



Diplomarbeit

Master's Thesis

Modellbildung und Parameterstudien zu Spannungszuständen im Bereich von Gurtdickensprüngen

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

Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Josef Fink
und
Univ.Ass. Dipl.Ing. Lukas Juen

durchgeführt am

Institut für Tragkonstruktionen, E 212
Forschungsbereich für Stahlbau

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Josef Eiweck
Matr.Nr.: 0325043
Bergstrasse 6
7000 Eisenstadt

Wien, Dezember 2009

Kurzfassung

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

Das Thema ist die Analyse von Spannungszuständen im Bereich von Gurtickenänderungen auf geschweißten H-förmigen Stahlträgern. Ziel ist es, ein Ingenieurmodell zur Beschreibung der Schubspannungsverläufe am Anschluss des Obergurtes zum Steg zu finden. Dazu werden Untersuchungen mittels eines Finite Elemente Programms durchgeführt.

Zu Beginn wird ein statisches System und die gewählten Belastungen vorgestellt. An diesen werden die Spannungsverläufe untersucht. Danach werden Modelle als idealisierte Abbilder der realen Ausführung erstellt, die in das FE-Programm eingegeben werden. Die Ergebnisse der Modellberechnungen werden verglichen und auf ihre Eigenschaften sowie ihr Verhalten hin untersucht. An geeigneten Modellen wird eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei werden die Einflüsse der Variation von Querschnittsabmessungen auf die Spannungszustände beobachtet.

Als Erkenntnis wird ein ingenieurmäßiges Modell vorgestellt, das die Schubspannungsverläufe am Anschluss zwischen Obergurt und Steg in allen untersuchten Varianten erfolgreich abbildet.

Abstract

This thesis was written at the Institute of Structural Engineering, field of study: Steel Structures, at the Vienna University of Technology. Its topic is the analysis of tensions during changes in diameter of flanges. The aim is finding an engineer model describing the courses of shear tension at the connection point of top flange and web. The analyses were made by means of a finite elements program.

At the beginning a system and suitable loads are introduced. Based on these facts, the tension courses are analysed. After that, models, idealised images of the real design, were made and entered into a FE-program. The results of the model calculations are compared and examined concerning their qualities and behaviour. Parameter studies on suitable models are carried out. Thus, the influences of variation of the geometrical dimensions of the cross-section are observed.

As a result, a technical model describing the courses of shear tensions at the connection point of top flange and web is presented.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Josef Fink für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchführen zu können, für fachliche Ratschläge und für die Bereitstellung des für meine Berechnungen erforderlichen Computerprogramms. Weiters möchte ich mich für die gute Beratung durch meinen Betreuer und Kollegen Dipl. Ing. Lukas Juen bedanken.

Ebenfalls danke ich meinen Eltern für ihre Unterstützung in meinem Studium. Ohne Sie wäre Vieles nicht möglich gewesen.

Besonders danke ich meinen guten Freunden für ihre Unterstützung und Aufmunterung in dieser schwierigen Zeit. Vielen Dank!

1) Inhaltsverzeichnis

1) Inhaltsverzeichnis	I
2) Einleitung	1
2.1) Formelzeichen	2
2.2) Abkürzungen	3
3) Berechnungsgrundlagen	4
3.1) Finite Elemente Berechnung	4
3.2) Normen	5
4) Allgemeine Beschreibung	6
4.1) Statisches System	8
4.2) Querschnitt	9
4.2.1) Grundlagen zur Ermittlung der Querschnittswerte	9
4.2.2) Querschnittswerte	10
4.3) Belastung	15
4.3.1) Allgemein	15
4.3.2) Moment	17
4.3.3) Einzellast	18
4.3.4) Gleichlast	19
4.4) Spannungsermittlung	20
4.4.1) Allgemein	20
4.4.2) Lokale Schubkraft	22
4.4.3) Lokales Moment	24
4.4.4) Ideeller Hebelarm	26
4.4.5) Weitere lokale Effekte	27
4.5) Schweißnähte	28
4.5.1) Allgemein	28
4.5.2) Auswirkungen lokaler Effekte auf die Schweißnähte	29
4.5.3) Nachweise	30

5) Modelle	32
5.1) Allgemein	32
5.2) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch	40
5.2.1) Modellverhalten	40
5.2.2) Spannungen	42
5.3) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch	51
5.3.1) Modellverhalten	51
5.3.2) Spannungen	53
5.4) Modell E-Modul, einfach symmetrisch	59
5.4.1) Modellverhalten	59
5.4.2) Spannungen	60
5.5) Vergleich der Modelle Abrupt Dick und E-Modul	64
5.6) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch	66
5.7) Modell Schweißnaht	69
5.8) Modell Verlaufend	71
5.8.1) Modellverhalten	71
5.8.2) Spannungen	72
5.9) Vergleich der Modelle Abrupt Dick, Schweißnaht und Verlaufend	80
6) Parameterstudie	83
6.1) Allgemein	83
6.2) Eingangsparameter	85
6.2.1) Schnittgrößen	85
6.2.2) Geometrische Größen	87
6.2.3) Ausführungsart	90
6.3) Schnittgrößen	92
6.3.1) Allgemein	92
6.3.2) Verhalten der Gurtdifferenzkraft dN	93
6.3.3) Verhalten der Spannungen bei Querkraftbeanspruchung	94
6.3.4) Verhalten der Spannungen bei Momentenbeanspruchung	107

6.4)	Geometrische Größen	109
6.4.1)	Allgemein	109
6.4.2)	Verhalten der Gurtdifferenzkraft dN	110
6.4.3)	Querschnittsbreite b	113
6.4.4)	Querschnittshöhe h	129
6.4.5)	Gurtdickensprung dt	149
6.4.6)	Variation des Obergurtdicke des Querschnitt l	162
6.5)	Zusammenfassung	166
6.5.1)	Schubspannungen	166
6.5.2)	Parameterstudie	168
7)	Ingenieurmodell	173
7.1)	Allgemein	174
7.1.1)	Beschreibung	174
7.1.2)	Modelle	177
7.1.3)	Spannungsabbildung	178
7.1.4)	Verhalten des Ingenieurmodells	180
7.1.5)	Gültigkeit des Ingenieurmodells	181
7.2)	Spannungen des Ingenieurmodells	185
7.2.1)	Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch	185
7.2.2)	Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch	193
7.2.3)	Modell E-Modul, einfach symmetrisch	196
7.2.4)	Modell E-Modul, doppelt symmetrisch	202
7.3)	Zusammenfassung	205
8)	Verzeichnisse	208
8.1)	Abbildungsverzeichnis	208
8.2)	Tabellenverzeichnis	213
8.3)	Literaturverzeichnis	214
9)	Anhang	215
9.1)	Anhang A, Modelle	217
9.2)	Anhang B, Parameterstudie	223
9.3)	Anhang C, Ingenieurmodell	252
9.4)	Anhang D, Anwendungsbeispiel	263

2) Einleitung

Diese Arbeit behandelt die Erstellung eines Ingenieurmodells zur Beschreibung von Schubspannungsverläufen am Anschluss des Obergurtes zum Steg eines H-Querschnittes im Bereich eines Gurtdickensprunges. Gurtdickensprünge werden verwendet um die Biegetragfähigkeit eines Trägers an die Biegebeanspruchung anzupassen.

In den „Berechnungsgrundlagen“ wird das verwendete Berechnungsverfahren, die Finite Elemente Methode, kurz erläutert. Es werden Bedingungen aufgezählt die einzuhalten waren, um das vorhandene System mit Hilfe des FE-Programmes zu idealisieren. Die entstehenden Modelle entfernen sich je nach Struktur unterschiedlich von der Realität.

Das Kapitel „Allgemeine Beschreibung“ gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Variationen des untersuchten Systems. Unterteilt wird nach System, Belastung und Modell. Es wird das System eines halben Einfeldträgers mit drei Belastungen - Moment, Einzellast und Gleichlast - berechnet. Unabhängig davon werden verschiedene Modelle betrachtet. Diese stellen Möglichkeiten dar, die Detailausführung des Gurtdickensprunges im FE-Programm abzubilden. Es werden im Folgenden die Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“, „Verlaufend“ und „E-Modul“ unterschieden.

In den „Modelluntersuchungen“ wird auf das Verhalten der verschiedenen Modelle näher eingegangen. An ausgewählten Modellen werden Parameterstudien durchgeführt und die Auswirkungen auf den Spannungsverlauf beobachtet. Abschließend wird ein ingenieurmäßiges Modell vorgestellt, das in einfacher Weise die Berücksichtigung der lokalen Schubspannungsschwankungen bei Gurtdickenänderungen erlaubt.

2.1) Formelzeichen

x	[mm]	Längsachse
y	[mm]	Querschnittsachse
z	[mm]	Querschnittsachse
b	[mm]	Querschnittsbreite
h	[mm]	Querschnittshöhe
ε	[-]	Dehnung
f_y	[N/mm ²]	Streckgrenze
σ_N	[N/mm ²]	Normalspannung
τ	[N/mm ²]	Schubspannung
γ_{m0}	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten
γ_{m2}	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Verbindungsmitteln
M_{Ed}	[kN/m]	Bemessungswert des einwirkenden Momentes
V_{Ed}	[kN]	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
A_{SN}	[mm ²]	Querschnittsfläche der Schweißnaht
$S_{y,SN}$	[cm ³]	statisches Moment zwischen Gurt und Steg
A	[mm ²]	Querschnittsfläche des Gesamtquerschnitts
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
G	[N/mm ²]	Schubmodul
dN	[kN]	lokale Schubkraft, Gurtnormalkraftdifferenz zwischen den Querschnitten vor und nach dem Dickensprung
dM	[kNm]	lokales Moment
e'	[mm]	ideeller Hebelarm

α	[-]	Parameter der Gurtdicken
β	[-]	Parameter der Steghöhe und Gurtbreite
δ	[-]	Parameter des Ingenieurmodells
ε	[-]	Parameter des Ingenieurmodells

2.2) Abkürzungen

OG	Obergurt
St	Steg
UG	Untergurt
L	Lamelle
QS 1	Grundquerschnitt
QS 2 bis 5	Querschnitte mit dickerem Gurt oder erhöhtem E-Modul im Gurt
SN	Schweißnaht

3) Berechnungsgrundlagen

Der gesamten Arbeit werden folgende Annahmen zugrundegelegt:

Stahl S235

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 81.000 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{m0} = 1,00$$

Basierend auf dem EC 3 [1] werden alle Sicherheitsbeiwerte mit 1,00 angenommen. Dies entspricht dem Teilsicherheitsbeiwert für Stahl. Auf der Einwirkungsseite sind alle angesetzten Kräfte bereits Bemessungslasten.

3.1) Finite Elemente Berechnung

Die Methode der finiten Elemente ist ein numerisches Näherungsverfahren. Es beruht darauf, ein komplexes System in einzelne Elemente zu zerlegen, die an Knoten miteinander gekoppelt sind. Ein System mit unendlich vielen Freiheitsgraden wird dadurch in ein System mit endlich vielen Freiheitsgraden umgewandelt, auch diskretisieren genannt. Begleitend ist die Definition von Randbedingungen, Belastungen und Materialparametern erforderlich. Die verwendete Finite Elemente Methode ist ein Weggrößenverfahren. Die Unbekannten sind die Verformungsgrößen in den Knoten. Die Verformungen zwischen den Knoten erhält man durch Interpolation der Knotenwerte.

Die Genauigkeit einer Finiten Elemente Berechnung ist von der Feinheit ihres Netzes abhängig. Je mehr Elemente verwendet werden, desto mehr nähern sich die Ergebnisse der exakten Lösung an. Das Verfahren basiert auf dem Energieprinzip, das ein Minimum der Formänderungsarbeit fordert. Daraus lässt sich für jedes Element eine Steifigkeitsmatrix berechnen, die das Elementverhalten abhängig von den Verschiebungen beschreibt. Durch das Aufstellen des globalen Kräftegleichgewichts für jeden Knoten werden die Unbekannten ermittelt. Das FE-Programm ermöglicht so die statische und dynamische Berechnung beliebig geformter Tragwerke mit allgemeiner Belastung.

Die Finite Elemente Berechnungen erfolgen mit dem Programm SSD – Sofistik Struktural Desktop Version 10.75 – 23. Die Eingabe des Systems erfolgt graphisch über den modularen Aufsatz Sofiplus, die Berechnung selbst über das Modul ASE.

Im Zuge der Berechnung mittels des FE-Programms musste eine programmbedingt angepasste Eingabe des Systems erfolgen. Dies erfordert die Unterscheidung von realer Ausführung und Modell in der FE-Berechnung. Eine reale Ausführung kann somit durch verschiedene Modelle beschreiben werden.

Einschränkungen und Näherungen des FE-Programms sind unter anderem:

- Die Querschnitte sind als Scheibenelemente mit zugewiesener Dicke idealisiert.
- Die Lage einer Bezugsfläche (unten / mitte /oben) ist zu wählen.
- Es treten Überlappungen bei Schnittkanten von Bezugsflächen auf.
- Bei Kopplungen wird der Dehnungszustand im Querschnitt gegenüber der technischen Biegelehre verändert.

3.2) Normen

Für Gurtdickensprünge und die Aufdoppelung von Lamellen auf Stahlträger werden derzeit übliche konstruktive Bemessungsregeln als Grundlage herangezogen. Es gibt im Eurocode 3 [1] keine diesbezügliche Regelung. In der Norm DIN 18800-1 [3] ist eine Regelausbildung für den Stumpfstoß von Querschnittsteilen verschiedener Dicken dargestellt. Es wird empfohlen, bei Dickenunterschieden von mehr als 10 mm den Übergang im Verhältnis 1:1 oder flacher auszuführen. Ebenfalls beschrieben wird das Verbinden einer aufgeschweißten Lamelle. Dabei wird die Lamelle zur Kraftereinleitung um die halbe Gurtbreite über den eigentlichen Beginn verlängert. In der ÖNORM B 4602-08 [2] ist eine pauschale Mindestdicke der Schweißnähte im Bereich eines Gurtdickensprunges oder einer Lamelle vorgesehen.

4) Allgemeine Beschreibung

Den Berechnungen wird das statische System eines halben Einfeldträgers zugrunde gelegt. Bis zur Stabmitte wird der Querschnitt 1 verwendet. Danach wird, je nach Modell, auf die Querschnitte 2 bis 5 gewechselt. Untersucht wird die Auswirkung von drei verschiedenen Belastungen - Moment, Einzellast und Gleichlast. Die Höhe der Lasten wurde so gewählt, dass sich am Ort des Dickensprunges immer das Moment $M = 4.077,2 \text{ kNm}$ einstellt. Dies entspricht gerade der elastischen Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts 1. Die Schnittgrößen unterscheiden sich daher in Trägermitte nur durch die Querkraft, deren Verlauf je Belastung unterschiedlich ist.

Es werden vier Ausführungsvarianten untersucht, die sich alle direkt als Modelle im FE-Programm abbilden lassen. Das Modell „Abrupt Dick“ entspricht einem plötzlichen Übergang der Gurtdicke. Eine lokale Verdickung des Gurtes durch die Schweißnahtwulst vor dem eigentlichen Dickensprung wird im Modell „Schweißnaht“ berücksichtigt. Es kommt dabei zu einem Absinken der extremen Spannungsspitzen, die das Modell „Abrupt Dick“ charakterisieren. Das Modell „Verlaufend“ beschreibt einen stetigen Übergang der Gurtdicke im Verhältnis 1:4.

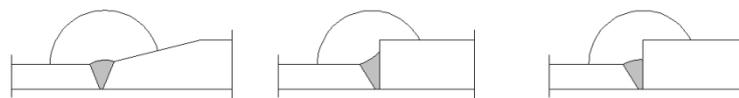


Abbildung 4-1: Ausführungen Dickensprung: „Verlaufend“, „Schweißnaht“, „Abrupt Dick“

Als Ergänzung wird ein viertes Modell „E-Modul“ eingeführt, das den Dickensprung anhand der Veränderung des Elastizitätsmoduls des Gurtes berücksichtigt. Dabei entsteht an der Stelle des Querschnittwechsels keine Exzentrizität der Gurtnormalkräfte, die beidseitig des Dickensprunges vorhanden sind. Dadurch treten nur geringe lokale Biegemomente auf, die den untersuchten Schubspannungsverlauf beeinflussen können.

Das Modell erlaubt die Untersuchung des Einflusses dieser lokalen Beanspruchung. Freischnitte im Steg werden bei den Modelluntersuchungen generell nicht berücksichtigt.

Übersicht über die grundsätzliche Einteilung der Untersuchungen

Statisches System

- Halber Einfeldträger

Querschnitte

- Querschnitt 1 (Grundquerschnitt)
- Querschnitt 2 bis 5 (verstärkte Querschnitte)

Belastungen

- Moment M
- Einzellast F
- Gleichlast q

Modelle

- Abrupt Dick
- Schweißnaht
- Verlaufend
- E-Modul

4.1) Statisches System

Es wird ein Träger mit einer Länge von 10,0 m gewählt, der an einer Seite (Punkt A) horizontal verschiebbar, sowie an der gegenüberliegenden Seite (Punkt B) vertikal verschiebbar und eingespannt gelagert ist. Ab einer Länge von 5,0 m wird der Grundquerschnitt (QS 1) durch einen verstärkten Querschnitt (QS 2 bis 5) abgelöst. Der Grundquerschnitt bleibt in allen berechneten Varianten konstant.

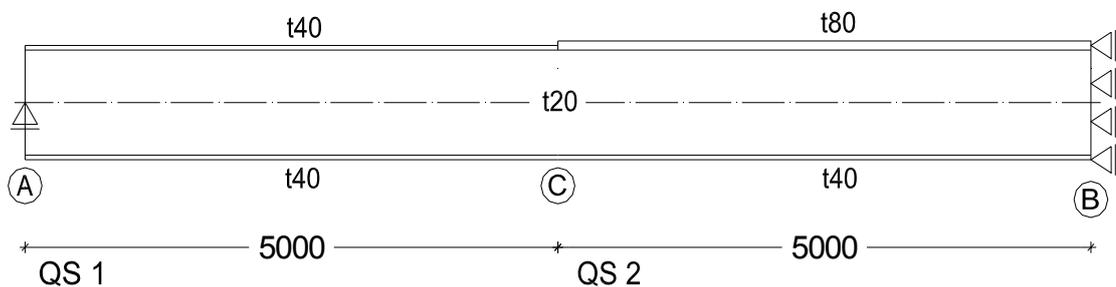


Abbildung 4-2: System

Die Trägerlänge wird maßgeblich durch die vorhandene Rechnerleistung und die gewünschte Netzdichte des FE-Modells begrenzt. Da es sich hier um ein lokales Problem handelt, ist eine ausreichende Netzdichte im Nahebereich des Punktes C unerlässlich. Es wird daher davon abgesehen, einen ganzen Einfeldträger zu modellieren und versucht, die Längsausdehnung gering zu halten. Eine Mindestträgerlänge ist jedoch erforderlich, um zwischen der Stelle des Gurtdickensprunges (Punkt C) und den Auflagerbereichen (Punkt A und B) die Gültigkeit der technischen Biegelehre sicherzustellen. Für Trägerhöhen bis zirka 2.500 mm ist die gewählte Systemlänge ausreichend.

4.2) Querschnitt

4.2.1) Grundlagen zur Ermittlung der Querschnittswerte

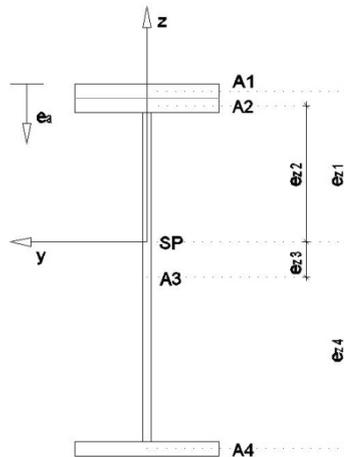


Abbildung 4-3: Allgemeine Darstellung des Querschnitts

Teilquerschnittsflächen:

$$A_i = b_i * h_i$$

Gesamtquerschnittsfläche:

$$A = \Sigma A_i$$

Flächenträgheitsmoment in Bezug auf den oberen Querschnittsrand:

$$S_{a,i} = A_i * e_{a,i}$$

Schwerpunktsabstand vom oberen Querschnittsrand:

$$e_z = \Sigma S_{a,i} / \Sigma A_i$$

Schwerpunktsabstand der Teilquerschnitte:

$$e_{z,i} = e_{a,i} - e_z$$

Teilträgheitsmoment:

$$I_{y,i} = \int z^2 dA = (A_i * e_{z,i}^2 + I_{y,i,eigen})$$

Eigentragheitsmoment:

$$I_{y,i,eigen} = \frac{b_i * h_i^3}{12}$$

Trägheitsmoment:

$$I_y = \Sigma I_{y,i}$$

Widerstandsmoment:

$$W_z = I_y / z$$

statisches Moment:

$$S_{y,i} = A_i * e_{z,i}$$

statisches Moment am Anschluss vom Obergurt zum Steg:

$$S_{y,OG} = A_{OG} * e_{z,OG}$$

maximal elastisch aufnehmbares Moment:

$$M_{rd} = f_{y,d} / \min W_z$$

maximal elastisch aufnehmbare Querkraft:

$$V_{rd} = \frac{(f_{y,d} / \sqrt{3}) * I_y * b_{St}}{\max S_y}$$

4.2.2) Querschnittswerte

Für die verwendeten Querschnitte, die den Berechnungen und Parameterstudien zugrundeliegen, werden im Folgenden die wichtigsten Querschnittswerte aufgelistet. Es werden fünf Querschnitte betrachtet: Querschnitt 1 ist der Grundquerschnitt aller Modelle, je nach betrachtetem Detail geht dieser nach dem Dickensprung in einen der Querschnitte 2 bis 5 über.

Bei der Ausführung eines Gurtdickensprunges wird in Querschnitt 2 und 3 unterschieden. Dabei verändert sich die Gurtstärke einmal nur am Obergurt und das zweite mal an Ober- und Untergurt gleichermaßen. Bei einem Sprung im E-Modul des Gurtes wird entsprechend dazu in Querschnitt 4, mit Materialwechsel am Obergurt, und Querschnitt 5, mit Materialwechsel an Ober- und Untergurt, unterteilt. Im Anhang A 1 sind die Normalspannungsverläufe der Querschnitte 1 bis 4 dargestellt.

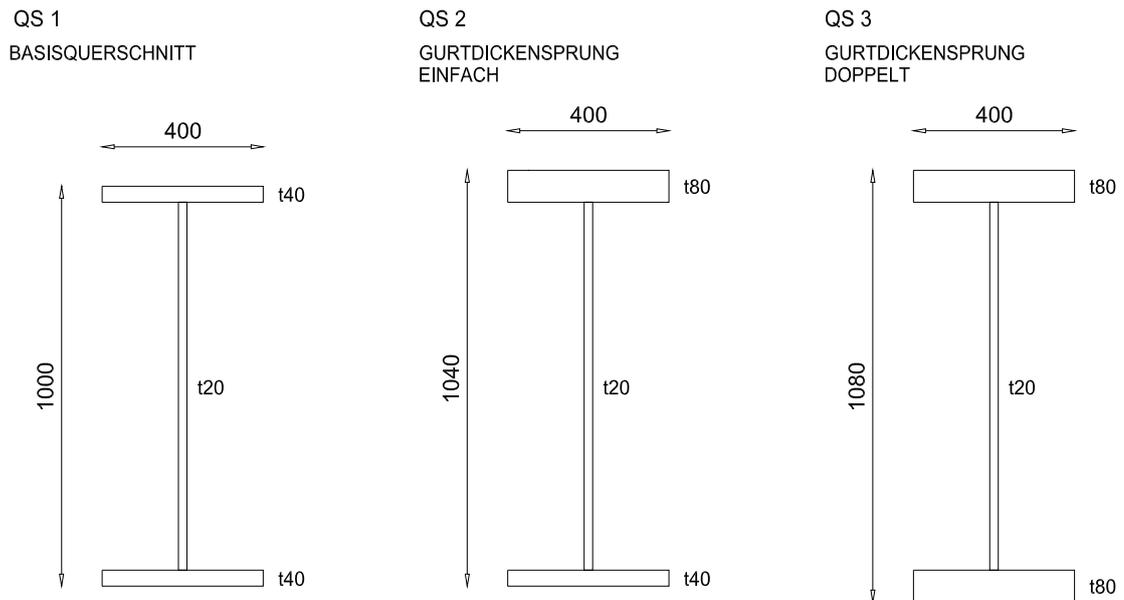


Abbildung 4-4: Querschnitt 1 bis 3

4.2.2.1) Querschnitt 1

Grundquerschnitt

Tabelle 4-1: Querschnittswerte QS 1

i	b [cm]	h [cm]	\bar{A}_i [cm ²]	ea [cm]	Sa [cm ³]	ez [cm]	Iy [cm ⁴]
1							
2	40	4	160,0	2,0	320,0	-48,00	368.853,3
3	2	92	184,0	50,0	9.200,0	0,00	129.781,3
4	40	4	160,0	98,0	15.680,0	48,00	368.853,3
5							
		100	504,0		25.200,0		867.488,0

elastische Querschnittswiderstände:

$$M_{rd} = 4.077,19 \text{ kNm}$$

$$V_{rd} = 2.403,00 \text{ kN}$$

statisches Moment zwischen OG und Steg:

$$S_{y,OG} = -7.680,00 \text{ cm}^3$$

4.2.2.2) Querschnitt 2

Grundquerschnitt mit Obergurtdickensprung

Tabelle 4-2: Querschnittswerte QS 2

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1	40	4	160,0	2,0	320,0	-39,47	249.472,8
2	40	4	160,0	6,0	960,0	-35,47	201.511,3
3	2	92	184,0	54,0	9.936,0	12,53	158.670,1
4	40	4	160,0	102,0	16.320,0	60,53	586.436,6
5							
		104	664,0		27.536,0		1.196.090,7

elastische Querschnittswiderstände:

$$M_{rd} = 4.495,14 \text{ kNm}$$

$$V_{rd} = 2.475,59 \text{ kN}$$

statisches Moment zwischen OG und Steg:

$$S_{y,OG} = -11.990,36 \text{ cm}^3$$

4.2.2.3) Querschnitt 3

Grundquerschnitt mit Ober- und Untergurtdickensprung

Tabelle 4-3: Querschnittswerte QS 3

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1	40	4	160,0	2,0	320,0	-52,00	432.853,3
2	40	4	160,0	6,0	960,0	-48,00	368.853,3
3	2	92	184,0	54,0	9.936,0	0,00	129.781,3
4	40	4	160,0	102,0	16.320,0	48,00	368.853,3
5	40	4	160,0	106,0	16.960,0	52,00	432853,3
		108	824,0		44.496,0		1.733.194,7

elastische Querschnittswiderstände:

$$M_{rd} = 7.542,61 \text{ kNm}$$

$$V_{rd} = 2.596,11 \text{ kN}$$

statisches Moment zwischen OG und Steg:

$$S_{y,OG} = -16.000,00 \text{ cm}^3$$

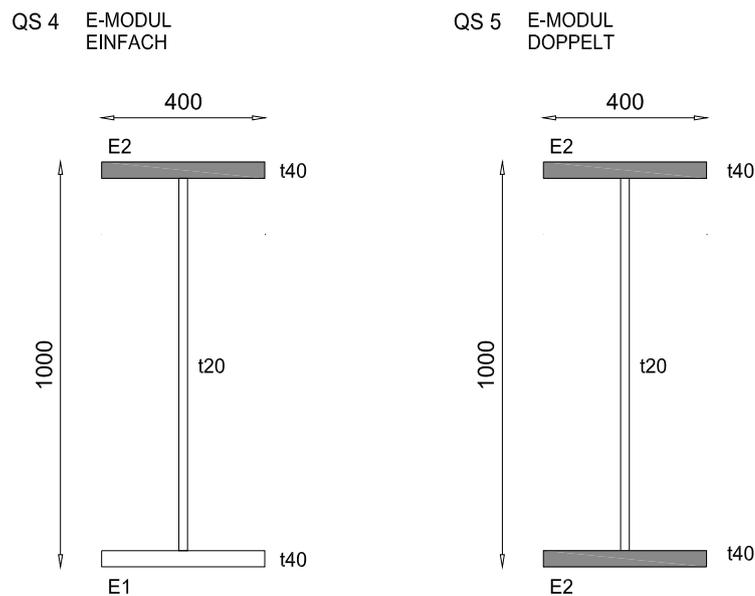


Abbildung 4-5: Querschnitt 4 und 5

4.2.2.4) Querschnitt 4

E-Modul Sprung am Obergurt

Tabelle 4-4: Querschnittswerte QS 4

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1							
2	40	4	160,0	2,0	320,0	-48,00	368.853,3
3	2	92	184,0	50,0	9.200,0	0,00	129.781,3
4	40	4	160,0	98,0	15.680,0	48,00	368.853,3
5							
		100	504,0		25.200,0		867.488,0

elastische Querschnittswiderstände:

$$M_{rd} = 4.380,08 \text{ kNm}$$

$$V_{rd} = 2.424,25 \text{ kN}$$

statisches Moment zwischen OG und Steg:

$$S_{y,OG} = -11.658,80 \text{ cm}^3$$

4.2.2.5) Querschnitt 5

E-Modul Sprung an Ober- und Untergurt

Tabelle 4-5: Querschnittswerte QS 5

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1							
2	40	4	160,0	2,0	320,0	-48,00	368.853,3
3	2	92	184,0	50,0	9.200,0	0,00	129.781,3
4	40	4	160,0	98,0	15.680,0	48,00	368.853,3
5							
		100	504,0		25.200,0		867.488,0

elastische Querschnittswiderstände:

$$M_{rd} = 7.544,42 \text{ kNm}$$

$$V_{rd} = 2.492,43 \text{ kN}$$

statisches Moment zwischen OG und Steg:

$$S_{y,OG} = -15.360,00 \text{ cm}^3$$

Nachfolgend sind die Widerstände für alle Querschnitte bei alleiniger Belastung entweder mit Moment oder mit Querkraft zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Querschnittswiderstände aller Querschnitte

QS	Ausführung	elast. QS Widerstände	
		M _{rd} [kNm]	V _{rd} [kN]
1	Grundquerschnitt	4.077,20	2.403,00
2	1 Gurtdickensprung	4.495,14	2.475,59
3	2 Gurtdickensprünge	7.542,61	2.596,11
4	1 E-Modul Sprung	4.380,08	2.424,25
5	2 E-Modul Sprünge	7.544,42	2.492,43

4.3) Belastung

4.3.1) Allgemein

Um die Vergleichbarkeit bei unterschiedlicher Querkraft zu gewährleisten wurden die Belastungen so gewählt, dass am Gurtdickensprung ein konstantes Moment herrscht. Es werden drei Lastfälle unterschieden.

- Moment
- Einzellast
- Gleichlast

Durch eine reine Momentenbelastung kann das Modellverhalten ohne Querkraftmitwirkung beobachtet werden. Die Schnittgrößen bei der Einwirkung einer Einzellast oder einer Gleichlast unterscheiden sich davon durch eine konstante beziehungsweise linear veränderliche Querkraft. Außerdem kommt es über die gesamte Länge des Trägers zu einem anderen Momentenverlauf. Es tritt keine Normalkraftbeanspruchung auf.

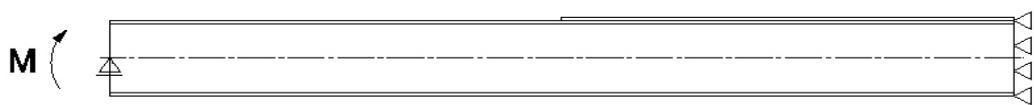
Am Ort des Gurtdickensprunges wird das Moment $M = 4.077,2 \text{ kNm}$ gewählt. Es kennzeichnet die maximale elastische Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Grundquerschnittes wie in Tabelle 4-6 dargestellt. Sämtlichen Berechnungen wird ein ideal elastisches Materialverhalten zugrundegelegt. Tatsächlich treten jedoch im Bereich des Gurtdickensprunges örtliche Spannungsspitzen auf, die mitunter die Fließgrenze übersteigen. Die dadurch an einem vergleichbaren realen Bauteil entstehenden lokalen Plastifizierungen werden in dieser Arbeit nicht untersucht. Dabei werden andere als die hier angeführten Mechanismen maßgeblich.

Im Folgenden werden die Einwirkungen und die sich daraus ergebenden Schnittgrößen am Gurtdickensprung dargestellt.

Tabelle 4-7: Einwirkungen und hervorgerufene Schnittgrößen am Dickensprung

Belastung	Einwirkung			Schnittgrößen	
	M [kNm]	F [kN]	q [kN/m]	Med [kNm]	Ved [kN]
Moment	4.077,2	0,0	0,0	4.077,2	0,0
Einzellast	0,0	815,44	0,0	4.077,2	815,44
Gleichlast	0,0	0,0	108,73	4077,2	543,63

MOMENT



EINZELLAST



GLEICHLAST

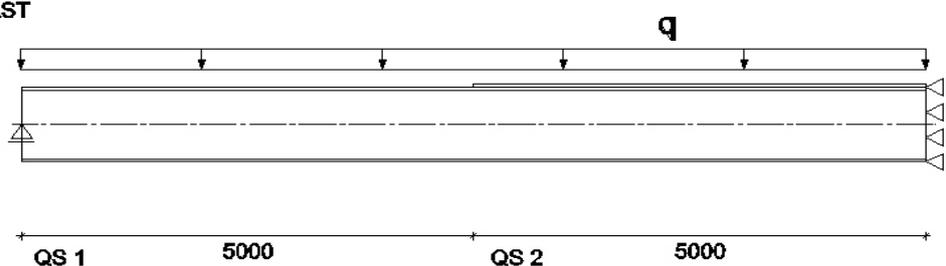


Abbildung 4-6: Belastungen des Systems

In den Abbildungen 4-7 bis 4-12 werden die einwirkenden Schnittgrößenverläufe „Ed“ im Träger dargestellt. Zum Vergleich wurden ebenfalls die elastischen Querschnittswiderstände „Rd“ der Querschnitte 1 und 2 eingetragen. In manchen Bereichen kommt es zu einer Überschreitung der Beanspruchbarkeit ($E_d > R_d$), die für eine bautechnische Berechnung nicht zulässig wäre. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf die Detailbetrachtung des Dickensprunges und eine qualitative Analyse des lokalen Spannungszustandes nach einer ideal elastischen Berechnung. Eine Überschreitung des Querschnittswiderstandes führt zu keiner qualitativen Änderung des Spannungsverlaufes.

4.3.2) Moment

Am Beginn des Trägers wird das Moment $M = 4.077,2 \text{ kNm}$ eingepreßt. Es ergibt sich ein konstanter Momentenverlauf über die gesamte Trägerlänge.

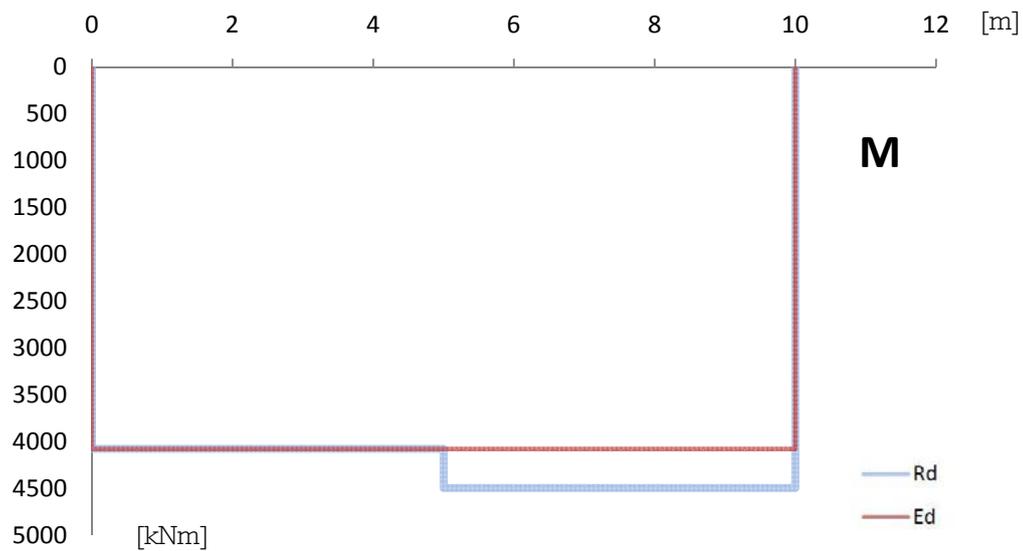


Abbildung 4-7: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Moment $M = 4.077,2 \text{ kNm}$

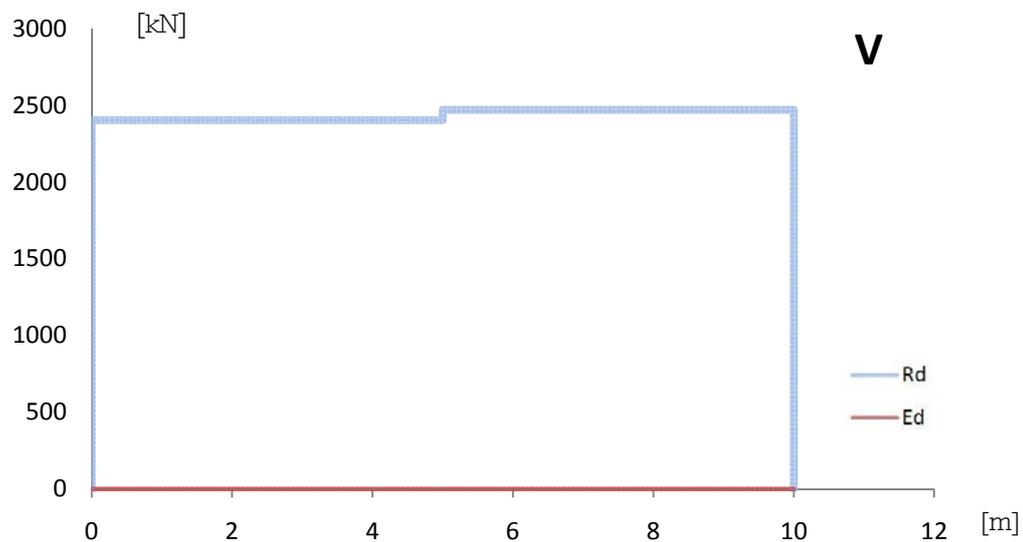


Abbildung 4-8: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Moment $M = 4.077,2 \text{ kNm}$

Belastung	QS 1		QS 2	
	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]
Moment	4.077,2	0,0	4.077,2	0,0

4.3.3) Einzellast

Am Ende des Trägers wird die Einzellast $P = 815,44 \text{ kN}$ eingeprägt. Es ergeben sich ein linearer Momenten- und ein konstanter Querkraftverlauf.

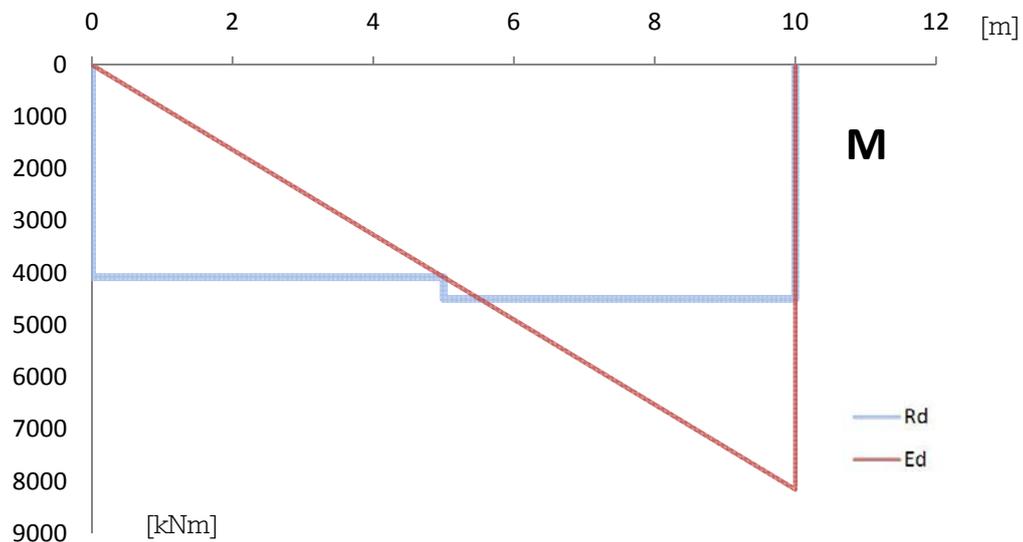


Abbildung 4-9: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Einzellast $P = 815,44 \text{ kN}$

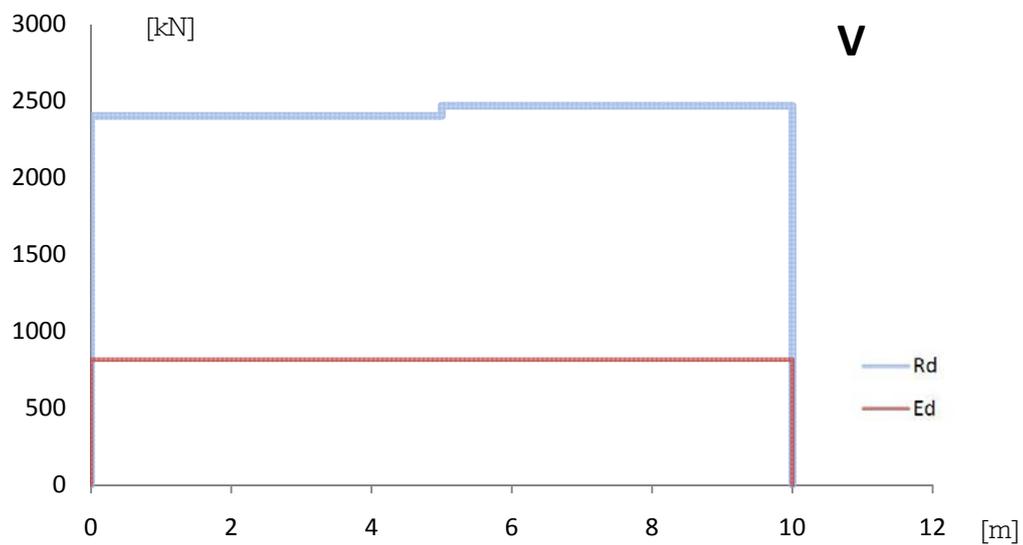


Abbildung 4-10: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Einzellast $P = 815,44 \text{ kN}$

Belastung	QS 1		QS 2	
	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]
Einzellast	4.077,2	815,4	8.154,4	815,4

4.3.4) Gleichlast

Über die gesamte Länge des Trägers wird an der Stabachse die Last $q = 108,73 \text{ kN/m}$ eingeprägt. Es ergeben sich ein quadratischer Momentenverlauf und ein linear veränderlicher Querkraftverlauf.

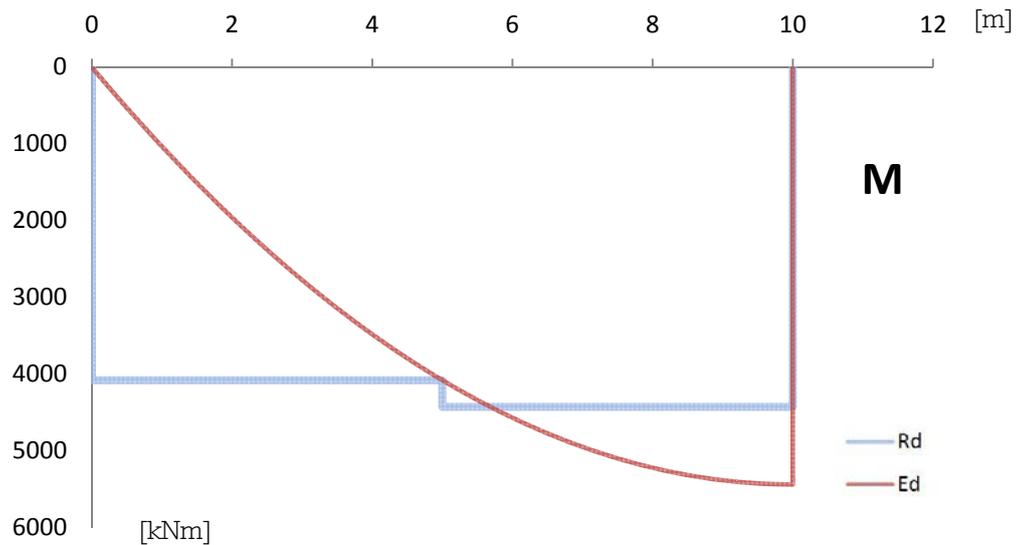


Abbildung 4-11: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Gleichlast $q = 108,73 \text{ kN/m}$

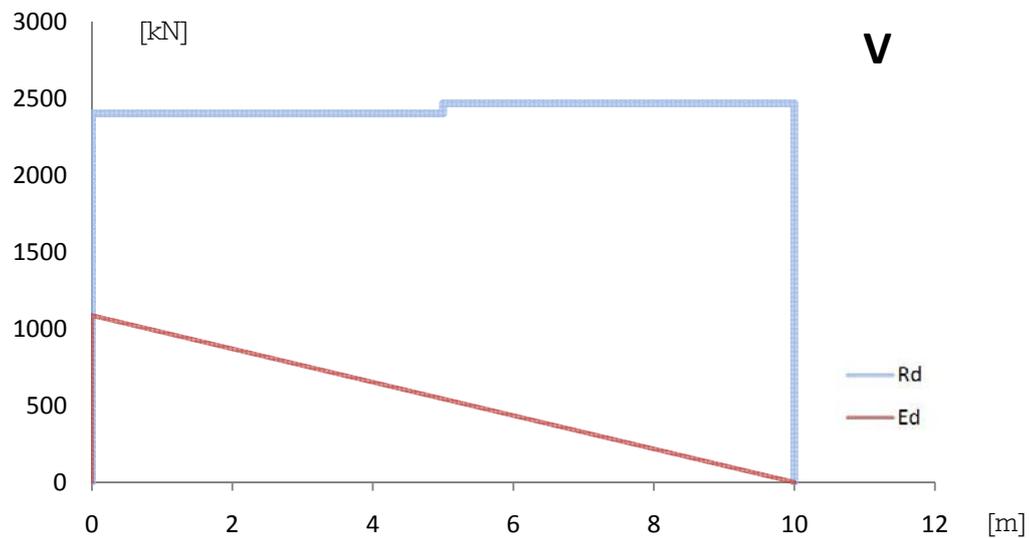


Abbildung 4-12: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Gleichlast $q = 108,73 \text{ kN/m}$

Belastung	QS 1		QS 2	
	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]	max. Med [kNm]	max. Ved [kN]
Gleichlast	4.077,2	1087,25	5.436,3	543,63

4.4) Spannungsermittlung

4.4.1) Allgemein

Unabhängig vom lokalen Problem der Spannungsschwankungen an einem Gurtdickensprung lassen sich die Spannungen in den Regelbereichen der Querschnitte 1 bis 5 nach der technischen Biegelehre ermitteln. Die Berechnung der Normalspannungen für eine allgemeine Belastung erfolgt mittels

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

Der Schubfluss im Querschnitt ergibt sich nach

$$T_{y,z} = -\frac{V_z * S_y(s)}{I_y}$$

Die zugehörigen Schubspannungen werden ermittelt über

$$\tau_{y,z} = \frac{T_{y,z}}{t(s)}$$

Diese Spannungen sind später mit den Spannungen aus der FE-Berechnung zu vergleichen. Die sich einstellende Normalspannungsverteilung in den Querschnitten 1 bis 5 ist im Anhang A 1 dargestellt. Daraus ergeben sich verschiedene Teilschnittgrößen welche in den Tabellen des Anhangs A 2 bis A 5 aufgelistet sind. Es werden die Ausführungen Gurtdickensprung (QS 2, QS 3) und E-Modul Sprung (QS 4, QS 5) untersucht. Dabei wird zwischen einer einseitigen, nur am Obergurt vorhandenen, und einer zweiseitigen, an Ober- und Untergurt vorhandenen, Gurtänderung unterschieden. Die entsprechenden Querschnitte sind daher entweder einfach oder doppelt symmetrisch.

Nach Ermittlung der Teilschnittgrößen vor und nach der Gurtänderung kann die Gurtkraftdifferenz dN als Differenz von N_{OG1} und N_{OG2} ermittelt werden. Diese Kraft ist abhängig von den Querschnittsabmessungen.

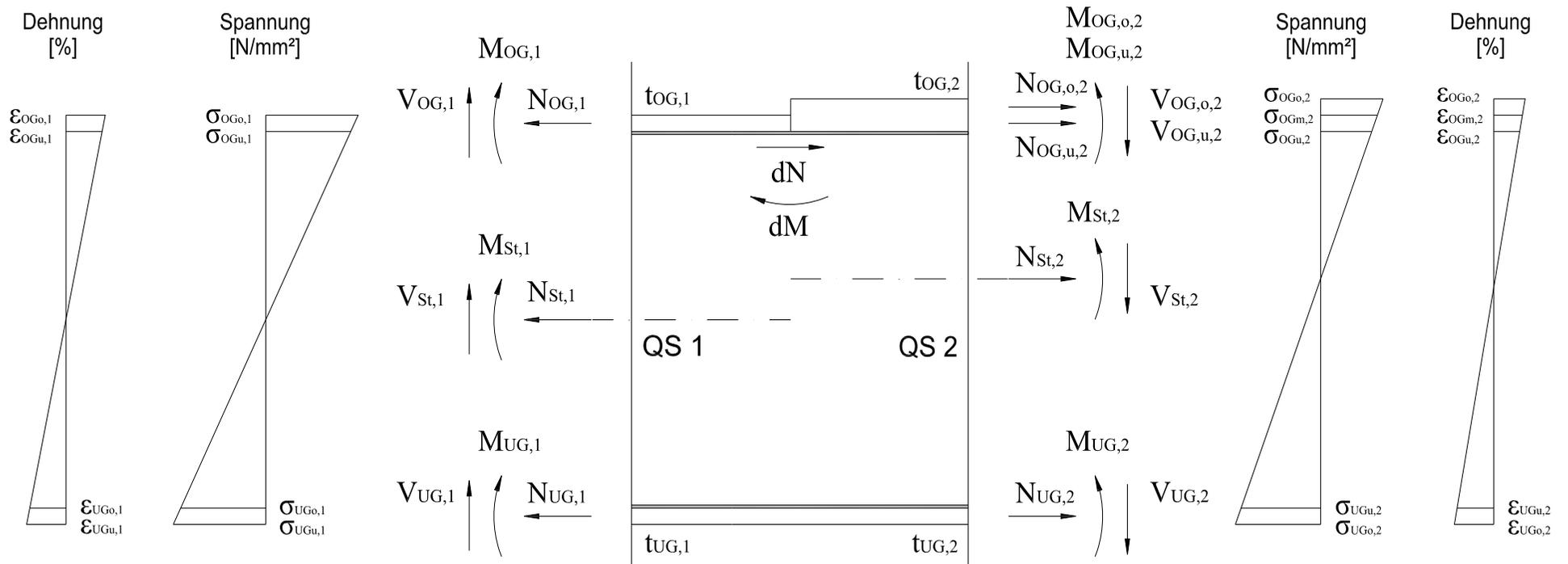


Abbildung 4-13: Teilschnittgrößen, Spannungszustände und Dehnungszustände nach der technischen Biegetheorie

4.4.2) Lokale Schubkraft

Die Teilschnittgrößen in den Gurten lassen sich über die Spannungen und die Gurtfläche berechnen. Die Normalspannung im Obergurt des QS 1 ergibt sich zum Beispiel aus

$$N_{OG,1} = \frac{1}{2} * (\sigma_{OG,o,1} + \sigma_{OG,u,1}) * A_{OG,1}$$

Die Gesamtresultierende $N_{OG,2}$ im Obergurt des QS 2 ergibt sich durch Addition der Normalkräfte der Gurtverdickung oder einer aufgeschweißten Lamellen und vom, bereits im QS1 vorhandenen, Obergurt.

$$N_{OG,2} = N_{OG,u,2} + N_{OG,o,2}$$

Aufgrund der unterschiedlichen Normalkräfte in den Gurten der Querschnitte 1 und 2 ist eine entsprechende Differenzkraft in den Steg einzuleiten. Die Berechnung dieser Kraft erfolgt mittels

$$dN = N_{OG,2} - N_{OG,1} = M_y * \left(\frac{S_{y,OG,2}}{I_{y,2}} - \frac{S_{y,OG,1}}{I_{y,1}} \right)$$

$N_{OG,1}$ [kN] Normalkraft im Obergurt in Querschnitt 1

$N_{OG,2}$ [kN] Normalkraft im Obergurt in Querschnitt 2

und $N_{OG,1} < N_{OG,2}$

$S_{y,OG,1}$ [mm³] Flächenträgheitsmoment im Obergurt in Querschnitt 1

$S_{y,OG,2}$ [mm³] Flächenträgheitsmoment im Obergurt in Querschnitt 2

wobei $S_{y,OG} = A_{OG} * e_{z,OG}$

dN [kN] Differenzkraft die als Schub in den Steg übertragen wird

Im Fall einer aufgeschweißten Lamelle ist deren Normalkraft zusätzlich durch Verbinden in den Obergurt einzuleiten. Die Differenzkraft dN ist für die Dimensionierung der Halskehlnähte am Übergang von Obergurt zum Steg zu berücksichtigen.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird der Verlauf der, durch die Differenzkraft dN verursachten Schubspannungen untersucht. Dabei gilt lokal, dass die Summe aller Schubspannungen in der Fuge zwischen Gurt und Steg der Normalkraftdifferenz der Gurte entsprechen muss.

$$dN = \iint \tau_{Lokal} \, dx dy$$

Diese Schubspannungen sind, zusätzlich zu den Schubspannungen aus der technischen Biegetheorie, vom Material aufzunehmen. Im betrachteten System gehen diese als Schubspannungen parallel zur Schweißnahtichtung τ_{\parallel} in die Berechnung der Halskehlnähte additiv ein. Über die hier untersuchte Verteilung der Schubspannungen ist momentan nur wenig bekannt. Derzeit werden diese Spannungen durch ingenieurmäßige Ansätze pauschal berücksichtigt. Es sei hierbei auf eine Studie [4] der TU-Graz verwiesen in der ähnliche Sachverhalte untersucht wurden.

Bei einer reinen Biegebelastung des Trägers kommt es zu keinen Schubspannungen nach der technischen Biegelehre $\tau_{t.Bl}$. Die lokalen Spannungen werden also direkt aus der FE-Berechnung ersichtlich. Aus diesem Grund wurde ein Großteil der folgenden Untersuchungen für den Lastfall mit konstantem Moment durchgeführt. Die Lastfälle „Einzellast“ und „Gleichlast“ dienen zur Bestimmung des Einflusses einer vorhandenen Querkraft. Durch diese verändert sich am Punkt des Gurtdickensprunges der Betrag der Schubspannungen um den Wert der Schubspannung nach der technischen Biegelehre.

$$\tau = \tau_{t.Bl} + \tau_{Lokal}$$

wobei

$$\tau_{t.Bl} = -\frac{V_z * S_y(s)}{I_y * t(s)}$$

τ_{Lokal} ... am FE-Modell bestimmt

Bedingt durch die unterschiedlichen Widerstände I_y der Querschnitte vor und nach dem Dickensprung ergibt sich ein Sprung im Verlauf der Schubspannungen nach der technischen Biegelehre.

4.4.3) Lokales Moment

Durch die exzentrische Wirkung der Gurtkräfte und deren betragsmäßige Differenz entsteht ein lokales Biegemoment dM im Gurt. Dieses lokale Moment, im Folgenden auch als Versatzmoment bezeichnet, verursacht Biegespannungen in den Gurtflanschen. Es kommt zu einer lokalen Verdrehung der Gurtbleche. In der Fuge zwischen Obergurt und Steg treten dadurch nicht nur Schubspannungen τ , sondern auch Normalspannungen σ_L auf. Über die Halskehlnähte werden diese auf den Steg des Querschnitts übertragen. Dieser wirkt ähnlich einer Linienlagerung.

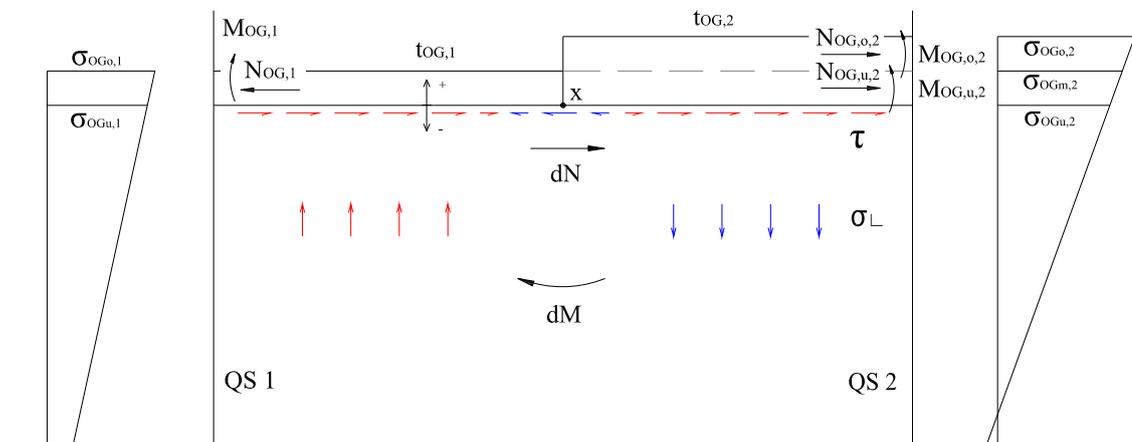


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung der am Dickensprung wirkenden Kräfte

Aus der Gleichgewichtsbedingung

$$\Sigma M_x = 0$$

lässt sich ausformuliert anschreiben:

$$dM = \frac{1}{2} * (N_{OG,1} * t_{OG,1}) + M_{OG,1} - \frac{1}{2} * (N_{OG,2} * t_{OG,2}) - M_{OG,2}$$

wobei

$$N_{OG,2} = N_{OG,u,2} + N_{OG,o,2}$$

$$M_{OG,2} = M_{OG,u,2} + M_{OG,o,2}$$

Die zusätzliche Belastung der Schweißnähte infolge der Spannungen normal zur Nahtlängsrichtung σ_L ist für die Schweißnahtbemessung zu berücksichtigen. Der Verlauf dieser Spannungen wird im Zuge dieser Arbeit ebenfalls betrachtet. Die Auswirkungen des Kräftepaars des lokalen Momentes auf das Beulverhalten des Steges und der Flansche wird nicht näher betrachtet. Es ist jedoch aufgrund des Querdrucks mit einem lokalen Abfall des Beulwiderstandes im Steg zu rechnen. Auf die Schweißnähte zwischen einer eventuell vorhandenen Gurtlamelle und dem Obergurt wirkt ebenfalls das lokale Moment.

Auswirkungen des lokalen Moments dM

- Biegespannungen in den Gurtflanschen
- Zug- und Druckkräfte auf den Steg
- Umkehrung der Schubspannungen zwischen Gurt und Steg

Die Spannungen normal zum Schnitt σ_L stehen in Gleichgewicht mit dem lokalen Moment dM . Sie werden durch den Gurtkraftunterschied und den geometrischen Versatz hervorgerufen und bewirken örtliche Abweichungen von den Spannungen zufolge der technischen Biegelehre.

$$\sigma_L = \sigma_{L, \text{techn. Biegelehre}} + \sigma_{L, \text{Lokal}}$$

wobei

$$\sigma_{L, \text{techn. Biegelehre}} = 0$$

$\sigma_{L, \text{Lokal}}$... am FE-Modell bestimmt

4.4.4) Ideeller Hebelarm

Um eine Verbindung zwischen den Schubspannungen dN und dem lokalen Moment dM herzustellen, wurde die Größe eines ideellen Hebelarmes e' [mm] eingeführt. Sie ergibt sich aus

$$e' = \frac{dM}{dN}$$

Die Größe des ideellen Hebelarmes gibt Aufschluss darüber, wie stark eine Ausführung von einem lokalen Moment geprägt ist, sagt jedoch nichts über die Verteilung der entstehenden Spannungen normal zum Schnitt σ_{\perp} aus.

So steigt zu Beispiel im Vergleich zu einem einseitigen Dickensprung der ideale Hebelarm e' bei einem beidseitigen Dickensprung stark an. Unabhängig davon ändert sich die Verteilung der Spannungen, je nachdem, ob ein plötzlicher oder ein verlaufender Übergang zwischen den Gurtdicken gewählt wird.

4.4.5) Weitere lokale Effekte

Alle lokalen Effekte treten zusätzlich zum Verhalten nach der technischen Biegetheorie auf. Somit lässt sich auch für die Normalspannungen im Querschnitt der folgende Zusammenhang anschreiben

$$\sigma_x = \sigma_{x, \text{techn. Biegelehre}} + \sigma_{x, \text{Lokal}}$$

wobei

$$\sigma_{x, \text{techn. Biegelehre}} = \frac{M_y}{I_y} z$$

$\sigma_{x, \text{Lokal}}$... *am FE-Modell bestimmt*

Das lokale Moment dM überlagert den Spannungs- und Dehnungszustand nach der technischen Biegelehre im Gurt. Im Zuge dieser Arbeit werden die dadurch beschriebenen Biegespannungen in den Gurtblechen kurz betrachtet. Diese können beträchtliche Ausmaße annehmen, so dass die Fließgrenze örtlich überschritten werden kann, obwohl der Gurt nach der technischen Biegetheorie nicht voll ausgenützt ist.

Durch eine Dickenänderung des Gurtes wird der Dehnungszustand des Querschnitts beeinflusst. Es verändert sich die Stauchung des Querschnitts im Druckbereich in Trägerlängs- und Querrichtung, sowie die Dehnung im Zugbereich. Durch Obergurtdickensprünge oder Aufschweißen einer Gurtlamelle wird die Querverformung eines dünneren Querschnitts behindert. Es kann dadurch, insbesondere in den Ecken einer beginnenden Lamelle, zu lokalen Spannungsspitzen kommen.

4.5) Schweißnähte

4.5.1) Allgemein

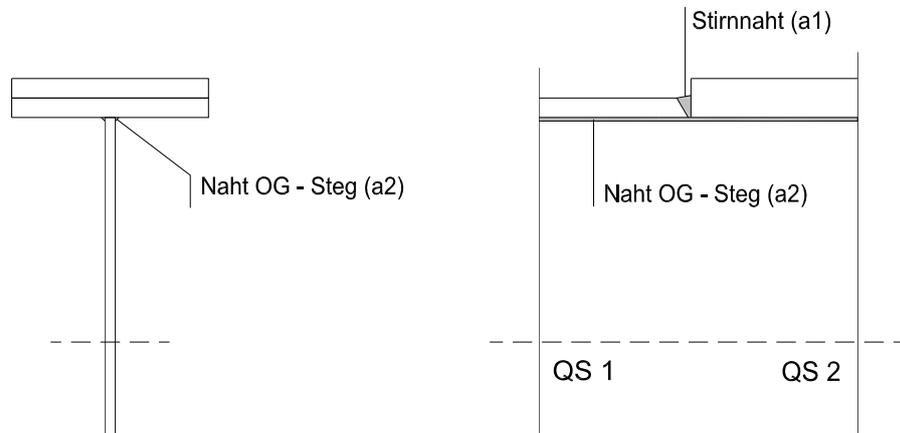


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung der Schweißnähte bei einem Gurtdickensprung

Nachfolgend werden die Schweißnähte für die Ausführung eines Gurtdickensprunges berechnet. Der Anschluss der Gurtbleche wird voll durchgeschweißt. Es ist kein eigener Nachweis für die Stirnnaht a1 erforderlich.

Die Kehlnähte a2 am Anschluss des Obergurtes zum Steg werden nachfolgend dimensioniert und decken alle in Kapitel 4) beschriebenen Lastfälle ab. Maßgeblich für diese sind die Schubspannungen am Auflager A, bei Belastung mit der in Kapitel 4.3.4) beschriebenen Gleichlast. Die Berechnung erfolgt mit dem richtungsbezogenen Verfahren gemäß EN 1993-1-8, Kapitel 4. Im FE-Modell wurden alle Schweißnähte als vollkommen starre Verbindungen idealisiert.

Wirksame Kehlnahtfläche:

$$A_w = \sum a * l_{eff}$$

Die Tragfähigkeit der Schweißnaht wird nachgewiesen mit der Bedingung

$$(\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2))^{0,5} \leq \frac{f_u}{(\beta_w \gamma_{m2})} \text{ und } \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{m2}}$$

σ_{\perp}	[N/mm ²]	Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse
τ_{\perp}^2	[N/mm ²]	Schubspannung senkrecht zur Schweißnahtachse
τ_{\parallel}^2	[N/mm ²]	Schubspannung parallel zur Schweißnahtachse
β_w	[-]	Korrelationsbeiwert
f_u	[N/mm ²]	Zugfestigkeit

Es ergibt sich zusätzlich

$$\frac{f_u}{(\beta_w \gamma_{m2})} = 360,0 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{m2}} = 259,2 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

4.5.2) Auswirkungen lokaler Effekte auf die Schweißnähte

Über die Halskehlnähte werden die in Kapitel 4.4) beschriebenen Effekte der lokalen Schubkraft und des lokalen Momentes auf den Steg des Querschnitts übertragen. Es kommt zu einer zusätzlichen Belastung der Kehlnähte a2. Durch das Moment werden die Spannungen normal zur Nahtlängsrichtung erhöht, durch die Schubkraft die Spannungen in Nahtichtung.

4.5.2.1) Berücksichtigung lokaler Effekte nach Norm

In der bereits überholten ÖNORM B 4602 [2] wurde eine pauschale Nahtdicke von $a = t_{st}/2$ der Halskehlnähte in einem Bereich um den Beginn einer Lamelle gefordert.

In der DIN 18800-1 [3] sind das Verbinden einer aufgeschweißten Lamelle und ein Blechdickensprung graphisch dargestellt. Für Dickensprünge von mehr als 10 mm wird eine Abschrägung von mindestens 1:1 gefordert. Gurtplatten, die mit Schweißverbindungen angeschlossen oder gestoßen werden, sollen nicht dicker als 50 mm sein. Darüber wird eine werkstoffliche Prüfung gefordert.

4.5.3) Nachweise

Stirrnaht (a1)

Die Gurtplatten werden mittels Schweißverbindung verbunden. Der Querschnitt wird als durchgeschweißt betrachtet. Der Nachweis einer Lastüberleitung ist somit entsprechend den Querschnittsnachweisen als erfüllt anzusehen. Die Tabelle 4-8 stellt die Teilschnittgrößen der Querschnitte 1 bis 3 aus Anhang A 2 und Anhang A 3 dar. Die maximal auftretende Differenzkraft beträgt -477,6 kN.

Tabelle 4-8: Teilschnittgrößen N_{OG} und Gurtkraftdifferenzen dN

QS	Ausführung	Teilschnittgröße N_{OG} Obergurtkraft [kN]	Gurtkraftdifferenz dN [kN]
1	Grundquerschnitt	-3.609,6	0,0
2	1 Gurt dickensprung	-4.087,2	-477,6
3	2 Gurt dickensprünge	-3.763,9	-154,3
4	1 E-Modul Sprung	-4.142,5	-532,9
5	2 E-Modul Sprünge	-3.901,4	-291,8

Kehlnähte (a2)

Nachfolgend ist der Schubfluss in den Kehlnähten zwischen Obergurt und Steg aufgelistet.

Tabelle 4-9: von Einwirkungen verursachte Schubflüsse

QS	Ausführung	Schubfluss [kN/cm]		
		Moment	Einzellast	Gleichlast
1	Grundquerschnitt	0,0	7,22	4,81 (9,63)
2	1 Gurtdickensprung	0,0	8,17	5,45
3	2 Gurtdickensprünge	0,0	7,53	5,02

Da die Querkraft und somit auch der Schubfluss im Falle einer Gleichlast über die Trägerlänge linear veränderlich sind, ist der betrachtete Ort für den Nachweis entscheidend. Angeschrieben in Tabelle 4-9 wurde der Schubfluss am Gurtdickensprung in Trägermitte. Eingeklammert ist - wenn davon verschieden - der maximale Schubfluss in den Kehlnähten zwischen Obergurt und Steg, wenn dieses Maximum an einem anderen Punkt des Trägers auftritt. Der unter den betrachteten Fällen größte Schubfluss ergibt sich bei einwirkender Linienlast am Querschnitt 1 an der Stelle des Auflagers A mit 9,63 kN/cm. Es wird für den Nachweis eine Schweißnaht mit $a = 3,0$ mm angenommen.

$$(3\tau_{\parallel}^2)^{0,5} = \left(3 * \left(\frac{9,63 * 100}{2 * a_2}\right)^2\right)^{0,5} = (3 * (160,4)^2)^{0,5} = 227,9 \left[\frac{N}{mm^2}\right] \leq 360,0 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Der Nachweis ist somit erfüllt.

5) Modelle

5.1) Allgemein

Gurtdickensprünge werden verwendet, um die Biegetragfähigkeit eines Trägers an den Momentenverlauf anzupassen. Die Blechdicke eines oder beider Gurtbleche ändert sich dabei, je nach Ausführung, plötzlich oder stetig. Der Gurt kann sich nach „innen“ in Richtung des Steges, auf die Außenseite des Querschnitts, oder zentrisch in beide Richtungen aufweiten. In dieser Arbeit werden grundsätzlich Dickensprünge nach außen hin untersucht. Im Bereich des Stoßes der beiden Gurtbleche werden oft Freischnitte angeordnet, die jedoch bei den Modelluntersuchungen nicht berücksichtigt werden.

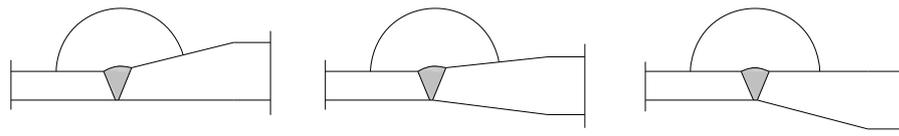


Abbildung 5-1: Ausführungsrichtungen des Dickensprunges: innen, zentrisch, außen

Mittels eines Finite Elemente Programms wird versucht, ein reales Systemverhalten anzunähern. Die entsprechenden, sich von der realen Ausführung unterscheidenden Abbilder im FE-Programm werden Modelle genannt. Um die Grenzen des Systemverhaltens zu ermitteln, kann ein reales System durch mehrere Modelle mit unterschiedlichem Verhalten abgebildet werden. Auf diese Abschätzung des Verhaltens durch Unter- und Obergrenzen wird hier verzichtet. Jeder Ausführung ist daher nur ein eigenes Modell zugeordnet, das als Abbild der Realität in das FE-Programm eingegeben wird. Es werden im Folgenden vier Ausführungsvarianten eines Gurtdickensprunges untersucht.

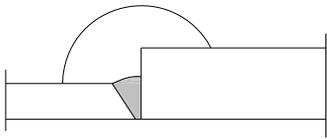
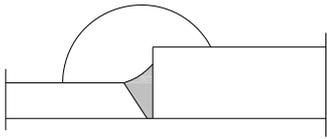
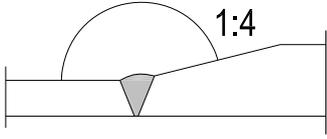
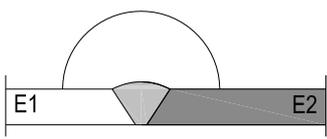
Detail in der Realität	Modell im FE-Programm
	- Abrupt Dick
	- Schweißnaht
	- Verlaufend
	- E-Modul Sprung

Abbildung 5-2: Ausführungsart und entsprechendes FE-Modell

Der Querschnitt wurde bei allen Modellen als ein durchgehender Körper modelliert. Beim Modell „Abrupt Dick“ kommt es zu einem sprunghaften Anstieg in der Obergurtdicke, beim Modell „Schweißnaht“ wird zusätzlich die Stumpfnah zum dickeren Obergurt hin mit berücksichtigt und beim Modell „Verlaufend“ werden die Obergurtquerschnitte fließend mit dem Steigungsverhältnis 1:4 aneinander angeschlossen. Zusätzlich wird ein Modell untersucht, das einen Sprung im E-Modul des Gurtes abbildet. Dieses zeichnet sich durch ein geringes lokales Moment dM aus und dient als Vergleichsmodell. Das Modell ähnelt der Ausführung mit einem zentrischen Gurtdickenübergang.

Bei den Modellen mit sprunghaftem Anstieg der Dicke, wie „Abrupt Dick“ und „Schweißnaht“, kommt es zu extremen Spannungsspitzen in der Ecke an der Kontaktfläche der beiden Gurte. Durch das Abschrägen des Überganges, wie beim Modell „Verlaufend“, können diese gedämpft werden. Die Auswirkungen einer Abschrägung sinken mit steigendem Abschrägungsverhältnis ab.

Die Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“ werden auch für die Ausführung als doppelt symmetrische Querschnitte untersucht. Dabei verändert sich neben dem Obergurt identisch auch der Untergurt. Je nach Modell und Ausführung wechselt der Grundquerschnitt 1 vor dem Dickensprung danach auf einen der Querschnitte 2 bis 5. Exemplarisch ist dies nachfolgend für das Modell „Abrupt Dick“ dargestellt.

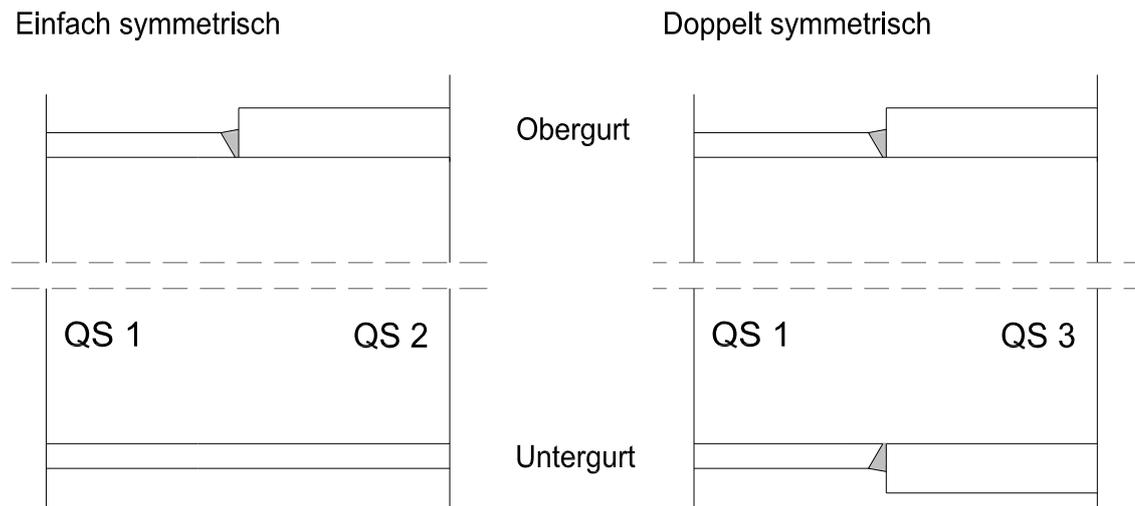


Abbildung 5-3: Einfach und doppelt symmetrische Ausführung

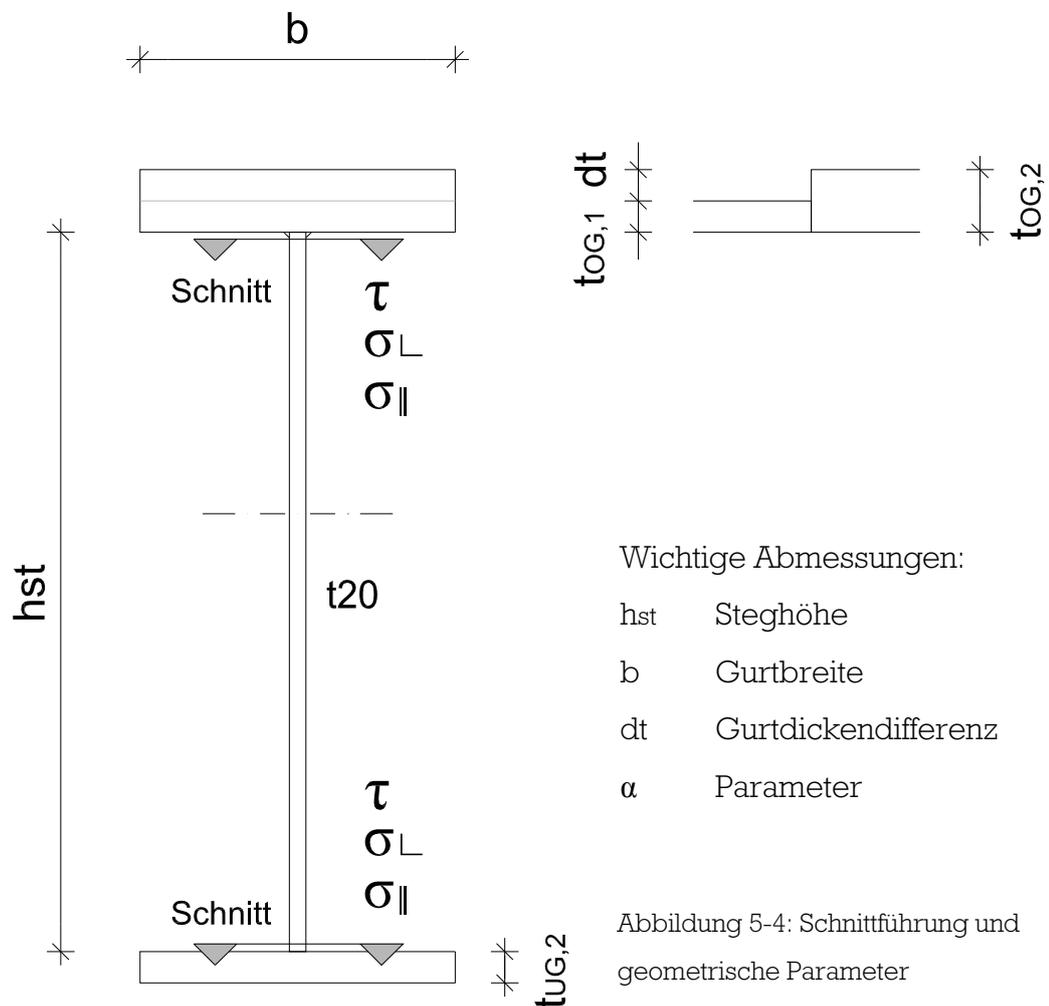
In diesem Kapitel werden 6 Modellausführungen genauer untersucht. Belastet werden alle Modelle durch die in Kapitel 4.3.2) dargestellte konstante Momentenbelastung $M = 4077,2 \text{ kNm}$. Abhängig vom Modell erfährt der Träger einen Übergang im Querschnitt. Die verwendeten Querschnitte vor und nach dem Dickensprung wurden in Kapitel 4.2.2) definiert.

Tabelle 5-1: Modelle für Grunduntersuchungen

Modell	Ausgangs-querschnitt	End-querschnitt	Belastung
Abrupt Dick, einfach symmetrisch	QS 1	QS 2	Moment
Abrupt Dick, doppelt symmetrisch	QS 1	QS 3	Moment
E-Modul, einfach symmetrisch	QS 1	QS 4	Moment
E-Modul, doppelt symmetrisch	QS 1	QS 5	Moment
Schweißnaht, einfach symmetrisch	QS 1	QS 2	Moment
Verlaufend, einfach symmetrisch	QS 1	QS 2	Moment

Schnittführung

Die Schnittführung erfolgt direkt unterhalb des Ober- beziehungsweise Untergurtes. Untersucht werden Normalspannungen und Schubspannungen in der Schnittfuge. Um den Normalspannungsverlauf im Querschnitt zu erfassen, werden zum Teil auch Spannungen parallel zur Schnittlinie dargestellt. Andere Schnittverläufe, wie zum Beispiel zum Abbilden des Normalspannungsverlaufes im Obergurt, werden gesondert dargestellt.



Die Gurtbreite b wird an Ober- und Untergurt immer gleich angenommen. Als Differenz zwischen der Gurtstärke vor und nach dem Sprung wird die Gurtstärkungsdifferenz dt definiert. In Abhängigkeit von der Gurtstärke des Querschnitts 1 wird der Parameter α festgelegt.

$$dt = t_{OG,2} - t_{OG,1}$$

$$\alpha = t_{OG,2} / t_{OG,1}$$

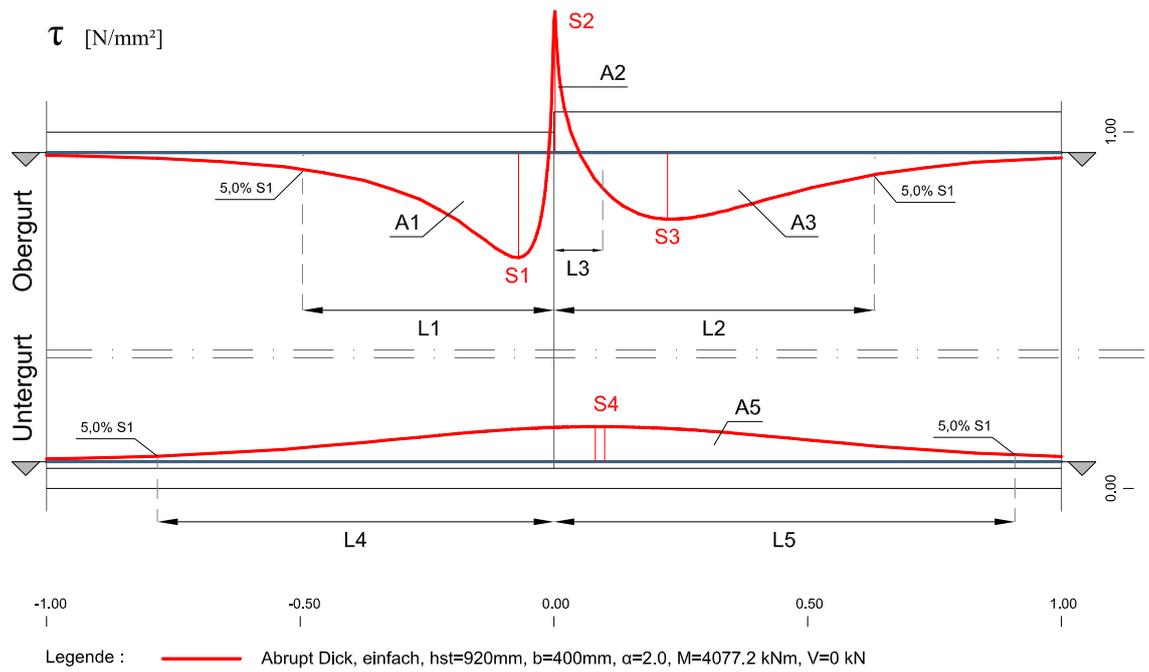


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“

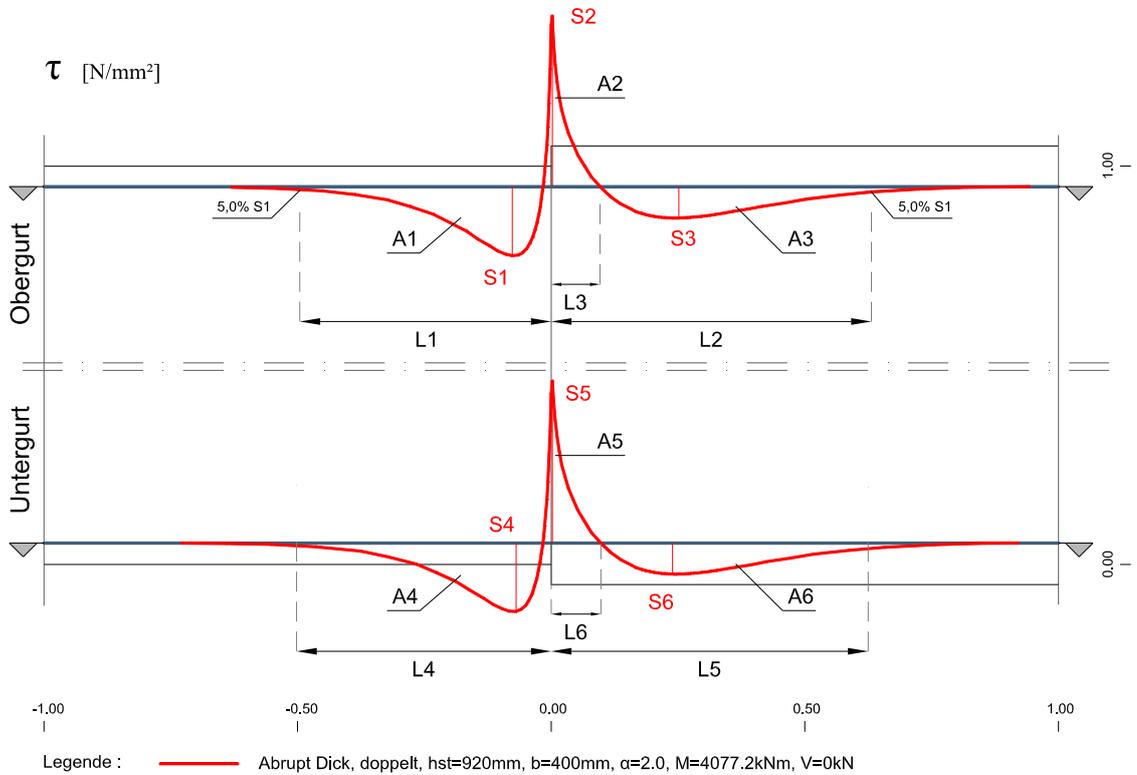


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“

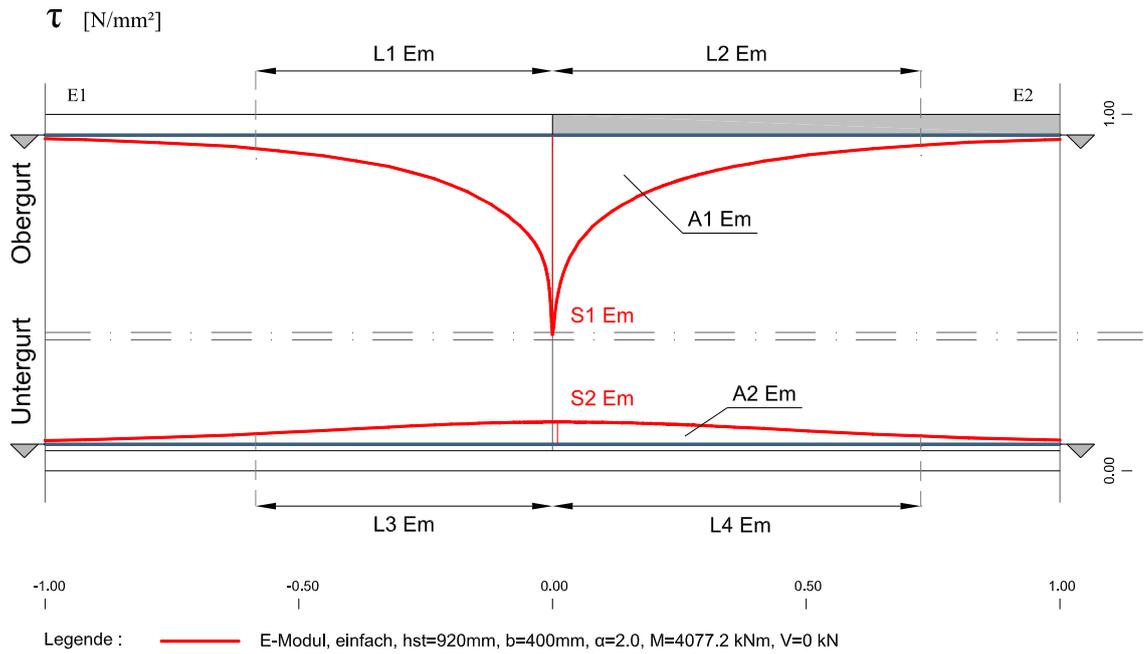


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“

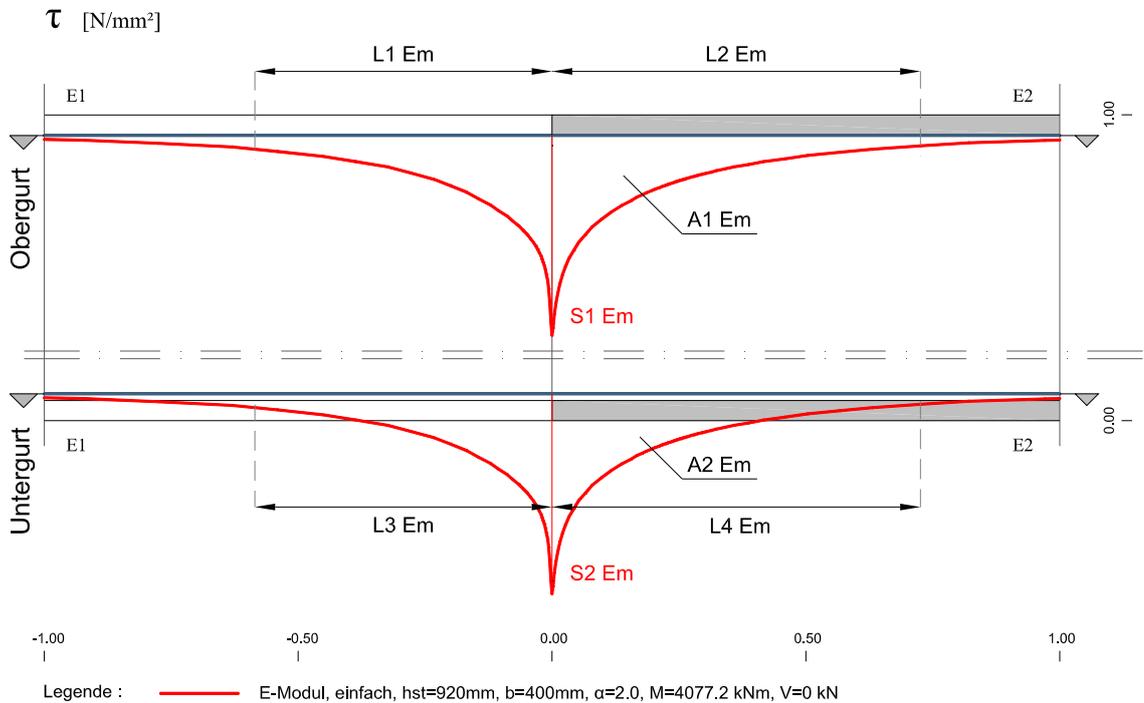


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“

In der betrachteten Schnittlinie zwischen Gurt und Steg treten neben den untersuchten Schubspannungen auch Spannungen normal und parallel zum Schnitt auf. Bildet man das Moment der Spannungen normal zum Schnitt um den Punkt der Schnittlinie an der Stelle des Dickensprunges, entspricht dies dem zugehörigen lokalen Moment dM . Das Integral über diese Spannungen ergibt Null. Für die Spannungen oder Längen, die die Verläufe normal zum Schnitt beschreiben, wird der Buchstabe „n“ angefügt. Die Spannungen parallel zum Schnitt beschreiben den Verlauf der Normalspannungen im Querschnitt über den Dickensprung.

