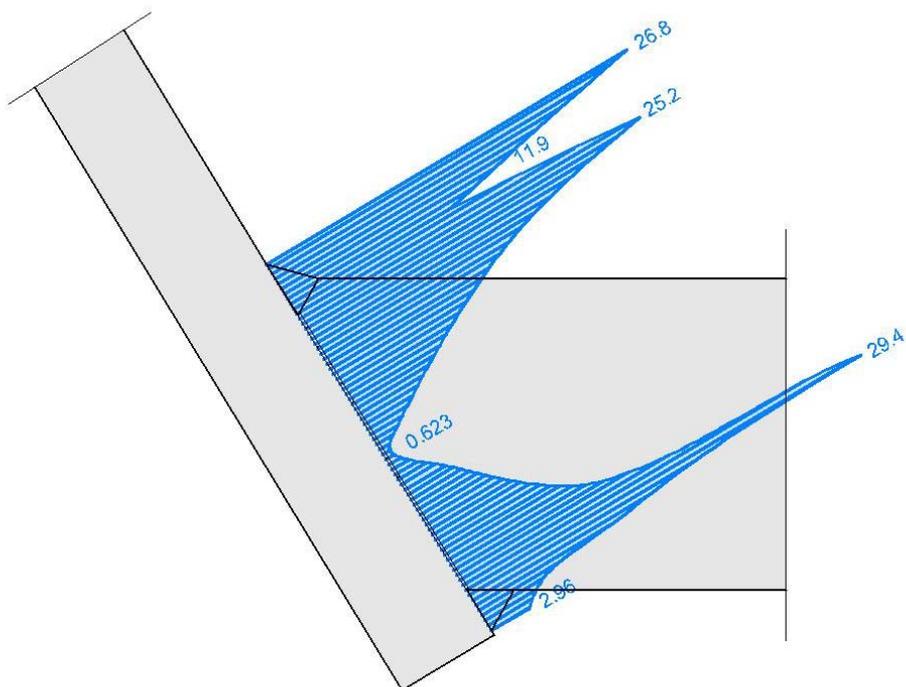


Abbildung B-27: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

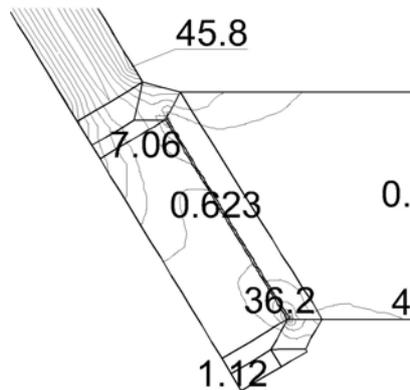


Abbildung B-28: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 45,8 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

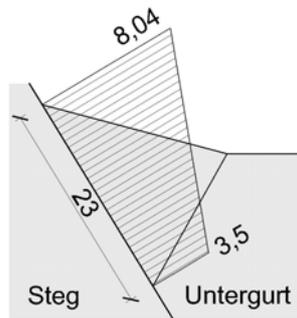


Abbildung B-29: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,3 \cdot 10 = 23 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 23 \cdot \frac{(8,04 + 3,50)}{2 \cdot 10} = 13,3 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.4) Fall c

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 20° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

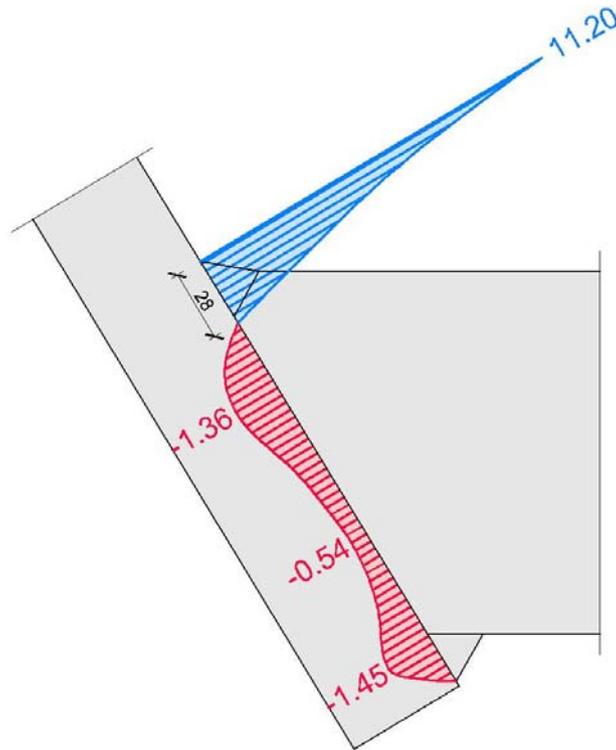


Abbildung B-30: Normalspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 28 mm.

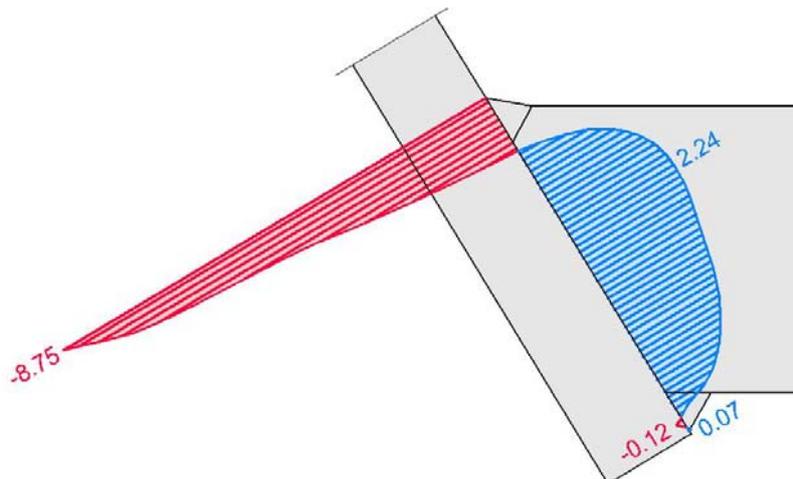


Abbildung B-31: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

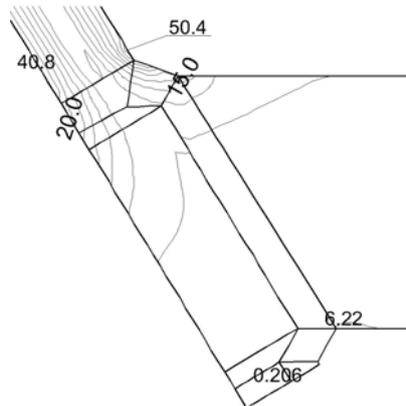


Abbildung B-32: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 50,4 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

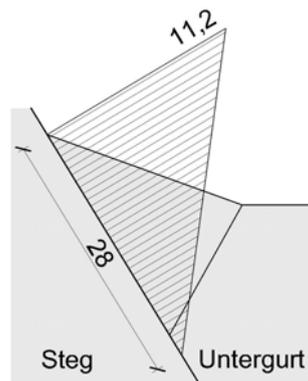


Abbildung B-33: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,8 \cdot 10 = 28 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 28 \cdot \frac{11,2}{2 \cdot 10} = 15,7 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge

Ergebnisse der FE-Berechnung

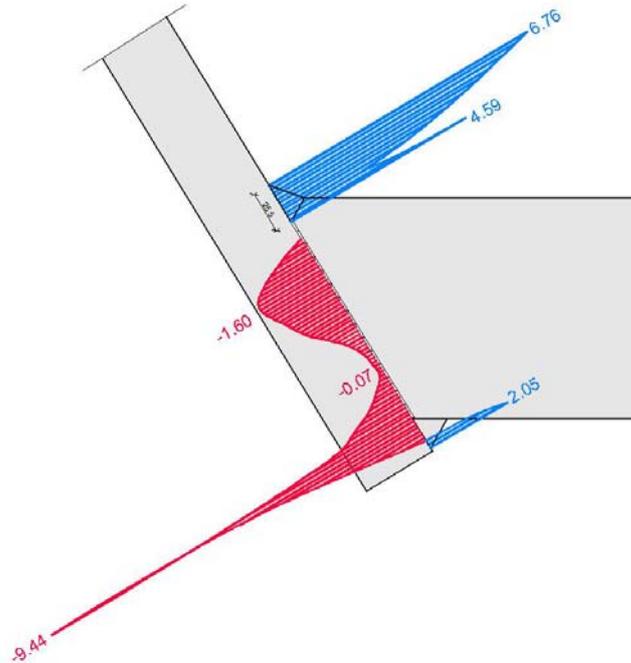


Abbildung B-34: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 25,5 mm.

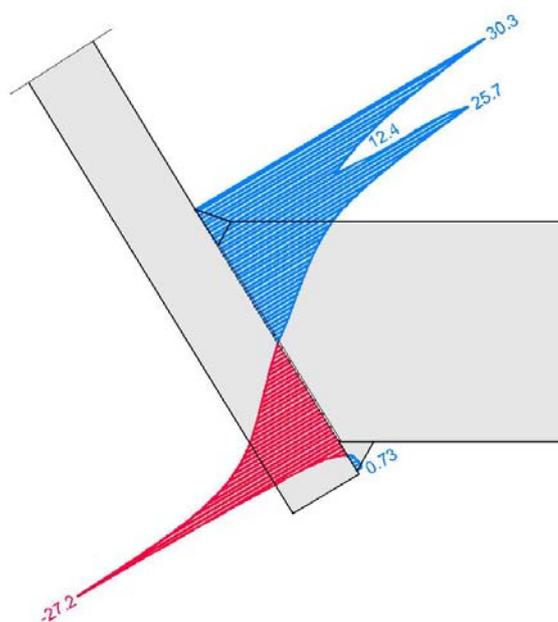


Abbildung B-35: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

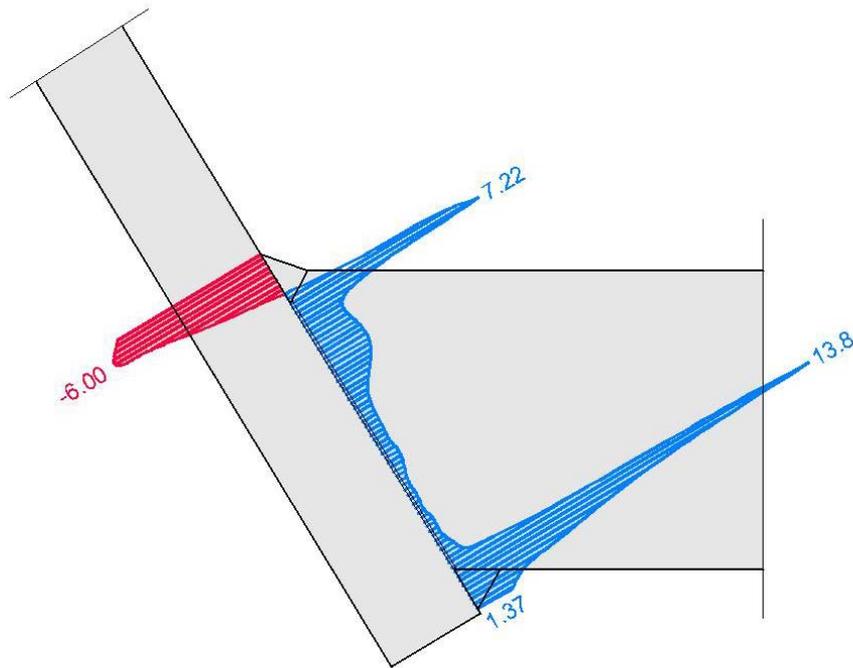


Abbildung B-36: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

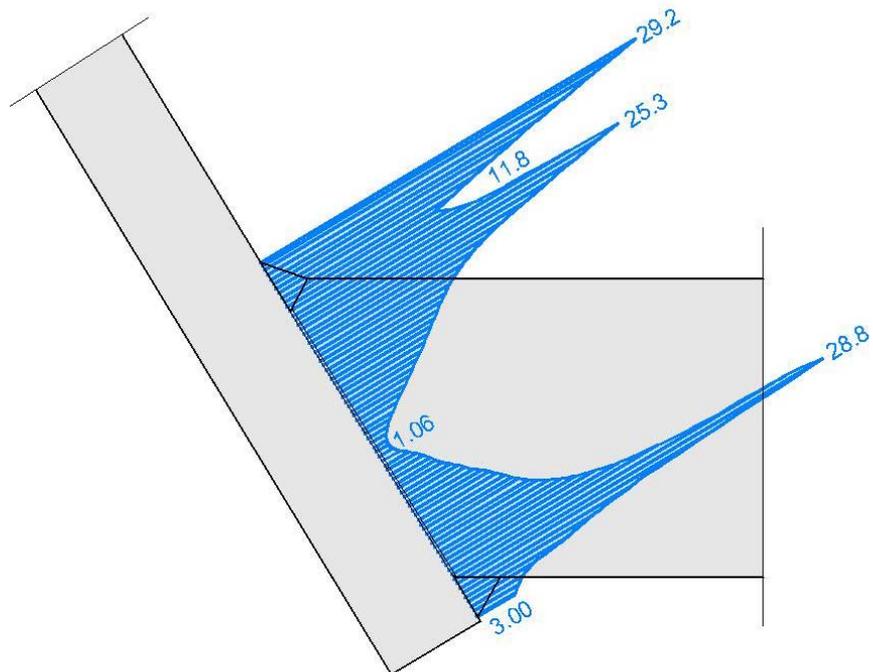


Abbildung B-37: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

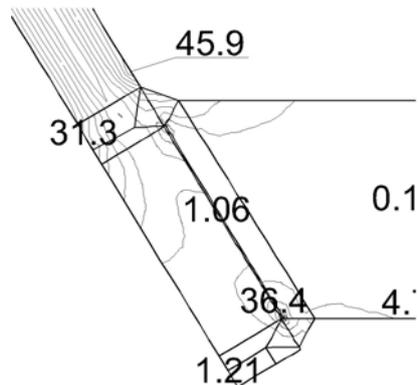


Abbildung B-38: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 45,9 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

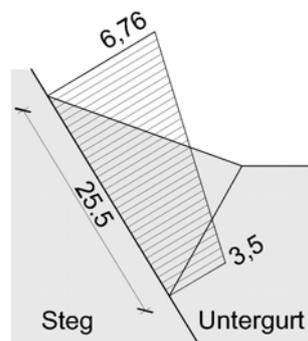


Abbildung B-39: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,55 \cdot 10 = 25,5 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 25,5 \cdot \frac{(6,76 + 3,50)}{2 \cdot 10} = 13,1 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=16,6$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung

Ergebnisübersicht

In der folgenden Tabelle sind die sich in den einzelnen Modellen für Regelquerschnitt 1 ergebenden maximalen Spannungen zusammengefasst. Der Winkel α beschreibt den Winkel zwischen Schweißnaht- und Untergurtoberfläche.

Die eingetragenen Werte σ_V , σ_N , σ_T und τ geben den Maximalwert der jeweiligen Spannung innerhalb des Schnittverlaufes wieder. Bei der Normal-, Tangential- und Vergleichsspannung liegt dieser am obersten Schweißnahtpunkt. Für die Vergleichsspannung wird noch ein zweiter Wert angegeben und zwar $\sigma_{V,max}$. Dieser stellt den maximal auftretenden Wert bei der jeweiligen Geometrie dar.

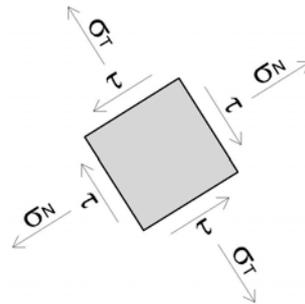


Abbildung B-40: Definition der Spannungskomponenten

Es werden die Ergebnisse des Berechnungsmodells (BM) und jene des Referenzmodells (RM) angegeben. Für das Referenzmodell wurden auch die Tangentialspannung und die Vergleichsspannung eingetragen. Die zugehörigen Abbildungen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht eigens angeführt.

Fall	α	Modell	σ_N	σ_T	τ	σ_V	$\sigma_{V,max}$
	[°]		[N/mm ²]				
a	10	BM	10,50	39,60	-7,96	38,70	53,50
		RM	15,70	38,80	-8,12	36,60	49,20
b	15	BM	8,04	28,10	-5,45	26,80	45,80
		RM	13,30	39,60	-8,31	37,70	53,10
c	20	BM	6,76	30,30	-6,00	29,20	45,90
		RM	11,20	41,80	-8,75	40,40	50,40

Tabelle B-01: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 1

Ergebnisauswertung

Berechnungsmodell

Die Normalspannungen im Schnitt durch die Stoßfuge nehmen mit zunehmendem Winkel α ab. Die tangential zum Schnitt verlaufenden Spannungen sowie die Schubspannungen ergeben bei einem Winkel Alpha von 15° den betragsmäßig geringsten Wert. Die größten Vergleichsspannungen werden bei einem geringen Steigungswinkel der Schweißnaht erreicht. Zwischen 15° und 20° ändert sich die Vergleichsspannung jedoch nur mehr geringfügig.

