



# DIPLOMARBEIT

MASTER THESIS

## **Herleitung von Rechenmodellen zur Spannungsberechnung für ein Hängeranschluss-Detail einer Stabbogenbrücke auf Basis von Parameterstudien**

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

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Fink**

und als verantwortlich mitwirkend

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Francesco Aigner**

am

**E212-Institut für Tragkonstruktion – Stahlbau**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Birgit Hauer BSc**

0625730

2084 Weitersfeld 21, Österreich

Wien, im Oktober 2011

A handwritten signature in black ink that reads 'Birgit Hauer'. The signature is written over a horizontal dotted line.

eigenhändige Unterschrift

## **Danksagung**

Ich bedanke mich herzlich bei all jenen, die mich während meiner Studienzeit unterstützt und begleitet haben.

Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Fink danke ich für die Anregung zu diesem Thema, für die fachlichen Ratschläge sowie für die Möglichkeit, das erforderliche Computerprogramm über das Institut nutzen zu können.

Meinem Betreuer, Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Francesco Aigner, danke ich für die fachliche Betreuung und freundliche Unterstützung während der Entstehung meiner Diplomarbeit.

Ein großes Dankeschön geht an Herrn Dipl.-Ing. Ernst Illetschko, bei dem ich seit dem Sommer 2008 neben meinem Studium tätig sein kann. Vielen Dank für diese Möglichkeit, für das Interesse an meinem Studium und die Unterstützung dabei.

Mein aufrichtiger Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden. Danke für das Verständnis und die Geduld während meines Studiums und Danke, dass ihr mir immer wieder gezeigt habt, dass das Leben nicht nur aus Studium und Arbeit besteht.

## Kurzfassung

Für eine neue Stabbogenbrücke über den Rhein im Zuge des Umbaus der Eisenbahnstrecke zwischen St.Margrethen (Schweiz) und Lustenau (Österreich) wurde für den Anschluss der Hänger an den Versteifungsträger ein Detail entwickelt. Dieses zeichnet sich durch die geschmiedete, schaufelartige Verbreiterung des Hängers aus, die mit einem Anschlussblech an den Obergurt des Versteifungsträgers geschweißt ist. In der Ebene des Anschlussblechs befindet sich eine Querscheibe zwischen den Stegen des Versteifungsträgers. Der beschriebene Anschluss kommt ohne Schraubverbindungen aus und ist ausschließlich geschweißt.

In der vorliegenden Arbeit ist das oben in aller Kürze beschriebene Detail in einer Parameterstudie bearbeitet. Ziel der Parameterstudie ist die Erstellung von „Rechenmodellen“, die es ermöglichen, aufgrund geometrischer Detailabmessungen und einer vorgegebenen Hängerkraft die maßgebenden Schweißnahtdicken abschätzen zu können. Dafür wird ein idealisiertes und vereinfachtes Detail – ausgehend von den konkreten Projektangaben – entwickelt. Als Parameter werden drei charakteristische Bauteilabmessungen bestimmt. Für die Durchführung der Parameterstudie werden Grenzen für die Parameter festgelegt und mit Hilfe eines Finite Elemente Programms zahlreiche Detailmodelle untersucht. Die Ergebnisse in den ausgewählten Schnitten werden grafisch und tabellarisch miteinander verglichen und einfache Gesetzmäßigkeiten in den Spannungmaxima, den Spannungsverteilungen und den übertragenen Kräften erkannt. Diese Größen werden in Abhängigkeit von den Parametern und konstant angenommenen Abmessungen in einzelnen Diagrammen dargestellt. Für die entstandenen Kurven in den Diagrammen lassen sich Näherungsgeraden finden. Damit ist die Basis für die Rechenmodelle geschaffen. Mit diesen Diagrammen und kurzen, einfachen Formelapparaten lassen sich die gesuchten Größen (Einflusslänge, Spannungmaximum, Ausbreitungswinkel) berechnen und in weiterer Folge die Schweißnähte bemessen.