Die Lasteinleitungslängen $L1$ und $L2$ am Obergurt und $L4$ und $L5$ am Untergurt aus der Abbildung 5-6 sind als Strecke zwischen dem Gurtdickensprung und der Stelle, an der die vorhandene lokale Schubspannung auf fünf Prozent des Maximalwertes $S1$ bzw. $S4$ absinkt, definiert. Die Längen $L3$ und $L8$ bezeichnen den Bereich im Querschnitt 2 in dem eine Schubspannung mit umgekehrtem Vorzeichen auftritt.

Um die Genauigkeit der berechneten Modelle zu überprüfen, wurde für alle Modelle bis zu einer Höhe von etwa 2500 mm nachgewiesen, dass sich um den Dickensprung ein Spannungszustand nach der technischen Biegelehre einstellen kann. Mit steigender Trägerhöhe vergrößert sich nämlich der Einflussbereich des Gurtdickensprunges. Es wurde sichergestellt, dass die gewonnenen Schubspannungen um den Dickensprung nicht von Einflüssen aus den Auflagerbereichen gestört werden.

An den unterschiedlichen Modellen herrscht am Gurtdickensprung das Moment $M = 4077,2 \text{ kNm}$. Aufgrund der unterschiedlichen Querschnittswiderstände der Querschnitte 2 bis 5 verursacht das Moment für jedes Modell eine andere Gurtkraftdifferenz dN . Für einen direkten Vergleich der Schubspannungskurven sollte diese in beiden Modellen ident zu sein. Es müssten somit alle Spannungsverläufe zugunsten einer einheitlichen Gurtkraftdifferenz korrigiert werden. Darauf wird jedoch verzichtet, da die Differenzen für einen qualitativen Vergleich Spannungskurven ausreichend gering sind.

Die nachfolgenden Untersuchungen dienen als Grundlage für die Parameterstudien in Kapitel 6). Dort werden die hier verwendeten geometrischen Abmessungen und Belastungen variiert.

5.2) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch

5.2.1) Modellverhalten

Die Blechdicke des Obergurtes verändert sich bei diesem Modell abrupt von 40 mm (QS1) auf 80 mm (QS2). Die gesamte Höhe des Querschnitts 1 beträgt 1000 mm.

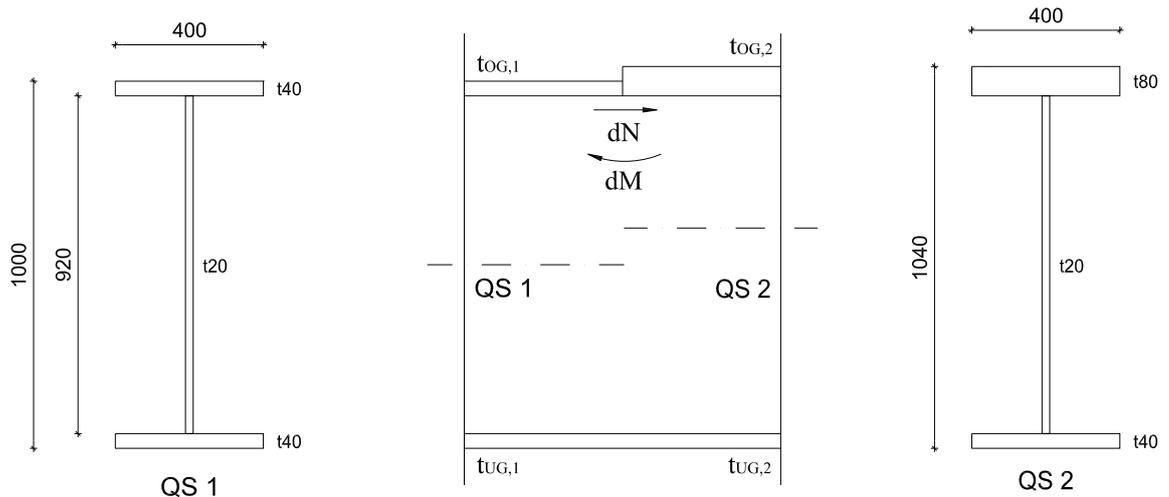


Abbildung 5-9: Darstellung der Querschnitte beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“

Durch die unterschiedlichen Dicken der Obergurtbleche von Querschnitt 1 und 2 kommt es sowohl zu einer geometrischen Exzentrizität, als auch zu einer betragsmäßigen Differenz der Gurtnormalkräfte. Die Differenzkraft dN ist als Schubspannung (τ) in den Steg einzuleiten. Deren Verlauf ist in Abbildung 5-16 ersichtlich. Aufgrund des entstehenden lokalen Momentes dM kommt es zu entgegenwirkenden Reaktionskräften, die das Gleichgewicht herstellen. In der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg entsteht ein rückwirkendes Kräftepaar. Dies ist in Abbildung 5-11 (Spannungen in lokale z-Richtung) und Abbildung 5-15 (σ_{\perp}) ersichtlich. Das auftretende lokale Moment hat des Weiteren auch Auswirkungen auf den Verlauf der Schubspannungen. In einem kurzen Bereich in Trägerlängsrichtung, unmittelbar an der Querschnittsänderung durch den Gurtdickensprung, kommt es zu einem Vorzeichenwechsel und damit zu einer Umkehr der Schubspannungen. Dies wird in Abbildung 5-12 und 5-16 dargestellt. Zusätzlich treten Biegespannungen in den Gurtblechen auf. Diese sind in Abbildung 5-14 ersichtlich.

Tabelle 5-2 zeigt eine Zusammenfassung der Differenzschnittgrößen in Abhängigkeit von der Ausführung.

Tabelle 5-2: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang

Ausführung des QS 2	dM [kNm]	dN [kN]	e' [mm]
OG Dickensprung	96,1	-477,6	-201,1
OG und UG Dickensprung	81,4	-154,3	-527,5
OG E-Modul Sprung	11,2	-532,9	-21,0
OG und UG E-Modul Sprung	5,9	-291,8	-20,3
zentrischer OG Dickensprung	16,4	-567,6	-29,0

Die Bezeichnungen Obergurt- beziehungsweise Untergurt Dickensprung beinhalten die Schnittgrößen für die Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“. Für den ideellen Hebelarm gilt $e' = dM/dN$. Er gibt Aufschluss darüber, wie stark eine Ausführung von einem lokalen Moment beeinflusst ist. So steigt der Anteil des Momentes dM gegenüber der Normalkraftdifferenz dN beim Übergang auf eine Ausführung mit Ober- und Untergurtdickensprung an. Die Verteilung der zugehörigen Spannung normal zum Schnitt σ_{\perp} ist jedoch von der Art des Dickenüberganges, „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ oder „Verlaufend“, abhängig.

Bei den Modellen „Abrupt Dick“ und „Schweißnaht“ mit sprunghaftem Anstieg der Dicke kommt es, wie bereits erwähnt, zu extremen Spannungsspitzen. Diese sind aufgrund ihrer sehr ausgeprägten lokalen Maxima durch das FE-Programm schwer zu erfassen. Bereits eine geringfügige Veränderung der Netzdichte bewirkt beträchtliche Unterschiede in der Schubspannung S2. Es wurde versucht, dem durch eine maximal mögliche Netzdichte zu begegnen. Es lässt sich jedoch in manchen Verläufen deutlich erkennen, dass das eigentliche Maximum von S2 nicht berechnet werden konnte.

Zumal die Ausführung „Abrupt Dick“ einen idealen Sonderfall darstellt, wird der reale Verlauf eher dem Modell „Schweißnaht“ entsprechen. Dieses unterscheidet sich hauptsächlich durch eine deutlich gedämpfte Spannungsspitze S2.

5.2.2) Spannungen

Die Abbildung 5-10 zeigt die Spannungen in die lokale x-Richtung. Der schräge Verlauf der Normalspannungen deutet auf die Verschiebung der Schwerlinie des Querschnitts 1 zum Querschnitt 2 hin. Entsprechend kommt es zu einer Spannungsverschiebung über die Querschnittshöhe. Im QS 1 herrschen noch Normalspannungen bis $235,0 \text{ N/mm}^2$ an der Obergurtoberseite, die stetig zum QS 2 hin auf $158,8 \text{ N/mm}^2$ absinken.

Die Abbildung 5-11 zeigt die Spannungen in die lokale z-Richtung. Blau entspricht Spannungsfreiheit, dunkelblau zeigt positive Spannungen (Zug) und rot negative Spannungen (Druck). Vor dem Gurtdickensprung wirken Druckspannungen, danach Zugspannungen auf den Steg. Die Darstellung zeigt die Auswirkungen des lokalen Momentes auf den Steg. Nicht ersichtlich sind die ebenfalls verursachten Biegespannungen in den Gurtblechen. Die Druck- und Zugbereiche reichen bis über die halbe Höhe des Querschnitts, der Zugbereich im QS 2 erstreckt sich etwas weiter. Die dickere Gurtplatte trägt dort zur besseren Verteilung der Zugspannungen bei.

Abbildung 5-12 gibt die Schubspannungsverteilung im Stegblech wieder. Dunkelgrüne Bereiche sind spannungslos, blau zeigt positive Schubspannungen und rot negative Schubspannungen. Beidseitig des Obergurtdickensprunges treten negative Schubspannungen auf, die durch einen kurzen positiven Bereich unterbrochen sind. Dabei kehrt sich die Richtung der Schubspannungen um. Durch die positiven Spannungen werden Kräfte in den vergrößerten Obergurt eingetragen. Durch die negativen Spannungen entsteht ein Absinken der Normalkraft im Obergurt.

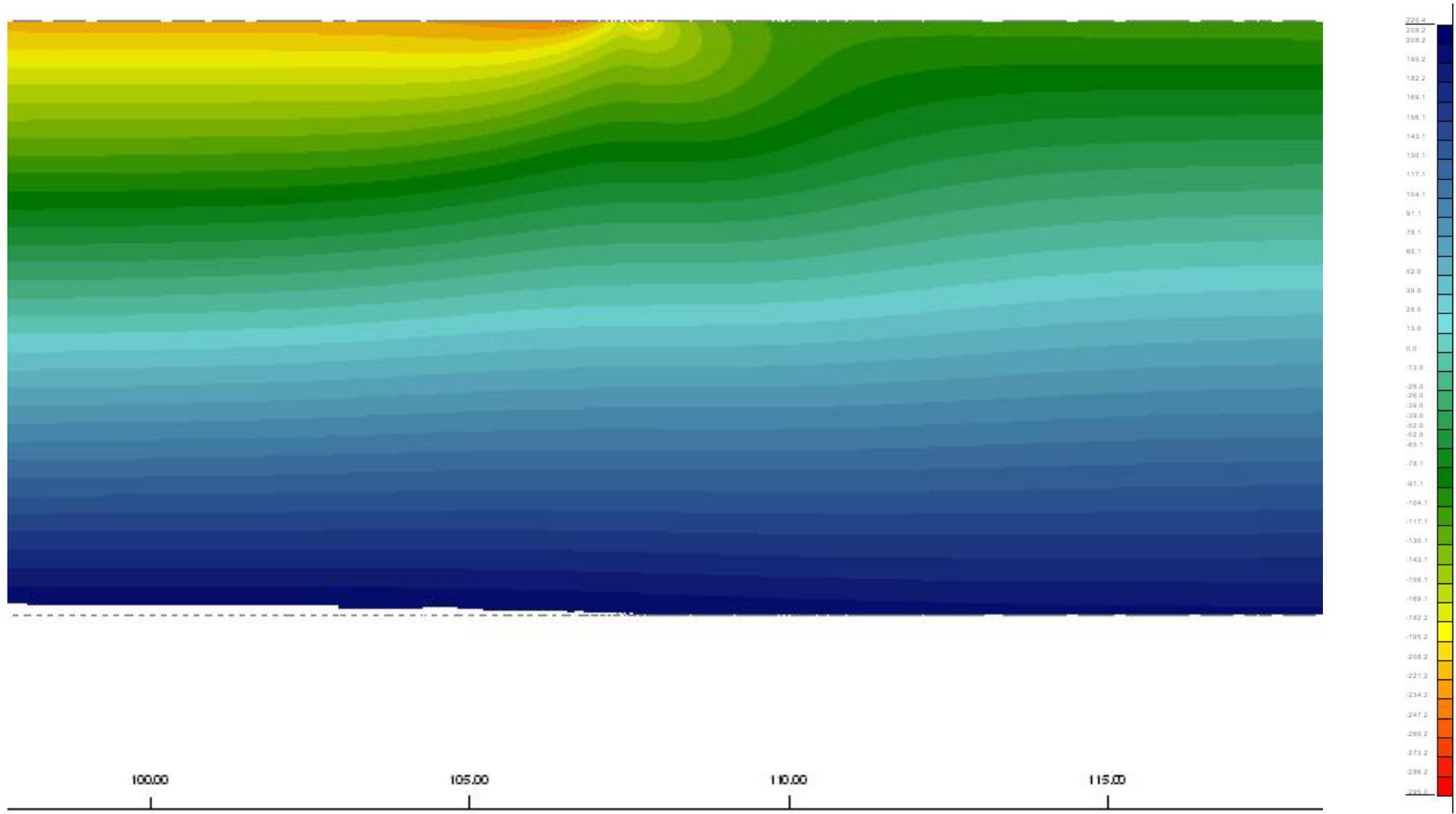


Abbildung 5-10: Spannungen in lokale x-Richtung

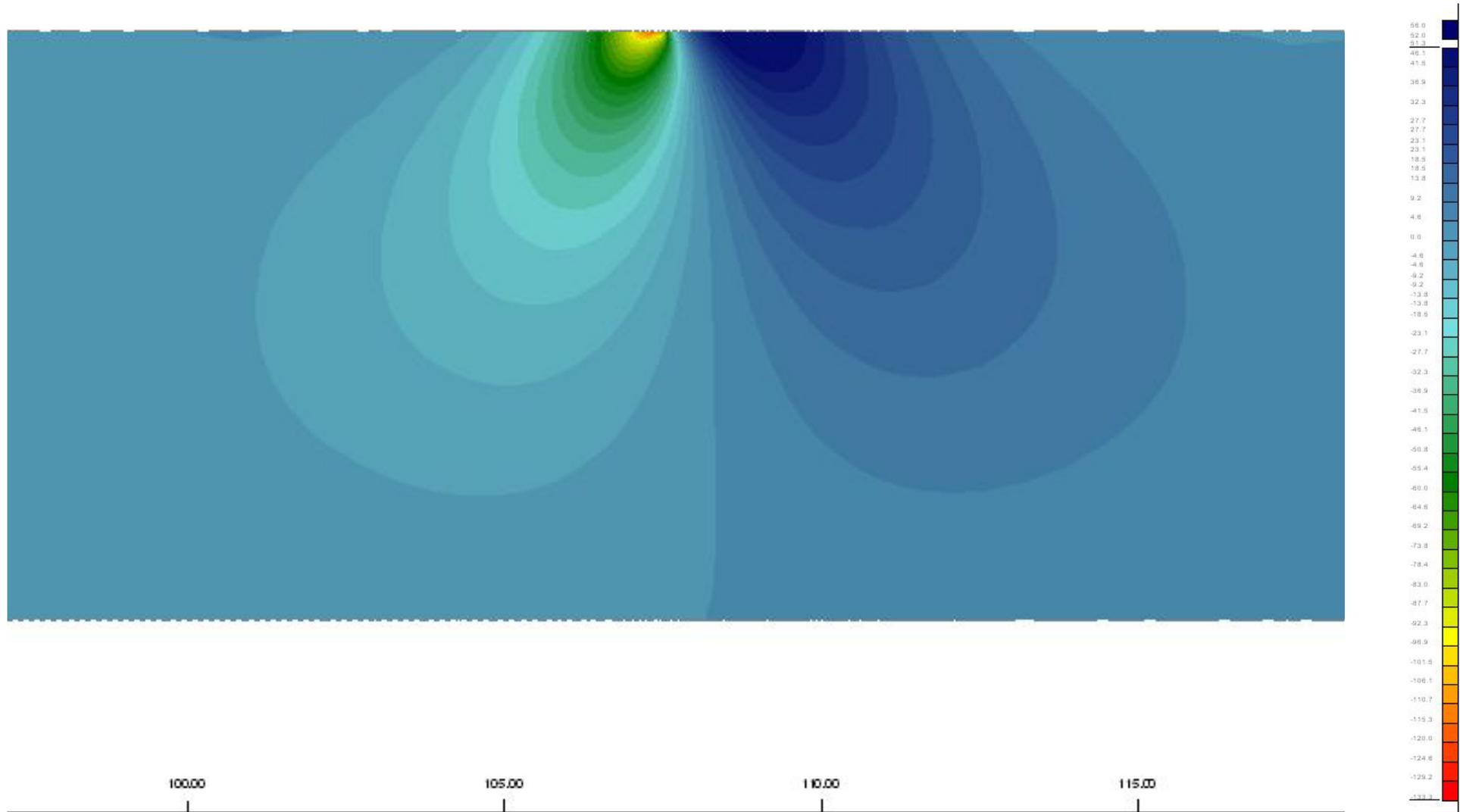


Abbildung 5-11: Spannungen in lokale z-Richtung

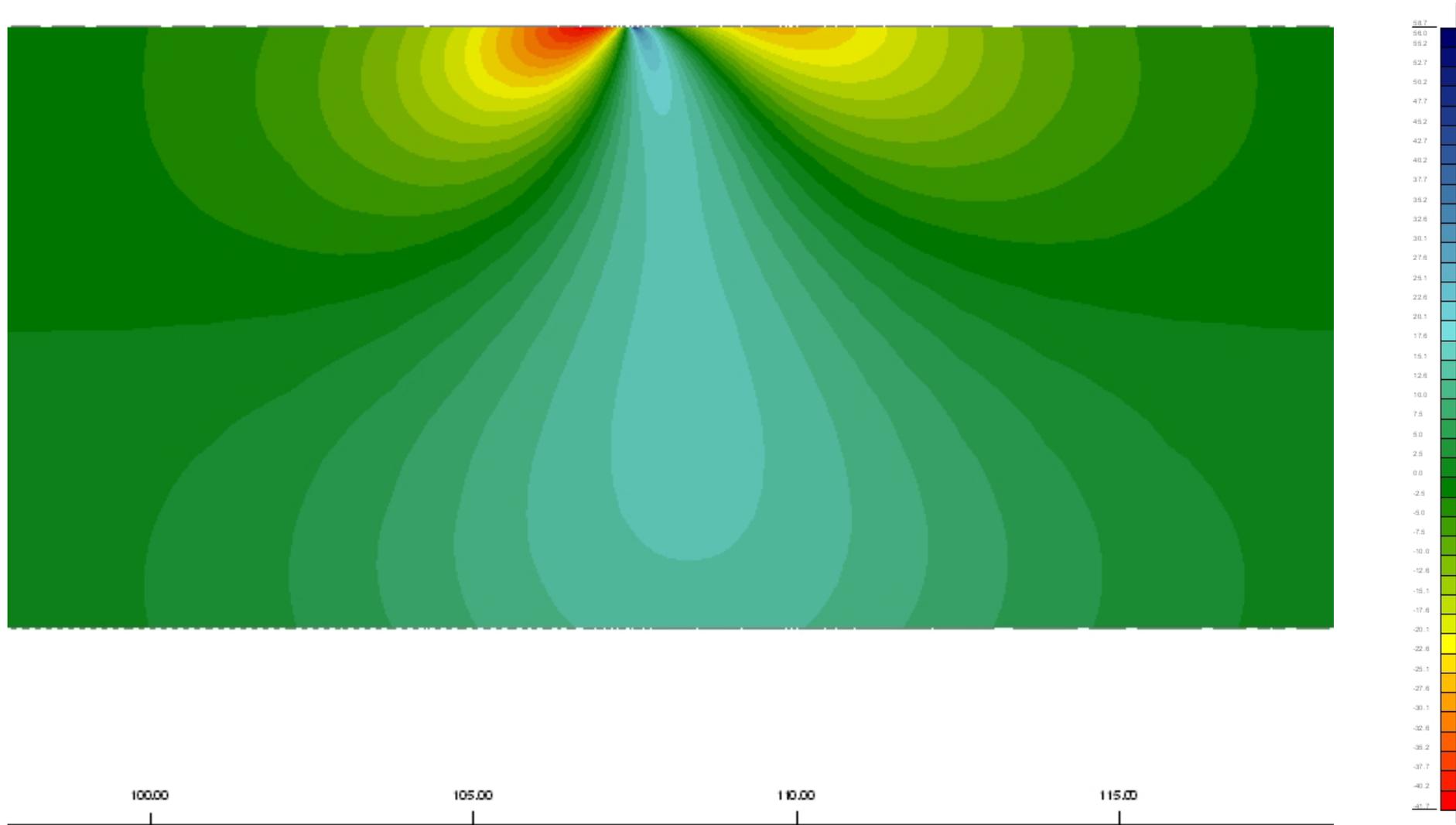
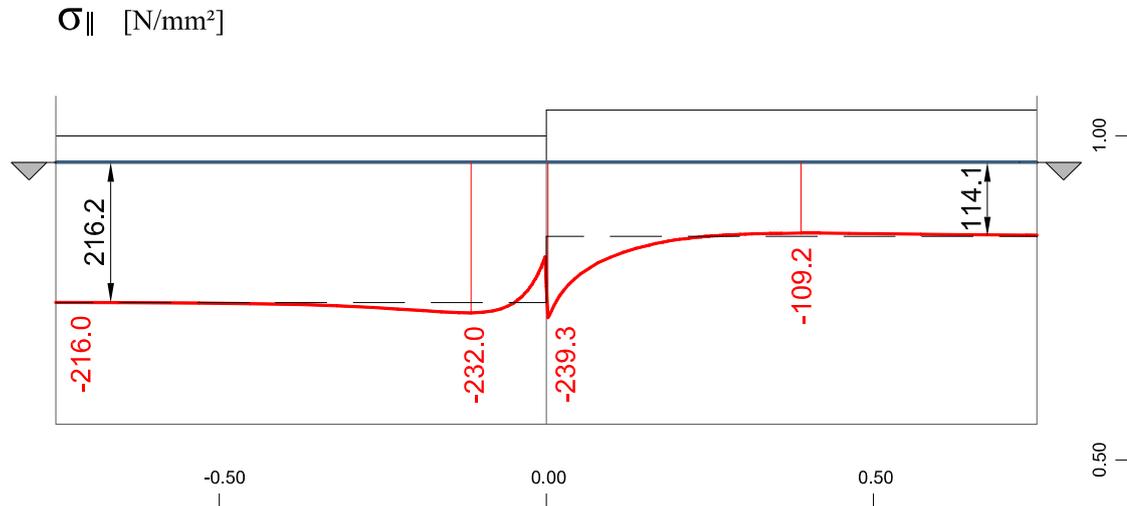


Abbildung 5-12: Schubspannungen

Die Abbildung 5-13 zeigt die Spannungen parallel zur Schnittlinie in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg. Der Sprung im Spannungsverlauf an der Unterseite des Gurtes entsteht durch die Konzentration der Spannungen an der Oberseite.



Legende : — Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-13: Spannungen parallel zum Schnitt

In der Abbildung 5-14 werden die Spannungsvorgänge im Obergurt des Querschnitts betrachtet. Die Normalspannungen konzentrieren sich ab ca. 100 mm vor dem Dickensprung an der Oberseite des Gurtes. Die Extremwerte der Spannung reichen bis $-513,8$ N/mm². An der Unterseite sinken die Spannungen bis auf $-70,0$ N/mm² ab. Nach der Änderung des Querschnitts steigen die Spannungen an der Unterseite wieder bis auf $-239,3$ N/mm² an, an der Oberseite kommt es beinahe zu Zugspannungen. Der eigentliche Spannungs- und Verformungszustand nach der technischen Biegetheorie, der im Abstand von ca. 200 mm um den Gurtdickensprung herrscht, wird durch den lokalen Exzentrizitätseffekt umgedreht. Es kommt zu einer gegenläufigen Krümmung der Flansche. Der dickere und damit weniger nachgiebige Gurt des QS 2 mit $t=80$ mm erzwingt größere Verformungen und höhere Spannungsdifferenzen im dünneren Gurt mit $t=40$ mm. Im Abstand von $b/4$ vom Steg kommt es im dünneren Gurt des QS 1 noch zu Spannungsunterschieden $\Delta\sigma$ von ca. $400,0$ N/mm² zwischen Ober- und Unterseite, im dickeren Gurt zu ca. $250,0$ N/mm².

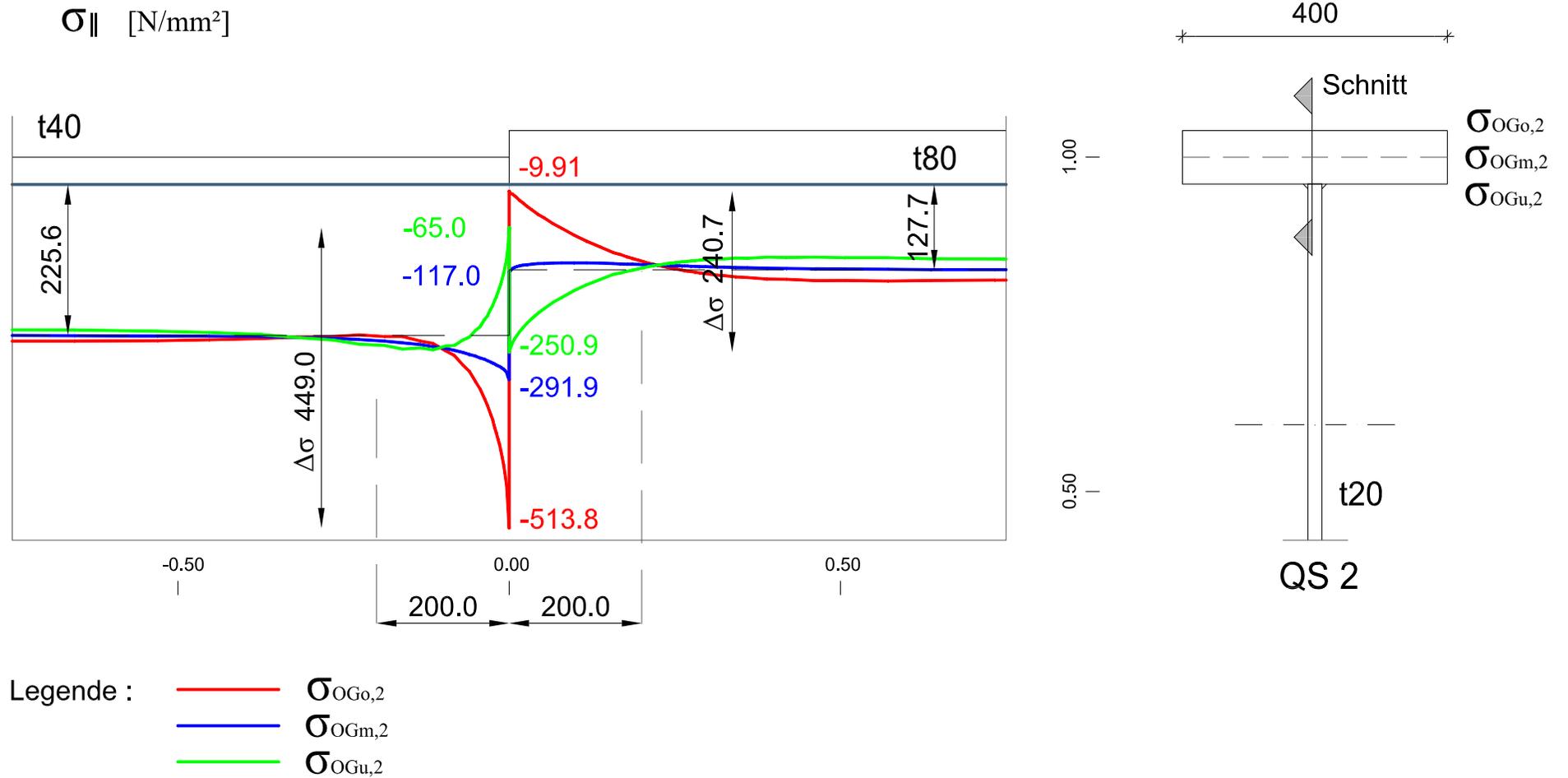
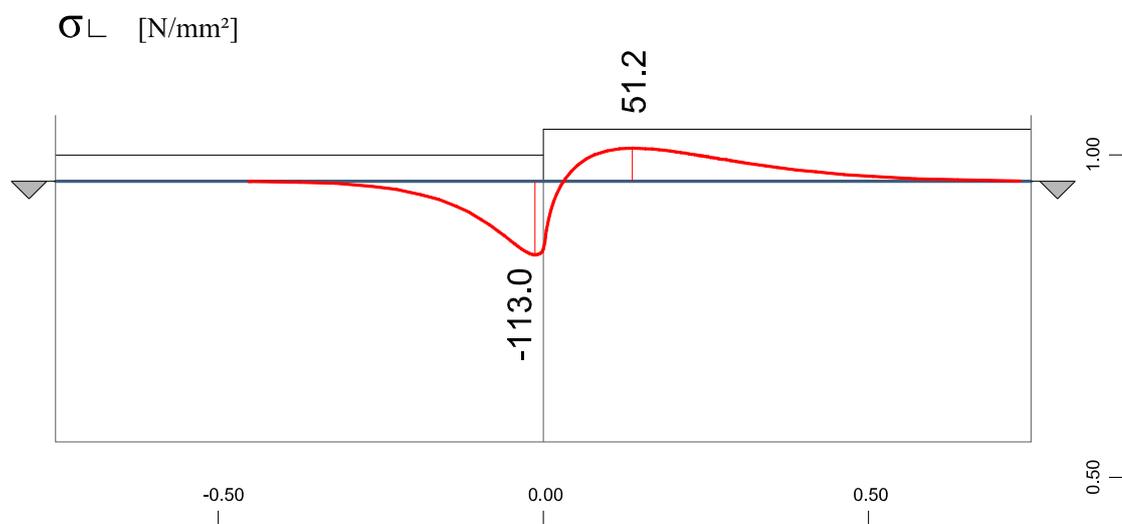


Abbildung 5-14: Normalspannungen im Gurt

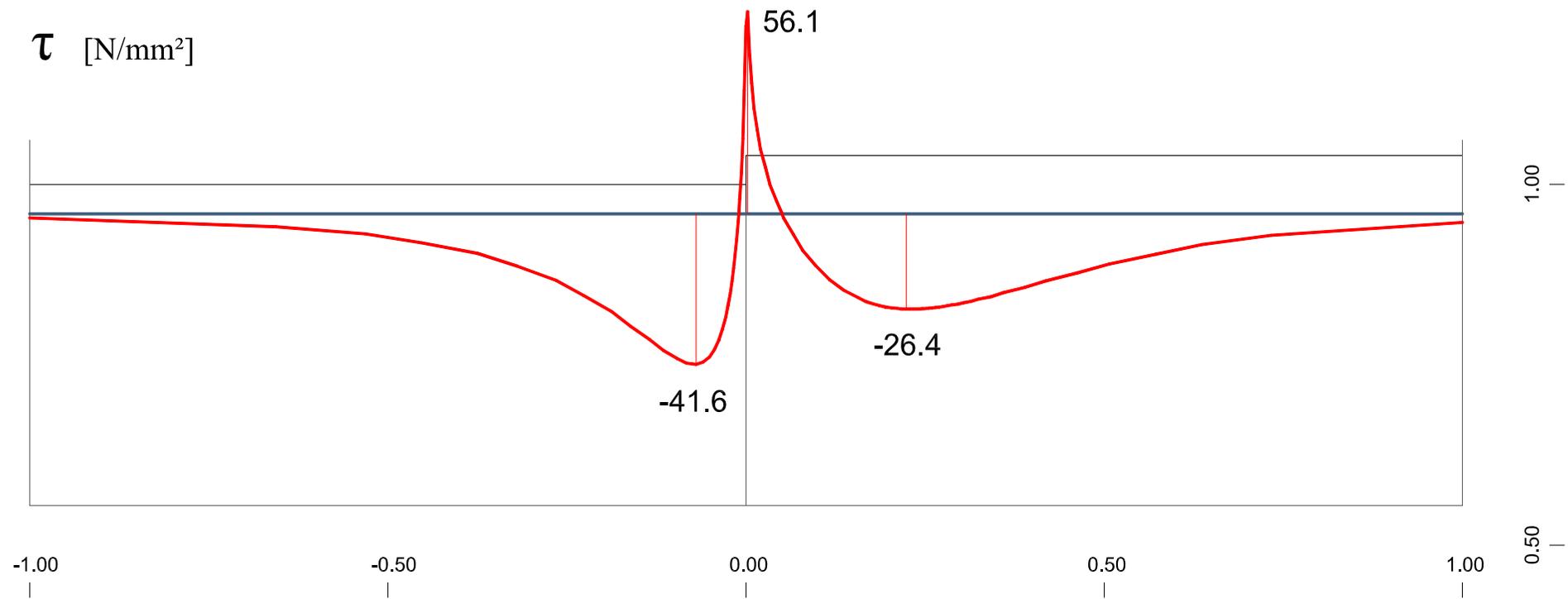
Durch die exzentrische Wirkung der Gurtkräfte und deren betragsmäßiger Differenz, entsteht ein lokales Biegemoment im Querschnitt. Aus der Abbildung 5-14 war dessen Auswirkung auf den Gurt ersichtlich. Abbildung 5-15 zeigt den Spannungsverlauf normal zum Schnitt in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg. Die negativen Druckspannungen konzentrieren sich vor dem Gurtdickenübergang und erreichen betragsmäßig deutlich höhere Werte als im Zugbereich. Dieser erstreckt sich weiter in den Querschnitt 2 hinein. Die dünnere Gurtplatte besitzt weniger lastverteilende Wirkung als der dickere Gurt des QS 2.



Legende : — Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-15: Spannungen normal zum Schnitt

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich beim Verlauf der Schubspannungen in der Schnittlinie zwischen Obergurt und Steg. Die Schubspannungen vor dem Dickensprung treten konzentrierter und mit ausgeprägterem Maximum als danach auf. Die Aufteilung erfolgt zu je ca. 50% vor und nach dem Sprung. Durch die elastische Berechnung wird somit bereits etwa die Hälfte der Gurtkraftdifferenz dN in den dünnen Gurt des Querschnitts 1 eingeleitet. Diese Steigerung der Gurtnormalkraft $N_{OG,1}$ kann den Gurt über das Maß nach der technischen Biegetheorie hinaus belasten. In dieser Arbeit bleibt dies durch die angewandte ideal elastische Berechnung ohne Auswirkungen auf die Ergebnisse des FE-Programms.



Legende : — Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-16: Schubspannungen im Schnitt

Diese Kraftkonzentration kann bis zur plastischen Grenzlast des Obergurtes erfolgen. Bei einer plastischen Berechnung ändert sich das Systemverhalten und die angegebenen Spannungsverteilungen sind in dieser Form nicht mehr gültig. Die Störung des Schubspannungsverlaufes nach der technischen Biegetheorie durch den abrupten Übergang des Gurtblechs erstreckt sich beidseitig des Dickensprunges um mehr als 500 mm. Dies entspricht in etwa der halben Trägerhöhe. Es zeigt sich somit ein beträchtlicher Einflussbereich der Querschnittsänderung. Über die Höhe des Steges nehmen die lokalen Schubspannungen rasch ab. Sie haben ihre größte Auswirkung daher auf die Anschlussschweißnaht zwischen Steg und Obergurt.

Abbildung 5-17 zeigt die auftretenden Schubspannungen und Normalspannungen in der Schnittfuge. Die maximale Spannung normal zum Schnitt erreicht dabei mit $113,0 \text{ N/mm}^2$ etwa das Dreifache der Schubspannung S_1 mit $41,6 \text{ N/mm}^2$. Die Maxima treten um ca. 55 mm versetzt auf. Das Maximum von σ_L konzentriert sich dabei näher am Dickensprung als die Schubspannungen, die dort eine Richtungsumkehr erfahren. Eine zusätzlich wirkende Querkraft hat hauptsächlich Einfluss auf die Schubspannungen, siehe Anhang A 6.

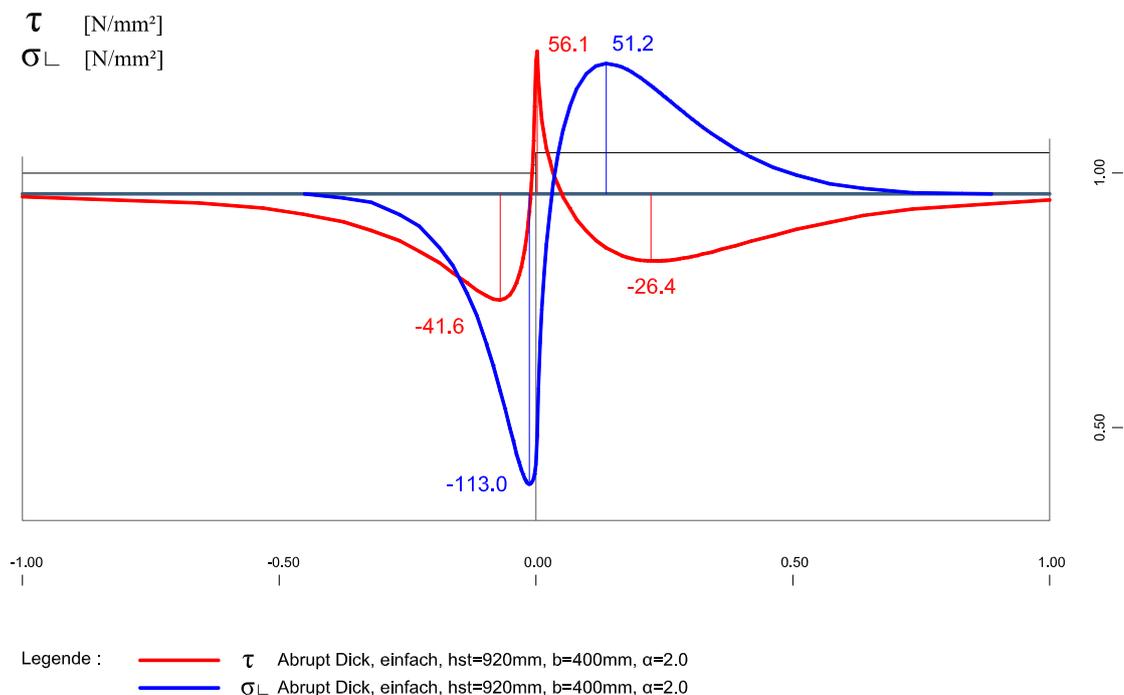


Abbildung 5-17: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt

5.3) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

5.3.1) Modellverhalten

In dieser Ausführung erfolgt der Dickensprung an Obergurt und Untergurt. Alle weiteren Abmessungen sind ident mit der Ausführung als einfach symmetrischer Querschnitt. Die Änderung der Gurtdicke beträgt 40 mm.

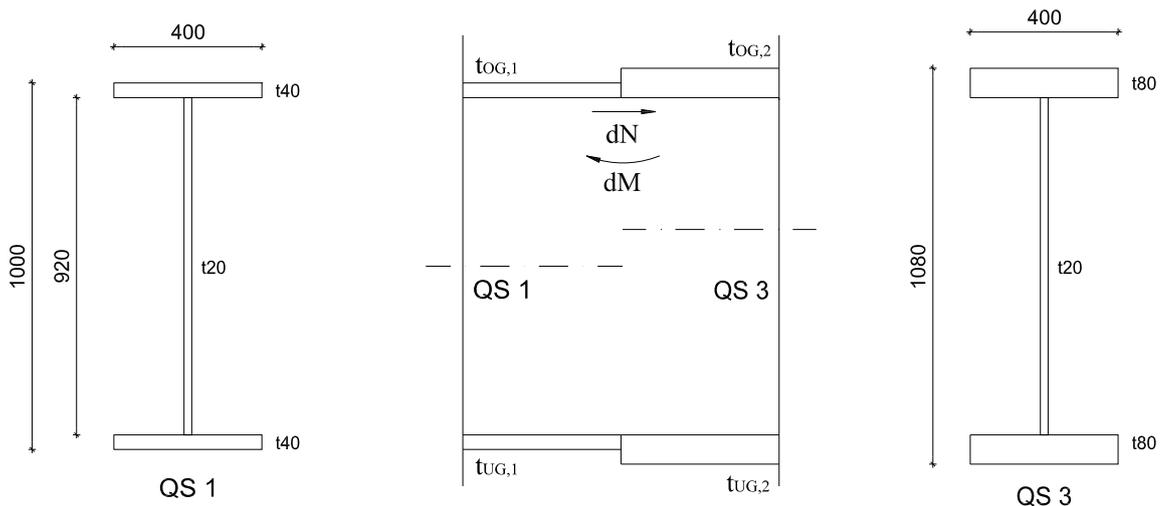


Abbildung 5-18: Darstellung der Querschnitte beim Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

Beim doppelt symmetrischen Gurtdickensprung treten dieselben Mechanismen wie bereits in Kapitel 5.2) auf. Zusätzlich kommt es bei dieser Ausführung zu einer gegenseitigen Beeinflussung von Ober- und Untergurt. Aus den im Modell „Abrupt Dick“ in einfach symmetrischer Ausführung auftretenden Schubspannungen lassen sich die nachfolgenden Spannungsbilder ableiten. Das Modell lässt sich daher als eine Überlagerung von zwei einseitig verdickten Trägern betrachten.

Durch die unterschiedlichen Dicken der Gurtbleche kommt es auch hier zu einem lokalen Moment dM sowie einer Gurtnormalkraftdifferenz dN . Die Differenzkraft ist als Schubspannung τ in den Steg einzuleiten. Deren Verlauf ist in Abbildung 5-22 ersichtlich. Im Vergleich zur einfach symmetrischen Ausführung tritt hierbei eine um etwa $2/3$ reduzierte Differenzkraft dN auf. Diese Reduktion lässt sich jedoch aufgrund der gegenseitigen Gurtbeeinflussung nicht gleichwertig auf die Spannungen übertragen.

Tabelle 5-3: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang

Ausführung des QS 2	dM [kNm]	dN [kN]	e' [mm]
OG Dickensprung	96,1	-477,6	-201,1
OG und UG Dickensprung	81,4	-154,3	-527,5
OG E-Modul Sprung	11,2	-532,9	-21,0
OG und UG E-Modul Sprung	5,9	-291,8	-20,3
zentrischer OG Dickensprung	16,44	-567,6	-29,0

Das lokale Moment dM bewirkt sowohl einen Vorzeichenwechsel in den Schubspannungen, als auch die Ausbildung eines Zug- und Druckbereiches in den Spannungen normal zur Schnittrichtung. Beide Effekte gemeinsam stehen im Gleichgewicht mit dem Versatzmoment. Der ideale Hebelarm e' zeigt, dass die anteilige Wirkung des Moments bei Ausbildung eines doppelt symmetrischen Dickensprungs gegenüber der einseitigen Ausführung ansteigt. Die Auswirkungen dessen zeigen sich in Abbildung 5-25, in der die Schubspannungsbilder der Ausführungen einfach- und doppelt symmetrisch verglichen werden.

5.3.2) Spannungen

Die Abbildung 5-20 gibt die Schubspannungsverteilung im Stegblech wieder. Hellgrüne Bereiche sind spannungslos, blau zeigt positive und rot negative Schubspannungen. Vor und nach beiden Gurtdickensprüngen treten negative Schubspannungen auf. Diese sind getrennt voneinander jeweils auf Ober- und Untergurt aufgeteilt. Unterbrochen werden sie durch einen positiven Bereich in der Nähe des Dickensprunges. Dabei kehrt sich die Richtung der Schubspannungen um. Dieser Bereich zieht sich über die ganze Trägerhöhe zwischen den Gurten. Die maximale positive Spannung beträgt an den Gurten jeweils etwa $67,0 \text{ N/mm}^2$ und sinkt dazwischen auf ca. $30,0 \text{ N/mm}^2$ ab.

Abbildung 5-19 zeigt die Spannungen parallel zur Schnittlinie in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg. Der Sprung im Spannungsverlauf an der Unterseite des Gurtes entsteht durch die Konzentration der Spannungen an der Oberseite.

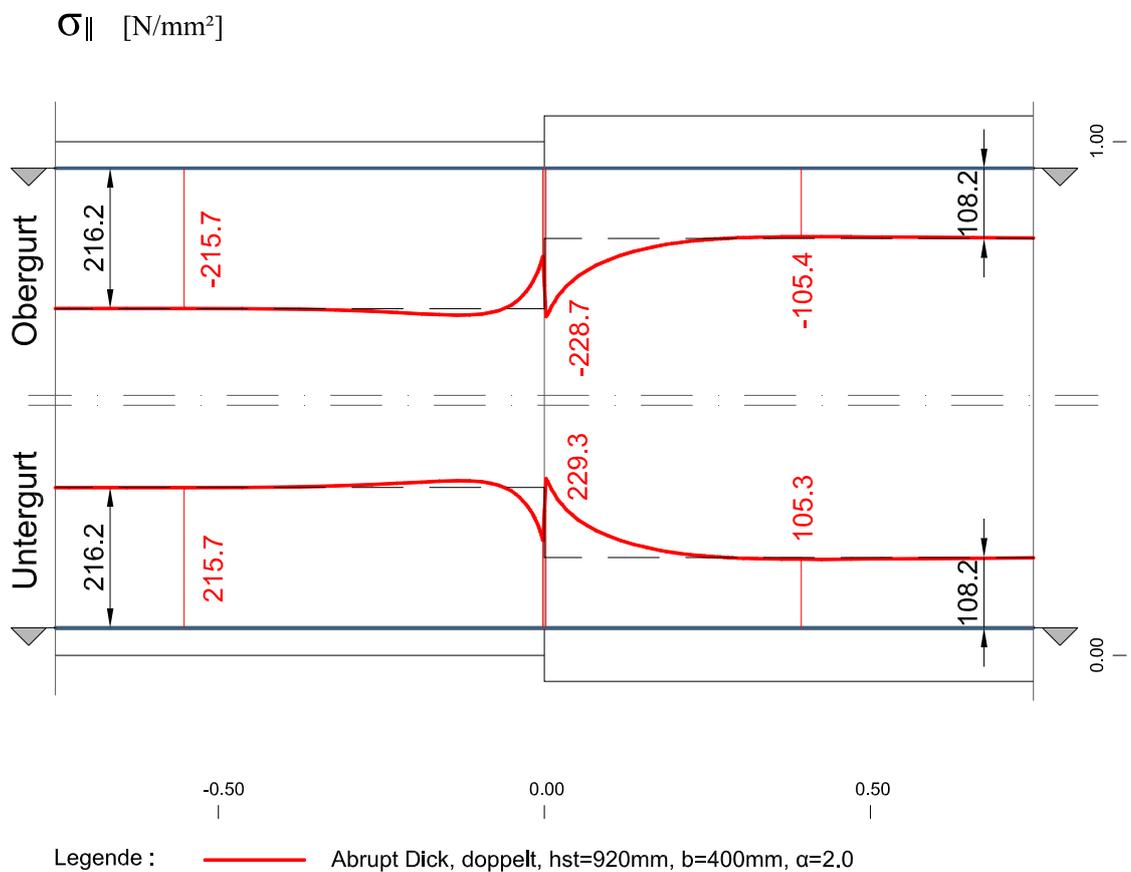


Abbildung 5-19: Spannungen parallel zum Schnitt

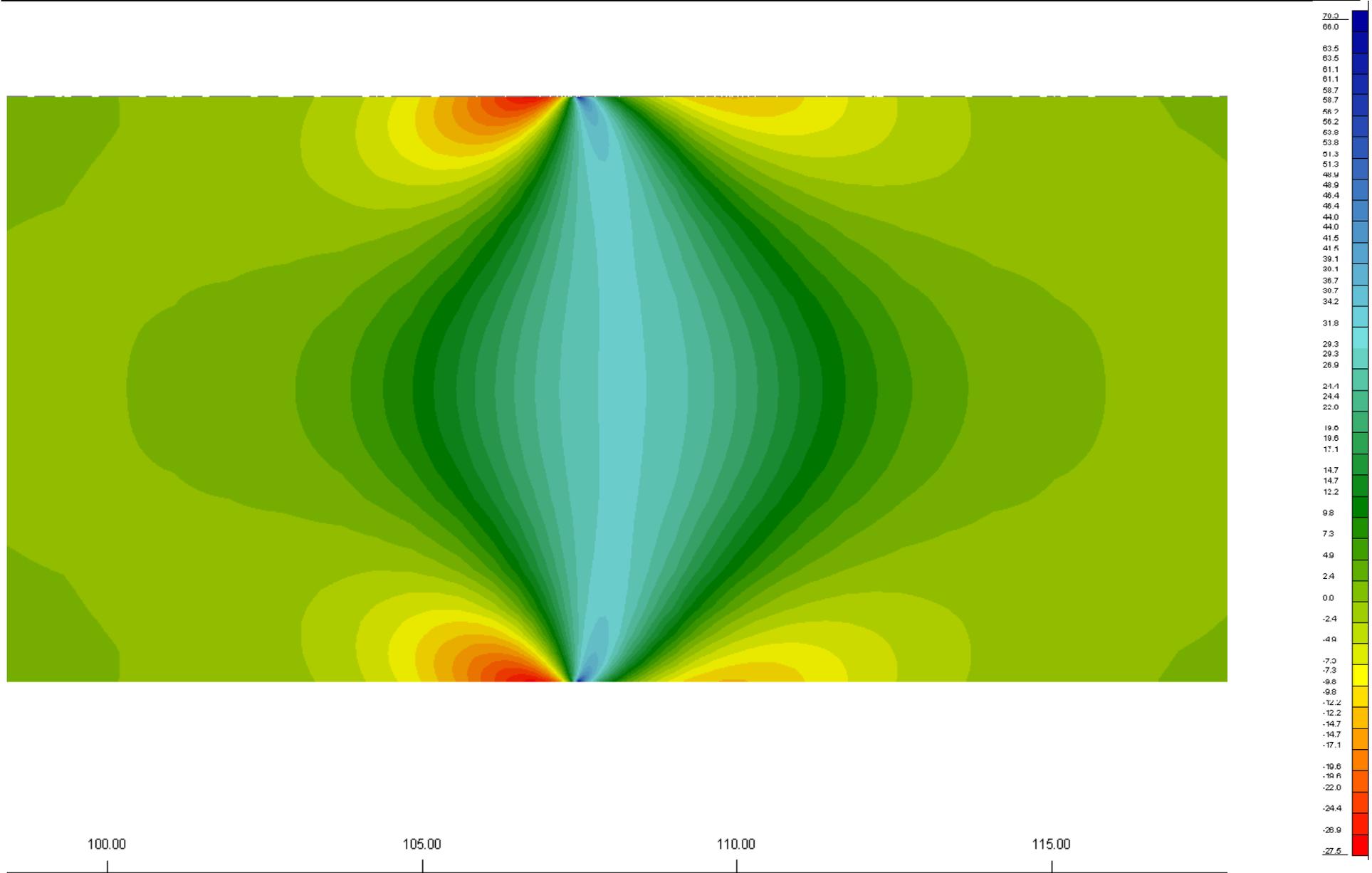


Abbildung 5-20: Schubspannungen

Durch die exzentrische Wirkung der Gurtkräfte und deren betragsmäßige Differenz entsteht ein lokales Biegemoment im Querschnitt. Abbildung 5-21 zeigt den Spannungsverlauf normal zum Schnitt in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg.

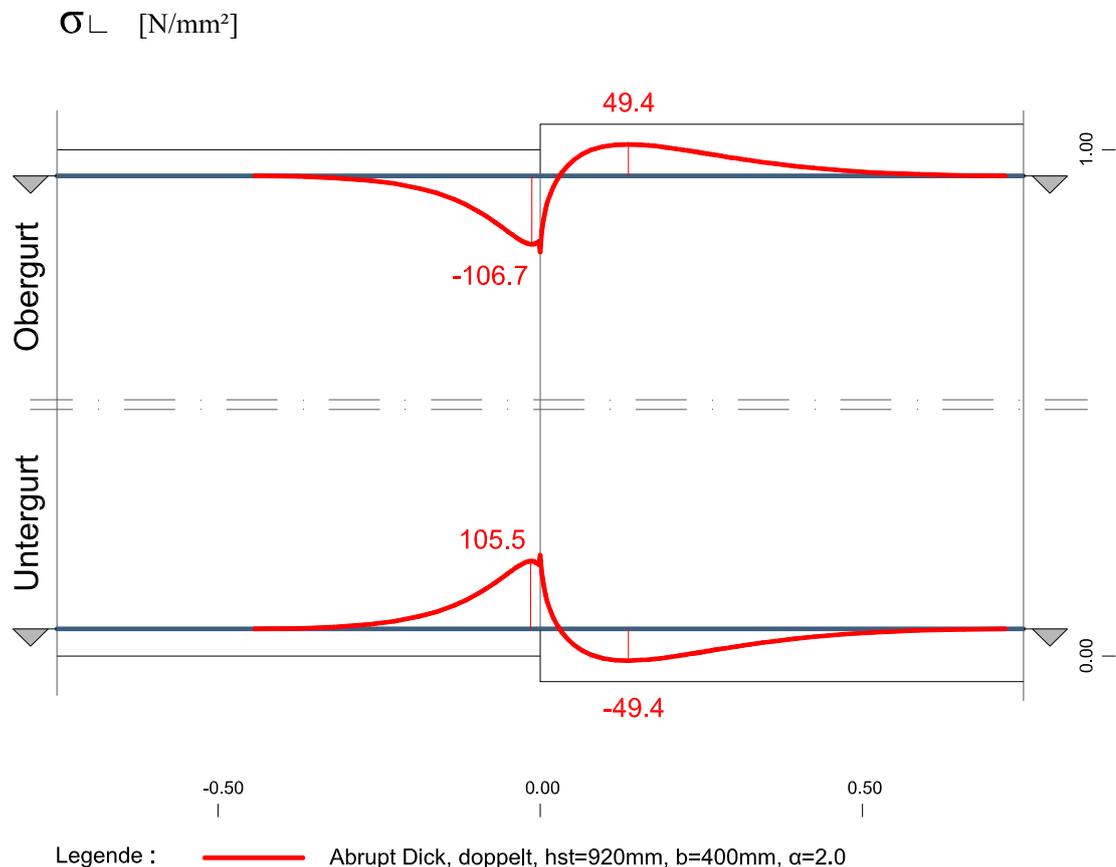


Abbildung 5-21: Spannungen normal zum Schnitt

Betrachtet man die Schubspannungen, zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der einfach symmetrischen Ausführung. Etwa 50% der Schubkraft dN wird bereits vor dem Dickensprung in den Steg des Querschnitts l eingeleitet. Der Einflussbereich der Schubspannungen aus dem Dickensprung erstreckt sich beidseitig des Überganges um mehr als 500 mm. Dies entspricht in etwa der halben Trägerhöhe. Die beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ verursachte Schubspannung S_4 wird dabei von jedem Gurtdickensprung am Gegenüberliegenden verursacht. Näherungsweise lässt sich anschreiben

$$S_{1\text{einfach sym.}} - S_{4\text{einfach sym.}} \approx S_{1\text{doppelt sym.}}$$

Dieser Zusammenhang ist etwa ab einer Steghöhe von 800 mm gültig.

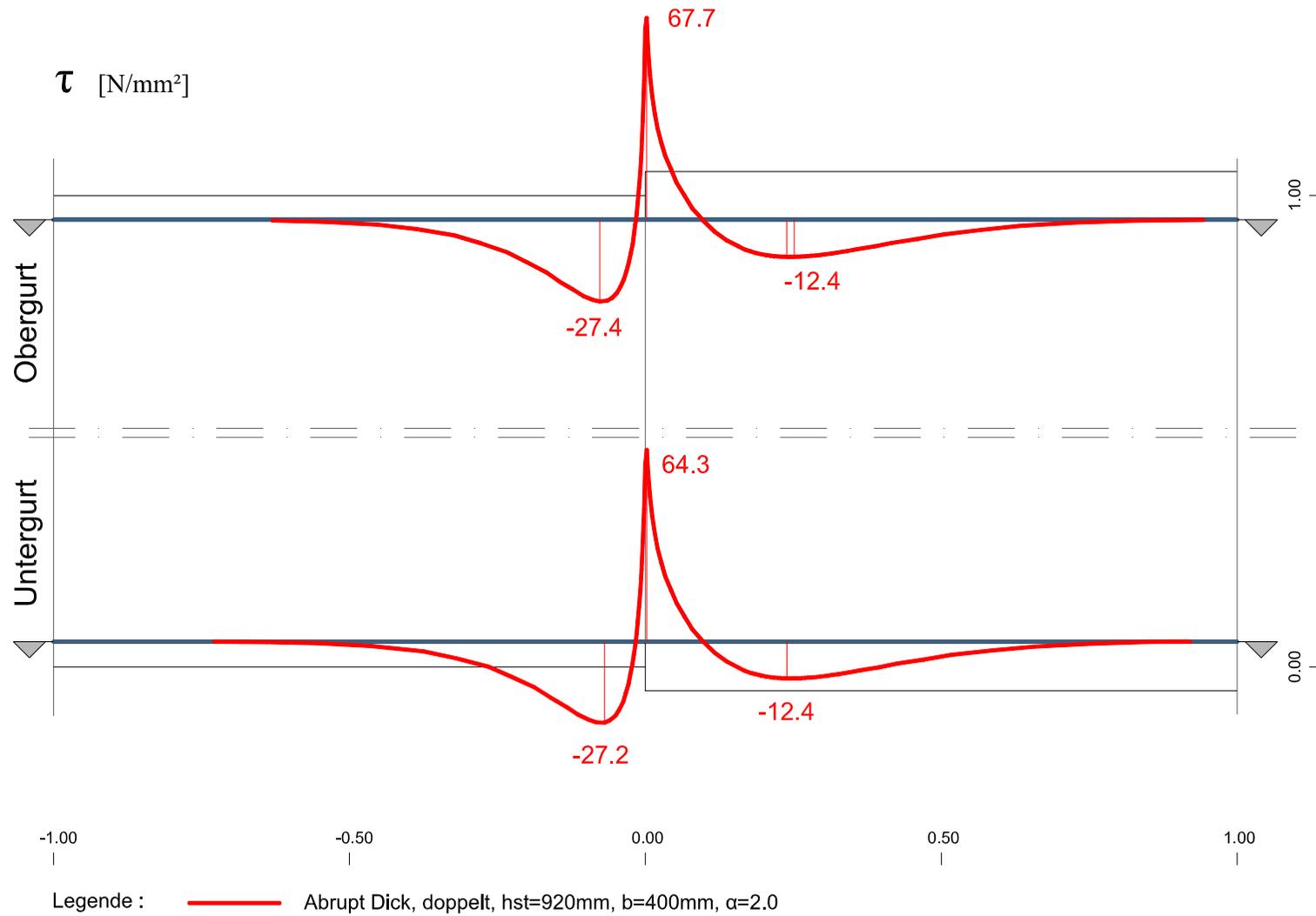


Abbildung 5-22: Schubspannungen im Schnitt

Abbildung 5-23 zeigt die auftretenden Schubspannungen und Normalspannungen in der Schnittfuge. Die maximale Normalspannung erreicht dabei etwa das Dreifache der Schubspannung. Die Maxima treten um etwa 60 mm versetzt auf. Das Maximum von σ_L konzentriert sich dabei näher am Dickensprung als die Schubspannungen, die dort eine Richtungsumkehr erfahren. Beim Nachweis der Halskehlnähte ist die Überlagerung der Spannungsmaxima zu berücksichtigen.

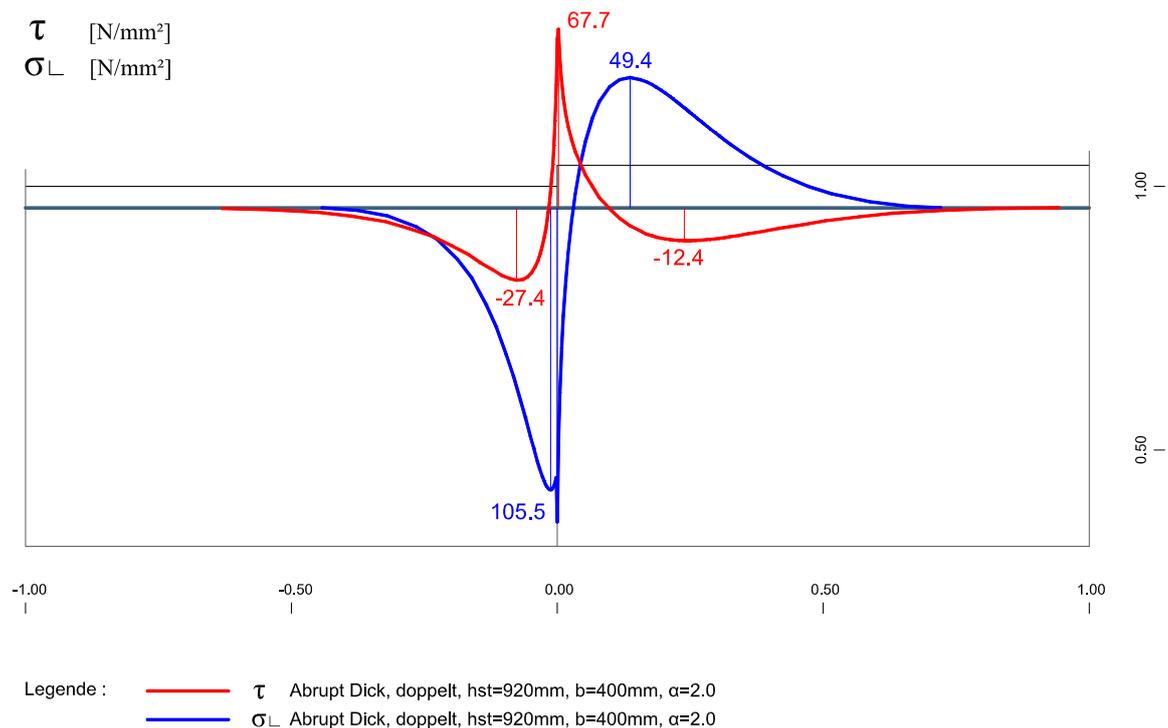


Abbildung 5-23: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt

Die Spannungen normal zur Schnitttrichtung verhalten sich ähnlich wie das lokale Moment dM . Parallel zum geringeren Moment bei der Ausführung als doppelt symmetrischer Querschnitt sinken auch die Spannungen in Abbildung 5-24. Die Abbildung 5-25 zeigt die Schubspannungen der Modelle Abrupt Dick, einfach und doppelt symmetrisch. Obwohl das lokale Moment dM beim Übergang vom einfach symmetrischen auf einen doppelt symmetrischen Querschnitt sinkt, vergrößert sich der Bereich der positiven Schubspannungen. Ebenso steigt auch das zugehörige Maxima S_2 .

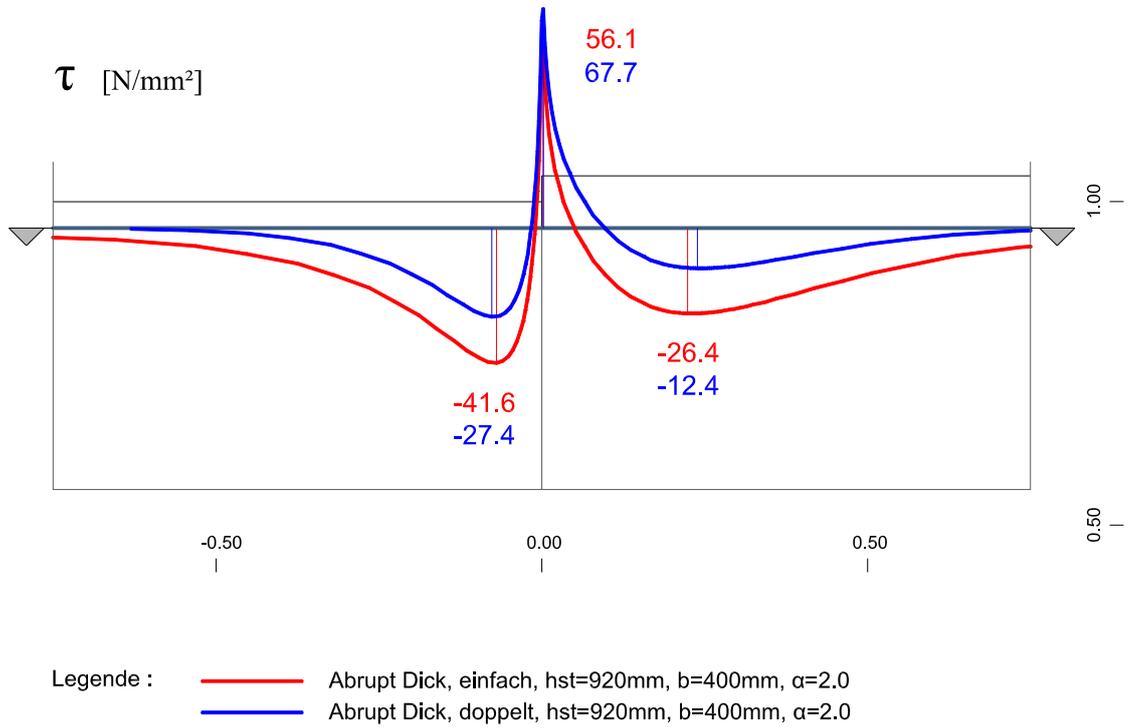


Abbildung 5-25: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ und „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“

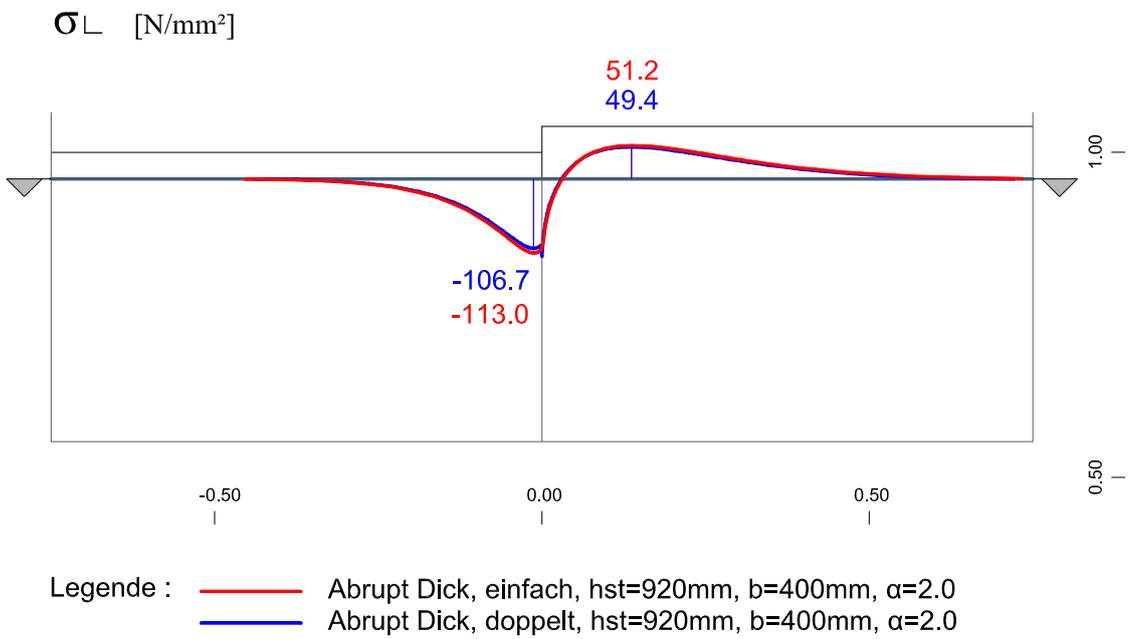


Abbildung 5-24: Vergleich der Spannungen normal zum Schnitt der Modelle „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ und „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“

5.4) Modell E-Modul, einfach symmetrisch

5.4.1) Modellverhalten

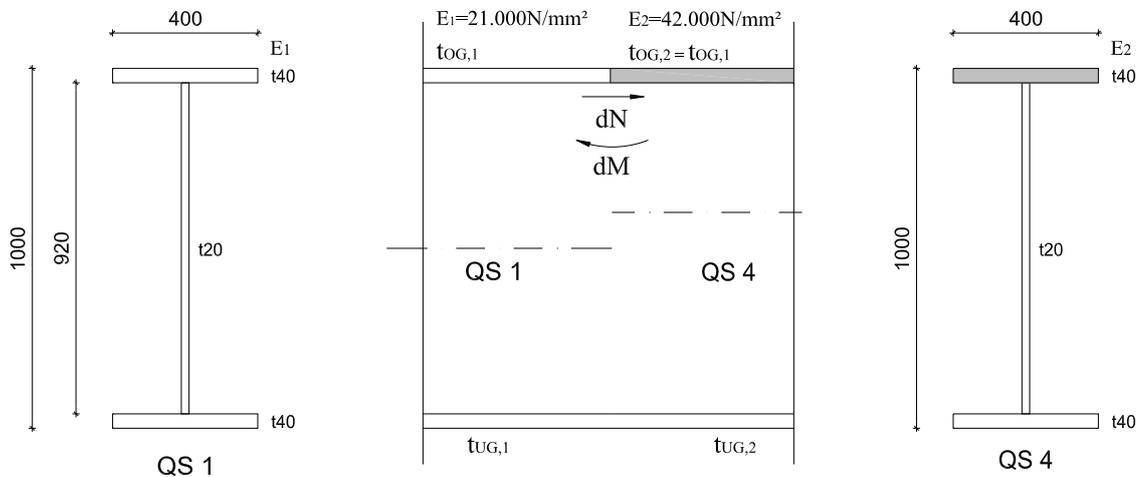


Abbildung 5-26: Darstellung der Querschnitte beim Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“

Tabelle 5-4: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang

Ausführung des QS 2	dM [kNm]	dN [kN]	e' [mm]
OG Dickensprung	96,1	-477,6	-201,1
OG und UG Dickensprung	81,4	-154,3	-527,5
OG E-Modul Sprung	11,2	-532,9	-21,0
OG und UG E-Modul Sprung	5,9	-291,8	-20,3
zentrischer OG Dickensprung	16,4	-567,6	-29,0

Der Querschnitt mit nach außen verdicktem Obergurt wird bei diesem Modell ersetzt durch einen Obergurt mit einem entsprechend erhöhten Elastizitätsmodul von $E=420.000 \text{ N/mm}^2$. Daher kommt es nur zu einem geringen Versatz der Wirkungslinien der Gurtkräfte und damit zu einem geringen Versatzmoment dM . Dieses beträgt nur etwa $1/9$ im Vergleich zum Modell „Abrupt Dick“. Durch die Änderung des E-Moduls kommt es zu einem plötzlichen und direkten Übergang der Spannungen im Querschnitt. Die Schubspannungen erreichen ihr Maximum am Ort des Materialübergangs. Das Modell ähnelt einer Ausführung mit einem zentrischen Übergang der Gurtstärke. In diesem Fall müssen sich die Spannungen im größeren Gurt erst verteilen. Daher erreichen diese nicht dieselben Extremwerte wie im Modell „E-Modul“.

5.4.2) Spannungen

Der Verlauf der Normalspannungen des Querschnitts in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg weicht geringfügig von einem Verhalten nach der technischen Biegetheorie ab. Der Übergang in den neuen Spannungszustand des Querschnitts 4 erfolgt rasch. Im Steg kommt es dabei zu einem Abfallen der Spannung σ_{\parallel} . Bei einem zentrischen Dickenübergang kommt es zu einem langsamen Spannungsübergang. Das Verhalten ist in Abbildung 5-27 ersichtlich.

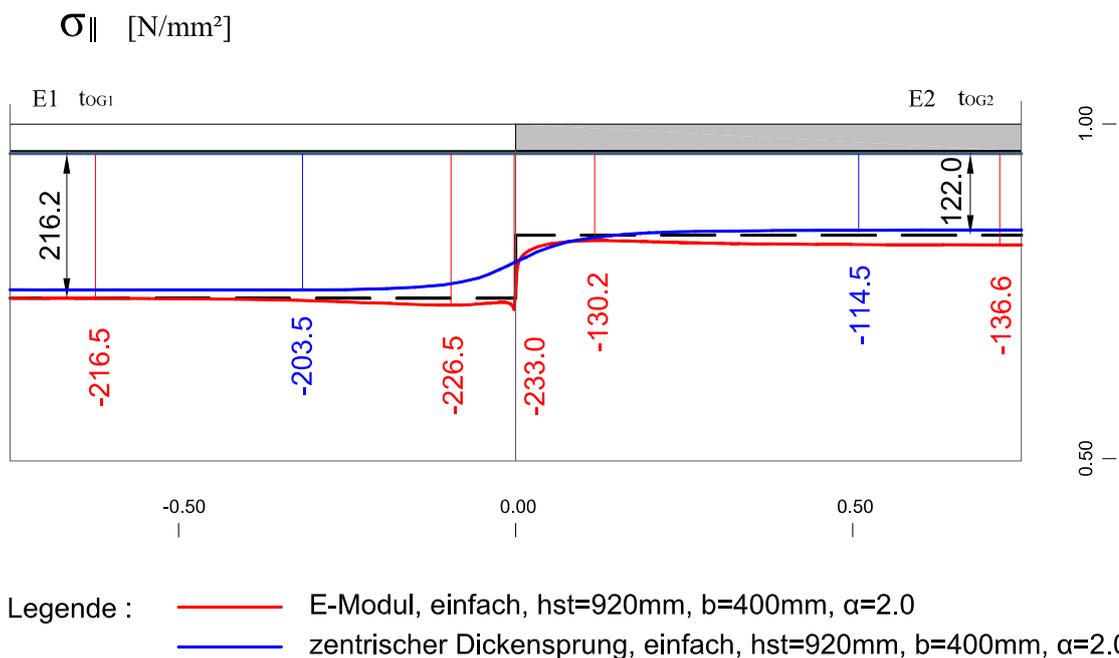
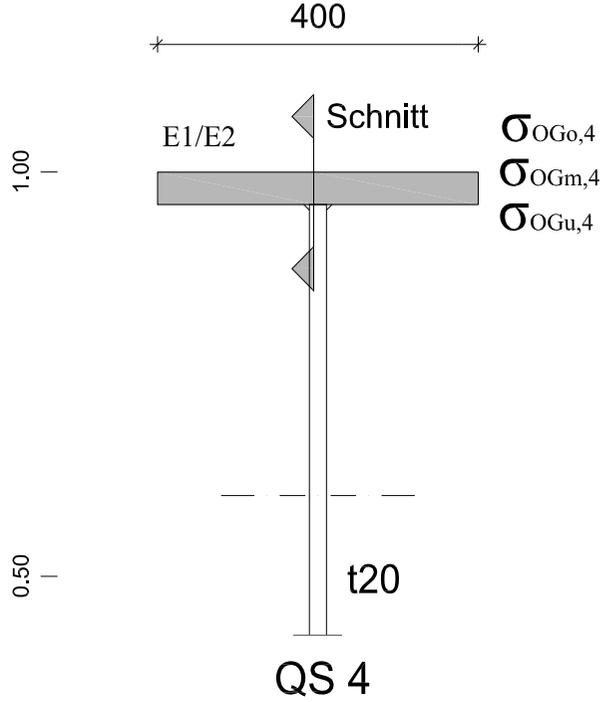
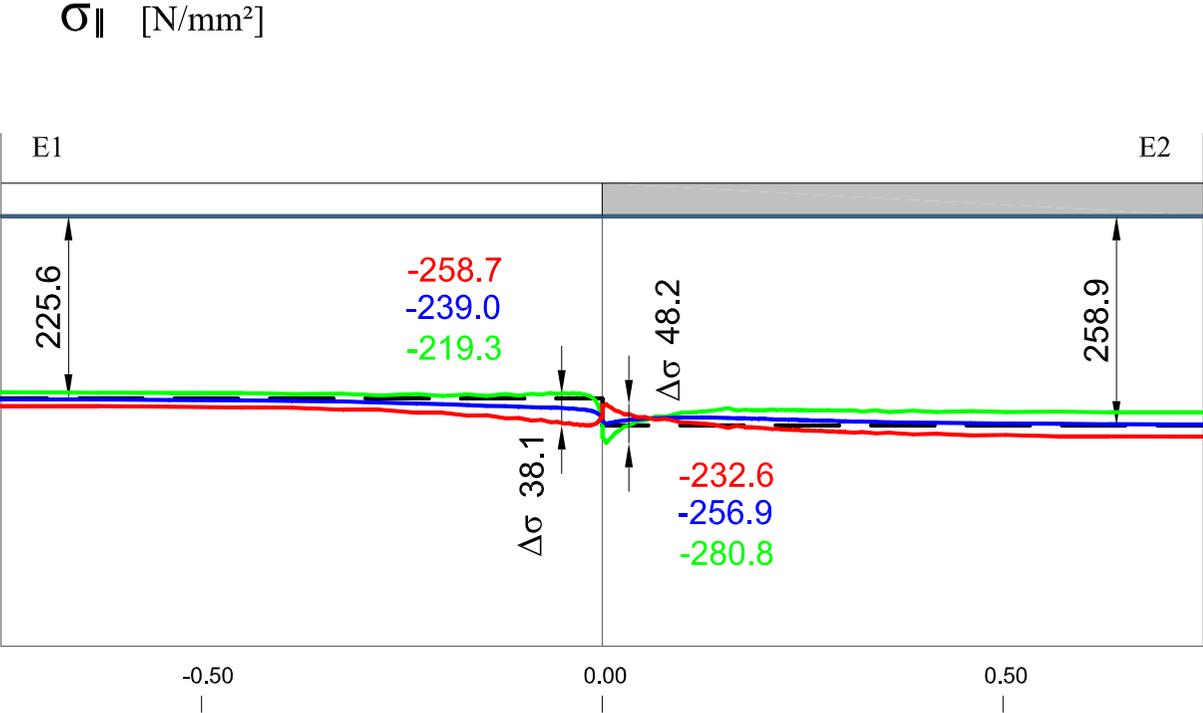


Abbildung 5-27: Spannungen parallel zum Schnitt

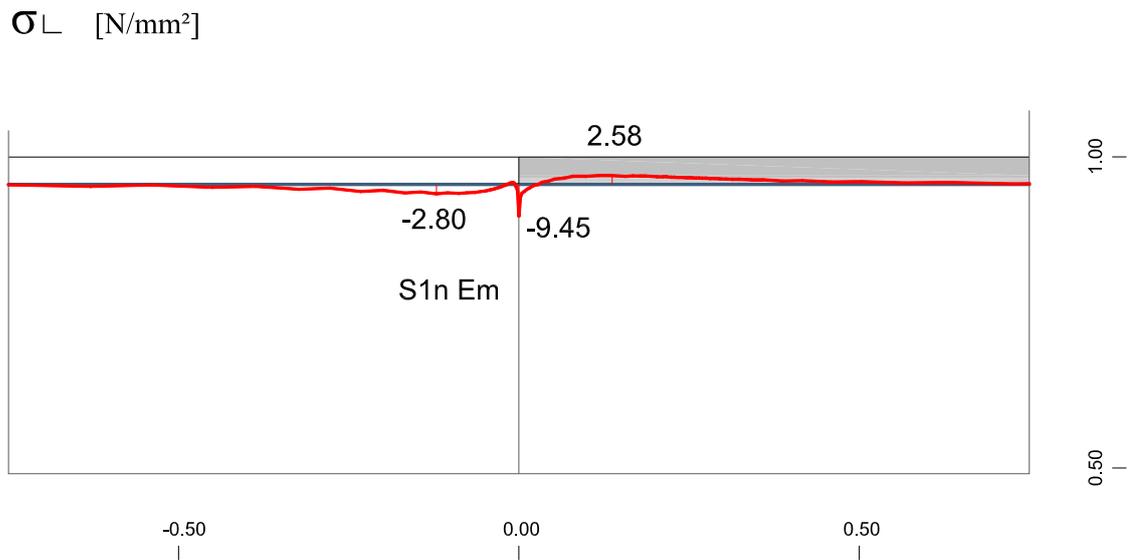
Im Obergurt steigen die Spannungen durch den erhöhten E-Modul an. Abbildung 5-28 zeigt das Verhalten der Spannungen über die Dicke des Obergurtes. In der Mitte des Obergurtes kommt es am E-Modul Sprung zu einer Umkehrung im Spannungs- und Verzerrungszustand. Durch das geringe lokale Moment bleibt die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ zwischen Ober- und Unterseite des Gurtes kleiner als beim Modell „Abrupt Dick“. Sie betragen im dünnen Gurt ca. 40,0 N/mm² und im dicken Gurt ca. 50 N/mm². Im Abstand $b/4$ vom Steg tritt dieser Effekt nicht mehr auf. Im Falle einer Ausführung als zentrischer Dickenübergang kommt es zu keinen maßgeblichen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ mehr. Es tritt daher auch keine Gurtbiegung infolge des Dickenüberganges auf.



Legende :
 — $\sigma_{OG0,4}$ (red line)
 — $\sigma_{OGm,4}$ (blue line)
 — $\sigma_{OGu,4}$ (green line)

Abbildung 5-28: Normalspannungen im Gurt

Aufgrund des geringen lokalen Momentes sind die Spannungen normal zum Schnitt ebenfalls klein. Diese sind nachfolgend in Abbildung 5-29 dargestellt.



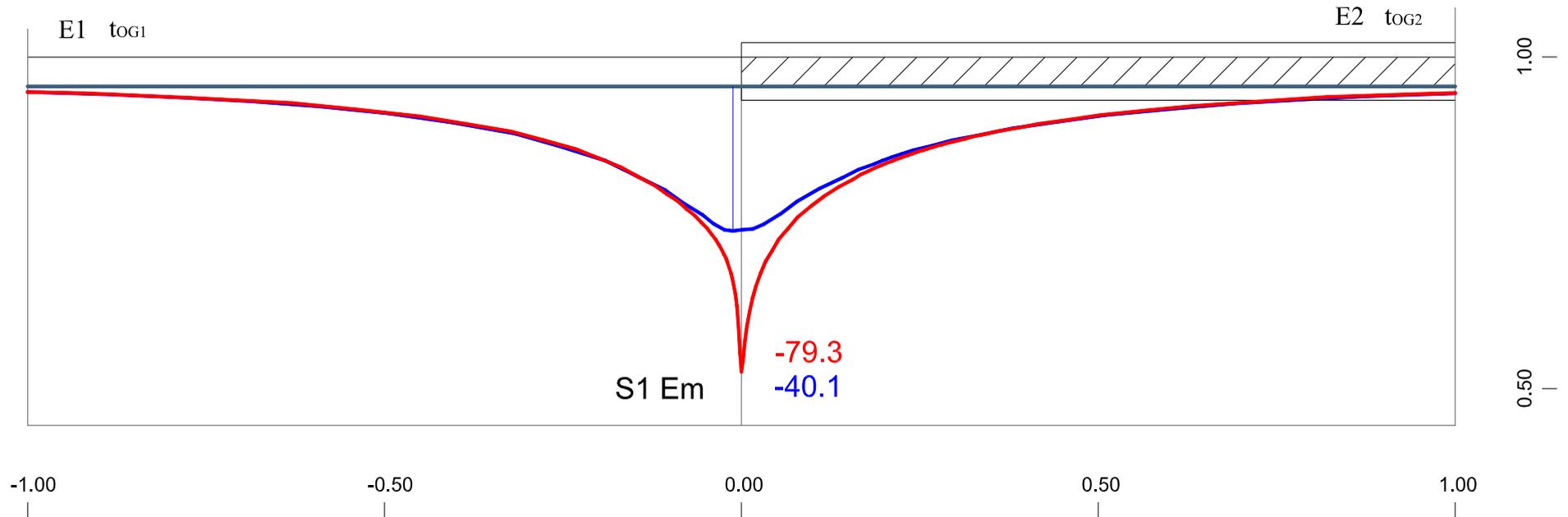
Legende : — E-Modul, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-29: Spannungen normal zum Schnitt

Durch den plötzlichen Wechsel des E-Moduls kommt es zu einer konzentrierten Kraftüberleitung vom Querschnitt 1 in den Querschnitt 4. Die daraus resultierende Gurtkraftdifferenz dN wird bei einer elastischen Berechnung ebenso konzentriert in den Steg übertragen. Die Abbildung 5-30 zeigt den Schubspannungsverlauf zwischen Obergurt und Steg. Der Bereich, in dem die auftretenden Schubspannungen von jenen der technischen Biegetheorie abweichen, hat eine Länge von ca. 500 mm beidseitig des Materialwechsels. Dies entspricht etwa der halben Trägerhöhe. Die Spannung erreicht 79,3 N/mm². In der Abbildung 5-27, die die Spannungen parallel zum Schnitt darstellt, erkennt man ebenfalls den raschen Übergang in den neuen Spannungszustand im Querschnitt.

Im Falle einer Ausführung als zentrischer Dickensprung kommt es zu einer Reduzierung der Schubspannungsspitze am Materialübergang. Die Abbildung 5-30 beinhaltet den qualitativen Verlauf für das Modell eines zentrischen Dickensprungs.