Vergleich mit dem Referenzmodell

Die Abnahme der Normalspannungen bei zunehmendem Winkel α haben beide Modelle gemeinsam, wenn sich beim Referenzmodell auch betragsmäßig höhere Werte ergeben. Sowohl Tangential- als auch Schubspannung steigen im Gegensatz dazu beim Referenzmodell kontinuierlich an. Die maximale Vergleichsspannung im Querschnitt ergibt sich bei einem mittleren Winkel α von 15° .

Vergleich mit dem Ingenieurmodell

Das Ingenieurmodell (siehe Abbildung B-09) zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte konnte durch die FE-Berechnungen untermauert werden. Der Angriffspunkt der Druckkraft normal zur Fuge wurde dabei auf halber Höhe des Untergurtes angenommen. Die Ergebnisse liegen durchwegs auf der sicheren Seite.

Beim Vergleich der Randspannungen im Stegblech auf der Höhe der oberen Schweißnaht zufolge des Ingenieurmodells, mit der maximalen Vergleichsspannung der verschiedenen FE-Berechnungen, zeigt sich, dass die beiden Resultate nicht weit voneinander entfernt liegen. Allerdings wird die Vergleichsspannung durchwegs um 10 bis 25% unterschätzt, da es am rechten Rand, bedingt durch die Geometrie, zu Spannungskonzentrationen kommt. Dieser Ingenieuransatz kann somit nur zur groben Abschätzung der Spannungen herangezogen werden.

B2) Regelquerschnitt 2

1) Geometrie

Querschnitt

Diese Querschnittsausbildung ist für einen Stützweitenbereich von 18 bis 20 Metern geeignet.

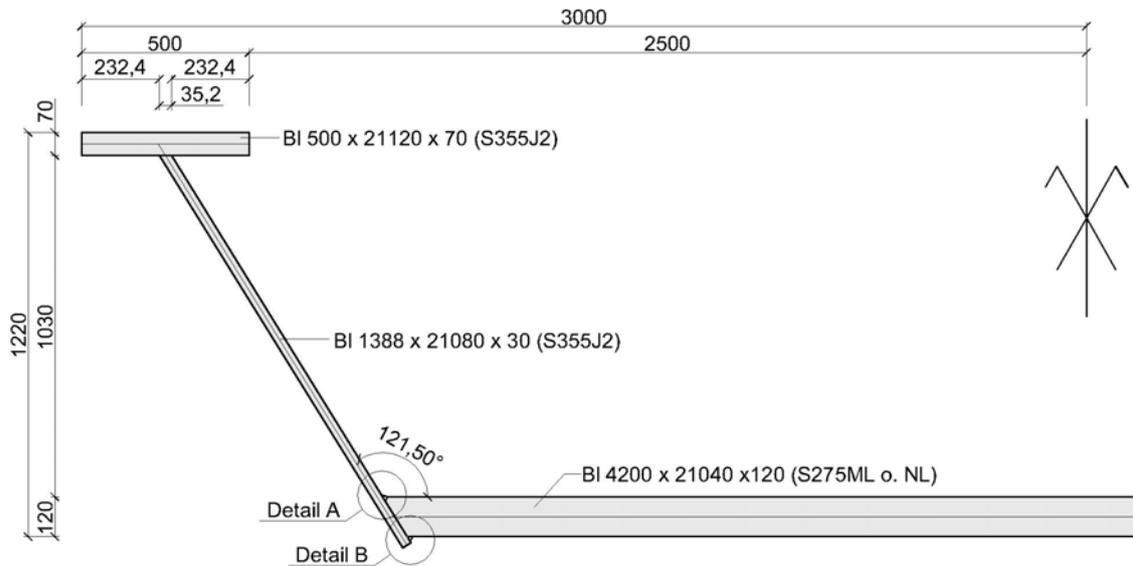


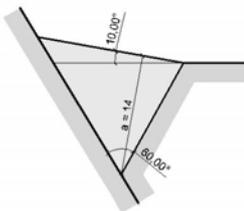
Abbildung B-41: Führungsskizze Regelquerschnitt 2

Die in Abbildung B-41 gekennzeichneten Details sind in Abbildung B-42 dargestellt.

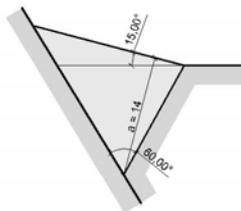
Schweißnähte - Fallunterscheidung

Detail A - Oberseite

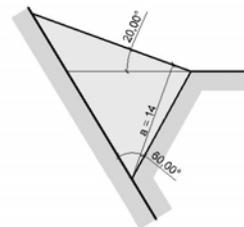
Fall a



Fall b



Fall c



Detail B - Unterseite

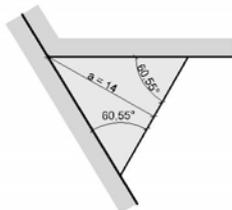


Abbildung B-42: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für a = 14mm

2) Berechnung

2.1) Ingenieurmodell

Spannungen im Regelbereich des Steges

Ermittlung der Querschnittswerte

$$A = 30\text{cm}^2$$

$$I_{xs} = \frac{10 \cdot 3^3}{12} = 22,5\text{cm}^4$$

$$W_x = \frac{10 \cdot 3^2}{6} = 15\text{cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen auf Höhe der Untergurt-Oberkante

$$N = 1 \cdot \cos(180 - 121,1) = 0,52\text{kN}$$

$$V = 1 \cdot \sin(180 - 121,1) = 0,86\text{kN}$$

$$M_x = 1 \cdot 1,10 = 1,10\text{kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{links} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^2} - \frac{110 \cdot 10^4}{15 \cdot 10^3} = -73,2\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{rechts} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^2} + \frac{110 \cdot 10^4}{15 \cdot 10^3} = +73,5\text{N/mm}^2$$

Bei Vernachlässigung der Schubspannungen entspricht die Normalspannung σ_{rechts} der Vergleichsspannung am oberen Schweißnahtansatz.

Grafische Darstellung der Ergebnisse

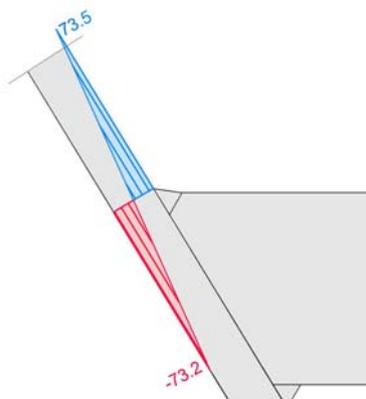


Abbildung B-43: Normalspannungen gemäß Ingenieurmodell [N/mm²]

Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

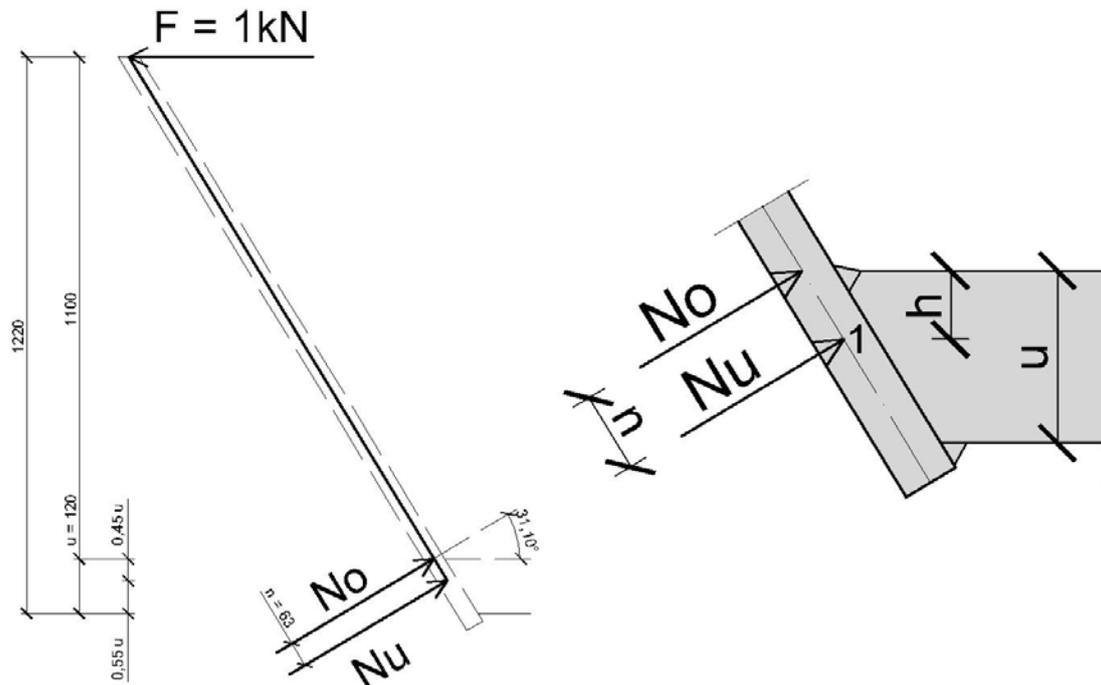


Abbildung B-44: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

Für das Ingenieurmodell wird angenommen, dass die Zugspannungen großteils in der oberen Schweißnaht übertragen werden. Der Angriffspunkt der Zugkraft der oberen Schweißnaht liegt im Modell der Einfachheit halber auf Höhe der Oberkante des Untergurtes und ist damit unabhängig von der Schweißnahtgeometrie. Der Hebelsarm zwischen den resultierenden Druck- und Zugkräften wird auf 45% der Untergurthöhe abgemindert, da sich die Druckspannungen durch das dünner werdende Stegblech nach oben verlagern.

Momentengleichgewichtsbedingung um Punkt 1 (Abbildung B-44):

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow N_o = \frac{F \cdot (1,1 + 0,45 \cdot u)}{n} = \frac{1,0 \cdot (1,1 + 0,45 \cdot 0,12)}{0,063} = 18,3 \text{ kN}$$

2.2) Fall a

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 10° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

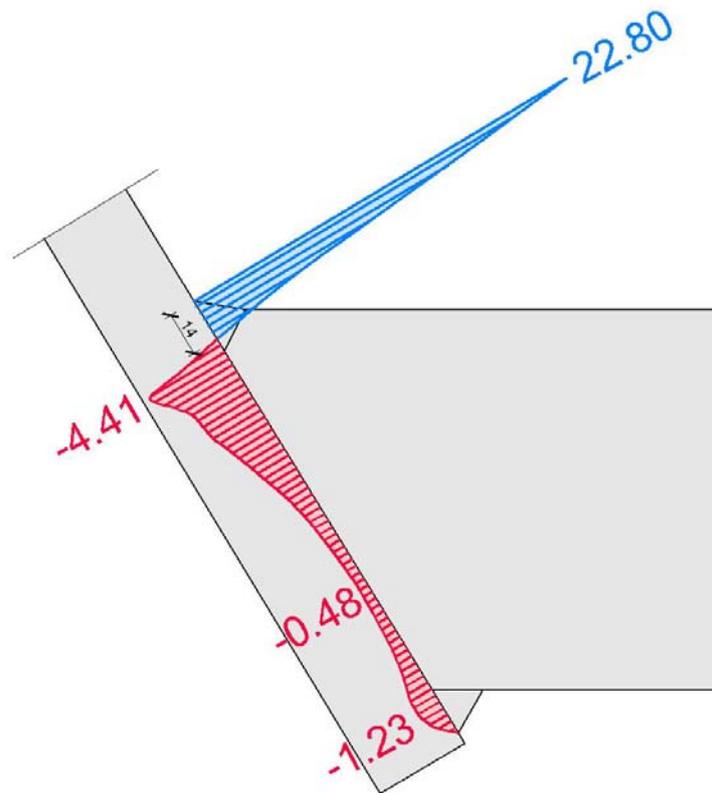


Abbildung B-45: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 14 mm.

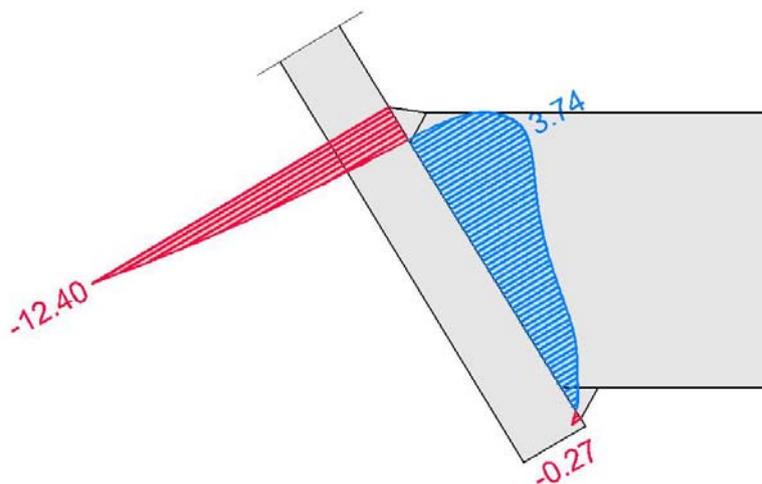


Abbildung B-46: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

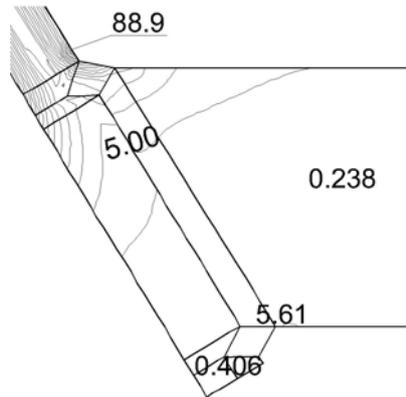


Abbildung B-47: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 88,9 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

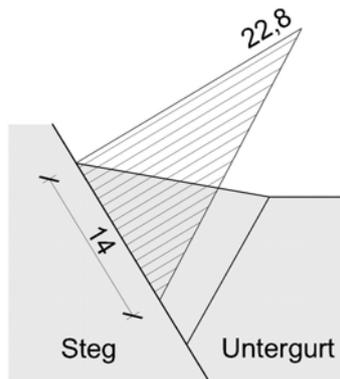


Abbildung B-48: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,4 \cdot 10 = 14 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 14 \cdot \frac{22,80}{2 \cdot 10} = 16,0 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

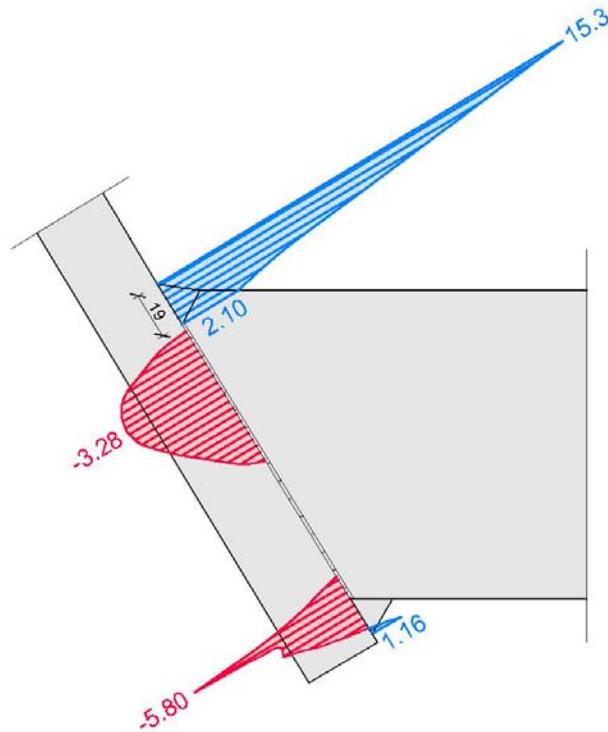


Abbildung B-49: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 19 mm.