Im letzten Teil der Arbeit werden die Rechenmodelle für alle Modelle aus den Parameterstudien für einen konkreten Lastfall („Hängervolllast“) angewandt und mit den Ergebnissen aus der Finite Elemente Analyse verglichen. Durch den Auftrag der Ergebnisse in Diagrammen kann so die Anwendbarkeit und die Güte der Rechenmodelle gezeigt werden. Die Ergebnisse aus der Anwendung der Rechenmodelle werden im Anschluss verwendet, um die Schweißnahtdicken des Details abzuschätzen.

## **Abstract**

The existent railway bridge between St. Margrethen (Switzerland) and Lustenau (Austria) is going to be replaced by a new bowstring bridge constructed of a stiffening girder and hanger rods made of steel as well as a bow of reinforced concrete.

The object of this diploma thesis is the study of the detail “connection of a hanger rod to the stiffening girder”. The end of the hanger is forged and designed like a shovel in the area where the hanger rod is welded on the top chord of the stiffening girder. The cross compartment is located between the webs of the stiffening girder along an extension of the hanger rod. The connections between the construction components are welded and built without any screws.

The described detail is analysed in a study of parameters. The result of the study is the development of “Rechenmodelle” to estimate the thickness of the welding seams. “Rechenmodelle” are formulas and diagrams and their input values are the dimensions of the construction components and the known tension of the hanger rod.

To accomplish the study the details of the project have to be idealised and simplified. The three selected parameters are characteristic dimensions of the detail. The parameters get varied between selected limits. The outcome of this variations are many different models of the detail, witch get analysed by a finite element programme. The stress distributions, maximal stress and load transmissions of the selected sections are compared graphically and in table form. These results are plotted against the parameters and unchanged dimensions in diagrams. The resulting graphs get approximated and the “Rechenmodelle” are based on these approximations.

At least the stress of the sections of all models get calculated for a defined loading case using the “Rechenmodelle” in comparison to the results of the finite element analysis.

The comparisons between the results (“Rechenmodelle” towards finite element analyse) demonstrate the practicability and quality of the “Rechenmodelle”.

## INHALT

1	Einleitung und Aufgabenstellung .....	3
2	Allgemeines .....	4
2.1	Projekt der Österreichischen Bundesbahn: Rheinbrücke St. Margrethen - Lustenau .....	4
2.2	Detail für die Parameterstudie .....	6
2.3	Abmessungen aus dem Projekt .....	7
2.4	Geometrisch idealisiertes und vereinfachtes Detail .....	8
3	Finite Elemente-Modell für die Parameterstudie .....	10
3.1.1.	Modellbildung und Randbedingungen .....	13
3.1.1.1.	Modell "g" .....	15
3.1.1.2.	Modell "h" .....	19
4	Parameter .....	22
4.1	Parameter Querscheibenbreite "b <sub>QS</sub> " bzw. Freischnittsradius "r <sub>FS</sub> " .....	22
4.2	Parameter Querscheibenhöhe "h <sub>QS</sub> " .....	22
4.3	Parameter Obergurtdicke "t <sub>OG</sub> " .....	23
4.4	Modelle für die Parameterstudie .....	23
5	Ermittlung und Auswertung der Spannungsverläufe in ausgewählten Schnitten und Entwicklung von Rechenmodellen .....	26
5.1	Beschreibung der Schnitte und Ermittlung der Spannungsverläufe .....	27
5.2	Lastableitung der Zugkraft vom Hänger in die Stege .....	29
5.3	Rechenmodell für den Faktor f .....	31
5.4	Schnitt „Querscheibe vertikal“ – Spannungsverteilung .....	36
5.5	Schnitt „Querscheibe horizontal“ - Spannungsverteilung .....	50
5.6	Schnitt „Obergurt horizontal“ – Spannungsverteilung .....	59
5.7	Schnitt „Anschlussblech horizontal“ – Spannungsverteilung .....	68
6	Schweißnahtdimensionierung und Spannungsnachweis für einen konkreten Lastfall .....	77
6.1	Doppelte Kehlnaht im Schnitt „Querscheibe vertikal“ .....	77
6.2	Versenkte Kehlnaht im Schnitt „Obergurt horizontal“ .....	79
6.3	Durchgeschweißte Naht im Schnitt „Querscheibe horizontal“ .....	80
6.4	Durchgeschweißte Naht im Schnitt „Anschlussblech horizontal“ .....	81
7	Zusammenfassung und offene Punkte .....	82