τ [N/mm²]



- Legende :
- E-Modul, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - zentrischer Dicken sprung, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-30: Schubspannungen im Schnitt

5.5) Vergleich der Modelle Abrupt Dick und E-Modul

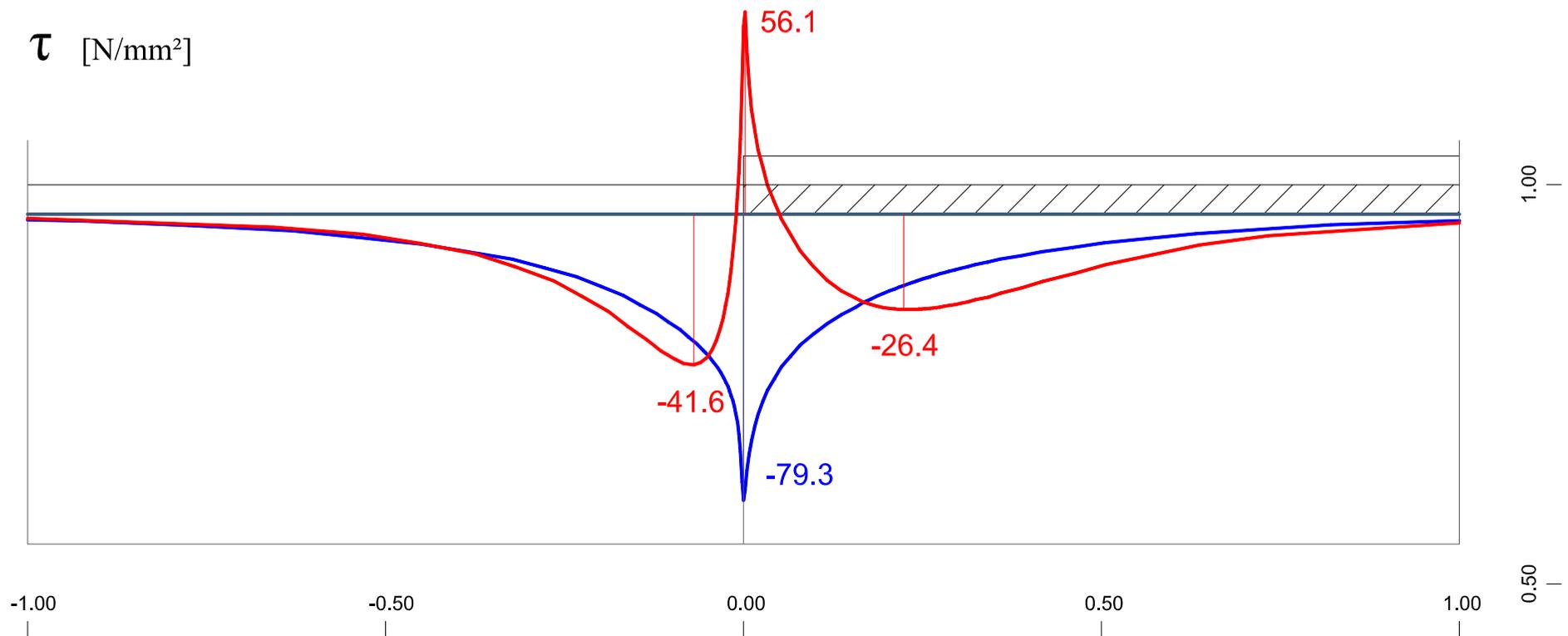
Die Abbildung 5-31 zeigt die Schubspannungsverläufe der Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“. Im Modell „Abrupt Dick“ kommt es aufgrund des, durch den Versatz der Wirkungslinien der Gurtnormalkräfte entstehenden Momentes, zu Reaktionskräften, um das Gleichgewicht herzustellen. Es entsteht in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg ein rückwirkendes Kräftepaar aus dem Verlauf der Spannungen normal zur Schnittfläche σ_{\perp} . Zusätzlich kommt es zu einem geringen rückwirkenden Moment aus dem Vorzeichenwechsel im Schubspannungsverlauf. Dabei gleichen die erhöhten Spannungen S1 und S3 den positiven Schubfluss S2 aus.

Das Modell „E-Modul“ hat im Gegensatz dazu nur ein geringes Versatzmoment, das über die Normalspannungen σ_{\perp} aufgenommen wird. Es tritt dabei keine Umkehrung der Schubspannungen ein.

Über die Schubspannung wird die gesamte erforderliche Differenz der Gurtnormalkräfte dN eingeleitet. Diese ist, wie in Tabelle 5-5 ersichtlich, nicht in beiden Modellen gleich! Als Grundlage für die Vergleichbarkeit dient die in beiden Modellen am Ort des Dickensprungs gleiche Schnittgröße $M = 4077,2 \text{ kNm}$. Die Schubspannung des Modells „E-Modul“ müsste also im gleichen Maße wie ihre Gurtkraftdifferenz dN verändert werden um mit dem Modell „Abrupt Dick“ in Abbildung 5-31 dieselbe Schubfläche darzustellen.

Tabelle 5-5: Gurtkraftdifferenzen dN

	Abrupt Dick	E-Modulsprung
$dN \text{ [kN]}$	-477,63	-532,85



- Legende :
- Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-31: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“, einfach symmetrisch

5.6) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch

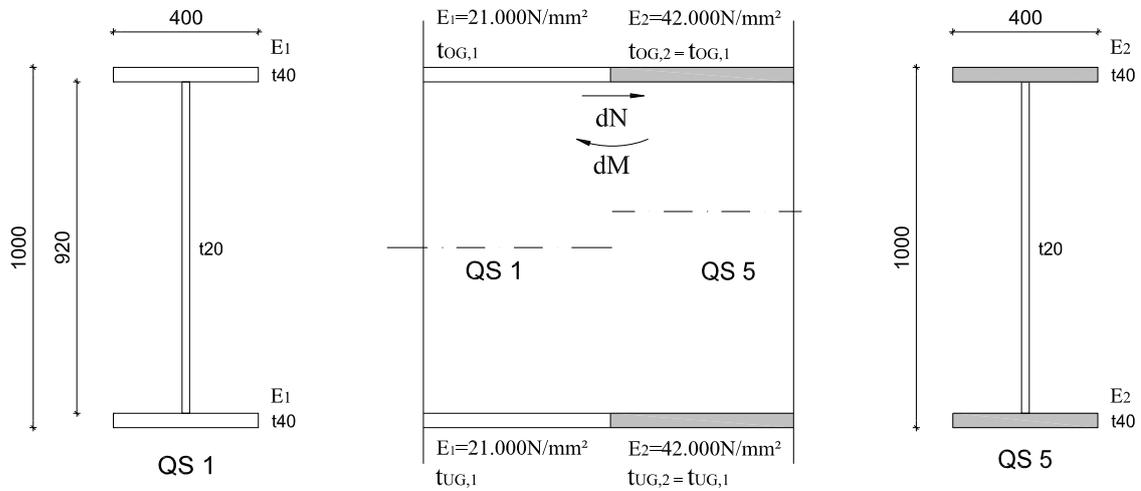


Abbildung 5-32: Darstellung der Querschnitte beim Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“

Tabelle 5-6: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang

Ausführung des QS 2	dM [kNm]	dN [kN]	e' [mm]
OG Dickensprung	96,1	-477,6	-201,1
OG und UG Dickensprung	81,4	-154,3	-527,5
OG E-Modul Sprung	11,2	-532,9	-21,0
OG und UG E-Modul Sprung	5,9	-291,8	-20,3
zentrischer OG Dickensprung	16,4	-567,6	-29,0

Durch die Ausführung als doppelt symmetrischer Querschnitt reduzieren sich bei diesem Modell die Gurtkraftdifferenz dN und das lokale Moment dM in ähnlichem Verhältnis. Der ideale Hebelarm e' bleibt nahezu konstant. Die Spannungen zeigen ein Verhalten wie in der Ausführung mit einseitigem Dickensprung. Es wird daher auf eine Darstellung der Spannungen normal und parallel zur Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg verzichtet. Die Abbildung 5-33 zeigt die zugehörigen Schubspannungen. Die Spannungen an Ober- und Untergurt sind näherungsweise gegengleich. Geringe Differenzen in den Extremwerten ergeben sich aus der geringfügig unterschiedlichen Lage der Schnittlinien.

Die Materialsprünge der Gurte beeinflussen sich gegenseitig. Es gilt der selbe näherungsweise Zusammenhang zur einfach symmetrischen Ausführung wie bereits in Kapitel 5.3) vorgestellt.

$$S1 Em_{einfach\ sym.} - S2 Em_{einfach\ sym.} \approx S1 Em_{doppelt\ sym.}$$

Dieser Zusammenhang ist etwa ab einer Steghöhe von 500 mm gültig. Die Spannungen des doppelt symmetrischen Querschnittes werden dabei um maximal 10% überschätzt.

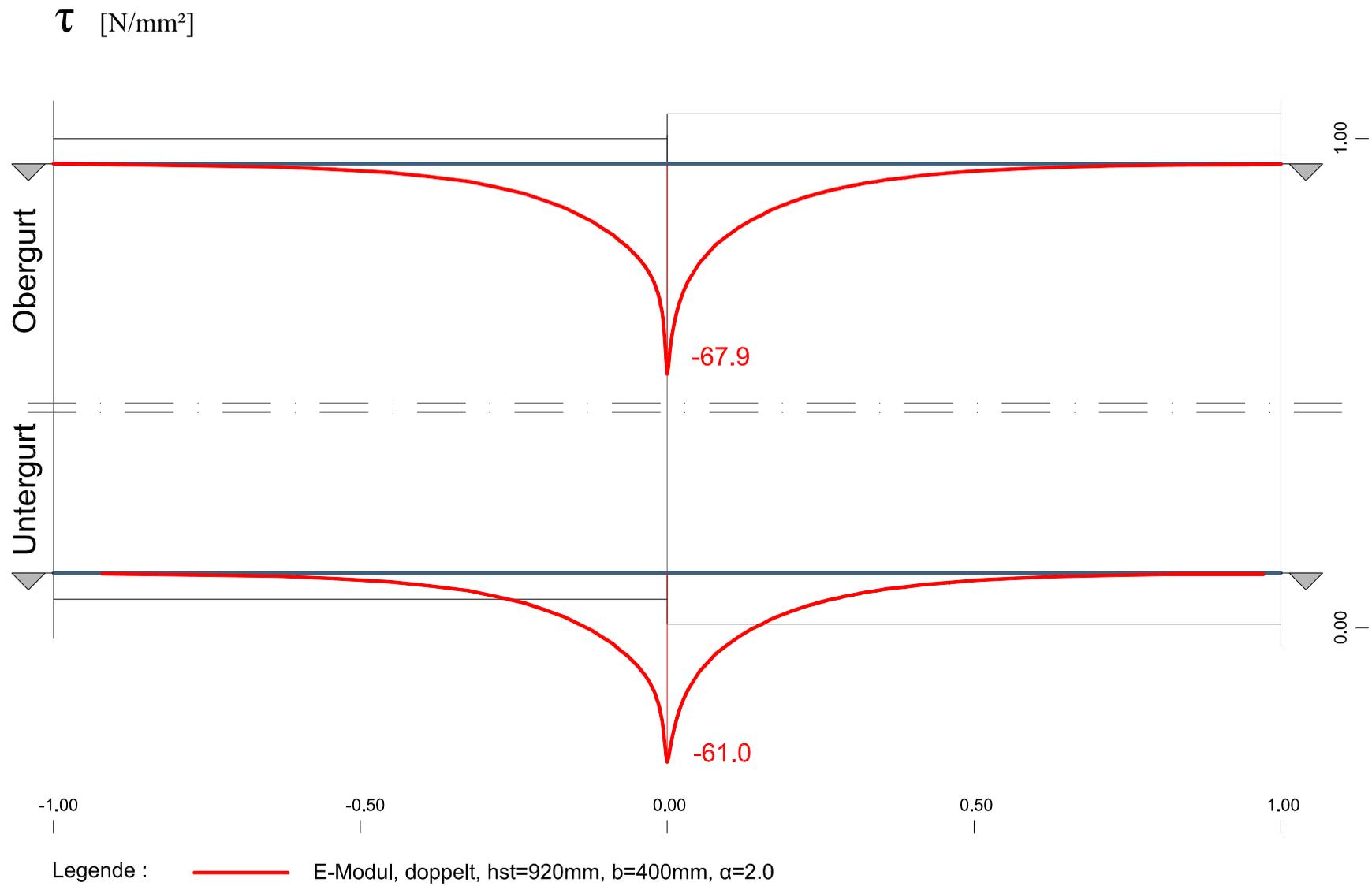


Abbildung 5-33: Schubspannungen im Schnitt

5.7) Modell Schweißnaht

Dieses Modell ist eine Erweiterung des Modells „Abrupt Dick“. Der Übergang in der Dicke des Obergurtes vollzieht sich mittels einer Schweißnaht mit der wirksamen Nahtdicke $a = 12 \text{ mm}$. Der Obergurt verändert seine Dicke von 40 mm auf 80 mm . Die Höhe des Querschnitts l beträgt weiterhin 1000 mm .

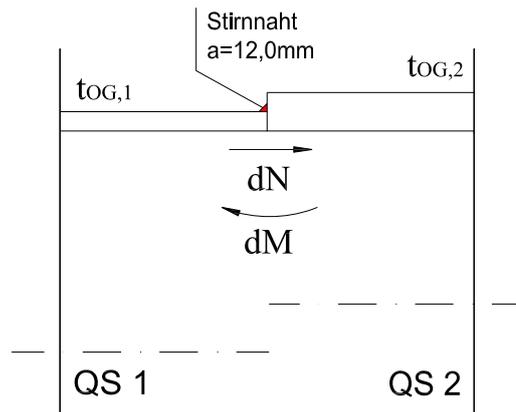
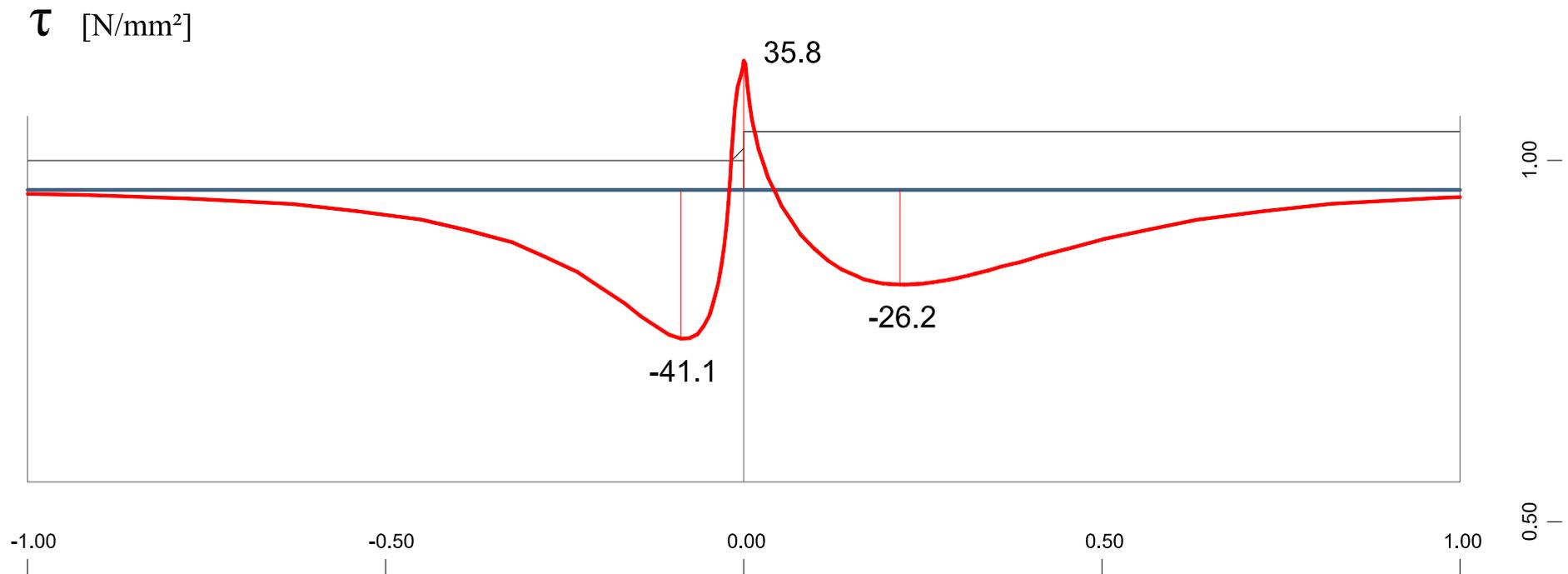


Abbildung 5-34: Querschnittsübergang beim Modell „Schweißnaht“

Dieses Modell zeigt die Veränderungen im Spannungsbild, die bei einem gering abgechrägten Dickenübergang entstehen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Auswirkungen einer dickeren Stumpfnah zwischen den Gurten. Aufgrund der großen Ähnlichkeit mit dem Modell „Abrupt Dick“ sind die Vorgänge im Querschnitt vergleichbar.

Die Schubspannung S_2 konzentriert sich weiterhin an der Kante des Dickenübergangs, deren Extremwert ist jedoch deutlich reduziert. Alle weiteren Spannungsmaxima verändern sich nur marginal. Es kommt zu einer Verschiebung der Maxima S_1 der Schubspannungen τ und Spannungen normal zum Schnitt σ_{\perp} zum Querschnitt l hin. Dies entsteht, da der im Übergang durch die Schweißnaht geringfügig verdickte Querschnitt l beginnt, Spannungen anzuziehen. Nachfolgend in Abbildung 5-35 ist der Schubspannungsverlauf ersichtlich. Die Darstellung der Spannungen normal zum Schnitt werden im Kapitel 5.9) beim Vergleich der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“ in Abbildung 5-44 nachgeholt.



Legende : — Schweißnaht, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-35: Schubspannungen im Schnitt

5.8) Modell Verlaufend

5.8.1) Modellverhalten

Bei diesem Modell wurde ein gänzlich verlaufender Querschnittsübergang mit dem Steigungsverhältnis 1:4 gewählt. Alle Querschnittswerte davor und danach bleiben unverändert zum Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“.

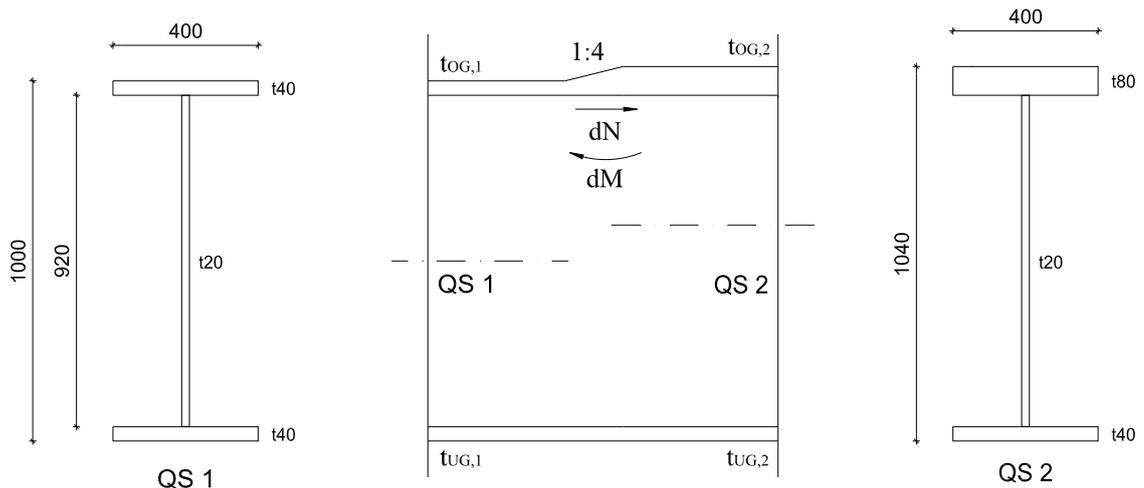


Abbildung 5-36: Darstellung der Querschnitte beim Modell „Verlaufend, einfach symmetrisch“

Durch die unterschiedliche Dicke der Obergurbleche kommt es zur selben geometrischen Exzentrizität und Differenz der Gurtnormalkräfte dN sowie dem selben lokalen Moment dM wie in den Modellen „Abrupt Dick“ und „Schweißnaht“. Die Gurtkraftdifferenz ist als Integral über alle Schubspannungen τ in der Abbildung 5-42 ersichtlich. Der Verlauf der Spannungen ist durch den kontinuierlichen Dickenübergang beeinflusst und unterscheidet sich deutlich von den anderen Modellen. Wie bei allen anderen kommt es auch hier zu einem Absinken der Schubspannungen im Bereich des Dickenüberganges. Ein Umkehren der Wirkungsrichtung bleibt aber bei dieser Ausführung aus.

Sowohl die Schubspannungen als auch die Spannungen normal zur Schnittrichtung ziehen sich durch die stetige Gurtdickenzunahme weiter in den Querschnitt 1 hinein. Die Spannungsspitzen aus vorigen Modellen werden daher grundsätzlich gedämpft und weiter verteilt.

5.8.2) Spannungen

Die Abbildung 5-37 zeigt die Spannungen in die lokale z-Richtung. Cyan entspricht Spannungsfreiheit, dunkelblau zeigt positive Spannungen (Zug) und Rot negative Spannungen (Druck). Die Darstellung zeigt die Auswirkungen des lokalen Momentes auf den Steg. Durch den verlaufenden Übergang der Gurticken kommt es zur gleichmäßigeren Verteilung der Spannungen auf den Steg. Der Zugbereich im Querschnitt 2 erstreckt sich weiter als der Druckbereich. Die dickere Gurtplatte trägt dort zur besseren Verteilung der Zugspannungen bei.

Die Abbildung 5-38 gibt die Schubspannungsverteilung im Stegblech wieder. Grüne Bereiche sind spannungslos, blau zeigt positive und rot negative Schubspannungen. Durch die verlaufende Gurticke sinken die Schubspannungen am Übergang ab. Der Richtungswechsel mit kurzzeitig extremen positiven Spannungen wie beim Modell „Abrupt Dick“ entfällt.

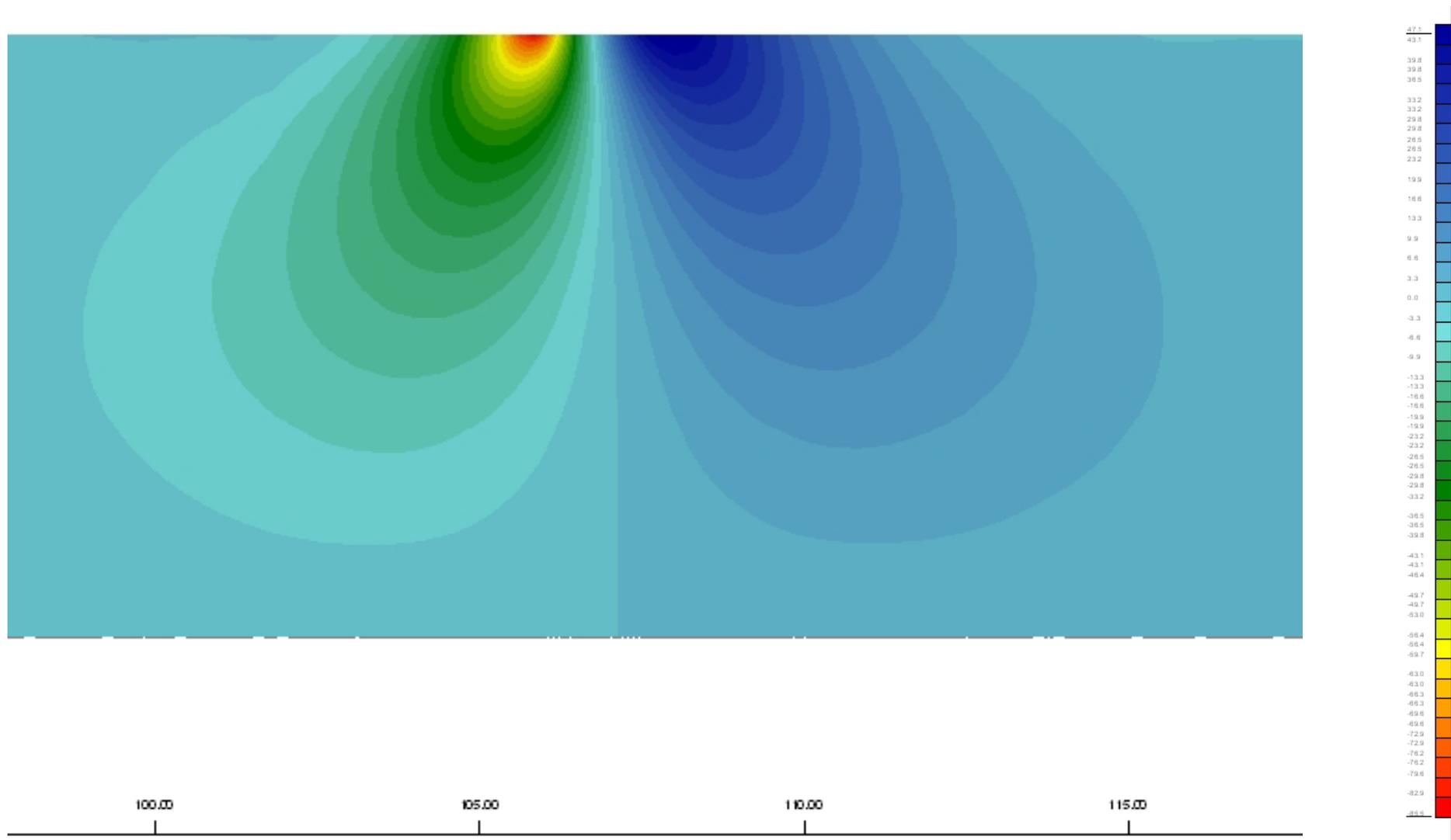


Abbildung 5-37: Spannungen in lokale z-Richtung

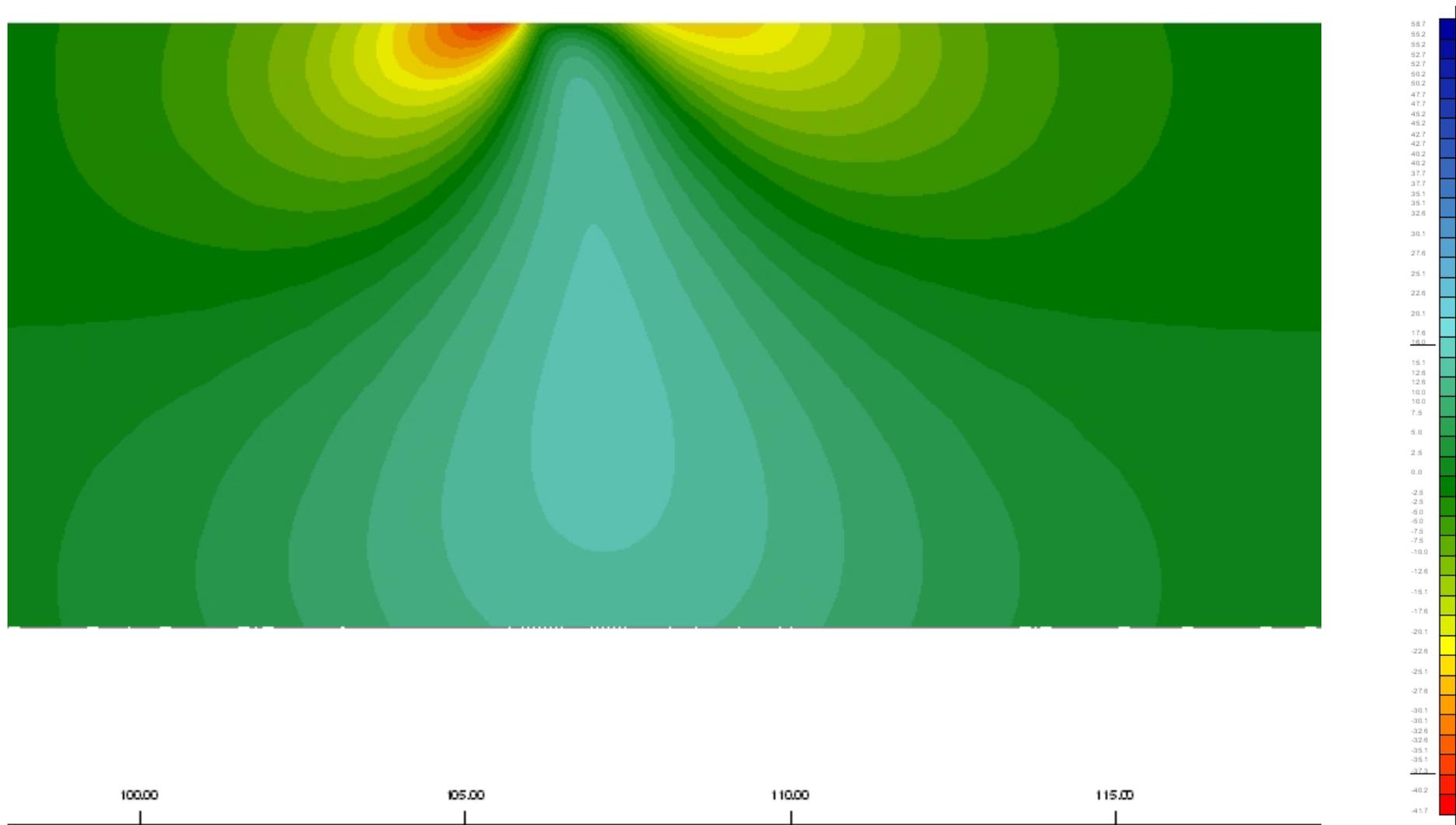
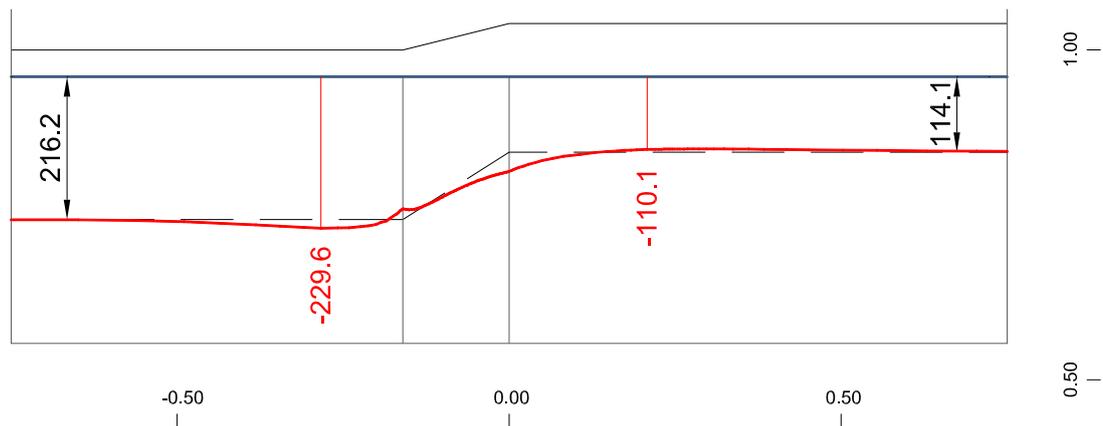


Abbildung 5-38: Schubspannungen

In Abbildung 5-39 ist der Normalspannungsverlauf im Querschnitt an der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg dargestellt. Durch den abgeschrägtem Gurt kommt es zu einem gleichmäßigen Übergang der Normalspannungszustände von Querschnitt 1 zu 2.

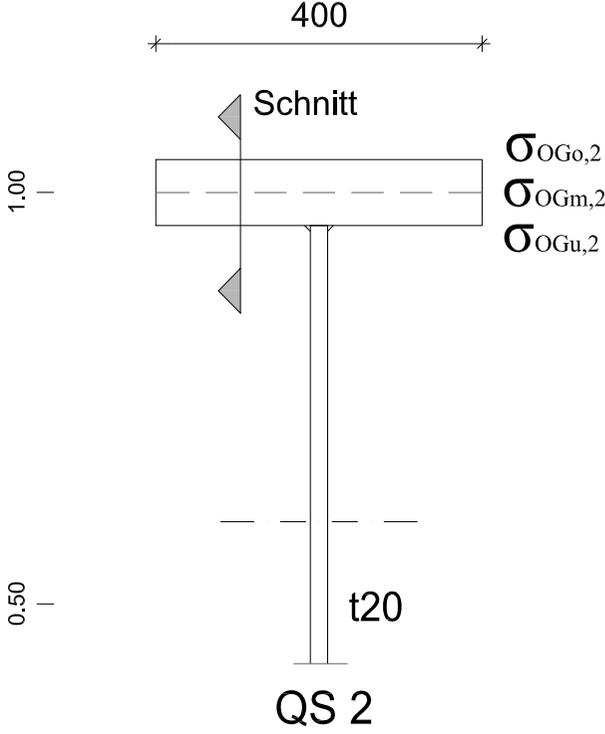
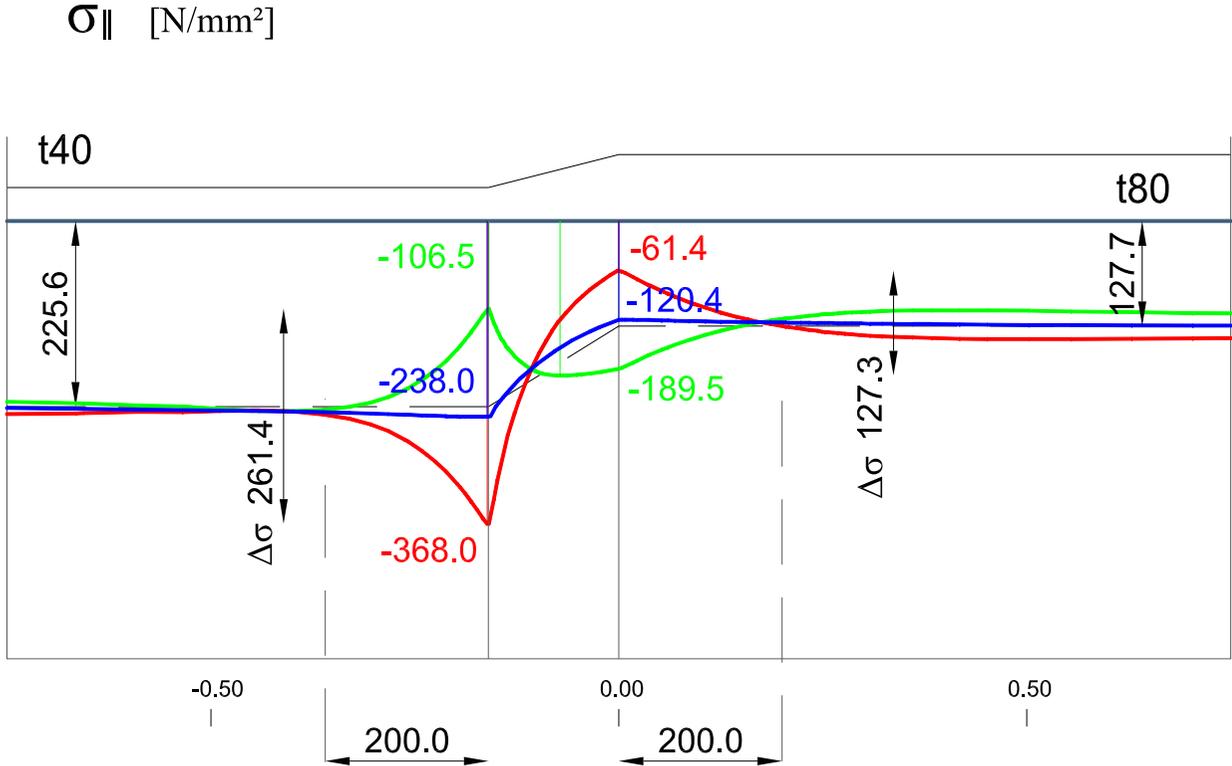
σ_{\parallel} [N/mm²]



Legende : — Verlaufend, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-39: Spannungen parallel zum Schnitt

Im Folgenden werden die Spannungsvorgänge im Obergurt des Querschnittes betrachtet. Diese sind in Abbildung 5-40 dargestellt. Die Normalspannungen beginnen sich ab ca. 200 mm vor dem Dickensprung an der Oberseite des Gurtes zu konzentrieren. Beim Modell „Abrupt Dick“ ist der plötzliche Übergang der Gurtstärke gekennzeichnet durch einen extremen Spannungswechsel im Gurtblech. Die Bleche werden an der Kante des Dickensprunges stark beansprucht. Durch den stetigen Übergang der Dicke treten weite Bereiche der Krümmung- und Gegenkrümmung auf. Der eigentliche Spannungs- und Verformungszustand nach der technischen Biegetheorie, wie er ab ca. 200 mm vor und nach dem Gurtdickensprung herrscht, wird durch den lokalen Exzentrizitätseffekt im Gurt umgedreht. Der dickere Gurt des Querschnitts 2 erzwingt eine größere Verformung und höhere Spannungsunterschiede im dünneren Gurt. Die Spannungsunterschiede $\Delta\sigma$ zwischen Gurtoberseite und Gurtunterseite reduzieren sich etwa auf die Hälfte jener Ergebnisse, die beim Modell „Abrupt Dick“ auftreten.



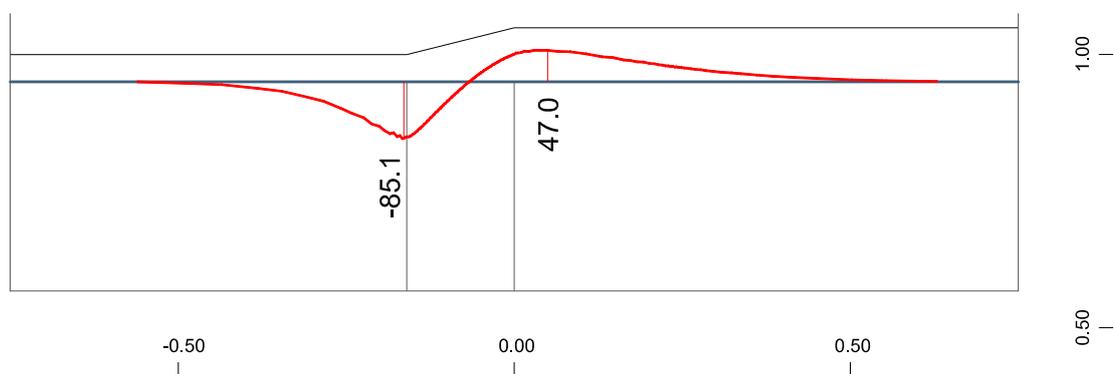
Legende :

- $\sigma_{OG0,2}$
- $\sigma_{OGm,2}$
- $\sigma_{OGu,2}$

Abbildung 5-40: Normalspannungen im Gurt

Die Abbildung 5-41 zeigt den Spannungsverlauf normal zum Schnitt in der Kontaktfläche zwischen Obergurt und Steg. Es kommt zu einer Verschiebung des Spannungsbildes in den Querschnitt 1 hinein. Der Bereich der Druckeinleitung konzentriert sich vor dem Gurtdickenübergang mit Spannungen bis $85,1 \text{ N/mm}^2$. Der flächengleiche Zugbereich erstreckt sich weiter in den Querschnitt 2 und erreicht maximal $47,0 \text{ N/mm}^2$. Die dünnere Gurtplatte besitzt weniger lastverteilende Wirkung als der dickere Gurt des Querschnitts 2.

σ_L [N/mm²]

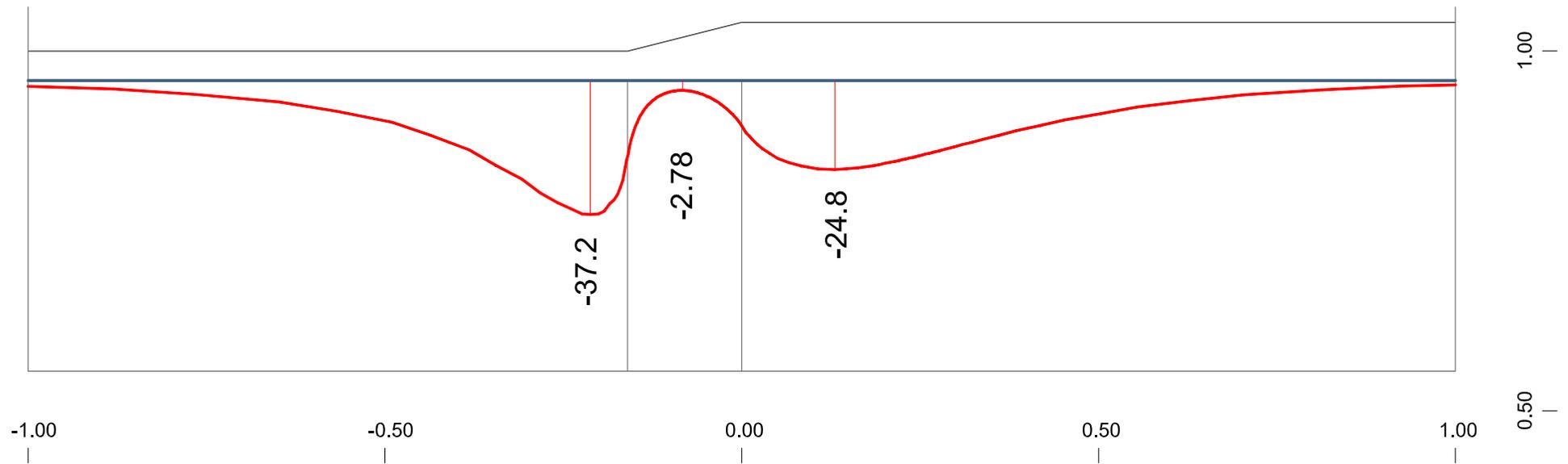


Legende : — Verlaufend, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-41: Spannungen normal zum Schnitt

Die Schubspannungen werden in Abbildung 5-42 dargestellt. Ähnlich wie bei den Spannungen normal zum Schnitt treten diese vor dem Dickensprung konzentrierter auf. Die Aufteilung erfolgt zu je etwa 50% vor und nach dem Gurtdickensprung. Durch unbegrenzt ideal elastisches Verhalten wird somit bereits die Hälfte der Gurtkraftdifferenz dN in den dünnen Gurt des Querschnitts 1 eingeleitet. Diese Steigerung der Gurtnormalkraft $N_{OG,1}$ kann den Gurt unter Berücksichtigung duktilen Materialverhaltens bis zur plastischen Grenzlast beanspruchen. Dabei ändert sich jedoch das Systemverhalten und die dargestellten Spannungsbilder verlieren ihre Gültigkeit.

τ [N/mm²]



Legende : — Verlaufsform, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-42: Schubspannungen im Schnitt

In der Abbildung 5-43 sind sowohl Schub-, als auch Normalspannungen in der Schnittfuge zwischen Obergurt und Steg eingetragen. Die maßgeblichen Maximalspannungen sind örtlich um etwa 50 mm versetzt. Die maximale Normalspannung erreicht dabei etwa das 2,3fache der Schubspannung. Bei Nachweisen, die die lokalen Spannungsstörungen des Dickenüberganges beinhalten, ist die Überlagerung dieser Spannungen zu berücksichtigen.

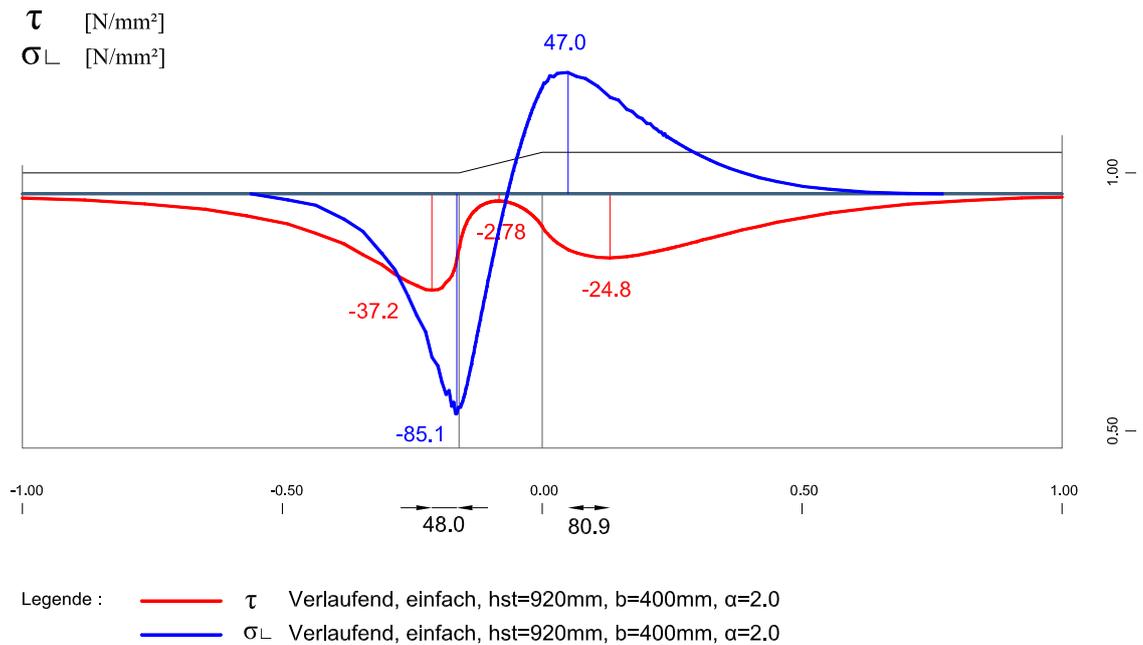
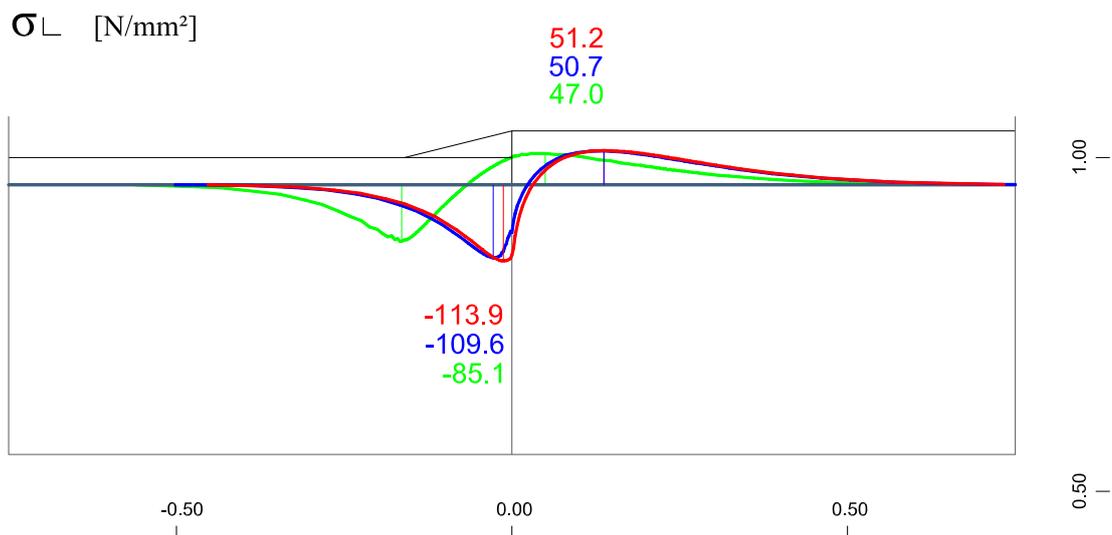


Abbildung 5-43: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt

5.9) Vergleich der Modelle Abrupt Dick, Schweißnaht und Verlauffend

Durch einen gleichmäßigeren Übergang der Gurtdicken ineinander kommt es zu Veränderungen im Spannungsbild. Grundsätzlich werden Spitzenwerte reduziert und die Spannungen gleichmäßiger verteilt. Vergleichswerte wie die lokale Schubkraft dN und das lokale Moment dM sind für die drei gegenständlichen Modelle gleich. Die Modelle „Abrupt Dick“ und „Schweißnaht“ unterscheiden sich nur geringfügig. Das Modell „Verlauffend“ zeigt die Entwicklung zum Fall einer über die ganze Trägerlänge linear veränderlichen Gurtdicke an.

Die Spannungen normal zur Schnittrichtung sind in der Abbildung 5-44 ersichtlich. Es zeigt sich durch den flacheren Übergang zwischen den Gurtdicken eine Verlagerung der Spannungen zum Querschnitt I hin. Ein weiter gezogener Verlauf der Spannungen normal zum Schnitt bedeutet einen längeren Hebelarm. Um mit dem konstanten lokalen Moment dM im Gleichgewicht zu stehen, sinken die Spannungen entsprechend ab.



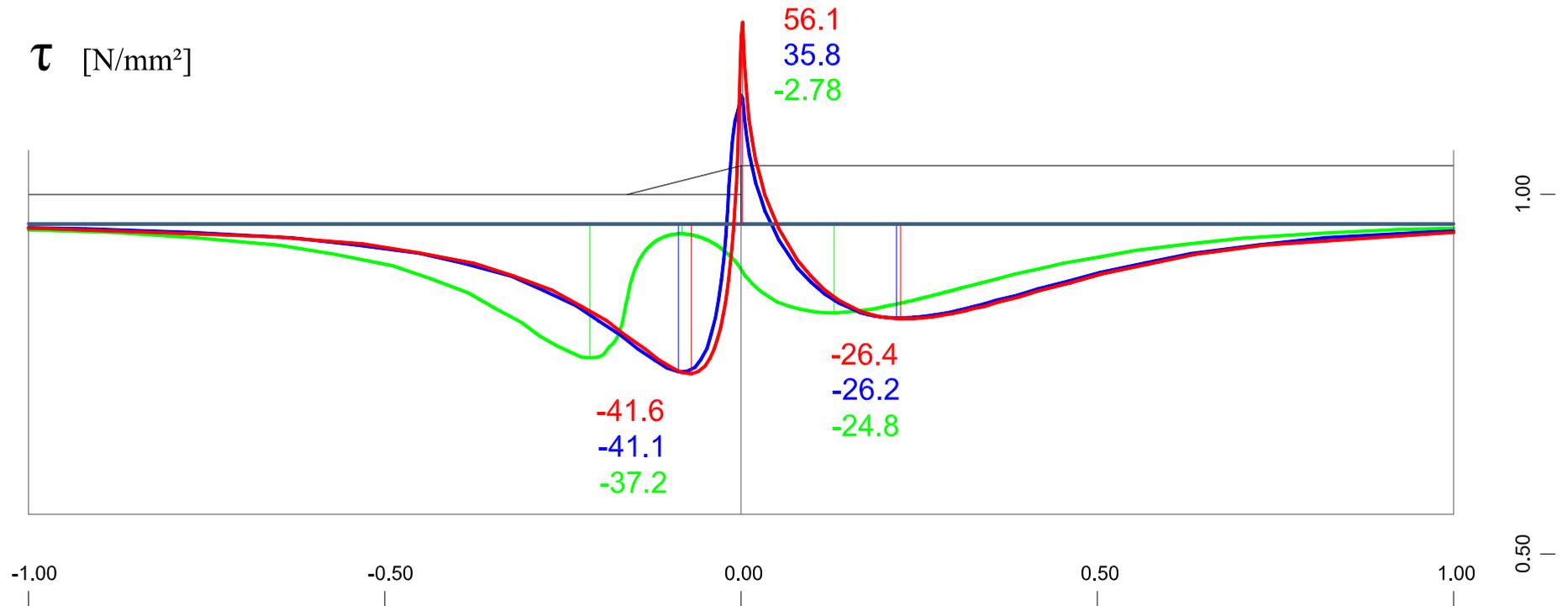
Legende :

- Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
- Schweißnaht, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
- Verlauffend, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-44: Vergleich der Spannungen normal zum Schnitt der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlauffend“, einfach symmetrisch

Im Schubspannungsverlauf kommt es zu einem beträchtlichen Absinken der Spannung S_2 am Dickensprung. Es zeigt sich somit, dass der kontinuierliche Übergang der Gurtdicken diesen sensiblen Punkt bereits merklich verbessert. Die Maxima S_1 und S_3 der Schubspannungen zeigen nur geringe Veränderungen. Die Abschrägung verändert weiters nicht die gegebenenfalls vorhandene Notwendigkeit einer Einbeziehung der Schubspannungen und Spannungen normal zur Schnittrichtung in die Nachweisführung. Die örtliche Nähe beider Spannungsspitzen bleibt bestehen.

Hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit bietet die Ausführung eines verlaufenden Dickenüberganges die Möglichkeit, die Kerbanfälligkeit des Details zu verringern.



- Legende :
- Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Schweißnaht, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Verlaufend, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 5-45: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“, einfach symmetrisch

6) Parameterstudie

6.1) Allgemein

Zur Entwicklung eines geeigneten Ingenieurmodells zur Beschreibung des Schubspannungsverlaufes im Schnitt zwischen Obergurt und Steg ist es nötig, das Verhalten bei variierenden Bedingungen zu beobachten. Das Ingenieurmodell wird aus den gewonnenen Daten aus dem FE-Programm erstellt. Ziel ist es, die Auswirkungen auf die Ergebnisse aus der FE-Berechnung, bei Änderung eines Parameters zu beobachten und Schlüsse auf die wirkenden Prozesse zu ziehen. Die Eingangsparameter in die Berechnung lassen sich einteilen in Schnittgrößen und geometrische Größen, sowie nach der Ausführungsart.

Verwendete Parameter:

- Schnittgrößen
- Geometrie
- Ausführungsart

Es wird der Einfluss von Moment und Querkraft auf die Spannung am Ort des Dickensprunges analysiert. Die Auswirkung einer zusätzlichen Normalkraft wird in dieser Arbeit nicht untersucht. Die geometrischen Größen beschreiben alle Abmessungen der Querschnitte 1 bis 5. Der lokale Übergang zwischen den Querschnitten, der genau genommen ebenfalls eine geometrische Größe darstellt, wird durch die Ausführungsart beschrieben. Diese bezeichnet die in Kapitel 5) besprochenen Modelle. Im Folgenden werden jedoch nur die Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“ einer Parameterstudie unterzogen. Ebenfalls wird bei der Ausführung unterschieden, ob ein einfach symmetrischer Querschnitt, mit einem Dickensprung nur am Obergurt, oder ein doppelt symmetrischer Querschnitt, mit einem Dickensprung an Ober- und Untergurt zur Anwendung kommt. Je nach Modell und Ausführung wechselt der Grundquerschnitt 1 vor dem Dickensprung auf einen der Querschnitte 2 bis 5 danach.

Bei der Parameterstudie werden die Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Schubspannungen untersucht. Dazu werden alle Schubspannungsmaxima und Lasteinleitungslängen aufgenommen und deren Verlauf dargestellt.

- Schubspannungen S [N/mm²]
- Lasteinleitungslängen L [mm]

Die Lasteinleitungslängen L_1 und L_2 umschreiben den Einflussbereich, in dem der Dickensprung Auswirkungen auf die Schubspannungen zeigt. Sie sind als Strecke zwischen dem Gurtdickensprung und der Stelle, an der die vorhandene lokale Schubspannung auf 5% des Maximalwertes $S_{1_{Lokal}}$ absinkt, definiert. Die lokale Schubspannung ist dabei jene, die ausschließlich zufolge der lokalen Effekte im Bereich des Dickensprunges entsteht.

$$S_1 = S_{1_{Lokal}} + S_{1_{techn.Biegelehre}}$$

Bei reiner Biegung, bedeutet das

$$S_{1_{Lokal}} = S_1 \quad \text{da gilt } S_{1_{techn.Biegelehre}} = 0$$

Bei doppelt symmetrischen Querschnitten sind die Spannungen an Ober- und Untergurt sind näherungsweise gegengleich. Bei extremen Spannungsmaxima können jedoch Spannungsdifferenzen zwischen den Gurten auftreten. Diese sind zumeist auf geringfügig unterschiedliche Schnittführungen zurückzuführen.

Nachfolgend werden zunächst alle vorhandenen Eingangswerte erklärt und begründet, weshalb die gewählten Parameter variiert werden. Danach folgen die Studien an den Schnittgrößen und den geometrischen Größen parallel für die Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“. Im nächsten Kapitel wird versucht, die berechneten Spannungen durch ein Ingenieurmodell anzunähern.

6.2) Eingangsparmeter

6.2.1) Schnittgrößen

Es wird unterschieden in Art und Betrag der auf den Querschnitt wirkenden Schnittgrößen. Es werden, wie in Tabelle 6-2 dargestellt, sowohl Modelle mit variierender alleiniger Momentenbelastung, als auch Modelle mit konstanter Momentenbeanspruchung bei variierender Querkraft untersucht.

Auftretende Schnittgrößen sind

- Moment M [kNm]
- Querkraft V [kN]

Das Moment $M = 4077,2$ kNm kennzeichnet die vollständige elastische Ausnutzung des Grundquerschnitts QS 1. Durch die ideal elastische Berechnung ist eine Belastung darüber hinaus möglich. Das Moment bewirkt in Kombination mit der Normalkraft den Normalspannungszustand im Querschnitt. Aus der Differenz der Gurtnormalkräfte der Querschnitte vor (QS 1) und nach (QS 2 bis 5) dem Dickensprung lässt sich die Kraft dN berechnen.

$$dN = N_{OG,1} - N_{OG,2 \text{ bis } 5}$$

Die Gurtkraftdifferenz dN ist unabhängig von der Querkraft. Eine auf den Querschnitt wirkende Normalkraft beeinflusst dN da sich die Querschnittflächen, abhängig vom Parameter α , vor und nach dem Dickensprung unterscheiden. Die Normalkraft wurde nicht als veränderlicher Parameter gewählt und über alle Modelle als nicht wirkend angesetzt. Bei einem wirkenden Moment ist eine Abhängigkeit von allen geometrischen Parametern gegeben. Das zugehörige entstehende lokale Moment dM ist ebenfalls direkt von den Normalkräften abhängig. Es zeigen sich daher die gleichen Wirkungsweisen wie bei der Gurtkraftdifferenz.

Der Schubspannungsverlauf des lokalen Problems eines Dickensprunges τ_{Lokal} verändert sich um den Wert der Schubspannungen nach der technischen Biegelehre $\tau_{techn.Biegelehre}$. Die Schubspannungen nach der technischen Biegelehre sind direkt abhängig von der am Querschnitt wirkenden Querkraft.

$$\tau = \tau_{techn.Biegelehre} + \tau_{Lokal}$$

Bei Belastung mit reinem Moment ergibt sich

$$\tau_{Lokal} = \tau \quad \text{da gilt } \tau_{techn.Biegelehre} = 0$$

Entsprechend Kapitel 4.3) wurden drei Lastfälle untersucht. Um die Vergleichbarkeit zu gewähren, wirkt in allen Lastfällen an der Stelle des Dickensprunges das Moment $M = 4077,2 \text{ kNm}$.

Tabelle 6-1: Lastfälle nach Kapitel 4.3)

Lastfall / Belastung	V-Verlauf	M-Verlauf
Moment (4.3.2)	0	konstant
Einzellast (4.3.3)	konstant	linear
Gleichlast (4.3.4)	linear	quadratische Parabel

Durch die Untersuchung der lokalen Schubspannungen τ_{Lokal} um den Gurtdickensprung unter verschiedenen Querkraftverläufen lässt sich die Auswirkung der Querkraft auf den Schubspannungszustand im Querschnitt bestimmen. Bedingt durch die unterschiedlichen Querschnitte vor und nach dem Dickensprung ergibt sich ein Sprung im Verlauf der Schubspannungen nach der technischen Biegelehre. Zusätzlich kommt es bei der Belastung durch eine Gleichlast zu einem linear veränderlichen Querkraft- und Schubspannungsverlauf nach der technischen Biegelehre.

Tabelle 6-2: Schnittgrößen Parameter

	Belastung	SG	M variiert				
V variiert	Moment	M [kNm]	2000	3000	4077,2	5000	6000
		V [kN]	0	0	0	0	0
	Gleichlast	M [kNm]			4077,2		
		V [kN]			543,6		
	Einzellast	M [kNm]			4077,2		
		V [kN]			815,4		

Die gekennzeichnete fettgedruckte Variante zeigt die Belastung aus den Grunduntersuchungen des Kapitels 5).

6.2.2) Geometrische Größen

Unter diesem Begriff sind alle Abmessungen der Regelquerschnitte 1 bis 5 zusammengefasst. Eine Zusammenstellung aller geometrischen Größen findet sich in Kapitel 4.1) und 4.2). Diese Arbeit beschränkt sich darauf, drei Abmessungen als Parameter zu variieren.

Die geometrischen Parameter sind

- Querschnittsbreite b
- Steghöhe h_{st}
- Verhältnis der Gurticken α
bzw. E-Modulverhältnis

Die Querschnittsbreite b geht linear in die Berechnung des Normalspannungsverlaufes des Querschnitts ein. Sie entspricht der Breite des Ober- und Untergurtes gleichermaßen, so dass die Querschnitte aller Modelle zumindest einfach symmetrisch sind. Ebenso direkten Einfluss übt die Stegdicke t_{st} aus, die über den Schubfluss in die Schubspannungen mit eingeht.

Die Steghöhe h_{st} wurde als Parameter gewählt, um ein von den sich verändernden Gurticken unabhängiges Modell zu gewährleisten. Der Einfluss der Höhe auf das Spannungsbild erweist sich als sehr vielfältig und schwierig zu erfassen. Zusätzlich werden α und β eingeführt, um einen Zusammenhang zwischen den variierenden Abmessungen herzustellen.

Ausgehend von den Basisquerschnitten aus Kapitel 4.2.2) wird jeweils ein Parameter variiert und dessen Auswirkungen auf den Schubspannungsverlauf beobachtet - alle anderen Parameter werden festgehalten. Abbildung 6-1 zeigt den untersuchten Bereich aller geometrischen Parameter. Bei der Veränderung der Schnittgrößen bezieht sich die Berechnung auf die unveränderten Basisquerschnitte.

Um das Verhältnis zwischen der Gurtbreite und der Steghöhe zu beschreiben, wurde β definiert.

$$\beta = \frac{h_{Steg}}{b_{Gurt}}$$

Die Tabelle 6-3 zeigt den untersuchten Parameterbereich. In der Ausführung sind Werte von etwa 1,0 bis 5,0 üblich. Bei einer Veränderung der Breite bleibt die Höhe mit $h_{St} = 920$ mm bestehen – bei Veränderung der Höhe wird die Breite auf $b = 400$ mm festgelegt.

Tabelle 6-3: Geometrischer Parameter β , Steghöhe und Breite

β [-]	Höhe Steg [mm]	b variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h variiert	520			1,3		
	720			1,8		
	920	4,6	3,1	2,3	1,8	1,5
	1120			2,8		
	1920			4,8		
	2720			6,8		
	3320			8,3		

Die fett gedruckte Variante zeigt die Abmessungen der Modelle aus den Grunduntersuchungen von Kapitel 5).

Die Gurtdicken werden unterschieden in ihrer Zugehörigkeit zum Querschnitt vor oder nach dem Dickensprung. Die Gurtdicke des Ausgangsquerschnitts (QS 1) wird, mit Ausnahme von Kapitel 6.4.6), grundsätzlich nicht verändert. Die Ober- und Untergurtdicke des Querschnitts nach dem Dickensprung wird entsprechend dem Parameterbereich variiert. Im Falle eines einfach symmetrischen Querschnitts verändert sich nur die Dicke des Obergurtes, wobei der Untergurt unabhängig davon konstant bleibt. Bei einem doppelt symmetrischen Querschnitt ändern sich beide Gurtdicken synchron. Die Differenz der Gurtdicken liefert die Gurtdickendifferenz dt .

$$dt = t_{OG,2 \text{ bis } 3} - t_{OG,1}$$

Der zugehörige Parameter α wird in Abhängigkeit von der Gurtdicke und des E-Moduls des Querschnitts 1 definiert.

$$\alpha = \frac{t_{OG,2 \text{ bis } 3}}{t_{OG,1}} = \frac{E_{OG,4 \text{ bis } 5}}{E_{OG,1}}$$

Betrachtet werden, ausgehend von der fixen Gurtdicke $t_{OG,1} = 40 \text{ mm}$ und dem E-Modul $E_{OG,1} = 210.000 \text{ N/mm}^2$, der Bereich von $\alpha=1,0$ bis $3,0$. Dabei entspricht $1,0$ einem ebenen Übergang ohne Dickensprung und $3,0$ einer Verdreifachung der Dicke.

Tabelle 6-4: Geometrischer Parameter α , Gurtdicke

α [-]	$t_{OG,1}$ [mm]	$t_{OG,2}$ variiert [mm]				
		40	60	80	100	120
	40	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0

Die fett gedruckte Variante zeigt die Abmessungen der Modelle aus den Grunduntersuchungen von Kapitel 5).

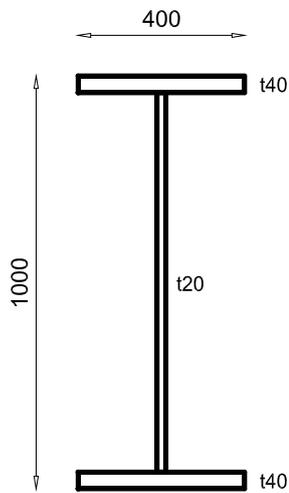
Bei der gewählten Trägerlänge von 10,0 m können sich bis zu einer Trägerhöhe von etwa 2500 mm außerhalb des Wirkungsbereiches des Dickensprunges, Spannungen nach der technischen Biegelehre einstellen. Größere Trägerhöhen wie bei $h_{st} = 3320$ mm erfordern größere Systemlängen und bedingen damit bei begrenzter Rechnerleistung eine geringere Netzdicke. Mit einer Verringerung der Netzdicke ist jedoch gleichzeitig ein Verlust der Genauigkeit verbunden. Die für diese Trägerhöhe gewonnenen Ergebnisse sind daher als Tendenz zu verstehen.

6.2.3) Ausführungsart

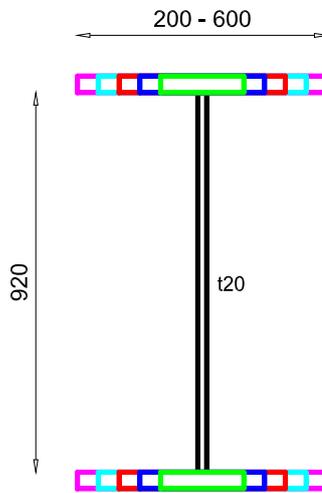
Als Ausführung wird die Art des Überganges zwischen den Querschnitten vor und nach dem Dickensprung verstanden. Beschrieben wird dieser Übergang durch die in Kapitel 5) beschriebenen Modelle. Im Folgenden werden jedoch nur die Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“ einer Parameterstudie unterzogen. Ebenfalls wird unterschieden, ob der Ausgangsquerschnitt QS 1 auf einen einfach symmetrischen oder einen doppelt symmetrischen Querschnitt übergeht.

Die Erweiterung des Ingenieurmodells um einen zusätzlichen Parameter, der die Unterschiede zwischen den Modellen „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“ beschreibt und somit auch deren Spannungsmaxima abbilden kann, scheint möglich. Darauf und auf eine Integrierung der beiden untersuchten Modelle in ein einziges Ingenieurmodell wurde jedoch verzichtet.

BASISQUERSCHNITT
QS 1



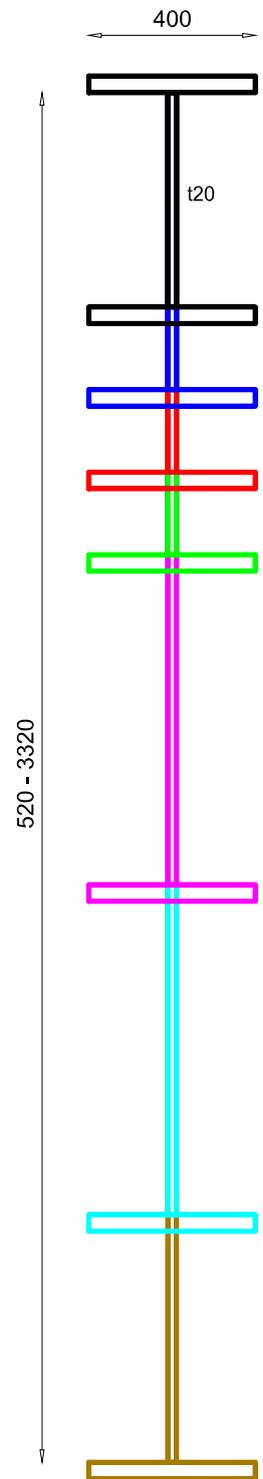
Variation der Breite b



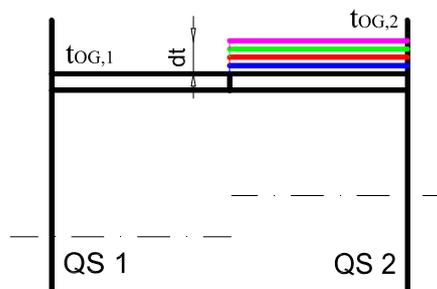
Legende zu b:

- b=200mm
- b=300mm
- b=400mm
- b=500mm
- b=600mm

Variation der Höhe h



Variation des Dickensprungs dt bzw. α



Legende zu α :

- $\alpha=1.0$
- $\alpha=1.5$
- $\alpha=2.0$
- $\alpha=2.5$
- $\alpha=3.0$

Legende zu hst:

- hst=520mm
- hst=720mm
- hst=920mm
- hst=1120mm
- hst=1920mm
- hst=2720mm
- hst=3320mm

Abbildung 6-1: Variation der geometrischen Parameter

6.3) Schnittgrößen

6.3.1) Allgemein

Es wurden an zwei Parametern Studien durchgeführt:

- Moment M
- Querkraft V

Die Veränderung der vorhandenen Schnittgrößen am Ort des Dickensprunges hat direkte Auswirkungen auf das Spannungsbild. Aus dem Moment entsteht die vorhandene Differenz der Gurtnormalkräfte dN . Diese bildet später die Grundlage für das Ingenieurmodell und besitzt großen Einfluss auf das Schubspannungsbild. Die Querkraft beeinflusst ebenfalls den allgemeinen Schubspannungszustand im Querschnitt. Sie hat jedoch, wie sich im Verlauf dieses Kapitels zeigt, nur geringen Einfluss auf die lokalen Spannungszustände im Bereich des Dickensprunges.

6.3.2) Verhalten der Gurtdifferenzkraft dN

Die Gurtkraftdifferenz dN ist direkt abhängig von dem am Dickensprung wirkenden Moment. Für den Übergang vom Querschnitt 1 auf den Querschnitt 2 ergibt sich zum Beispiel je aufgebrachtem Moment $M_{Ed} = 1000,0 \text{ kNm}$ am Dickensprung eine Gurtkraftdifferenz von $dN = 117,1 \text{ kN}$. Dieser lineare Zusammenhang gilt für das Modell „Abrupt Dick“ bei einfach symmetrischer Ausführung. Direkt abhängig von den Gurtnormalkräften ändert sich proportional der gesamte lokale Spannungszustand um den Dickensprung. Eine Verdopplung des Momentes bedeutet damit eine Verdopplung aller Schubspannungen. Die Querkraft hat keinen Einfluss auf die Gurtkraftdifferenz. Sie verändert jedoch den allgemeinen Schubspannungszustand nach der technischen Biegelehre.

Nachfolgend ist der Zusammenhang zwischen der Belastung mit einem variablen Moment und der daraus resultierenden Gurtnormalkraftdifferenz dN für das Modell „Abrupt Dick“ einfach symmetrisch exemplarisch dargestellt.

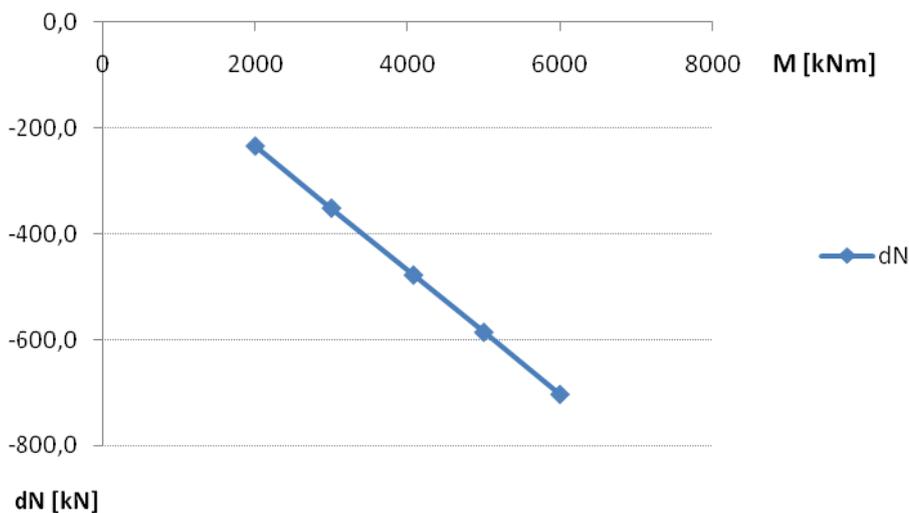


Abbildung 6-2: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Momentes

6.3.3) Verhalten der Spannungen bei Querkraftbeanspruchung

In den Abbildungen 6-5 bis 6-14 wird der Schubspannungsverlauf der Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“ mit jeweils ein- und zweiseitigem Dickensprung in Abhängigkeit von der Querkraft dargestellt. Schwarz strichliert und kotiert sind die Schubspannungen nach der technischen Biegetheorie. Diese besitzen aufgrund der Querschnittänderung eine Sprungstelle.

Bei den Lastfällen „Einzellast“ und „Gleichlast“ sind die Schubspannungen τ_{Lokal} , die sich aus den lokalen Spannungszuständen in der Umgebung der Gurtdickensprünge ergeben, einkotiert. Die Unterscheidung der Schubspannungen aus der technischen Biegelehre und einem, aus dem Dickensprung entstehenden, lokalen Anteil wurde bereits in Kapitel 4.4.2) dargelegt.

$$\tau = \tau_{techn.Biegelehre} + \tau_{Lokal}$$

Bei einer reinen Biegebeanspruchung können die lokalen Schubspannungen τ_{Lokal} direkt aus den Ergebnissen der FE-Berechnung abgelesen werden, da sich zufolge der technischen Biegetheorie keine Schubspannungen ergeben.

6.3.3.1) Modell Abrupt Dick, einfach und doppelt sym.

Tabelle 6-5: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“

	Belastung	Schubspannung [N/mm ²]					
		S1	S2	S3	S4	-	-
V variiert	Moment	-41,6	56,1	-26,4	13,9		
	Gleichlast	-43,2	54,7	-26,2	14,6		
	Einzellast	-43,9	53,8	-26,4	13,7		

Tabelle 6-6: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“

	Belastung	Schubspannung [N/mm ²]					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
V variiert	Moment	-27,4	67,7	-12,4	-24,1	40,3	-11,4
	Gleichlast	-28,0	66,4	-12,6	-25,3	40,1	-11,7
	Einzellast	-28,3	65,6	-12,8	-25,5	40,4	12,0

In den Tabellen 6-5 und 6-6 sind die sich unter verschiedenen Lastfällen ergebenden lokalen Schubspannungen τ_{Lokal} für das Modell „Abrupt Dick“ in einfach und doppelt symmetrischer Ausführung untereinander verglichen.

Es zeigt sich, dass die Querkraft zwar einen direkten Einfluss über die Schubspannungen nach der technischen Biegelehre auf den Verlauf der Schubspannungen ausübt, die lokalen Schubspannungen τ_{Lokal} aber nur geringfügig beeinflusst. Diese können somit näherungsweise ohne Berücksichtigung der Querkraft beschrieben werden. Im Ingenieurmodell wird deshalb auf eine Einbeziehung der Querkraft verzichtet und nur eine Abhängigkeit vom am Dickensprung herrschenden Moment angestrebt.

In Abbildung 6-3 und 6-4 wird der Verlauf der Gurtnormalkraftdifferenz und der darausfolgenden Spannungen für das Modell „Abrupt Dick“ mit einseitigem Dickensprung graphisch dargestellt. Die dargestellten Werte sind der Tabelle 6-5 und Anhang B 5 für den Obergurt zu entnehmen. Neben der sich verändernden Querkraft wirkt das Moment $M=4077,2$ kNm am Ort des Dickensprunges. Dieses verursacht die von der Querkraft unabhängige Gurtkraftdifferenz dN . Die geometrischen Abmessungen entsprechen den in Kapitel 4.2.2) besprochenen Basisquerschnitten.

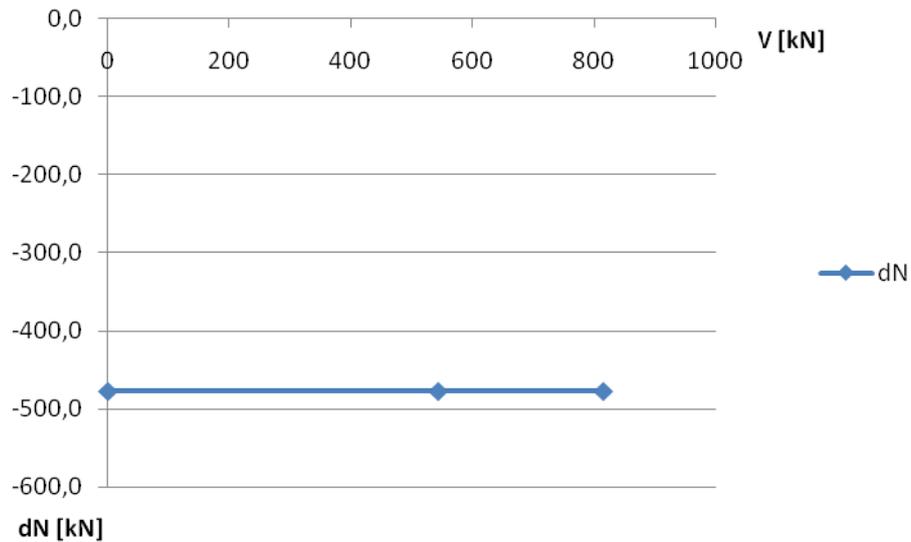


Abbildung 6-3: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Querkraft

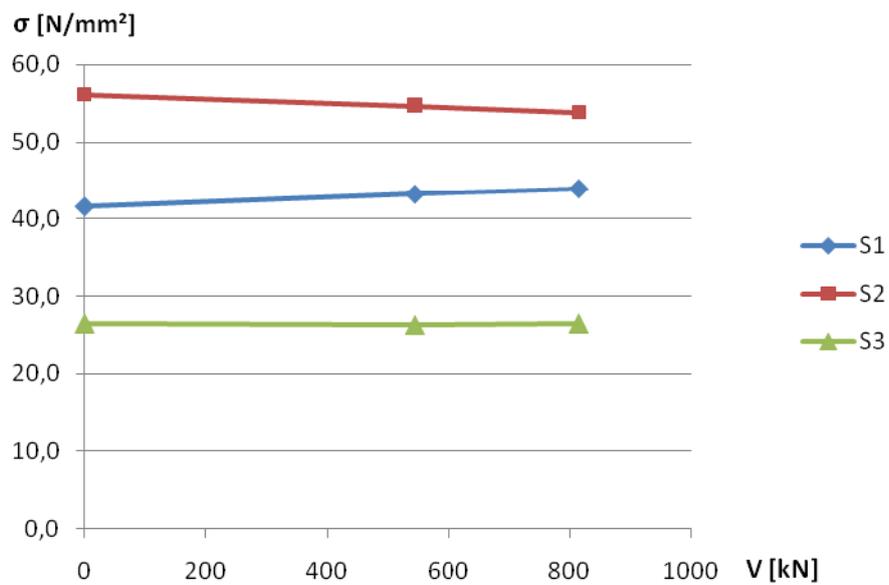


Abbildung 6-4: Verhalten der Spannungen bei Variation der Querkraft

Die nachfolgenden Abbildungen 6-5 bis 6-7 zeigen die zugehörigen Ergebnisse aus der FE-Berechnung.