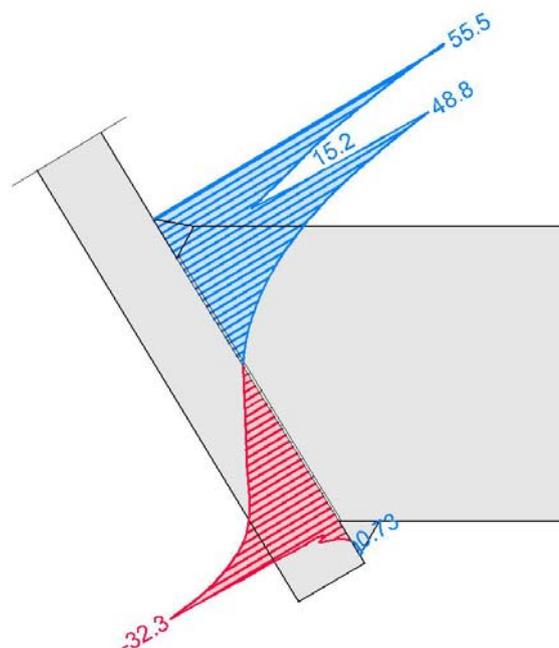


Abbildung B-50: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

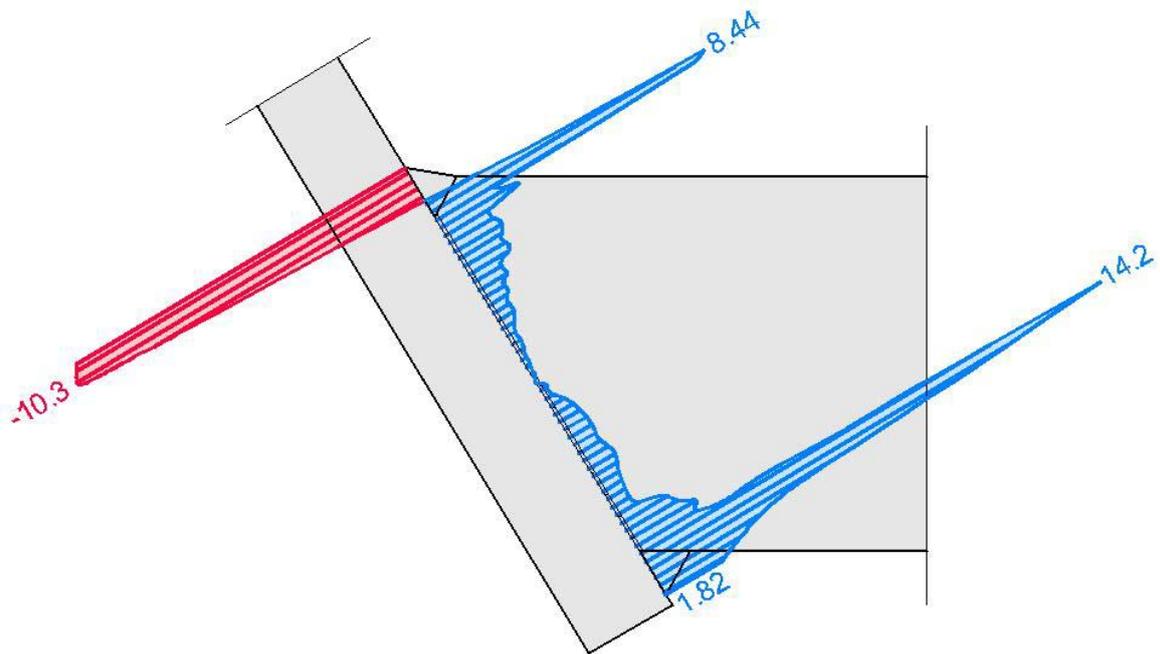


Abbildung B-51: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

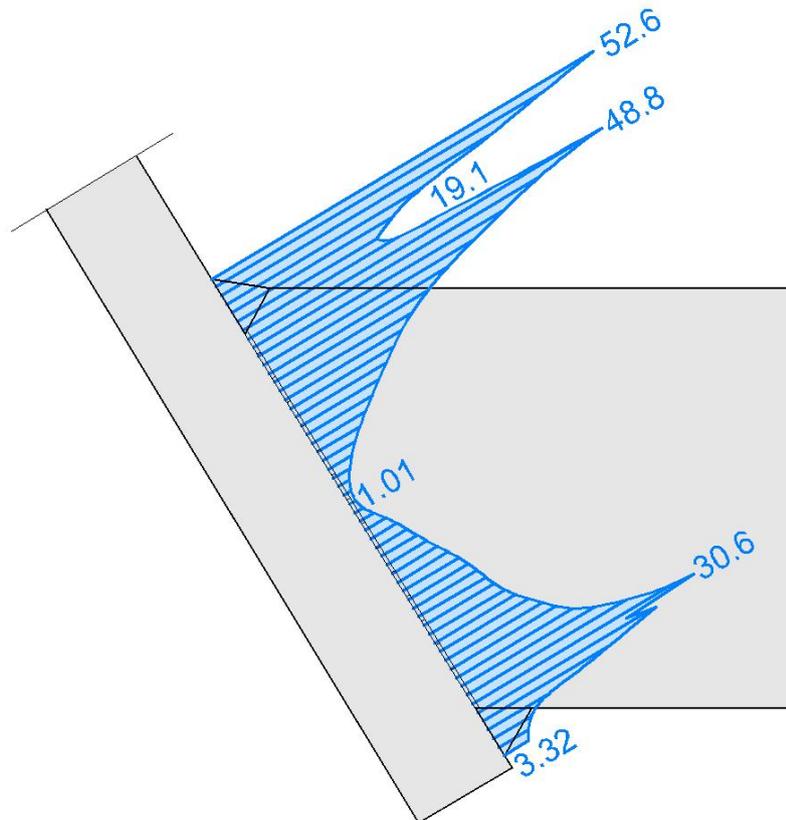


Abbildung B-52: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

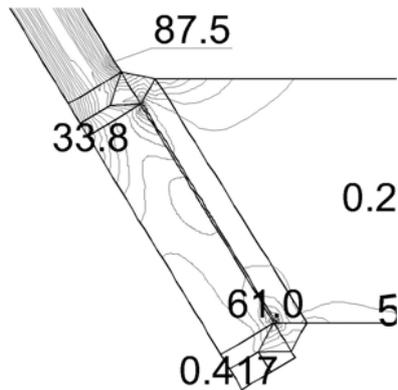


Abbildung B-53: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 87,5 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

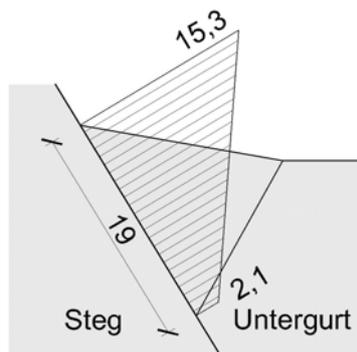


Abbildung B-54: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,9 \cdot 10 = 19 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 19 \cdot \frac{(15,3 + 2,1)}{2 \cdot 10} = 16,5 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.3) Fall b

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 15° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

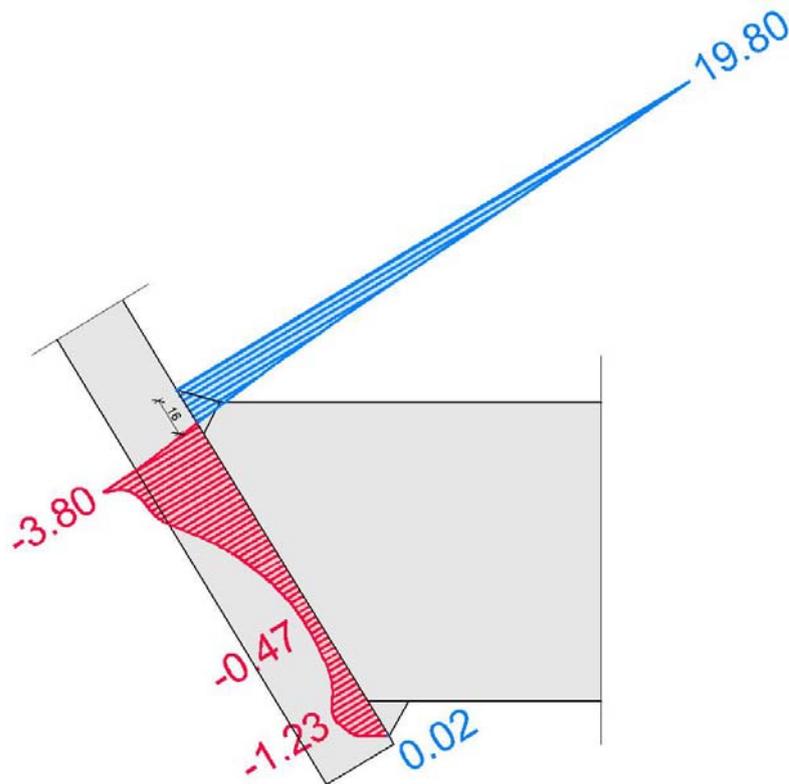


Abbildung B-55: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 16 mm.

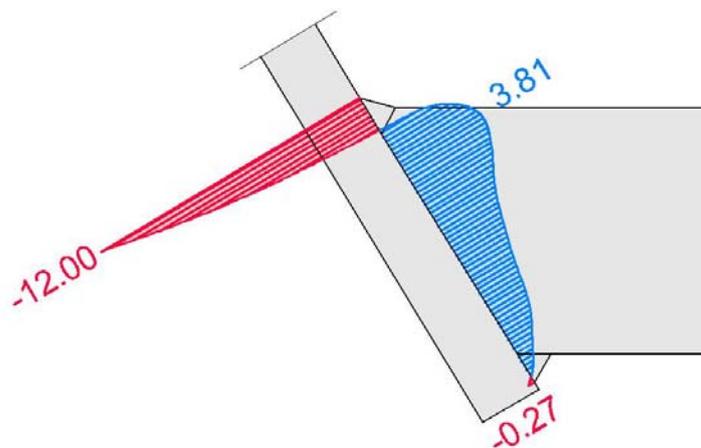


Abbildung B-56: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

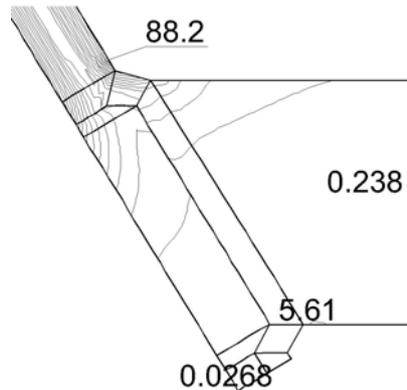


Abbildung B-57: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 88,2 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

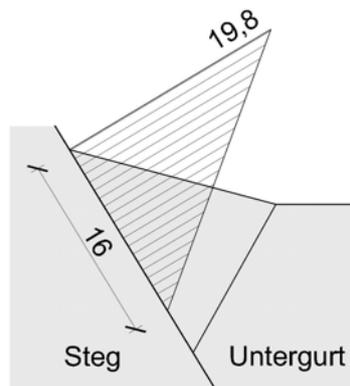


Abbildung B-58: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,6 \cdot 10 = 16 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 16 \cdot \frac{19,80}{2 \cdot 10} = 15,8 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

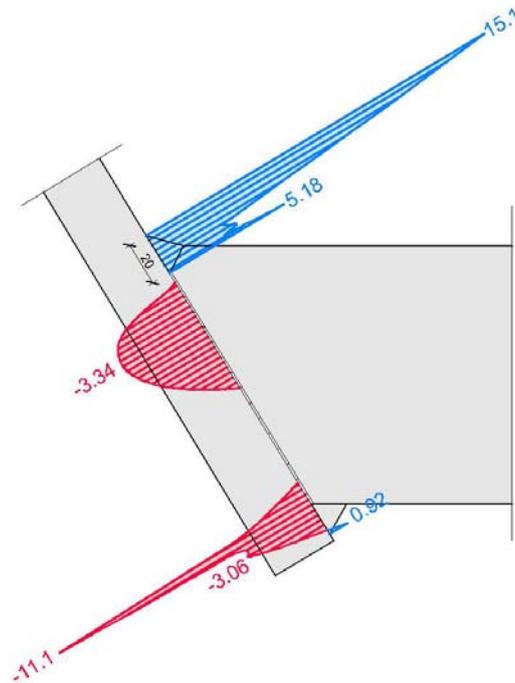


Abbildung B-59: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 20 mm.

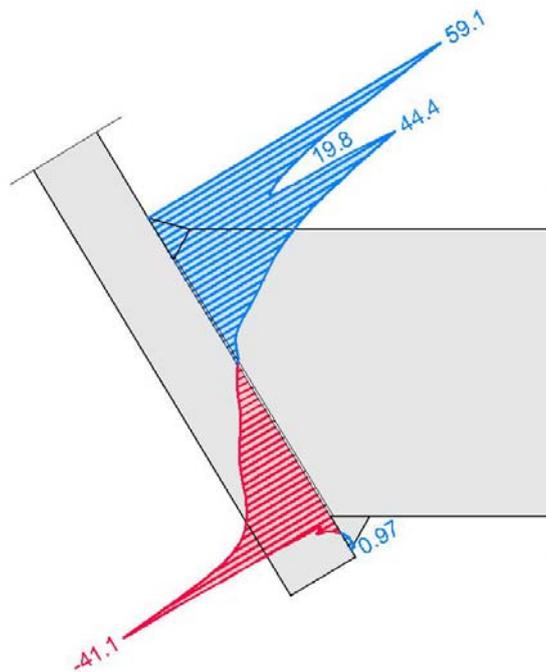


Abbildung B-60: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

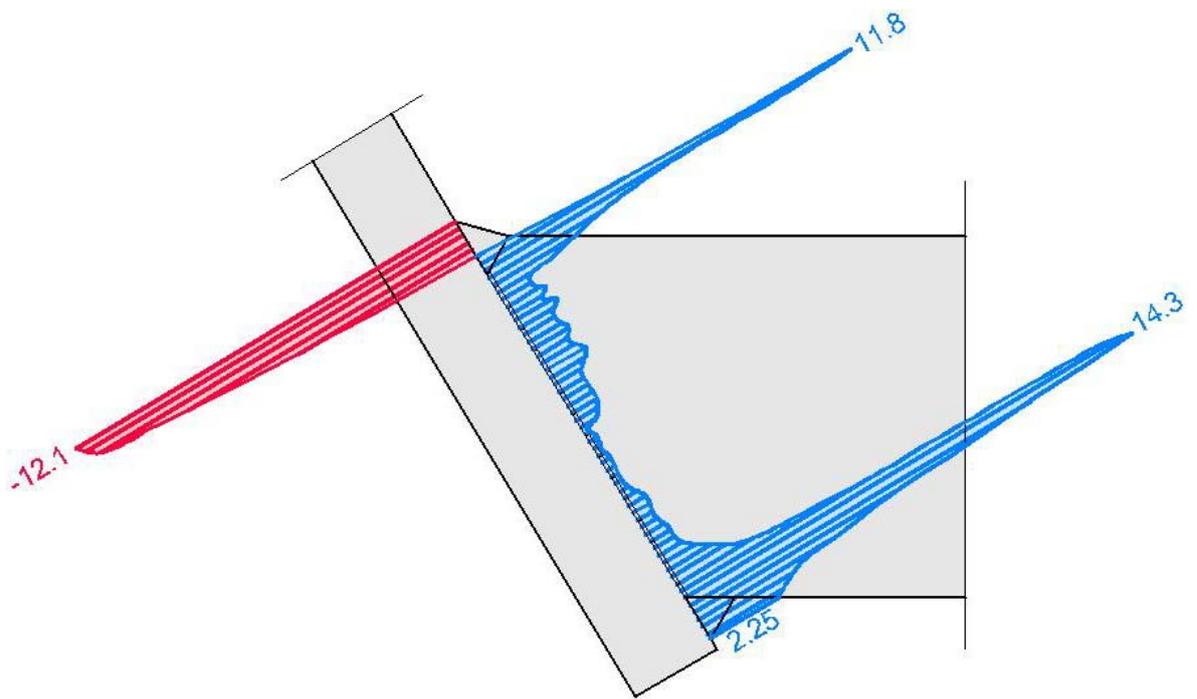


Abbildung B-61: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm^2]

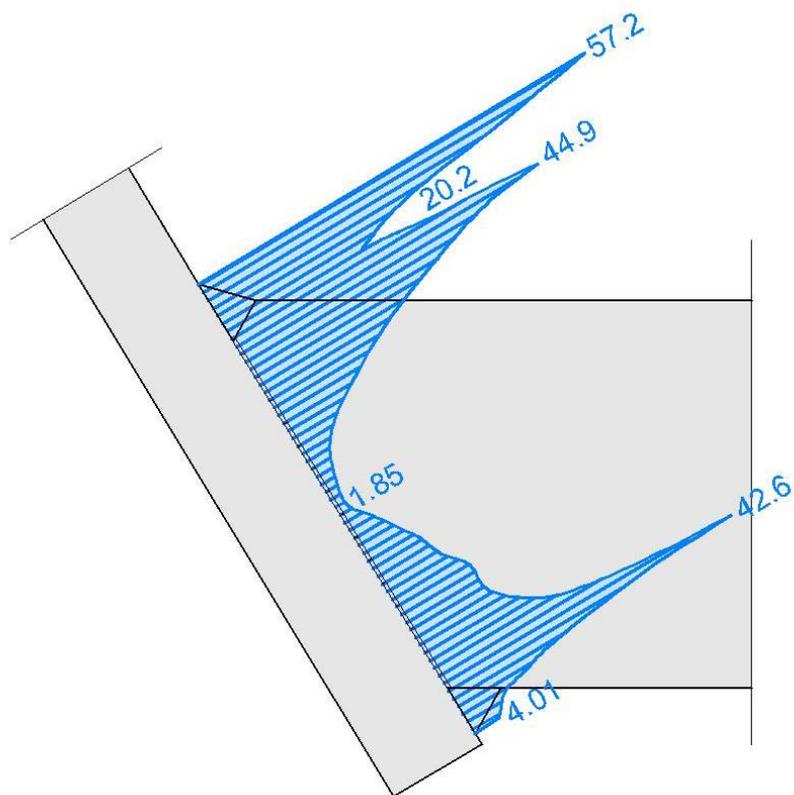


Abbildung B-62: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm^2]