8	Abbildungsverzeichnis .....	83
9	Tabellenverzeichnis .....	85
10	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	86
11	Anhang A.....	87
12	Anhang B.....	88

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Ein wesentlicher Arbeitsschritt bei der Planung und Berechnung von Stahltragwerken ist die Entwicklung von Details wie beispielsweise Trägeranschlüssen, Rahmenecken sowie Auflager- oder Krafteinleitungspunkten. Zunächst wird für diese oft komplizierten Punkte eine konstruktive Lösung gesucht. Die Kraft soll auf möglichst kurzem Weg von einem Bauteil in den nächsten weitergeleitet werden. Dabei sind meist zusätzliche Laschen, Knotenbleche, Futterbleche und Verbindungsmittel wie Schrauben und Schweißnähte erforderlich. Für die Dimensionierung von Schweißnähten ist die Kenntnis über den Kraftverlauf durch das Detail und die daraus resultierenden Spannungen unabdingbar. Bei immer wiederkehrenden Details, also Standardknoten und -anschlüssen, ist es für den Ingenieur von Vorteil, wenn „Rechenmodelle“ vorhanden sind, mit deren Hilfe die Spannungsverläufe in den Schweißnähten abgeschätzt werden können. Als „Rechenmodell“ wird in dieser Arbeit die Aufstellung und Anwendung von Näherungslösungen für die Spannungsberechnung in einem ausgewählten Schnitt eines Details verstanden. Ziel dieser Rechenmodelle ist, dass für die Spannungsberechnung lediglich die äußeren Lasten und Faktoren, die sich über charakteristische Detailabmessungen aus Diagrammen oder über Gleichungen bestimmen lassen, erforderlich sind. Mit einfachen Formeln, die das Ergebnis von Gleichgewichts- bzw. Äquivalenzbetrachtungen sind, errechnet sich der Spannungsverlauf und damit ist auch das Spannungsmaximum bekannt (welches für eine Schweißnahtdimensionierung oder einen Spannungsnachweis benötigt wird).

In der vorliegenden Arbeit wird ein bereits fertig konstruiertes Detail einer Stabbogenbrücke bearbeitet. Bei dem Knotenpunkt handelt es sich um die Verbindung des Hängers mit dem Versteifungsträger, welche aufgrund des Tragsystems auf Zug belastet ist. Das Detail wird im Projekt mehrmals verwendet, wobei die Abmessungen der einzelnen „Detailbauteile“ variieren. Ziel dieser Arbeit ist nicht, die konkret vorliegenden Anschlüsse nachzurechnen, sondern von diesem „Grund-Detail“ ausgehend auf Basis von Parameterstudien (als „Parameter“ werden charakteristische Detailabmessungen gewählt) einfache Rechenmodelle zu entwickeln, um die Spannungen für die Dimensionierung von Schweißnähten abzuschätzen. Die Rechenmodelle sollen für einen eingegrenzten Anwendungsbereich gültig sein, der über die Angaben des Projekts hinausgeht, da die Detaillösung auch für zukünftige Stahltragwerke interessant sein kann.

## 2 Allgemeines

### 2.1 Projekt der Österreichischen Bundesbahn: Rheinbrücke St. Margrethen - Lustenau

Für die Eisenbahnstrecke zwischen St. Margrethen (Schweiz) und Lustenau (Österreich) gibt es ein Ausführungsprojekt der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB), welches den Neubau der Brücke über den Rhein beinhaltet. Die ÖBB führt in einer Pressemitteilung vom Juni 2011 als Ziele des Umbaus einen verbesserten Hochwasserschutz, deutliche Lärmentlastung für die Anrainer und eine bessere Entwicklung des Nah- und Fernverkehrs an [1].