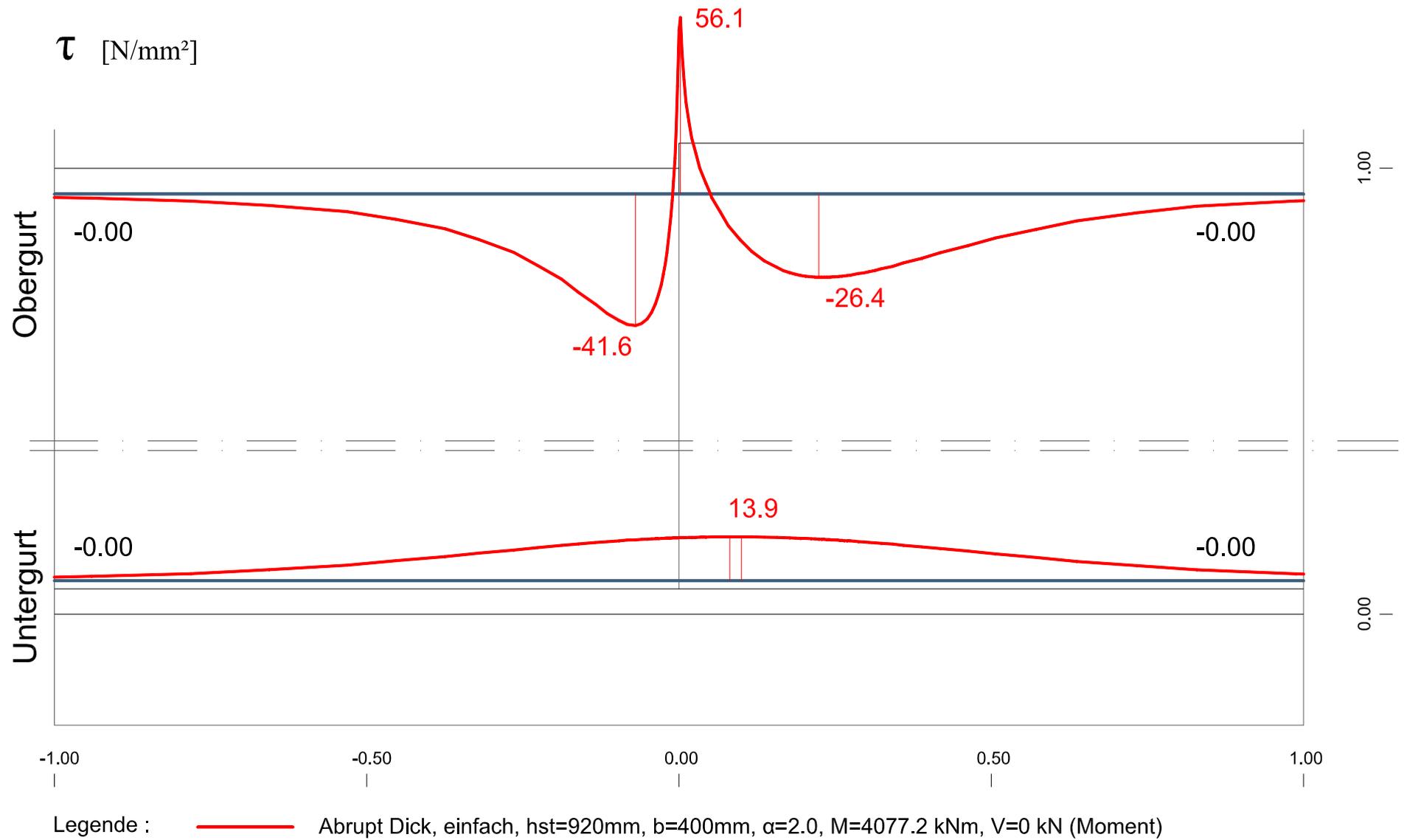


Abbildung 6-5: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 0,0 kN, über Träger konstant

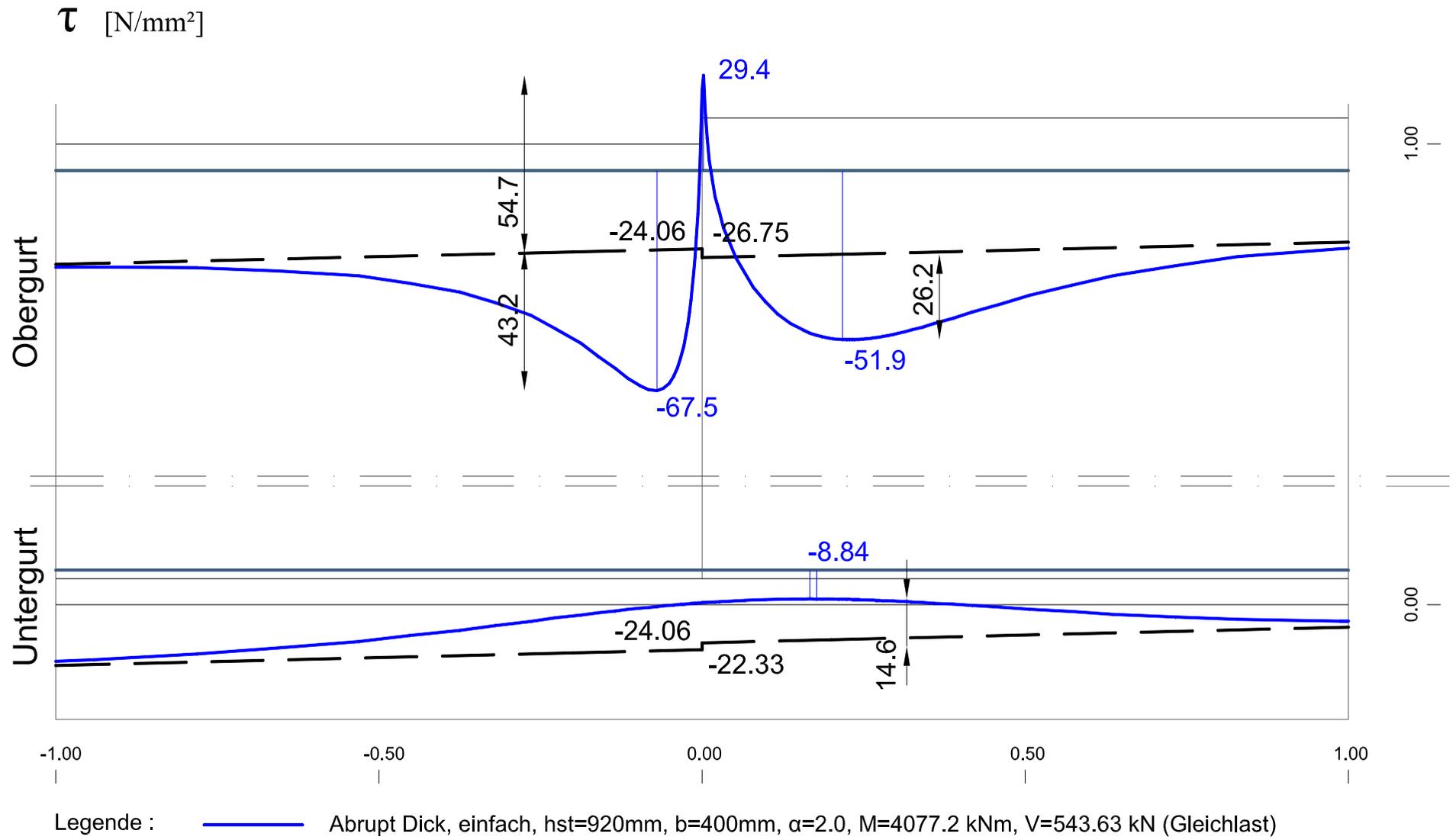


Abbildung 6-6: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V= 543,63$ kN, über Träger linear veränderlich

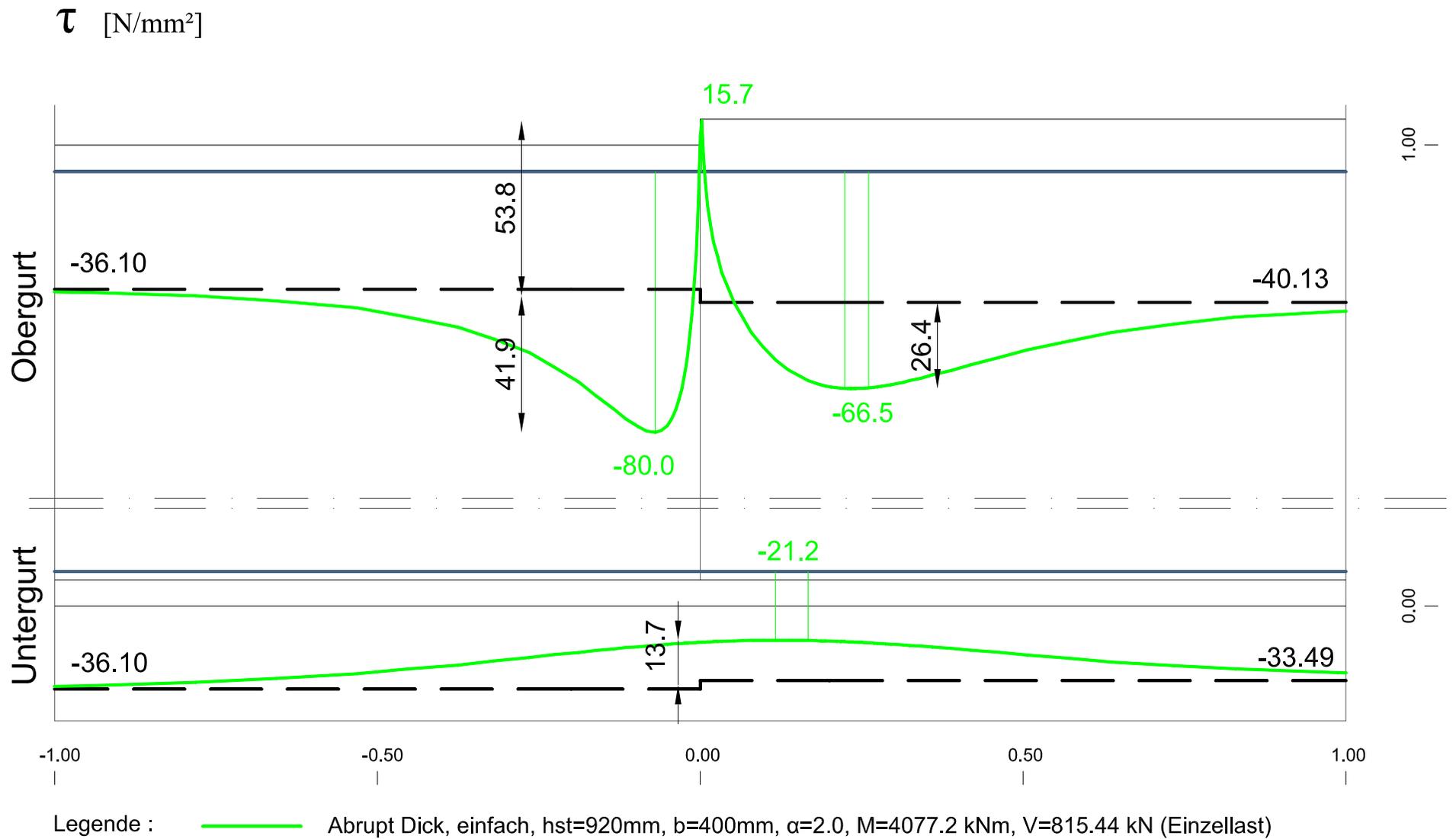


Abbildung 6-7: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V=815,44$ kN, über Träger konstant

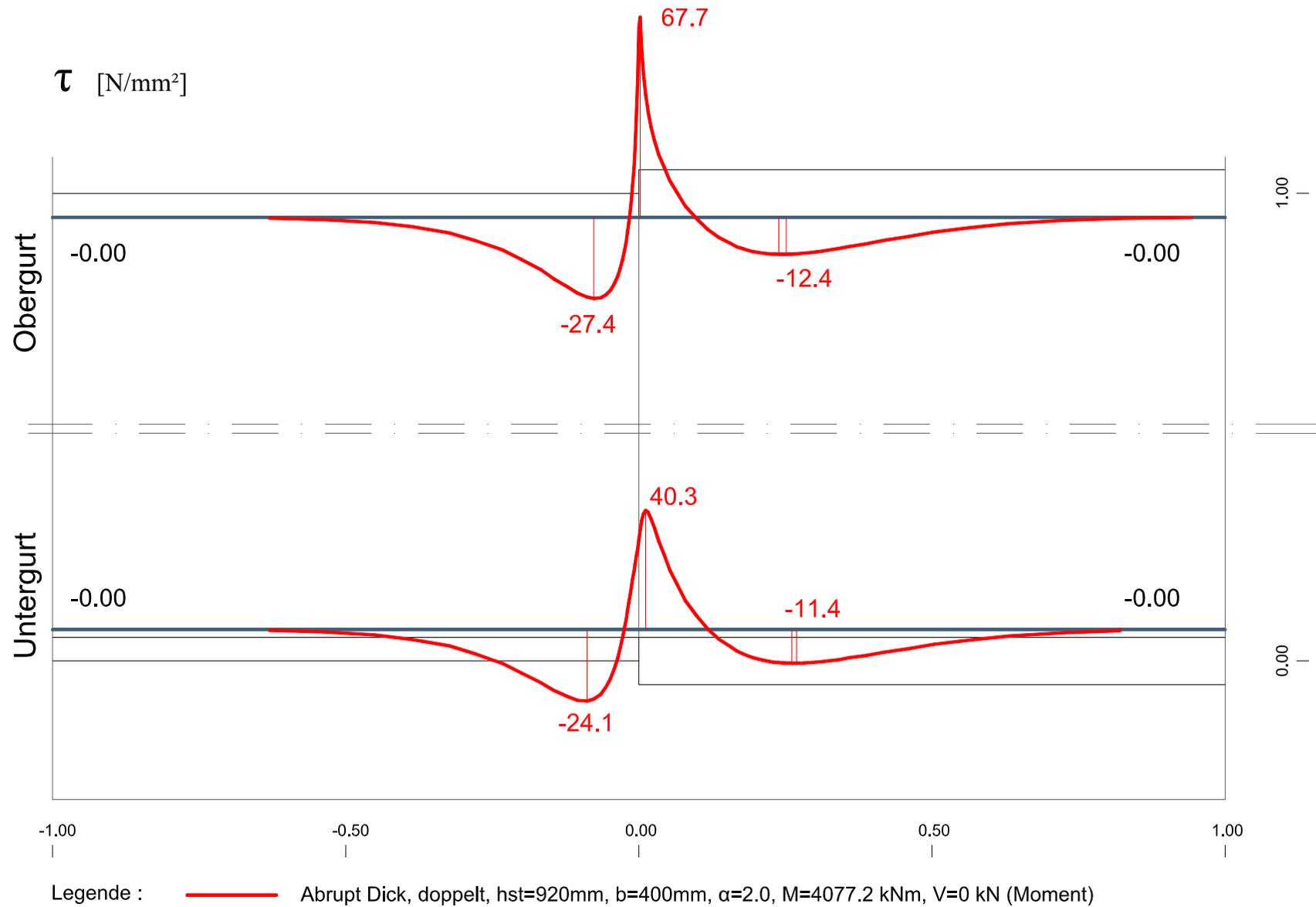


Abbildung 6-8: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V=0,0$ kN, über Träger konstant

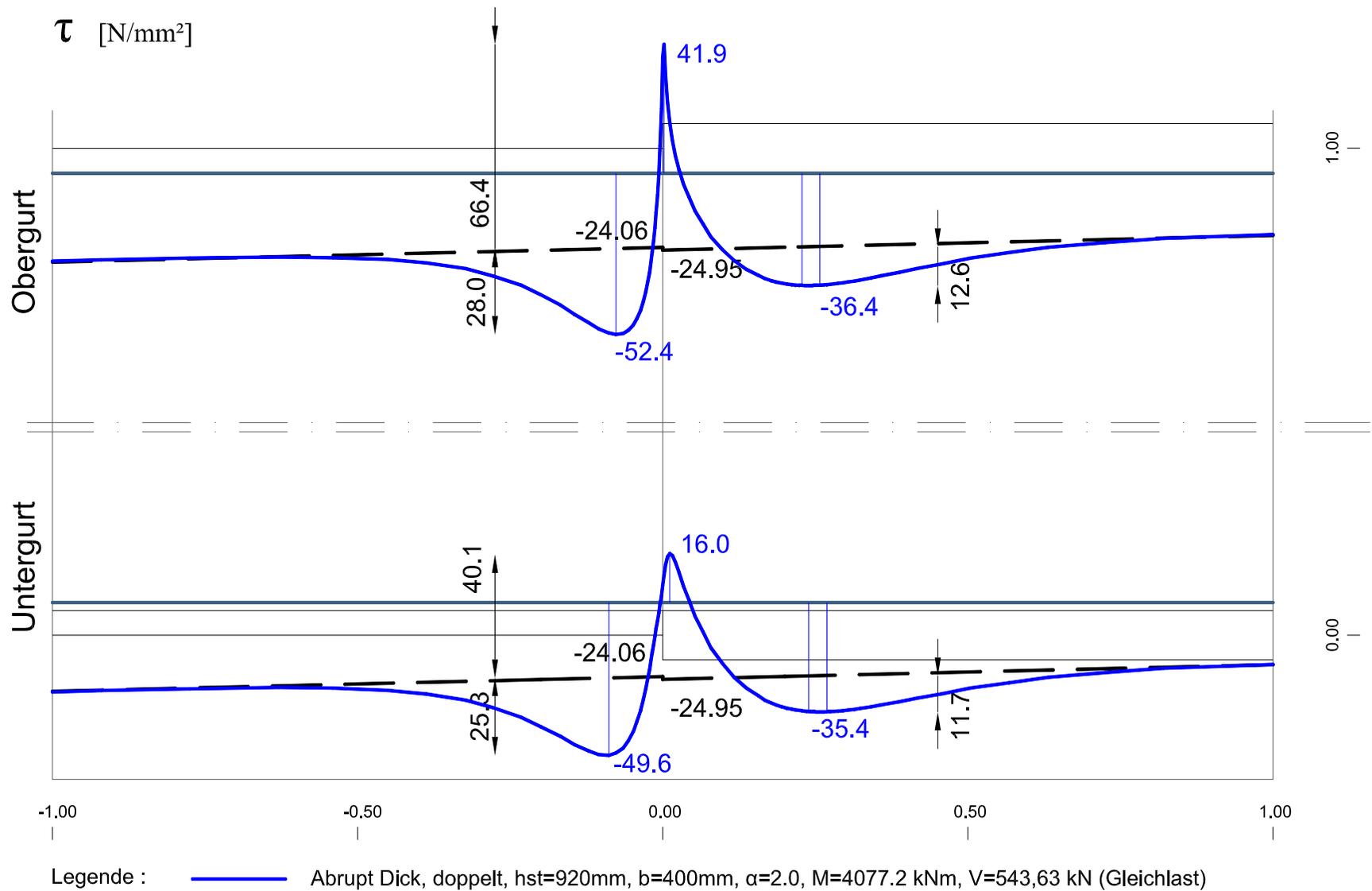


Abbildung 6-9: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V= 543,63$ kN, über Träger linear veränderlich

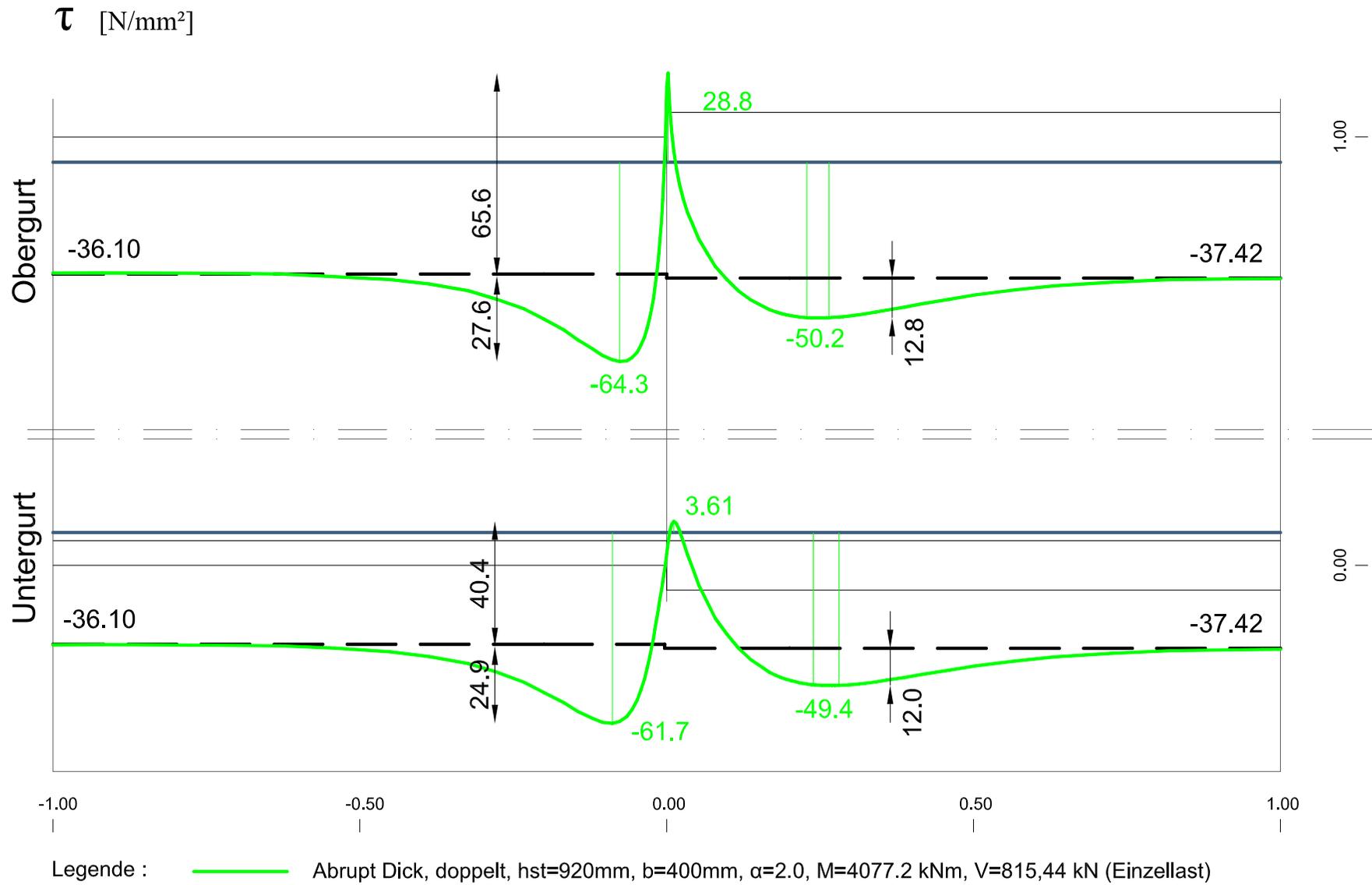


Abbildung 6-10: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V=815,44$ kN, über Träger konstant

6.3.3.2) Modell E-Modul, einfach symmetrisch

Tabelle 6-7: Schubspannungsspitzen beim Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“

	Belastung	Schubspannung [N/mm ²]					
		S1 Em	-	-	S2 Em	-	-
V variiert	Moment	-79,3			8,76		
	Gleichlast	-81,3			8,9		
	Einzellast	-82,6			7,3		

Das Modell „E-Modul“ liefert ähnlich konstante Werte bei den lokalen Schubspannungen für die Variation der Querkraft wie das Modell „Abrupt Dick“. Die Schubspannungen die aus dem Dickensprung entstehen erweisen sich also auch bei diesem Modell als näherungsweise unabhängig von der Querkraft. Die Belastung mit dem konstanten Moment $M = 4077,2 \text{ kNm}$ über die Trägerlänge verursacht die, von der Querkraft unabhängige, Gurtkraftdifferenz $dN = 532,85 \text{ kN}$. Abbildung 6-11 zeigt die Werte aus Tabelle 6-7. Die Abbildung 6-11 bis 6-14 zeigen die Ergebnisse der zugehörigen FE-Berechnung.

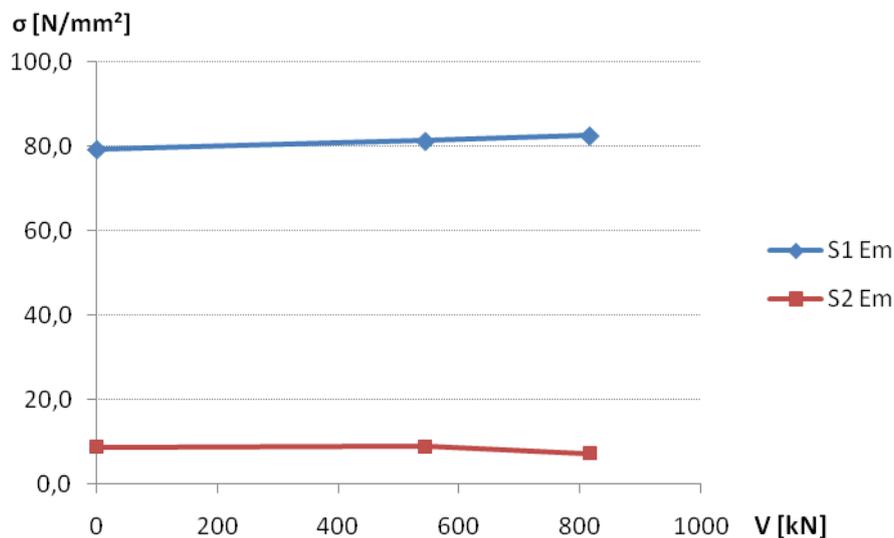


Abbildung 6-11: Verhalten der Spannungen bei Variation der Querkraft

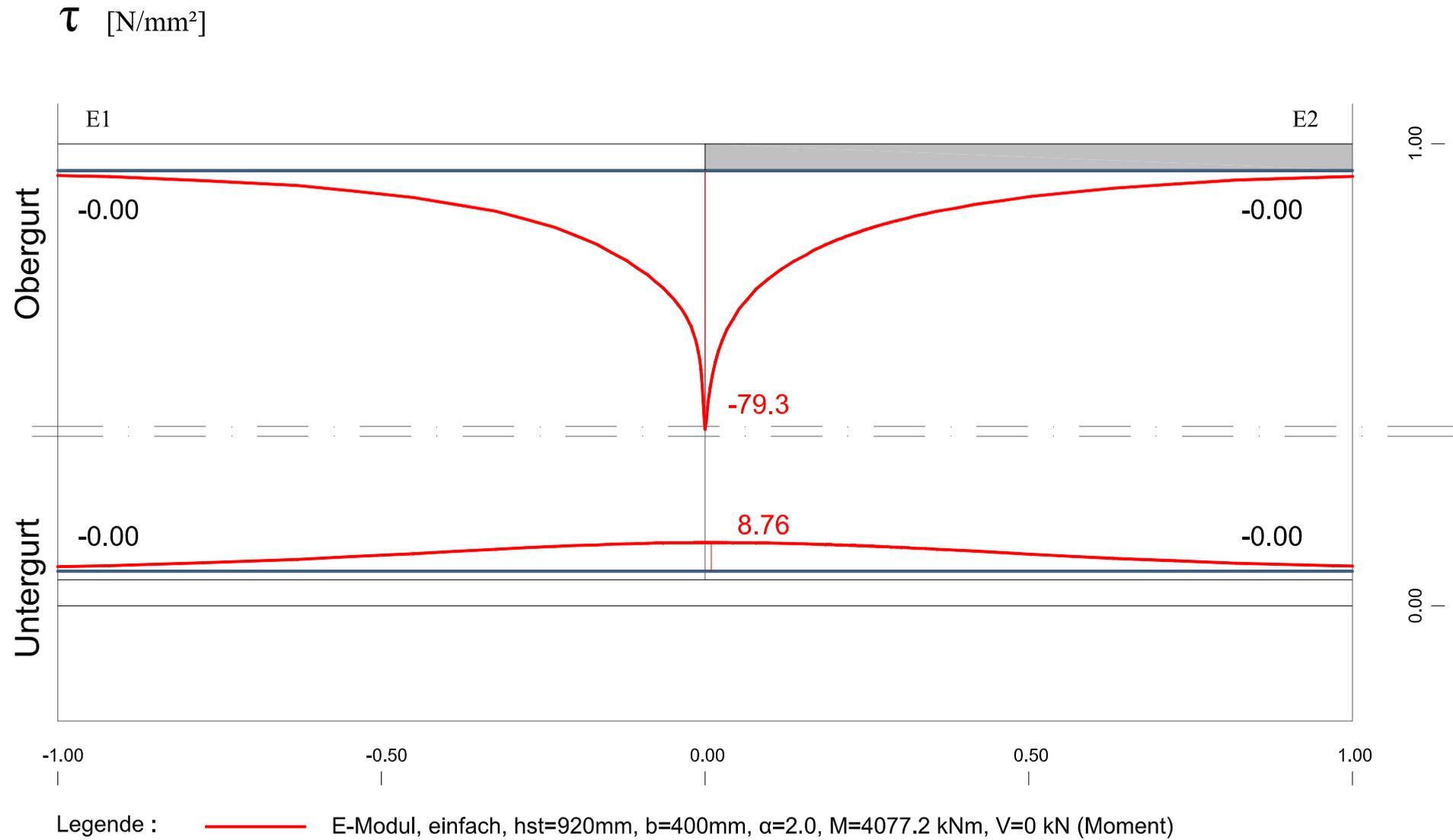


Abbildung 6-12: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 0,0 kN, über Träger konstant

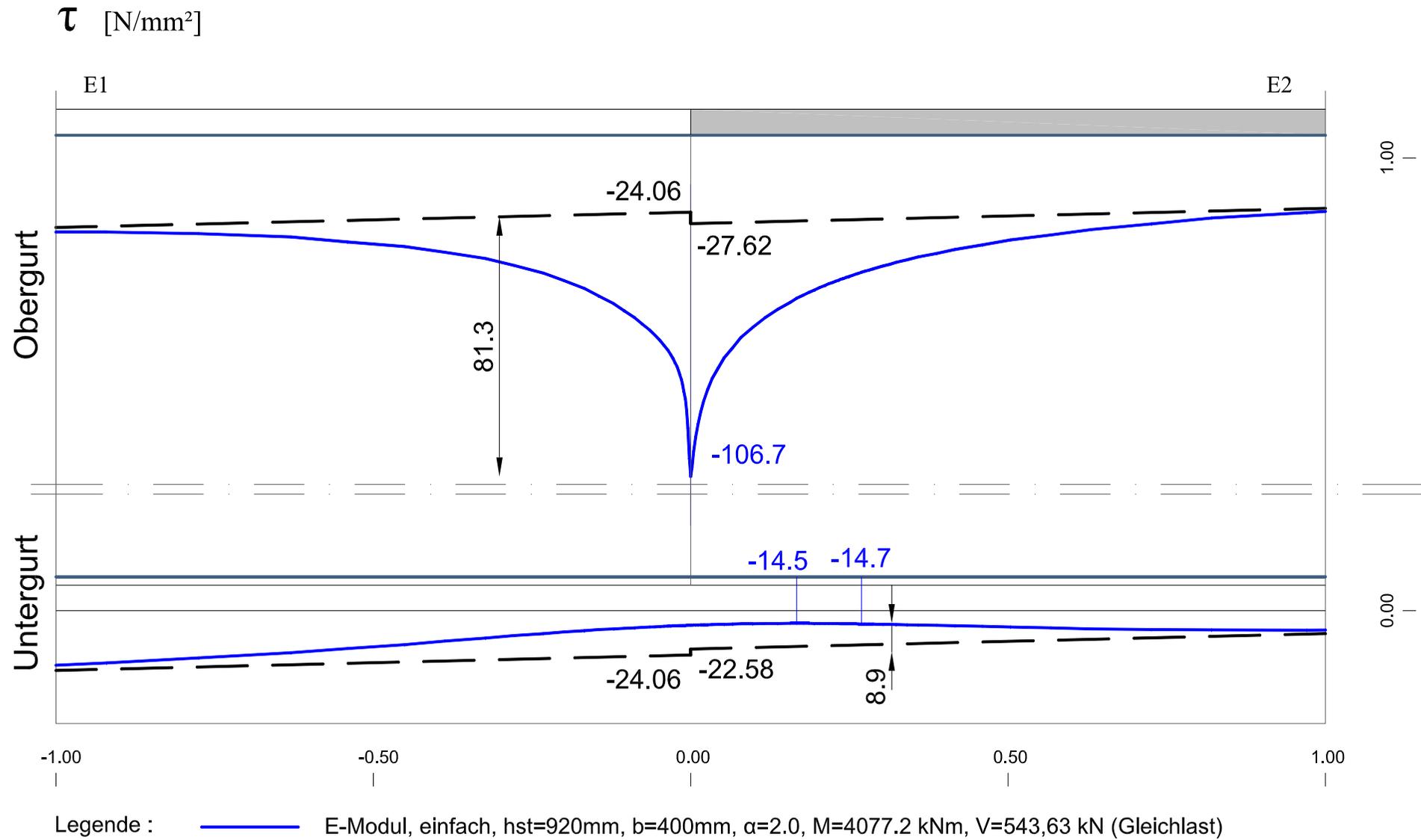


Abbildung 6-13: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 543,63 kN, über Träger linear veränderlich

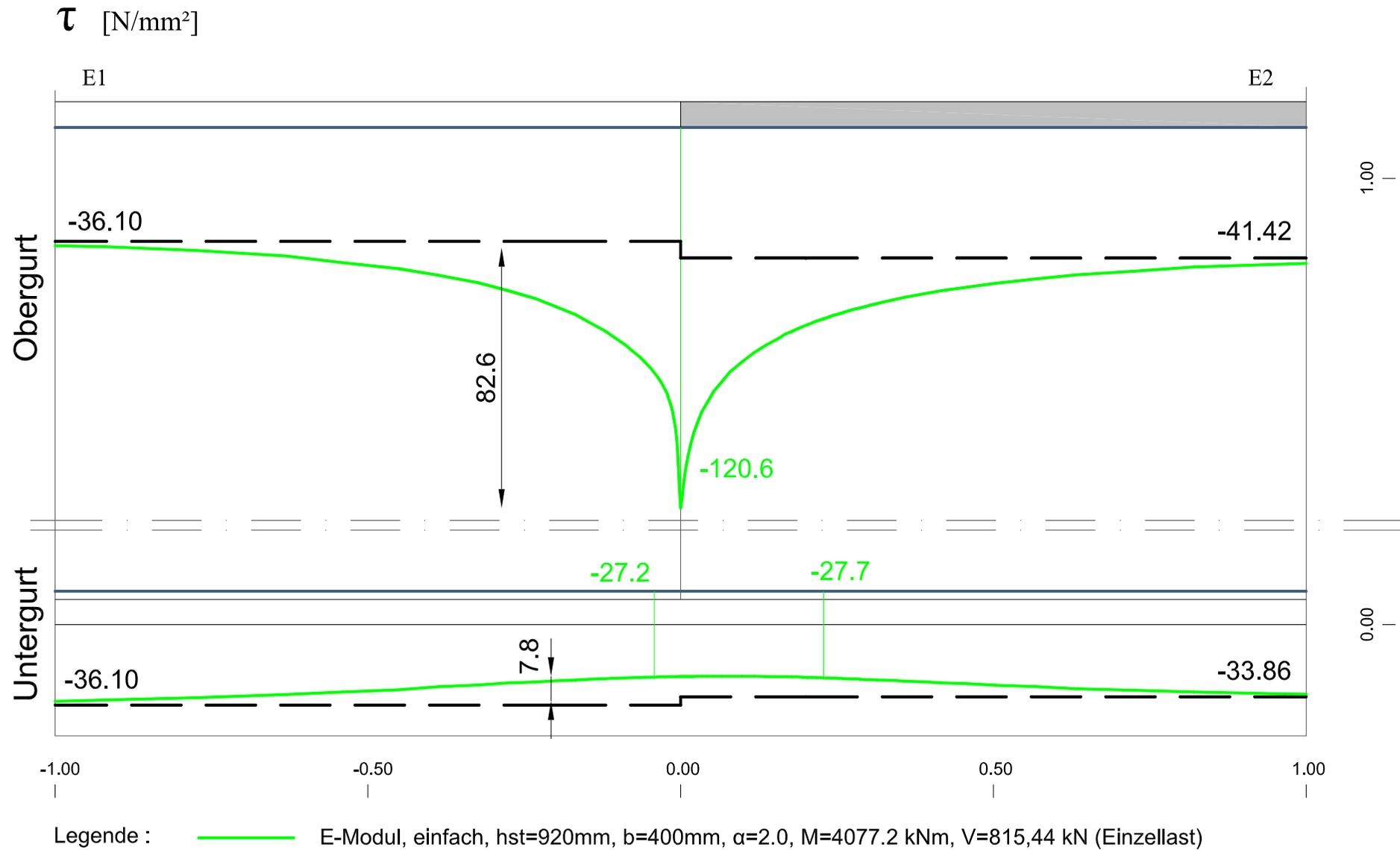


Abbildung 6-14: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 815,44 kN, über Träger konstant

6.3.4) Verhalten der Spannungen bei Momentenbeanspruchung

Zur Vollständigkeit sei auch die Variation des alleinigen Momentes angeführt. Dieses wirkt sich direkt proportional auf den gesamten Spannungszustand aus. Alle Einleitungslängen bleiben dabei unverändert. Aus Gründen der Übersicht wird nur das Modell „Abrupt Dick“ in einfach symmetrischer Ausführung betrachtet. Weitere Tabellen und Abbildungen sind im Anhang B 7 und Anhang B 8 enthalten.

Tabelle 6-8: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“

	Belastung M [kNm]	Schubspannung [N/mm ²]					
		S1	S2	S3	S4	-	-
M variiert	2000,0	-20,4	27,5	-12,9	6,8		
	3000,0	-30,6	41,3	-19,4	10,2		
	4077,2	-41,6	56,1	-26,4	13,2		
	5000,0	-51,1	68,8	-32,3	17,1		
	6000,0	-61,3	82,6	-38,8	20,5		

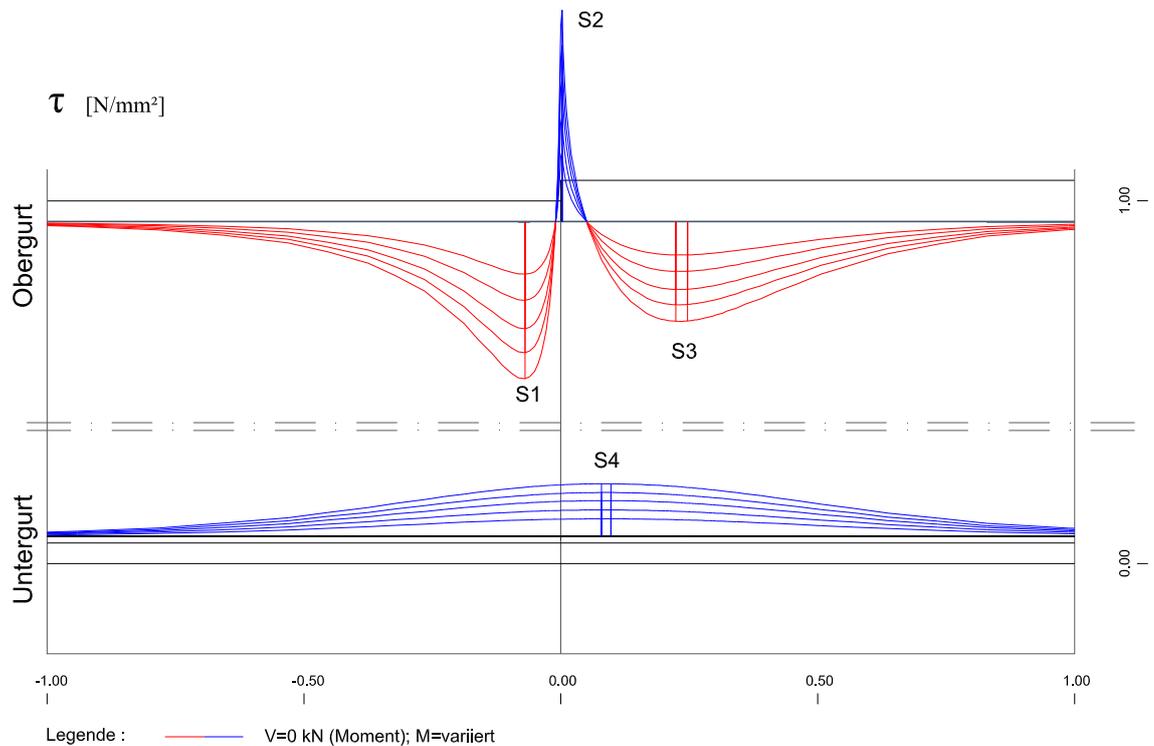


Abbildung 6-15: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Momentes

Die Abbildung 6-16 stellt die Werte aus Tabelle 6-8 graphisch dar. Proportional zum Moment steigen alle Spannungen im betrachteten Schnitt zwischen Gurt und Steg. Ebenso verhalten sich die Spannungen normal zum Schnitt. Abbildung 6-17 zeigt den Einflussbereich der lokalen Störung am Obergurt anhand der Lasteinleitungslängen L_1 und L_2 , die auf Seite 84 beschrieben wurden.

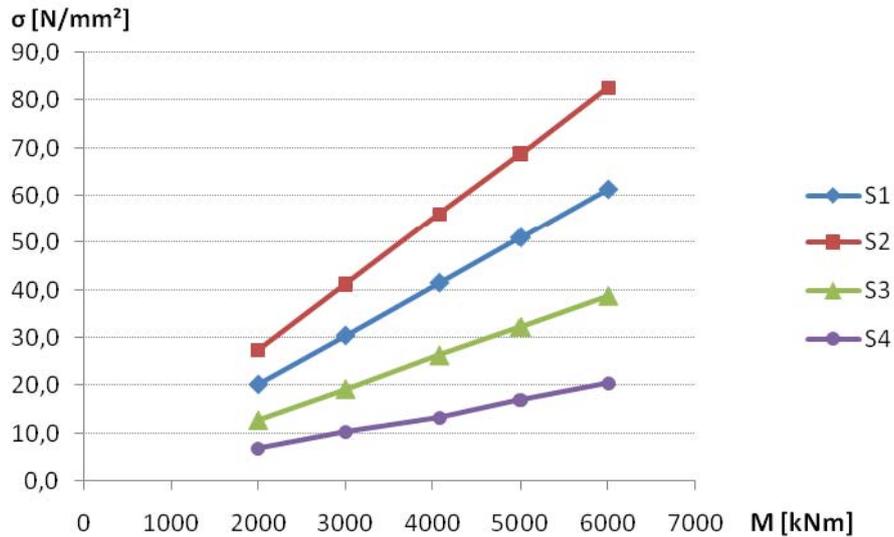


Abbildung 6-16: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Momentes

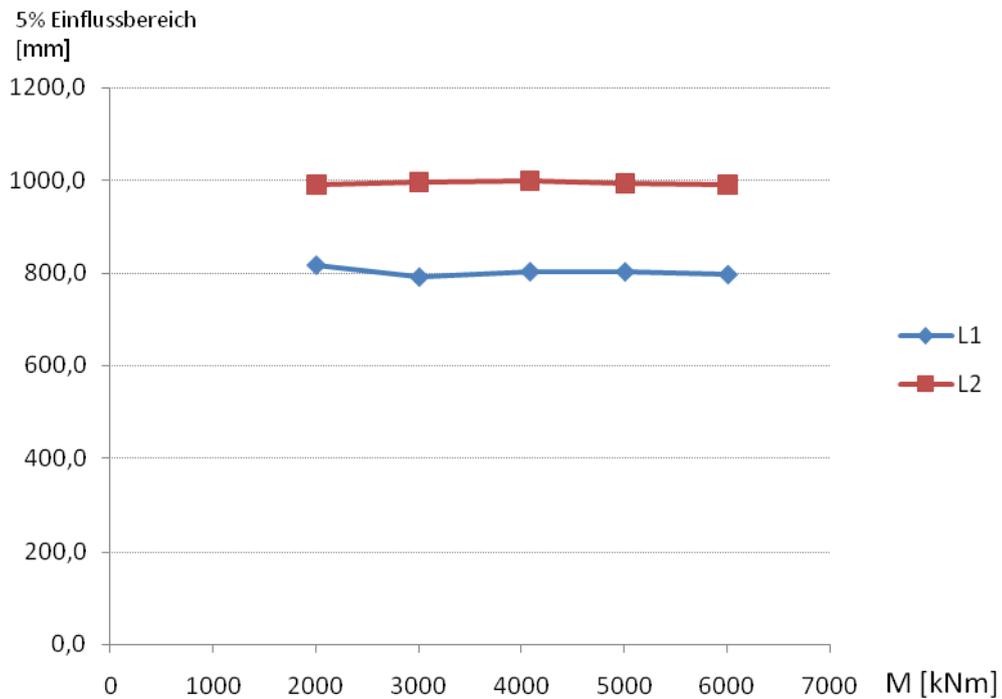


Abbildung 6-17: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Momentes

6.4) Geometrische Größen

6.4.1) Allgemein

Ändert man eine Querschnittabmessung, so kommt es zu einer Veränderung der Gurtkraftdifferenz dN und des lokalen Momentes dM . Diese lokalen Größen sind neben den sich ändernden Parametern wichtige Eingangswerte für das in Kapitel 7) vorgestellte Ingenieurmodell. Daher werden bei der Variation einer Abmessung sowohl die Veränderungen im Schubspannungsbild, als auch bei der Gurtkraftdifferenz dN und dem lokalen Moment dM untersucht. Jedes Ingenieurmodell beruht später darauf, mit Hilfe der Ergebnisse für die Gurtkraftdifferenz dN die Schubspannungen auf der sicheren Seite abzubilden.

Es wird versucht, bautechnisch interessante Bereiche des Verhältnisses von Breite zu Höhe abzudecken. Wie bereits in Tabelle 6-3 gezeigt, werden Werte des Parameters β von etwa 1,2 bis 7,0 untersucht.

Um die lokalen Spannungszustände, die sich aus der Lasteinleitung am Auflager und dem Gurtdickensprung ergeben, voneinander zu trennen, ist dazwischen eine Mindestlänge erforderlich. Für die Gültigkeit der technischen Biegelehre zwischen diesen Punkten ist bei der vorhandenen Systemlänge von 10,0 m eine maximale Steghöhe von etwa $h_{st} = 2500$ mm zulässig. Die untersuchte Höhe $h = 3400$ mm ist unter diesem Gesichtspunkt kritisch zu beurteilen und dient vornehmlich dazu, eine Tendenz aufzuzeigen.

6.4.2) Verhalten der Gurtdifferenzkraft dN

Die Gurtkraftdifferenz dN ist direkt abhängig von den Querschnitts-abmessungen. Ihren Verlauf, bei einer Veränderung der Querschnittsbreite und -höhe (b/h) bei einem konstanten Gurtdickensprung von $dt=40$ mm, zeigen die Abbildungen 6-18 und 6-19. Durch ein bestimmtes Verhältnis von Breite zu Höhe wird die Gurtkraftdifferenz in Abhängigkeit von der Ausführungsart und dem Gurtdickensprung maximal. Die Tabelle 6-9 zeigt die Ergebnisse nochmals zusammengefasst. Bei einer Veränderung der Breite steigt beziehungsweise fällt ebenfalls die Trägerhöhe an dem das Maximum von dN auftritt.

Tabelle 6-9: maximale Gurtkraftdifferenzen

Modell	b [mm]	h [mm]	α [-]	max dN [kN]	β [-]
Abrupt Dick einfach sym.	300	750	2,0	-601,2	2,5
	400	890	2,0	-477,9	2,2
	500	1020	2,0	-398,5	2,0
Abrupt Dick doppelt sym.	300	1400	2,0	-274,6	4,7
	400	1670	2,0	-220,0	4,2
	500	1910	2,0	-184,4	3,8
E-Modul einfach sym.	300	320	2,0	-776,4	1,1
	400	360	2,0	-601,0	0,9
	500	400	2,0	-504,1	0,8
E-Modul doppelt sym.	300	560	2,0	-378,7	1,9
	400	640	2,0	-298,4	1,6
	500	720	2,0	-247,0	1,4

Wie sich in den folgenden Kapiteln zeigen wird, verhalten sich die Spannungen dabei nicht immer kongruent zur Gurtdifferenzkraft dN, wie dies bei der Variation des Momentes in Kapitel 6.3.4) der Fall ist. Besonders bei einer Veränderung der Höhe kommt es zum Teil zu divergierenden Verläufen.

Beim Unterschreiten der Höhe, bei der die maximale Gurtdifferenzkraft auftritt, steigen die Schubspannungen im Schnitt weiter an, obwohl die Gurtdifferenzkraft absinkt. Diese Besonderheit wird bei der Erstellung des Ingenieurmodells berücksichtigt, trotzdem kann dieser schwer zu modellierende Bereich nicht genau abgebildet werden.

Die den nachfolgenden Abbildungen zugrundeliegenden Tabellen sind im Anhang B 1 und Anhang B 2 dargestellt.

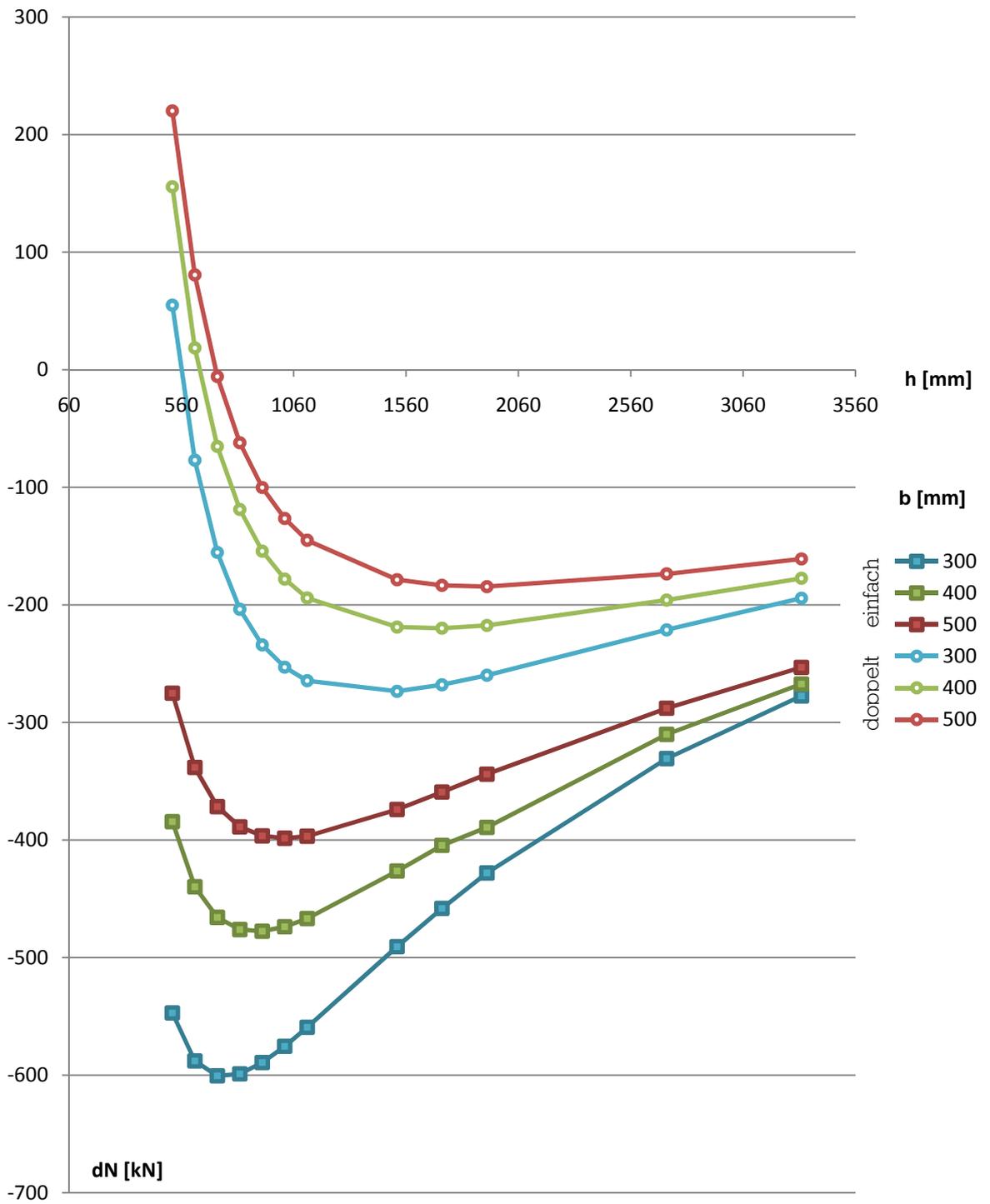


Abbildung 6-18: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Höhe und Breite für das Modell „Abrupt Dick“ in einfach und doppelt sym. Ausführung

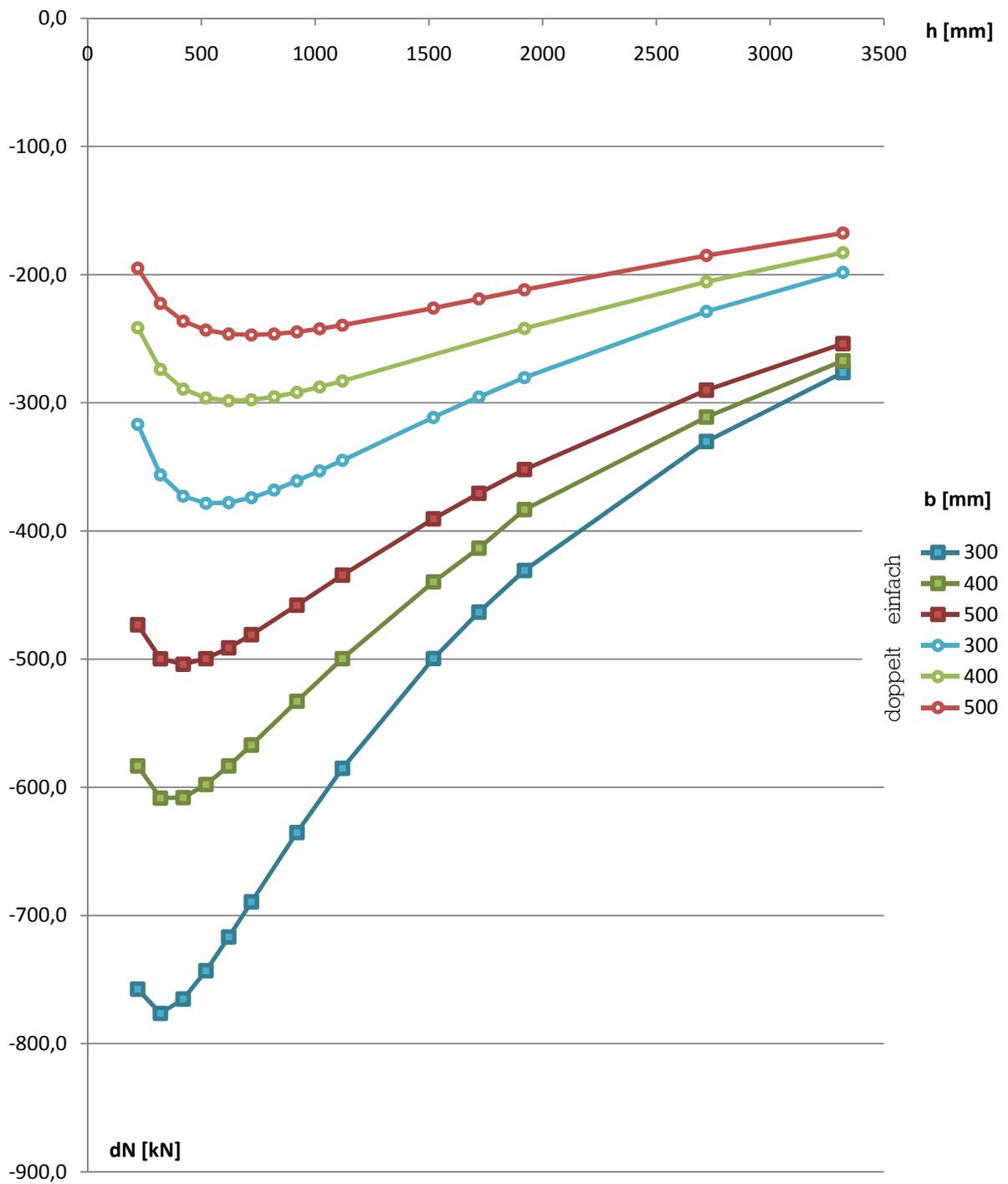


Abbildung 6-19: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Höhe und Breite für das Modell „E-Modul“ in einfach und doppelt sym. Ausführung

6.4.3) Querschnittsbreite b

6.4.3.1) Allgemein

Tabelle 6-10: Parameterbereich bei Variation der Breite

	Basis- querschnitt	b variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
β	2,3	4,6	3,1	2,3	1,8	1,5
Darstellung						

Die Breite des Querschnitts wird ausgehend vom Basisquerschnitt mit $b=400$ mm in Schritten von je 100 mm zweimal erhöht und verringert. Nachfolgend wird zuerst das Modell „Abrupt Dick“, danach das Modell „E-Modul“ in den Ausführungen einfach und doppelt symmetrisch behandelt.

Durch die Erhöhung der Breite kommt es zu einem Absinken der Normalspannungen im Obergurt. Gleichzeitig steigen die Gurtnormalkräfte der Querschnitte vor und nach dem Dickensprung aufgrund der gestiegenen Gurtfläche an. Die Gurtkraft des QS 1 steigt proportional mehr an – wodurch die Gurtkraftdifferenz dN absinkt. Aus dem Zusammenspiel von absolutem und relativem Verhalten der Gurtkräfte erklärt sich, dass das lokale Moment über alle Breiten näherungsweise konstant bleibt.

6.4.3.2) Modell Abrupt Dick

6.4.3.2.A) lokale Schnittgrößen

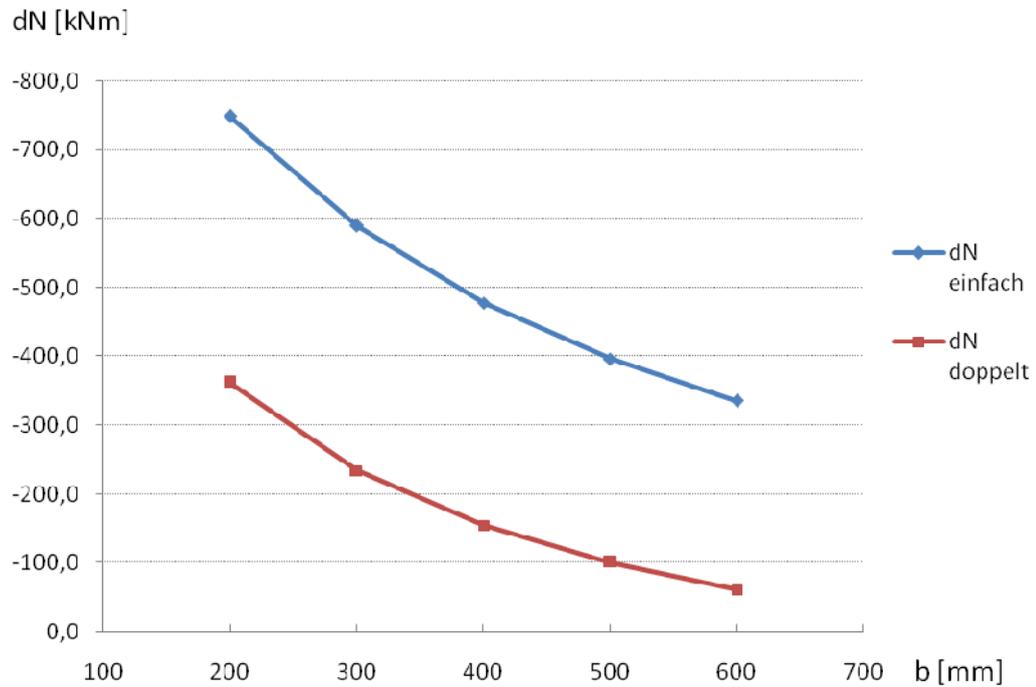
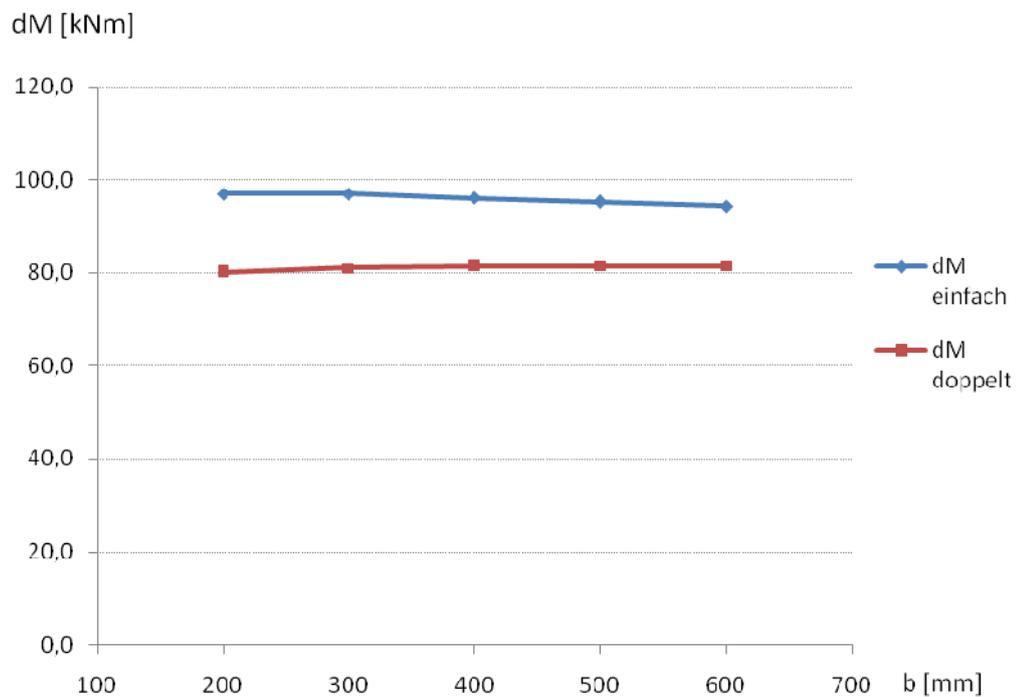
Abbildung 6-20: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Breite

Abbildung 6-21: Verhalten des lokalen Momentes bei Variation der Breite

Die Abbildungen 6-20 und 6-21 stellen das Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN und des lokalen Momentes dM bei veränderlicher Gurtbreite am Obergurt dar. Für den doppelt symmetrischen Querschnitt sind die lokalen Schnittgrößen des Obergurtes betragsmäßig ident mit denen des Untergurtes. Sowohl die Gurtkraftdifferenzen, als auch die lokalen Momente beider Ausführungen verhalten sich ähnlich.

6.4.3.2.B) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch

In der Abbildung 6-22 ist der Verlauf der Schubspannungen ersichtlich. Diese verhalten sich ähnlich zu der Gurtnormalkraftdifferenz dN aus Abbildung 6-20.

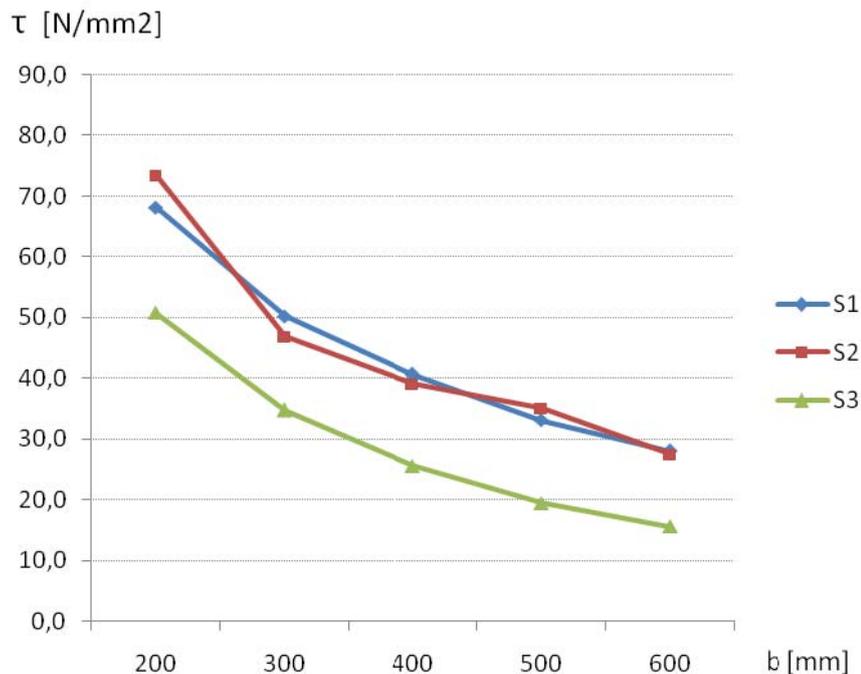


Abbildung 6-22: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite

Die Abnahme der Spannungen verringert sich mit zunehmender Breite. Dieses Verhalten spiegelt sich bei Betrachtung der Gurtnormalkraftdifferenz dN wieder. Die Spannungen S1 bis S3 verhalten sich ähnlich. Bei der Spannung S2 treten aufgrund der starken Abhängigkeit von der örtlichen Netzdicke geringfügige Abweichungen auf.

In Abbildung 6-22 und folgend auch in Abbildung 6-32 ist ein unstetiger Verlauf der Spannungen S_2 beim Modell „Abrupt Dick“ und S_1 Em beim Modell „E-Modul“ zu erkennen. Dies ist auf unterschiedliche Netzdichten bei den FE-Berechnungen mit den verschiedenen Breiten zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, sind die gegenständlichen lokalen Spitzen in ihren Extremwerten mit dem FE-Programm nur schwer erfassbar. Durch eine Steigerung der Netzdicke lässt sich ein verbesserter Verlauf für die betroffenen Maxima gewinnen. Im Gegensatz dazu zeigte sich, dass die Werte S_1 und S_3 nur gering davon beeinflusst sind.

Mit den Spannungen verändern sich ebenfalls die Lasteinleitungslängen L_1 und L_2 . Diese steigen mit zunehmender Breite an. Das bedeutet, dass sich, bei gleichzeitig sinkendem Spannungsniveau, der Bereich der lokalen Spannungsunregelmäßigkeiten ausdehnt.

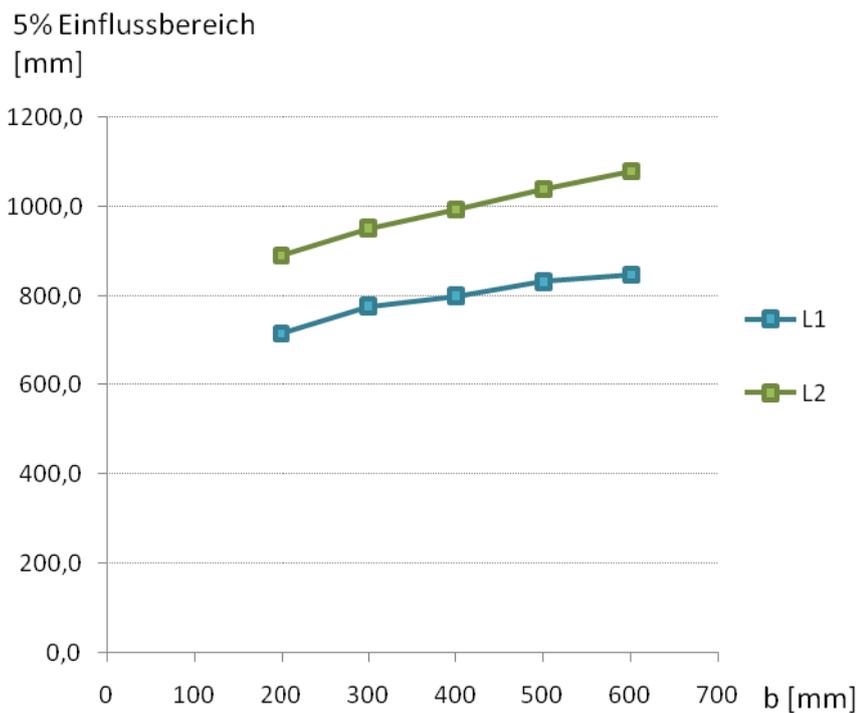


Abbildung 6-23: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite

Nachfolgend sind die Flächen A1 bis A3 in Abhängigkeit von der Breite zueinander aufgetragen. In Summe ergeben diese den Verlauf von dN. In Abbildung 6-22 war ersichtlich, dass sich durch die Variation der Wert von S2 verändert. Der zugehörige Schub A2 am Dickensprung bleibt jedoch durch die Ausdehnung seines Wirkungsbereiches konstant. Aus dem Verhältnis der Linien von A1 und A2 lässt sich ableiten, dass in etwa die Hälfte des zu übertragenden Schubes dN bei einer ideal elastischen Berechnung bereits vor dem Dickensprung in den Gurt des Querschnittes l eingeleitet wird.

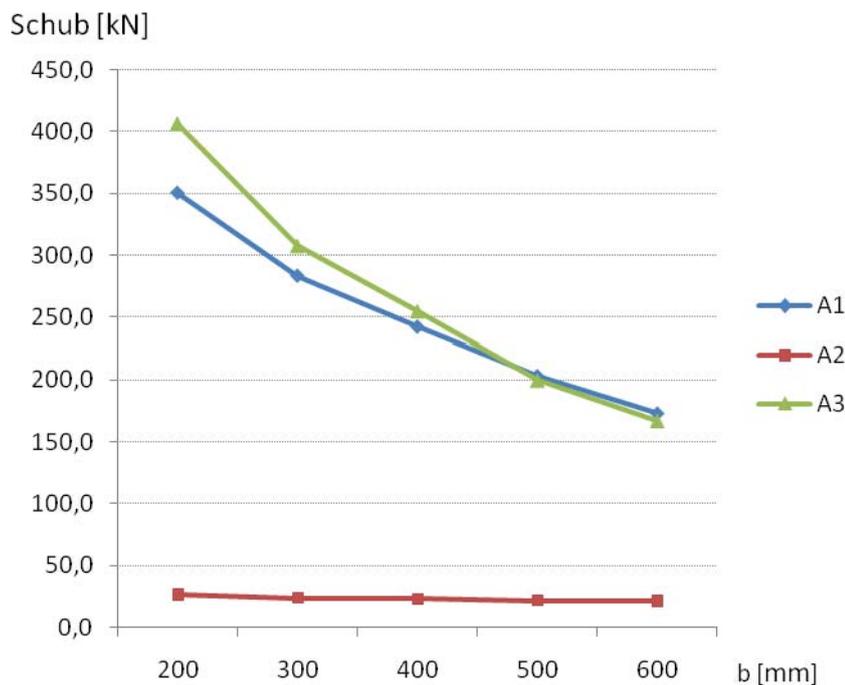
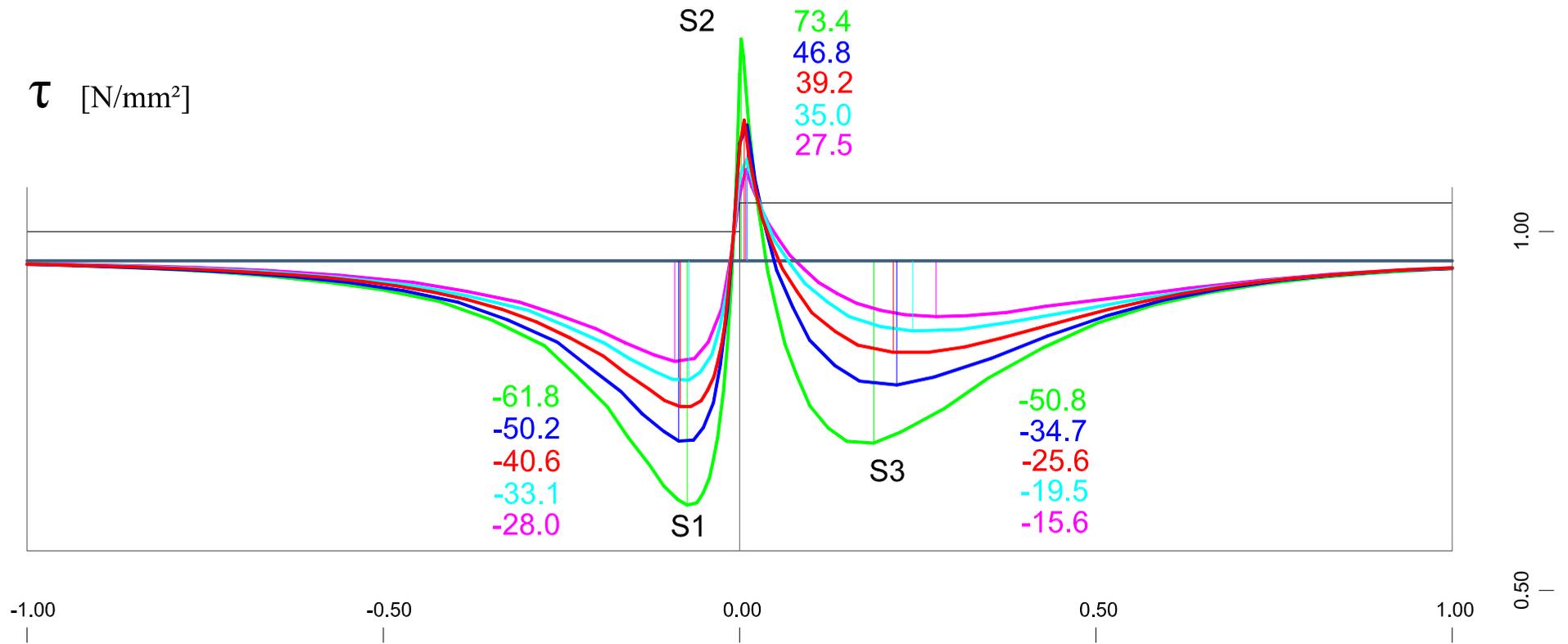


Abbildung 6-24: Verhalten der Schubflächen bei Variation der Breite

Die Einteilung der Flächen wurden in Kapitel 5.1) in Abbildung 5-5 dargestellt.

- A1 übertragene Schubkraft vor dem Dickensprung
- A2 übertragene (rückwirkende) Schubkraft am Dickensprung
- A3 übertragene Schubkraft nach dem Dickensprung



- Legende :
- Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=200mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=300mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=500mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=600mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-25: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite

6.4.3.2.C) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

Da der Querschnitt doppelt symmetrisch ist, stimmen die Teilschnittgrößen von Ober- und Untergurt bis auf das Vorzeichen überein. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung von Ober- und Untergurt verändert sich das Niveau der Schubspannungen im Vergleich zur einfach symmetrischen Ausführung. Es zeigt sich auch hier eine direkte Abhängigkeit der Schubspannungen von der Gurtkraftdifferenz.

Abbildung 6-26 zeigt den Verlauf der Schubspannungen in der Kontaktfläche zwischen dem Steg und den Gurten. Die Spannungen S1 bis S3 beziehen sich auf den Obergurt, S4 bis S6 auf den Untergurt. Wie auch bei den Lasteinleitungslängen zeigt sich bei den Spannungen ein kongruentes Verhalten von Ober- und Untergurt. Beide weisen einen der Gurtnormalkraftdifferenz dN entsprechenden Verlauf auf.

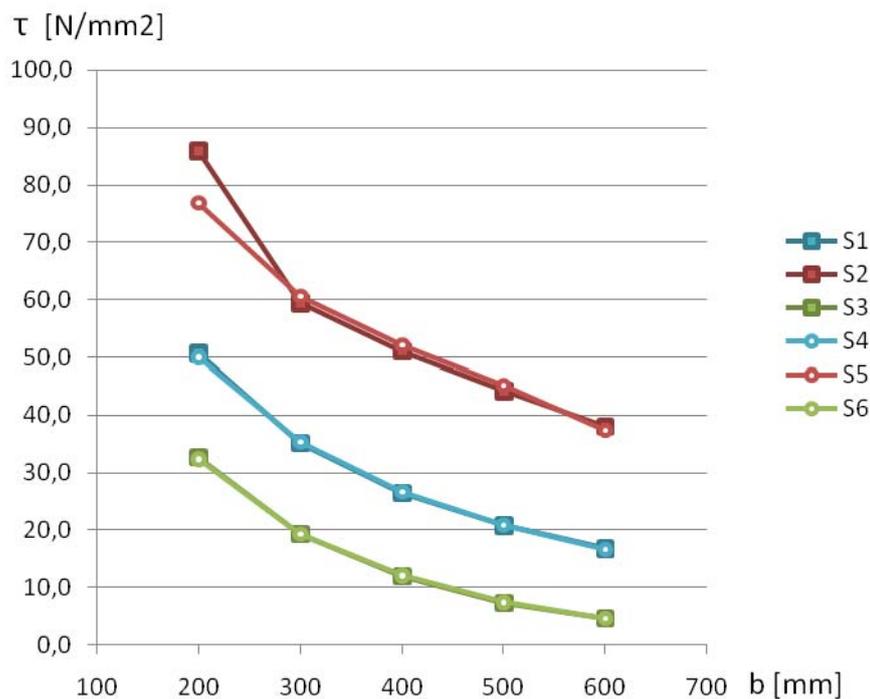


Abbildung 6-26: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite

Die Lasteinleitungslänge L2 steigt mit zunehmender Breite. Bei L1 ist in diesem Modell kein deutlicher Anstieg zu erkennen, wie es bei einer einfach symmetrischen Ausführung noch der Fall war.

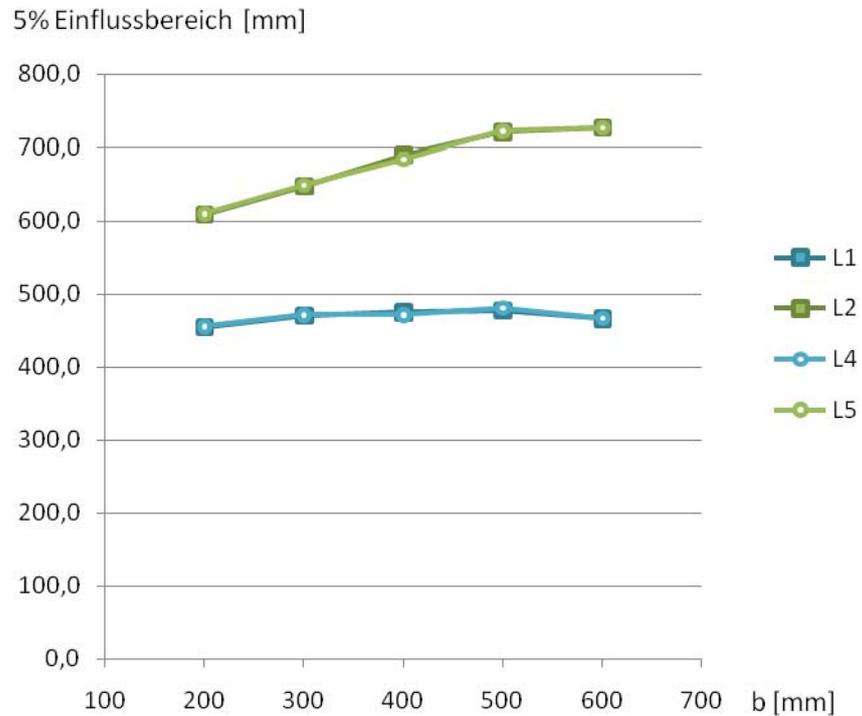
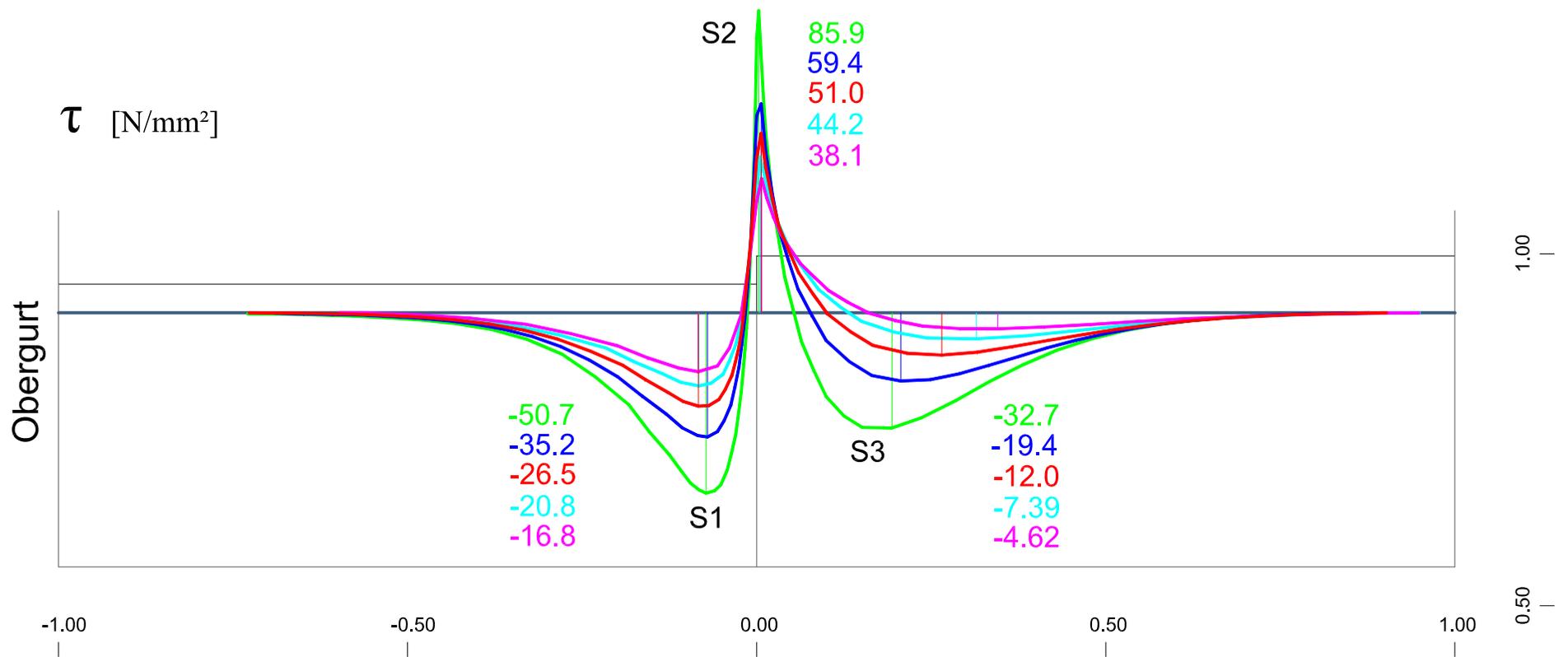
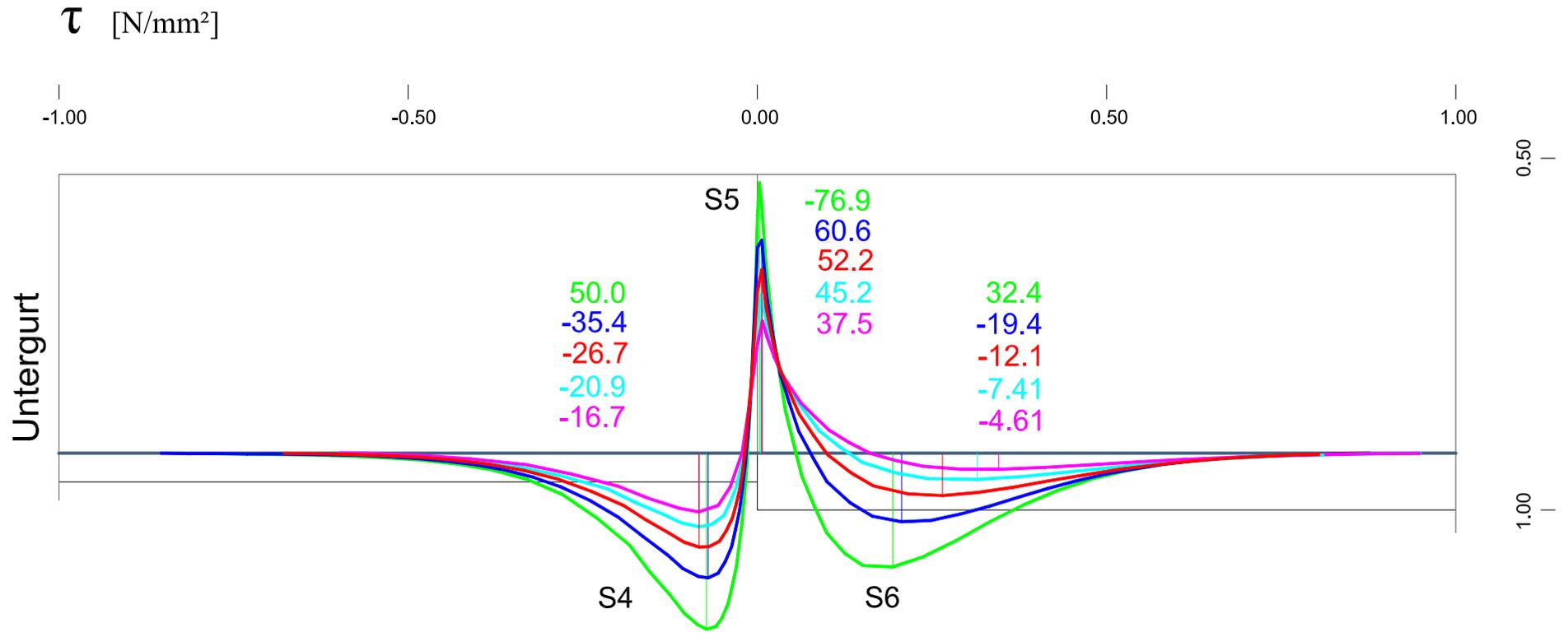


Abbildung 6-27: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite



- Legende :
- Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=200mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=300mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=500mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=600mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-28: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Obergurt

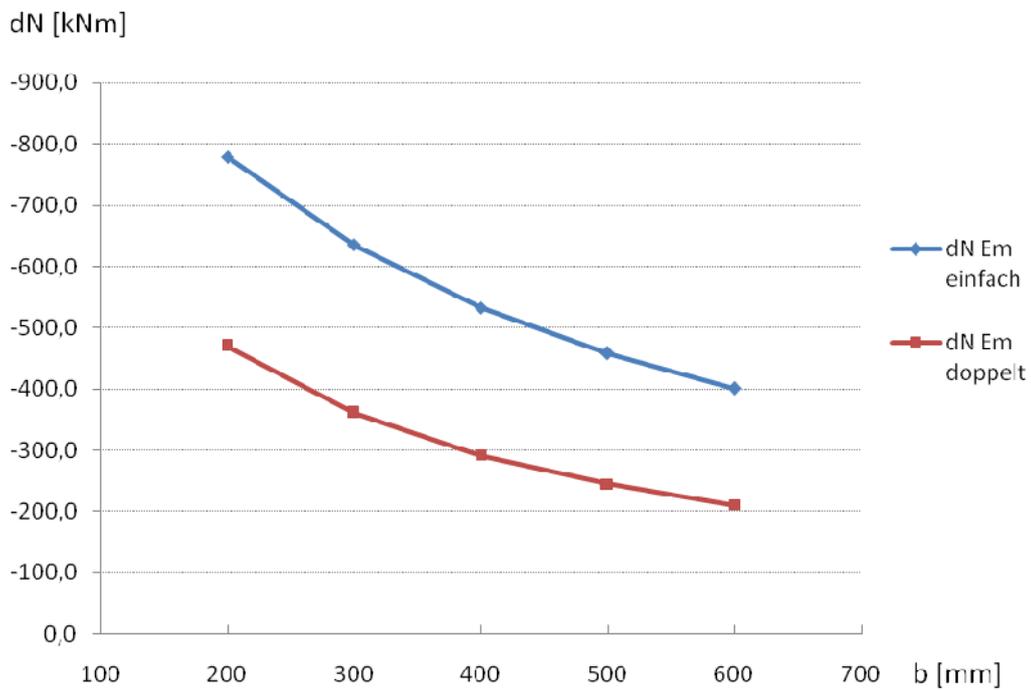
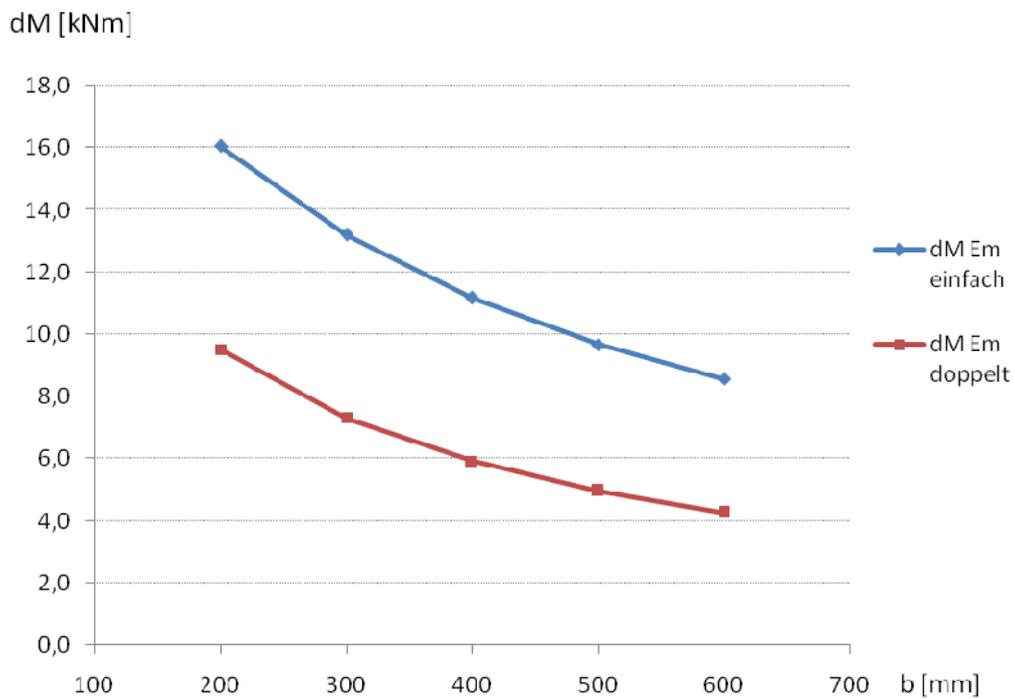


- Legende :
- Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=200mm, α=2.0
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=300mm, α=2.0
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=400mm, α=2.0
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=500mm, α=2.0
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=600mm, α=2.0

Abbildung 6-29: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Untergurt

6.4.3.3) Modell E-Modul

6.4.3.3.A) lokale Schnittgrößen

Abbildung 6-30: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der BreiteAbbildung 6-31: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Breite

6.4.3.3.A) Modell E-Modul, Einfach Symmetrisch

Ähnlich wie bei den vorhergehenden Modellen zeigt sich eine direkte Abhängigkeit der Schubspannungen von der Gurtnormalkraftdifferenz dN . Abbildung 6-32 zeigt den sinkenden Verlauf der Schubspannungen bei steigender Breite. Parallel dazu kommt es zu einer Vergrößerung des Einflussbereiches des Dicken Sprunges wie in Abbildung 6-33 dargestellt.

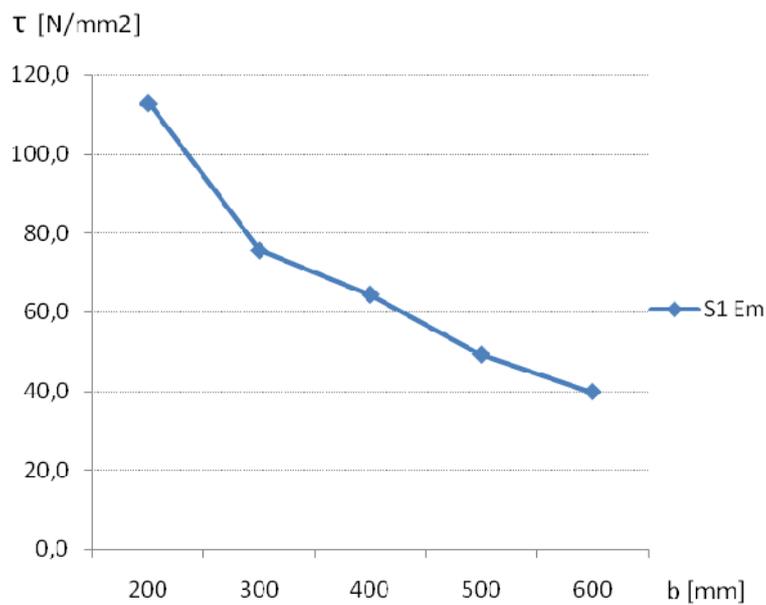


Abbildung 6-32: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite

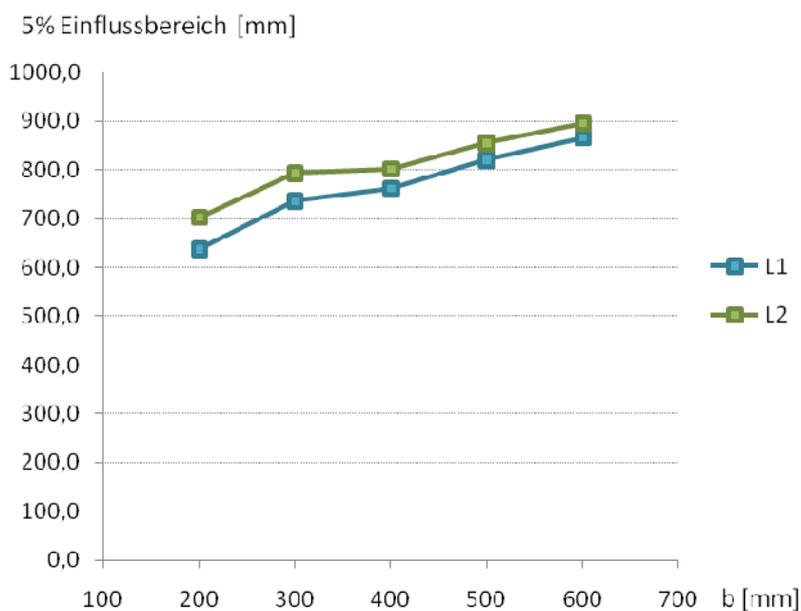
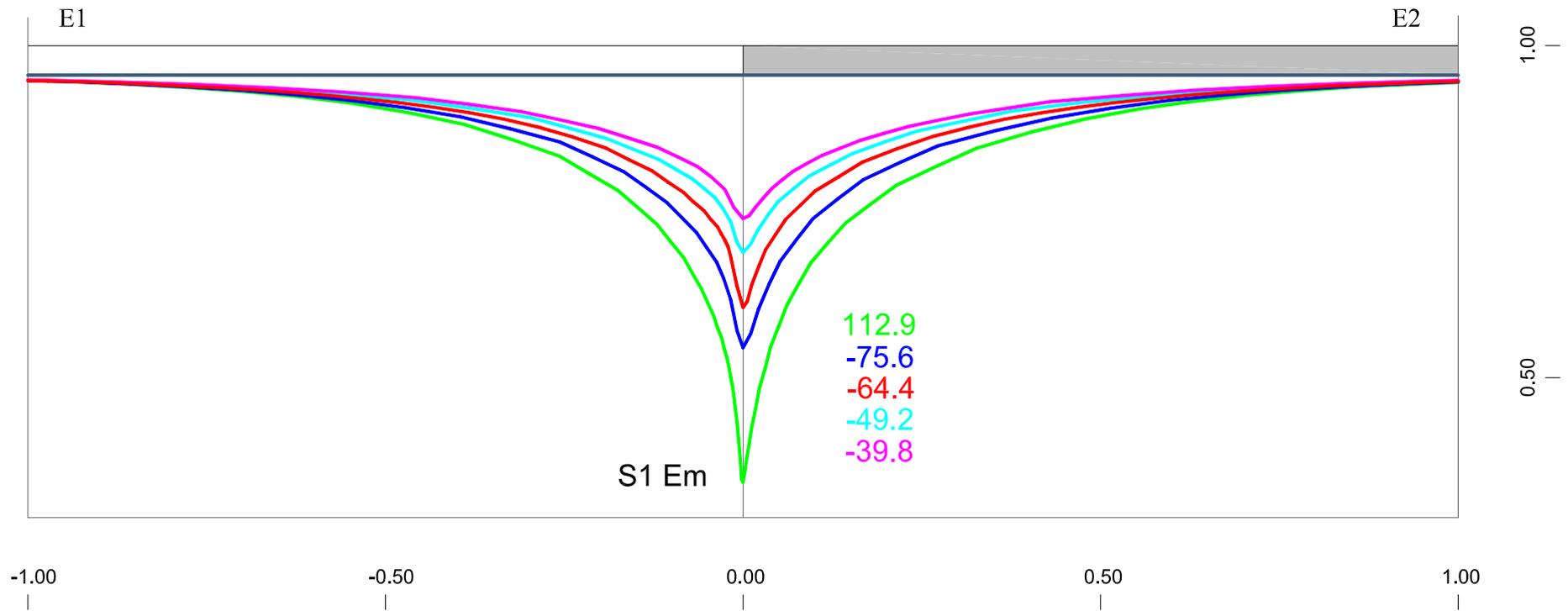


Abbildung 6-33: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite

τ [N/mm²]



- Legende :
- E-Modul, einfach, hst=920mm, b=200mm, α=2.0
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=300mm, α=2.0
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=400mm, α=2.0
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=500mm, α=2.0
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=600mm, α=2.0

Abbildung 6-34: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite

6.4.3.3.A) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch

In Abbildung 6-35 sind die Schubspannungen bei veränderlicher Breite zu sehen. Aufgrund von unterschiedlichen Schnittführungen unterscheiden sich die Verläufe von Ober- und Untergurt geringfügig. Der prinzipielle Verlauf lehnt sich jedoch am Verlauf der Gurtnormalkraftdifferenz dN an. Die Abbildung 6-36 zeigt die Entwicklung der Lasteinleitungslängen. Durch die geringfügig unterschiedlichen Schubspannungsverläufe und den schleifenden Schnitt an der 5% Grenze von S1 kommt es zu differierenden Werten. Generell lässt sich jedoch das gleiche Bild wie in den vorhergegangenen Modellen erkennen.