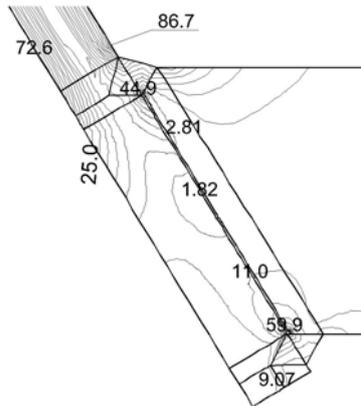


Abbildung B-63: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 86,7 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

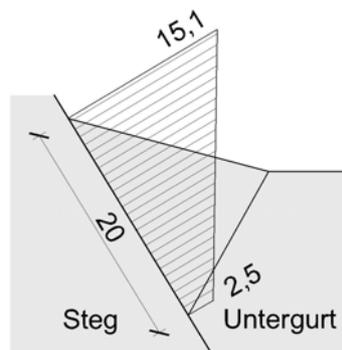


Abbildung B-64: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,0 \cdot 10 = 20 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 20 \cdot \frac{(15,1 + 2,5)}{2 \cdot 10} = 17,6 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.4) Fall c

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 20° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

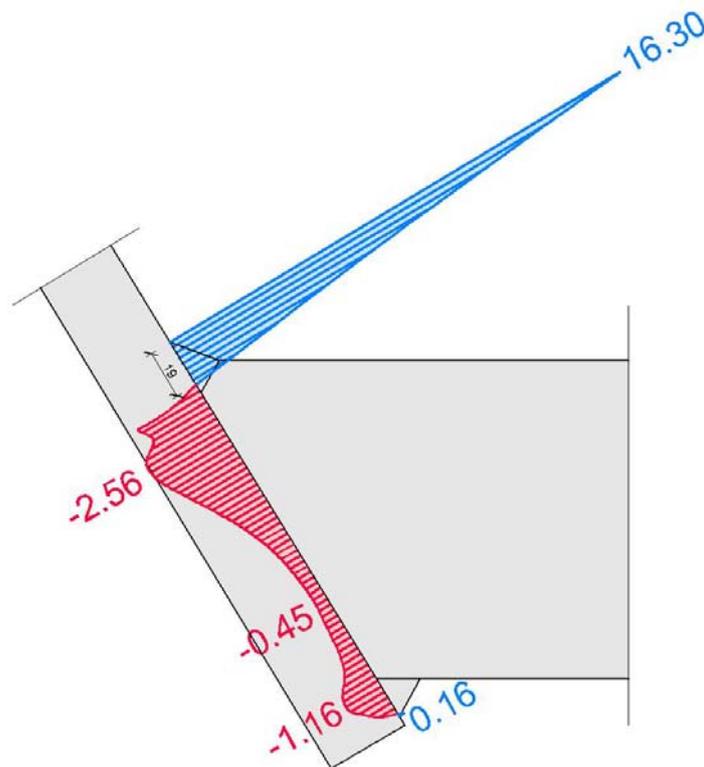


Abbildung B-65: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 19mm.

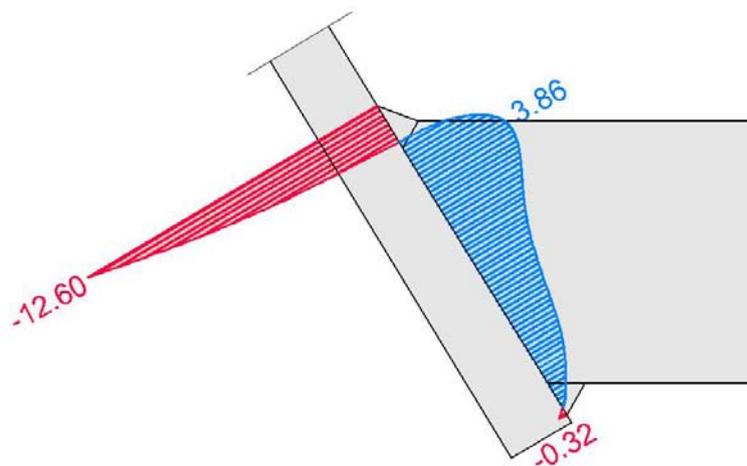


Abbildung B-66: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

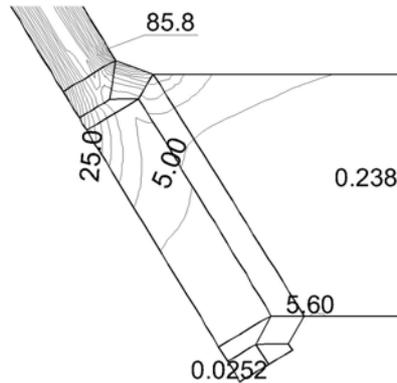


Abbildung B-67: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 85,8 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

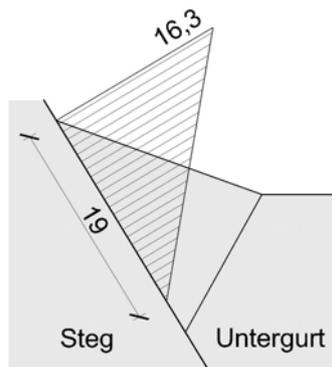


Abbildung B-68: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,9 \cdot 10 = 19 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 19 \cdot \frac{16,3}{2 \cdot 10} = 15,5 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

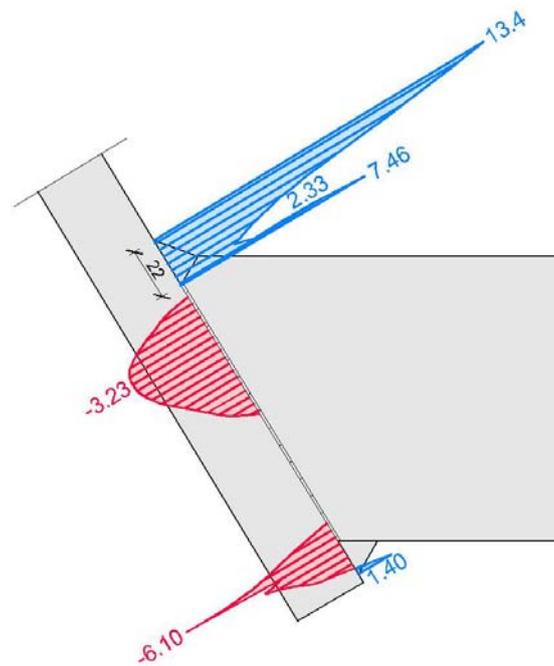


Abbildung B-69: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 22 mm.

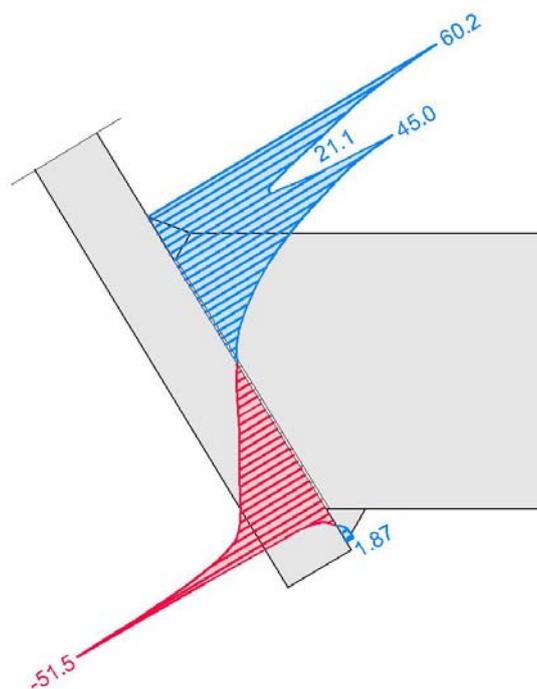


Abbildung B-70: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

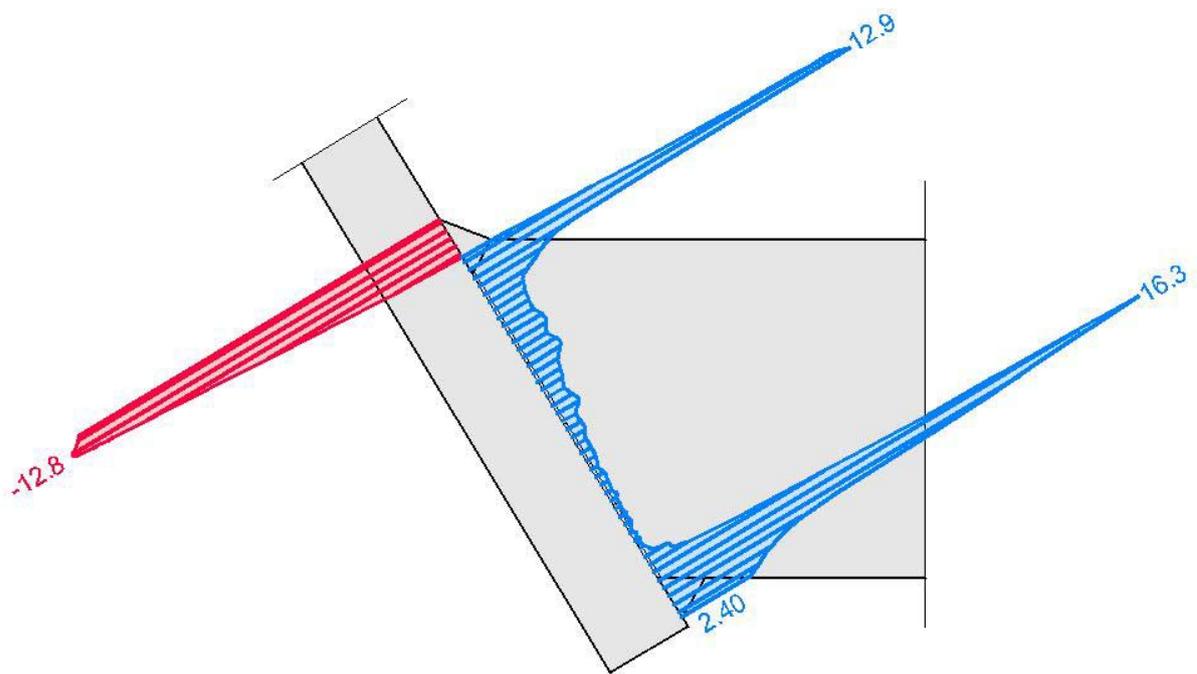


Abbildung B-71: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge $[\text{N/mm}^2]$

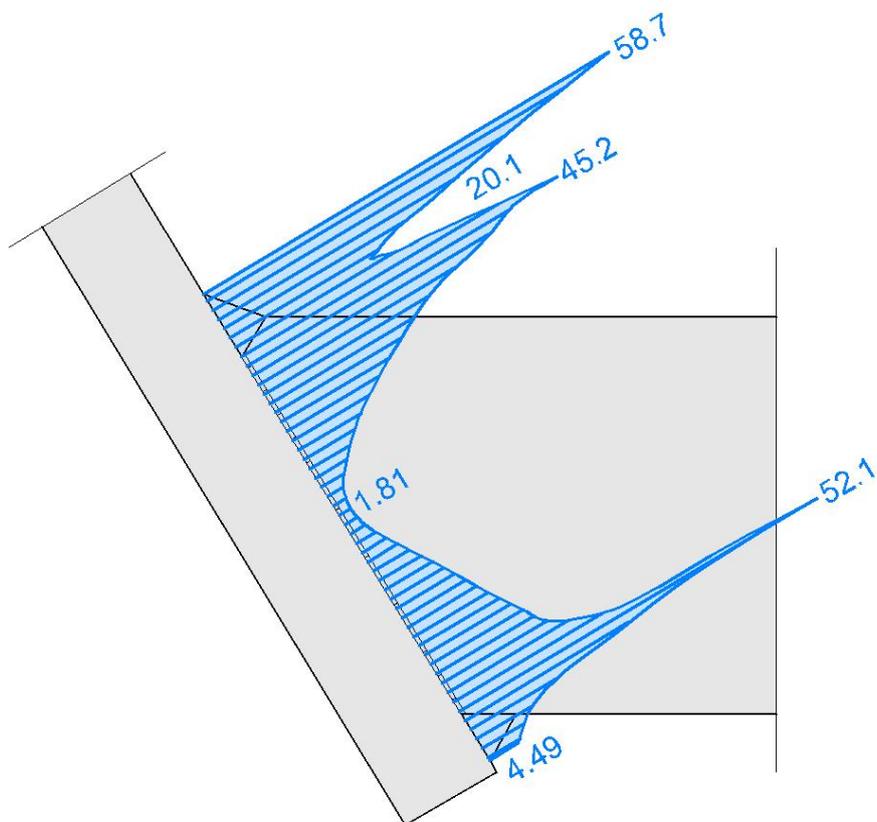


Abbildung B-72: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge $[\text{N/mm}^2]$

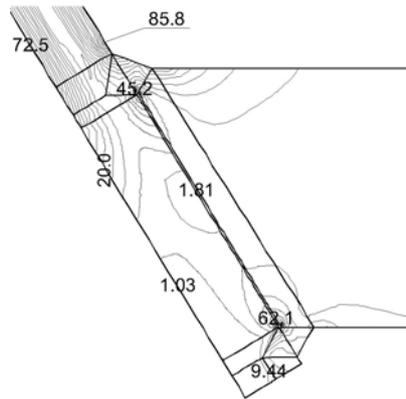


Abbildung B-73: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 85,8 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

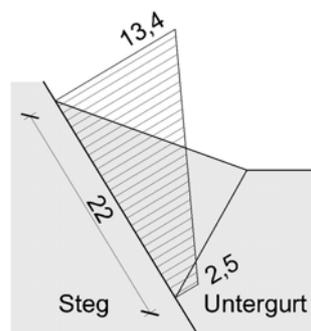


Abbildung B-74: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 2,2 \cdot 10 = 22 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 22 \cdot \frac{(13,4 + 2,5)}{2 \cdot 10} = 17,5 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=18,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 20% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung

Ergebnisübersicht

In der folgenden Tabelle sind die sich in den einzelnen Modellen für Regelquerschnitt 2 ergebenden maximalen Spannungen zusammengefasst. Der Winkel α beschreibt den Winkel zwischen Schweißnaht- und Untergurtoberfläche.

Die eingetragenen Werte σ_V , σ_N , σ_T und τ geben den Maximalwert der jeweiligen Spannung innerhalb des Schnittverlaufes wieder. Bei der Normal-, Tangential- und Vergleichsspannung liegt dieser am obersten Schweißnahtpunkt. Für die Vergleichsspannung wird noch ein zweiter Wert angegeben und zwar $\sigma_{V,max}$. Dieser stellt den maximal auftretenden Wert bei der jeweiligen Geometrie dar.

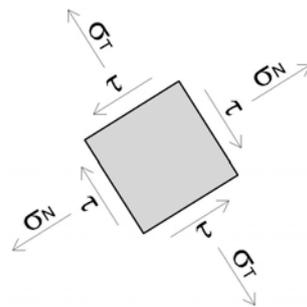


Abbildung B-75: Definition der Spannungskomponenten

Es werden die Ergebnisse des Berechnungsmodells (BM) und jene des Referenzmodells (RM) angegeben. Für das Referenzmodell wurden auch die Tangentialspannung und die Vergleichsspannung eingetragen. Die zugehörigen Abbildungen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht eigens angeführt.

Fall	α	Modell	σ_N	σ_T	τ	σ_V	$\sigma_{V,max}$
	[°]		[N/mm ²]				
a	10	BM	15,30	55,50	-10,30	52,60	87,50
		RM	22,80	61,50	-12,40	58,00	88,90
b	15	BM	15,10	59,10	-12,10	57,20	86,70
		RM	19,80	61,60	-12,00	58,30	88,20
c	20	BM	13,40	60,20	-12,80	58,70	85,80
		RM	16,30	64,50	-12,60	62,10	85,80

Tabelle B-02: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 2

Ergebnisauswertung

Berechnungsmodell

Die Normalspannungen im Schnitt durch die Stoßfuge nehmen mit zunehmendem Winkel α ab. Die tangential zum Schnitt verlaufenden Spannungen sowie die Schubspannungen nehmen jedoch zu, sodass der Wert der Vergleichsspannung am oberen Schweißnahtpunkt insgesamt ansteigt. Der Einfluss der verschiedenen Schweißnahtgeometrien auf die maximale Vergleichsspannung in der Struktur ist sehr gering, sodass diese annähernd konstant bleibt. Es ist jedoch eine leicht abfallende Tendenz mit steigendem Winkel α erkennbar.

Vergleich mit dem Referenzmodell

Die Abnahme der Normalspannungen bei zunehmendem Winkel α haben beide Berechnungsmodelle gemeinsam, wenn sich beim Referenzmodell auch betragsmäßig höhere Werte ergeben. Auch die tendenzielle Zunahme von Tangential- und Schubspannung stimmen überein. Die maximale Vergleichsspannung im Querschnitt ergibt sich bei einem Winkel α von 10° .