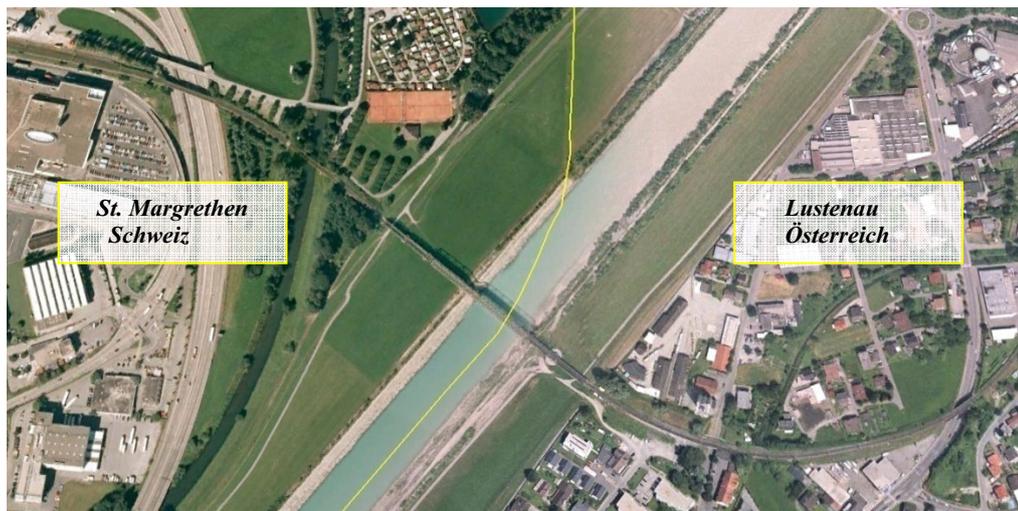


Abbildung 2.1: Standort der Eisenbahnbrücke über den Rhein [1]

Die Rheinbrücke zwischen St. Margrethen und Lustenau besteht aus insgesamt sechs Vorlandöffnungen und einer Stromöffnung. Über den Rhein führt eine Stabbogenbrücke mit Versteifungsträgern aus Stahl, Stahlhängern und einem Stahlbetonbogen, der an seinen Enden mit stählernen Kämpfern ausgestattet ist. Die Stützweite der Stabbogenbrücke beträgt 102 m.



Abbildung 2.2: Visualisierung der neuen Brücke über den Rhein [2]

In Anhang A1 befindet sich ein Übersichtsplan der Stabbogenbrücke im Maßstab 1:200. In Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 sind die wichtigsten Bauteile des Tragwerks und das in dieser Arbeit untersuchte Detail eingezeichnet.