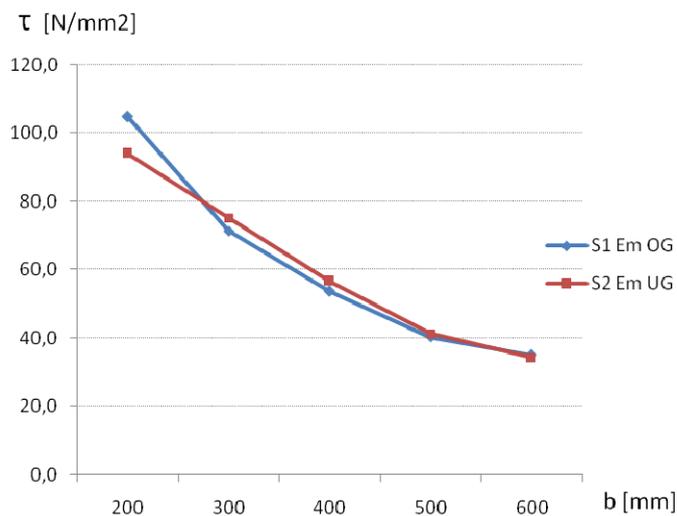


Abbildung 6-35: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite

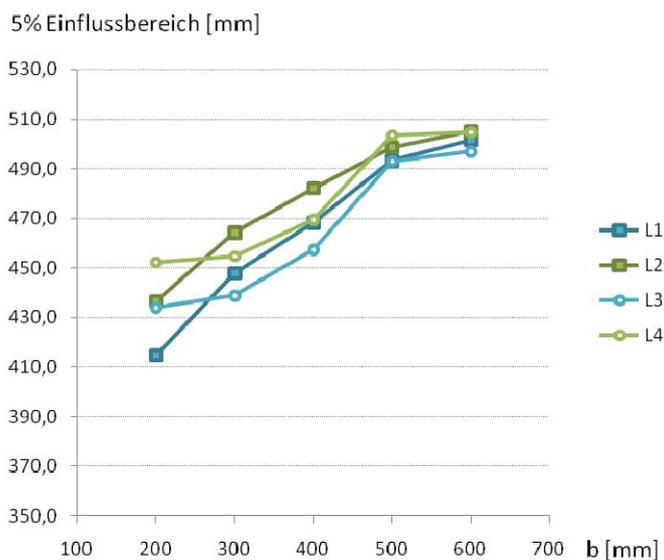


Abbildung 6-36: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite

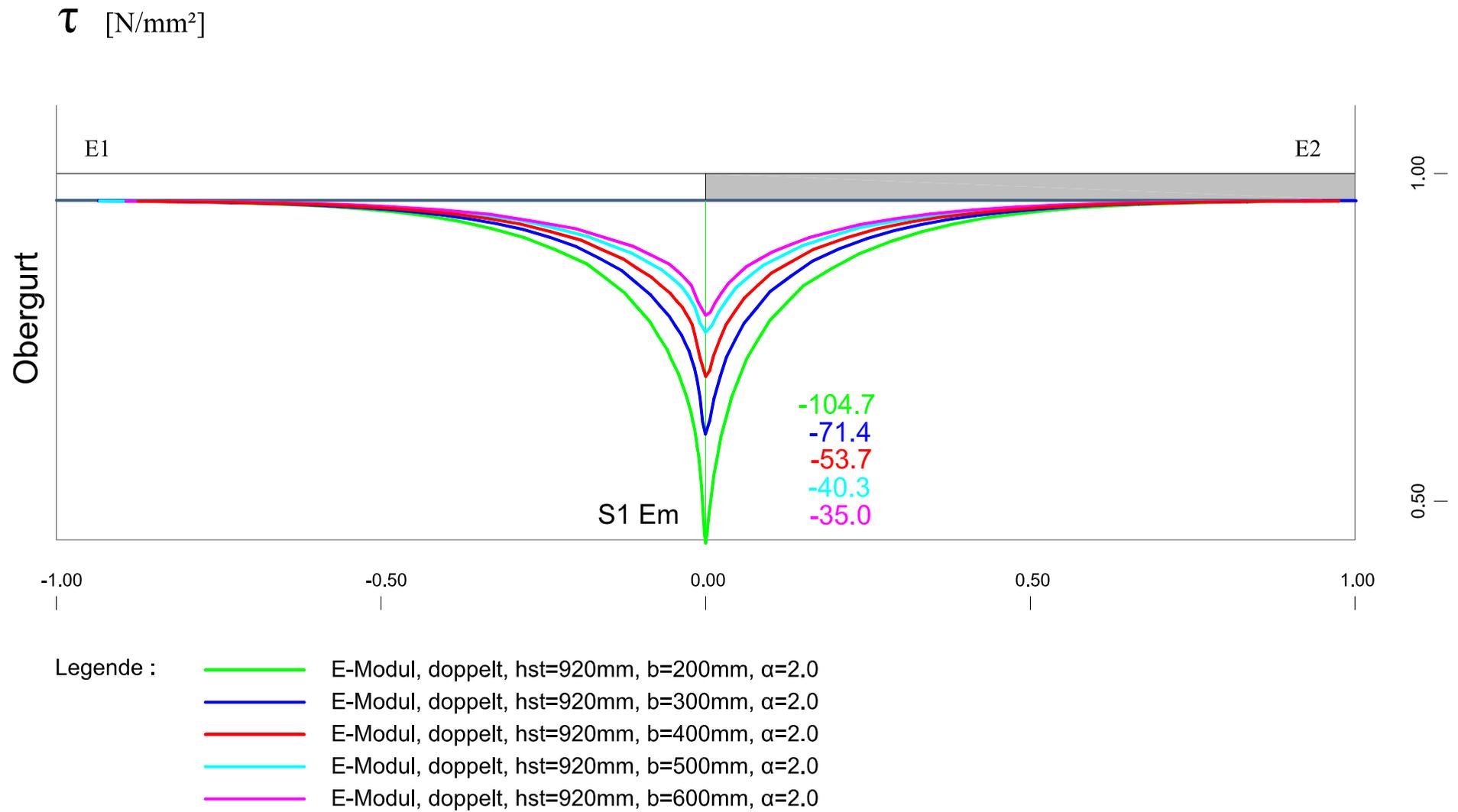
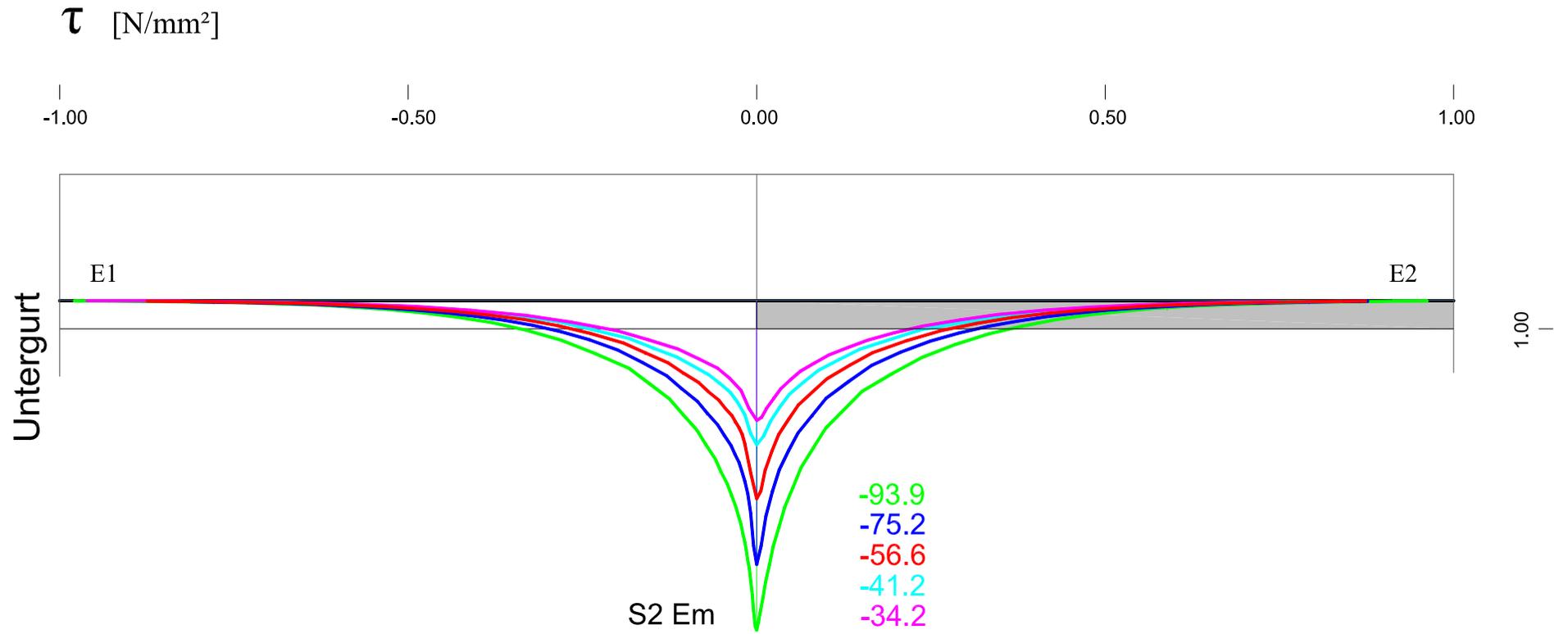


Abbildung 6-37: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Obergurt



- Legende :
- E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=200mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=300mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=500mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=600mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-38: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Untergurt

6.4.4) Querschnittshöhe h

6.4.4.1) Allgemein

Tabelle 6-11: Parameterbereich bei Variation der Steghöhe

	Basis- querschnitt	h _{st} variiert [mm]						
		520	720	920	1120	1920	2720	3320
β	2,3	1,3	1,8	2,3	2,8	4,8	6,8	8,3
Darstellung								

Die Schubspannungsverläufe werden für sieben verschiedene Trägerhöhen von 800 mm bis 3400 mm untersucht. Als Parameter wird die, von den Gurt-dicken unabhängige Steghöhe h_{st} gewählt.

Durch die Vergrößerung der Höhe kommt es zu einem generellen Abfall der Spannungen durch das höhere Widerstandsmoment des Querschnitts. Anders jedoch als bei veränderter Breite verhalten sich hier die Spannungen deutlich verschieden. Bei geringen Steghöhen ist die Spannung S_2 maßgeblich, bei hohen Trägern die Spannung S_1 .

6.4.4.2) Modell Abrupt Dick

6.4.4.2.A) lokale Schnittgrößen

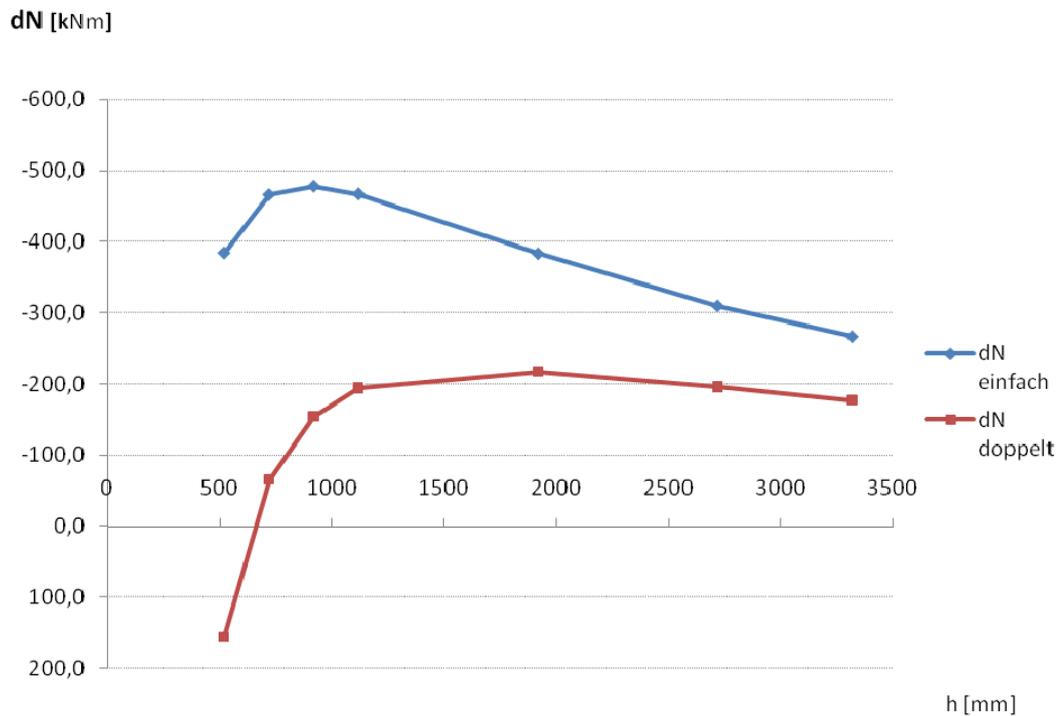


Abbildung 6-39: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Steghöhe

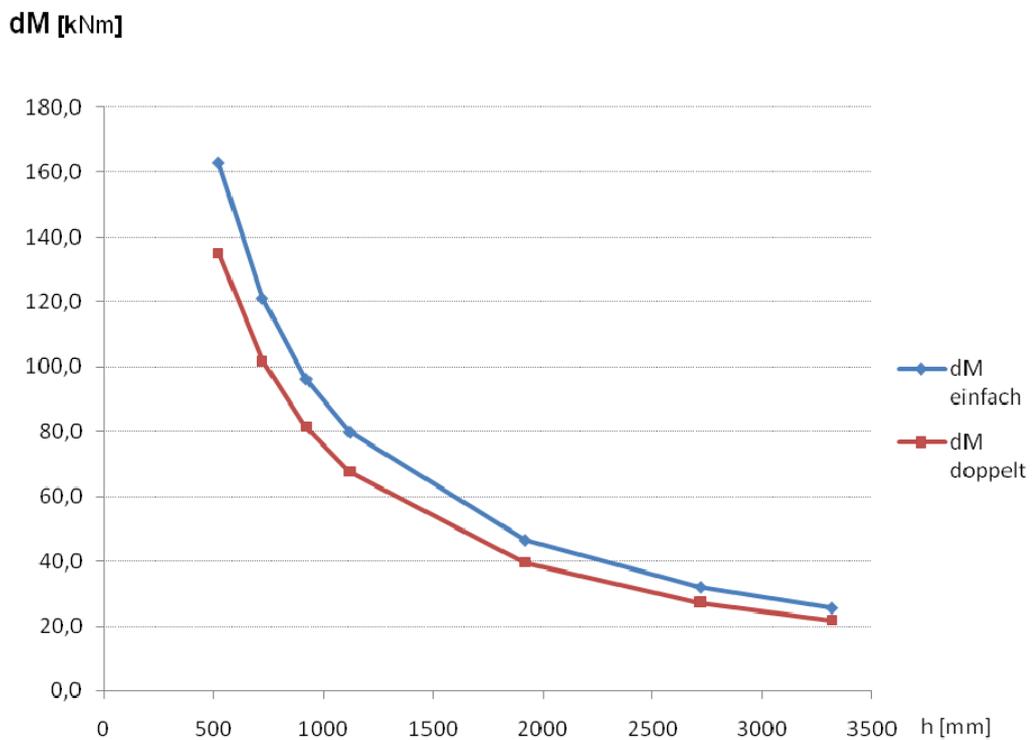


Abbildung 6-40: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Steghöhe

Die Abbildungen 6-39 und 6-40 stellen das Verhalten Gurtkraftdifferenz dN und des lokalen Momentes dM für die Variation der Höhe beim Modell „Abrupt Dick“ dar. Die den Abbildungen zugehörigen Tabellen sind in Anhang B 13 bis Anhang B 16 ersichtlich. Der Querschnitt für das Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ erreicht mit den Abmessungen $b=400\text{ mm}$ und $h_{st}=890\text{ mm}$ bei einem Gurtdickensprung von $dt=40\text{ mm}$, die größte Gurtkraftdifferenz dN . Im doppelt symmetrischen Fall tritt dieses Maximum bei einer Steghöhe von etwa $h_{st}=1670\text{ mm}$ auf. Gleichzeitig sinkt das entstehende lokale Moment dM bei steigender Höhe.

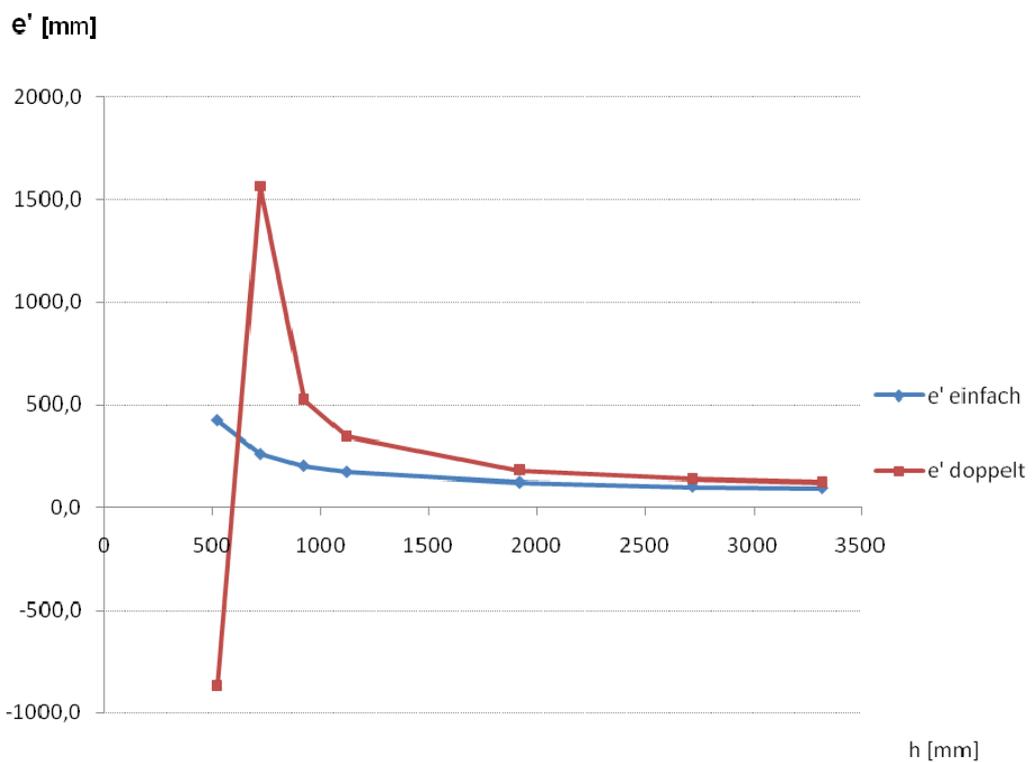


Abbildung 6-41: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation der Steghöhe

6.4.4.2.B) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch

Die Abbildung 6-42 zeigt die Schubspannungen in der Anschlussfuge zwischen Obergurt und Steg bei Variation der Steghöhe. Ein Vergleich mit Abbildung 6-39 zeigt, dass sich die Schubspannungen nicht konkordant zur Gurtkraftdifferenz dN verhalten. Unter einer Steghöhe von 890 mm beginnt die Gurtkraftdifferenz abzusinken, die Schubspannungen steigen jedoch weiter an. Bei einer weiteren Reduktion auf 520 mm zeigt sich, außer bei der Spannung S3, weiterhin ein kontinuierliches Ansteigen des Spannungsniveaus. Mit dem Maximum der Gurtkraftdifferenz dN geht also kein vergleichbarer Trend in den Spannungen einher. Durch den Einfluss der Höhe kommt es zu einem weiteren Ansteigen der Spannungen.

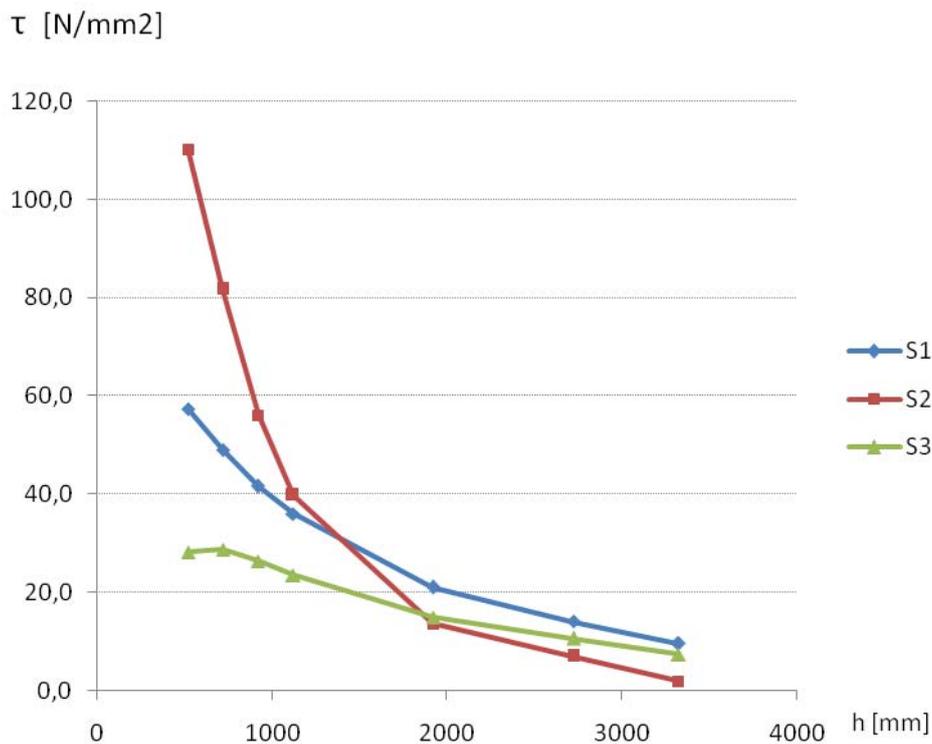


Abbildung 6-42: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe

Wie sich in der Ausführung als doppelt symmetrischer Querschnitt zeigen wird, bleibt der Einfluss der Gurtkraftdifferenz dN nicht aus, sondern wird in einen Bereich geringerer Höhe verschoben. Es ist daher zu erwarten, dass bei einer weiteren Reduktion der Höhe die Spannungen $S1$ und $S3$ ebenfalls deutlich sinken. Das lokale Moment dM steigt mit geringer werdender Höhe überproportional an. Ein ähnliches Verhalten ist auch beim Schubspannungsmaxima $S2$ zu erkennen.

Neben den Spannungsmaxima kommt es zu Veränderungen im Ausdehnungsbereich der lokalen Schubspannungen. Die Abbildung 6-43 zeigt die Entwicklung des Einflussbereiches gemessen an der 5%igen Spannung von $S1$. Bei steigender Höhe steigen die Lasteinleitungslängen proportional dazu an. Es lässt sich keine Veränderung entsprechend dem Verlauf von dN erkennen.

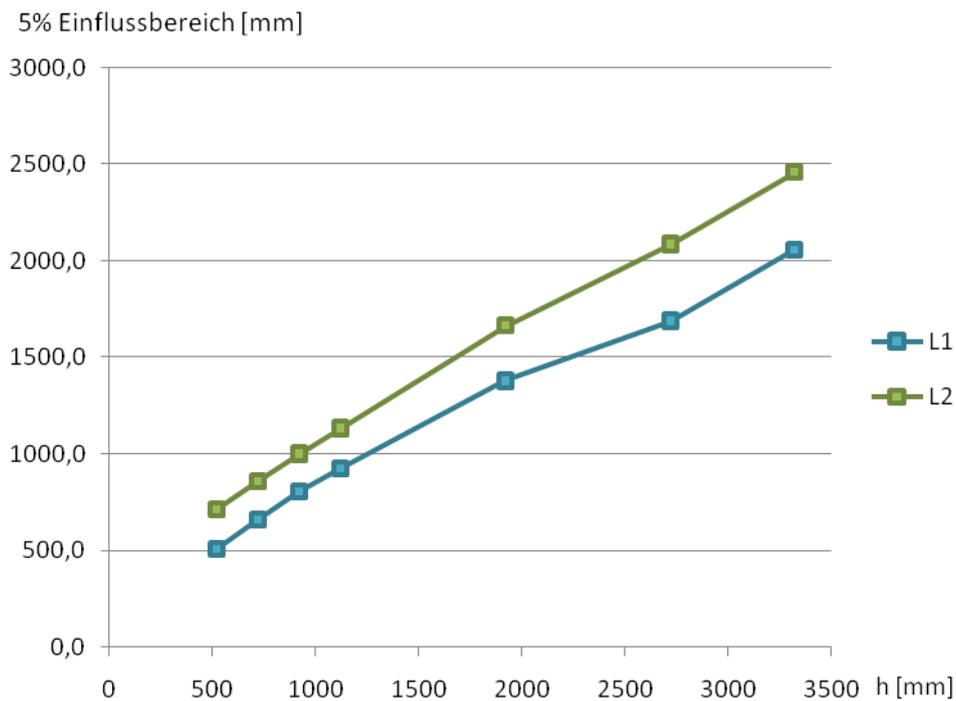


Abbildung 6-43: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe

Nachfolgend sind die Flächen A1 bis A3 zueinander aufgetragen. In Summe ergeben diese den Verlauf von dN . Ersichtlich gemacht wird das Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN in Bezug auf die Höhe bereits in Abbildung 6-39. Sie erreicht, bei der gegebenen Ausführung und Geometrie, ihr Maximum etwa bei der Steghöhe $h_{st} = 890$ mm. Aus dem Verhältnis der Linien von A1 und A2 zeigt sich, dass bei der Variation der Höhe etwa die Hälfte des zu übertragenden Schubes dN bei einer ideal elastischen Berechnung bereits vor dem Dickensprung in den Gurt des Querschnitts eingeleitet wird.

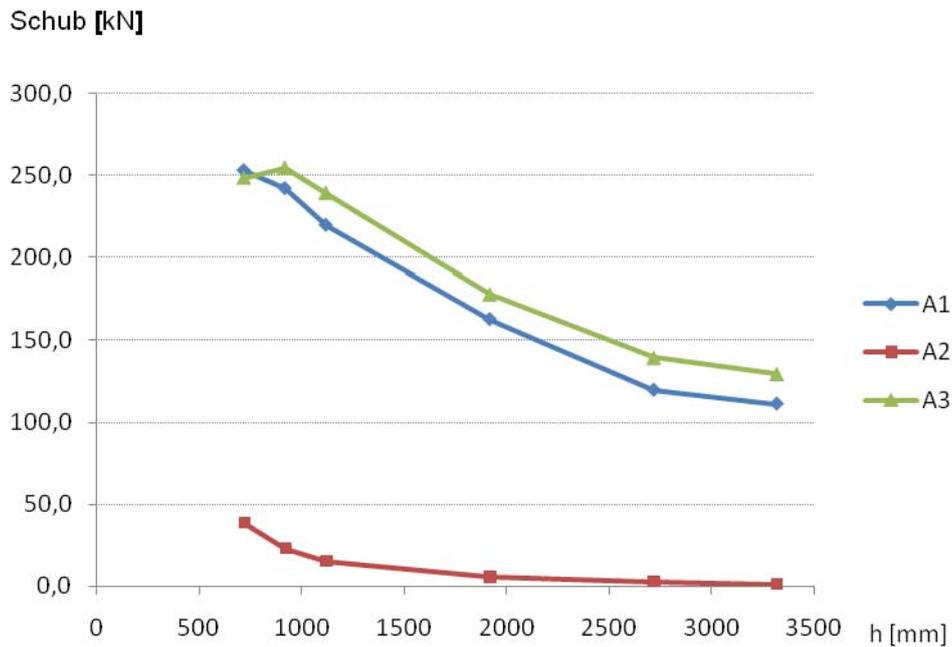
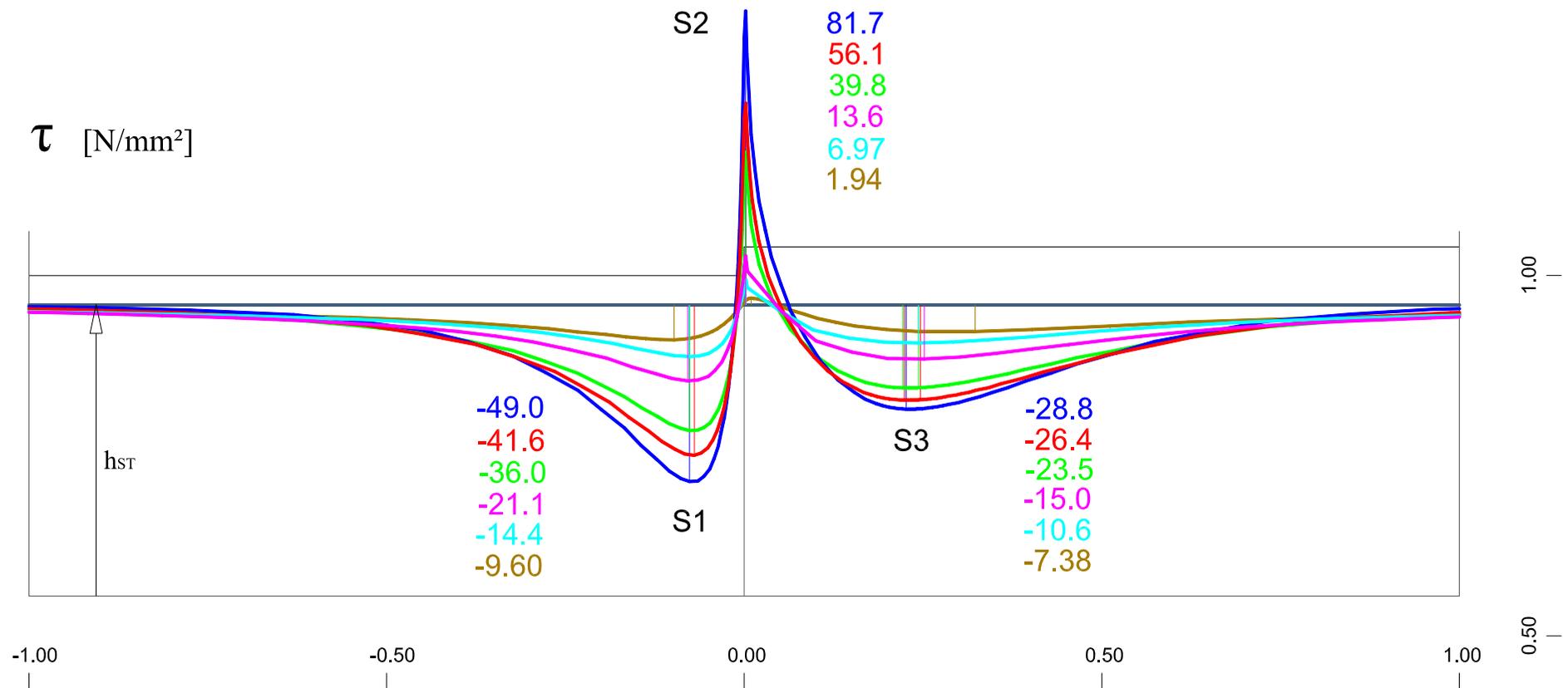


Abbildung 6-44: Verhalten der Schubkräfte bei Variation der Steghöhe



- Legende :
- Abrupt Dick, einfach, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, einfach, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-45: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe

6.4.4.2.C) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

Wie bei der einfach symmetrischen Ausführung, tritt auch hier ein Maximum in der Gurtnormalkraftdifferenz dN auf. Dieses zeigt sich jedoch schon bei einer Steghöhe von 1670 mm, wie in Abbildung 6-39 dargestellt. Vergleicht man dies mit der Entwicklung der Schubspannungen bei einer Änderung der Steghöhe aus Abbildung 6-46, zeigt sich auch beim doppelt symmetrischen Querschnitt kein direkter Zusammenhang der Spannungen mit der Gurtkraftdifferenz dN . Bei geringen Höhen ist jedoch ein Abfallen der Spannungen $S1$ und $S3$ ersichtlich. Es kommt zu einem, in geringere Steghöhen versetzten aber ähnlichen Verlauf dieser Spannungen zu dN .

Dass die Spannung $S2$ weiterhin steigt, ist auf das ebenso steigende lokale Moment zurückzuführen. Der Spannungsblock $A2$ mit der maximalen Spannung $S2$ ist Teil des rückwirkenden Momentes, das als Reaktion auf dM entsteht.

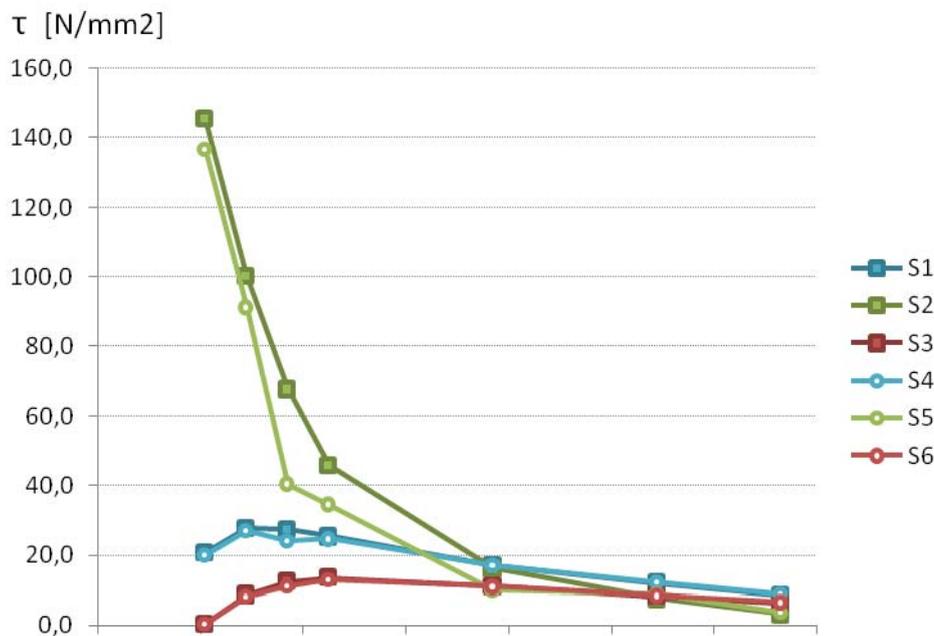


Abbildung 6-46: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe

Die Abbildung 6-47 zeigt die Entwicklung der Lasteinleitungslängen des Gurtdickensprunges. Oberhalb einer Steghöhe von etwa 920 mm stellt sich bei steigender Höhe ein sich proportional dazu vergrößernder Einflussbereich ein. Aufgrund des Absinkens der Spannungen S_3 und S_6 unter einer Steghöhe von 520 mm auf sehr geringe Werte, treten die zugehörigen Längen L_2 und L_5 nicht mehr auf. Der Einflussbereich des Spannungsbereichs A_2 dehnt sich bei geringer Höhe beträchtlich aus.

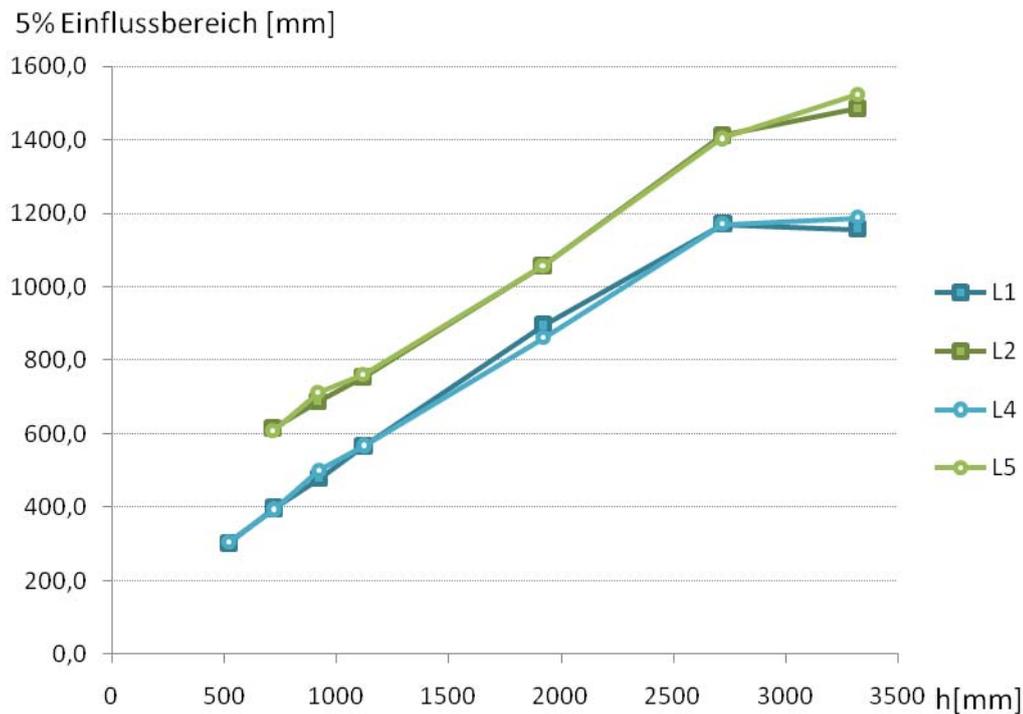
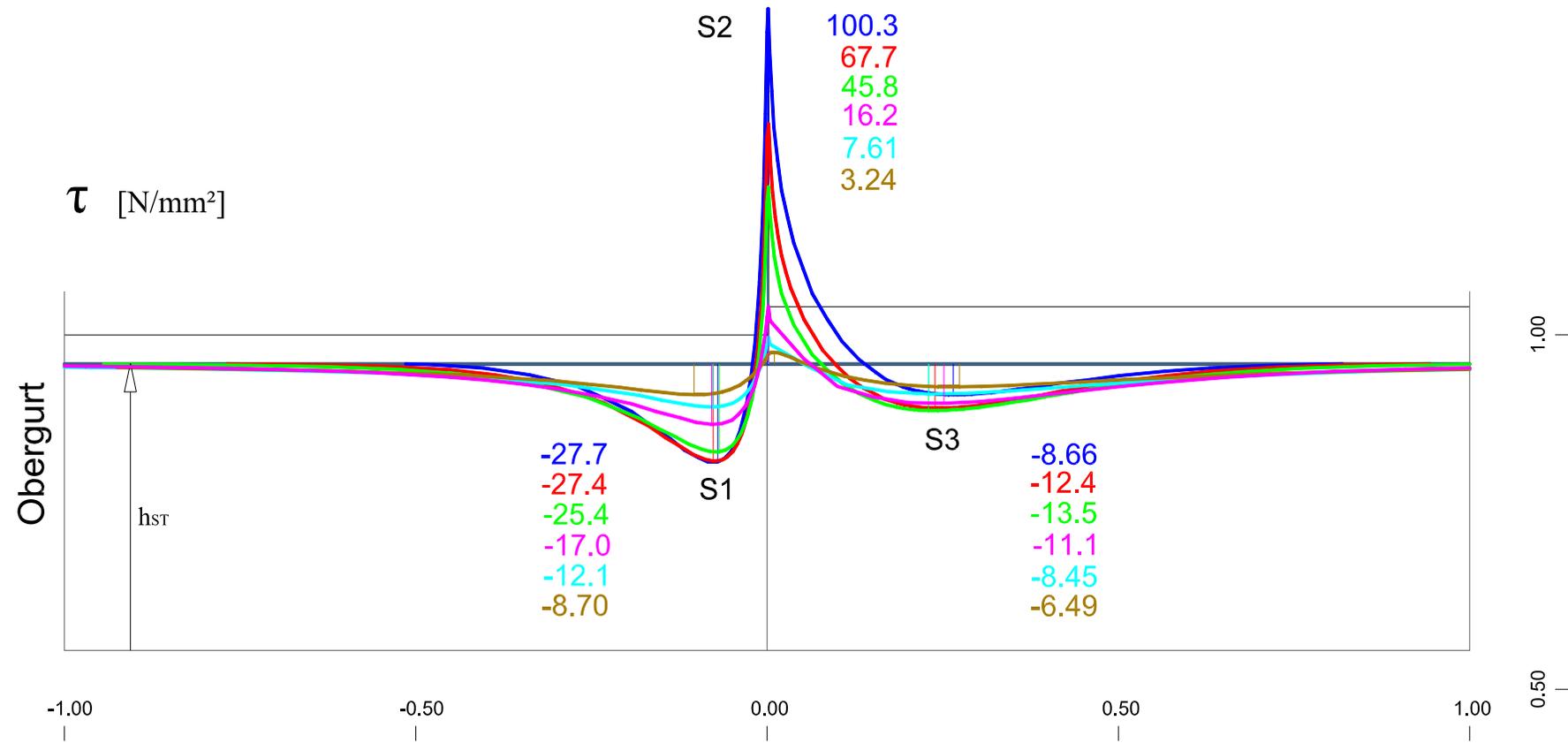


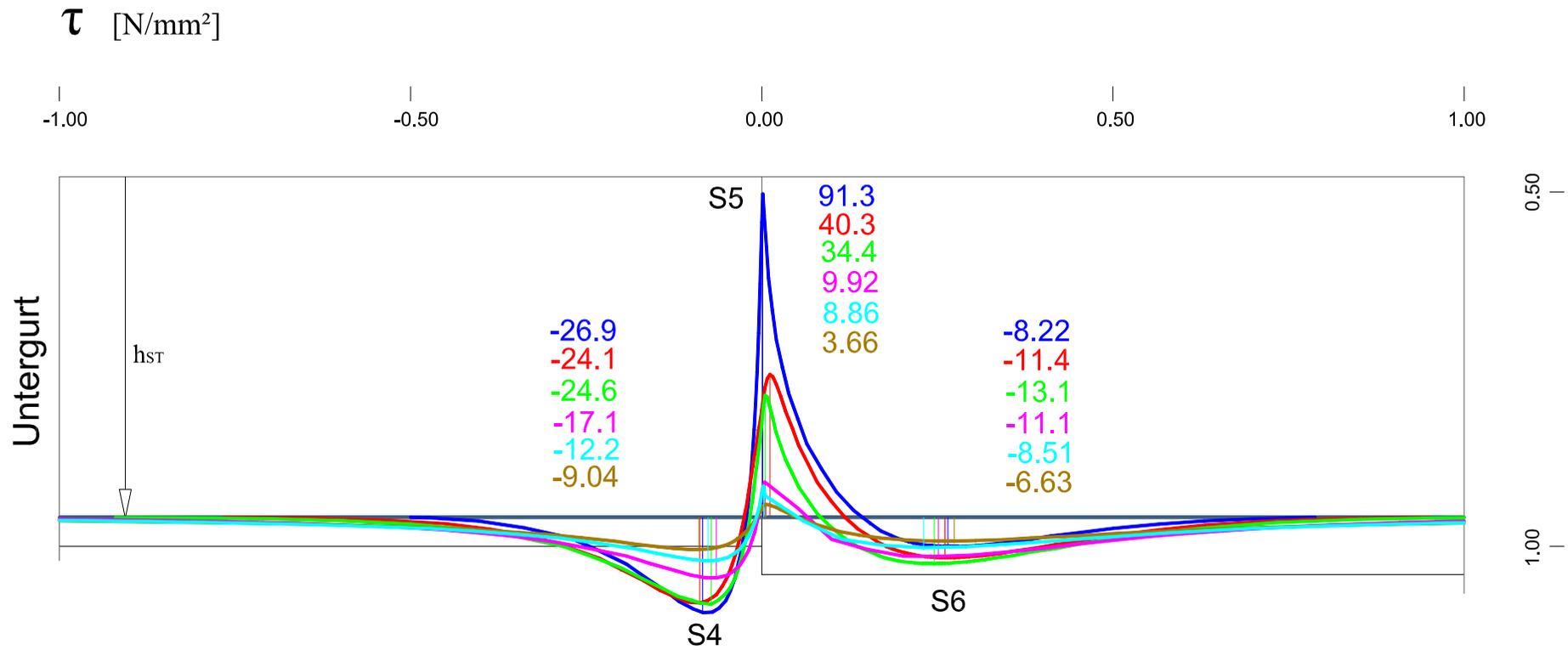
Abbildung 6-47: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe

Nach dem Überschreiten der maximalen Gurtnormalkraftdifferenz dN und dem weiteren Absinken der Höhe tritt der Einfluss des lokalen Momentes überproportional auf. Die von dM maßgebend beeinflusste Spannung S_2 steigt stark an, die von dN abhängigen Spannungen S_1 und S_3 sinken.



- Legende :
- Abrupt Dick, doppelt, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-48: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Obergurt



- Legende :
- Abrupt Dick, doppelt, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - Abrupt Dick, doppelt, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-49: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Untergurt

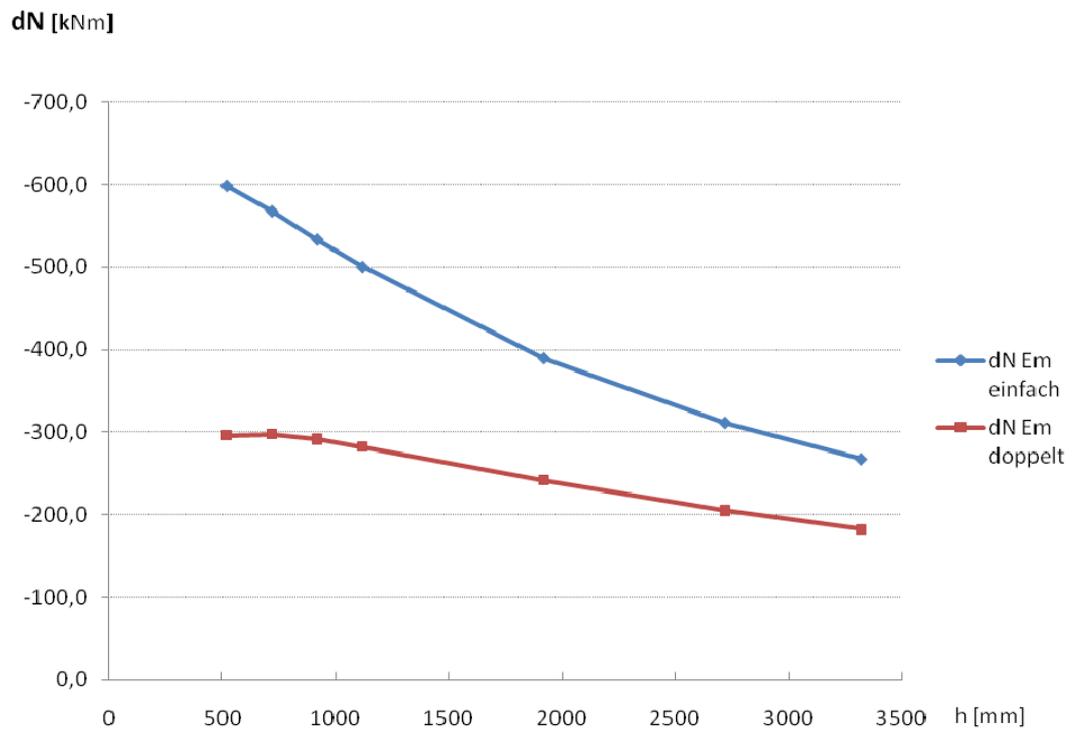
6.4.4.3) Modell E-Modul**6.4.4.3.A) lokale Schnittgrößen**

Abbildung 6-50: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Steghöhe

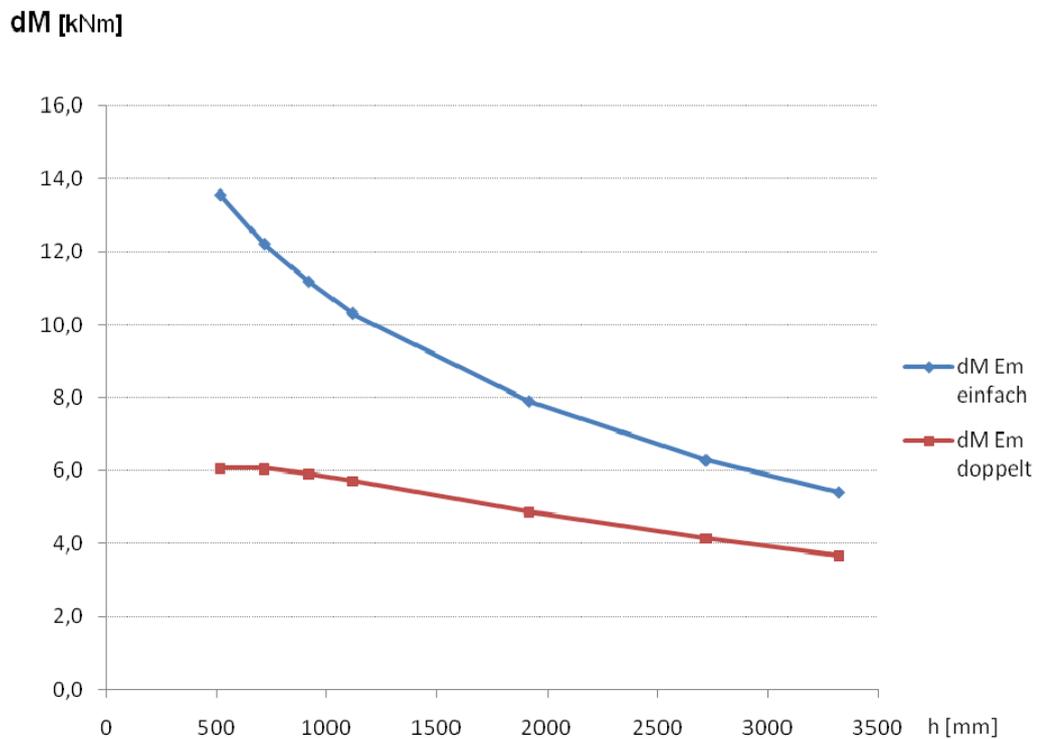


Abbildung 6-51: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Steghöhe

Im Modell „E-Modul“ kommt es zu keinem geometrischen Versatz der Gurt-
normalkräfte. Das lokale Moment am E-Modulsprung entspringt nur dem
unterschiedlichen Betrag der Gurtschnittgrößen. Daher ist es etwa um den Faktor
neun geringer, als im Modell „Abrupt Dick“. Außerdem ist das Moment deshalb
direkt abhängig von der Gurtnormalkraftdifferenz.

Die Gurtnormalkraftdifferenz dN erreicht auch bei diesem Modell einen
Höchstwert. Allerdings tritt dieser erst bei geringen Steghöhen von 360 mm beim
einfach symmetrischen und 640 mm beim doppelt symmetrischen Querschnitt
auf.

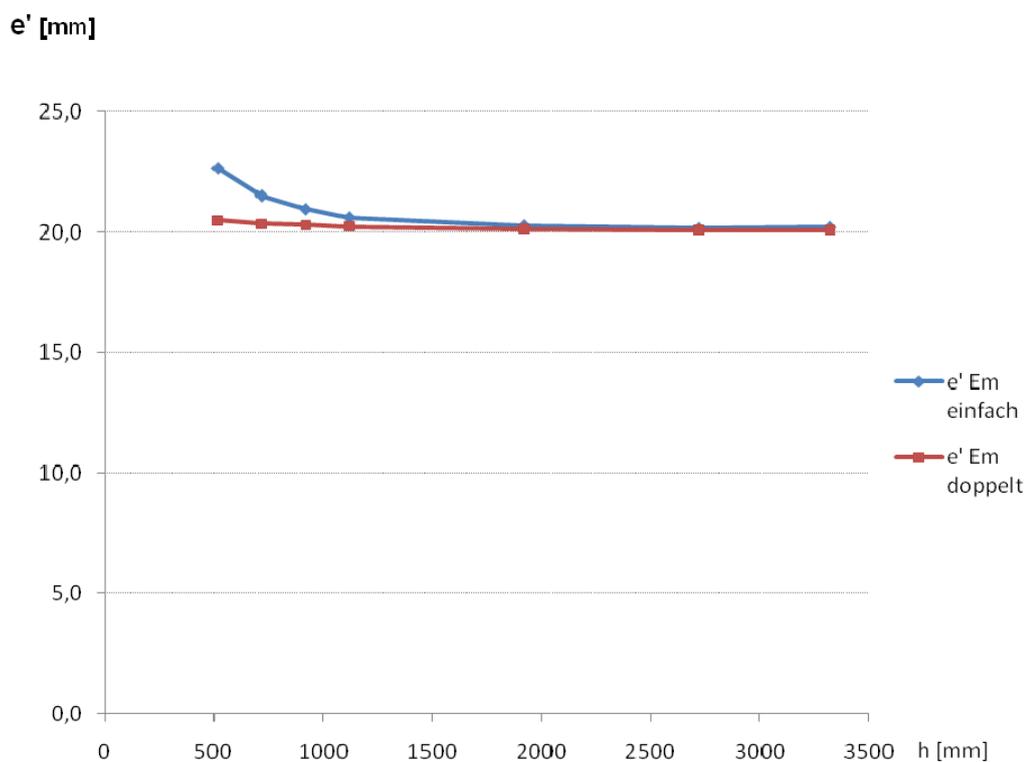


Abbildung 6-52: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation der Steghöhe

6.4.4.3.B) Modell E-Modul, einfach symmetrisch

Abbildung 6-53 zeigt den Schubspannungsverlauf bei variierender Steghöhe für das Modell „E-Modul“ mit Obergurtsprung. Ein Vergleich mit der Abbildung 6-50 zeigt, dass der Verlauf ähnlich dem der Gurtnormalkräfte ist. Durch den Einfluss der Höhe treten Spannungen in Querschnitten mit geringer Höhe stärker hervor und bei großer Höhe schwächer, als dies ein direkter Vergleich mit dN nahelegen würde. Der Einfluss des Versatzmomentes tritt bei diesem Modell nicht zutage, da dieses hierbei sehr gering ist.

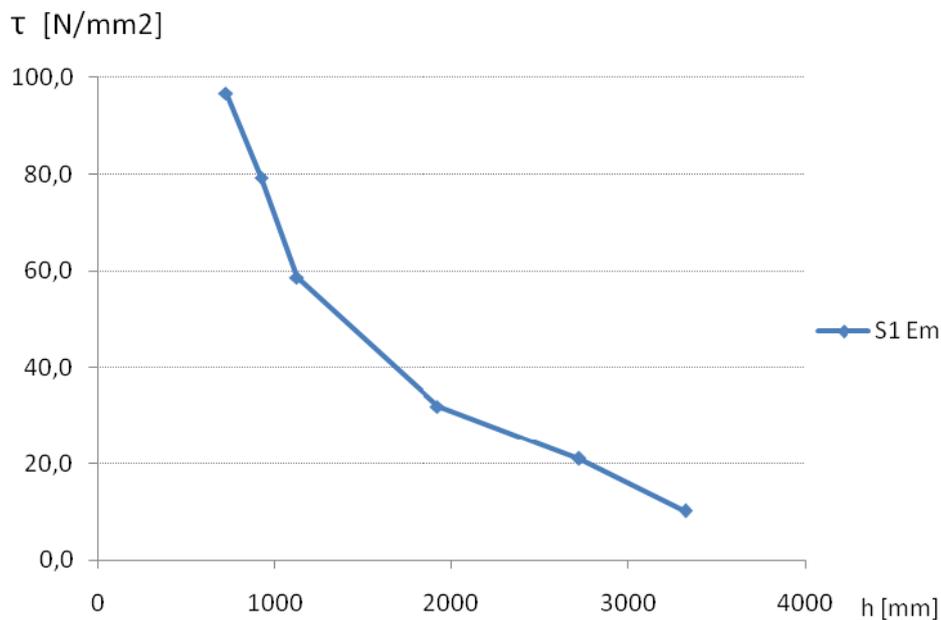


Abbildung 6-53: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe

Die zugehörigen Lasteinleitungslängen steigen annähernd proportional zur Höhe an. Dies steht in Übereinstimmung mit dem Verhalten in den vorhergehenden Modellen. Der Einflussbereich L2 ist größer als L1. Das erklärt sich durch den doppelten E-Modul des Gurtes im Querschnitt 2 – dieser ist steifer und die Spannungen erfahren dort eine weitere Verteilung.

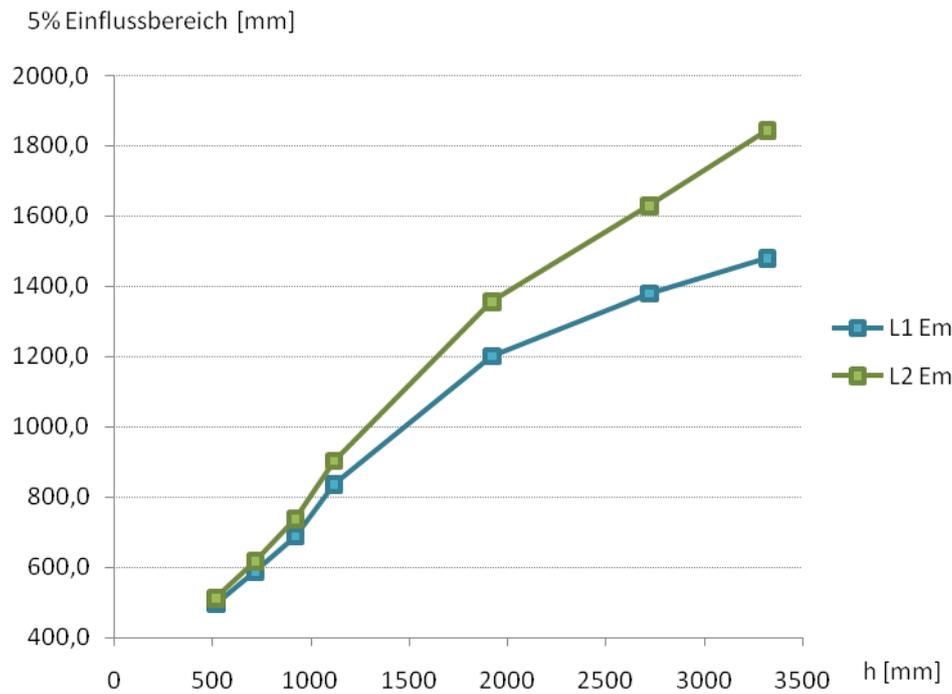
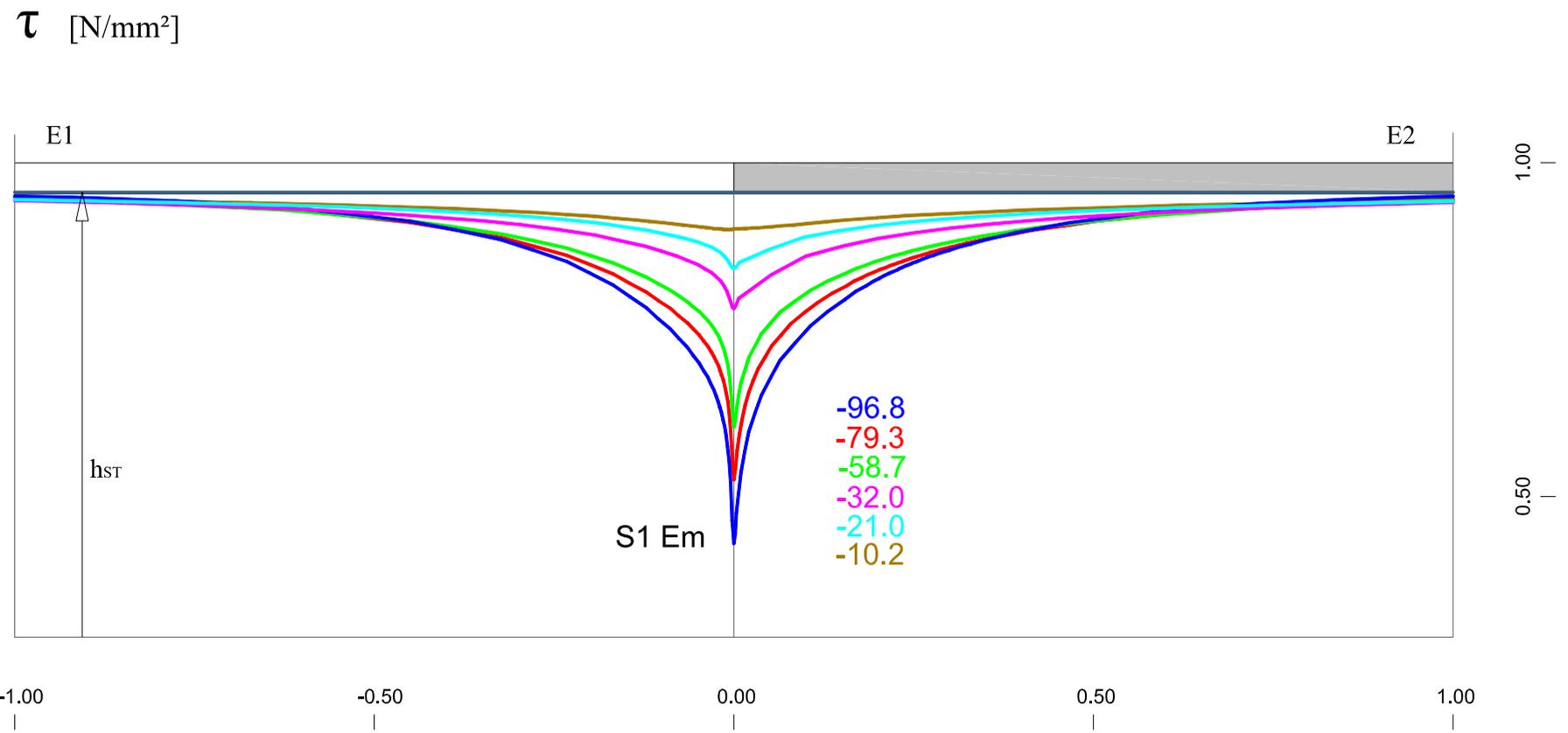


Abbildung 6-54: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe



- Legende :
- E-Modul, einfach, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, einfach, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-55: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe

6.4.4.3.C) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch

Bei der gegebenen Ausführung mit Materialsprüngen an Ober- und Untergurt ist ein ähnliches Verhalten wie schon bei der einfach symmetrischen Ausführung zu beobachten. Abbildung 6-56 zeigt den Schubspannungsverlauf bei variierender Steghöhe. Ein Vergleich mit der Abbildung 6-50 zeigt, dass die maximale Gurtnormalkraft direkte Auswirkungen auf das Spannungsverhalten hat. Die Spannungen sind durch die Höhe beeinflusst und treten bei geringer Höhe stärker hervor. Bei einer Steghöhe von 600 mm ist ein Umschlagen in der Krümmung des Spannungsverlaufes, ähnlich dem von dN, sichtbar. Das lokale Moment ist bei diesem Modell nur gering wirksam.

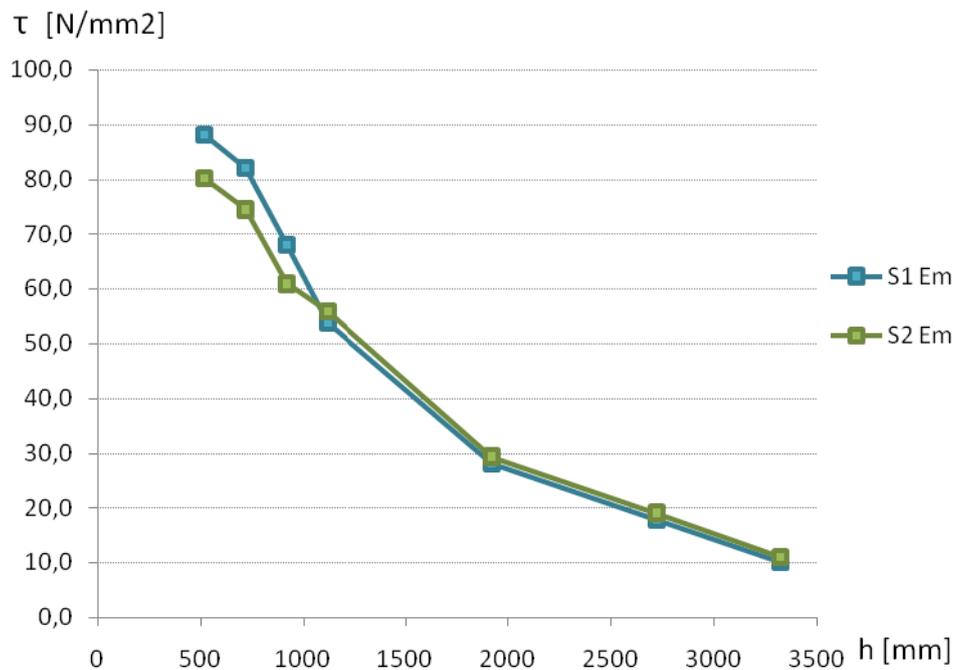


Abbildung 6-56: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe

Die zugehörigen Lasteinleitungslängen steigen annähernd proportional mit der Höhe an. Dies steht in Übereinstimmung mit dem Verhalten in den vorhergehenden Modellen. Aufgrund des höheren E-Moduls im Querschnitt 2 ist die zugehörige Lasteinleitungslänge L2 größer als L1.

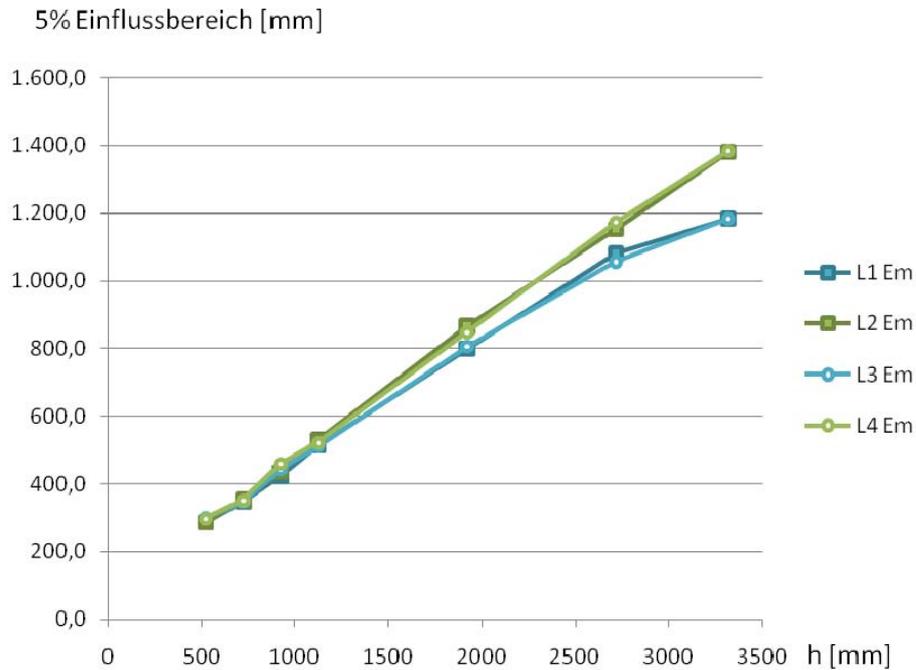
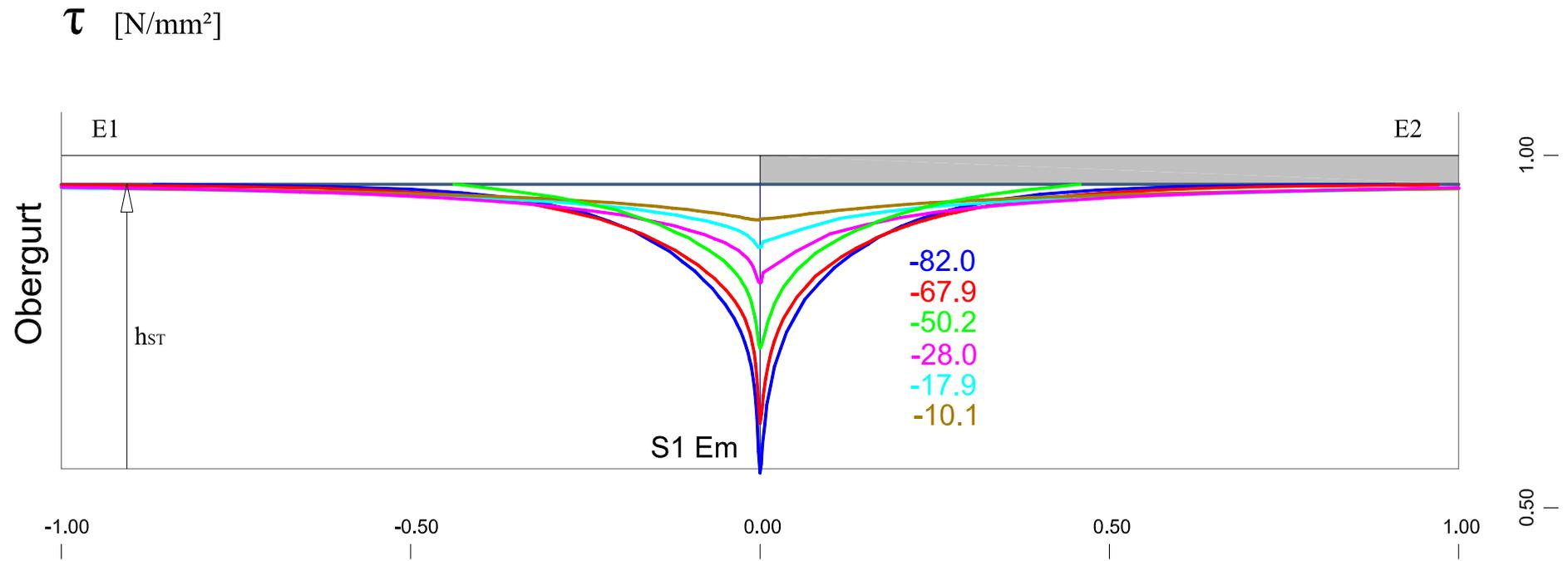
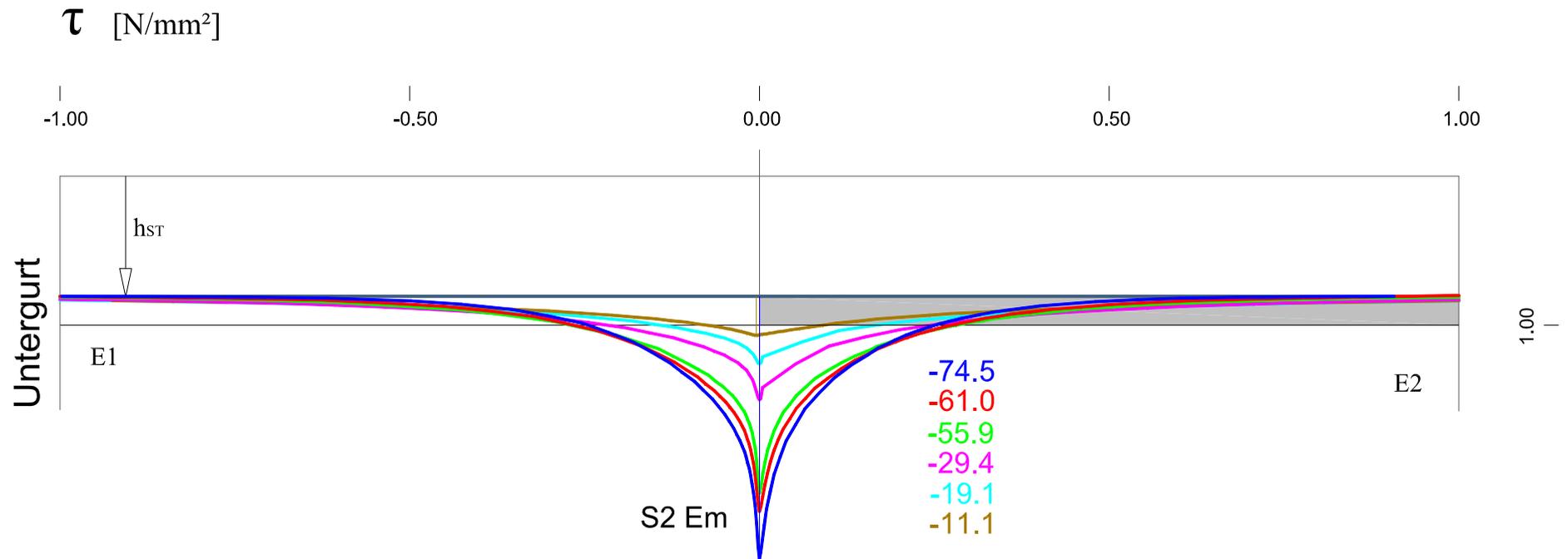


Abbildung 6-57: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe



- Legende :
- E-Modul, doppelt, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-58: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Obergurt



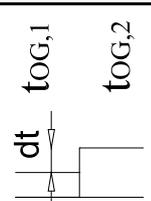
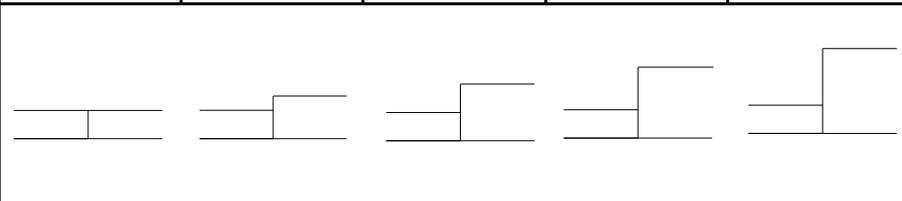
- Legende :
- E-Modul, doppelt, hst=720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=1120mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=1920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=2720mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 - E-Modul, doppelt, hst=3320mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Abbildung 6-59: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Untergurt

6.4.5) Gurtdickensprung dt

6.4.5.1) Allgemein

Tabelle 6-12: Parameterbereich bei Variation des Gurtdickensprunges mit $t_{OG,1} = 40,0$ mm

	Basis- querschnitt	dt variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
α	2,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Darstellung						

Der Querschnitt 1 besitzt eine konstante Gurtdicke von $t_{OG,1} = 40$ mm mit einem E-Modul von $E = 210.000$ N/mm². Die Dicke der Gurte der Querschnitte 2 und 3 wird beim Modell „Abrupt Dick“ ausgehend vom Basisquerschnitt erhöht und verringert. Die Differenz der Gurtdicken dt ergibt sich wie folgt:

$$dt = t_{OG,2 \text{ bis } 3} - t_{OG,1}$$

Für das Modell „E-Modul“ werden in entsprechendem Maß die E-Module der Querschnitte 4 und 5 variiert. Um einen Zusammenhang zwischen den Gurtdicken beziehungsweise E-Modulen herzustellen, wurde der Parameter α eingeführt. Betrachtet wird hierbei der Bereich von $\alpha = 1,0$ bis $3,0$.

$$\alpha = \frac{t_{OG,2 \text{ bis } 3}}{t_{OG,1}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{E_{OG,4 \text{ bis } 5}}{E_{OG,1}}$$

Beim Vergleich der Gurtkraftdifferenzen der Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“ aus den Abbildungen 6-60 und 6-71 zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten. Beim Modell „E-Modul“ steigt dN_{Em} schneller an, als dN des Modells „Abrupt Dick“. Die Ursache liegt in der beim Modell „E-Modul“ gleichbleibenden Gurtdicke. Beim Modell „Abrupt Dick“ steigt diese nach außen hin an, wodurch der Obergurt nicht ideal ausgenutzt werden kann. Beim Modell „Abrupt Dick“ steigt das lokale Moment dM , ähnlich der Gurtdickendifferenz dt, linear an, beim Modell „E-Modul“ verhält sich es sich ähnlich zur Gurtkraftdifferenz dN .

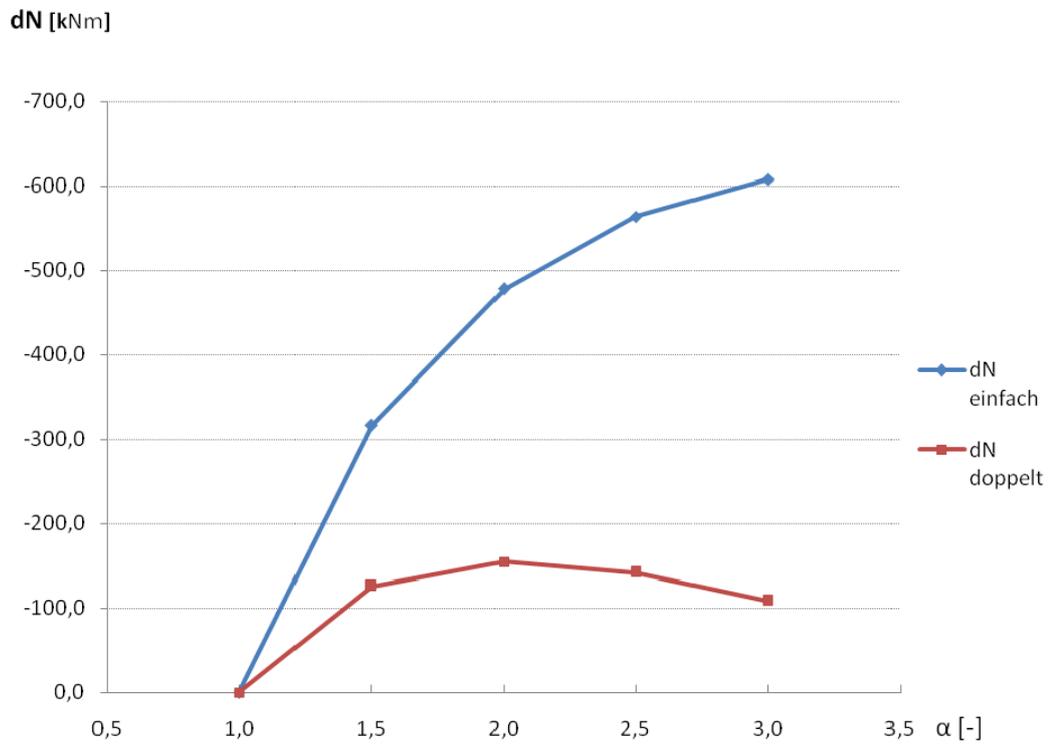
6.4.5.2) Modell Abrupt Dick**6.4.5.2.A) Lokale Schnittgrößen**

Abbildung 6-60: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Gurt dickensprunges

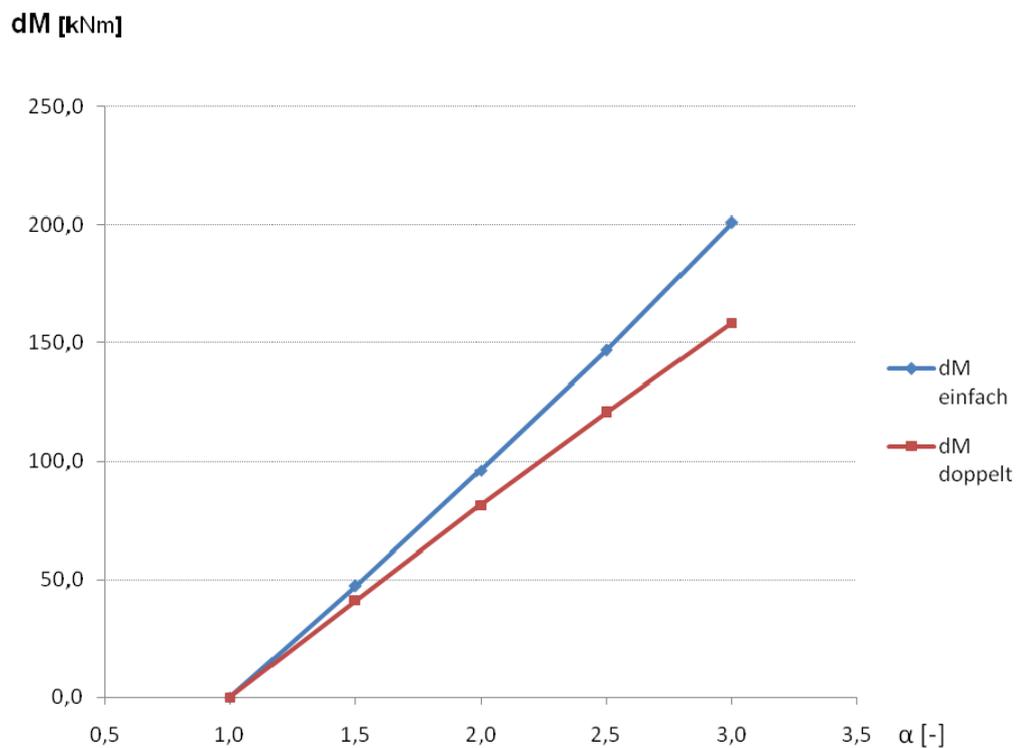


Abbildung 6-61: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Gurt dickensprunges

Die Abbildung 6-60 zeigt die Differenz der Gurtnormalkräfte bei Variation der Gurt Dicke. Es zeigt sich bei steigendem Dickensprung aufgrund der schwächeren Ausnutzung des Querschnittes ein Absinken der Gurtkraftdifferenz dN . Eine Steigerung der Obergurtdicke um mehr als das doppelte bringt eine immer geringere Ausnutzung der Tragfähigkeit des dickeren Gurtes. Bei einer Verdickung beider Gurte ist das bereits ab der 1,5fachen Dicke der Fall. Beim Verhalten des lokalen Momentes dM in Abbildung 6-61 ist ein annähernd linearer Verlauf zu erkennen. Die ideellen Hebelarme beider Modelle weichen, aufgrund der stark unterschiedlichen Gurtkraftdifferenz, mit dem Parameter α zunehmend voneinander ab. Die den Abbildungen zugehörigen Tabellen sind im Anhang B 13 bis Anhang B 20 beigelegt.

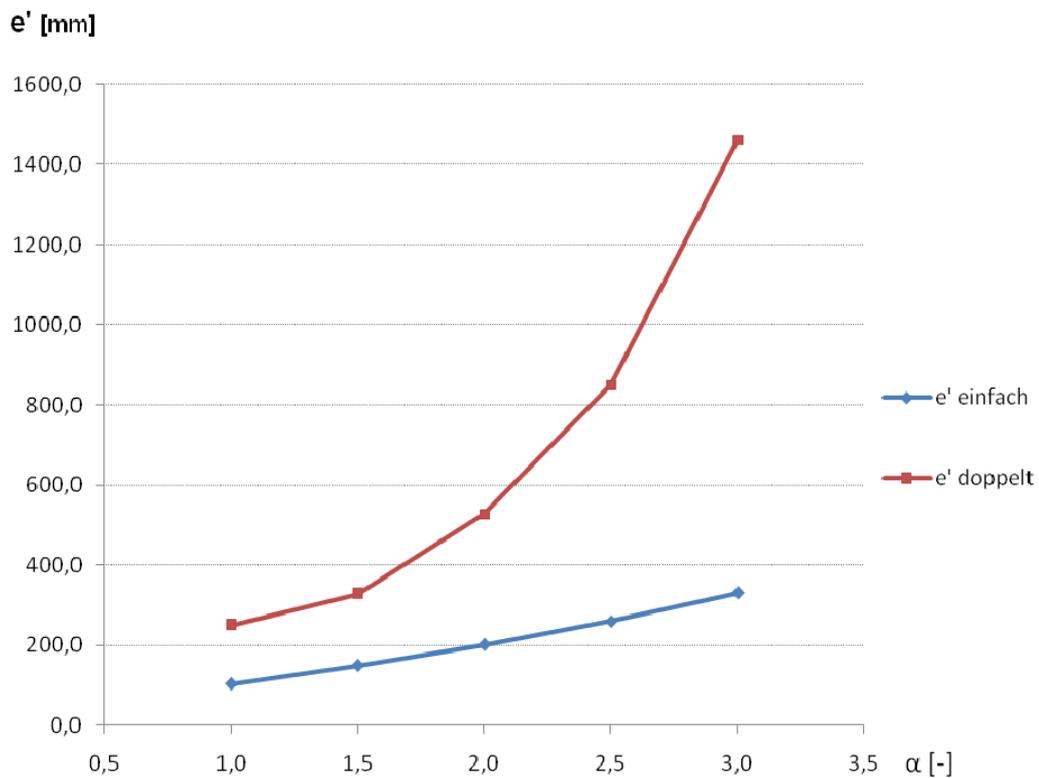


Abbildung 6-62 Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation des Gurt Dickensprunges

6.4.5.2.B) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch

Die Abbildung 6-63 zeigt das sehr unterschiedliche Verhalten der Schubspannungsspitzen. S2 verhält sich dabei entsprechend dem Verlauf der Gurtkraftdifferenz dN . Abweichend davon besitzt die Spannung S1 einen verhältnismäßig steilen Anstieg, ähnlich dem von dN_{Em} . Die zugehörige Lasteinleitungslänge, die in Abbildung 6-64 dargestellt ist, sinkt geringfügig. Ebenfalls anders verändert sich die Spannung S3. Durch die steigende Gurtstärke des Querschnitts 2 kommt es zu einer immer weiteren Verteilung der Schubspannungen über eine größere Länge. Die Lasteinleitungslänge L_2 steigt mit Erhöhung der Gurtstärkedifferenz proportional an. Das Spannungsmaximum S3 nimmt dabei ab $\alpha = 2,5$ ab.

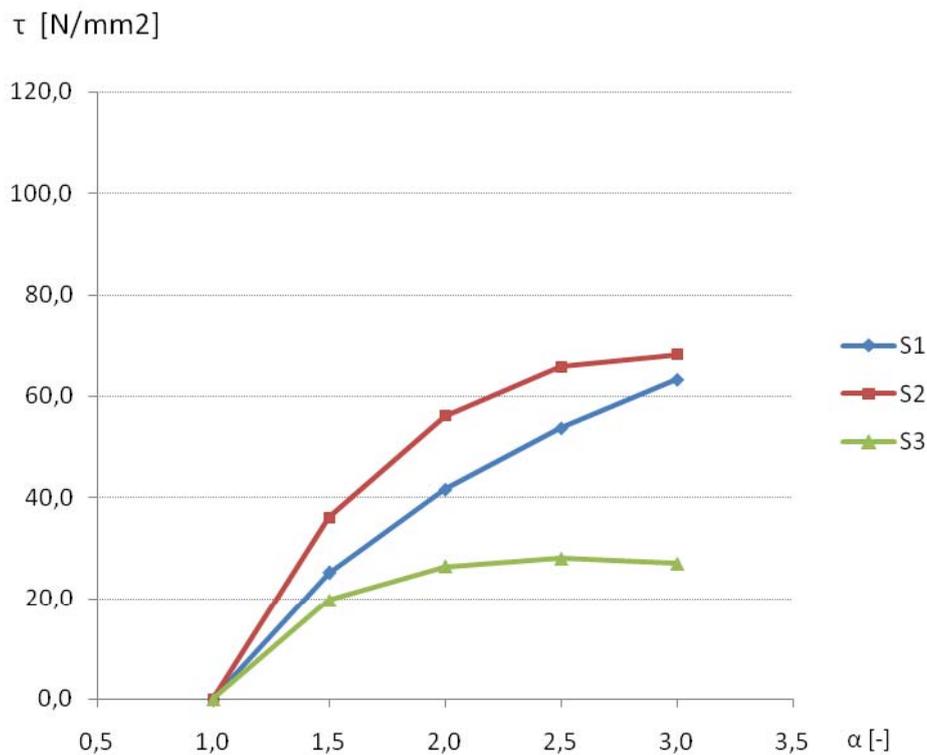


Abbildung 6-63: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtstärkesprunges

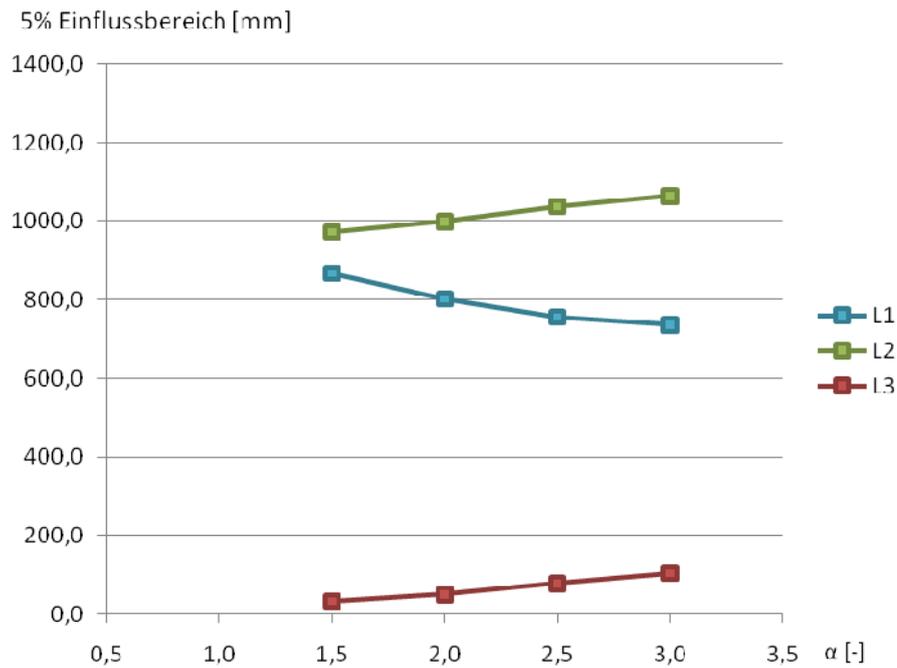


Abbildung 6-64: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurt dickensprunges

Nachfolgend sind die Flächen A1 bis A3 zueinander aufgetragen. In Summe ergeben diese den Verlauf von dN . Das Verhalten von A1 und A3 entspricht dem ihrer zugehörigen Spannungen $S1$ und $S3$. Es zeigt sich, dass etwa 50% der zu übertragenden Schubkraft bereits vor dem Dickensprung in den Gurt eingeleitet werden.