Vergleich mit dem Ingenieurmodell

Das Ingenieurmodell (siehe Abbildung B-44) zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte konnte durch die FE-Berechnungen untermauert werden. Der Hebelsarm zwischen Druck- und Zugnormalkraft in der Fuge wurde dabei mit 45% der Untergurthöhe angenommen. Die Ergebnisse liegen durchwegs auf der sicheren Seite.

Der Wert der Randspannung am Schweißnahtansatz im Stegblech beträgt zufolge des Ingenieurmodells $73,5 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert liegt etwa 20% unter den Ergebnissen der FE-Berechnung. Dieser Ingenieuransatz kann somit nur zur groben Abschätzung der Spannungen herangezogen werden.

B3) Regelquerschnitt 3

1) Geometrie

Querschnitt

Diese Querschnittsausbildung ist für einen Stützweitenbereich von 10 bis 13 Metern geeignet.

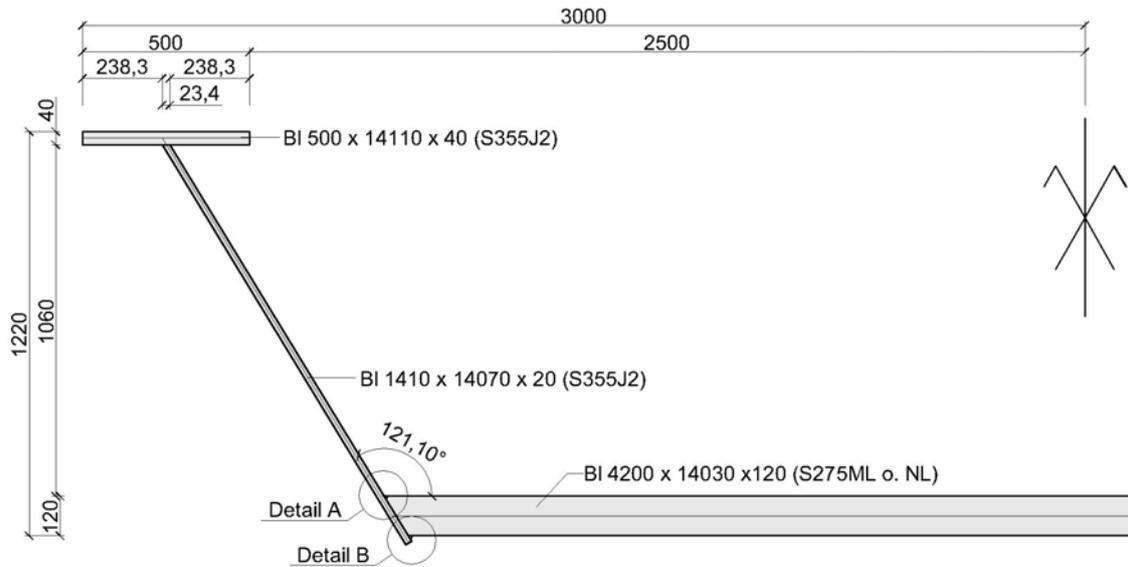


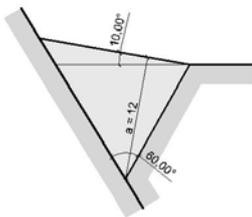
Abbildung B-76: Führungsskizze Regelquerschnitt 3

Die in Abbildung B-76 gekennzeichneten Details sind in Abbildung B-77 dargestellt.

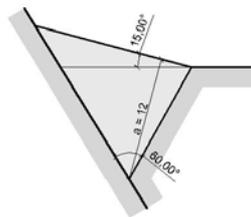
Schweißnähte - Fallunterscheidung

Detail A - Oberseite

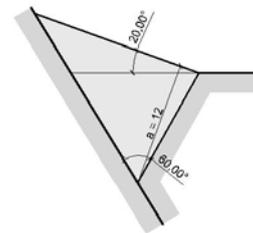
Fall a



Fall b



Fall c



Detail B - Unterseite

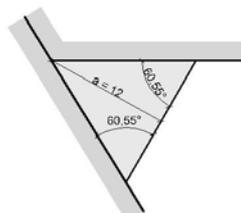


Abbildung B-77: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für $a = 12\text{mm}$

2) Berechnung

2.1) Ingenieurmodell

Spannungen im Regelbereich des Steges

Ermittlung der Querschnittswerte

$$A = 20\text{cm}^2$$

$$I_{xs} = \frac{10 \cdot 2^3}{12} = 6,67\text{cm}^4$$

$$W_x = \frac{10 \cdot 2^2}{6} = 6,67\text{cm}^3$$

Ermittlung der Schnittgrößen auf Höhe der Untergurt-Oberkante

$$N = 1 \cdot \cos(180 - 121,1) = 0,52\text{kN}$$

$$V = 1 \cdot \sin(180 - 121,1) = 0,86\text{kN}$$

$$M_x = 1 \cdot 1,10 = 1,10\text{kNm}$$

Ermittlung der Spannungen

$$\sigma_{links} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^2} - \frac{110 \cdot 10^4}{6,67 \cdot 10^3} = -164,7\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{rechts} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{0,52 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^2} + \frac{110 \cdot 10^4}{6,67 \cdot 10^3} = +165,2\text{N/mm}^2$$

Bei Vernachlässigung der Schubspannungen entspricht die Normalspannung σ_{rechts} der Vergleichsspannung am oberen Schweißnahtansatz.

Grafische Darstellung der Ergebnisse

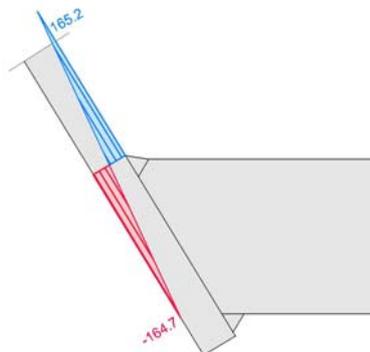


Abbildung B-78: Normalspannungen gemäß Ingenieurmodell [N/mm²]

Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

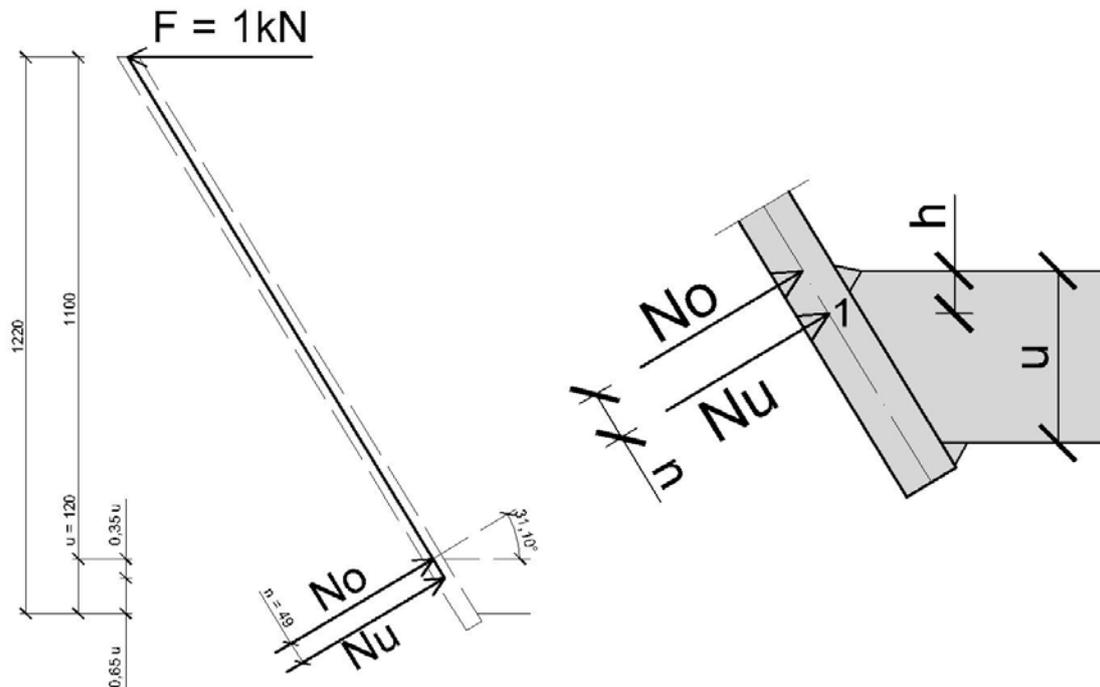


Abbildung B-79: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte

Für das Ingenieurmodell wird angenommen, dass die Zugspannungen großteils in der oberen Schweißnaht übertragen werden. Der Angriffspunkt der Zugkraft der oberen Schweißnaht liegt im Modell der Einfachheit halber auf Höhe der Oberkante des Untergurtes und ist damit unabhängig von der Schweißnahtgeometrie. Der Hebelsarm zwischen den resultierenden Druck- und Zugkräften wird auf 35% der Untergurthöhe abgemindert, da sich die Druckspannungen durch das dünner werdende Stegblech nach oben verlagern.

Momentengleichgewichtsbedingung um Punkt 1 (Abbildung B-79):

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow N_o = \frac{F \cdot (1,1 + 0,35 \cdot u)}{n} = \frac{1,0 \cdot (1,1 + 0,35 \cdot 0,12)}{0,049} = 23,3 \text{ kN}$$

2.2) Fall a

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 10° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

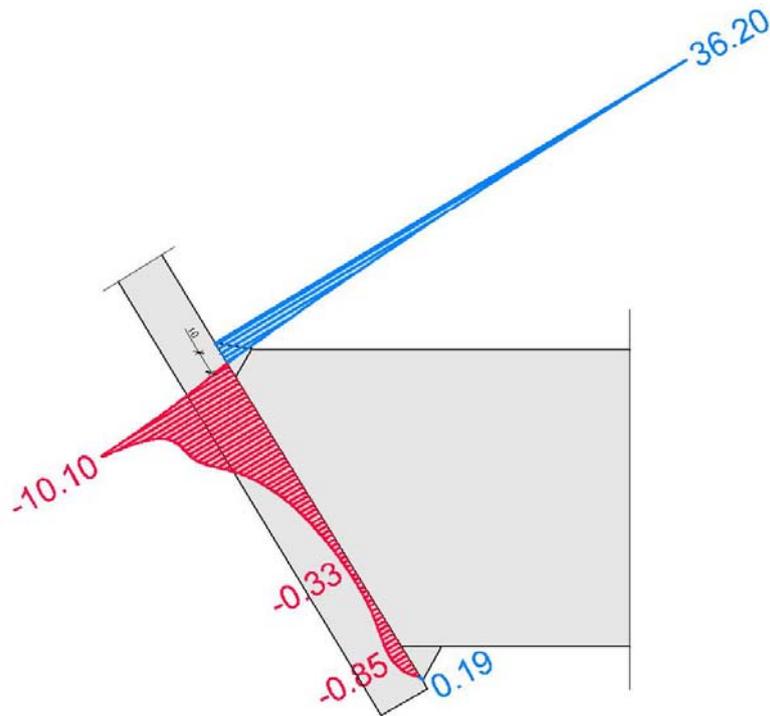


Abbildung B-80: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm^2]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 10 mm.

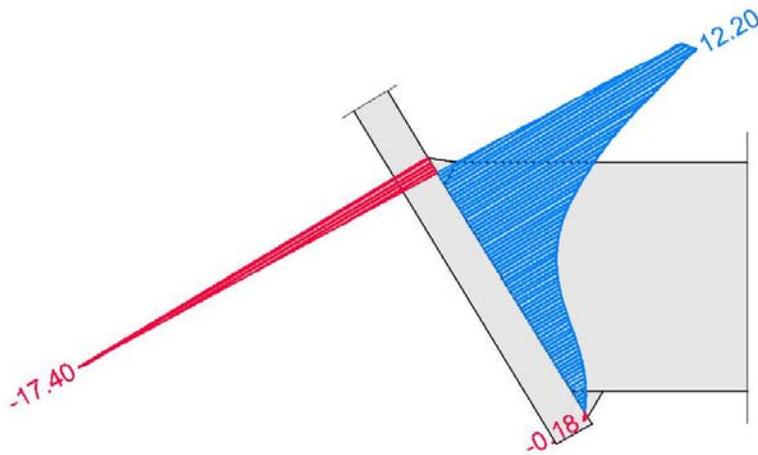


Abbildung B-81: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm^2]

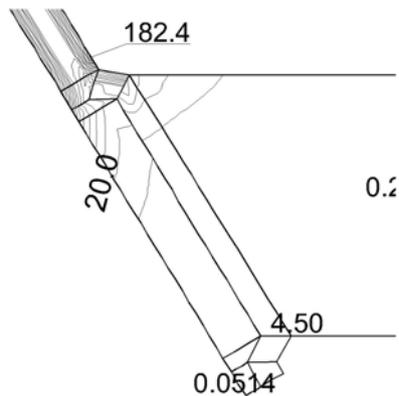


Abbildung B-82: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 182,4 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

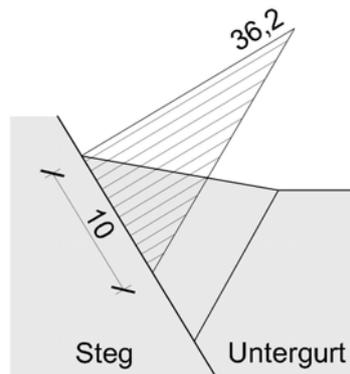


Abbildung B-83: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,0 \cdot 10 = 10 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 10 \cdot \frac{36,2}{2 \cdot 10} = 18,1 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=23,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

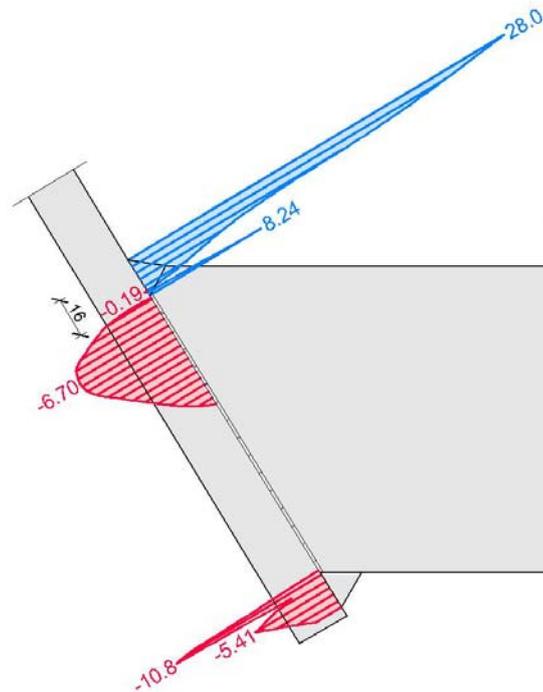


Abbildung B-84: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 16 mm.