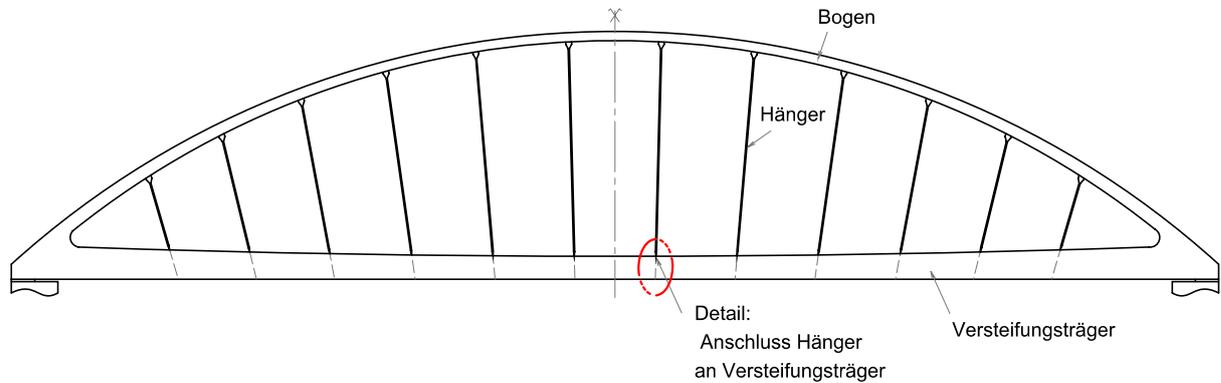


Abbildung 2.3: Längsschnitt der Stabbogenbrücke

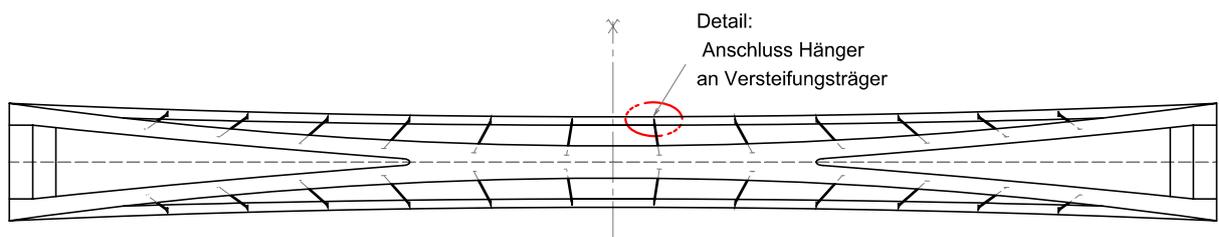


Abbildung 2.4: Grundriss der Stabbogenbrücke

Der in diesem Projekt verwendete Anschluss der Stahlhänger an den Versteifungsträger ist Ausgangspunkt für die vorliegende Diplomarbeit. In den nächsten Kapiteln ist das Detail ausführlich beschrieben und im Anhang B befinden sich Ausschnitte aus den originalen Planunterlagen.

## 2.2 Detail für die Parameterstudie

Der Anschluss „Hänger an Versteifungsträger“ ist im Projekt als Detail für die Hänger „H1“ bis „H6“ ausgearbeitet und in Anhang B5 bis B16 auf Auszügen aus Stahlbauplänen des Projekts ersichtlich. Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 zeigen ausgewählte Detailausschnitte. In Abbildung 2.6 sind die Bezeichnungen der einzelnen Detailbauteile, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, eingetragen.