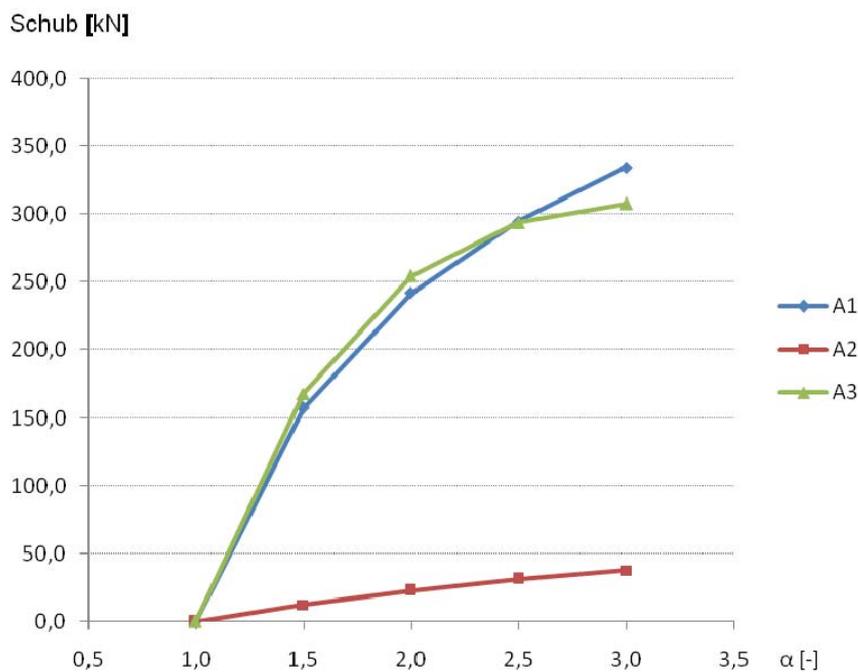


Abbildung 6-65: Verhalten der Schubkräfte bei Variation des Gurt dickensprunges

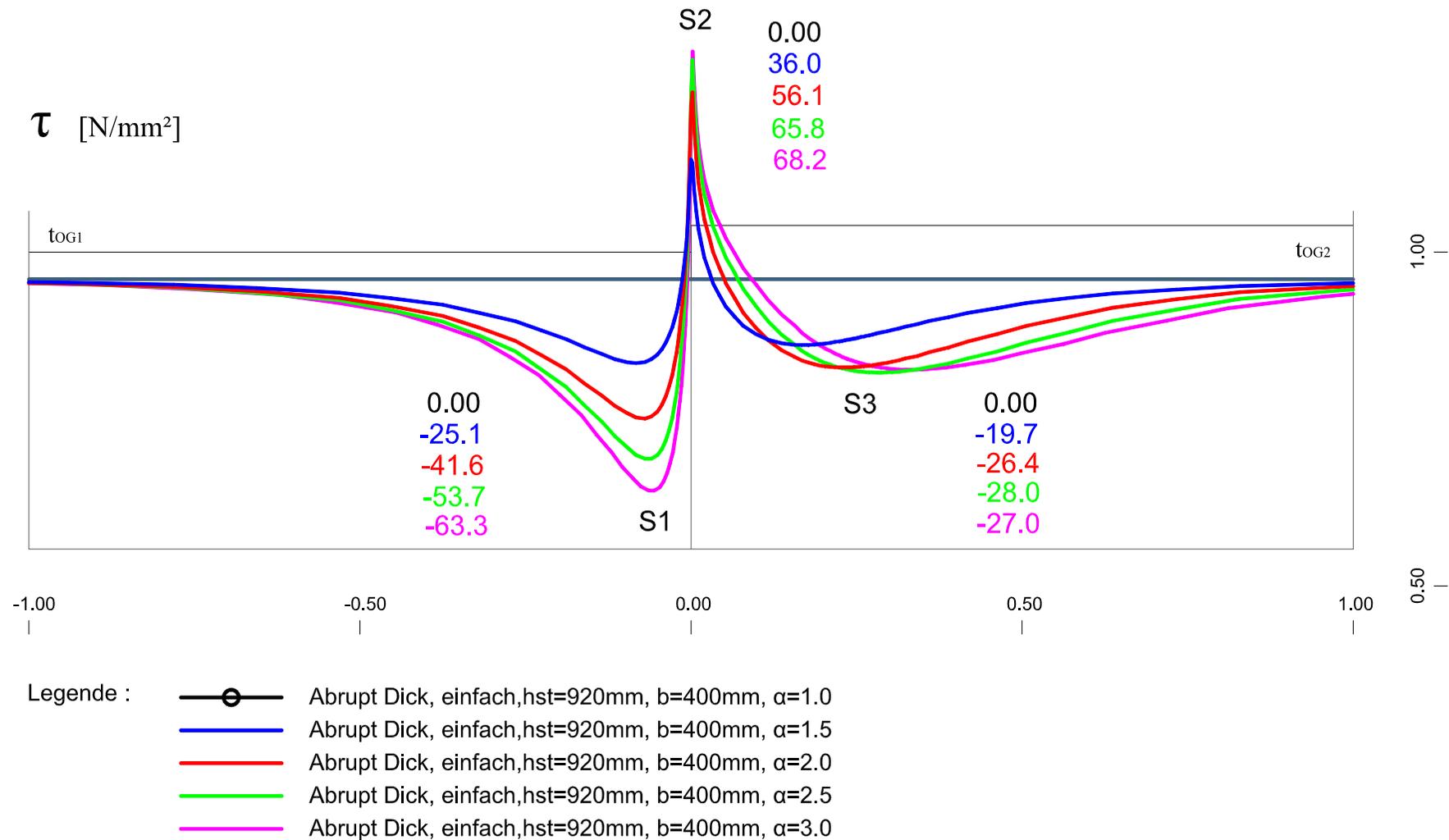


Abbildung 6-66: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurtdickensprunges

6.4.5.2.C) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

Durch die Ausführung des Trägers mit Ober- und Untergurtdickensprung sinkt das Niveau der Gurtkraftdifferenz dN stark ab. Das lokale Moment bleibt jedoch erhalten. Das Moment gewinnt daher anteilmäßig an Einfluss. Abbildung 6-67 stellt den Verlauf der Schubspannungen bei einem doppelt symmetrischen Querschnitt für das Modell „Abrupt Dick“ dar. Im Vergleich zur Abbildung 6-63 steigt die vom lokalen Moment beeinflusste Spannung S2 deutlich stärker an. Die Spannungen S1 und S3 liegen unter dem dortigen Niveau. Diese sind stärker von der gesunkenen Gurtnormalkraft abhängig.

Durch eine geringfügige Änderung der Lage der Schnittlinie und der örtlichen Feinheit des FE-Netzes wird besonders die Spannung S2 bereits stark beeinflusst. Da eine genaue Lage eines Schnittes im FE-Modell nicht definierbar ist, sind in der nachfolgenden Abbildung Abweichungen zwischen Ober- und Untergurt ersichtlich.

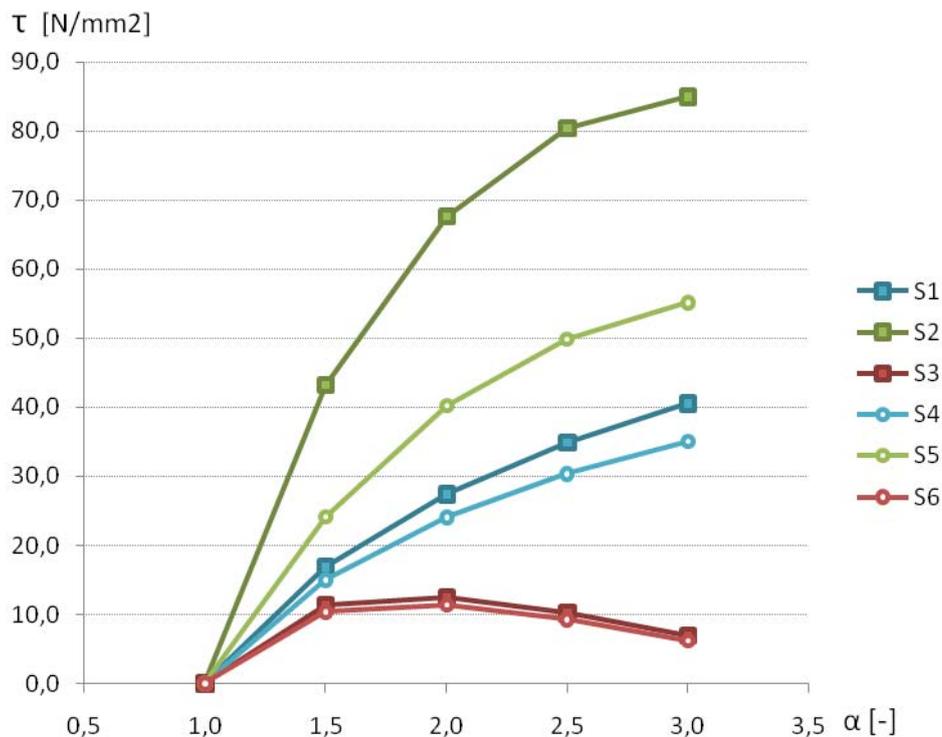


Abbildung 6-67: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges

Das Modell verhält sich ähnlich wie bei einfach symmetrischer Ausführung. Abbildung 6-68 zeigt das Verhalten der Lasteinleitungslängen. Die dem Querschnitt 1 zugeordnete Länge $L1$ sinkt mit steigender Dicke α ab. Gleichzeitig steigt die zugehörige Spannung $S1$ an. Am Querschnitt 3 steigt parallel dazu die Lasteinleitungslänge $L2$ an und die zugehörige Spannung $S3$ sinkt ab. Die Länge $L3$ des Spannungsblocks $A2$ dehnt sich ebenfalls stetig aus.

Im Querschnitt 1 konzentrieren sich also die Spannungen immer mehr um das Maximum direkt vor dem Dickensprung und im Querschnitt 3 kommt es zu einer immer größeren Verteilung durch die steigende Gurtdicke.

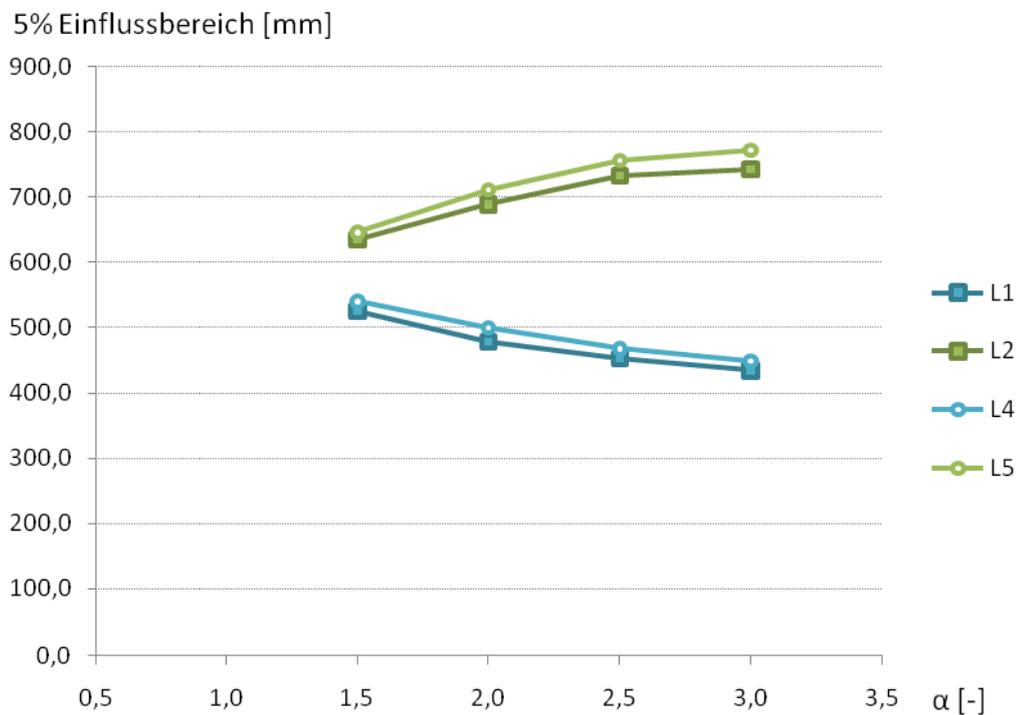


Abbildung 6-68: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges

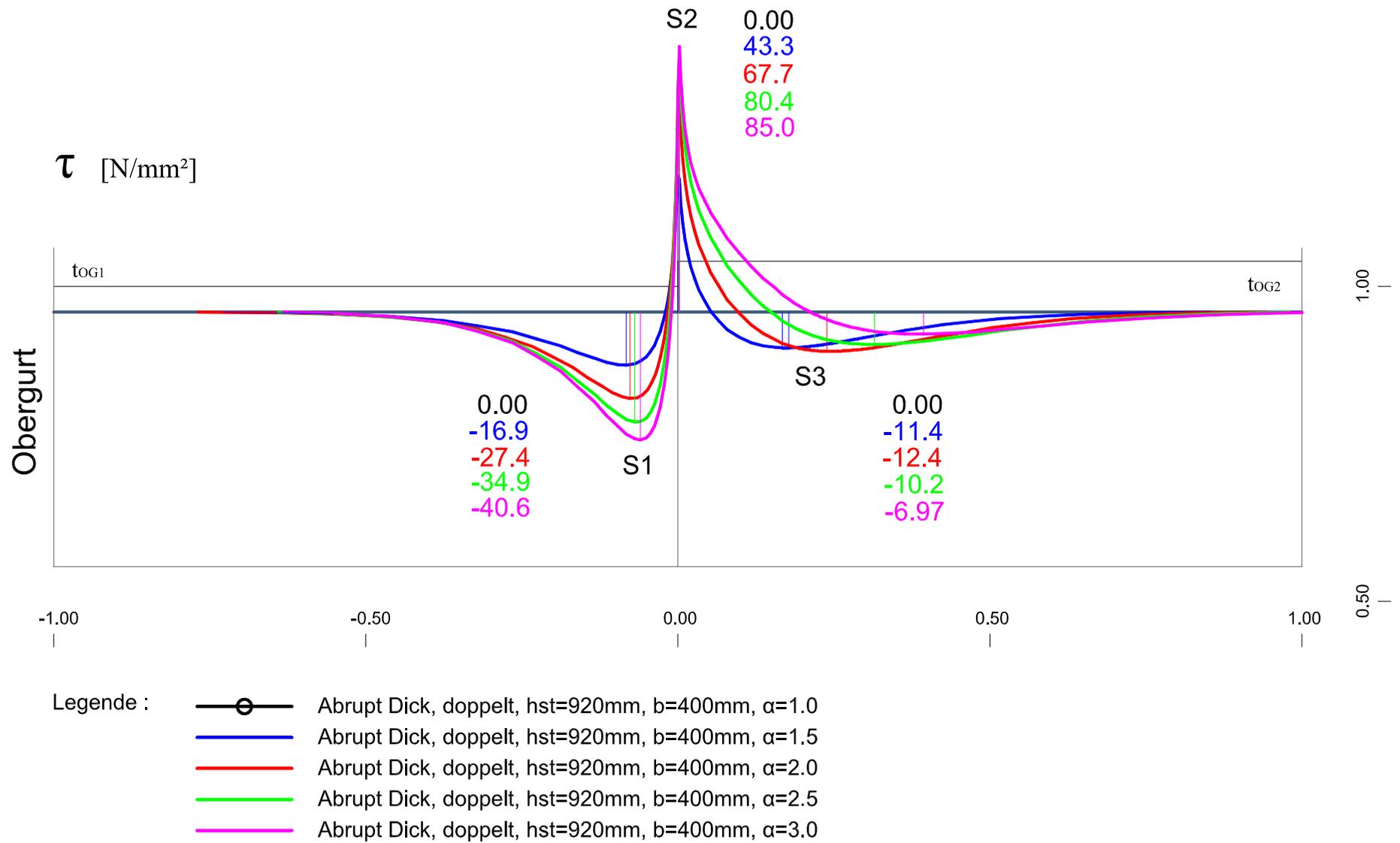


Abbildung 6-69: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurtdickenspr., Obergurt

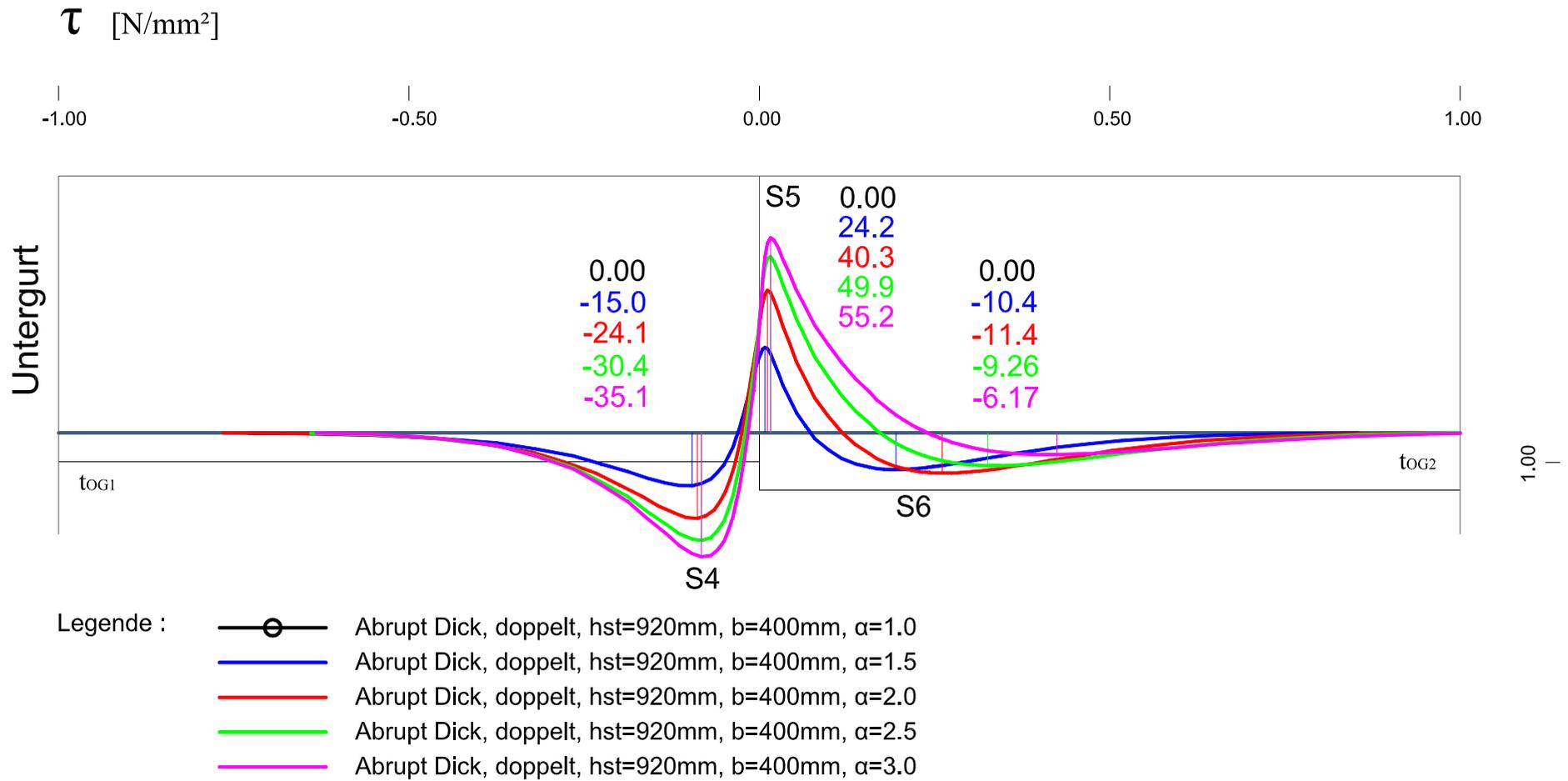


Abbildung 6-70: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurt dickenspr., Untergurt

6.4.5.3) Modell E-Modul

6.4.5.3.A) lokale Schnittgrößen

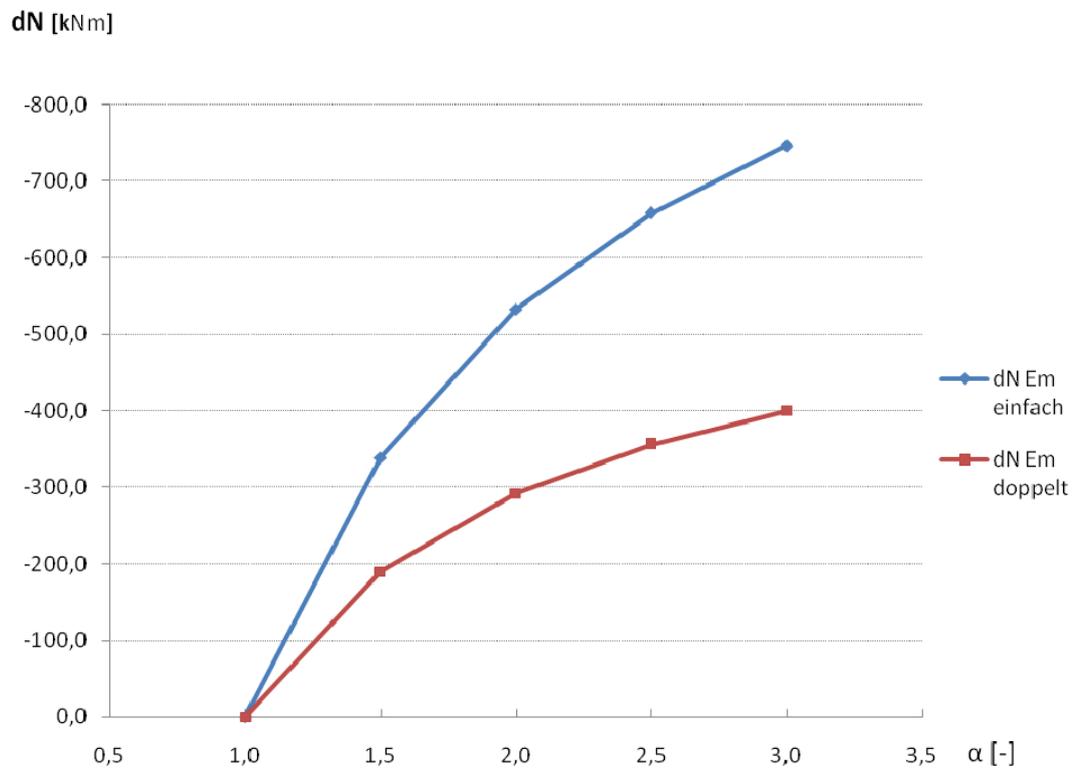


Abbildung 6-71: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Gurtdickensprunges

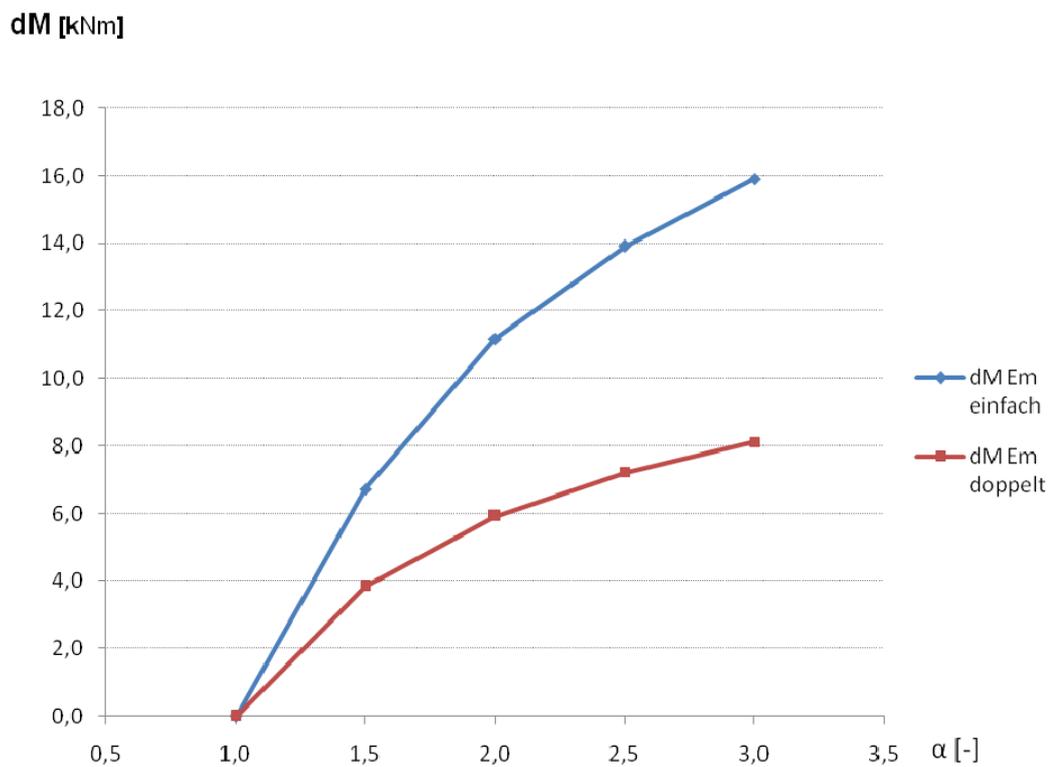


Abbildung 6-72: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Gurtdickensprunges

6.4.5.3.B) Modell E-Modul, einfach symmetrisch

Beim Modell „E-Modul“ entsteht nur ein geringes Versatzmoment. Es kommt daher zu keinem Vorzeichenwechsel in den Schubspannungen. Das auftretende Maximum $S1_{Em}$ weist einen ähnlichen Verlauf wie die Gurtnormalkraftdifferenz dN_{Em} auf. Die Lasteinleitungslängen sinken mit steigender Gurtdicke, wobei die Länge $L2$ aufgrund der größeren Steifigkeit des dicken Gurtes größer ist als $L1$.

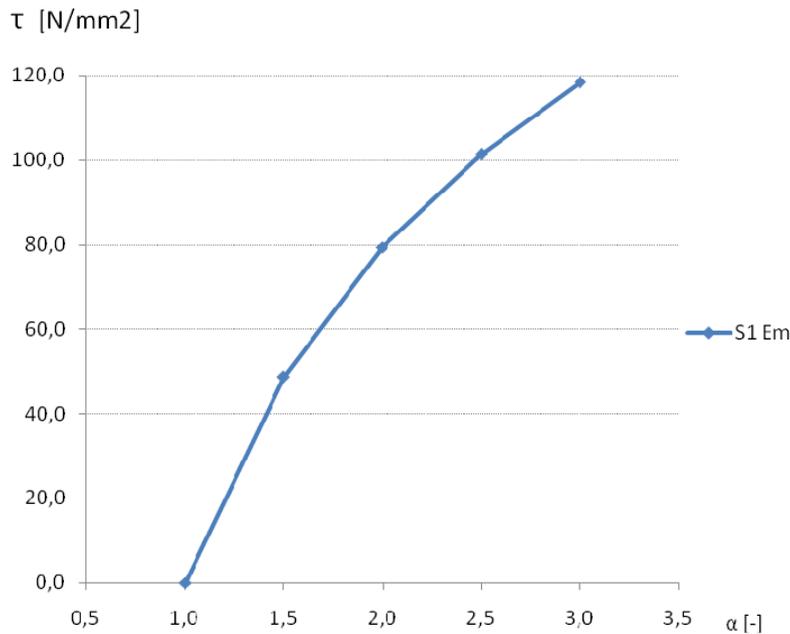


Abbildung 6-73: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges

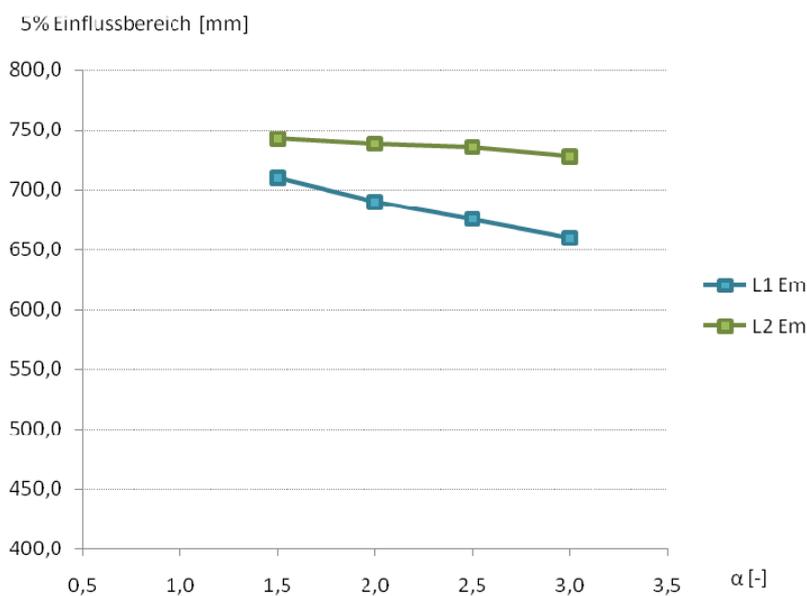


Abbildung 6-74: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges

6.4.5.3.C) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch

Obwohl sich die Gurtkraftdifferenz dN im Vergleich zum Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“ um nahezu die Hälfte reduziert, sinken die Spannungen aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Gurte nicht entsprechend stark ab. Es lässt sich davon unabhängig generell dasselbe Verhalten beobachten.

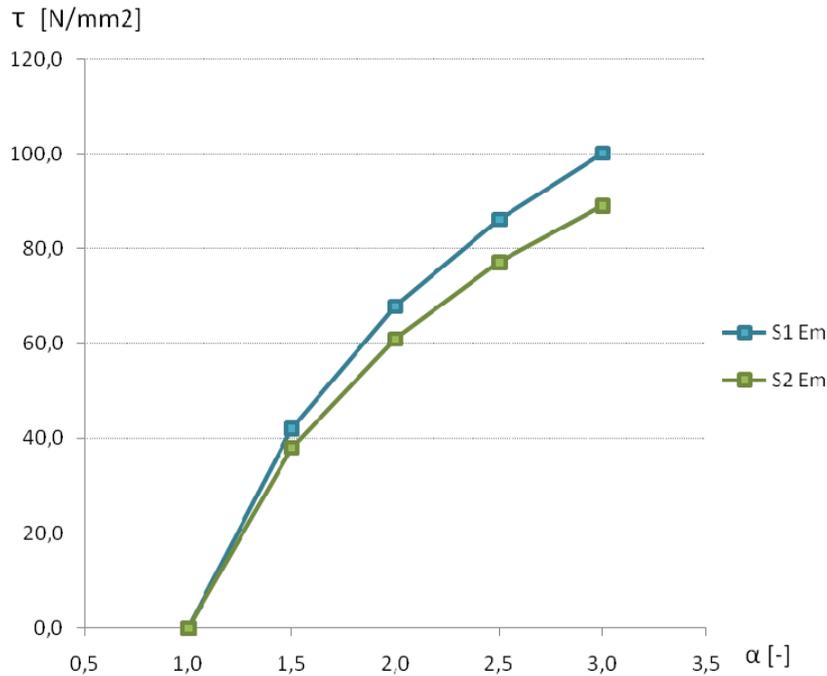


Abbildung 6-75: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurt dickensprunges

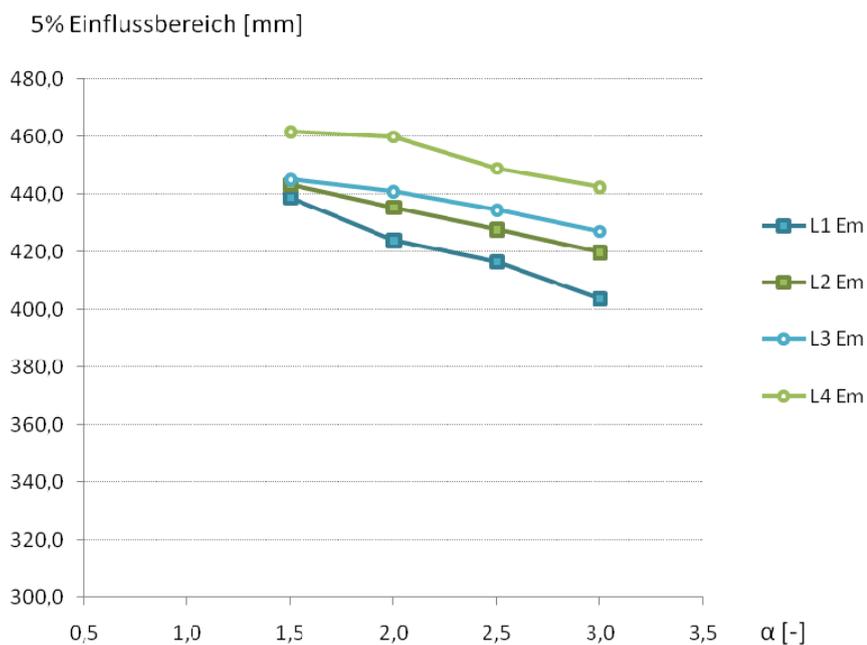


Abbildung 6-76: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurt dickensprunges

6.4.6) Variation des Obergurtdicke des Querschnitt 1

Im Folgenden werden die Auswirkung einer Änderung der Gurtdicke des Querschnitts 1, $t_{G,1}$ untersucht. Dabei wird das Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ zugrunde gelegt. Die zugehörige Parameterstudie beschränkt sich auf die Variation der Gurtdicke dt des Querschnitts 2. Der Parameter α bezieht sich dabei auf die neue Gurtdicke $t_{G,1} = 80$ mm. Alle weiteren Abmessungen und Belastungen entsprechen dem Basismodell, das zu Beginn der Diplomarbeit in Kapitel 5.2) vorgestellt wurde.

Um einen Vergleich mit Kapitel 6.4.5.2.B), das sich auf eine Gurtdicke des Querschnittes 1 von $t_{G,1} = 40$ mm bezieht, zu ermöglichen, werden Kräfte, Spannungen und Längen aus diesem Kapitel mit dem Index „t40“ versehen. Alle ermittelten Größen die sich auf eine Gurtdicke $t_{G,1} = 80$ mm beziehen erhalten den Index „t80“.

Tabelle 6-13: Parameterbereich bei Variation des Gurtdickensprunges mit $t_{G,1} = 80,0$ mm

α	Basis- querschnitt	dt variiert [mm]						
		80	100	120	140	160	180	200
2,0		1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5

Aufgrund der Erhöhung der Gurtdicke $t_{G,1}$ kommt es zu einer Veränderung aller Teilschnittgrößen im Querschnitt 1. Die Schnittgrößen des Querschnitts 2 sind davon unabhängig. Aus der Zusammenführung der Schnittgrößen vor und nach dem Dickensprung ergeben sich neue lokale Schnittgrößen.

Abbildung 6-77 und 6-78 zeigen diese im Vergleich mit den in Kapitel 6.4.5.2.A) dargestellten lokalen Schnittgrößen des Modells mit $t_{G,1} = 40,0$ mm. Es lässt sich für die Gurtkraftdifferenz dN und das lokale Moment dM ein annähernd gleichmäßig reduzierter Verlauf erkennen. Die Normalkraftdifferenz dN beträgt etwa 26% und das lokale Moment etwa 92% im Vergleich zur Ausführung mit der Gurtdicke $t_{G,1} = 40,0$ mm. Aufgrund des nahezu gleichbleibenden Momentes dM bei gleichzeitig verhältnismäßig großer Reduktion der Gurtkraftdifferenz dN lässt sich ein ansteigen des ideellen Hebelarmes e' ableiten. Dieser kennzeichnet den Einfluss des lokalen Momentes auf das Modell.

6.4.6.1) Modell Abrupt Dick

6.4.6.1.A) lokale Schnittgrößen und Spannungen

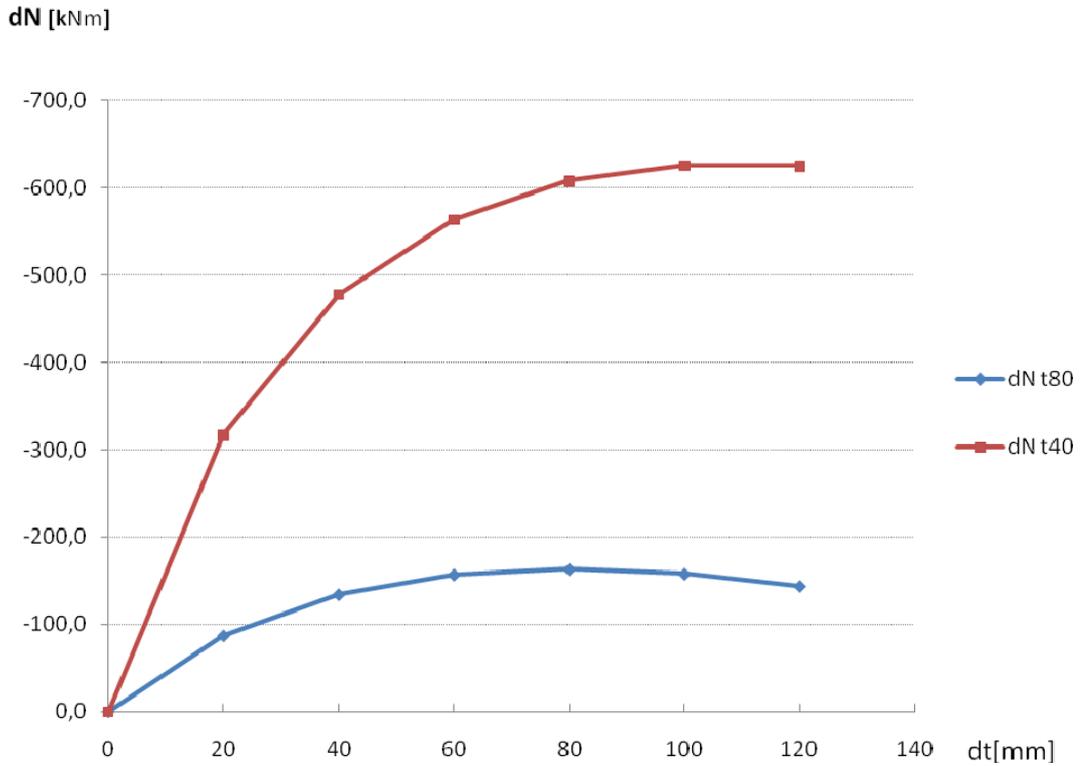


Abbildung 6-78: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Dicken spr.

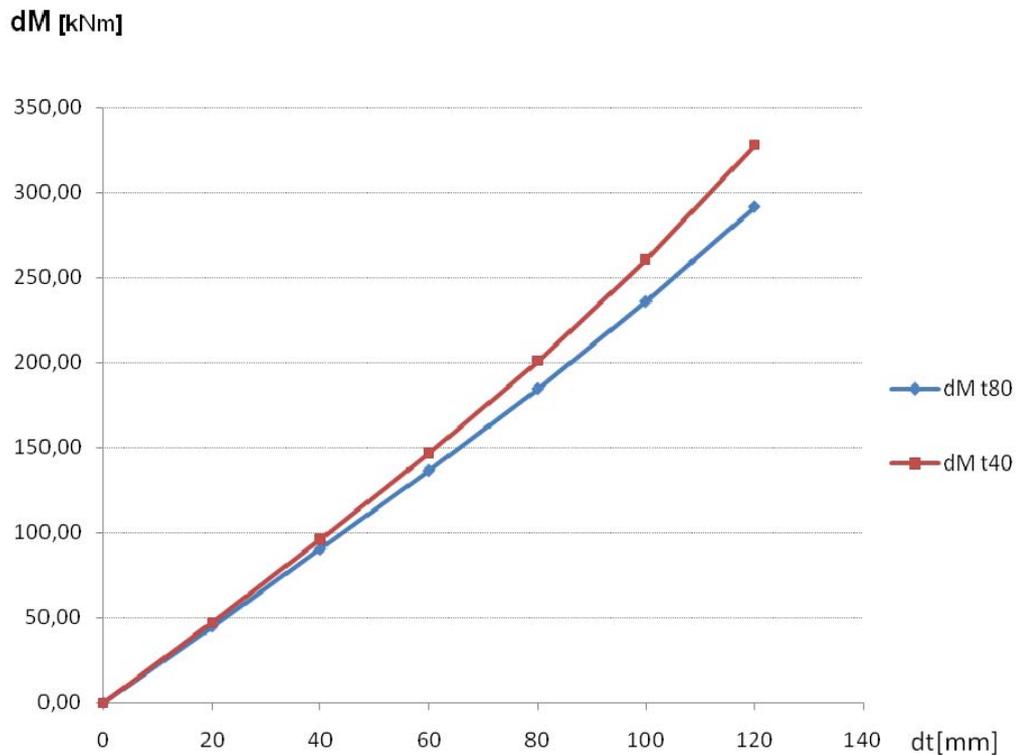


Abbildung 6-77: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Dicken spr.

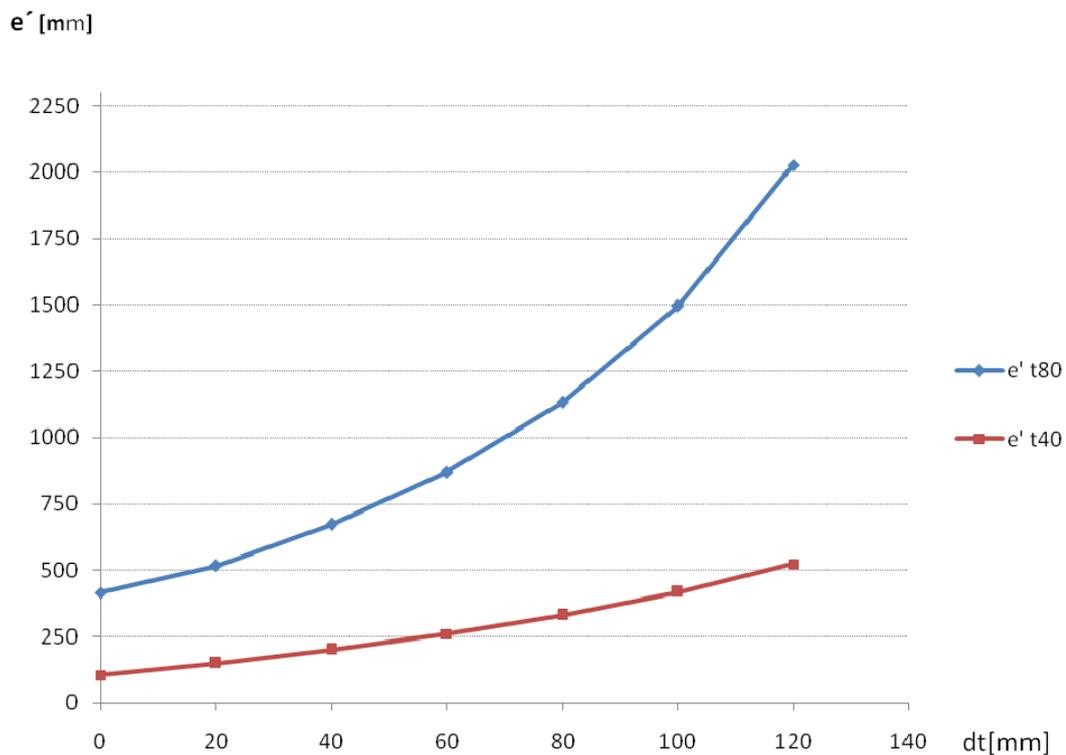


Abbildung 6-79: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation des Dickenspr.

Die Abbildungen 6-80 und 6-81 zeigen im Folgenden die Schubspannungsverläufe für das Modell „Abrupt Dick“ in einfach symmetrischer Ausführung mit den Obergurtdicken $t_{G,1} = 80$ mm und 40 mm. Wie sich bereits in vorhergehenden Studien gezeigt hat, weisen die Spannungen S1 und S3 eine größere Abhängigkeit von der Gurtkraftdifferenz dN auf als S2. Beide sinken ähnlich zu dN ab. S1 sinkt auf etwa 27% und S3 auf etwa 32% der Spannung von der Ausführung mit $t_{G,1} = 40$ mm.

Ein anderes Verhalten zeigt sich bei der Beobachtung der Spannung S2. Diese ist sowohl von der Gurtkraftdifferenz dN , als auch maßgeblich vom lokalen Moment dM abhängig. Exemplarisch zeigt sich hier die Veränderung aufgrund eines gestiegenen Einflusses des lokalen Momentes. Das Niveau der Spannung verändert sich, ähnlich zum lokalen Moment, nur geringfügig. Es kommt jedoch zu einer veränderten Krümmung der Kurve.

Die diesem Kapitel zugrundeliegenden Tabellen befinden sich im Anhang B 21 und Anhang B 22.

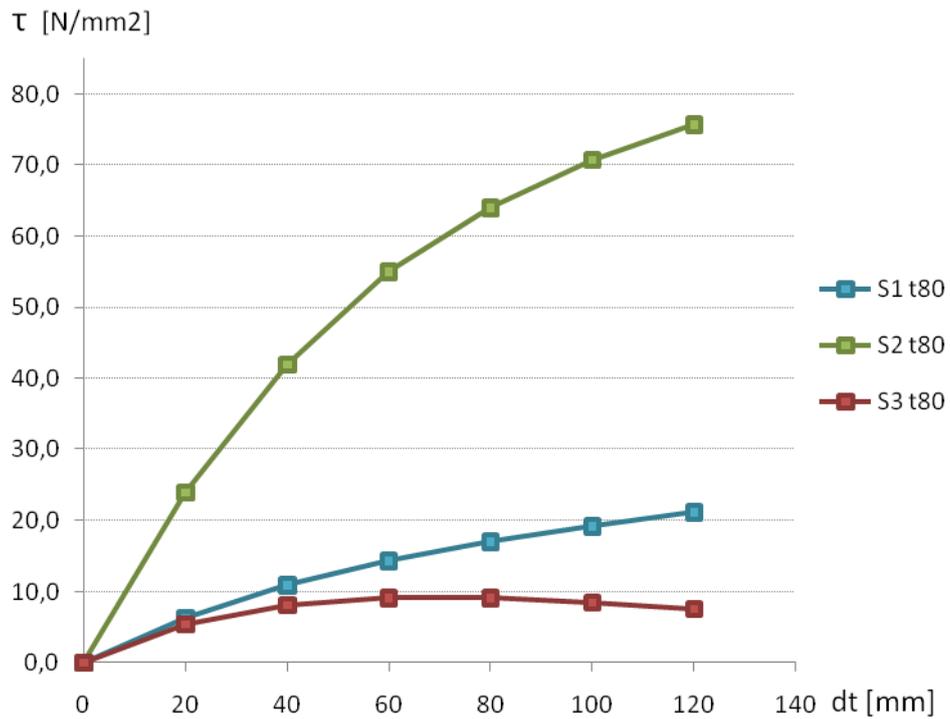


Abbildung 6-80: Verhalten der Schubspannungen, $t_{G,1}=80\text{mm}$ bei Variation des Gurt Dickensprunges

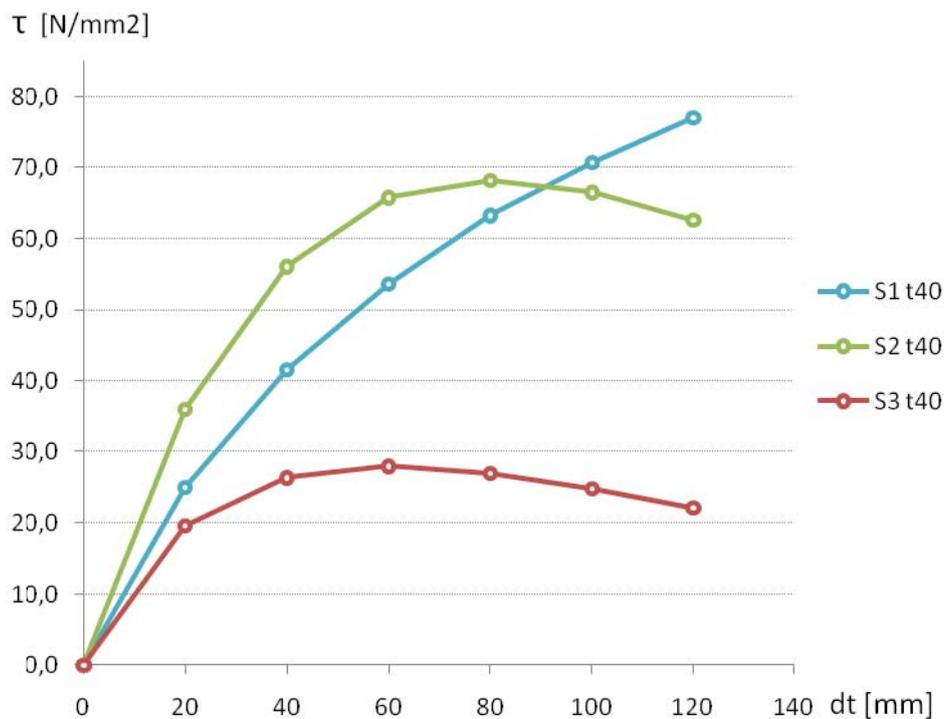


Abbildung 6-81: Verhalten der Schubspannungen, $t_{G,1}=40\text{mm}$ bei Variation des Gurt Dickensprunges

6.5) Zusammenfassung

6.5.1) Schubspannungen

Generell zeigte sich bei den Variationen aus der Parameterstudie eine Abhängigkeit der Spannungsmaxima von den lokalen Schnittgrößen.

Das Schubspannungsmaximum S_2 tritt unmittelbar am Gurtdickensprung auf. Es weist neben der Beeinflussung durch die Gurtkraftdifferenz dN eine maßgebliche Abhängigkeit vom vorherrschenden lokalen Moment dM auf. Dies ist besonders aus den Kapiteln 6.4.4) „Variation der Höhe“ und 6.4.6) „Variation der Gurtdicke des Querschnitts l “ ersichtlich. Ein Maß für die Einflussnahme liefert der ideale Hebelarm e' .

Die Spannung S_2 ist stark am Dickensprung konzentriert und kann dabei extreme Werte annehmen. In der Realität ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit beim Modell „Abrupt Dick“ mit einem Fließen des Materials in diesem Bereich und einem entsprechenden Abbau der Spannungsspitzen zu rechnen.

Durch eine hohe Spannung S_2 wird die Anfälligkeit für Risse an der Kante des Dickensprunges erhöht. Um S_2 zu verringern, kann das entstehende lokale Moment dM gering gehalten werden. Dies erfolgt zum Beispiel bei einer Ausführung mit einem zentrischen Dickensprung. Als weitere theoretische Möglichkeit wurde ein Gurt mit unterschiedlichen E-Modulen im Modell „E-Modul“ im Kapitel 5.4) behandelt. In beiden Modellen ist der geometrische Versatz der Gurnormalkräfte gering und dadurch das lokale Moment im Vergleich zum Modell „Abrupt Dick“ reduziert. Es ist aber auch möglich, den Einfluss des lokalen Moments dM aus einem exzentrischen Dickensprung über einen größeren Bereich in den Steg einzuleiten. Im Modell „Verlaufend“ im Kapitel 5.8) verändert sich die Gurtdicke linear mit der Steigung 1:4. Dadurch sinkt die Schubspannung S_2 deutlich ab.

Das Modell „Abrupt Dick“ stellt den Sonderfall eines idealen plötzlichen Dickensprunges dar. Dabei entsteht eine verhältnismäßig hohe Spannung S_2 , die in weiten Teilen der Parameterstudie größer als S_1 ist. Bei einer hohen Ausnutzung des Querschnitts kann es dabei zur Ausbildung von Fließbereichen kommen.

Die Ausführung eines plötzlichen Gurtdickensprunges ist daher geeignet wenn hohe Spannungsunterschiede oder kleinräumige Plastizierungen am Querschnitt auftreten dürfen. Es wird empfohlen einen verlaufenden Übergang der Gurtdicken auszuführen oder die unterschiedlichen Gurtbleche zentrisch anzuschließen. Bei diesen Modellen ist die Schubspannung $S1$ das maßgebliche Maximum.

Die Spannungsspitze $S2$ lässt sich mit Hilfe der FE-Berechnung durch die limitierte Rechnerleistung und die damit verbundene nur begrenzt mögliche Netzverfeinerung nicht genau ermitteln. Es ergeben sich daher zum Teil größere Ergebnisschwankungen in Abhängigkeit von der lokalen Netzteilung des FE-Programmes.

Anders verhalten sich die Spannungen $S1$ und $S3$, die stärker von der Gurtnormalkraftdifferenz dN beeinflusst sind. Bei der Variation der Gurtdicke in Kapitel 6.4.5.2.B) weisen diese ebenfalls eine Abhängigkeit von der Gurtdickendifferenz dt auf. Abweichungen der Spannung $S1$ von der Gurtkraftdifferenz dN lassen sich auf den Einfluss des lokalen Momentes dM zurückführen. Dieses wiederum steigt beim Modell „Abrupt Dick“ bei der Erhöhung der Gurtdickendifferenz dt linear an. Es lässt sich daher der Verlauf von $S1$ anhand der Gurtkraftdifferenz dN , des Gurtdickensprunges dt und der Steghöhe h_{st} beschreiben. In keinem untersuchten Fall war die Spannung $S3$, die nach dem Dickensprung auftritt, maßgeblich.

Durch das lokale Moment dM entstehen Biegespannungen in den Gurtflanschen. Für diese wirkt der Steg wie eine Linienlagerung auf den die Kräfte als Spannungen normal zur Schnittrichtung in der Kontaktfläche zwischen Gurt und Steg übertragen werden. Die Maxima der Schubspannungen $S1$ und $S3$ liegen örtlich nahe an den Extremwerten dieser Spannungen normal zur Schnittlinie. Es ist also zur Berechnung eines allgemeinen Spannungszustandes eine Überlagerung in Form der Vergleichsspannung σ_v erforderlich. Im Ingenieurmodell wird deswegen vorrangig versucht, die Spannung $S1$ nachzubilden.

6.5.2) Parameterstudie

Schnittgrößen

In Kapitel 6.3) wurde die Variation der Schnittgrößen behandelt. Es wurde gezeigt, dass bei einer linear veränderlichen Querkraft und dem daraus resultierendem Schubfluss für die lokalen Schubspannungsspitzen nur geringe Veränderungen entstehen. Die Addition der lokalen Schubspannungen zum Mittelwert der Schubspannung der Querschnitte 1 und 2 an der Stelle der Halskehlnaht nach der technischen Biegetheorie ist somit möglich.

$$\tau \approx \tau_{t,Bl,m} + \tau_{Lokal}$$

Um Ergebnisse auf der sicheren Seite zu erhalten ist es möglich, die lokalen Schubspannungen τ_{Lokal} zu denen des Querschnitts mit den größeren Spannungen nach der technischen Biegelehre zu addieren. Alle entstehenden geringen Abweichungen liegen innerhalb der Toleranz des Ingenieurmodells.

Ebenfalls wurde nachgewiesen, dass mit linear steigendem Moment ein ebenso lineares Verhalten aller Spannungen bei konstanten Lasteinleitungslängen hervorgerufen wird.

Querschnittsbreite

Die Abhängigkeit der Schubspannungen von Änderungen der geometrischen Größen wurde in Kapitel 6.4) untersucht. Diese beeinflussen das Spannungsverhalten in mehrerlei Hinsicht. Bei einer Veränderung der Breite kommt es zu einem, der Gurtnormalkraftdifferenz dN ähnlichen Verlauf aller Spannungsmaxima. Das Verhalten der Spannungen lässt sich daher im Ingenieurmodell allein über die Gurtnormalkraftdifferenz dN nachbilden. Die zugehörigen Lasteinleitungslängen steigen in allen Modellen an, wobei $L1$ durchgehend $L2$ übersteigt.

Querschnittshöhe

Bei einer Veränderung der Querschnittshöhe, wie in Kapitel 6.4.4) gezeigt, kommt es zu einem sehr unterschiedlichen Verhalten der einzelnen Spannungen. Beim Modell „Abrupt Dick“ ist unter einer bestimmten Höhe S_2 die maßgebliche Spannung, fällt jedoch mit steigender Höhe stark ab und wird durch S_1 als größte Spannung abgelöst. Die Spannungen verhalten sich nicht konform zur Gurtkraftdifferenz dN .

In Kapitel 6.4.2) wurde gezeigt, dass die Gurtkraftdifferenz dN bei bestimmten geometrischen Abmessungen je Modell ein Maximum erreicht. Steigt oder fällt davon ausgehend die Höhe des Trägers sinkt dN . Mit der Gurtkraftdifferenz dN geht jedoch nicht ein gleiches Verhalten bei den Spannungen einher.

Generell weisen zwar alle Spannungen eine mit der Gurtnormalkraftdifferenz dN vergleichbare Tendenz auf. Es tritt jedoch nach Überschreiten des Maximums von dN und bei weiterem Absenken der Höhe der Einfluss des lokalen Momentes hervor. Die vom lokalen Moment dM beeinflusste Spannung S_2 steigt ähnlich zu dM an, während die eher von dN abhängigen Spannungen S_1 und S_3 eher dessen Verlauf folgen. S_1 und S_3 besitzen wie die Gurtkraftdifferenz ein Maximum bei der Variation der Höhe. Dieses tritt bei den Spannungen aber erst bei geringeren Steghöhen auf. Durch den Einfluss der Höhe treten Spannungen in Querschnitten mit geringer Höhe stärker hervor und bei großer Höhe schwächer, als dies ein direkter Vergleich mit dN nahelegen würde. Durch den Verzicht einer Berücksichtigung des lokalen Momentes dM im Ingenieurmodell lässt sich die Spannung S_2 in ihrem Verhalten daher nur schwer abbilden.

Die zugehörigen Lasteinleitungslängen, oder auch Einflussbereiche genannt, steigen generell annähernd proportional mit der Höhe an. Die Einleitungslänge L_2 nach dem Dickensprung ist generell größer, als L_1 davor. Der Gurt des Querschnittes nach dem Sprung besitzt aufgrund seiner größeren Gurtstärke oder seines erhöhten E-Modules eine höhere Steifigkeit. Sowohl die Schubspannungen, als auch die Spannungen normal zur Schnittrichtung verteilen sich deshalb über weitere Bereiche auf den Steg. Beim Querschnitt 1 konzentrieren sich die Spannungen mehr und näher vor dem Dickensprung.

Gurtdickensprung

Bei der Variation des Gurtdickensprunges dt in Kapitel 6.4.5) durch den Parameter α kam es zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die Spannungsmaxima.

Die Spannung S_2 verhält sich ähnlich zur Gurtkraftdifferenz dN . Sie ist durch das lokale Moment dM stark beeinflusst, dessen Einfluss sich ähnlich zum ideellen Hebelarm verhält. Wie oben bereits erwähnt konzentrieren sich die Spannungen im Querschnitt vor dem Dickensprung. Bei Steigerung des Gurtdickensprunges steigt die Schubspannung S_1 stärker an, als der Verlauf von dN . Die zugehörige Lasteinleitungslänge L_1 sinkt daher ab. Nach dem Dickensprung werden die Spannungen aufgrund der höheren Steifigkeit des Gurtbleches weiter auf den Steg verteilt. Die Spannung S_3 steigt weniger an als der Verlauf zu dN . Die zugehörige Lasteinleitungslänge L_2 vergrößert sich daher. In Summe ergeben die abweichenden Verläufe von S_1 und S_3 wieder einen, der Gurtkraftdifferenz dN ähnlichen Verlauf. Die Erhöhung der Gurtdicke bewirkt also vor dem Dickensprung eine Steigerung der Spannung S_1 und danach eine Verteilung der Spannungen über einen größeren Bereich.

Gurtdicke des Querschnitts 1

Im Kapitel 6.4.6) wurde die Gurtdicke des Querschnitts 1 von 40 mm auf 80 mm verändert. Untersucht wurde die Variation der Gurtdicke des Querschnitts 2. Um einen Vergleich mit der Studie aus Kapitel 6.4.5.2.B), der die Gurtdicke 40 mm zugrundeliegt, anstellen zu können, wurde der Gurtdickenunterschied dt als Vergleich herangezogen. Dies erwies sich als sinnvoller um einen Zusammenhang herzustellen, als der Parameter α .

Beim Vergleich der Verläufe für die Variation des Gurtdickensprunges dt , die sich auf die unterschiedlichen Gurtdicken des QS 1 beziehen, zeigt sich ein geändertes Verhalten der Spannung S_2 . Diese ändert die Form ihres Verlaufes. Zurückführen lässt sich dies, aufgrund ihrer Abhängigkeit vom lokalen Moment dM , auf dessen größeren Einfluss.

Die Spannungen S_1 und S_3 weisen eine größere Abhängigkeit von der Gurtkraftdifferenz dN auf. Beide zeigen ein Verhalten ähnlich dem von dN . Da die Gurtkraftdifferenz dN als Grundlage für das Ingenieurmodell herangezogen wird ist die Abbildung der Spannung S_1 möglich. Eine ausreichende Nachbildung des Verlaufes von S_2 erfordert jedoch die Miteinbeziehung des lokalen Momentes dM in das Ingenieurmodell.

Ausführung

Durch die Art der Ausführung wird das Spannungsbild maßgeblich beeinflusst. Auf Seite 33 wurden die verschiedenen Detailausführungen und deren zugehörige Modelle vorgestellt.

Im Zuge der Betrachtung der Basismodelle in den Kapiteln 5.2) bis 5.6) wurden bereits Vergleiche zwischen den einzelnen Modellen angestellt. Verglichen wurden die Modelle der Reihe „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“, „Verlaufend“ in Kapitel 5.9), sowie das Modell „E-Modul“ und „zentrischer Dickensprung“ in Kapitel 5.4).

Das Modell „Abrupt Dick“ ist in allen Ausführungen gekennzeichnet durch einen Vorzeichenwechsel der Schubspannungen am Dickensprung. Verursacht wird dieses Verhalten durch das, aus dem geometrischen Versatz der Gurtnormalkräfte bedingte lokale Moment dM . Die daraus entstehende Spannung S_2 konzentriert sich stark um den Dickensprung und erreicht extreme Spitzen. Eine Ausführung gemäß dem idealen Modell „Abrupt Dick“ ist aufgrund des Fehlens von Schweißnahtübergängen unrealistisch und nicht zu empfehlen.

Ein für die Ausführung realistischeres Abbild ist das Modell „Schweißnaht“. Dieses berücksichtigt durch die Einführung einer geringen Abschrägung am Dickensprung näherungsweise die Auswirkungen einer Stumpfnah, deren Wulst über den Grundwerkstoff ragt. Durch das Modell „Schweißnaht“ konnte gezeigt werden, dass die Spannung S_2 stark vom der Abschrägung des Überganges zwischen den Gurten abhängt.

Das Modell „Verlaufend“ stellt einen linearen Übergang mit der Steigung 1:4 zwischen den Gurten dar. Dieses Modell weist einen Schubspannungsverlauf

ohne Vorzeichenwechsel auf. Je flacher der Übergang zwischen den Gurten ist, desto geringer wird die Senkung von S_2 bei einer weiteren Abflachung.

Alle drei Modelle, die sich auf dieselben Querschnitte vor und nach dem Dickensprung beziehen, zeigen nur bedingt Auswirkungen auf das Niveau der Schubspannungen S_1 und S_3 und der Spannungen normal zum Schnitt. Sehr deutlich wird jedoch die Schubspannung S_2 verringert. Aufgrund der Spannungsreduktion verbessert sich also bei einer Ausführung mit Abschrägung die Ermüdungsfestigkeit.

Die lokalen Spannungskonzentrationen vor und nach einem verlaufenden Gurt-dickenübergang, die unter anderem die Schweißnähte belasten, entsprechen jedoch weiterhin nahezu den Werten, die bei einer Ausführung mit plötzlichem Dickensprung entstehen.

Beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ entsteht ein beträchtliches Versatzmoment. Durch Ausführung als doppelt symmetrischer Querschnitt reduziert sich die Gurtkraftdifferenz dN auf etwa ein Drittel. Gleichzeitig verringert sich das Versatzmoment dM nur gering. Daraus folgt ein relatives Ansteigen des ideellen Hebelarmes e' .

Ähnlich dem Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN sinken die Spannungen S_1 und S_3 ab. Die Spannung S_2 wird jedoch maßgeblich von dM beeinflusst. Durch den verhältnismäßig gestiegenen Einfluss des Momentes erfährt diese einen beträchtlichen Anstieg. Dieser Effekt ließe sich im Ingenieurmodell durch eine Mitberücksichtigung des lokalen Momentes dM abbilden. Um das Ingenieurmodell einfach zu gestalten, wird aber davon abgesehen und stattdessen für jedes betrachtete Modell ein individuelles Ingenieurmodell erstellt. Dieses beinhaltet somit indirekt das Verhalten des lokalen Momentes.

Das Modell „E-Modul“ kommt einem zentrischen Dickensprung an nächsten. Es entsteht dabei nur ein geringes lokales Moment dM . Es kommt zu keinem Vorzeichenwechsel der Schubspannungen. Das auftretende Schubspannungsmaximum ist jedoch größer, als bei einer Ausführung mit einem zentrischen Dickensprung. Die Modelle sind daher zwar ähnlich, das Modell E-Modul stellt aber einen idealisierten theoretischen Fall dar.

7) Ingenieurmodell

Das Ingenieurmodell bildet den in den vorhergehenden Kapiteln untersuchten Schubspannungsverlauf in einfacher Form nach. Bei der Erstellung wurden die Veränderungen des Schubspannungsverlaufes dem Verhalten der Eingangsparameter gegenübergestellt. Es wurde versucht, eine einfache Abhängigkeit zu den bei elastischer Berechnung und Gültigkeit der technischen Biegetheorie, ermittelbaren Größen dN und dM , der Querschnittsgeometrie und der Ausführungsart des Dickensprunges herzustellen. Spannungen und Schubkräfte des Ingenieurmodells erhalten im Folgenden den Index „m“.

Im Ingenieurmodell abgebildet werden

- Schubspannungsspitzen S_1, S_{1Em} [N/mm²]

in Abhängigkeit von

- Gesamtschubspannung dN [kN]
- Querschnittsabmessungen b, h, dt [mm]
- Ausführung des Querschnittsüberganges
- lokalem Moment dM [kNm]

Zum Abbilden des Schubspannungsverlaufes wird eine Dreiecksverteilung angenommen, deren Fläche dem übertragenen Schubfluss dN entspricht. Die maximale Spannung des Ingenieurmodells S_m wird an der Spannung S_1 aus dem FE-Modell ausgerichtet.

7.1) Allgemein

7.1.1) Beschreibung

Das Modell basiert auf der Differenz der Gurtnormalkräfte dN , die gleichzeitig die über den Steg zu übertragende Schubkraft bezeichnet. Die Berechnung von dN erfolgt nach der technischen Biegelehre, wie bereits in Kapitel 4.4) dargelegt. Sie ergibt sich mittels

$$dN = N_{OG,2} - N_{OG,1} = M_y * \left(\frac{S_{y,OG,2}}{I_{y,2}} - \frac{S_{y,OG,1}}{I_{y,1}} \right)$$

$N_{OG,1}$	[kN]	Kraft im Obergurt im Querschnitt 1
$N_{OG,2}$	[kN]	Kraft im Obergurt im Querschnitt 2
t_{st}	[mm]	Stegdicke

Die Gurtnormalkraftdifferenz dN entspricht dem Integral über den Schubspannungsverlauf aus der FE-Berechnung.

$$dN = \int \tau_{Lokal} dx * t_{st}$$

Im Ingenieurmodell wird diese Fläche auf ein entsprechendes Dreieck mit der Basis $2 * L_m$ und der Höhe S_m umgelegt.

$$dN = S_m * L_m * t_{st}$$

Somit ist ein direkter Zusammenhang zwischen der maximalen Spannung im Ingenieurmodell S_m und der Gurtnormalkraftdifferenz dN gegeben. Das lokale Moment dM hat dabei keinen direkten Einfluss. Es wird jedoch indirekt durch die, für jedes Modell entsprechend definierte Längen L_m berücksichtigt. Diese entspricht der halben Basis des dreieckigen Schubspannungsverlaufes. Der ingenieurmäßige Einflussbereich beinhaltet die Auswirkungen aller Eingangswerte für jedes Modell.

$$L_m = L_m(dN, b, h_{st}, \alpha, t_{OG,1})$$

Um das Verhalten von S_m an die beobachteten Verläufe aus dem FE-Modell anzupassen, ist die Länge L_m entsprechend zu wählen.

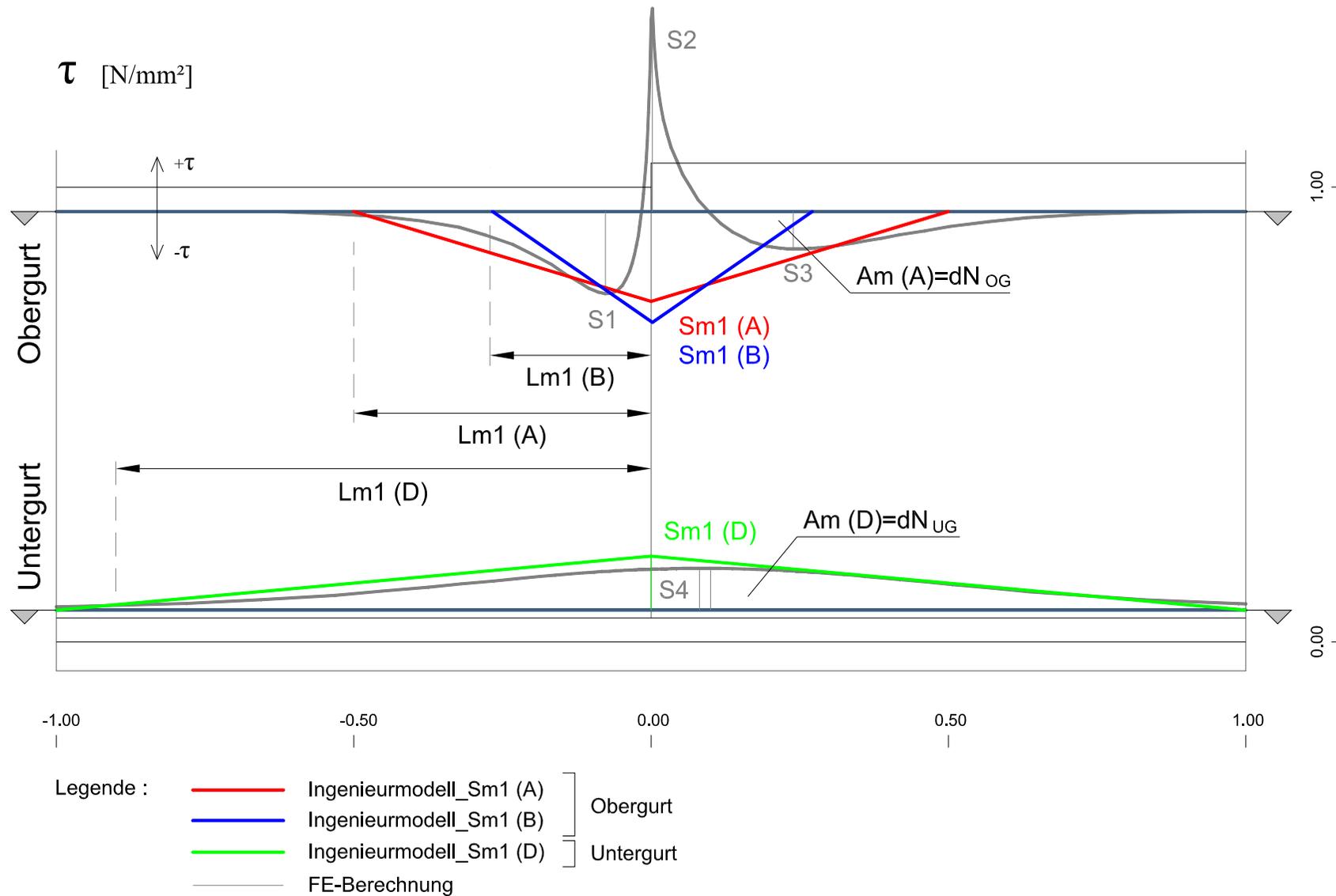


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des Ingenieurmodells und der drei Spannungsbilder Sm1 (A), (B) und (C)

Querkraft

Bei reinem Moment treten keine Schubspannungen nach der technischen Biegelehre auf. Wird jedoch der Querschnitt ebenfalls durch eine Querkraft belastet, sind diese Spannungen zu dem lokalen Verlauf zu addieren.

$$\tau = \tau_{t.Bl} + \tau_{Lokal}$$

Die Parameterstudien zeigen, dass es möglich ist, den Wert aus dem Ingenieurmodell zu einer gemittelten Schubspannung nach der technischen Biegelehre über die Querschnitte 1 und 2 zu addieren.

$$\tau_{max} \approx \tau_{t.Bl,m} + Sm$$

$$\tau_{t.Bl,m} = \frac{1}{2} (\tau_{t.Bl,QS1} + \tau_{t.Bl,QS2})$$

Die entsprechenden Schubspannungen berechnen sich mittels

$$\tau_{t.Bl,QS1} = -\frac{V_z * S_{y,1}}{I_{y,1} * t_{St}} \quad \text{und} \quad \tau_{t.Bl,QS2} = -\frac{V_z * S_{y,2}}{I_{y,2} * t_{St}}$$

Um Ergebnisse mehr auf der sicheren Seite zu erhalten ist es möglich, die lokalen Schubspannungen zu den höheren Schubspannungen nach der technischen Biegelehre des Querschnitts 2 zu addieren.

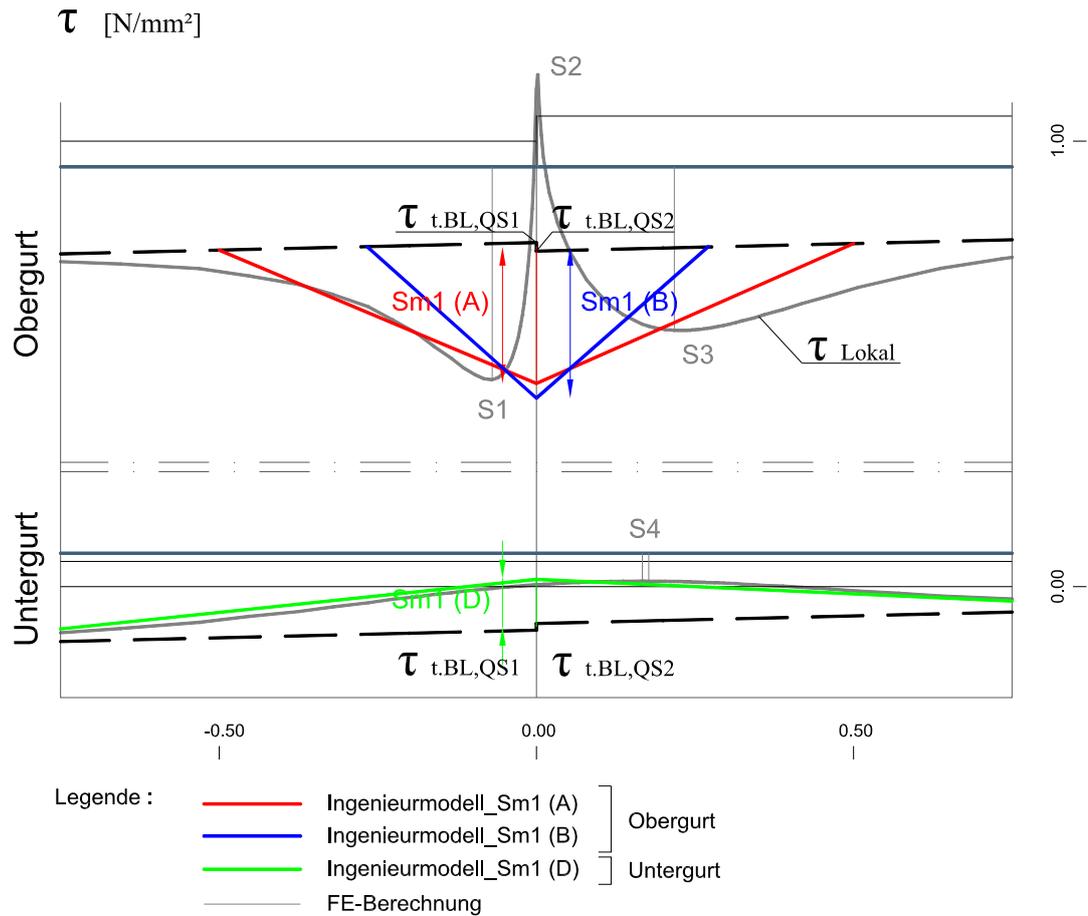


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung des Ingenieurmodells bei Querkraft

7.1.2) Modelle

Es wird für vier Modelle ein Ingenieurmodell entwickelt, das deren Schubspannungen an Ober- und Untergurt abbildet. Diese stehen in keinem Zusammenhang. Eine Zusammenfassung auf ein Ingenieurmodell, das in der Lage ist, alle vier Spannungsverläufe abzubilden, scheint möglich - war jedoch nicht Ziel dieser Arbeit.

Abgebildete Modelle durch das Ingenieurmodell:

- Abrupt Dick, einfach symmetrisch
- Abrupt Dick, doppelt symmetrisch
- E-Modul, einfach symmetrisch
- E-Modul, doppelt symmetrisch

7.1.3) Spannungsabbildung

Aufgrund der in den Parameterstudien untersuchten Verhaltensweise der Schubspannungen wurden drei unterschiedliche Ingenieurmodelle entwickelt. Alle drei basieren auf der Annahme eines dreiecksförmigen Schubspannungsverlaufes. Sie unterscheiden sich durch eine unterschiedliche Festlegung der Länge L_m .

Spannungsbilder für das Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“

- $S_{m1} (A)$
- $S_{m1} (B)$
- $S_{m1} (D)$

„S“ steht dabei für Spannungen, „m“ kennzeichnet alle Größen des Ingenieurmodells, „1“ steht für ein einfach symmetrisches Modell und „2“ für ein doppelt symmetrisches. Die Ausdrücke in Klammer unterscheiden die Berechnungsmethode für die zugehörige Länge L_m . Die Spannungsbilder $S_{m1} (A)$ und $S_{m1} (B)$ dienen der Abbildung der Spannung S_1 . Sie beziehen sich bei einfach symmetrischen Querschnitten auf den Obergurt und bei doppelt symmetrischen Querschnitten auf Ober- und Untergurt. Das Spannungsbild $S_m (D)$ dient bei einfach symmetrischen Querschnitten zur Abbildung der Untergurtschubspannungen.

Die Varianten (A) und (D) sind durch alleinige Abhängigkeit von der Gurtnormalkraftdifferenz dN charakterisiert. In der Variante (B) findet auch das lokale Moment dM indirekt Berücksichtigung. Dadurch wird eine bessere Annäherung an den berechneten Schubspannungsverlauf der FE-Modelle aus der Parameterstudie erreicht.

Spannungsbilder in Abhängigkeit von der Gurtnormalkraftdifferenz dN

Für die Spannungsbilder S_m (A) und S_m (D) wurde die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge L_m wie folgt festgelegt:

$$L_m = \delta * h_{St}$$

δ [-] Korrekturfaktor des Ingenieurmodells

h_{St} [mm] Steghöhe

Dabei wird der Parameter δ am Verhalten der Schubspannungen aus der Parameterstudie ausgerichtet. Um die Wahl des Korrekturfaktors darzustellen, wird in jedem Modell in Kapitel 7.2) der erforderliche δ -Verlauf gezeigt, der notwendig ist, um die Spannungen aus dem FE-Modell ohne Sicherheiten abzubilden. Dabei wird bezüglich der Höhe $h_{St} = 920$ mm die Breite variiert und für die fixe Breite $b = 400$ mm die Höhe variiert. Für die sich daraus ergebenden Werte von β und verschiedene α Werte von 1,0 bis 3,0 wird der erforderliche Korrekturfaktor dargestellt. Um diese variierenden Erfordernisse abzudecken, wird für jedes Modell ein fixer Korrekturfaktor δ gewählt. Ist der gewählte δ -Wert geringer als der erforderliche, liegt das Ingenieurmodell auf der sicheren Seite.

Spannungsbilder in Abhängigkeit von der Gurtnormalkraftdifferenz dN und dem lokalen Moment dM

Zusätzlich zu der vorhergehenden Variante wurde nach einer Möglichkeit gesucht, den Verlauf der Spannung S_1 besser anzunähern. Besonders bei der Variation der Gurtdicke der Querschnitte 2 und 3 kommt es zu unerwünschten, nicht vernachlässigbaren Abweichungen. Als zusätzlicher Eingangswert wird die Gurtdickendifferenz dt gewählt. Diese verhält sich beim Modell „Abrupt Dick“ ähnlich zum lokalen Moment dM .

$$L_m = (\delta + \varepsilon * dt) * h_{St}$$

ε [-] Korrekturfaktor des Ingenieurmodells

Der Nachteil dieser Berechnung ist die Notwendigkeit eines zusätzlichen Parameters ε . Die Berücksichtigung eines Gurtdickensprunges entfällt für das Modell „E-Modul“, bei dem kein geometrischer Versatz auftritt.

Maximale Schubspannung im Ingenieurmodell

Die maximale Spannung des Ingenieurmodells ergibt sich für alle Ingenieurmodelle mittels:

$$S_m = \frac{dN}{L_m * t_{st}}$$

S_m	[N/mm ²]	maximale Schubspannung im Ingenieurmodell
dN	[kN]	Gurtnormalkraftdifferenz
L_m	[mm]	ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge
t_{st}	[mm]	Stegdicke

7.1.4) Verhalten des Ingenieurmodells

Die Parameter δ und ε werden so gewählt, dass es durch das Ingenieurmodell zu einer Überschätzung von höchstens 40% im Vergleich zur FE-Berechnung kommt. Werte auf der unsicheren Seite werden weitgehend vermieden. Trotzdem erweist sich das Ingenieurmodell, besonders im Bereich geringer Trägerhöhen, als unzureichend.

Es werden in den Graphiken, die Vergleiche zwischen Ingenieurmodell und FE-Modell darstellen, alle am Schnitt vorhandenen Spannungsspitzen dargestellt. Ziel dieser Arbeit war es jedoch, hauptsächlich die Spannung S1 nachzubilden. Die Spannung S3 war in keinem untersuchten Parameterbereich maßgeblich. Die Spannung S2 ist über weite Bereiche die größte Schubspannung. Sie hängt stark von der lokalen Ausbildung des Dickenüberganges und dem lokalen Moment dM ab. Weiters kann die Spannung S2, da sie ein sehr begrenztes lokales Maximum darstellt, nur unzureichend genau mit dem FE-Programm erfasst werden.

Im Anhang C sind die Ergebnisse des Ingenieurmodells in Tabellenform aufgelistet. Diese beschränken sich auf eine Darstellung in Abhängigkeiten von der Steghöhe und dem Gurtdickensprung. In der Parameterstudie zeigte sich eine, in allen Modellen ähnliche Abhängigkeit von der Breite.

Toleranzen

Tabelle 7-1: Toleranzen des Ingenieurmodells

Toleranzen	Relativ	Absolut
Überschätzung	+40 %	+10,0 N/mm ²
Unterschätzung	-10 %	-5,0 N/mm ²

Grundsätzlich richtet sich der Gültigkeitsbereich des Ingenieurmodells nach den relativen Abweichungen vom FE-Modell. Wenn das Niveau der Schubspannungen gering ist, können die Abweichungen die Relativen Grenzen überschreiten aber absolut gesehen trotzdem ausreichend genau sein. Das Modell behält dann weiterhin seine Gültigkeit.

7.1.5) Gültigkeit des Ingenieurmodells

7.1.5.1) *Maximum der Gurtnormalkraftdifferenz*

Wie man im späteren Verlauf sehen wird, behält das Ingenieurmodell nicht über den gesamten Parameterbereich seine Gültigkeit. Besonders bei geringen Steghöhen kommt es, abhängig vom Modell, zu abweichenden Schubspannungsverläufen.

Die Gurtnormalkraftdifferenz dN erreicht bei einem bestimmten Verhältnis der geometrischen Abmessungen ein Maximum. Diese Eigenschaft wurde bereits in Kapitel 6) genauer behandelt. Der Verlauf der daraus entstehenden Schubspannungen in der Kontaktfläche zwischen Gurt und Steg gehen in diesem Bereich jedoch nicht konform mit dem Verlauf der Gurtnormalkraftdifferenz. Durch die Abhängigkeit des Ingenieurmodells von der Höhe steigen die errechneten Schubspannungsspitzen S_m des Ingenieurmodells bei sinkender Trägerhöhe stärker an, als dies bei einer Abhängigkeit von einem konstanten Faktor der Fall wäre. Trotzdem ist das Ingenieurmodell nicht in der Lage, das unterschiedliche Verhalten von Schubspannungen und Gurtnormalkraftdifferenz auszugleichen. Es ist daher für jedes Ingenieurmodell ein Bereich geometrischer Abmessungen angegeben, in dem seine Gültigkeit gegeben ist.

Unter den vier untersuchten Modellen betrifft dies hauptsächlich das Modell „Abrupt Dick“ bei doppelt symmetrischer Ausführung. Die maximale Gurtkraftdifferenz bewegt sich in diesem Modell innerhalb des bautechnisch interessanten Bereich bei $\beta = 4,0$ bis $5,0$ [-]. Das Ingenieurmodell ist daher für das Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ nur sehr eingeschränkt gültig. Bei anderen Modellen tritt die maximale Gurtkraftdifferenz bei geringeren Werten von β auf.

7.1.5.2) *Elastisches Verhalten*

Das Ingenieurmodell ist ebenfalls nur gültig, wenn elastisches Materialverhalten auch für die lokalen Störzonen erfüllt ist. Das Auftreten von Fließbereichen ist daher für die in dieser Arbeit berechneten Modelle nicht zulässig. Daher ist besonders in Hinblick auf die Gurnormalkraftsteigerung vor dem Gurt Dickensprung eine Überprüfung der Verhältnisse erforderlich.

Im Kapitel 6) wurde bereits ausführlich der Schubfluss am Anschluss zwischen Steg und Gurt dargelegt. Dabei zeigte sich, dass bei elastischer Berechnung etwa ein Drittel bis zur Hälfte der Gurnormalkraftdifferenz dN schon vor dem eigentlichen Dickensprung in den Gurt fließt. Die daraus resultierende Veränderung des Spannungszustandes darf nicht zum Überschreiten der Fließspannung führen, um die hier angeführten Modelle verwenden zu können.