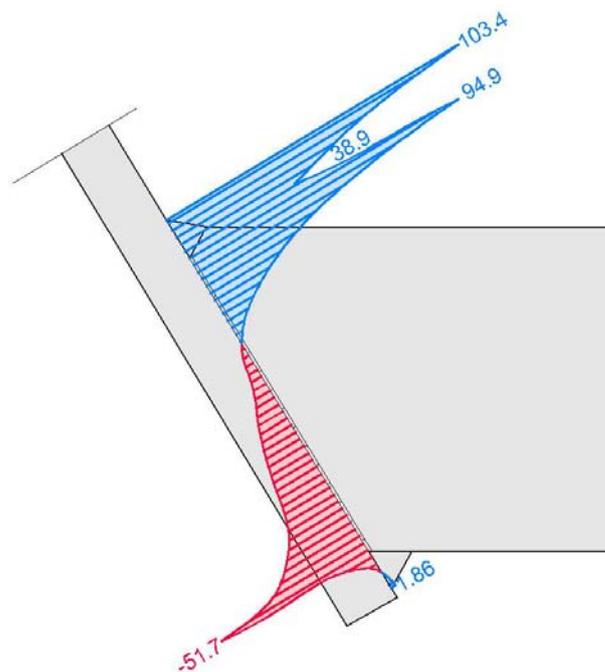


Abbildung B-85: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

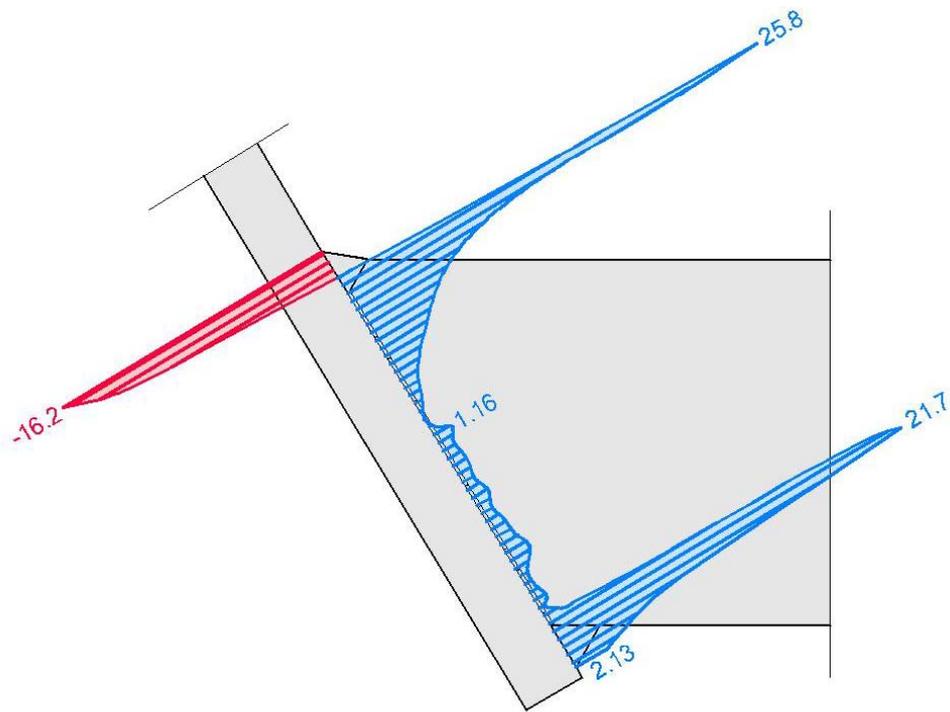


Abbildung B-86: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

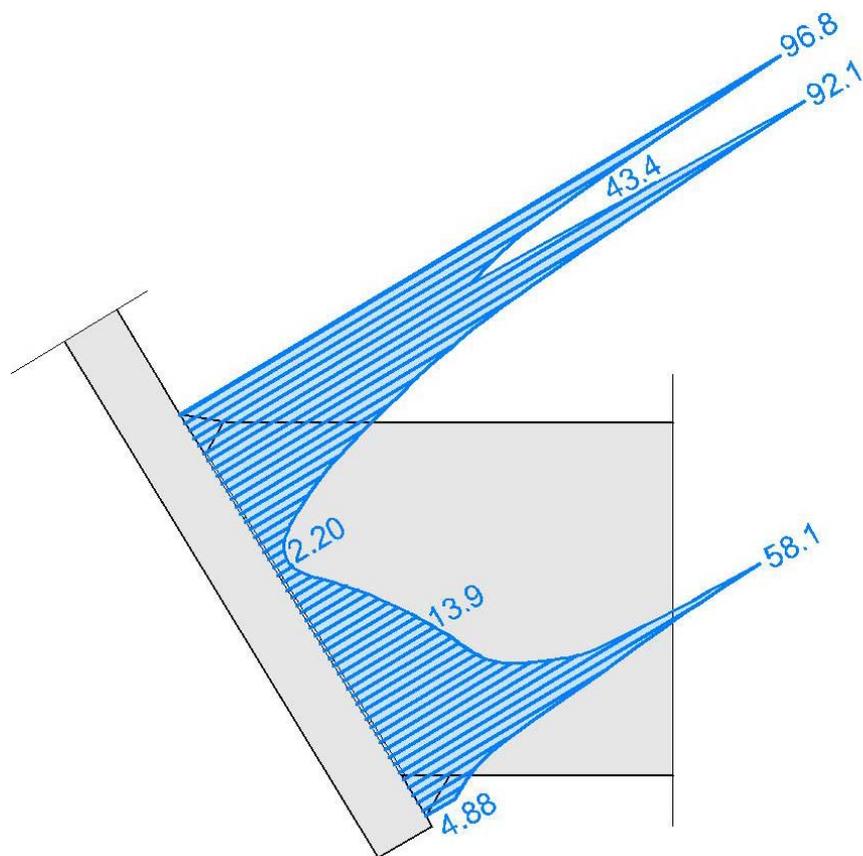


Abbildung B-87: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

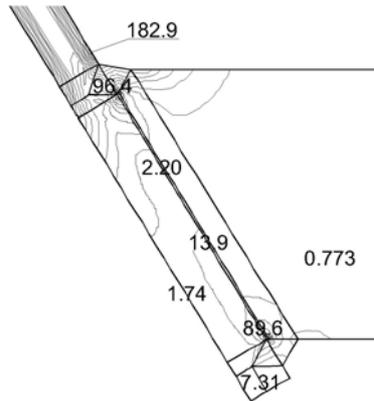


Abbildung B-88: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 182,9 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

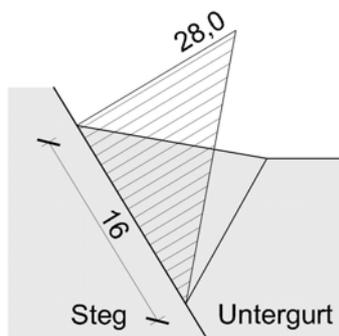


Abbildung B-89: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,6 \cdot 10 = 16 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 16 \cdot \frac{28}{2 \cdot 10} = 22,4 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=23,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.3) Fall b

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 15° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

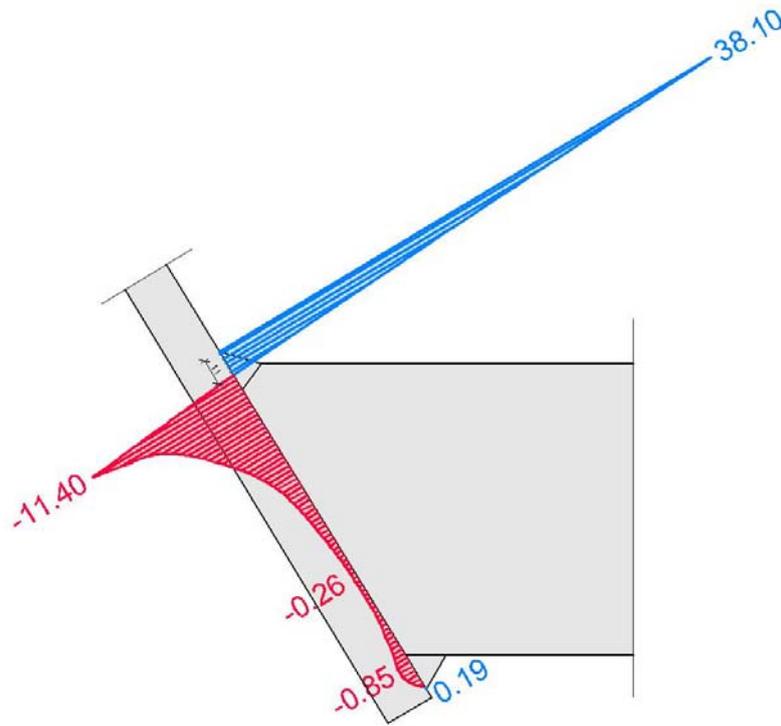


Abbildung B-90: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 11 mm.

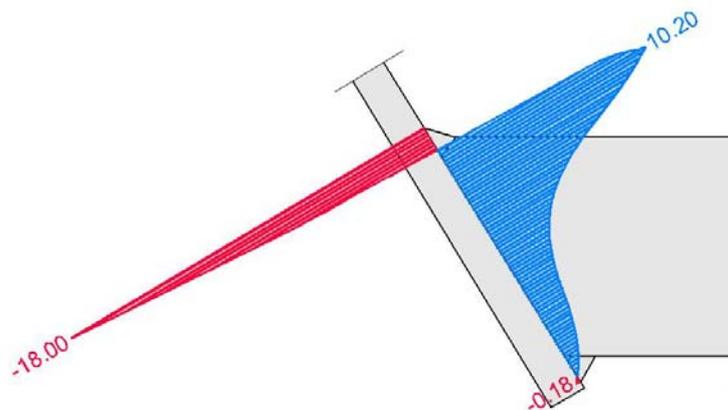


Abbildung B-91: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

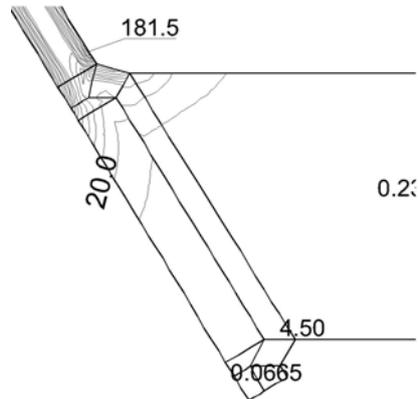


Abbildung B-92: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 181,5 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

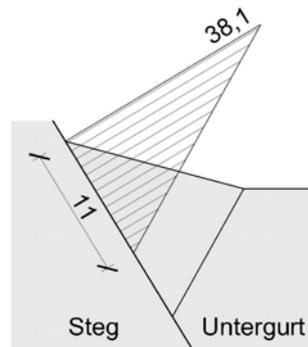


Abbildung B-93: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von No

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,1 \cdot 10 = 11 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 11 \cdot \frac{38,1}{2 \cdot 10} = 21,0 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o = 23,3 \text{ kN}$ auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

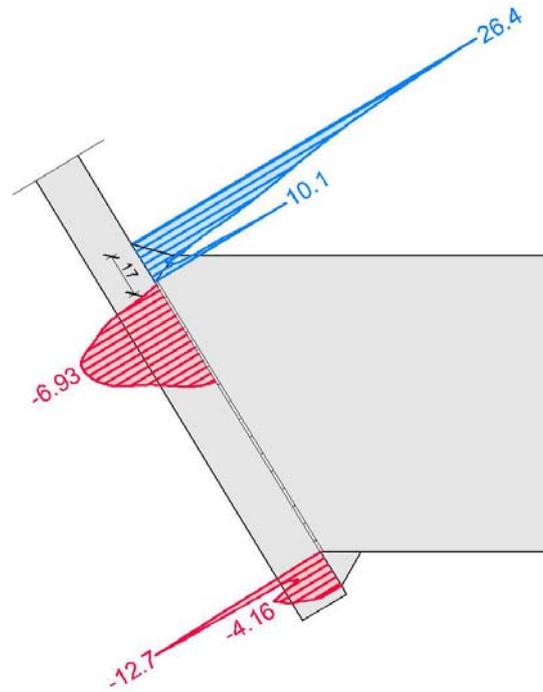


Abbildung B-94: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 17 mm.

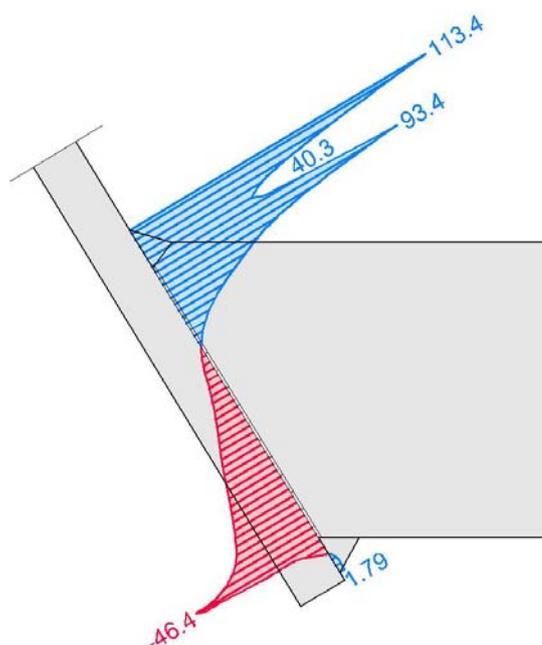


Abbildung B-95: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

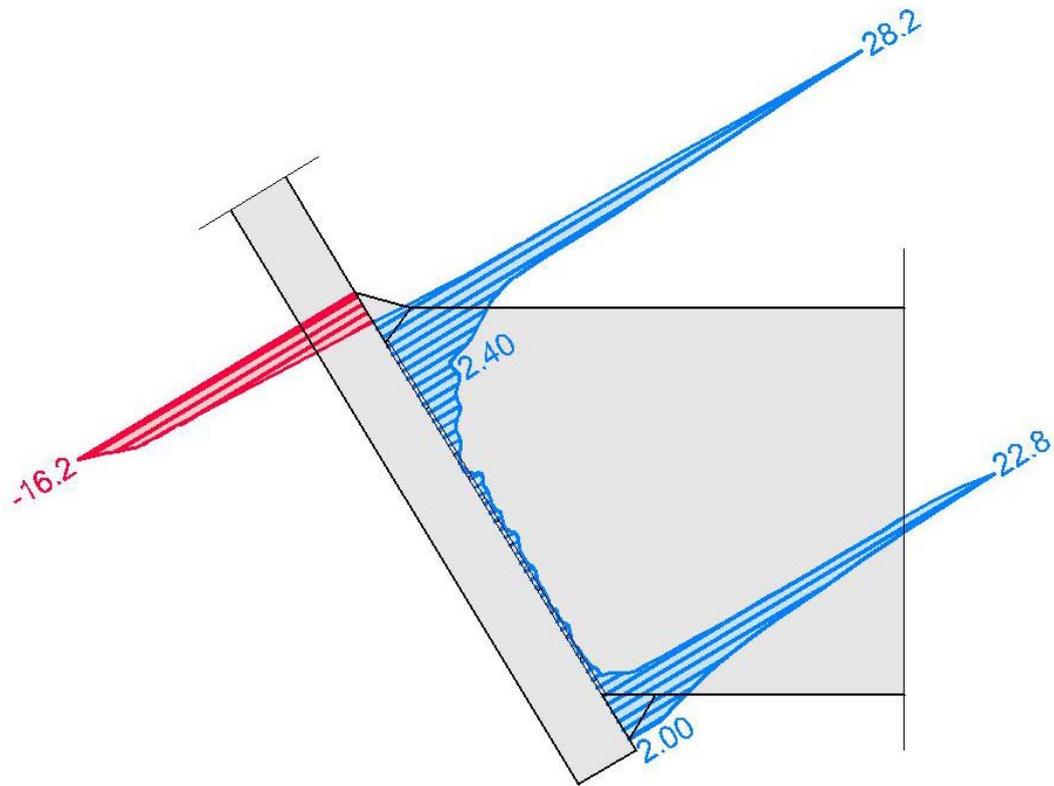


Abbildung B-96: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

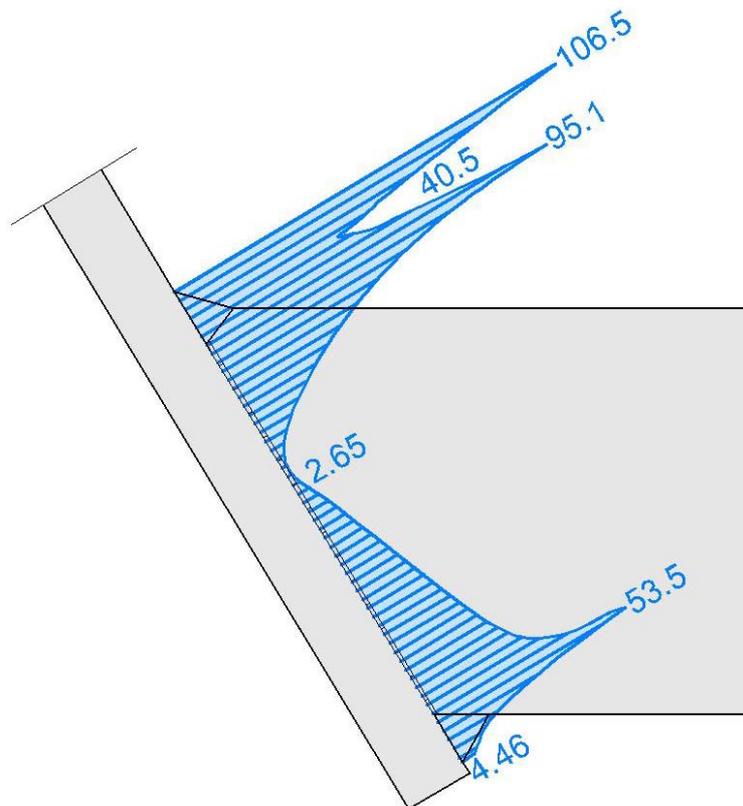


Abbildung B-97: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

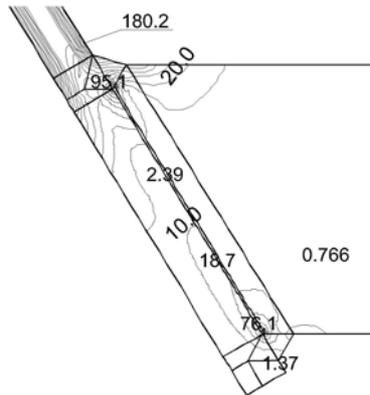


Abbildung B-98: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 180,2 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

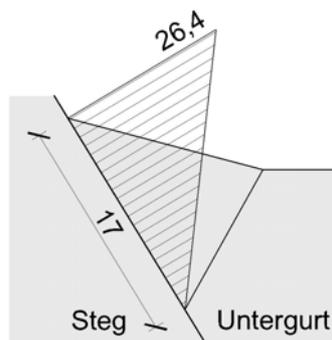


Abbildung B-99: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,7 \cdot 10 = 17 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 17 \cdot \frac{26,4}{2 \cdot 10} = 22,4 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=23,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.4) Fall c

Die Schweißnahtoberfläche steigt mit 20° gegenüber der Untergurtoberfläche an.