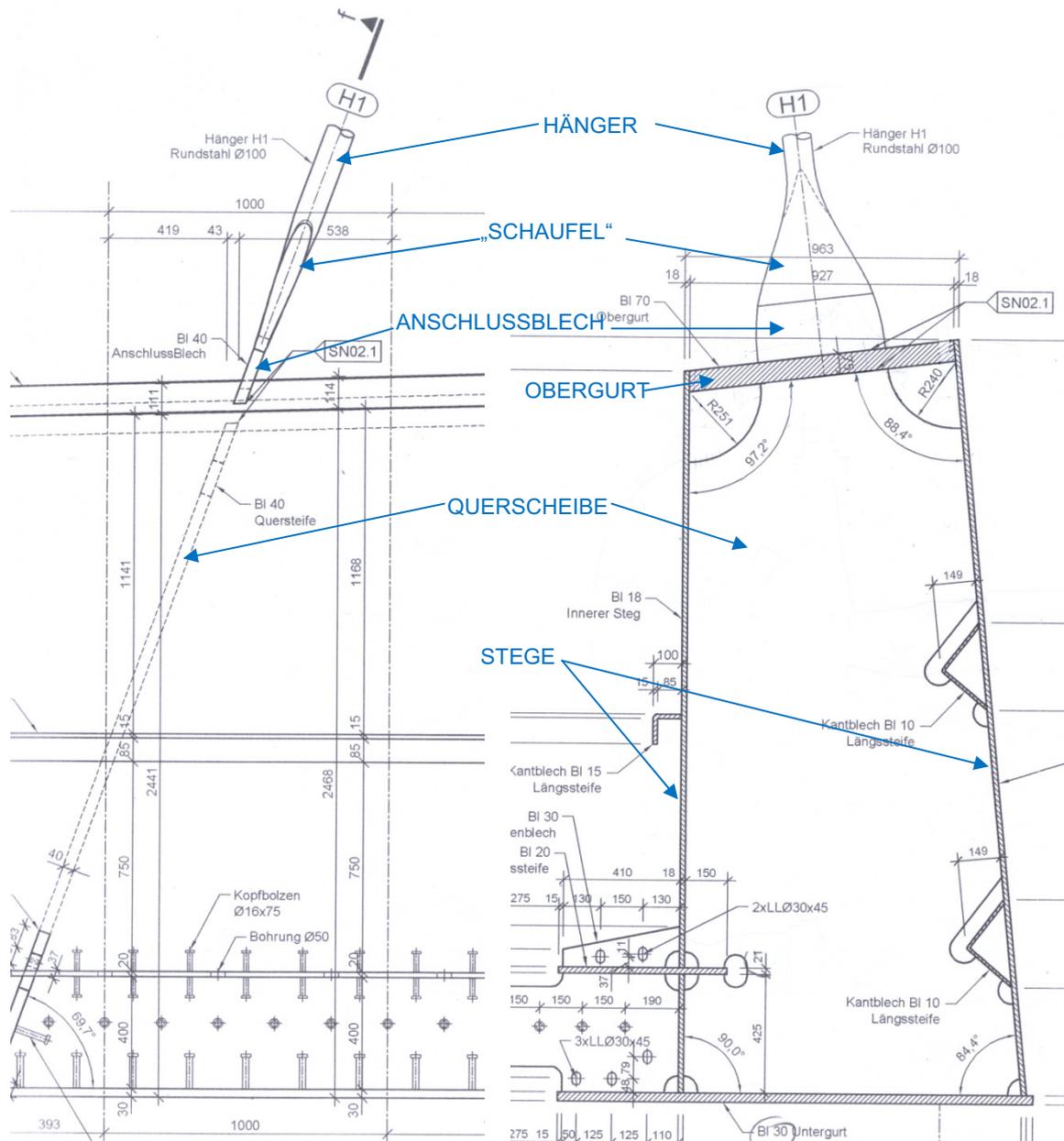


Abbildung 2.5: Hänger „H1“: Hänger mit Versteifungsträger [8]