Es kommt im Bereich um den Dickensprung zusätzlich zu komplexen dreidimensionalen Spannungszuständen. Unter anderem verteilen sich die Gurtspannungen nicht gleichmäßig über die Dicke. Durch das lokale Moment kommt es zu einer örtlichen Verdrehung des Gurtes. Es treten deutlich unterschiedliche Spannungen an der Gurtoberseite und der Unterseite auf. Dieses Verhalten wurde im Kapitel 5.2) in der Abbildung 5-14 und im Kapitel 5.8) in der Abbildung 5-40 für die beiden Ausführungen „Abrupt Dick“ und „Verlaufend“ untersucht.

7.1.5.3) Gurtabschrägung

In weiten Bereichen der Parameterstudie für das Modell „Abrupt Dick“ ist die Schubspannung S_2 betragsmäßig größer als die, vom Ingenieurmodell abgebildete, Spannung S_1 . Daher ist das Ingenieurmodell nicht geeignet einen plötzlichen Gurtdickensprung abzubilden.

Bei einer geringen Abschrägung am Dickenübergang wie im Modell „Schweißnaht“ angedeutet, sinkt die Spannung S_2 deutlich ab und S_1 wird maßgeblich. Für diesen Fall wird das Ingenieurmodell ausgelegt, da ein idealer Dickensprung ohne Schweißnahtübergang in Wirklichkeit nicht ausführbar ist.. Bei einem flacheren Übergang zwischen den Gurtdicken wie im Modell „Verlaufend“ liegt das Ingenieurmodell weiterhin auf der sicheren Seite. Dabei kommt es zu größeren Sicherheiten als bei einem plötzlichen Dickenübergang. Wie im Kapitel 5.9) beim Vergleich der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“ ersichtlich wurde sinkt die Schubspannung S_1 mit stetigerem Übergang der Gurtdicken ab.

Die Tabelle 7-2 zeigt eine Übersicht über alle Spannungsbilder. Jedem der vier untersuchten Modelle sind zumindest zwei zugeordnet, jeweils eines für Ober- und Untergurt. Für die Spannung S1 am Obergurt des Modells „Abrupt Dick“ existiert eine zweite Möglichkeit diese, unter Berücksichtigung des Gurtdickensprunges dt , abzubilden. Da das Modell „E-Modul“ keinen geometrischen Versatz aufweist fehlen diese Spannungsbilder dort.

Tabelle 7-2: Übersicht Ingenieurmodelle

Nr	Modell	Gurt	abgebildete Spannung	Spannungsbilder			Gültigkeitsbereich			
				Name	Korrekturfaktor		hst [mm]	b [mm]	α [-]	β [-]
					δ [-]	ε [-]				
1	Abrupt Dick, einfach symmetrisch	OG	S1	Sm1 (A)	0,50	-	750-2500	200-600	1-3	1,8-5,0
		OG	S1	Sm1 (B)	0,75	-0,0035				
		UG	S4	Sm1 (D)	1,20	-	500-2800	200-600	1-3	1,3-5,0
2	Abrupt Dick, doppelt symmetrisch	OG	S1	Sm2 (A)	0,25	-	900-2800	300-500	1-2,5	2,2-3,2
		OG	S1	Sm2 (B)	0,417	-0,0035				
		UG	S4	Sm2 (A)	0,25	-	900-2800	300-500	1-2,5	2,2-3,2
		UG	S4	Sm2 (B)	0,417	-0,0035				
3	E-Modul, einfach symmetrisch	OG	S1 Em	Sm1 (A)Em	0,33	-	750-2500	200-600	1-3	1,8-5,0
		UG	S2 Em	Sm1 (D)Em	1,25	-	500-2800	200-600	1-3	1,3-5,0
4	E-Modul, doppelt symmetrisch	OG	S1 Em	Sm2 (A)Em	0,23	-	700-2000	200-600	1-3	1,75-5,0
		UG	S2 Em	Sm2 (A)Em	0,23	-	700-2000	200-600	1-3	1,75-5,0

Im Folgenden wird für jedes Modell das Ingenieurmodell anhand der Länge l_m festgelegt. Bei doppelt symmetrischen Querschnitten wird für den Spannungsverlauf an Ober- und Untergurt nur ein Ingenieurmodell angewendet.

7.2) Spannungen des Ingenieurmodells

7.2.1) Modell Abrupt Dick, einfach symmetrisch

7.2.1.1) Obergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge ergibt sich für Sm1 (A) mittels

$$\delta = 0,5 [-]$$

zu

$$Lm = 0,5 \cdot h_{St}$$

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den erforderlichen Verlauf des Parameters δ um die Ergebnisse aus der FE-Berechnung abzubilden.

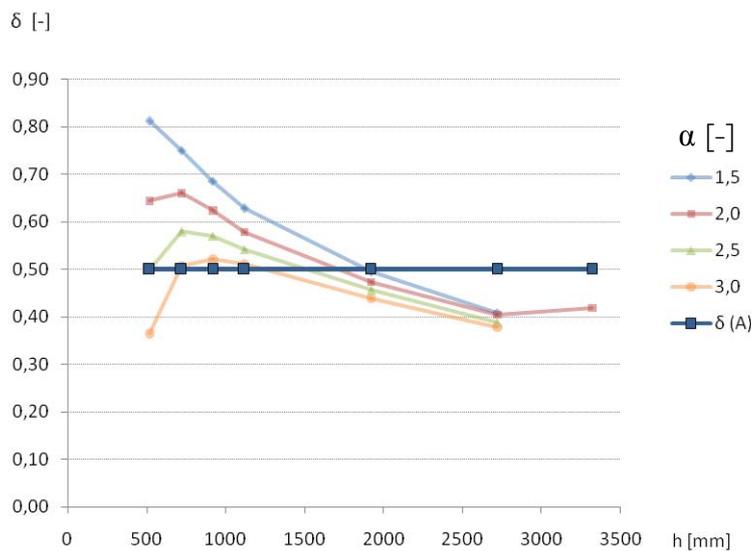


Abbildung 7-3: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

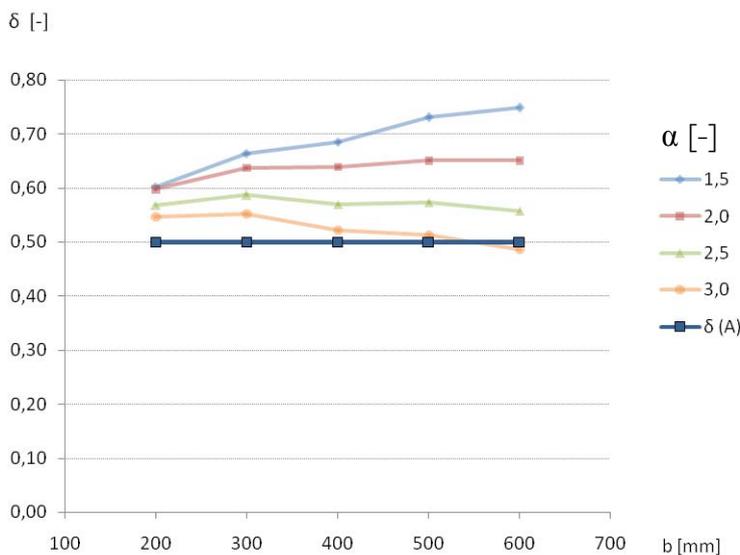


Abbildung 7-4: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

In Abbildung 7-5 wird dargestellt, dass bei konstantem β Unterschiedliche δ Werte erforderlich werden, je nachdem ob die Höhe oder die Breite variiert wird. Es lässt sich jedoch eine ähnliche Tendenz in allen Modellen erkennen. Eine Einschränkung des Gültigkeitsbereiches über den Wert β ist daher möglich.

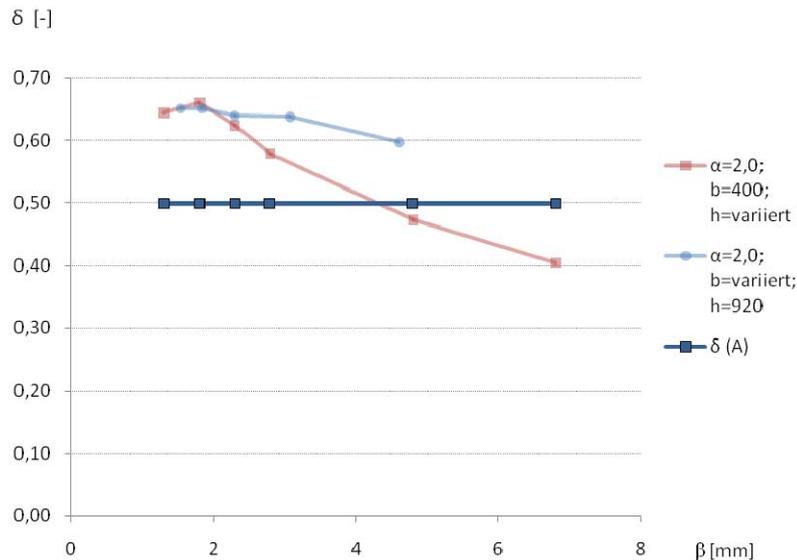


Abbildung 7-5: Korrekturfaktor δ bei Variation von β

Das Spannungsbild S_{m1} (A) weist bei allen Variationen der Querschnittsabmessungen Sicherheiten um 20% und zum Teil mehr auf. Aufgrund der Abweichungen besonders bei der Variation der Gurtstärke wurde das Modell S_{m1} (B) entwickelt. Dieses berücksichtigt indirekt das lokale Moment dM durch die Miteinbeziehung der Gurtstärkedifferenz dt . Es nähert den Verlauf von S_1 besonders bei der Variation der Gurtstärke und der Höhe besser an.

Für Sm1 (B) ergibt sich die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge L_m über

$$\delta = 0,5 [-] \text{ und } \varepsilon = -0,0035 [-]$$

zu

$$L_m = (0,75 + (-0,0035) \cdot dt) \cdot h_{St}$$

Spannungen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Verhalten des Ingenieurmodells im Vergleich mit den am Schnitt auftretenden Schubspannungen. Die Tabellen im Anhang C 1 und Anhang C 2 zeigen umfassend das Verhalten bei Variation der Parameter.

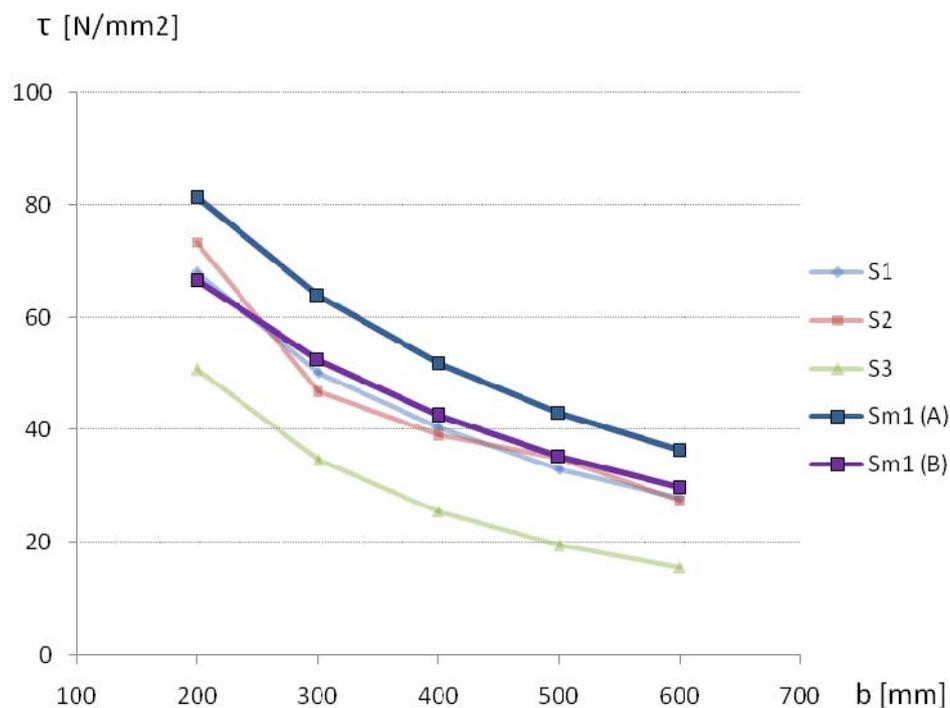


Abbildung 7-6: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation der Breite

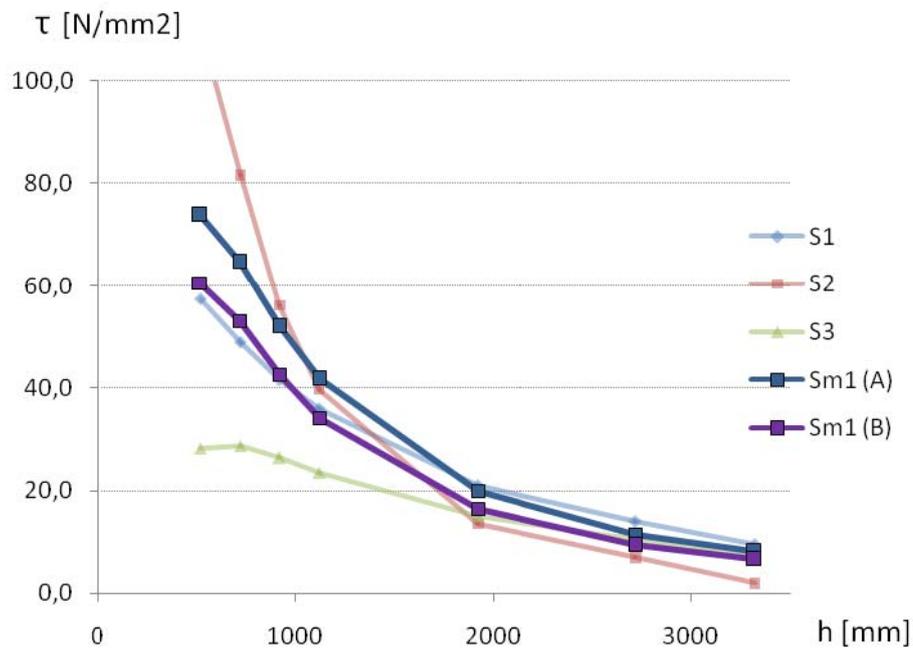


Abbildung 7-7: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation der Höhe

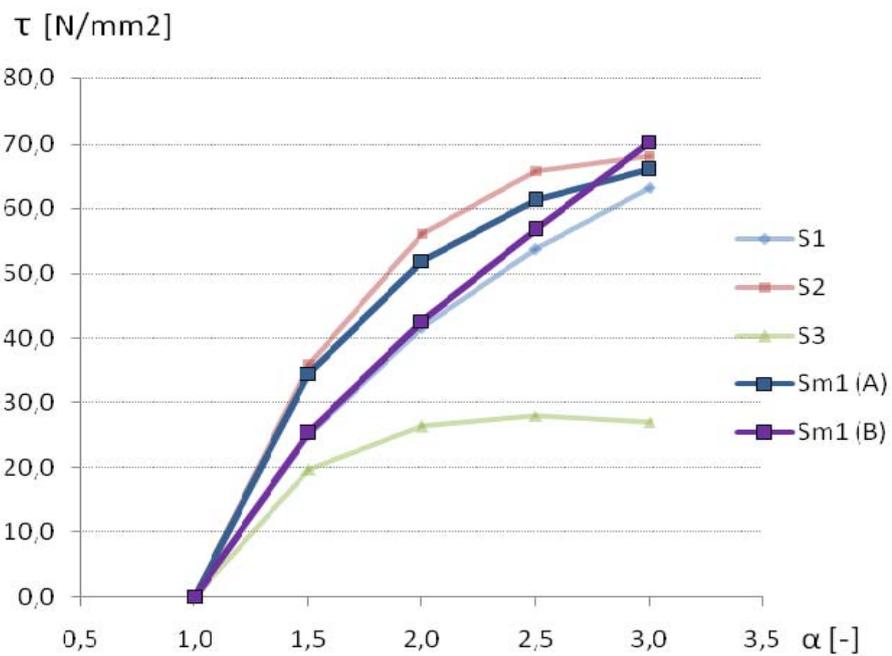


Abbildung 7-8: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation des Gurtdickenspr.

Das Modell „Abrupt Dick“ wird in der Ausführung als einfach symmetrischer Querschnitt ebenfalls auf die Änderung der Gurtdicke des Querschnitts 1 hin untersucht. Diese wird von $t_{G,1}=40$ mm auf 80 mm erhöht. Danach werden die Auswirkungen unterschiedlicher Gurtdickensprünge, wie schon beim Ausgangsquerschnitt untersucht. Das Ingenieurmodell liefert auch für diesen Fall befriedigende Ergebnisse. Dies wird in Abbildung 7-9 dargestellt. Auffällig ist hierbei die stark ansteigende Schubspannung S2, deren Erfassung jedoch nicht Ziel des Ingenieurmodells war.

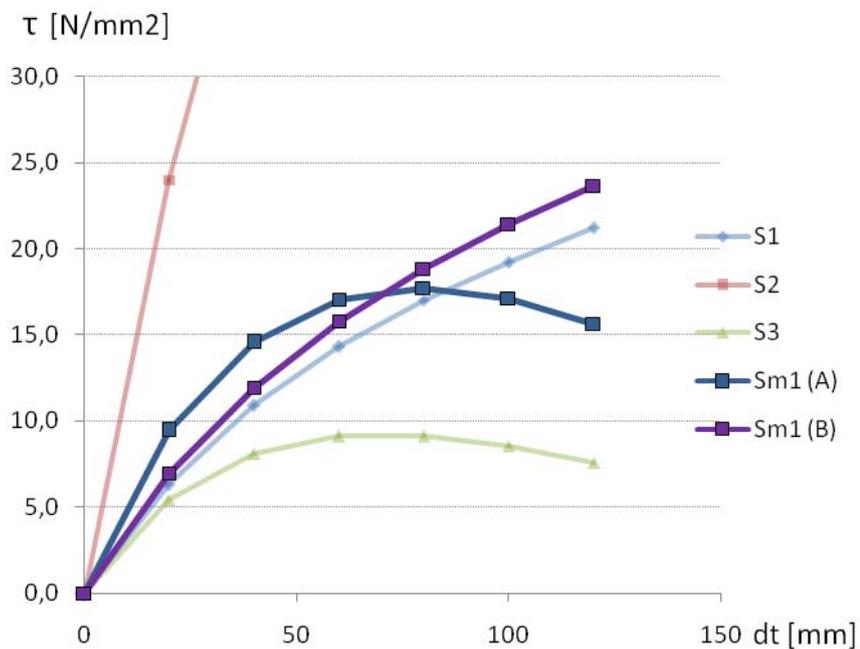


Abbildung 7-9: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei $t_{G,1}=40$ mm und Variation des Gurtdickensprunges

7.2.1.2) Untergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge ergibt sich für S_{m1} (D) mittels

$$\delta = 1,20 [-]$$

zu

$$L_m = 1,20 \cdot h_{St}$$

Die Abbildungen 7-10 und 7-11 zeigen den erforderlichen Verlauf des Parameters δ um die Ergebnisse aus der FE-Berechnung abzubilden.

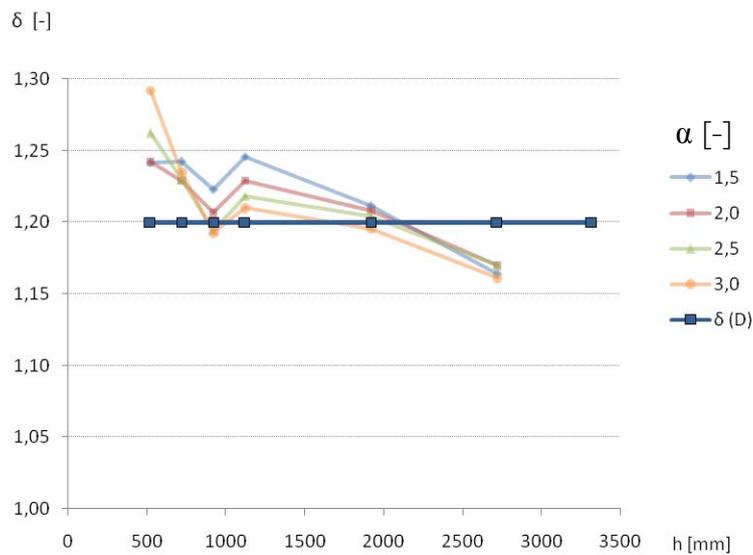


Abbildung 7-10: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

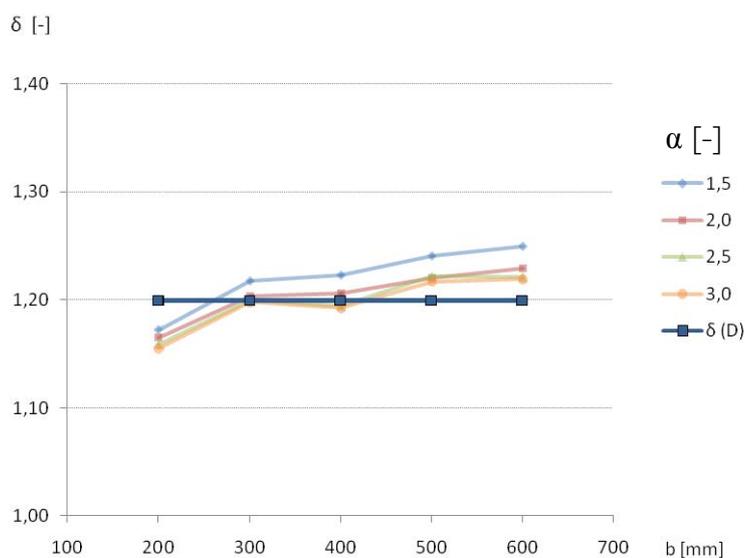


Abbildung 7-11: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

Spannungen

Diese Formel zeigt über weite Bereiche sehr gute Annäherungen an die gewünschte Untergurtschubspannung. Die zugehörigen Daten sind in den Tabellen im Anhang C 3 ersichtlich. Die Spannung S_{m1} (D) ist über den gesamten untersuchten Parameterbereich gültig.

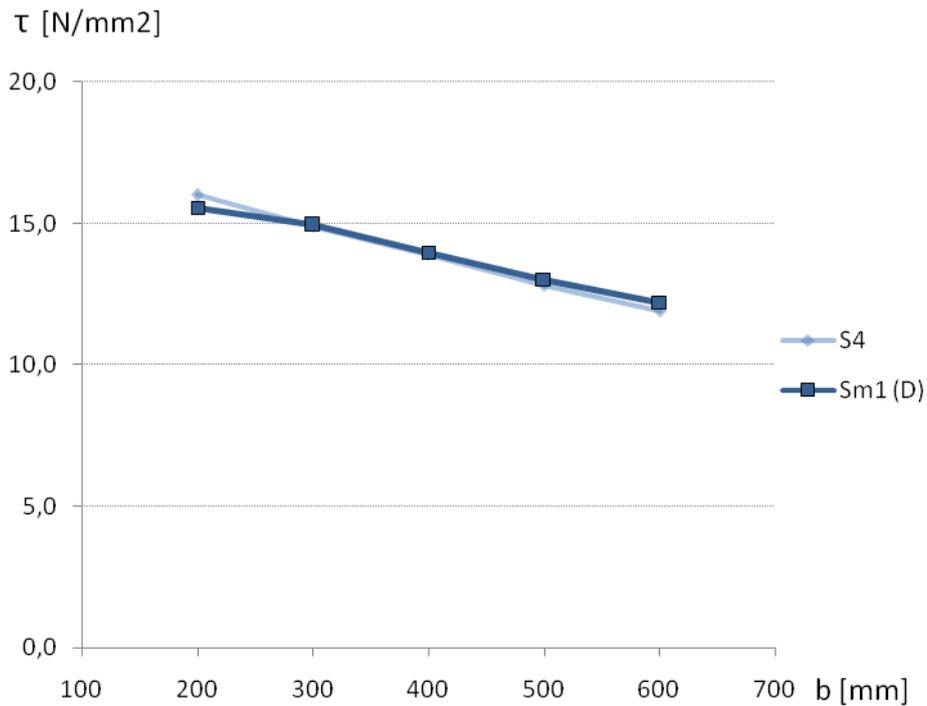


Abbildung 7-13: Verhalten des Ing. Modells S_{m1} (D) bei Variation der Breite

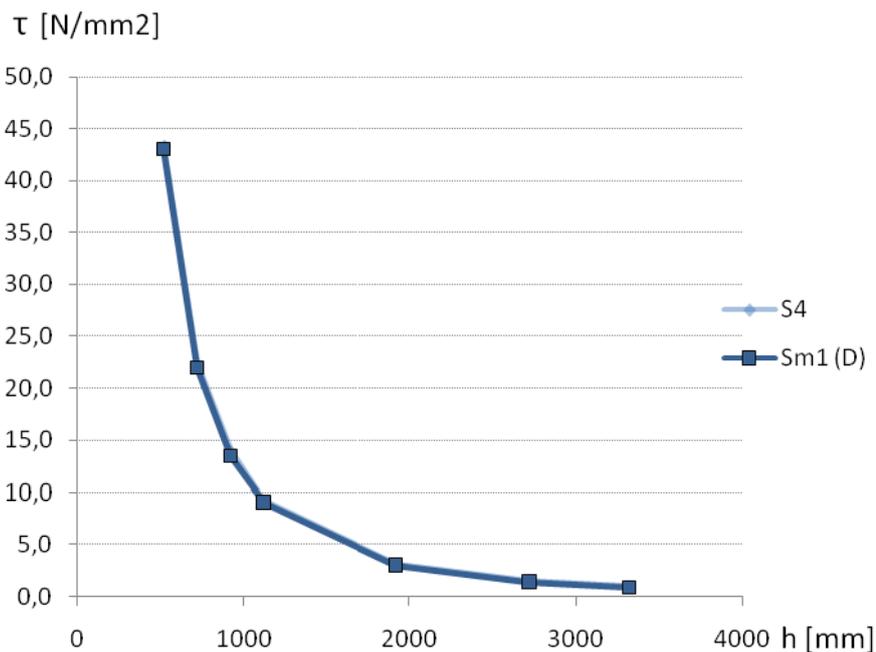


Abbildung 7-12: Verhalten des Ing. Modells S_{m1} (D) bei Variation der Höhe

Für die Änderung der Gurtstärke $t_{0G,1}$ auf 80 mm zeigt sich auch beim Untergurt eine gute Annäherung der Schubspannungen durch das Ingenieurmodell.

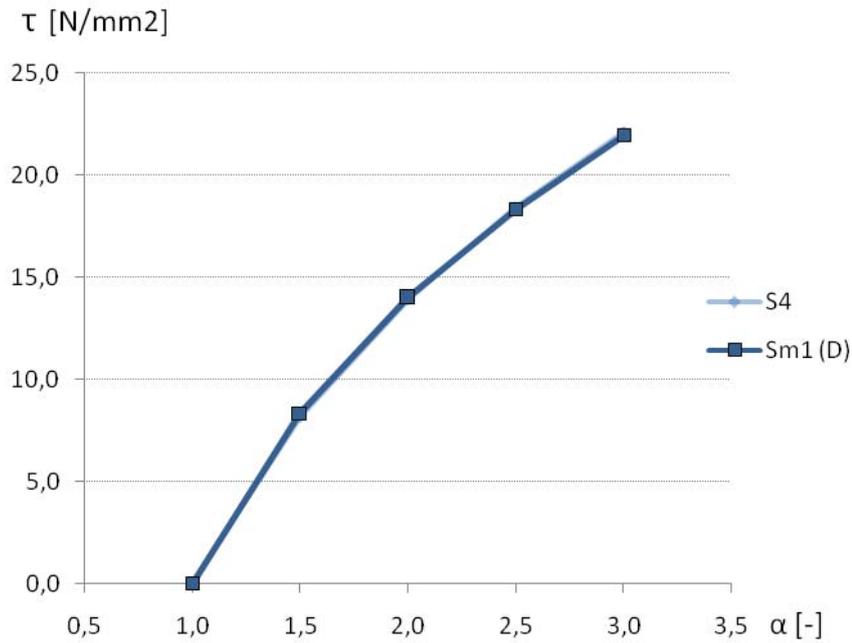


Abbildung 7-14: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei Variation des Gurtstärkensprunges

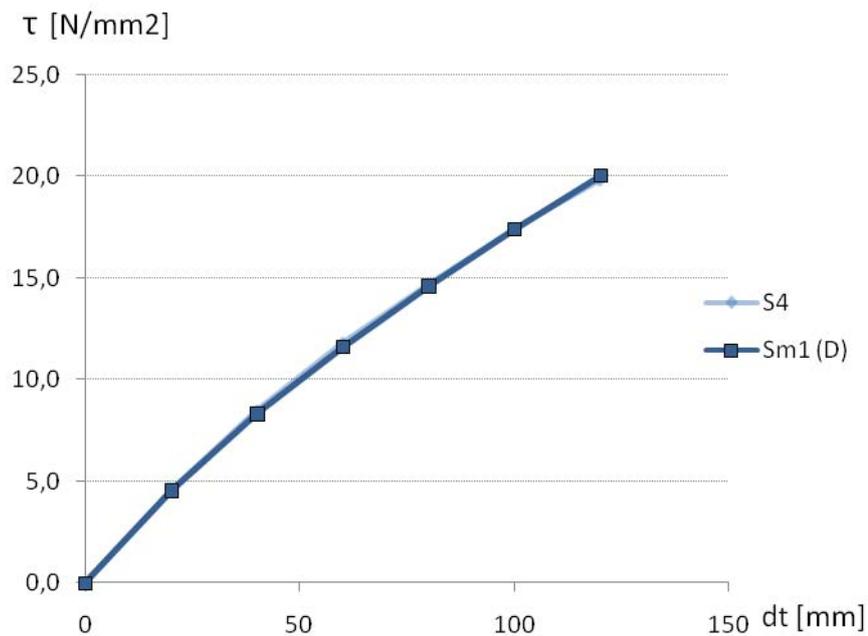


Abbildung 7-15: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei $t_{0G,1}=40$ mm und Variation des Gurtstärkensprunges

7.2.2) Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch

7.2.2.1) Obergurt und Untergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge ergibt sich für Sm2 (A) zu

$$\delta = 0,25 [-]$$

zu

$$Lm = 0,25 \cdot h_{St}$$

In den Abbildungen 7-16 und 7-17 ist für den Ober- und Untergurt der erforderliche Verlauf des Parameters δ , um die Ergebnisse aus den FE-Modellen abzubilden, ersichtlich.

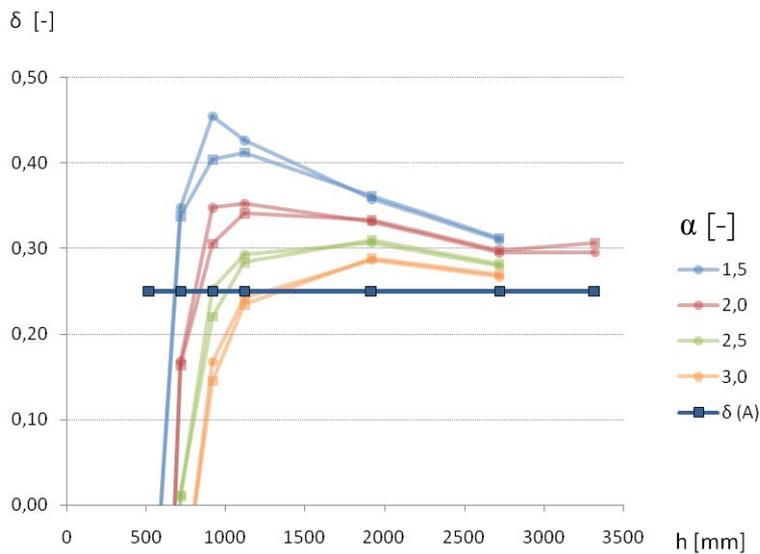


Abbildung 7-16: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

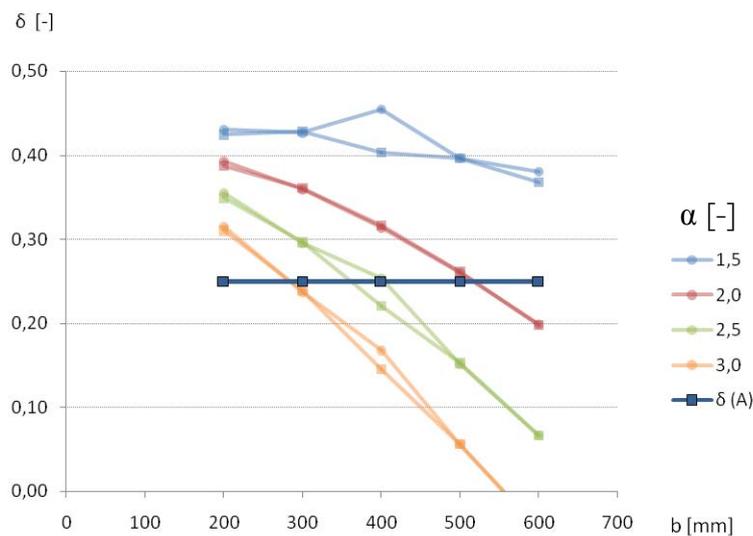


Abbildung 7-17: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

Spannungen

Das Spannungsbild Sm1 (A) bildet die auftretende Spannung S1 bei einer Variation des Dickensprunges nur unzureichend ab. Dies ist besonders in der Abbildung 7-20 bei $\alpha=3,0$ deutlich zu erkennen. Um dies zu korrigieren, wurde das Modell Sm2 (B) entwickelt. Es lässt unter Berücksichtigung von

$$\delta = 0,5 [-] \text{ und } \varepsilon = -0,0035 [-]$$

anschreiben

$$L_m = (0,417 + (-0,0035) \cdot dt) \cdot h_{st}$$

Der Verlauf von S1 wird besonders bei der Variation der Gurtdicke besser angenähert. Beide Spannungsbilder sind nicht in der Lage, das Schubspannungsverhalten nach Unterschreiten einer Steghöhe von 900 mm ausreichend genau abzubilden. Da die Spannungen in diesem Bereich nicht entsprechend der Gurtnormalkraftdifferenz dN verlaufen, kann das Ingenieurmodell diese nicht exakt abbilden. Die Abbildungen 7-18 bis 7-20 zeigen das Verhalten des Ingenieurmodells im Vergleich zu den am Schnitt auftretenden Spannungen. Die Tabellen im Anhang C 4 bis Anhang C 7 stellen das Gesamtverhalten bei beliebiger Variation dar.

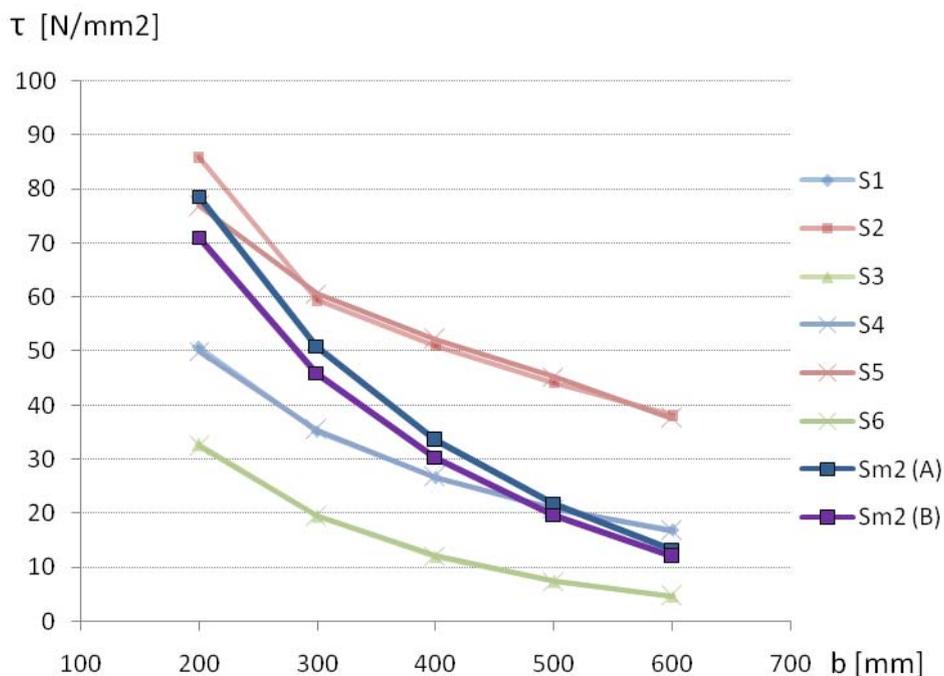


Abbildung 7-18: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation der Breite

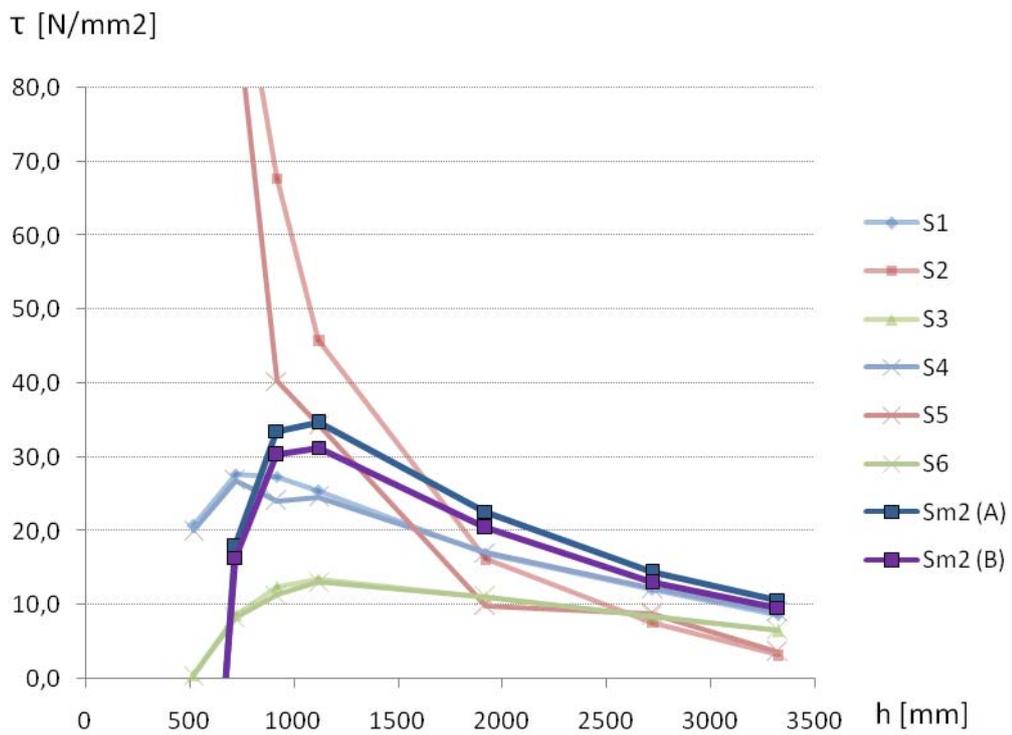


Abbildung 7-19: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation der Steghöhe

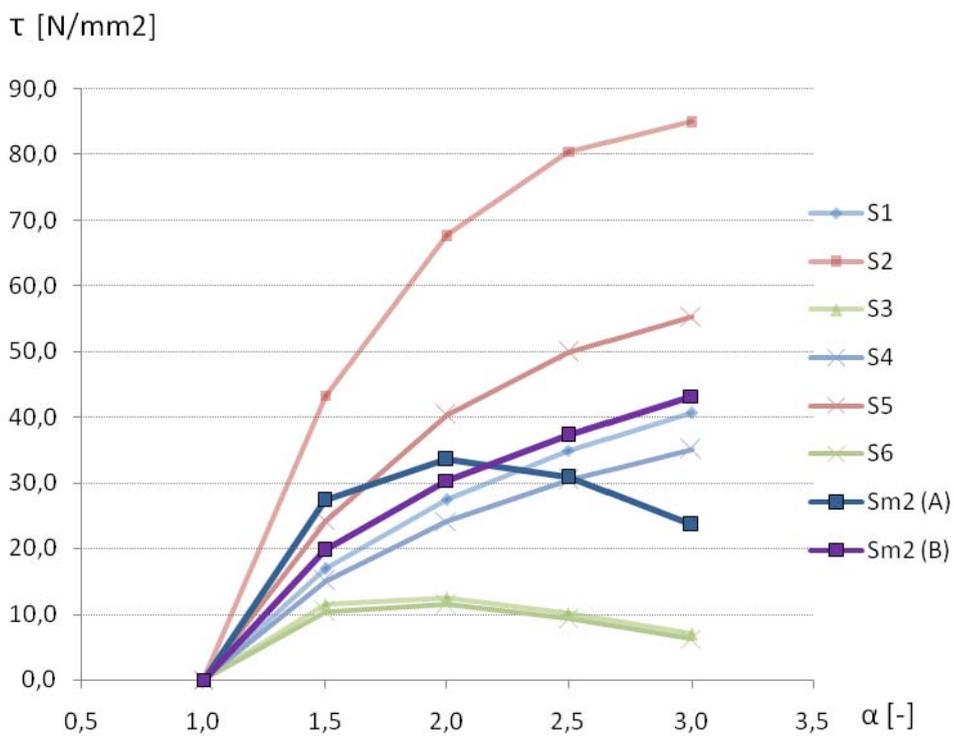


Abbildung 7-20: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation des Gurt Dickenspr.

7.2.3) Modell E-Modul, einfach symmetrisch

7.2.3.1) Obergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge für S_{m1} (A)Em wird mit

$$\delta = 0,33 [-]$$

ermittelt zu

$$L_m = 0,33 \cdot h_{st}$$

Die Abbildungen 7-21 und 7-22 zeigen den erforderlichen Verlauf des Parameters δ , um die Ergebnisse aus der FE-Berechnung abzubilden.

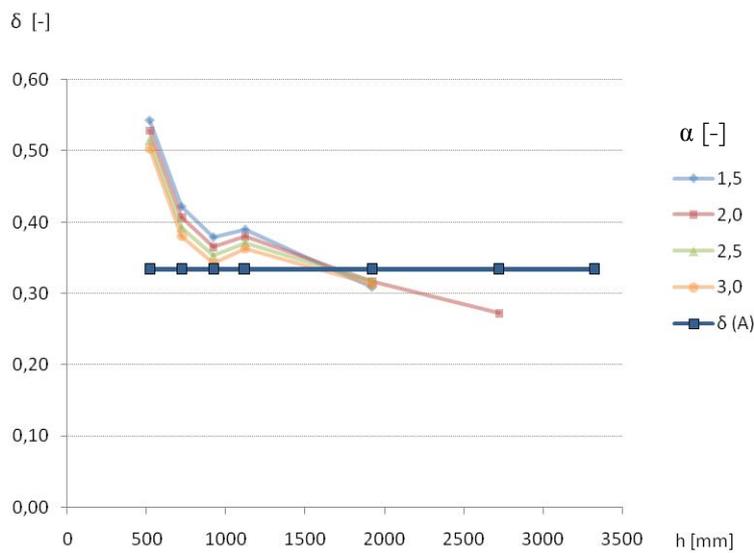


Abbildung 7-21: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

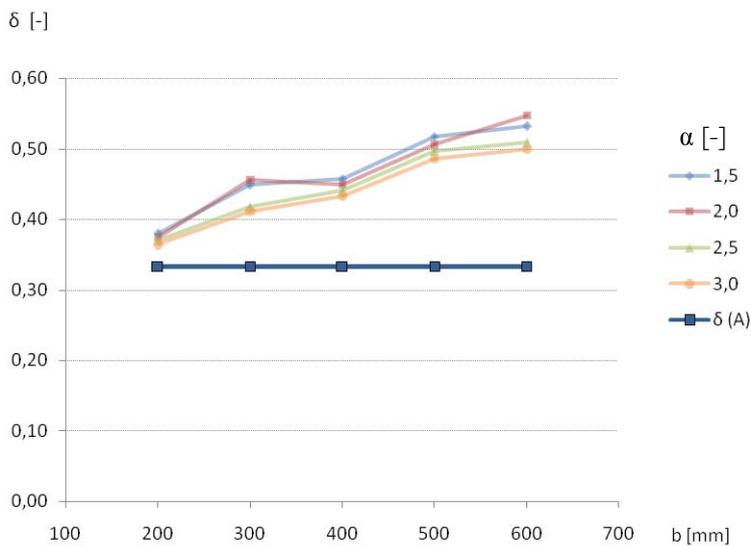


Abbildung 7-22: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

Spannungen

Die Spannung des Ingenieurmodells zeigt prinzipiell eine gute Näherung der Spannung aus dem FE-Modell. Sm1 (A)Em verliert jedoch mit sinkender Höhe an Gültigkeit. Unter einer Steghöhe von etwa 750 mm überschreiten die Abweichungen 20%. Die zugehörigen Daten sind in den Tabellen im Anhang C 8 ersichtlich.

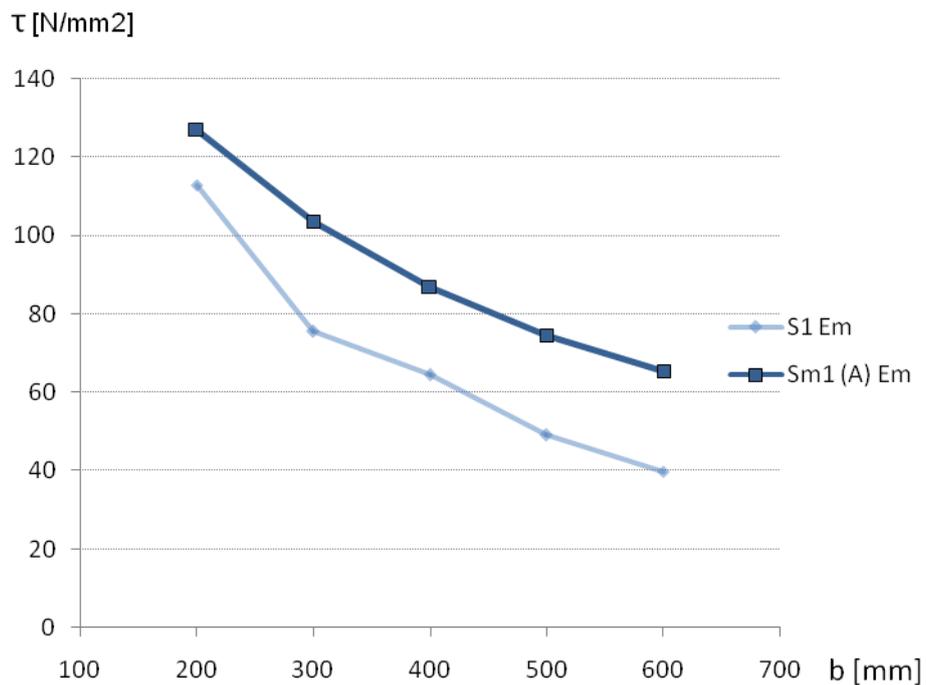


Abbildung 7-23: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation der Breite

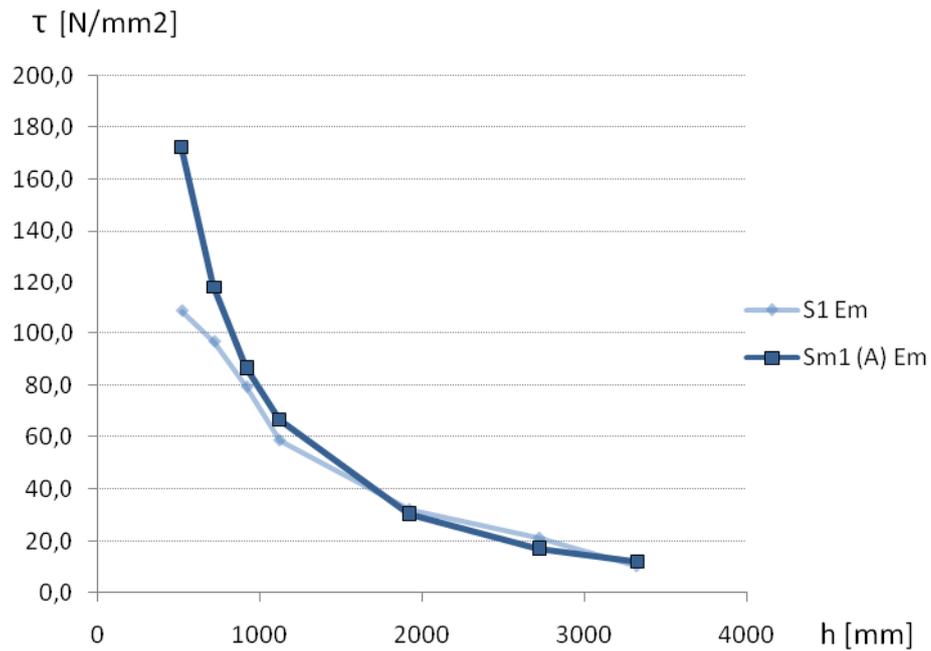


Abbildung 7-24: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation der Steghöhe

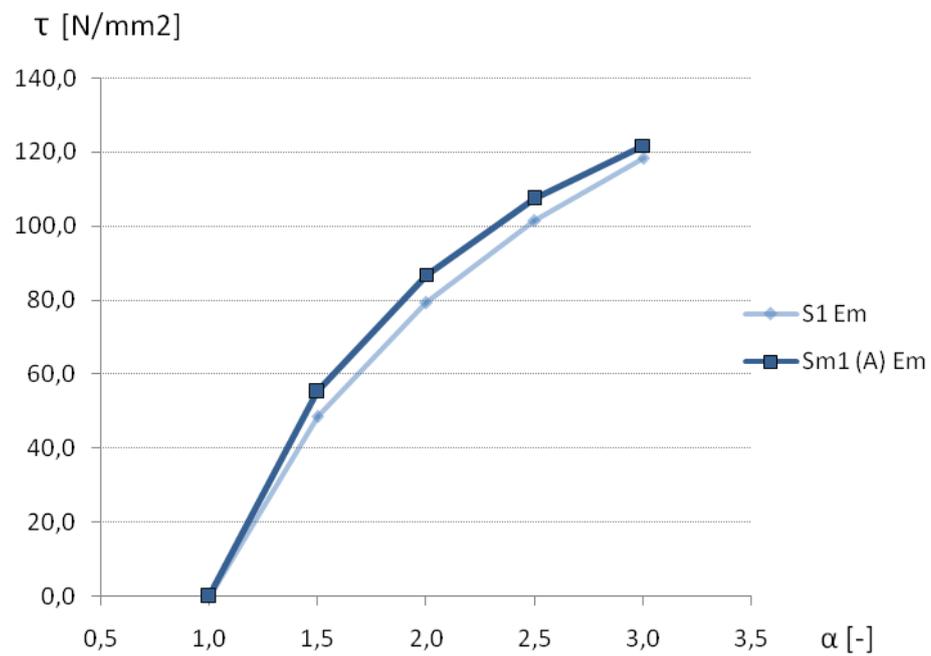


Abbildung 7-25: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation des Gurt Dickenspr.

7.2.3.2) Untergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge ergibt sich für S_{m1} (D)Em mittels

$$\delta = 1,25 [-]$$

zu

$$L_m = 1,25 \cdot h_{St}$$

Die Abbildungen 7-26 und 7-27 zeigen den erforderlichen Verlauf des Parameters δ um die Ergebnisse aus den FE-Modellen abzubilden.

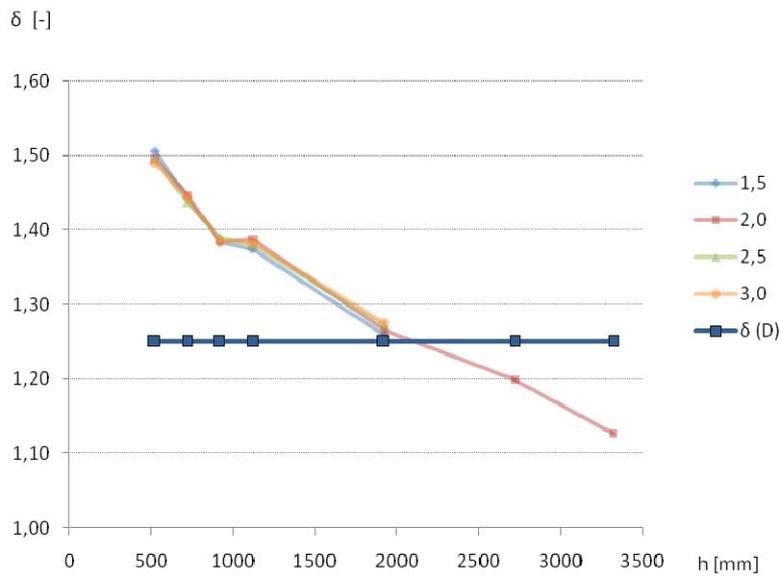


Abbildung 7-26: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

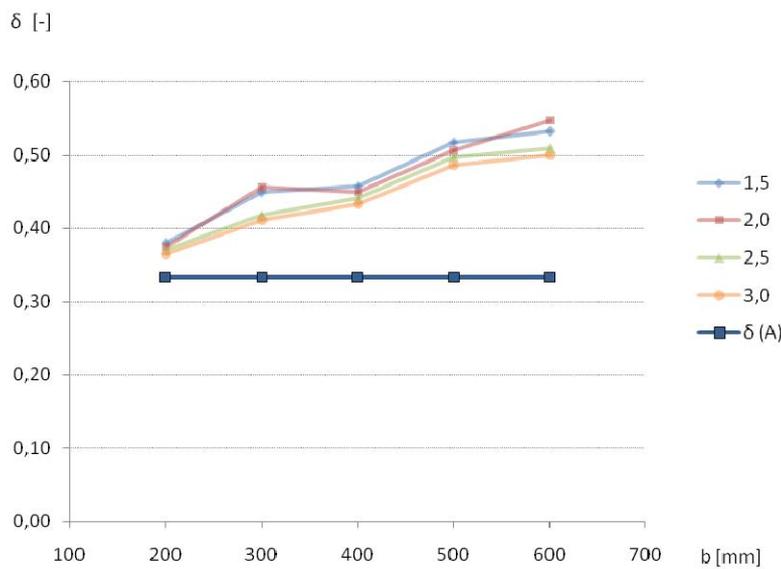


Abbildung 7-27: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

Spannungen

Diese Formel zeigt über weite Bereiche gute Annäherungen an die gewünschte Untergurtschubspannung. Die Spannung S_{m1} (D)Em ist über den gesamten untersuchten Parameterbereich gültig. Die zugehörigen Daten sind in den Tabellen im Anhang C 9 ersichtlich.

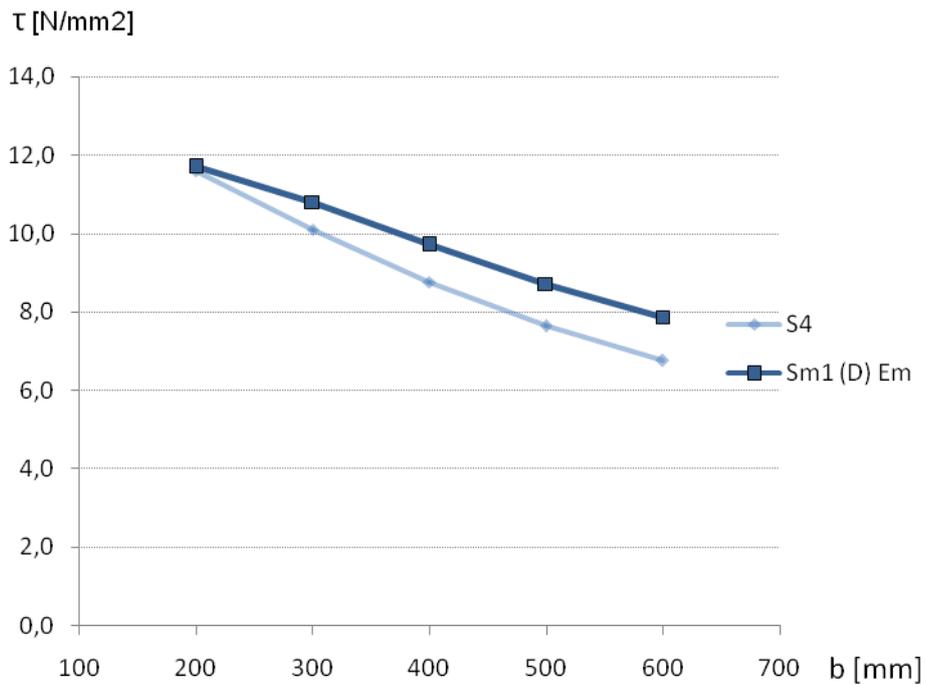


Abbildung 7-28: Verhalten des Ing. Modells S_{m1} (D)Em bei Variation der Breite

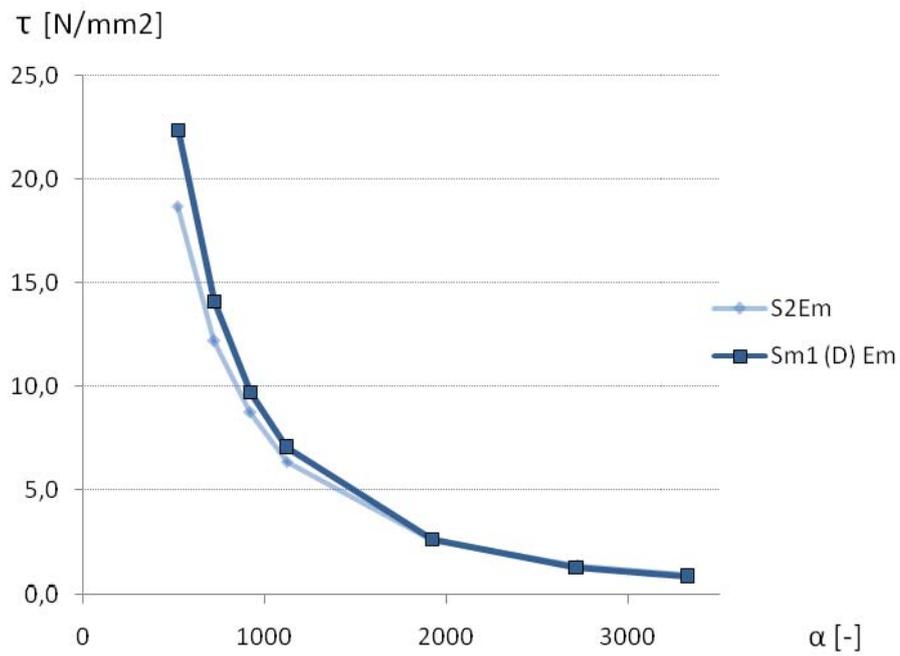


Abbildung 7-29: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D)Em bei Variation der Steghöhe

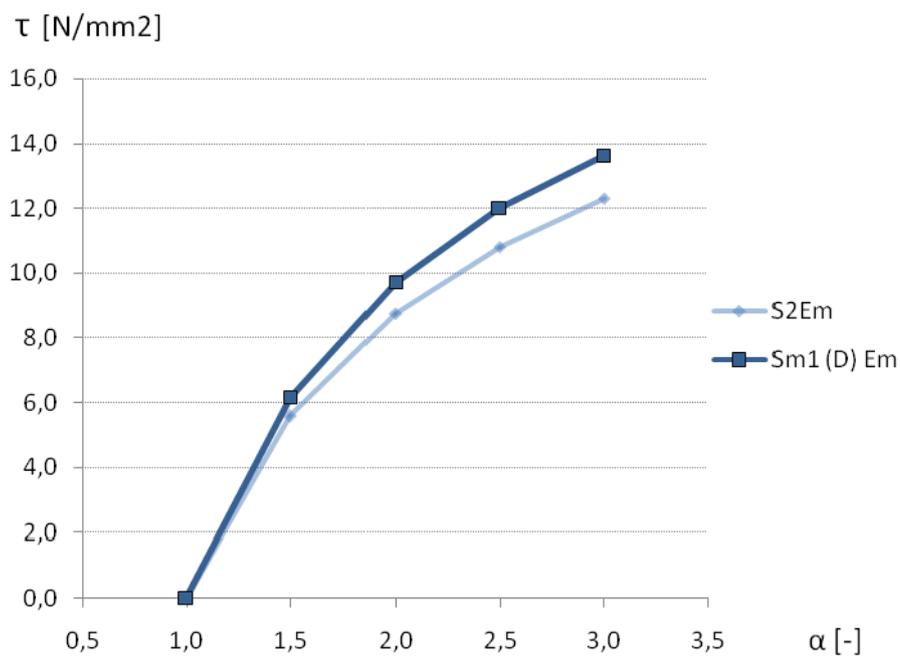


Abbildung 7-30: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D)Em bei Variation des Gurt Dickenspr.

7.2.4) Modell E-Modul, doppelt symmetrisch

7.2.4.1) Ober- und Untergurt

Die ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge ergibt sich für S_{m2} (A)Em mittels

$$\delta = 0,23 [-]$$

$$L_m = 0,23 \cdot h_{St}$$

Die Abbildungen 7-31 und 7-32 zeigen den erforderlichen Verlauf des Parameters δ für den Obergurt. Die Untergurtspannungen verhalten sich analog.

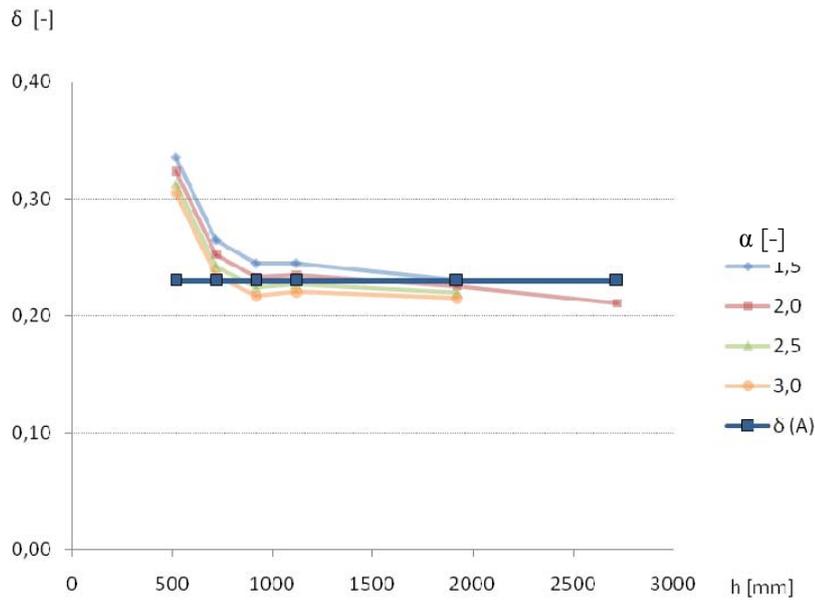


Abbildung 7-31: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe

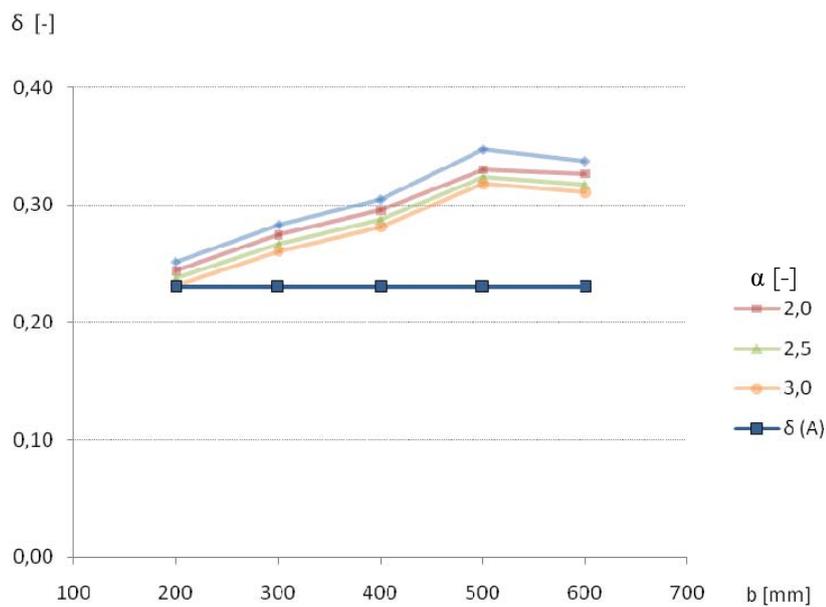


Abbildung 7-32: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite

Spannungen

Dieses Ingenieurmodell weist generell eine gute Übereinstimmung mit den auftretenden Schubspannungen auf. Bei zu geringen Höhen verliert das Modell ebenfalls seine Gültigkeit. Unter der Steghöhe von etwa 700 mm überschreiten die Abweichungen 20%. Die zugehörigen Daten sind in den Tabellen im Anhang C 10 und Anhang C 11 ersichtlich.

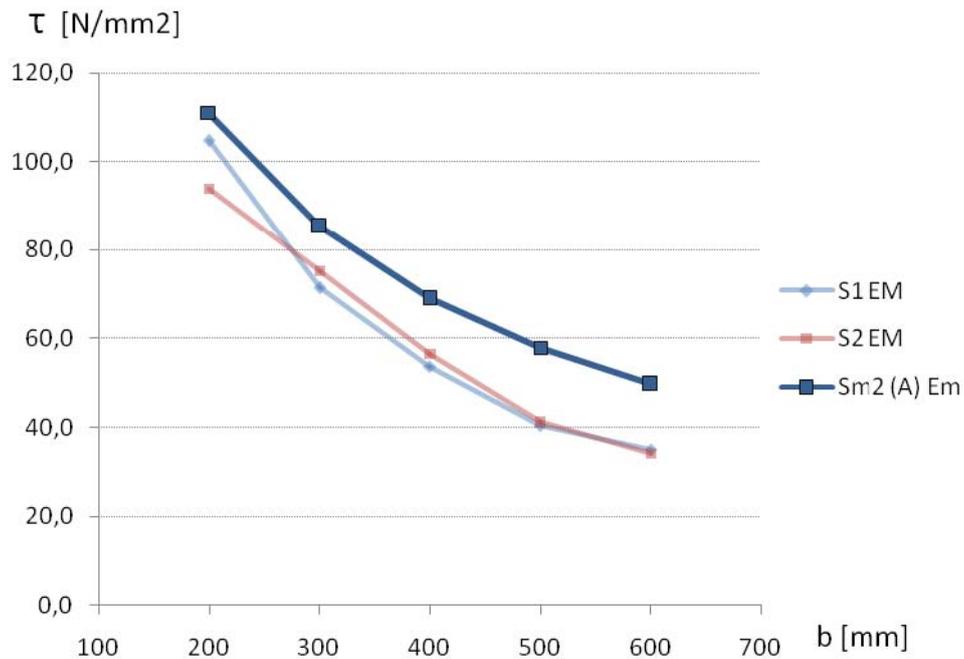


Abbildung 7-33: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation der Breite

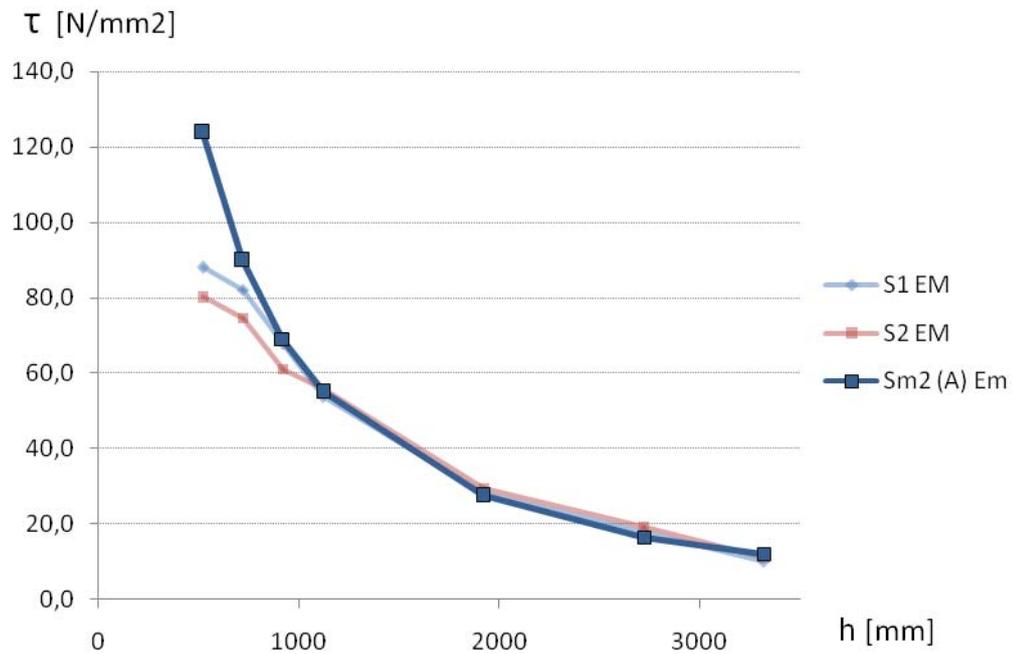


Abbildung 7-34: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation der Steghöhe

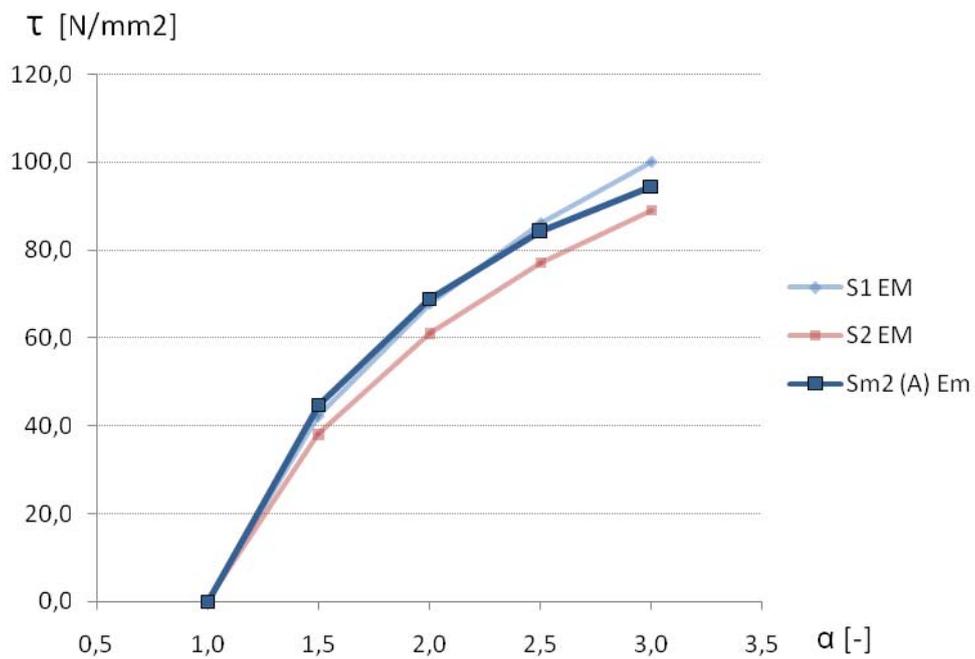


Abbildung 7-35: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation des Gurt Dickenspr.

7.3) Zusammenfassung

Ziel ist es, die Schubspannungen im Kontaktbereich zwischen Gurt und Steg so genau wie möglich durch ein einfaches Ingenieurmodell anzunähern. Es wurde ein Modell basierend auf einer dreieckigen Schubverteilung mit direkter Abhängigkeit von der Gurtkraftdifferenz dN gewählt. Für jeden untersuchten Schubspannungsverlauf eines Modells wurde ein eigener, das Verhalten bestimmender Parameter δ festgelegt. Dieser bestimmt den Einfluss der Höhe auf den Schubspannungsverlauf. Um die Mitwirkung des lokalen Momentes bei einer Variation des Gurtdickensprunges zu berücksichtigen, wurde ein zweiter Parameter ε in Abhängigkeit vom Gurtdickensprung dt eingeführt. Beide Parameter bestimmen das Verhalten des Ingenieurmodells bei einer Änderung der geometrischen Abmessungen.

Für jedes der vier untersuchten Modelle aus 7.1.2) werden daher drei Spannungen aus dem Ingenieurmodell berechnet. Diese Spannungen $S_m(A)$, $S_m(B)$ und $S_m(D)$ wurden in Kapitel 7.1.3) vorgestellt.

Das Ingenieurmodell wurde der Schubspannung S_1 , die an der Schnittlinie zwischen Gurt und Steg im Bereich des Gurtdickensprunges auftritt, angepasst. Diese tritt bei einem Gurtdickensprung davor und bei einem E-Modul Sprung am Ort des Materialüberganges auf. Auf die Abbildung der beim Modell „Abrupt Dick“ auftretenden Spannung S_2 wurde verzichtet. Diese tritt konzentriert am Dickensprung auf und nimmt zum Teil hohe Werte an. Die Spannung S_2 konnte aus den FE-Ergebnissen zum Teil nur näherungsweise ermittelt werden, da sie stark von der lokalen Netzteilung des FE-Programmes abhängt. Durch eine Abschrägung am Gurtdickensprung sinkt S_2 stark ab und wird durch die Spannung S_1 als maßgebliche Schubspannung abgelöst. Das Schubspannungsmaximum S_3 war in keinem betrachteten Fall maßgeblich.

Das Ingenieurmodell deckt daher das Modell „Schweißnaht“ auf der sicheren Seite liegend ab. Bei einem zunehmend stetigen Übergang der Gurtdicke erhöht sich sukzessive die Sicherheit des Ingenieurmodells.

Parameter

Die am Dickensprung auftretenden Schnittgrößen lassen sich nach Kapitel 6.3) in Moment und Querkraft einteilen. Das vorhandene Moment nimmt direkt Einfluss auf die Gurtnormalkraftdifferenz dN , die in das Ingenieurmodell mit eingeht. Im Kapitel 6.3.3) wurde die Auswirkung einer Querkraft auf die lokalen Spannungen untersucht. Es zeigte sich, dass die lokalen Spannungsdifferenzen im Vergleich zu den absoluten Spannungen bei reinem Moment gering sind. Es ist daher eine Berücksichtigung im Ingenieurmodell nicht erforderlich, da die Auswirkungen in dessen Toleranzbereich liegen. Das Kapitel 7.1.1) behandelt unter anderem den Einfluss der Schubspannungen nach der technischen Biegetheorie auf das Modell. Die lokalen Schubspannungen aus dem Ingenieurmodell werden dabei zum Mittelwert der Schubspannungen nach der technischen Biegetheorie über die Querschnitte vor und nach dem Dickensprung addiert.

Die Auswirkungen bei Veränderung einer geometrischen Größe zeigt das Kapitel 6.4). Die Berücksichtigung der Breite erfolgt in allen Ingenieurmodellen über die Gurtkraftdifferenz dN . Bei einer Veränderung der Breite verhalten sich die Schubspannungen weitgehend entsprechend der Gurtkraftdifferenz.

Kapitel 6.4.4) behandelte die Veränderungen bei variierender Querschnittshöhe. Die Gurtnormalkraftdifferenz dN weist dabei ein Maximum auf. Die zugehörigen Schubspannungen verhalten sich jedoch nicht konform zu dN und sind daher mit dem Ingenieurmodell unter einer bestimmten Steghöhe nicht mehr abbildbar. Dieses Problem existiert bei allen Modellen, scheint jedoch nicht bei jedem im betrachteten Parameterbereich auf. Für den bautechnisch interessanten Bereich von $\beta = 1,8$ bis $5,0$ [-] ist eine Einschränkung nur für das Modell „Abrupt Dick“ in doppelt symmetrischer Ausführung nötig.

Es stellt sich die Frage, wo man sich bei einem beliebigen System auf dem Gurtkraftdifferenzverlauf befindet. Im Falle des untersuchten Trägers wurde dies durch die Variation der Höhe und Aufzeichnen der Normalkräfte erreicht. Für die angegebenen Ingenieurmodelle wurden der Einfachheit halber Begrenzungen für die Gültigkeit in Abhängigkeit vom Wert β bzw. der Steghöhe definiert.

Der untersuchte Bereich von β erstreckt sich bei der Variation der Breite von 1,5 bis 4,6 und bei der Variation der Höhe von 1,3 bis 8,3. Es wird daher für den Bereich von etwa $\beta=1,3-5,0$ die Gültigkeit jedes Ingenieurmodells geprüft.

Bei einer Variation der Gurtdickendifferenz dt , wie in Kapitel 6.4.5) gezeigt, verhält sich die Spannung S_1 geringfügig anders als die Gurtkraftdifferenz dN . Dies erklärt sich aus den unterschiedlichen Gurtdicken der Querschnitte vor und nach dem Dickensprung. Dabei konzentriert sich die Spannung S_1 immer stärker vor dem Dickensprung. Um die Spannung S_1 im Ingenieurmodell besser anzunähern wurde das Modell S_m (B) eingeführt.

Das Ingenieurmodell behält ebenfalls für die Variation der Gurtdicke des Querschnitts l von $t_{0G,1} = 40$ auf 80 mm seine Gültigkeit.

Spannungsabbildungen

Das Ingenieurmodell S_m (A), welches von der Gurtkraftdifferenz dN und der Steghöhe h_{st} abhängt, erweist sich in weiten Bereichen als ausreichende Näherung. Um die Schubspannungen bei der Variation der Gurtdicken besser abzubilden, wurde das Modell S_m (B) definiert. Dieses ist ebenfalls vom Gurtdickensprung dt abhängig und nimmt dadurch indirekt Rücksicht auf das Mitwirken des lokalen Momentes. Grundsätzlich liefert dadurch die Berechnung von S_m (B) genauere Ergebnisse.

Die für einfach symmetrische Modelle am Untergurt berechnete Spannung S_m (C) liefert gute Näherungen für die dort auftretenden lokalen Schubspannungen S_4 beziehungsweise S_2 Em.

Ausblick

Es zeigte sich, dass für ein effektives Ingenieurmodell, das über größere Bereiche gültig ist, die Berücksichtigung des lokalen Momentes dM erforderlich ist. Die indirekte Berücksichtigung über die Gurtdickendifferenz dt erwies sich für die untersuchten Modelle als ausreichend, zeigte sich jedoch für andere Modelle als unpraktisch.