Berechnungsergebnisse des Referenzmodells

Modell mit durchgehendem Querschnitt im Bereich der Fuge.

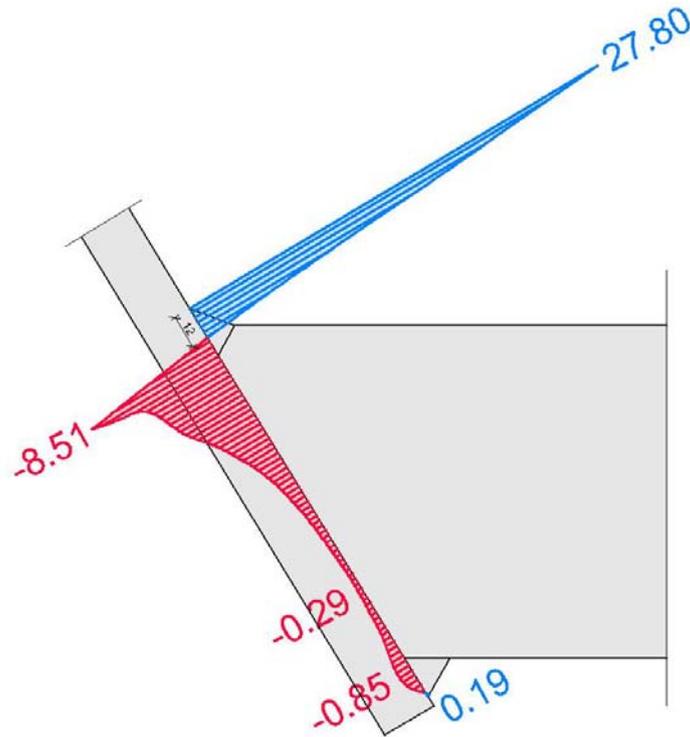


Abbildung B-100: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 12 mm.

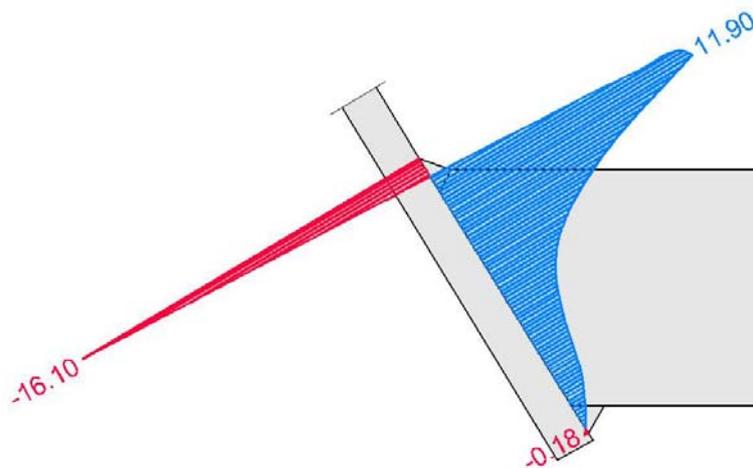


Abbildung B-101: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

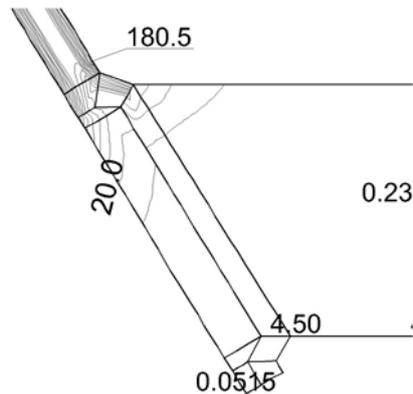


Abbildung B-102: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 180,5 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

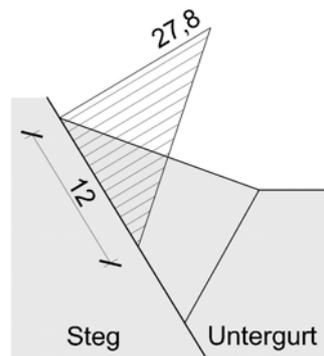


Abbildung B-103: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 12 \cdot \frac{27,8}{2 \cdot 10} = 16,7 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=23,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

Berechnungsmodell

Modell mit Federn im Druckbereich der Fuge.

Ergebnisse der FE-Berechnung

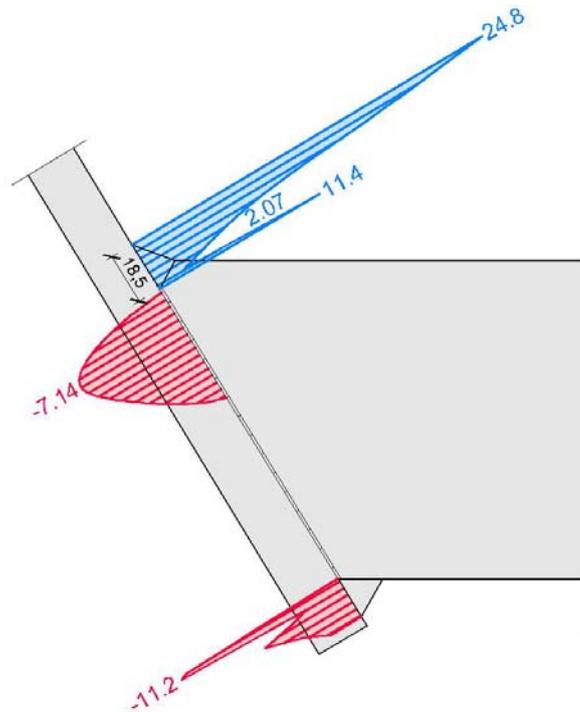


Abbildung B-104: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

Die Zugspannungen in der oberen Schweißnaht wirken auf eine Breite von 18,5 mm.

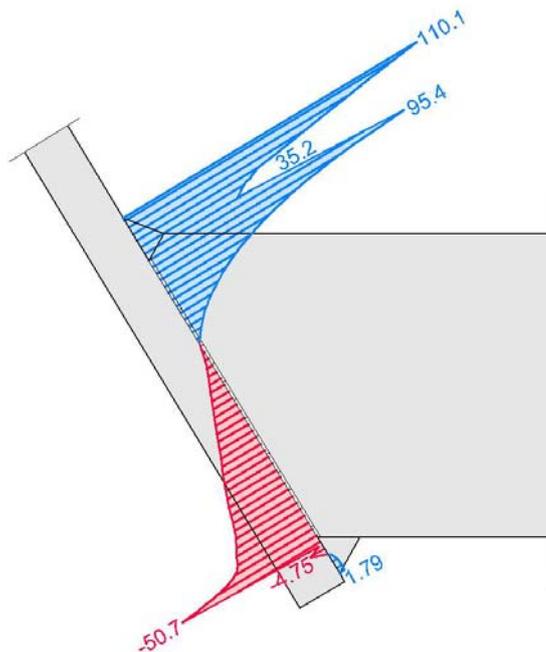


Abbildung B-105: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm²]

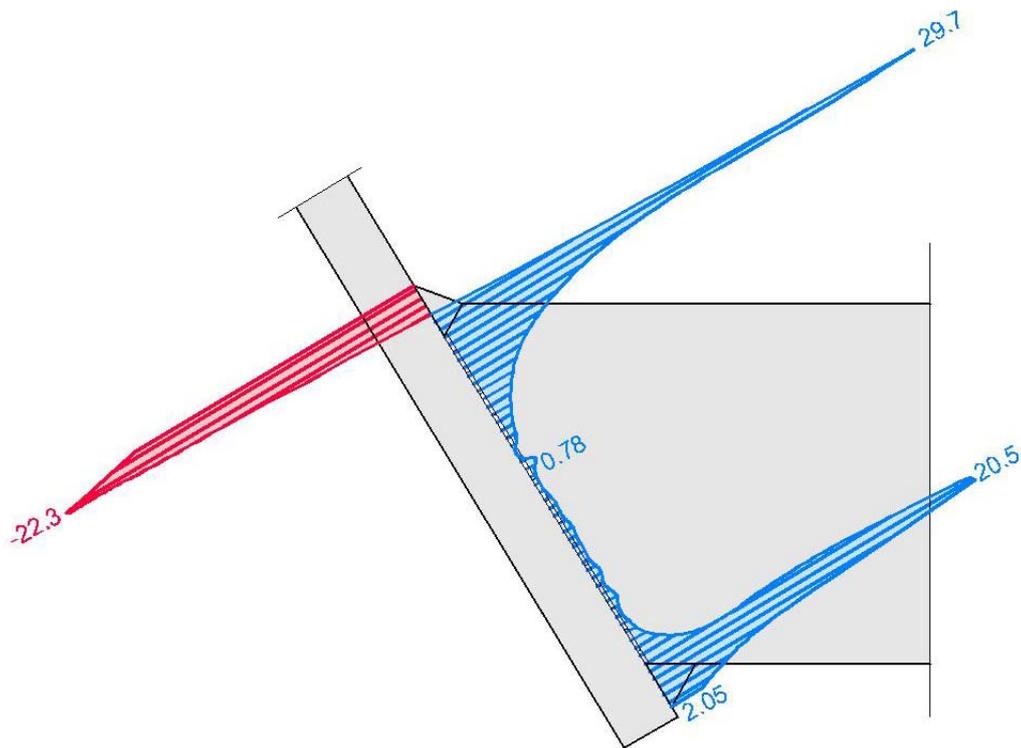


Abbildung B-106: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

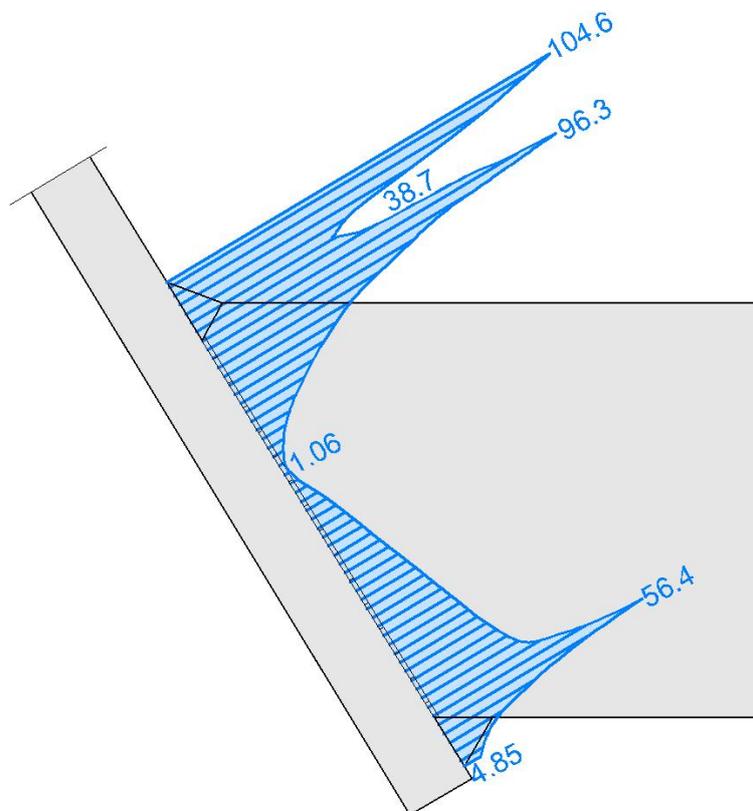


Abbildung B-107: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm²]

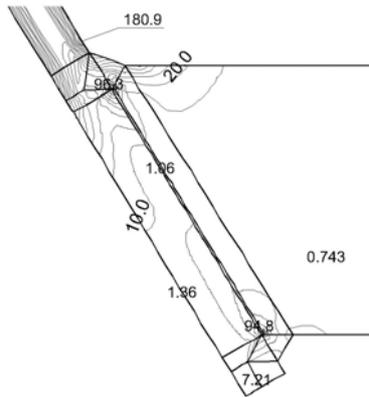


Abbildung B-108: Vergleichsspannungsmaximum

Der Maximalwert der Vergleichsspannung liegt im Steg oberhalb der Schweißnaht und beträgt 180,9 N/mm².

Abschätzung der Normalkraft in der oberen Schweißnaht

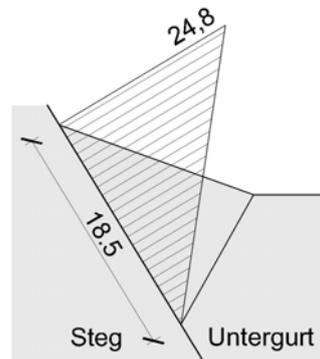


Abbildung B-109: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_o

$$N_{o_{FE}} = \int \sigma_N \cdot dA$$

$$A \approx 1,85 \cdot 10 = 18,5 \text{ cm}^2$$

$$N_{o_{FE}} \approx A \cdot \sigma_N = 18,5 \cdot \frac{24,8}{2 \cdot 10} = 23,0 \text{ kN}$$

Interpretation der Ergebnisse

Das Ingenieurmodell liefert mit $N_o=23,3$ kN auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Kräfte in der oberen Schweißnaht. Die Spannungen im Steg zufolge des Ingenieurmodells liegen jedoch 10% unterhalb der maximalen Vergleichsspannung im Steg zufolge FE-Analyse.

2.5) Ergebnisübersicht und Auswertung

Ergebnisübersicht

In der folgenden Tabelle sind die sich in den einzelnen Modellen für Regelquerschnitt 3 ergebenden maximalen Spannungen zusammengefasst. Der Winkel α beschreibt den Winkel zwischen Schweißnaht- und Untergurtoberfläche.

Die eingetragenen Werte σ_V , σ_N , σ_T und τ geben den Maximalwert der jeweiligen Spannung innerhalb des Schnittverlaufes wieder. Bei der Normal-, Tangential- und Vergleichsspannung liegt dieser am obersten Schweißnahtpunkt. Für die Vergleichsspannung wird noch ein zweiter Wert angegeben und zwar $\sigma_{V,max}$. Dieser stellt den maximal auftretenden Wert bei der jeweiligen Geometrie dar.

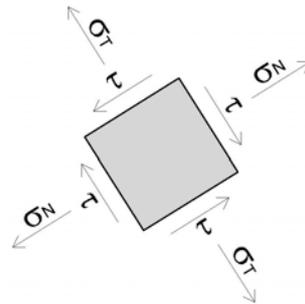


Abbildung B-110: Definition der Spannungskomponenten

Es werden die Ergebnisse des Berechnungsmodells (BM) und jene des Referenzmodells (RM) angegeben. Für das Referenzmodell wurden auch die Tangentialspannung und die Vergleichsspannung eingetragen. Die zugehörigen Abbildungen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht eigens angeführt.

Fall	α	Modell	σ_N	σ_T	τ	σ_V	$\sigma_{V,max}$
	[°]		[N/mm ²]				
a	10	BM	28,00	103,40	-16,20	96,80	182,90
		RM	36,20	108,20	-17,40	100,10	182,40
b	15	BM	26,40	113,40	-16,20	106,50	180,20
		RM	38,10	118,20	-18,00	109,00	181,50
c	20	BM	24,80	110,10	-22,30	104,60	180,90
		RM	27,80	110,70	-16,10	103,60	180,50

Tabelle B-03: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 3

Ergebnisauswertung

Berechnungsmodell

Die Normalspannungen im Schnitt durch die Stoßfuge nehmen mit zunehmendem Winkel α ab. Die tangential zum Schnitt verlaufenden Spannungen sowie die Schubspannungen nehmen jedoch zu. Der Wert der Vergleichsspannung am oberen Schweißnahtpunkt erreicht bei einem Winkel α von 15° ein Maximum. Der Einfluss der verschiedenen Schweißnahtgeometrien auf die maximale Vergleichsspannung ist sehr gering, sodass diese annähernd konstant bleibt. Bei einem Winkel α von 15° ergibt sich jedoch der geringste Wert.

Vergleich mit dem Referenzmodell

Im Referenzmodell ergeben sich bei einem Winkel α von 15° die größten Normal- und Schubspannungen. Die Vergleichsspannung am Schweißnahtansatz erreicht analog zum Berechnungsmodell ebenfalls bei diesem Winkel ein Maximum. Die maximalen Vergleichsspannungen im Querschnitt bleiben annähernd konstant. Eine geringfügig sinkende Tendenz der Werte mit steigendem Winkel α ist jedoch erkennbar.

Vergleich mit dem Ingenieurmodell

Das Ingenieurmodell (siehe Abbildung B-79) zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte konnte durch die FE-Berechnungen untermauert werden. Der Hebelsarm zwischen Druck- und Zugnormalkraft in der Fuge wurde dabei mit 35% der Untergurthöhe angenommen. Die Ergebnisse liegen durchwegs auf der sicheren Seite.