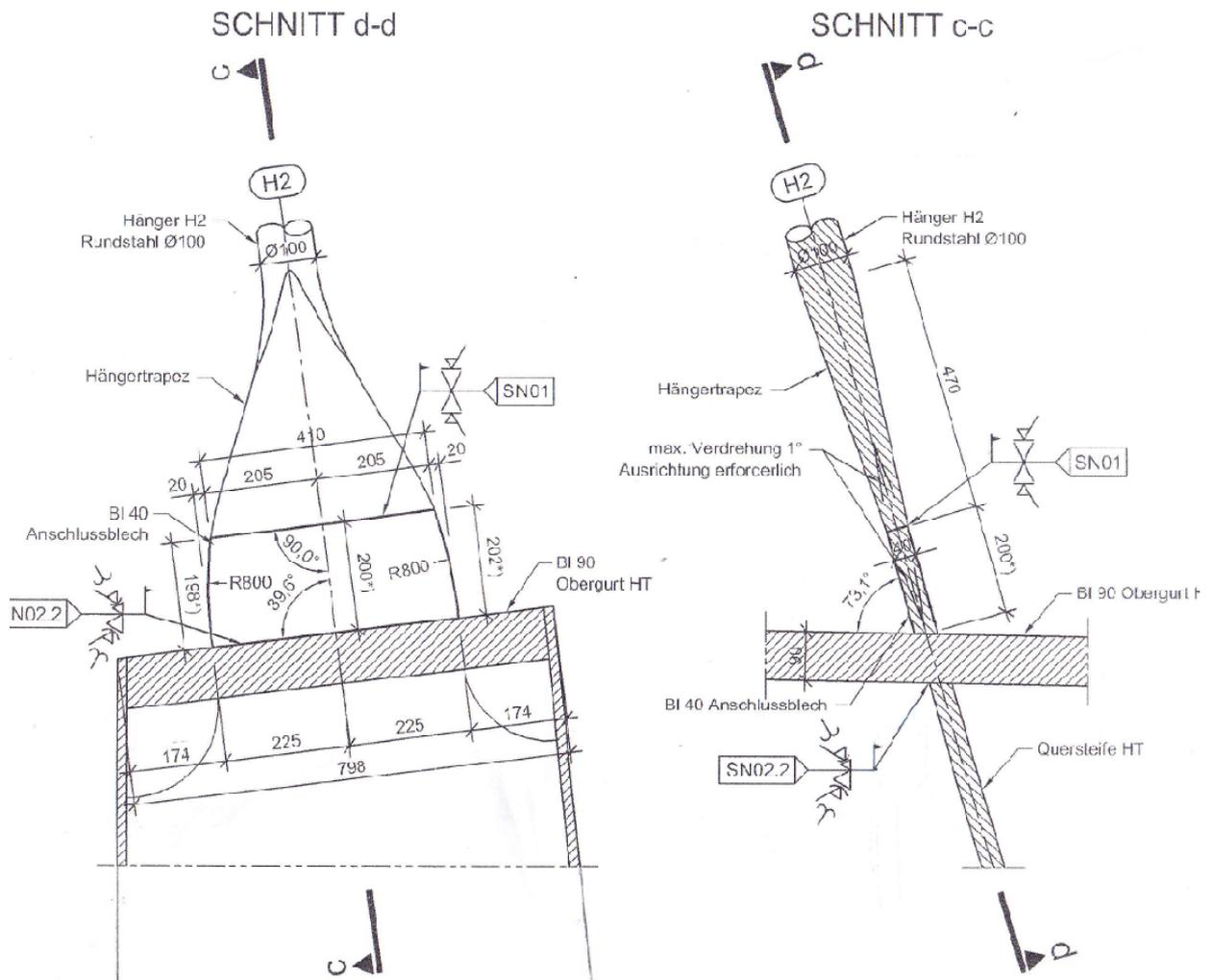


Abbildung 2.6: Hänger „H2“: Anschlussausbildung Hänger an Obergurt [8]

Im Projekt der ÖBB ändern sich entlang der Brückenlängsachse die Obergurtbreite, -dicke und Steghöhe des Versteifungsträgers. Die Neigung des Obergurts um die Längsachse sowie die Schrägstellung der Querscheibe bzw. des Hängers verändern sich ebenfalls längs der Brückenachse.

### 2.3 Abmessungen aus dem Projekt

Die Hänger der Stabbogenbrücke sind Rundstähle mit einem Durchmesser von 100 mm. Das untere Ende eines Hängers wird zu einer 40 mm dicken „Schaufel“ auseinandergeschmiedet. An diese Schaufel schließt ein 40 mm dickes Anschlussblech an, welches an die Oberseite des Obergurts mittels einer K-Naht geschweißt ist. An der Unterseite des Obergurts befindet sich in der Ebene des Anschlussblechs zwischen den Stegen eine Querscheibe mit 40 mm Dicke. Die Stegdicke des Versteifungsträgers beträgt 18 mm, die Obergurtstärke variiert von 70 bis 90 mm.

Tabellarische Zusammenfassung der im Projekt vorkommenden Detailabmessungen:

Bauteil		gleichbleibende Abmessungen	variierende Abmessungen
Hänger	Durchmesser	100 mm	---
„Schaufel“	Dicke	von 100 mm zu 40 mm	---
	Breite	von 100 mm zu 410 mm	---
Anschlussblech	Dicke	40 mm	---
	Breite	von 410 mm zu 450 mm	---
Obergurt	Dicke	---	70 mm bis 90 mm
	Breite	---	450 mm bis 934 mm
Querscheibe	Dicke	40 mm	---
	Breite (oben)	---	450 mm bis 934 mm
	Höhe	---	~ 1900 mm bis 2700 mm
	Freischnittradius	---	242 mm bis 50 mm
Steg	Dicke	18 mm	---
	Höhe	---	~ 1900 mm bis 2700 mm

Tabelle 2.1: Detailabmessungen im Projekt

Jede Detailausführung weist eine unterschiedliche Neigung des Obergurts, Schrägstellung des Hängers und Form der Querscheibe auf. Für eine über das Einzelprojekt hinaus gültige Parameterstudie des Details mit den Parametern Obergurtdicke, Höhe und Breite der Querscheibe ist eine Idealisierung und Vereinfachung hinsichtlich der Geometrie erforderlich.