8) Verzeichnisse

8.1) Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Ausführungen Dickensprung: „Verlaufend“, „Schweißnaht“, „Abrupt Dick“	6
Abbildung 4-2: System	8
Abbildung 4-3: Allgemeine Darstellung des Querschnitts	9
Abbildung 4-4: Querschnitt 1 bis 3	11
Abbildung 4-5: Querschnitt 4 und 5	13
Abbildung 4-6: Belastungen des Systems	16
Abbildung 4-7: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Moment $M= 4.077,2 \text{ kNm}$	17
Abbildung 4-8: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Moment $M= 4.077,2 \text{ kNm}$	17
Abbildung 4-9: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Einzellast $P= 815,44 \text{ kN}$	18
Abbildung 4-10: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Einzellast $P= 815,44 \text{ kN}$	18
Abbildung 4-11: Schnittgröße Moment bei Belastung mit Gleichlast $q= 108,73 \text{ kN/m}$	19
Abbildung 4-12: Schnittgröße Querkraft bei Belastung mit Gleichlast $q= 108,73 \text{ kN/m}$	19
Abbildung 4-13: Teilschnittgrößen, Spannungszustände und Dehnungszustände nach der technischen Biegetheorie	21
Abbildung 4-14: Schematische Darstellung der am Dickensprung wirkenden Kräfte	24
Abbildung 4-15: Schematische Darstellung der Schweißnähte bei einem Gurtdickensprung	28
Abbildung 5-1: Ausführungsrichtungen des Dickensprungh: innen, zentrisch, außen	32
Abbildung 5-2: Ausführungsart und entsprechendes FE-Modell	33
Abbildung 5-3: Einfach und doppelt symmetrische Ausführung	34
Abbildung 5-4: Schnittführung und geometrische Parameter	35
Abbildung 5-5: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“	36
Abbildung 5-6: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“	36
Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“	37
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Schubspannungen in der Schnittfuge für das Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“	37
Abbildung 5-9: Darstellung der Querschnitte beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“	40
Abbildung 5-10: Spannungen in lokale x-Richtung	43
Abbildung 5-11: Spannungen in lokale z-Richtung	44
Abbildung 5-12: Schubspannungen	45
Abbildung 5-13: Spannungen parallel zum Schnitt	46
Abbildung 5-14: Normalspannungen im Gurt	47
Abbildung 5-15: Spannungen normal zum Schnitt	48
Abbildung 5-16: Schubspannungen im Schnitt	49

Abbildung 5-17: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt.....	50
Abbildung 5-18: Darstellung der Querschnitte beim Modell Abrupt Dick, doppelt symmetrisch	51
Abbildung 5-19: Spannungen parallel zum Schnitt.....	53
Abbildung 5-20: Schubspannungen	54
Abbildung 5-21: Spannungen normal zum Schnitt.....	55
Abbildung 5-22: Schubspannungen im Schnitt.....	56
Abbildung 5-23: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt.....	57
Abbildung 5-24: Vergleich der Spannungen normal zum Schnitt der Modelle „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ und „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“	58
Abbildung 5-25: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ und „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“	58
Abbildung 5-26: Darstellung der Querschnitte beim Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“	59
Abbildung 5-27: Spannungen parallel zum Schnitt	60
Abbildung 5-28: Normalspannungen im Gurt	61
Abbildung 5-29: Spannungen normal zum Schnitt.....	62
Abbildung 5-30: Schubspannungen im Schnitt.....	63
Abbildung 5-31: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick“ und „E-Modul“, einfach symmetrisch	65
Abbildung 5-32: Darstellung der Querschnitte beim Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“	66
Abbildung 5-33: Schubspannungen im Schnitt.....	68
Abbildung 5-34: Querschnittsübergang beim Modell „Schweißnaht“	69
Abbildung 5-35: Schubspannungen im Schnitt.....	70
Abbildung 5-36: Darstellung der Querschnitte beim Modell „Verlaufend, einfach symmetrisch“.	71
Abbildung 5-37: Spannungen in lokale z-Richtung	73
Abbildung 5-38: Schubspannungen	74
Abbildung 5-39: Spannungen parallel zum Schnitt	75
Abbildung 5-40: Normalspannungen im Gurt	76
Abbildung 5-41: Spannungen normal zum Schnitt.....	77
Abbildung 5-42: Schubspannungen im Schnitt.....	78
Abbildung 5-43: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt.....	79
Abbildung 5-44: Vergleich der Spannungen normal zum Schnitt der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“, einfach symmetrisch.....	80
Abbildung 5-45: Vergleich der Schubspannungen der Modelle „Abrupt Dick“, „Schweißnaht“ und „Verlaufend“, einfach symmetrisch.....	82
Abbildung 6-1: Variation der geometrischen Parameter	91
Abbildung 6-2: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Momentes	93
Abbildung 6-3: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Querkraft.....	96
Abbildung 6-4: Verhalten der Spannungen bei Variation der Querkraft	96
Abbildung 6-5: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft $V = 0,0$ kN, über Träger konstant	97

Abbildung 6-6: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 543,63 kN, über Träger linear veränderlich.....	98
Abbildung 6-7: Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 815,44 kN, über Träger konstant.....	99
Abbildung 6-8: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 0,0 kN, über Träger konstant.....	100
Abbildung 6-9: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 543,63 kN, über Träger linear veränderlich.....	101
Abbildung 6-10: Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 815,44 kN, über Träger konstant.....	102
Abbildung 6-11: Verhalten der Spannungen bei Variation der Querkraft.....	103
Abbildung 6-12: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 0,0 kN, über Träger konstant.....	104
Abbildung 6-13: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 543,63 kN, über Träger linear veränderlich.....	105
Abbildung 6-14: Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“; Schubspannungen bei Querkraft V= 815,44 kN, über Träger konstant.....	106
Abbildung 6-15: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Momentes.....	107
Abbildung 6-16: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Momentes.....	108
Abbildung 6-17: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Momentes.....	108
Abbildung 6-18: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Höhe und Breite für das Modell „Abrupt Dick“ in einfach und doppelt sym. Ausführung.....	111
Abbildung 6-19: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Höhe und Breite für das Modell „E-Modul“ in einfach und doppelt sym. Ausführung.....	112
Abbildung 6-20: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Breite.....	114
Abbildung 6-21: Verhalten des lokalen Momentes bei Variation der Breite.....	114
Abbildung 6-22: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite.....	115
Abbildung 6-23: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite.....	116
Abbildung 6-24: Verhalten der Schubflächen bei Variation der Breite.....	117
Abbildung 6-25: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite.....	118
Abbildung 6-26: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite.....	119
Abbildung 6-27: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite.....	120
Abbildung 6-28: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Obergurt.....	121
Abbildung 6-29: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Untergurt.....	122
Abbildung 6-30: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Breite.....	123
Abbildung 6-31: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Breite.....	123
Abbildung 6-32: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite.....	124
Abbildung 6-33: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite.....	124
Abbildung 6-34: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite.....	125
Abbildung 6-35: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Breite.....	126

Abbildung 6-36: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Breite	126
Abbildung 6-37: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Obergurt.....	127
Abbildung 6-38: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Breite, Untergurt.....	128
Abbildung 6-39: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Steghöhe	130
Abbildung 6-40: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Steghöhe	130
Abbildung 6-41: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation der Steghöhe	131
Abbildung 6-42: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe.....	132
Abbildung 6-43: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe.....	133
Abbildung 6-44: Verhalten der Schubkräfte bei Variation der Steghöhe	134
Abbildung 6-45: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe	135
Abbildung 6-46: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe.....	136
Abbildung 6-47: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe.....	137
Abbildung 6-48: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Obergurt.....	138
Abbildung 6-49: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Untergurt	139
Abbildung 6-50: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation der Steghöhe	140
Abbildung 6-51: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation der Steghöhe	140
Abbildung 6-52: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation der Steghöhe	141
Abbildung 6-53: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe.....	142
Abbildung 6-54: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe.....	143
Abbildung 6-55: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe.....	144
Abbildung 6-56: Verhalten der Schubspannungen bei Variation der Steghöhe.....	145
Abbildung 6-57: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation der Steghöhe.....	146
Abbildung 6-58: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Obergurt.....	147
Abbildung 6-59: Schubspannungen im Schnitt bei Variation der Steghöhe, Untergurt	148
Abbildung 6-60: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Gurtdickensprunges	150
Abbildung 6-61: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Gurtdickensprunges...	150
Abbildung 6-62 Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation des Gurtdickensprunges..	151
Abbildung 6-63: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges	152
Abbildung 6-64: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges....	153
Abbildung 6-65: Verhalten der Schubkräfte bei Variation des Gurtdickensprunges	153
Abbildung 6-66: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurtdickensprunges	154
Abbildung 6-67: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges	155
Abbildung 6-68: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges....	156
Abbildung 6-69: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurtdickenspr., Obergurt	157
Abbildung 6-70: Schubspannungen im Schnitt bei Variation des Gurtdickenspr., Untergurt	158
Abbildung 6-71: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Gurtdickensprunges	159
Abbildung 6-72: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Gurtdickensprunges...	159
Abbildung 6-73: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges	160
Abbildung 6-74: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges....	160
Abbildung 6-75: Verhalten der Schubspannungen bei Variation des Gurtdickensprunges	161

Abbildung 6-76: Verhalten der Lasteinleitungslängen bei Variation des Gurtdickensprunges	161
Abbildung 6-77: Verhalten des lokalen Momentes dM bei Variation des Dickenspr.....	163
Abbildung 6-78: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation des Dickenspr.	163
Abbildung 6-79: Verhalten des ideellen Hebelarmes e' bei Variation des Dickenspr.....	164
Abbildung 6-80: Verhalten der Schubspannungen, $t_{OG, l=80\text{mm}}$ bei Variation des Gurtdickensprunges	165
Abbildung 6-81: Verhalten der Schubspannungen, $t_{OG, l=40\text{mm}}$ bei Variation des Gurtdickensprunges	165
Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des Ingenieurmodells und der drei Spannungsbilder Sm1 (A), (B) und (C)	175
Abbildung 7-2: Schematische Darstellung des Ingenieurmodells bei Querkraft.....	177
Abbildung 7-3: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	185
Abbildung 7-4: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite.....	185
Abbildung 7-5: Korrekturfaktor δ bei Variation von β	186
Abbildung 7-6: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation der Breite.....	187
Abbildung 7-7: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation der Höhe.....	188
Abbildung 7-8: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei Variation des Gurtdickenspr....	188
Abbildung 7-9: Verhalten der Ing. Modelle Sm1 (A) und (B) bei $t_{OG, l=40\text{ mm}}$ und Variation des Gurtdickensprunges	189
Abbildung 7-10: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	190
Abbildung 7-11: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite.....	190
Abbildung 7-12: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei Variation der Höhe	191
Abbildung 7-13: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei Variation der Breite	191
Abbildung 7-14: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei Variation des Gurtdickensprunges.....	192
Abbildung 7-15: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D) bei $t_{OG, l=40\text{ mm}}$ und Variation des Gurtdickensprunges	192
Abbildung 7-16: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	193
Abbildung 7-17: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite.....	193
Abbildung 7-18: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation der Breite.....	194
Abbildung 7-19: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation der Steghöhe.....	195
Abbildung 7-20: Verhalten der Ing. Modelle Sm2 (A) und (B) bei Variation des Gurtdickenspr.	195
Abbildung 7-21: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	196
Abbildung 7-22: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite.....	196
Abbildung 7-23: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation der Breite	197
Abbildung 7-24: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation der Steghöhe.....	198
Abbildung 7-25: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (A)Em bei Variation des Gurtdickenspr.....	198
Abbildung 7-26: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	199
Abbildung 7-27: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite.....	199
Abbildung 7-28: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D)Em bei Variation der Breite.....	200
Abbildung 7-29: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D)Em bei Variation der Steghöhe	201

Abbildung 7-30: Verhalten des Ing. Modells Sm1 (D)Em bei Variation des Gurt Dickenspr.	201
Abbildung 7-31: Korrekturfaktor δ bei Variation der Breite	202
Abbildung 7-32: Korrekturfaktor δ bei Variation der Höhe.....	202
Abbildung 7-33: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation der Breite	203
Abbildung 7-34: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation der Steghöhe.....	204
Abbildung 7-35: Verhalten des Ing. Modells Sm2 (A)Em bei Variation des Gurt Dickenspr.....	204

8.2) Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Querschnittswerte QS 1	11
Tabelle 4-2: Querschnittswerte QS 2	12
Tabelle 4-3: Querschnittswerte QS 3	12
Tabelle 4-4: Querschnittswerte QS 4	13
Tabelle 4-5: Querschnittswerte QS 5	14
Tabelle 4-6: Querschnittswiderstände aller Querschnitte.....	14
Tabelle 4-7: Einwirkungen und hervorgerufene Schnittgrößen am Dickensprung.....	16
Tabelle 4-8: Teilschnittgrößen NOG und Gurtkraftdifferenzen dN.....	30
Tabelle 4-9: von Einwirkungen verursachte Schubflüsse	31
Tabelle 5-1: Modelle für Grunduntersuchungen.....	34
Tabelle 5-2: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang	41
Tabelle 5-3: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang	52
Tabelle 5-4: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang	59
Tabelle 5-5: Gurtkraftdifferenzen dN.....	64
Tabelle 5-6: Differenzschnittgrößen am Querschnittsübergang	66
Tabelle 6-1: Lastfälle nach Kapitel 4.3)	86
Tabelle 6-2: Schnittgrößen Parameter.....	86
Tabelle 6-3: Geometrischer Parameter β , Steghöhe und Breite	88
Tabelle 6-4: Geometrischer Parameter α , Gurt Dicke.....	89
Tabelle 6-5: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“	95
Tabelle 6-6: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“	95
Tabelle 6-7: Schubspannungsspitzen beim Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“	103
Tabelle 6-8: Schubspannungsspitzen beim Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“	107
Tabelle 6-9: maximale Gurtkraftdifferenzen.....	110
Tabelle 6-10: Parameterbereich bei Variation der Breite.....	113
Tabelle 6-11: Parameterbereich bei Variation der Steghöhe.....	129
Tabelle 6-12: Parameterbereich bei Variation des Gurt Dickensprunges mit tOG,1= 40,0 mm....	149
Tabelle 6-13: Parameterbereich bei Variation des Gurt Dickensprunges mit tOG,1= 80,0 mm....	162
Tabelle 7-1: Toleranzen des Ingenieurmodells.....	181
Tabelle 7-2: Übersicht Ingenieurmodelle	184

8.3) Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1993-1-1:2005; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. CEN 2005
- [2] ÖNORM B 4602:1975-08; Stahlbau, Straßenbrücken. Österreichisches Normungsinstitut 1975
- [3] DIN 18800-1:1990-11; Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institut für Normung 1990
- [4] Tragverhalten an Gurt dickenssprüngen geschweißter Biegeträger; Richard Greiner, Andreas Taras, Harald Unterweger; Stahlbau 78 (2009), Heft 7; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG

9) Anhang

Anhang A, Modelle

Anhang A 1: Normalspannungen in den Querschnitten 1 bis 4 nach der techn. Biegelehre	217
Anhang A 2: Teilschnittgrößen Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ (QS 1 zu QS 2) für MEd= 4077,2 kNm, VEd= 0,0 kN, NEd= 0,0 kN	218
Anhang A 3: Teilschnittgrößen Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ (QS 1 zu QS 3) für MEd= 4077,2 kNm, VEd= 0,0 kN, NEd= 0,0 kN	219
Anhang A 4: Teilschnittgrößen Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“ (QS 1 zu QS 4) für MEd= 4077,2 kNm, VEd= 0,0 kN, NEd= 0,0 kN	220
Anhang A 5: Teilschnittgrößen Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“ (QS 1 zu QS 5) für MEd= 4077,2 kNm, VEd= 0,0 kN, NEd= 0,0 kN	221
Anhang A 6: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt.....	222

Anhang B, Parameterstudie

Anhang B 1: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „Abrupt Dick einfach symmetrisch“	223
Anhang B 2: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „E-Modul einfach symmetrisch“	223
Anhang B 3: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „Abrupt Dick doppelt symmetrisch“	224
Anhang B 4: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „E-Modul doppelt symmetrisch“	224
Anhang B 5: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, M= 4077,2 kNm, V= variiert	225
Anhang B 6: „E-Modul, einfach symmetrisch“, M= 4077,2 kNm, V= variiert	225
Anhang B 7: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, M= variiert	226
Anhang B 8: „E-Modul, einfach symmetrisch“, M= variiert	227
Anhang B 9: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, b= variiert	229
Anhang B 10: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“, b= variiert	231
Anhang B 11: „E-Modul, einfach symmetrisch“, b= variiert	234
Anhang B 12: „E-Modul, doppelt symmetrisch“, b= variiert	235
Anhang B 13: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert	237
Anhang B 14: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert	239
Anhang B 15: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert	240
Anhang B 16: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert	242
Anhang B 17: „E-Modul, einfach symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert	244
Anhang B 18: „E-Modul, einfach symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert	246
Anhang B 19: „E-Modul, doppelt symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert	247
Anhang B 20: „E-Modul, doppelt symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert	249
Anhang B 21: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Obergurt, tOG,l= 80,0mm, dt= variiert	250
Anhang B 22: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Untergurt, tOG,l= 80,0mm, dt= variiert	251

Anhang C, Ingenieurmodell

Anhang C 1: Obergurt, Sm1 (A).....	252
Anhang C 2: Obergurt, Sm1 (B).....	253
Anhang C 3: Untergurt, Sm1 (D).....	254
Anhang C 4: Obergurt, Sm2 (A).....	255
Anhang C 5: Untergurt, Sm2 (A).....	256
Anhang C 6: Obergurt, Sm2 (B).....	257
Anhang C 7: Untergurt, Sm2 (B).....	258
Anhang C 8: Obergurt, Sm1 (A)Em.....	259
Anhang C 9: Untergurt, Sm1 (D)Em.....	260
Anhang C 10: Obergurt, Sm2 (A)Em.....	261
Anhang C 11: Untergurt, Sm2 (A)Em.....	262

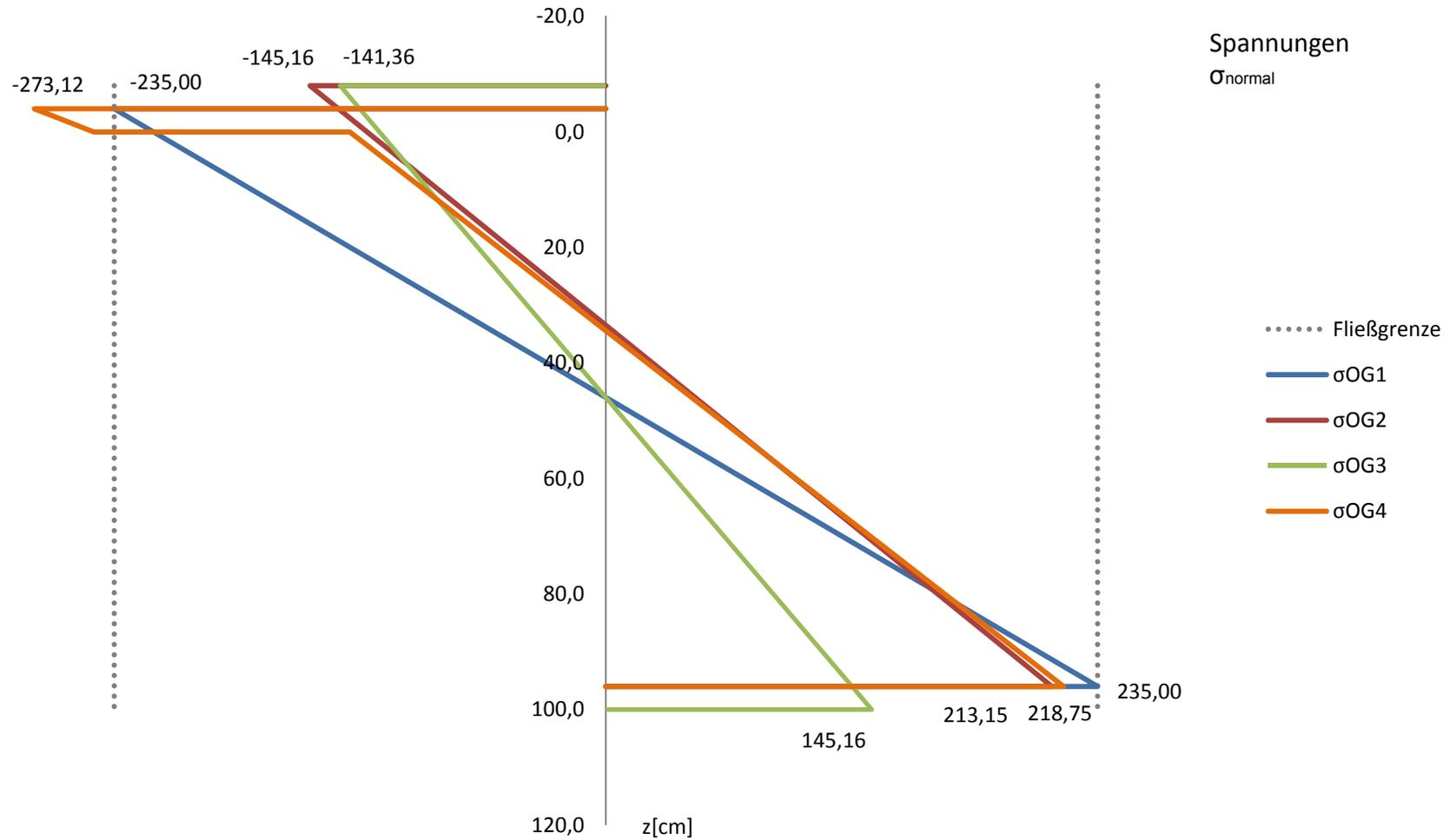
Im Anhang A sind die sich einstellenden Teilschnittgrößen nach der elastischen Biegetheorie in den Querschnitten 1 bis 5 bei einer Belastung mit dem konstanten Moment $M = 4077,2 \text{ kNm}$ dargelegt. Zusätzlich sind die, sich daraus ergebenden Differenzschnittgrößen angeführt.

Der Anhang B beinhaltet die Ergebnisse der Parameterstudien aus Kapitel 6) in tabellarischer Form. Die Tabellen sind die Grundlage für die Ingenieurmodelle aus Kapitel 7).

Die Gurtkraftdifferenz dN und das lokale Moment dM wurden aus einer Gegenüberstellung der Schnittgrößen nach der technischen Biegelehre der Querschnitte vor und nach dem Dickensprung berechnet. Alle aufscheinenden Spannungen S oder Lasteinleitungslängen L wie sie in Kapitel 5.1) vorgestellt wurden, wurden aus Berechnungen mit dem FE-Programm ermittelt.

Im Anhang C sind die Ergebnisse des Ingenieurmodells und dessen Abweichungen von den Schubspannungen nach der FE-Berechnung aufgelistet. Spannungen die im Gültigkeitsbereich des Ingenieurmodells liegen und die auf Seite 181 aufgelisteten Toleranzen erfüllen sind grau hinterlegt.

9.1) Anhang A, Modelle



Anhang A 1: Normalspannungen in den Querschnitten 1 bis 4 nach der techn. Biegelehre

Anhang A 2: Teilschnittgrößen Modell „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ (QS 1 zu QS 2) für $M_{Ed} = 4077,2 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$

	SG	SG _{OG1}	SG _{OG2}	SG _{OG1} - SG _{OG2}
OGO	N [kN]	0,0	-1.818,9	-1.818,9
	M [kNm]	0,0	0,6	0,6
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

OGu	N [kN]	-3.609,6	-2.194,3	1.415,3
	M [kNm]	1,0	0,8	-0,2
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

Steg	N [kN]	0,0	664,1	664,1
	M [kNm]	610,0	468,4	-141,6
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

UGu	N [kN]	3.609,6	3.349,2	-260,4
	M [kNm]	1,0	0,8	-0,2
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

UGo	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	0,0	0,0	0,0
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

lokales Moment		Schubkraft Steg-Gurt		ideeller Hebelarm	
M _{OG1}	73,2	N _{OG1}	-3.609,6		
M _{OG2}	169,3	N _{OG2}	-4.087,2		
dM	96,1	dN	-477,6	e'	-201,1
M _{UG1}	73,2	N _{UG1}	3.609,6		
M _{UG2}	66,8	N _{UG2}	3.301,3		
dM	-6,4	dN	-308,3	e'	20,9

Anhang A 3: Teilschnittgrößen Modell „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ (QS 1 zu QS 3) für $M_{Ed} = 4077,2 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$

	SG	SG _{OG1}	SG _{OG3}	SG _{OG1} – SG _{OG3}
OGo	N [kN]	0,0	-1.677,4	-1.677,4
	M [kNm]	0,0	0,4	0,4
	V [kN]	0,0	0,0	0,0
OGu	N [kN]	-3.609,6	-2.064,4	1.545,2
	M [kNm]	1,0	0,6	-0,4
	V [kN]	0,0	0,0	0,0
Steg	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	610,0	348,9	-261,1
	V [kN]	0,0	0,0	0,0
UGu	N [kN]	3.609,6	2.064,4	-1.545,2
	M [kNm]	1,0	0,6	-0,4
	V [kN]	0,0	0,0	0,0
UGo	N [kN]	0,0	1.677,4	1.677,4
	M [kNm]	0,0	0,4	0,4
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

lokales Moment		Schubkraft Steg-Gurt		ideeller Hebelarm	
M _{OG1}	73,2	N _{OG1}	-3.609,6		
M _{OG2}	154,6	N _{OG2}	-3.763,9		
dM	81,4	dN	-154,3	e'	-527,5
M _{UG1}	73,2	N _{UG1}	-3.609,6		
M _{UG2}	154,6	N _{UG2}	-3.763,9		
dM	81,4	dN	-154,3	e'	-527,5

Anhang A 4: Teilschnittgrößen Modell „E-Modul, einfach symmetrisch“ (QS 1 zu QS 4) für $M_{Ed} = 4077,2 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$

	SG	SG _{OG1}	SG _{OG4}	SG _{OG1} – SG _{OG4}
OGO	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	0,0	0,0	0,0
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

OGu	N [kN]	-3.609,6	-4.142,5	-532,9
	M [kNm]	1,0	1,5	0,5
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

Steg	N [kN]	0,0	756,2	756,2
	M [kNm]	610,0	461,1	-148,9
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

UGu	N [kN]	3.609,6	3.386,3	-223,3
	M [kNm]	1,0	0,8	-0,2
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

UGo	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	0,0	0,0	0,0
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

lokales Moment		Schubkraft Steg-Gurt		ideeller Hebelarm	
M _{OG1}	73,2	N _{OG1}	-3.609,6		
M _{OG2}	84,4	N _{OG2}	-4.142,5		
dM	11,2	dN	-532,9	e'	-21,0
M _{UG1}	73,2	N _{UG1}	3.609,6		
M _{UG2}	68,5	N _{UG2}	3.386,3		
dM	-4,7	dN	-223,3	e'	21,1

Anhang A 5: Teilschnittgrößen Modell „E-Modul, doppelt symmetrisch“ (QS 1 zu QS 5) für $M_{Ed} = 4077,2 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 0,0 \text{ kN}$

	SG	SG _{OG1}	SG _{OG5}	SG _{OG1} – SG _{OG5}
OGO	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	0,0	0,0	0,0
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

OGu	N [kN]	-3.609,6	-3.901,4	-291,8
	M [kNm]	1,0	1,1	0,1
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

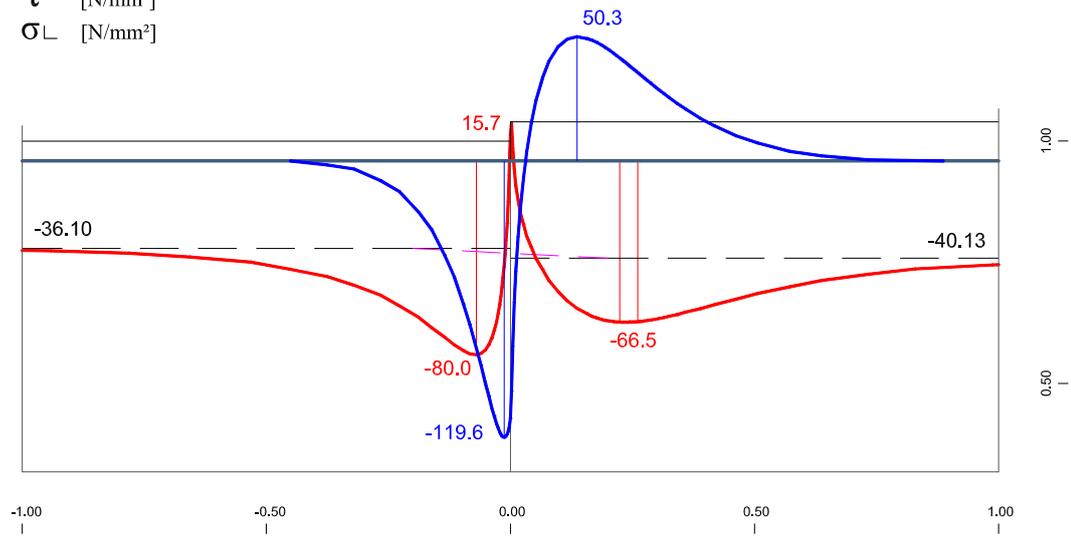
Steg	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	610,0	329,6	-280,3
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

UGu	N [kN]	3.609,6	3.901,4	291,8
	M [kNm]	1,0	1,1	3.900,4
	V [kN]	0,0	0,0	1,1

UGo	N [kN]	0,0	0,0	0,0
	M [kNm]	0,0	0,0	0,0
	V [kN]	0,0	0,0	0,0

lokales Moment		Schubkraft Steg-Gurt		ideeller Hebelarm	
M _{OG1}	73,2	N _{OG1}	-3.609,6		
M _{OG2}	79,1	N _{OG2}	-3.901,4		
dM	5,9	dN	-291,8	e'	-20,3
M _{UG1}	73,2	N _{UG1}	3.609,6		
M _{UG2}	79,1	N _{UG2}	3.901,4		
dM	5,9	dN	291,8	e'	20,3

τ [N/mm²]
 σ_{\perp} [N/mm²]



Legende :
 — τ Abrupt Dick, einfach, V=815,44 kN (Einzellast); hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$
 — σ_{\perp} Abrupt Dick, einfach, V=815,44 kN (Einzellast); hst=920mm, b=400mm, $\alpha=2.0$

Anhang A 6: Vergleich von Schubspannungen und Spannungen normal zum Schnitt

9.2) Anhang B, Parameterstudie

Anhang B 1: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h ; Modell „Abrupt Dick einfach symmetrisch“

dN [kN]	h _{St} [mm]	dt=40mm / b variiert [mm]		
		300	400	500
h variiert	520	-547,1	-384,4	-275,1
	620	-587,9	-439,8	-338,3
	720	-600,6	-465,8	-371,6
	750	-601,2		
	820	-598,9	-476,2	-388,8
	890		-477,9	
	920	-589,3	-477,6	-396,5
	1020	-575,5	-473,8	-398,5
	1120	-559,3	-466,8	-396,8
	3320	-277,5	-267,3	-253,2

Anhang B 2: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h ; Modell „E-Modul einfach symmetrisch“

dN [kN]	h _{St} [mm]	dt=40mm / b variiert [mm]		
		300	400	500
h variiert	220	-757,5	-583,3	-473,2
	320	-776,4	-608,4	-499,7
	360		-601,0	
	400			-504,1
	420	-765,2	-608,0	-504,0
	520	-743,1	-597,8	-499,6
	620	-716,8	-583,3	-491,2
	720	-689,4	-566,9	-480,9
	920	-635,3	-532,9	-457,9
	1020			
	1120	-585,2	-499,6	-434,4
	3320	-276,4	-267,2	-253,9

Anhang B 3: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „Abrupt Dick doppelt symmetrisch“

dN [kN]	h _{st} [mm]	dt=40mm / b variiert [mm]		
		300	400	500
h variiert	1020	-253,0	-178,1	-126,5
	1120	-264,5	-194,1	-145,1
	1400	-274,7		
	1520	-273,5	-218,9	-178,6
	1670		-220,0	
	1720	-268,0	-219,8	-183,4
	1910			-184,5
	1920	-259,9	-217,5	-184,5
	2720	-221,3	-195,9	-173,7
	3320	-194,3	-177,4	-160,9

Anhang B 4: Verhalten der Gurtkraftdifferenz dN bei Variation von d/h; Modell „E-Modul doppelt symmetrisch“

dN [kN]	h _{st} [mm]	dt=40mm / b variiert [mm]		
		300	400	500
h variiert	320	-356,2	-273,9	-222,5
	420	-372,8	-289,3	-236,3
	520	-378,4	-296,2	-243,2
	560	-378,7		
	620	-377,9	-298,3	-246,3
	640		-298,4	
	720	-374,0	-297,7	-247,1
	820	-368,1	-295,3	-246,3
	920	-360,9	-291,8	-244,6
	1020	-353,1	-287,6	-242,3
	1120	-344,8	-283,0	-239,5
	3320	-198,2	-182,8	-167,5

Anhang B 5: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, M= 4077,2 kNm, V= variiert

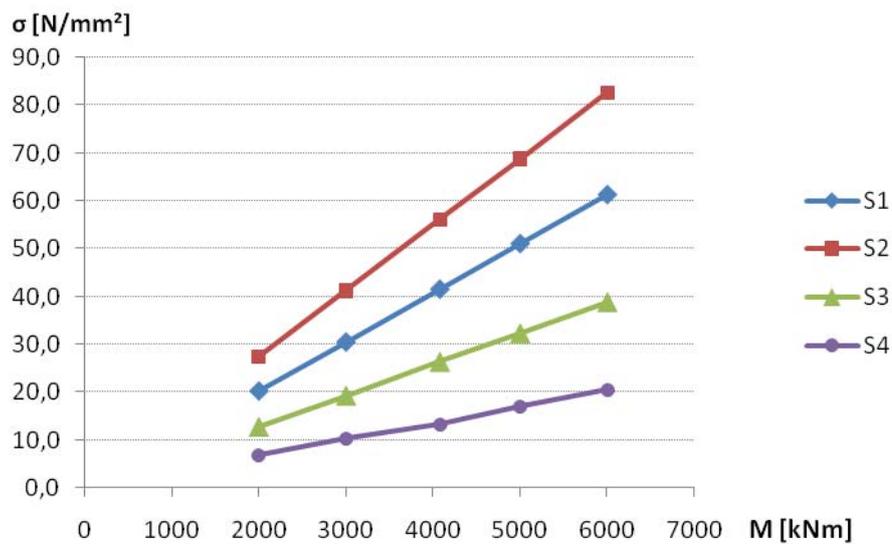
dN [kN]	hst [mm]	Geometrie=fix / M= 4077,2 kNm / V=variiert [kN]				
				0	543,63	815,44
h variiert	720			-465,8		
	920			-477,6	-477,6	-477,6
	1120			-466,8		
	3320			-267,3		
S1 [N/mm²]						
	920			41,6	43,2	43,9
S2 [N/mm²]						
	920			56,1	54,7	53,8
S3 [N/mm²]						
	920			26,4	26,2	26,4

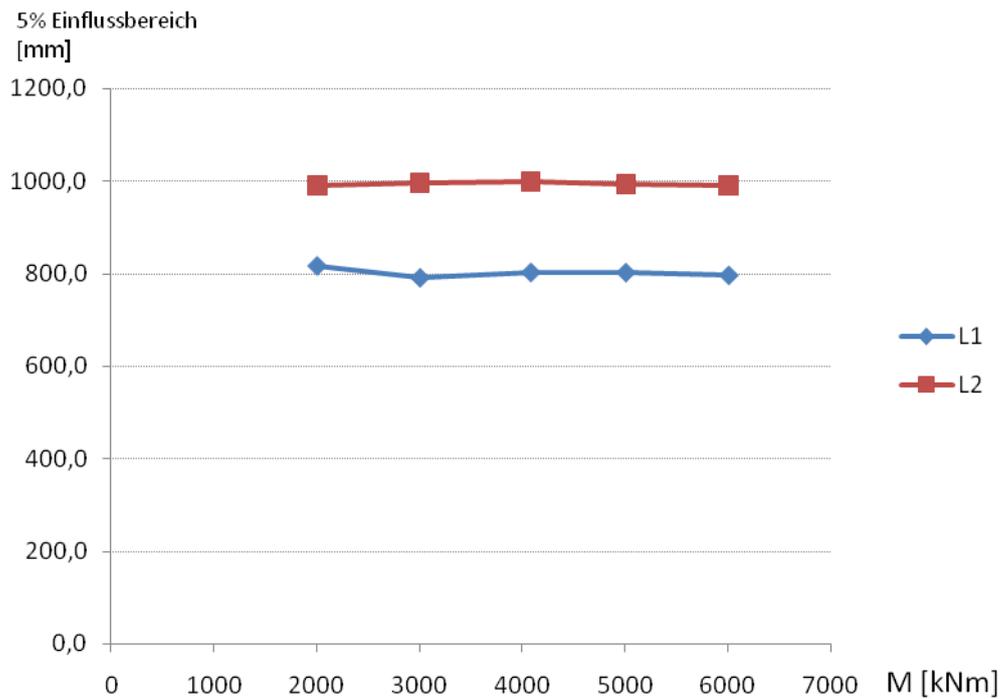
Anhang B 6: „E-Modul, einfach symmetrisch“, M= 4077,2 kNm, V= variiert

dN [kN]	hst [mm]	Geometrie=fix / M= 4077,2 kNm / V=variiert [kN]				
				0	543,63	815,44
h variiert	720			-567,0		
	920			-532,9	-532,9	-532,9
	1120			-499,6		
	3320			-267,2		
S1 Em [N/mm²]						
	920			-79,3	-81,3	-82,6
S2 Em [N/mm²]						
	920			8,76	8,9	7,3

Anhang B 7: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, M= variiert

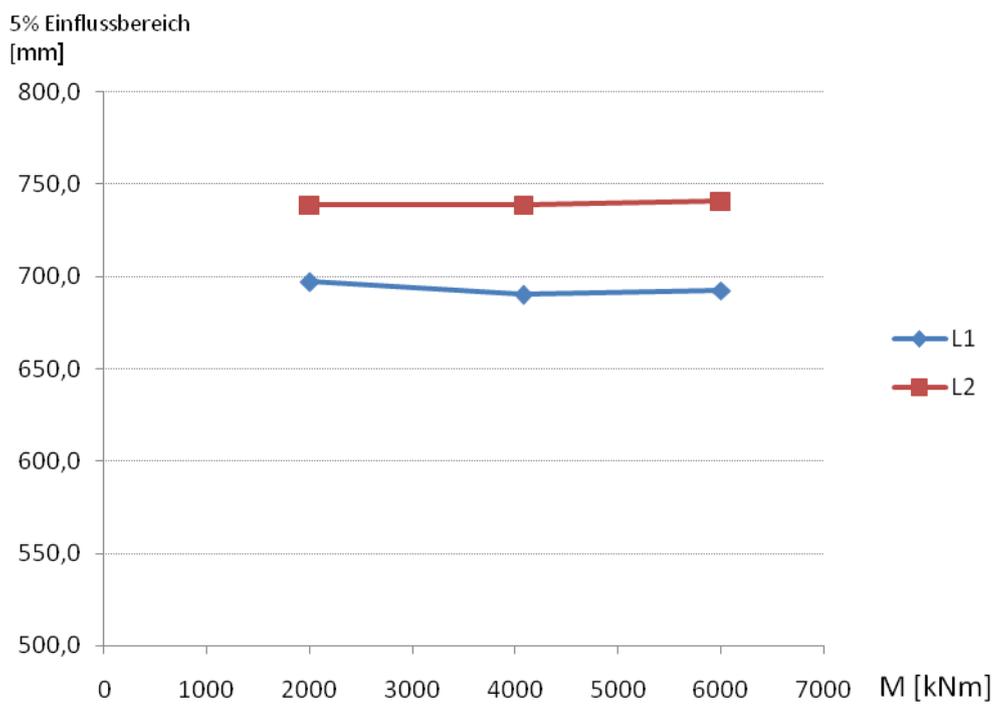
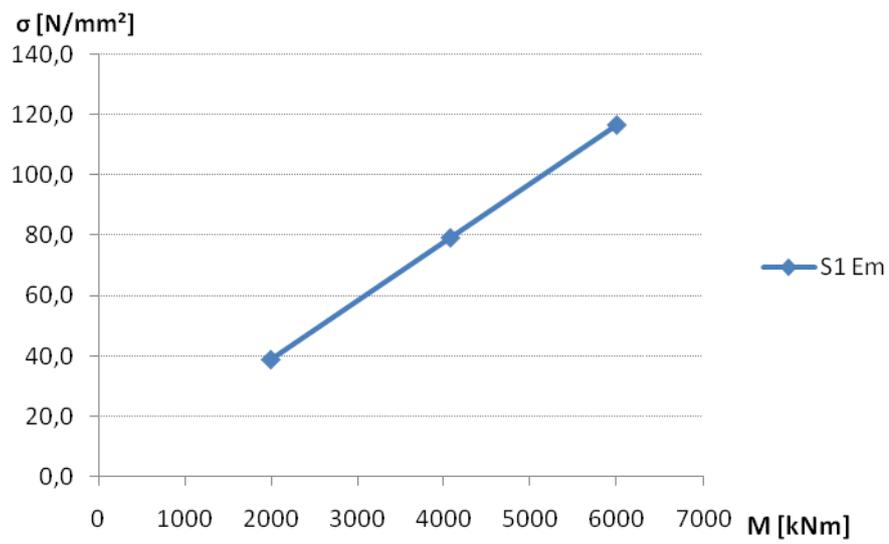
dN [kN]	h [mm]	Geometrie=fix / M=variiert [kNm] / V=0,0kN				
		2000	3000	4077,2	5000	6000
h variiert	720			-465,8		
	920	-234,3	-351,4	-477,6	-585,7	-702,9
	1120			-466,8		
	3320			-267,3		
S1 [N/mm²]						
	920	20,4	30,6	41,6	51,1	61,3
S2 [N/mm²]						
	920	27,5	41,3	56,1	68,8	82,6
S3 [N/mm²]						
	920	12,9	19,4	26,4	32,3	38,8
L1 [mm]						
	920	817,3	791,9	803,3	803,0	797,2
L2 [mm]						
	920	991,4	995,9	999,5	994,2	991,4
L3 [mm]						
	920	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0





Anhang B 8: „E-Modul, einfach symmetrisch“, M= variiert

dN [kN]	h [mm]	Geometrie=fix / M=variiert [kNm] / V=0,0kN				
		2000	3000	4077,2	5000	6000
h variiert	720			-567,0		
	920	-261,4		-532,9		-784,1
	1120			-499,6		
	3320			-267,2		
S1 [N/mm²]						
	920	38,9		79,3		116,7
L1 [mm]						
	920	697,0		690,1		692,5
L2 [mm]						
	920	738,8		738,8		740,9



Anhang B 9: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“, b= variiert

dN [kN]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200	0,0	-471,6	-748,5	-920,8	-1030,2
	300	0,0	-382,4	-589,3	-708,2	-776,5
	400	0,0	-316,7	-477,6	-563,7	-607,6
	500	0,0	-267,6	-396,5	-460,5	-488,5
	600	0,0	-229,9	-335,3	-383,4	-400,1
S1 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	42,6	68,1	88,0	102,3
	300	0,0	31,3	50,2	65,6	76,4
	400	0,0	25,1	40,6	53,7	63,3
	500	0,0	19,9	33,1	43,6	51,8
	600	0,0	16,7	28,0	37,4	44,7
S2 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	45,9	73,4	83,2	82,2
	300	0,0	30,1	46,8	55,6	57,7
	400	0,0	36,0	39,1	65,8	68,2
	500	0,0	17,0	35,0	39,5	41,5
	600	0,0	16,5	27,5	33,0	35,5
S3 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	36,4	50,8	56,7	57,5
	300	0,0	25,5	34,7	38,3	37,8
	400	0,0	19,7	25,6	28,0	27,0
	500	0,0	15,0	19,5	20,6	19,6
	600	0,0	12,2	15,6	15,9	14,7

dM [kNm]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200			97,03		
	300			96,96		
	400	0,00	47,34	96,11	146,84	200,98
	500			95,22		
	600			94,43		
S4 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	9,4	16,0	21,2	25,5
	300	0,0	8,8	14,9	19,6	23,5
	400	0,0	8,2	13,9	18,4	22,1
	500	0,0	7,5	12,8	16,8	20,3
	600	0,0	7,0	11,9	15,8	19,1
L1 [mm]						
b variiert	200			715,3		
	300			776,0		
	400	0,0	867,8	798,7	757,2	737,5
	500			831,1		
	600			845,8		
L2 [mm]						
b variiert	200			889,3		
	300			951,4		
	400	0,0	973,5	992,3	1037,6	1064,9
	500			1038,8		
	600			1079,9		
L3 [mm]						
b variiert	200			37,1		
	300			48,5		
	400	0,0	33,4	55,1	78,3	104,4
	500			68,4		
	600			78,7		

Anhang B 10: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“, b= variiert

dN [kN]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200	0,0	-252,3	-361,8	-404,0	-409,8
	300	0,0	-175,2	-234,1	-241,3	-222,0
	400	0,0	-125,5	-154,3	-141,7	-108,4
	500	0,0	-91,3	-100,2	-74,8	-32,7
	600	0,0	-66,3	-61,2	-26,9	21,4
dM [kNm]						
b variiert	200			80,1		
	300			81,1		
	400	0,0	41,1	81,4	120,5	158,5
	500			81,5		
	600			81,5		
S1 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	32,3	50,7	62,9	71,7
	300	0,0	22,2	35,2	44,2	50,5
	400	0,0	16,9	26,5	34,9	40,6
	500	0,0	12,5	20,8	26,6	31,5
	600	0,0	9,8	16,8	22,0	25,9
S2 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	53,9	85,9	98,9	100,4
	300	0,0	38,1	59,4	71,3	75,6
	400	0,0	43,3	51,0	80,4	85,0
	500	0,0	27,3	44,2	53,2	57,2
	600	0,0	23,0	38,1	46,7	51,2
S3 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	26,0	32,7	32,0	28,4
	300	0,0	16,3	19,4	17,6	14,0
	400	0,0	11,4	12,0	10,2	7,0
	500	0,0	7,6	7,4	5,4	2,8
	600	0,0	5,5	4,6	2,6	0,8

L1 [mm]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200			455,2		
	300			471,1		
	400	0,0	526,2	475,3	453,1	434,4
	500			478,1		
	600			466,0		
L2 [mm]						
b variiert	200			609,4		
	300			647,9		
	400	0,0	635,4	689,5	733,3	743,2
	500			720,7		
	600			726,6		
L3 [mm]						
b variiert	200			53,4		
	300			77,0		
	400	0,0	53,6	100,1	149,6	212,8
	500			131,9		
	600			159,2		
S4 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	31,8	50,0	61,8	70,6
	300	0,0	22,3	35,4	44,4	50,8
	400	0,0	15,0	26,7	30,4	35,1
	500	0,0	12,5	20,9	26,8	31,7
	600	0,0	9,5	16,7	21,9	25,6
S5 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	48,6	76,9	88,1	89,1
	300	0,0	39,7	60,6	72,8	77,2
	400	0,0	24,2	52,2	49,9	55,2
	500	0,0	27,8	45,2	54,4	58,6
	600	0,0	22,7	37,5	45,9	50,2
S6 [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	25,6	32,4	31,6	28,0
	300	0,0	16,4	19,4	17,6	14,1
	400	0,0	10,4	12,1	9,3	6,2
	500	0,0	7,7	7,4	5,4	2,9
	600	0,0	5,4	4,6	2,6	0,8

L4 [mm]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200			455,7		
	300			471,7		
	400	0,0	540,6	471,8	468,1	449,8
	500			481,1		
	600			467,3		
L5 [mm]						
b variiert	200			609,9		
	300			649,1		
	400	0,0	645,7	684,2	756,5	772,7
	500			722,2		
	600			727,0		
L6 [mm]						
b variiert	200			55,4		
	300			76,3		
	400	0,0	73,1	98,9	172,2	239,9
	500			131,1		
	600			161,1		

Anhang B 11: „E-Modul, einfach symmetrisch“, b= variiert

dN Em [kN]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200	0,0	-479,7	-778,9	-983,4	-1132,0
	300	0,0	-399,0	-635,3	-791,5	-902,4
	400	0,0	-338,6	-532,9	-658,8	-747,0
	500	0,0	-293,3	-457,9	-563,2	-636,3
	600	0,0	-258,3	-401,0	-491,4	-553,8
dM Em [kNm]						
b variiert	200			16,05		
	300			13,20		
	400	0,00	6,72	11,17	13,92	15,92
	500			9,68		
	600			8,55		
S1 Em [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	68,7	112,9	144,5	168,7
	300	0,0	48,3	75,6	102,9	119,1
	400	0,0	40,2	64,4	81,2	93,7
	500	0,0	30,8	49,2	61,6	71,1
	600	0,0	26,4	39,8	52,5	60,2
L1 Em [mm]						
b variiert	200			455,7		
	300			471,7		
	400			471,8		
	500			481,1		
	600			467,3		
L2 Em [mm]						
b variiert	200			609,9		
	300			649,1		
	400			684,2		
	500			722,2		
	600			727,0		

Anhang B 12: „E-Modul, doppelt symmetrisch“, b= variiert

dN Em [kN]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200	0,0	-298,3	-469,7	-581,1	-659,2
	300	0,0	-232,5	-360,9	-442,4	-498,7
	400	0,0	-189,5	-291,8	-356,0	-399,9
	500	0,0	-159,6	-244,6	-297,5	-333,5
	600	0,0	-137,8	-210,4	-255,4	-285,9
dM Em [kNm]						
b variiert	200			9,5		
	300			7,3		
	400	0,0	3,8	5,9	7,2	8,1
	500			5,0		
	600			4,3		
S1 Em [N/mm²]						
b variiert	200	0,0	64,5	104,7	133,0	154,6
	300	0,0	44,6	71,4	90,0	103,9
	400	0,0	33,8	53,7	67,3	77,3
	500	0,0	25,0	40,3	50,0	57,0
	600	0,0	22,2	35,0	43,7	50,0
L1 Em [mm]						
b variiert	200			414,9		
	300			448,0		
	400			468,3		
	500			493,2		
	600			501,5		
L2 Em [mm]						
b variiert	200			436,7		
	300			464,2		
	400			482,3		
	500			498,7		
	600			505,2		

S2 Em [N/mm ²]	b [mm]	hst=920mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
b variiert	200	0,0	58,2	93,9	118,9	137,8
	300	0,0	46,8	75,2	95,0	109,7
	400	0,0	35,6	56,6	71,0	81,6
	500	0,0	26,0	41,2	51,0	59,0
	600	0,0	21,7	34,2	42,6	48,7
L3 Em [mm]						
b variiert	200			434,0		
	300			438,9		
	400			457,3		
	500			493,1		
	600			496,9		
L4 Em [mm]						
b variiert	200			452,5		
	300			454,7		
	400			469,5		
	500			503,4		
	600			504,7		

Anhang B 13: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert

dN [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-293,0	-384,4	-383,2	-330,7
	720	0,0	-321,1	-465,8	-527,9	-543,9
	920	0,0	-316,7	-477,6	-563,7	-607,6
	1120	0,0	-302,7	-466,8	-562,6	-619,5
	1920	0,0	-237,5	-383,3	-479,9	-547,0
	2720	0,0	-187,3	-310,1	-396,0	-458,7
	3320	0,0	-159,2	-267,3	-345,0	-403,2
S1 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	34,7	57,4	73,7	86,9
	720	0,0	29,7	49,0	63,2	74,4
	920	0,0	25,1	41,6	53,7	63,3
	1120	0,0	21,5	36,0	46,3	54,0
	1920	0,0	12,5	21,1	27,4	32,4
	2720	0,0	8,4	14,1	18,7	22,3
	3320	0,0		9,6		
S2 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	66,1	110,2	135,7	149,7
	720	0,0	50,7	81,7	96,8	102,4
	920	0,0	36,0	56,1	65,8	68,2
	1120	0,0	25,0	39,8	45,8	46,3
	1920	0,0	9,5	13,6	13,8	11,9
	2720	0,0	5,0	7,0	6,5	4,8
	3320	0,0		1,9		
S3 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	24,1	28,2	25,4	19,9
	720	0,0	22,5	28,8	29,2	26,7
	920	0,0	19,7	26,4	28,0	27,0
	1120	0,0	17,0	23,5	25,5	25,3
	1920	0,0	10,3	15,0	17,2	17,9
	2720	0,0	7,1	10,6	12,3	13,1
	3320	0,0		7,4		

dM [kNm]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	80,6	162,8	249,5	345,1
	720	0,0	59,7	120,9	184,9	254,0
	920	0,0	47,3	96,1	146,8	201,0
	1120	0,0	39,1	79,6	121,7	166,2
	1920	0,0	22,5	46,4	71,3	97,3
	2720	0,0	15,3	31,9	49,4	67,7
	3320	0,0	12,1	25,5	39,6	54,5
L1 [mm]						
h variiert	520			507,8		
	720			659,1		
	920	-	867,8	803,3	757,2	737,5
	1120			923,1		
	1920			1379,7		
	2720			1689,3		
	3320			2056,9		
L2 [mm]						
h variiert	520			711,5		
	720			857,4		
	920	-	973,5	999,5	1037,6	1064,9
	1120			1131,8		
	1920			1663,9		
	2720			2085,2		
	3320			2457,0		
L3 [mm]						
h variiert	520			88,6		
	720			61,7		
	920	-	33,4	50,4	78,3	104,4
	1120			44,0		
	1920			44,5		
	2720			38,1		
	3320			46,2		

Anhang B 14: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert

dN [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-321,6	-559,4	-760,1	-941,9
	720	0,0	-232,5	-394,6	-524,4	-636,8
	920	0,0	-183,9	-308,6	-404,4	-484,9
	1120	0,0	-152,1	-253,5	-330,2	-393,0
	1920	0,0	-86,1	-143,8	-186,4	-219,9
	2720	0,0	-55,7	-94,2	-122,8	-145,3
	3320	0,0	-42,1	-71,9	-94,2	-111,9
dM [kNm]						
h variiert	520	0,0	-7,0	-12,1	-16,4	-20,2
	720	0,0	-4,9	-8,4	-11,1	-13,4
	920	0,0	-3,8	-6,4	-8,4	-10,1
	1120	0,0	-3,2	-5,2	-6,8	-8,1
	1920	0,0	-1,8	-2,9	-3,8	-4,5
	2720	0,0	-1,1	-1,9	-2,5	-2,9
	3320	0,0	-0,8	-1,4	-1,9	-2,3
S4 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	24,9	43,3	57,9	70,1
	720	0,0	13,0	22,3	29,6	35,8
	920	0,0	8,2	13,9	18,4	22,1
	1120	0,0	5,5	9,2	12,1	14,5
	1920	0,0	1,9	3,1	4,0	4,8
	2720	0,0	0,9	1,5	1,9	2,3
	3320	0,0		1,0		
L4 [mm]						
	520					
	720					
	920	-	1222,1	1118,4	1069,0	1017,6
	1120					
L5 [mm]						
	520					
	720					
	920	-	1285,3	1308,2	1297,2	1307,2
	1120					

Anhang B 15: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert

dN [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	26,8	155,7	320,0	496,5
	720	0,0	-83,7	-65,2	-5,6	73,0
	920	0,0	-125,5	-154,3	-141,7	-108,4
	1120	0,0	-142,3	-194,1	-205,9	-196,9
	1920	0,0	-142,9	-217,5	-259,2	-282,6
	2720	0,0	-124,2	-195,9	-240,8	-270,2
	3320	0,0	-110,5	-177,4	-221,1	-251,1
S1 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	13,1	20,7	26,9	31,5
	720	0,0	17,2	27,7	35,4	41,2
	920	0,0	16,9	27,4	34,9	40,6
	1120	0,0	15,4	25,4	32,4	37,5
	1920	0,0	10,3	17,0	21,8	25,5
	2720	0,0	7,3	12,1	15,7	18,4
	3320	0,0		8,7		
S2 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	88,4	145,4	178,4	196,0
	720	0,0	62,3	100,3	120,1	128,6
	920	0,0	43,3	67,7	80,4	85,0
	1120	0,0	28,9	45,8	53,3	55,1
	1920	0,0	11,1	16,2	17,3	16,0
	2720	0,0	5,8	7,6	8,2	6,9
	3320	0,0		3,2		
S3 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	3,8	0,5	-	-
	720	0,0	10,0	8,7	4,8	1,1
	920	0,0	11,4	12,4	10,2	7,0
	1120	0,0	11,2	13,5	12,5	10,3
	1920	0,0	8,1	11,1	11,9	11,6
	2720	0,0	6,0	8,5	9,5	9,6
	3320	0,0		6,5		

dM [kNm]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	69,4	135,1	197,3	256,0
	720	0,0	51,8	101,8	150,0	196,2
	920	0,0	41,1	81,4	120,5	158,5
	1120	0,0	34,0	67,6	100,4	132,6
	1920	0,0	19,6	39,5	59,3	79,0
	2720	0,0	13,4	27,2	41,2	55,3
	3320	0,0	10,6	21,8	33,2	44,7
L1 [mm]						
h variiert	520			302,3		
	720			396,7		
	920	-	526,2	478,3	453,1	434,4
	1120			566,1		
	1920			894,1		
	2720			1170,2		
	3320			1157,1		
L2 [mm]						
h variiert	520					
	720			616,0		
	920	-	635,4	689,4	733,3	743,2
	1120			755,2		
	1920			1056,7		
	2720			1412,1		
	3320			1485,1		
L3 [mm]						
h variiert	520			371,8		
	720			139,0		
	920	-	53,6	96,9	149,6	212,8
	1120			77,2		
	1920			61,5		
	2720			52,4		
	3320			55,9		

Anhang B 16: „Abrupt Dick, doppelt symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert

dN [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
	2720					
	3320					
S4 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	12,7	20,0	26,0	30,6
	720	0,0	16,7	26,9	34,3	39,8
	920	0,0	15,0	24,1	30,4	35,1
	1120	0,0	14,9	24,6	31,4	36,3
	1920	0,0	10,4	17,1	22,0	25,7
	2720	0,0	7,4	12,2	15,8	18,6
	3320	0,0		9,0		
S5 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	83,7	136,8	167,2	183,0
	720	0,0	57,2	91,3	108,6	115,8
	920	0,0	24,2	40,3	49,9	55,2
	1120	0,0	21,4	34,4	41,1	44,0
	1920	0,0	12,1	9,9	19,1	17,9
	2720	0,0	6,5	8,9	9,6	8,4
	3320	0,0		3,7		
S6 [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	3,7	0,5	-	-
	720	0,0	9,7	8,2	4,3	0,8
	920	0,0	10,4	11,4	9,3	6,2
	1120	0,0	10,9	13,1	12,3	10,1
	1920	0,0	8,2	11,1	11,9	11,7
	2720	0,0	6,0	8,5	9,5	9,7
	3320	0,0		6,6		

dM [kNm]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
	2720					
	3320					
L4 [mm]						
h variiert	520			305,4		
	720			393,0		
	920	-	540,6	499,6	468,1	449,8
	1120			567,1		
	1920			861,4		
	2720			1171,7		
	3320			1187,5		
L5 [mm]						
h variiert	520					
	720			607,3		
	920	-	645,7	711,1	756,5	772,7
	1120			760,0		
	1920			1056,1		
	2720			1402,3		
	3320			1522,2		
L6 [mm]						
h variiert	520			373,8		
	720			143,5		
	920	-	73,1	118,6	172,2	239,9
	1120			84,1		
	1920			65,5		
	2720			51,7		
	3320			51,2		

Anhang B 17: „E-Modul, einfach symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert

dN Em [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-387,3	-597,8	-729,8	-820,1
	720	0,0	-363,6	-567,0	-696,9	-786,9
	920	0,0	-338,6	-532,9	-658,8	-747,0
	1120	0,0	-314,9	-499,6	-621,0	-706,8
	1920	0,0	-238,9	-389,2	-492,6	-568,0
	2720	0,0	-187,0	-311,1	-399,4	-465,5
	3320	0,0	-158,6	-267,2	-346,1	-406,2
dM Em [kNm]						
h variiert	520	0,0	8,6	13,5	16,9	19,5
	720	0,0	7,7	12,2	15,2	17,3
	920	0,0	6,7	11,2	13,9	15,9
	1120	0,0	6,5	10,3	12,9	14,8
	1920	0,0	4,8	7,9	10,0	11,6
	2720	0,0	3,8	6,3	8,1	9,4
	3320	0,0	3,2	5,4	7,0	8,2
S1 Em [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	68,5	108,7	136,2	156,5
	720	0,0	59,8	96,8	123,2	143,5
	920	0,0	48,6	79,3	101,3	118,3
	1120	0,0	36,1	58,7	74,7	86,8
	1920	0,0	20,1	32,0	40,5	47,3
	2720	0,0	12,6	21,0	27,0	31,9
	3320	0,0		10,2		

L1 Em [mm]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520			497,2		
	720			588,4		
	920	-	710,1	690,1	675,7	660,1
	1120			836,2		
	1920			1201,1		
	2720			1379,7		
	3320			1480,6		
L2 Em [mm]						
h variiert	520			513,4		
	720			618,8		
	920	-	742,6	738,8	735,6	728,3
	1120			902,8		
	1920			1356,0		
	2720			1629,7		
	3320			1843,6		

Anhang B 18: „E-Modul, einfach symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert

dN Em [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-187,9	-290,9	-356,1	-401,2
	720	0,0	-162,8	-254,1	-312,6	-353,4
	920	0,0	-141,8	-223,3	-276,2	-313,4
	1120	0,0	-124,4	-197,4	-245,5	-279,5
	1920	0,0	-77,8	-126,8	-160,5	-185,1
	2720	0,0	-52,2	-86,8	-111,4	-129,9
	3320	0,0	-40,0	-67,4	-87,3	-102,4
dM Em [kNm]						
h variiert	520	0,0	-4,3	-6,6	-8,1	-9,1
	720	0,0	-3,5	-5,5	-6,8	-7,6
	920	0,0	-3,0	-4,7	-5,8	-6,6
	1120	0,0	-2,6	-4,1	-5,1	-5,8
	1920	0,0	-1,6	-2,6	-3,3	-3,8
	2720	0,0	-1,1	-1,8	-2,3	-2,6
	3320	0,0	-0,8	-1,4	-1,8	-2,1
S2 Em [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	12,0	18,7	22,9	25,9
	720	0,0	7,8	12,2	15,1	17,0
	920	0,0	5,6	8,8	10,8	12,3
	1120	0,0	4,0	6,4	7,9	9,0
	1920	0,0	1,6	2,6	3,3	3,8
	2720	0,0	0,8	1,3	1,7	1,9
	3320	0,0		0,9		

Anhang B 19: „E-Modul, doppelt symmetrisch“ Obergurt, h= variiert, dt= variiert

dN Em [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-194,6	-296,2	-358,6	-400,9
	720	0,0	-194,4	-297,7	-361,8	-405,4
	920	0,0	-189,5	-291,8	-356,0	-399,9
	1120	0,0	-182,7	-283,0	-346,4	-390,1
	1920	0,0	-153,1	-242,0	-300,1	-341,0
	2720	0,0	-127,9	-205,6	-257,8	-295,4
	3320	0,0	-112,4	-182,8	-231,0	-266,2
dM Em [kNm]						
h variiert	520	0,0	4,0	6,1	7,3	8,2
	720	0,0	4,0	6,1	7,4	8,3
	920	0,0	3,8	5,9	7,2	8,1
	1120	0,0	3,7	5,7	7,0	7,9
	1920	0,0	3,1	4,9	6,0	6,9
	2720	0,0	2,6	4,1	5,2	5,9
	3320	0,0	2,3	3,7	4,6	5,3
S1 Em [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	55,7	88,0	110,0	126,3
	720	0,0	51,0	82,0	103,8	120,4
	920	0,0	42,1	67,9	86,2	100,2
	1120	0,0	33,3	53,7	68,0	79,0
	1920	0,0	17,3	28,0	35,6	41,3
	2720	0,0		17,9		
	3320	0,0		10,1		

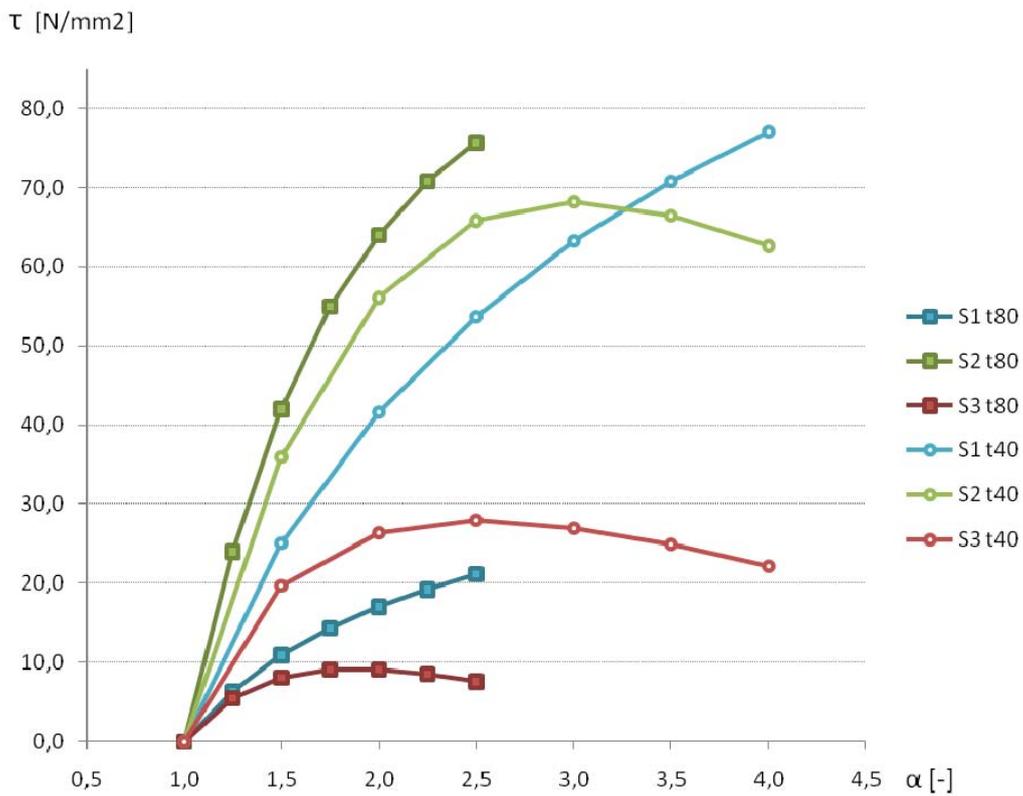
L1 Em [mm]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520			286,6		
	720			347,4		
	920	-	438,9	423,9	416,5	403,7
	1120			512,6		
	1920			798,5		
	2720			1079,3		
	3320			1182,1		
L2 Em [mm]						
h variiert	520			286,3		
	720			352,5		
	920	-	443,4	435,5	427,8	419,8
	1120			530,5		
	1920			866,5		
	2720			1153,3		
	3320			1380,9		

Anhang B 20: „E-Modul, doppelt symmetrisch“ Untergurt, h= variiert, dt= variiert

dN Em [kN]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
dM Em [kNm]						
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
S2 Em [N/mm²]						
h variiert	520	0,0	50,8	80,2	99,9	114,5
	720	0,0	49,5	74,5	100,4	116,4
	920	0,0	38,1	61,0	77,1	89,1
	1120	0,0	34,6	55,9	71,0	82,0
	1920	0,0	18,1	29,4	37,4	43,5
	2720	0,0		19,1		
	3320	0,0		11,1		
L3 Em [mm]						
h variiert	520			299,9		
	720			347,6		
	920	-	445,1	441	434,5	427,1
	1120			511,4		
	1920			805,2		
	2720			1054,7		
	3320			1181,8		
L4 Em [mm]						
h variiert	520			298,3		
	720			352,2		
	920	-	461,7	459,9	449	442,4
	1120			522,3		
	1920			849,5		
	2720			1173,7		
	3320			1385,0		

Anhang B 21: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Obergurt, $t_{OG,1} = 80,0\text{mm}$, $dt = \text{variiert}$

dN OG [kN]		b=400mm / h=920mm / dt=variiert [mm]						
		0	20	40	60	80	100	120
α 40 [-]		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	α 80 [-]	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5
toG,1 variiert	80	0,0	-86,9	-134,1	-156,7	-162,9	-157,6	-143,7
	40	0,0	-316,7	-477,6	-563,7	-607,6	-625,2	-625,0
dM OG [kNm]								
toG,1 variiert	80	0,00	44,9	90,2	136,4	184,5	235,6	291,2
	40	0,0	47,3	96,1	146,8	201,0	260,6	328,0
e' OG [mm]								
toG,1 variiert	80	416,0	516,5	672,6	870,6	1132,4	1495,1	2025,9
	40	103,0	149,5	201,2	260,5	330,8	416,8	524,8
S1 [N/mm²]								
toG,1 variiert	80	0,0	6,3	10,9	14,3	17,0	19,2	21,2
	40	0,0	25,1	41,6	53,7	63,3	70,8	77,1
S2 [N/mm²]								
toG,1 variiert	80	0,0	24,0	42,0	55,0	64,0	70,8	75,7
	40	0,0	36,0	56,1	65,8	68,2	66,5	62,6
S3 [N/mm²]								
toG,1 variiert	80	0,0	5,5	8,1	9,1	9,1	8,5	7,6
	40	0,0	19,7	26,4	28,0	27,0	24,9	22,2



Anhang B 22: „Abrupt Dick, einfach symmetrisch“ Untergurt, $t_{OG,1} = 80,0\text{mm}$, $dt = \text{variiert}$

dN UG [kN]	b=400mm / h=920mm / dt=variiert [mm]							
		0	20	40	60	80	100	120
	α 40 [-]	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	α 80 [-]	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5
toG,1 variiert	80	0	-99,9	-183,1	-255,8	-321,9	-383,4	-441,6
	40	0,0	-183,9	-308,6	-404,4	-484,9	-556,2	-621,4
dM UG [kNm]								
toG,1 variiert	80	0,00	-4,4	-8,1	-11,3	-14,1	-16,7	-19,2
	40	0,0	-3,8	-6,4	-8,4	-10,1	-11,6	-12,9
e' UG [mm]								
toG,1 variiert	80		44,5	44,3	44,1	43,9	43,7	43,5
	40		20,9	20,9	20,9	20,8	20,8	20,8
S4 [N/mm²]								
toG,1 variiert	80	0	4,6	8,4	11,8	14,7	17,4	19,8
	40	0,0	8,2	13,9	18,4	22,1	25,3	28,2

9.3) Anhang C, Ingenieurmodell

Abrupt Dick, einfach symmetrisch, b=variiert, h=variiert, dt=variiert

Anhang C 1: Obergurt, S_{m1} (A)

S _{m1} (A) [N/mm ²]	h _{St} [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	56,4	73,9	73,7	63,6
	720	0,0	44,6	64,7	73,3	75,5
	920	0,0	34,4	51,9	61,3	66,0
	1120	0,0	27,0	41,7	50,2	55,3
	1920	0,0	12,4	20,0	25,0	28,5
	2720	0,0	6,9	11,4	14,6	16,9
	3320	0,0	4,8	8,1	10,4	12,1
Abweichung Relativ [%] (S _{m1} (A)-S ₁)/S ₁ *100						
h variiert	520	0,0	62,4	28,8	0,0	-26,8
	720	0,0	50,1	32,0	16,0	1,5
	920	0,0	37,1	24,8	14,1	4,3
	1120	0,0	25,7	15,8	8,5	2,4
	1920	0,0	-1,0	-5,4	-8,8	-12,1
	2720	0,0	-18,3	-19,1	-22,1	-24,4
	3320	0,0		-16,1		
Abweichung Absolut [N/mm ²] S _{m1} (A)-S ₁						
h variiert	520	0,0	21,7	16,5	-0,0	-23,3
	720	0,0	14,9	15,7	10,1	1,1
	920	0,0	9,3	10,3	7,6	2,7
	1120	0,0	5,5	5,7	3,9	1,3
	1920	0,0	-0,1	-1,1	-2,4	-3,9
	2720	0,0	-1,5	-2,7	-4,1	-5,4
	3320	0,0		-1,5		

S _{m1} (A) [N/mm ²]	h _{St} [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	81,4	64,1	51,9	43,1	36,4
Abweichung Relativ [%] (S _{m1} (A)-S ₁)/S ₁ *100						
h	920	19,5	27,6	27,9	30,2	30,2
Abweichung Absolut [N/mm ²] S _{m1} (A)-S ₁						
h	920	13,3	13,9	11,3	10,0	8,4

Anhang C 2: Obergurt, Sml (B)

Sml (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	41,4	60,6	68,2	67,7
	720	0,0	32,8	53,0	67,9	80,4
	920	0,0	25,3	42,6	56,7	70,3
	1120	0,0	19,9	34,2	46,5	58,8
	1920	0,0	9,1	16,4	23,1	30,3
	2720	0,0	5,1	9,3	13,5	17,9
	3320	0,0	3,5	6,6	9,6	12,9
Abweichung Relativ [%] (Sml (B)-S1)/S1*100						
h variiert	520	0,0	19,4	5,6	-7,4	-22,1
	720	0,0	10,4	8,2	7,4	8,0
	920	0,0	0,8	2,3	5,6	11,0
	1120	0,0	-7,6	-5,1	0,5	9,0
	1920	0,0	-27,2	-22,4	-15,5	-6,5
	2720	0,0		-33,7		
	3320	0,0		-31,3		
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sml (B)-S1						
h variiert	520	0,0	6,7	3,2	-5,5	-19,2
	720	0,0	3,1	4,0	4,7	6,0
	920	0,0	0,2	1,0	3,0	7,0
	1120	0,0	-1,6	-1,8	0,2	4,8
	1920	0,0	-3,4	-4,7	-4,3	-2,1
	2720	0,0		-4,8		
	3320	0,0		-3,0		

Sml (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	54,2	42,7	34,6	28,7	24,3
Abweichung Relativ [%] (Sml (B)-S1)/S1*100						
h	920	-20,4	-14,9	-14,8	-13,2	-13,2
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sml (B)-S1						
h	920	-13,9	-7,5	-6,0	-4,4	-3,7

Anhang C 3: Untergurt, S_{m1} (D)

S _{m1} (D) [N/mm ²]	h _{St} [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	25,8	44,8	60,9	75,5
	720	0,0	13,5	22,8	30,3	36,9
	920	0,0	8,3	14,0	18,3	22,0
	1120	0,0	5,7	9,4	12,3	14,6
	1920	0,0	1,9	3,1	4,0	4,8
	2720	0,0	0,9	1,4	1,9	2,2
	3320	0,0	0,5	0,9	1,2	1,4
Abweichung Relativ [%]		(S _{m1} (D)-S ₁)/S ₁ *100				
h variiert	520	0,0	3,5	3,5	5,2	7,7
	720	0,0	3,5	2,4	2,5	2,9
	920	0,0	1,9	0,5	-0,5	-0,6
	1120	0,0	3,8	2,4	1,5	0,8
	1920	0,0	1,0	0,7	0,4	-0,4
	2720	0,0	-3,0	-2,5	-2,5	-3,2
	3320	0,0		-10,7		
Abweichung Absolut [N/mm ²]		S _{m1} (D)-S ₁				
h variiert	520	0,0	0,9	1,5	3,0	5,4
	720	0,0	0,5	0,5	0,7	1,1
	920	0,0	0,2	0,1	-0,1	-0,1
	1120	0,0	0,2	0,2	0,2	0,1
	1920	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0
	2720	0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,1
	3320	0,0		-0,1		

S _{m1} (D) [N/mm ²]	h _{St} [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	15,5	14,9	14,0	13,0	12,2
Abweichung Relativ [%]		(S _{m1} (D)-S ₁)/S ₁ *100				
h	920	-2,9	0,3	0,5	1,7	2,5
Abweichung Absolut [N/mm ²]		S _{m1} (D)-S ₁				
h	920	-0,5	0,0	0,1	0,2	0,3

Abrupt Dick, doppelt symmetrisch, b=variiert, h=variiert, dt=variiert

Anhang C 4: Obergurt, Sm2 (A)

Sm2 (A) [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	-10,3	-59,9	-123,1	-191,0
	720	0,0	23,2	18,1	1,6	-20,3
	920	0,0	27,3	33,5	30,8	23,6
	1120	0,0	25,4	34,7	36,8	35,2
	1920	0,0	14,9	22,7	27,0	29,4
	2720	0,0	9,1	14,4	17,7	19,9
	3320	0,0	6,7	10,7	13,3	15,1
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (A)-S1)/S1*100						
h variiert	520	0,0	-178,5	-389,3	-557,6	-706,2
	720	0,0	35,1	-34,6	-95,6	-149,3
	920	0,0	61,5	22,4	-11,8	-42,0
	1120	0,0	65,0	36,5	13,5	-6,2
	1920	0,0	44,5	33,3	23,8	15,4
	2720	0,0	25,1	19,0	12,8	8,0
	3320	0,0		22,8		
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (A)-S1						
h variiert	520	0,0	-23,4	-80,6	-150,0	-222,5
	720	0,0	6,0	-9,6	-33,8	-61,5
	920	0,0	10,4	6,1	-4,1	-17,0
	1120	0,0	10,0	9,3	4,4	-2,3
	1920	0,0	4,6	5,7	5,2	3,9
	2720	0,0	1,8	2,3	2,0	1,5
	3320			2,0		

Sm2 (A) [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	78,7	50,9	33,5	21,8	13,3
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (A)-S1)/S1*100						
h	920	55,1	44,6	26,6	4,7	-20,9
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (A)-S1						
h	920	28,0	15,7	7,0	1,0	-3,5

Anhang C 5: Untergurt, Sm2 (A)

Sm2 (A) [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
	2720					
	3320					
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (A)-S4)/S4*100				
h variiert	520	0,0	-181,0	-399,4	-573,4	-724,1
	720	0,0	39,2	-32,7	-95,5	-151,0
	920	0,0	81,9	39,2	1,3	-32,9
	1120	0,0	70,6	40,9	17,1	-3,1
	1920	0,0	43,1	32,5	22,7	14,5
	2720	0,0	23,9	18,1	12,1	6,8
	3320	0,0		18,2		
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (A)-S4				
h variiert	520	0,0	-23,0	-79,9	-149,1	-221,6
	720	0,0	6,5	-8,8	-32,7	-60,1
	920	0,0	12,3	9,4	0,4	-11,5
	1120	0,0	10,5	10,1	5,4	-1,1
	1920	0,0	4,5	5,6	5,0	3,7
	2720	0,0	1,8	2,2	1,9	1,3
	3320	0,0		1,6		

Sm2 (A) [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	wie Obergurt				
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (A)-S4)/S4*100				
h	920	57,3	43,7	25,6	4,2	-20,4
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (A)-S4				
h	920	28,7	15,5	6,8	0,9	-3,4

Anhang C 6: Obergurt, Sm2 (B)

Sm2 (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	7,4	54,1	148,9	349,3
	720	0,0	16,8	16,4	1,9	37,1
	920	0,0	19,7	30,3	37,3	43,1
	1120	0,0	18,3	31,3	44,5	64,3
	1920	0,0	10,7	20,5	32,7	53,9
	2720	0,0	6,6	13,0	21,4	36,3
	3320	0,0	4,8	9,7	16,1	27,7
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (B)-S1)/S1*100						
h variiert	520	0,0	-156,6	-361,4	-653,5	-1209,0
	720	0,0	-2,6	-40,9	-94,7	-190,1
	920	0,0	16,4	10,6	6,7	6,2
	1120	0,0	19,0	23,3	37,3	71,5
	1920	0,0	4,2	20,4	49,8	111,2
	2720			7,6		
	3320			11,0		
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (B)-S1						
h variiert	520	0,0	-20,5	-74,8	-175,8	-380,8
	720	0,0	-0,4	-11,3	-33,5	-78,3
	920	0,0	2,8	2,9	2,4	2,5
	1120	0,0	2,9	5,9	12,1	26,8
	1920	0,0	0,4	3,5	10,9	28,4
	2720			0,9		
	3320			1,0		

Sm2 (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	47,2	30,5	20,1	13,1	8,0
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (B)-S1)/S1*100						
h	920	-6,9	-13,3	-24,1	-37,2	-52,5
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (B)-S1						
h	920	-3,5	-4,7	-6,4	-7,7	-8,8

Anhang C 7: Untergurt, Sm2 (B)

Sm2 (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
	2720					
	3320					
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (B)-S4)/S4*100				
h variiert	520	0,0	-158,4	-370,5	-672,7	-1241,6
	720	0,0	0,4	-39,1	-94,5	-193,3
	920	0,0	31,2	25,7	22,5	22,8
	1120	0,0	23,0	27,3	41,6	77,2
	1920	0,0	3,2	19,7	48,5	109,5
	2720			6,7		
	3320			6,8		
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (B)-S4				
h variiert	520	0,0	-20,1	-74,1	-174,9	-379,9
	720	0,0	0,1	-10,5	-32,4	-76,9
	920	0,0	4,7	6,2	6,9	8,0
	1120	0,0	3,4	6,7	13,1	28,0
	1920	0,0	0,3	3,4	10,7	28,2
	2720			0,8		
	3320			0,6		

Sm2 (B) [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	wie Obergurt				
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (B)-S4)/S4*100				
h	920					
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (B)-S4				
h	920					

E-Modul, einfach symmetrisch, b=variiert, h=variiert, dt=variiertAnhang C 8: Obergurt, S_{m1} (A)Em

S _{m1} (A)Em [N/mm ²]	h _{St} [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	111,7	172,4	210,5	236,6
	720	0,0	75,7	118,1	145,2	163,9
	920	0,0	55,2	86,9	107,4	121,8
	1120	0,0	42,2	66,9	83,2	94,7
	1920	0,0	18,7	30,4	38,5	44,4
	2720	0,0	10,3	17,2	22,0	25,7
	3320	0,0	7,2	12,1	15,6	18,4
Abweichung Relativ [%] (S _{m1} (A)Em-S ₁ Em)/ S ₁ Em *100						
h variiert	520	0,0	63,1	58,6	54,6	51,2
	720	0,0	26,7	22,0	17,8	14,2
	920	0,0	13,6	9,6	6,0	2,9
	1120	0,0	16,8	14,0	11,3	9,1
	1920	0,0	-7,2	-5,0	-5,0	-6,2
	2720	0,0	-18,1	-18,3	-18,4	-19,5
	3320	0,0		18,3		
Abweichung Absolut [N/mm ²] S _{m1} (A)Em-S ₁ Em						
h variiert	520	0,0	43,2	63,7	74,3	80,1
	720	0,0	15,9	21,3	22,0	20,4
	920	0,0	6,6	7,6	6,1	3,5
	1120	0,0	6,1	8,2	8,5	7,9
	1920	0,0	-1,4	-1,6	-2,0	-2,9
	2720	0,0	-2,3	-3,8	-5,0	-6,2
	3320	0,0		1,9		

S _{m1} (A)Em [N/mm ²]	h _{St} [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	127,0	103,6	86,9	74,7	65,4
Abweichung Relativ [%] (S _{m1} (A)Em-S ₁ Em)/ S ₁ Em *100						
h	920	12,5	37,0	34,9	51,7	64,3
Abweichung Absolut [N/mm ²] S _{m1} (A)Em-S ₁ Em						
h	920	14,1	28,0	22,5	25,5	25,6

Anhang C 9: Untergurt, S_{m1} (D)Em

S_{m1} (D)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	14,5	22,4	27,4	30,9
	720	0,0	9,0	14,1	17,4	19,6
	920	0,0	6,2	9,7	12,0	13,6
	1120	0,0	4,4	7,1	8,8	10,0
	1920	0,0	1,6	2,6	3,3	3,9
	2720	0,0	0,8	1,3	1,6	1,9
	3320	0,0	0,5	0,8	1,1	1,2
Abweichung Relativ [%] $(S_{m1} (D)Em - S_2 Em) / S_2 Em * 100$						
h variiert	520	0,0	20,5	19,7	19,6	19,2
	720	0,0	15,5	15,7	15,0	15,5
	920	0,0	10,7	10,8	11,2	10,8
	1120	0,0	10,0	11,0	10,4	10,7
	1920	0,0	0,7	1,3	1,7	2,0
	2720	0,0	-4,1	-4,0	-3,6	0,5
	3320	0,0		-9,8		
Abweichung Absolut [N/mm ²] $S_{m1} (D)Em - S_2 Em$						
h variiert	520	0,0	2,5	3,7	4,5	5,0
	720	0,0	1,2	1,9	2,3	2,6
	920	0,0	0,6	0,9	1,2	1,3
	1120	0,0	0,4	0,7	0,8	1,0
	1920	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
	2720	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0
	3320	0,0		-0,1		

S_{m1} (D)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	11,7	10,8	9,7	8,7	7,9
Abweichung Relativ [%] $(S_{m1} (D)Em - S_2 Em) / S_2 Em * 100$						
h	920	0,9	7,0	10,8	14,1	16,4
Abweichung Absolut [N/mm ²] $S_{m1} (D)Em - S_2 Em$						
h	920	0,1	0,7	0,9	1,1	1,1

E-Modul, doppelt symmetrisch, b=variiert, h=variiert, dt=variiert

Anhang C 10: Obergurt, Sm2 (A)Em

Sm2 (A)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	0,0	81,3	123,8	149,9	167,6
	720	0,0	58,7	89,9	109,2	122,4
	920	0,0	44,8	69,0	84,1	94,5
	1120	0,0	35,5	54,9	67,2	75,7
	1920	0,0	17,3	27,4	34,0	38,6
	2720	0,0	10,2	16,4	20,6	23,6
	3320	0,0	7,4	12,0	15,1	17,4
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (A)Em-S1 Em)/ S1 Em *100						
h variiert	520	0,0	46,0	40,7	36,3	32,7
	720	0,0	15,1	9,6	5,2	1,7
	920	0,0	6,3	1,6	-2,4	-5,7
	1120	0,0	6,5	2,3	-1,1	-4,2
	1920	0,0	0,2	-2,1	-4,6	-6,5
	2720	0,0		-8,2		
	3320	0,0		18,5		
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (A)Em-S1 Em						
h variiert	520	0,0	25,6	35,8	39,9	41,3
	720	0,0	7,7	7,9	5,4	2,0
	920	0,0	2,7	1,1	-2,1	-5,7
	1120	0,0	2,2	1,2	-0,8	-3,3
	1920	0,0	0,0	-0,6	-1,6	-2,7
	2720	0,0		-1,5		
	3320	0,0		1,9		

Sm2 (A)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	111,0	85,3	69,0	57,8	49,7
Abweichung Relativ [%] (Sm2 (A)Em-S1 Em)/ S1 Em *100						
h	920	6,0	19,4	28,4	43,4	42,1
Abweichung Absolut [N/mm ²] Sm2 (A)Em-S1 Em						
h	920	6,3	13,9	15,3	17,5	14,7

Anhang C 11: Untergurt, Sm2 (A)Em

Sm2 (A)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	b=400mm / dt=variiert [mm]				
		0	20	40	60	80
h variiert	520	wie Obergurt				
	720					
	920					
	1120					
	1920					
	2720					
	3320					
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (A)Em-S2 Em) / S2 Em *100				
h variiert	520	0,0	60,1	54,4	50,1	46,4
	720	0,0	18,6	20,7	8,8	5,2
	920	0,0	17,5	13,0	9,1	6,1
	1120	0,0	2,5	-1,7	-5,3	-7,7
	1920	0,0	-4,2	-6,8	-9,2	-11,3
	2720	0,0		-14,0		
	3320	0,0		7,8		
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (A)Em-S2 Em				
h variiert	520	0,0	30,5	43,6	50,0	53,1
	720	0,0	9,2	15,4	8,8	6,0
	920	0,0	6,7	8,0	7,0	5,4
	1120	0,0	0,9	-1,0	-3,8	-6,3
	1920	0,0	-0,8	-2,0	-3,4	-4,9
	2720	0,0		-2,7		
	3320	0,0		0,9		

Sm2 (A)Em [N/mm ²]	hSt [mm]	dt=40mm / b=variiert [mm]				
		200	300	400	500	600
h	920	wie Obergurt				
Abweichung Relativ [%]		(Sm2 (A)Em-S2 Em) / S2 Em *100				
h	920	18,2	13,4	21,8	40,3	45,4
Abweichung Absolut [N/mm ²]		Sm2 (A)Em-S2 Em				
h	920	17,1	10,1	12,4	16,6	15,5

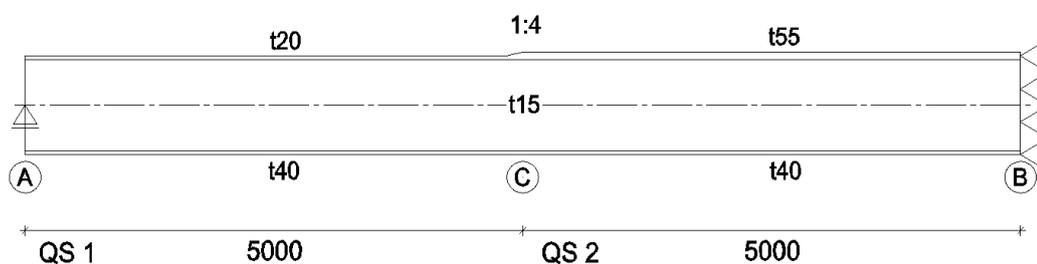
9.4) Anhang D, Anwendungsbeispiel

9.4.1) Allgemein

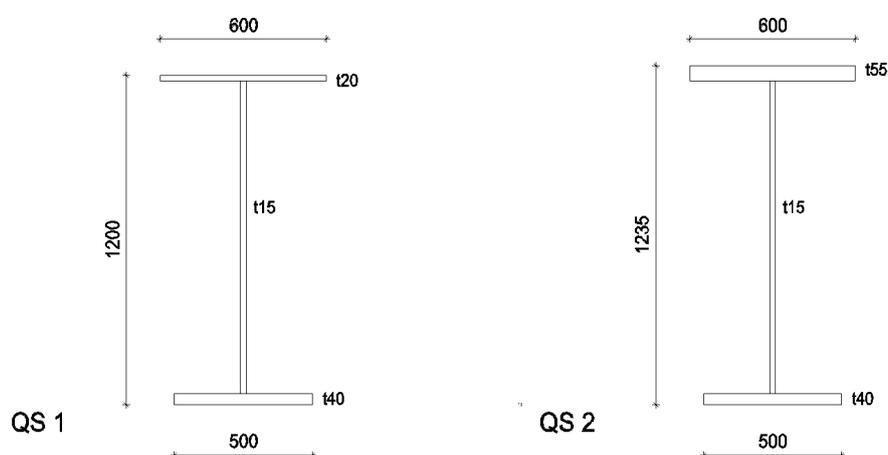
Nachfolgend wird das entwickelte Ingenieurmodell an einem allgemeinen Beispiel angewendet. Das untersuchte System soll einen Vergleich mit dem, im Fachbeitrag „Tragverhalten an Gurtdickensprüngen geschweißter Biegeträger“ [4] dargestellten Träger mit der Höhe $H = 1200 \text{ mm}$ ermöglichen. Dabei wurde mit dem FE-Programm „Abaqus“ ein verlaufender Gurtdickensprung untersucht. Die Ergebnisse werden verglichen und die Gültigkeit des Ingenieurmodells untersucht.

9.4.2) System

Angenommen wird ein halber Einfeldträger mit einer Länge von $10,0 \text{ m}$. Dieser wird durch ein konstantes Moment $M = 6.240,0 \text{ kNm}$ über die gesamte Länge belastet. Die Gurte werden in unterschiedlichen Breiten und Dicken ausgeführt. Vom Querschnitt 1 auf den Querschnitt 2 verändert sich die Dicke des Obergurtes stetig mit der Steigung $1:4$.



Anhang D 1: System



Anhang D 2: Querschnitte

9.4.2.1) Querschnitt 1

Anhang D 3: Querschnittswerte QS 1

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1							
2	60	2	120,0	1,0	120,0	-67,86	552595,8
3	1,5	114	171,0	59,0	10089,0	-9,86	201808,9
4	50	4	200,0	118,0	23600,0	49,14	483265,0
5							
		120	491,0		33809,0		1237669,7

elastische Querschnittswiderstände: $M_{rd} = 4.223,97 \text{ kNm}$

$V_{rd} = 2.191,20 \text{ kN}$

statisches Moment zwischen OG und Steg: $S_{y,OG} = -8.142,89 \text{ cm}^3$

9.4.2.2) Querschnitt 2

Anhang D 4: Querschnittswerte QS 2

i	b [cm]	h [cm]	A _i [cm ²]	ea [cm]	S _a [cm ³]	ez [cm]	I _y [cm ⁴]
1	60	3,5	210,0	1,8	367,5	-49,46	513840,5
2	60	2	120,0	4,5	540,0	-46,71	261807,6
3	1,5	114	171,0	62,5	10687,5	11,29	207007,0
4	50	4	200,0	121,5	24300,0	70,29	988532,2
5							
		124	701,0		35895,0		1971187,3

elastische Querschnittswiderstände: $M_{rd} = 6.407,52 \text{ kNm}$

$V_{rd} = 2.317,61 \text{ kN}$

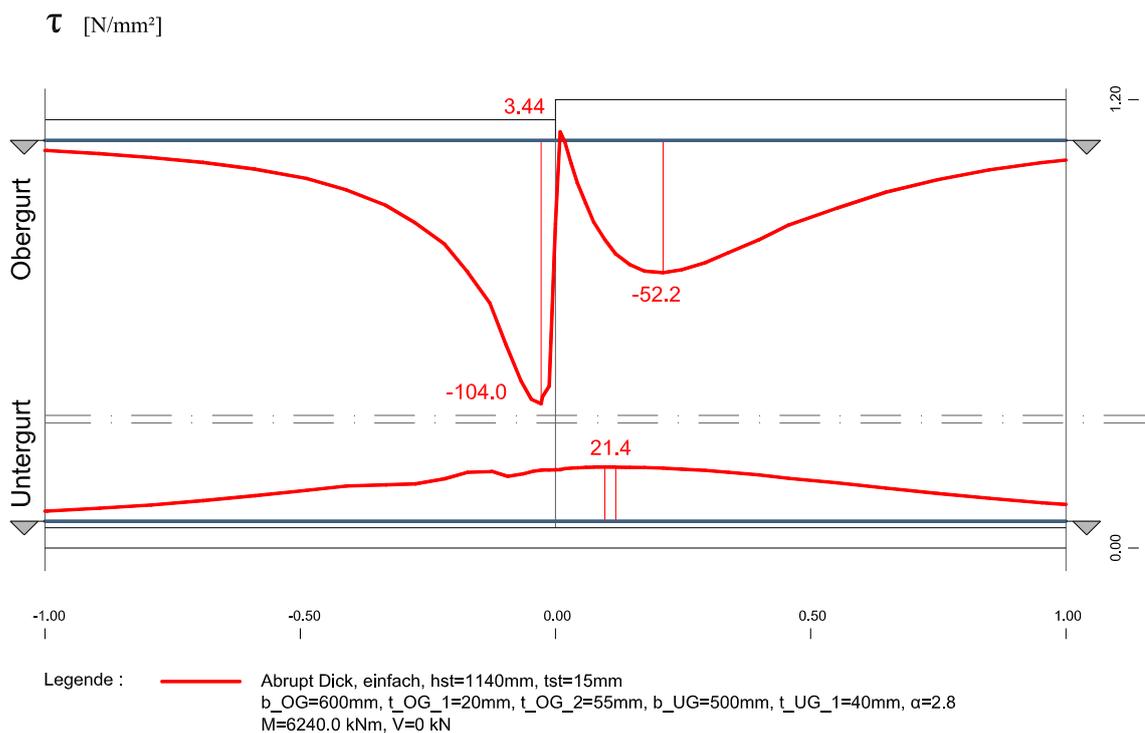
statisches Moment zwischen OG und Steg: $S_{y,OG} = -15.742,79 \text{ cm}^3$

9.4.3) Modell

In den Vergleichen in Kapitel 5.9) ist ersichtlich, dass bei einem Verlaufenden Übergang der Gurtstärke vor allem die Spannung S2, aber auch S1 reduziert wird. Im FE-Programm wird ein abrupter Dickensprung modelliert. Dieser bildet die Spannung S1 auf der sicheren Seite ab. Die Ergebnisse werden mit denen aus dem Fachbericht [4] verglichen. In der nachfolgenden Tabelle sind die Abweichungen vom verwendeten FE-Modell ersichtlich.

Anhang D 5: Vergleich der Schubspannungen

Spannung	Schubspannungen [N/mm ²]		Abweichungen [%]
	FE-Modell	Fachbeitrag	
S1	104,0	ca. 87	-17
S2	3,4	ca. 40	nicht vergleichbar
S3	52,2	ca. 50	-4



Anhang D 6: Schubspannungen in der Schnittfuge

9.4.4) Ingenieurmodell

Da das Ingenieurmodell am ungünstigsten Fall, einem abrupten Dickensprung, ausgerichtet ist, kann die Überschätzung die in Kapitel 7.1.4) vorgestellten Grenzen übersteigen. Das Ingenieurmodell liegt auf der sicheren Seite.

ingenieurmäßige Lasteinleitungslänge

$$L_m = \delta * h_{St}$$

mit $\delta = 0,5$; $h_{St} = 1140 \text{ mm}$

$$L_m = 570 \text{ mm}$$

maximale Schubspannung im Ingenieurmodell

$$S_m = \frac{dN}{L_m * t_{St}}$$

mit $dN = 956,5 \text{ kN}$; $t_{St} = 15 \text{ mm}$

$$S_m = 111,9 \text{ N/mm}^2$$

Anhang D 7: Schubspannungen

		Ingenieurmodell	Schubspannungen	
		$S_{m1} (A)$	FE-Modell	Fachbeitrag
Spannung	[N/mm ²]	104,0	111,9	ca. 87
Relativ	[%]	-	+7,6	+29,0
Absolut	[N/mm ²]	-	+7,6	+25,2

Das Ingenieurmodell nähert die Schubspannungen aus dem Modell „Abrupt Dick“ gut an. Durch den verlaufenden Übergang steigt die Überschätzung auf etwa 30% an.