Der Wert der Randspannung am Schweißnahtansatz im Stegblech beträgt zufolge des Ingenieurmodells $165,2 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert liegt etwa 10% unter den Ergebnissen der FE-Berechnung. Dieser Ingenieuransatz kann somit nur zur groben Abschätzung der Spannungen herangezogen werden.

B4) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1) Allgemeines

Der zweite Teil meiner Diplomarbeit beinhaltet Spannungsuntersuchungen am Schweißnahtdetail einer Trogbrücke. Dabei soll der Einfluss unterschiedlicher Schweißnahtgeometrien und Blechstärken auf die Spannungsverläufe ermittelt werden. Es werden drei verschiedene Trogbrückenquerschnitte im Stützweitenbereich von etwa zehn bis fünfundzwanzig Metern untersucht. Dabei werden drei verschiedene Schweißnahtausbildungen analysiert. Die Belastung erfolgt durch eine horizontale Einheitslast von 1 kN, die auf mittlerer Höhe des Brückenobergurtes, angreift.

Ein Großteil der Aufgabe bestand darin, ein geeignetes FE-Modell zu finden, um die Fugensituation möglichst gut zu erfassen. Diese Situation lässt sich folgendermaßen charakterisieren. Die beiden Einzelquerschnitte liegen im Fugenbereich plan aneinander. Dadurch können über die Fuge hinweg Druckspannungen, allerdings weder Zug- noch nennenswerte Schubspannungen übertragen werden. Schweißeigenspannungen wurden dabei im Rahmen der Modellbildung nicht berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Modelle beschrieben, die für alle Querschnittsgeometrien untersucht wurden.

2) Untersuchte Modelle

2.1) Berechnungsmodell

Dieses Modell berücksichtigt einen Spalt in der Fuge von einem Millimeter. Dieser Spalt wird in den Druckbereichen durch axiale Federn überbrückt, die ausschließlich Drucknormalspannungen übertragen. Die Ermittlung des Druckbereichs erfolgt iterativ.

2.2) Referenzmodell

Das zweite Modell analysierte Modell ist vereinfacht und dient als Referenz. Die Fuge wird hier nicht berücksichtigt, sondern es wird ein durchgehender Querschnitt im Fugenbereich angesetzt. Dieses Modell liefert trotzdem durchaus brauchbare Ergebnisse. Dies liegt daran, dass ohnehin ein Großteil der Zugspannungen innerhalb des Querschnittes der oberen Schweißnaht abgebaut werden kann.

2.3) Ingenieurmodell

Zusätzlich zu den FE-Berechnungen wurde mit Ingenieurmodellen gearbeitet. Einerseits wurden die Normalspannungen im Steg auf Höhe des oberen Schweißnahtpunktes ermittelt. Diese Spannungen entsprechen bei Vernachlässigung der geringen Schubspannungen der Vergleichsspannung gemäß Ingenieurmodell an diesem Punkt.

Der zweite Ingenieuransatz dient dazu die Normalkräfte in den Schweißnähten ermitteln zu können. Dies wurde durch Anwendung der Gleichgewichtsbedingung ($\sum M = 0$) am freigeschnittenen Stegblech erreicht. Die Normalspannungen im Fugenbereich wurden dabei durch ein resultierendes Kräftepaar ersetzt. Der Hebelsarm zwischen den Zug- und Druckkräften bestimmt deren Größe. Mit Hilfe der FE-Analysen konnte für die drei Regelquerschnitte jeweils ein Hebelsarm ermittelt werden, der auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse nahe an der FE-Lösung liefert.

3) Ergebnisse

Die drei untersuchten Brückenquerschnitte weisen je nach Spannweite unterschiedliche Stegblechdicken zwischen zwanzig und vierzig Millimetern auf. Damit verschiebt sich das Steifigkeitsverhältnis zwischen Untergurtblech und Steg. Dieser Umstand ist vor allem in den Normalspannungsverläufen des Berechnungsmodells erkennbar. Bei den letzten beiden untersuchten Regelquerschnitten bildet sich aufgrund des weichen Steges gegenüber dem Ersten ein unterbrochener Druckbereich in der unteren Fugenhälfte aus. Dies führt zu höheren Druckspannungen in der unteren Schweißnaht. Gesamt gesehen verlagern sich die Druckspannungen mit dünner werdendem Stegblech jedoch tendenziell nach oben

Bei allen betrachteten Beispielen nimmt mit zunehmendem Winkel α der Wert der Normalspannung am oberen Punkt der Schweißnaht ab. Dieser Zusammenhang, entspricht dem Ingenieurverständnis, da durch Zunahme des Winkels zwischen Untergurtblech und der Schweißnahtoberfläche, gleichzeitig der Knickwinkel zwischen Steg und Schweißnaht verringert wird. Ein geringerer Knickwinkel verringert den Anteil der Normalspannungskomponente im Schnitt.

Diese Abnahme der Normalspannung ist allerdings nicht gleichbedeutend mit einer Abnahme der Vergleichsspannung in diesem Punkt. Das Gegenteil trifft eher zu. Nimmt der Winkel α zu, so steigen Schub- und Tangentialspannung an. Somit ergibt sich im Endeffekt ein Zuwachs der Vergleichsspannung.

Interessanter Weise steigt gleichzeitig der Höchstwert der Vergleichsspannung in der gesamten untersuchten Struktur jedoch nicht an, sondern verringert sich tendenziell. Dieses Maximum liegt bei allen untersuchten Modellen in geringem Abstand oberhalb der Schweißnaht im Steg. Die dortigen Spannungskonzentrationen bilden den Vergleichswert für die ermittelten Randspannungen im Stegblech zufolge des Ingenieurmodells. Diese werden allerdings je nach Querschnitt und Schweißnahtgeometrie um 10 bis 25% übertroffen. Der Ingenieuransatz liegt daher auf der unsicheren Seite und kann nur zur groben Abschätzung der Spannungen herangezogen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde des Weiteren ein Ingenieurmodell zur Ermittlung der Normalkräfte in den Schweißnähten untersucht. Dabei wurde für jeden Regelquerschnitt ein eigenes Modell gewählt, da sich jeweils das Steifigkeitsverhältnis zwischen Steg und Untergurt durch die Variation der Stegblechdicke verändert.

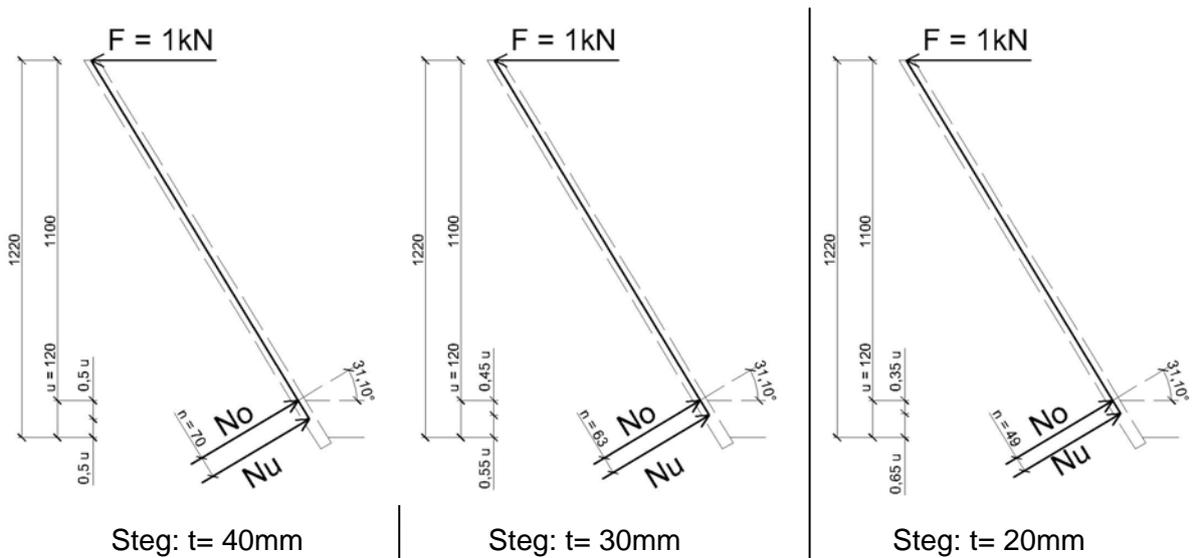


Abbildung B-111: Modelle zur Ermittlung der Schweißnahtkräfte

In Abbildung B-111 ist erkennbar, dass der Hebelsarm in Abhängigkeit der Stegblechdicke mit 35% bis 50% der Untergurtdicke u gewählt wurde.

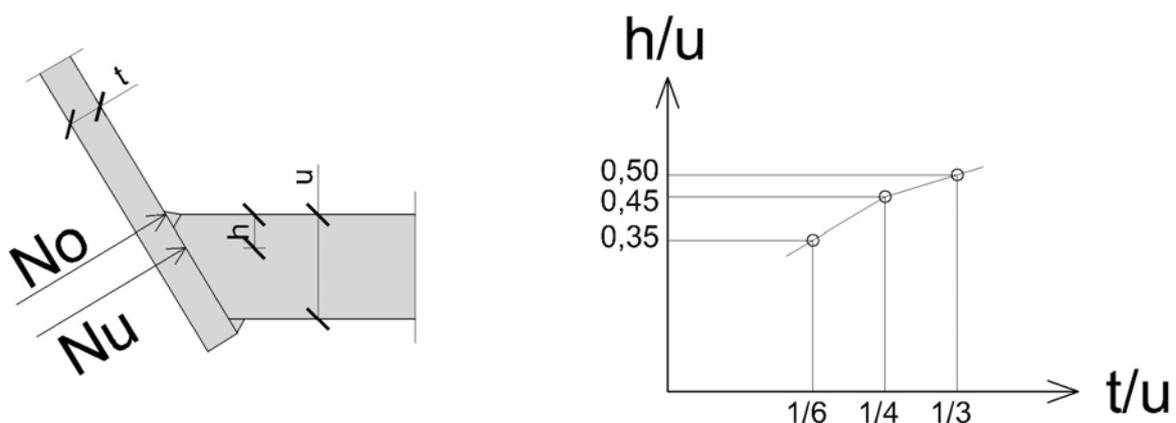


Abbildung B-112: Grafische Veranschaulichung der Berechnungsergebnisse

Abbildung B-112 veranschaulicht die Berechnungsergebnisse. Der Quotient t/u ist das Verhältnis von Stegblechdicke zu Untergurtdicke. Ein Ansteigen bedeutet somit eine Verstärkung des Steges gegenüber dem Untergurt. Der Quotient h/u steht für die Lage der resultierenden Druckkräfte. Steigt er an, so vergrößert sich der Hebelsarm zwischen den Druck- und Zugkräften.

Interpretiert man die Grafik, so kann man erkennen, dass sich die Druckspannungen im Fugenbereich nach oben verlagern je dünner das Stegblech wird. Dadurch verringert sich der Hebelsarm der Resultierenden der Zug- und Druckspannungen, sodass diese zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts anwachsen.

Das vorliegende Modell wurde auf Basis der FE-Berechnungen ermittelt und liegt für die behandelten Beispiele durchwegs auf der sicheren Seite.

B5) Verzeichnisse

1) Literaturverzeichnis

Fink, Josef. *Studienblätter zu Vorlesung Stahlbau 1*. Wien: Technische Universität - Institut für Tragkonstruktionen Stahlbau, 2006.

2) Tabellenverzeichnis

Tabelle B-01: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 1	130
Tabelle B-02: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 2	150
Tabelle B-03: Ergebnisvergleich der drei betrachteten Fälle für Regelquerschnitt 3	170

3) Abbildungsverzeichnis

Abbildung B-01: Randbedingungen und Belastung für die FE-Analysen	107
Abbildung B-02: Modell ohne Berührung der Querschnitte im Fugenbereich	108
Abbildung B-03: Modell ohne Zugspannungen im Fugenbereich	109
Abbildung B-04: Referenzmodell mit durchgehendem Querschnitt im Fugenbereich.....	109
Abbildung B-05: Berechnungsmodell mit Federn im Druckbereich der Fuge	110
Abbildung B-06: Führungsskizze Regelquerschnitt 1	112
Abbildung B-07: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für $a = 16\text{mm}$	112
Abbildung B-08: Ergebnisse des Ingenieurmodells $[\text{N}/\text{mm}^2]$	113
Abbildung B-09: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte	114
Abbildung B-10: Normalspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	115
Abbildung B-11: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	115
Abbildung B-12: Vergleichsspannungsmaximum	116
Abbildung B-13: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	116
Abbildung B-14: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	117
Abbildung B-15: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	117
Abbildung B-16: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	118
Abbildung B-17: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	118
Abbildung B-18: Vergleichsspannungsmaximum	119
Abbildung B-19: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	119
Abbildung B-20: Normalspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	120
Abbildung B-21: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge $[\text{N}/\text{mm}^2]$	120
Abbildung B-22: Vergleichsspannungsmaximum	121

Abbildung B-23: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	121
Abbildung B-24: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	122
Abbildung B-25: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	122
Abbildung B-26: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	123
Abbildung B-27: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	123
Abbildung B-28: Vergleichsspannungsmaximum	124
Abbildung B-29: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	124
Abbildung B-30: Normalspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	125
Abbildung B-31: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	125
Abbildung B-32: Vergleichsspannungsmaximum	126
Abbildung B-33: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	126
Abbildung B-34: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	127
Abbildung B-35: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	127
Abbildung B-36: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	128
Abbildung B-37: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	128
Abbildung B-38: Vergleichsspannungsmaximum	129
Abbildung B-39: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	129
Abbildung B-40: Definition der Spannungskomponenten	130
Abbildung B-41: Führungsskizze Regelquerschnitt 2	132
Abbildung B-42: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für $a = 14\text{mm}$	132
Abbildung B-43: Normalspannungen gemäß Ingenieurmodell [N/mm ²]	133
Abbildung B-44: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte	134
Abbildung B-45: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	135
Abbildung B-46: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	135
Abbildung B-47: Vergleichsspannungsmaximum	136
Abbildung B-48: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	136
Abbildung B-49: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	137
Abbildung B-50: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	137
Abbildung B-51: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	138
Abbildung B-52: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	138
Abbildung B-53: Vergleichsspannungsmaximum	139
Abbildung B-54: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	139
Abbildung B-55: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	140
Abbildung B-56: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	140
Abbildung B-57: Vergleichsspannungsmaximum	141
Abbildung B-58: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	141
Abbildung B-59: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	142

Abbildung B-60: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	142
Abbildung B-61: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	143
Abbildung B-62: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	143
Abbildung B-63: Vergleichsspannungsmaximum	144
Abbildung B-64: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	144
Abbildung B-65: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	145
Abbildung B-66: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	145
Abbildung B-67: Vergleichsspannungsmaximum	146
Abbildung B-68: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	146
Abbildung B-69: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	147
Abbildung B-70: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	147
Abbildung B-71: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	148
Abbildung B-72: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	148
Abbildung B-73: Vergleichsspannungsmaximum	149
Abbildung B-74: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	149
Abbildung B-75: Definition der Spannungskomponenten	150
Abbildung B-76: Führungsskizze Regelquerschnitt 3	152
Abbildung B-77: Untersuchte Schweißnahtgeometrien für $a = 12\text{mm}$	152
Abbildung B-78: Normalspannungen gemäß Ingenieurmodell [N/mm ²]	153
Abbildung B-79: Ingenieurmodell zur Abschätzung der Schweißnahtkräfte	154
Abbildung B-80: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	155
Abbildung B-81: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	155
Abbildung B-82: Vergleichsspannungsmaximum	156
Abbildung B-83: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	156
Abbildung B-84: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	157
Abbildung B-85: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	157
Abbildung B-86: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	158
Abbildung B-87: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	158
Abbildung B-88: Vergleichsspannungsmaximum	159
Abbildung B-89: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	159
Abbildung B-90: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	160
Abbildung B-91: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	160
Abbildung B-92: Vergleichsspannungsmaximum	161
Abbildung B-93: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von N_0	161
Abbildung B-94: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	162
Abbildung B-95: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	162
Abbildung B-96: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	163

Abbildung B-97: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²].....	163
Abbildung B-98: Vergleichsspannungsmaximum.....	164
Abbildung B-99: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von No	164
Abbildung B-100: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	165
Abbildung B-101: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	165
Abbildung B-102: Vergleichsspannungsmaximum.....	166
Abbildung B-103: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von No	166
Abbildung B-104: Normalspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	167
Abbildung B-105: Tangentialspannungsverlauf in der Stoßfuge [N/mm ²]	167
Abbildung B-106: Scheibenschubspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²]	168
Abbildung B-107: Vergleichsspannungen in der Stoßfuge [N/mm ²].....	168
Abbildung B-108: Vergleichsspannungsmaximum.....	169
Abbildung B-109: Vereinfachtes Spannungsbild zur Rückrechnung von No	169
Abbildung B-110: Definition der Spannungskomponenten.....	170
Abbildung B-111: Modelle zur Ermittlung der Schweißnahtkräfte	175
Abbildung B-112: Grafische Veranschaulichung der Berechnungsergebnisse.....	175