## 2.4 Geometrisch idealisiertes und vereinfachtes Detail

Die Querscheibe befindet sich in der  $x$ - $y$ -Ebene eines rechtwinkligen, rechtsdrehenden  $x$ - $y$ - $z$ -Koordinatensystems. Sie hat eine rechteckige Form, wobei die beiden oberen Ecken mit jeweils einem Freischnitt versehen sind. Die Stege werden parallel zueinander und normal auf die Querscheibe angenommen und liegen in der  $y$ - $z$ -Ebene. Der Obergurt befindet sich normal zur Querscheibe und zu den Stegen und ist damit in der  $x$ - $z$ -Ebene aufgespannt. Das Anschlussblech liegt in der gleichen Ebene wie die Querscheibe und befindet sich oberhalb des Obergurts. Die Hängerachse weist in Richtung  $y$ -Achse und ist gleichzeitig Symmetrieachse des Details in der  $x$ - $y$ -Ebene und der  $x$ - $z$ -Ebene. Abbildung 2.7, Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 zeigen das idealisierte und vereinfachte Detail im Quer-, Horizontal- und Längsschnitt.

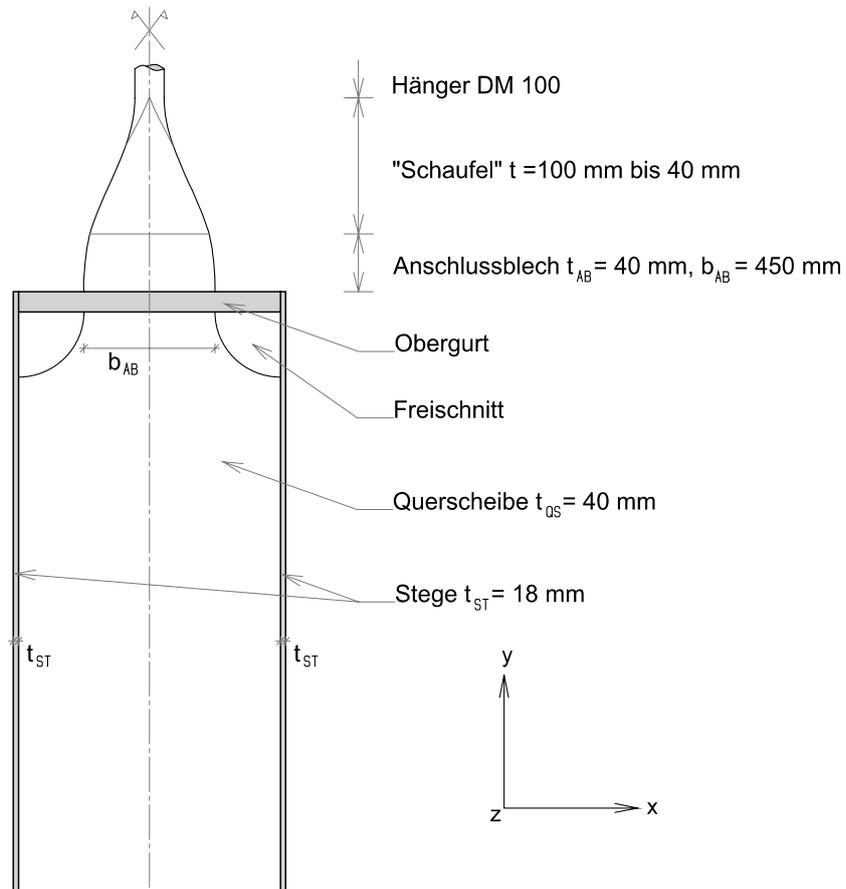


Abbildung 2.7: Detail für die Parameterstudie, Querschnitt

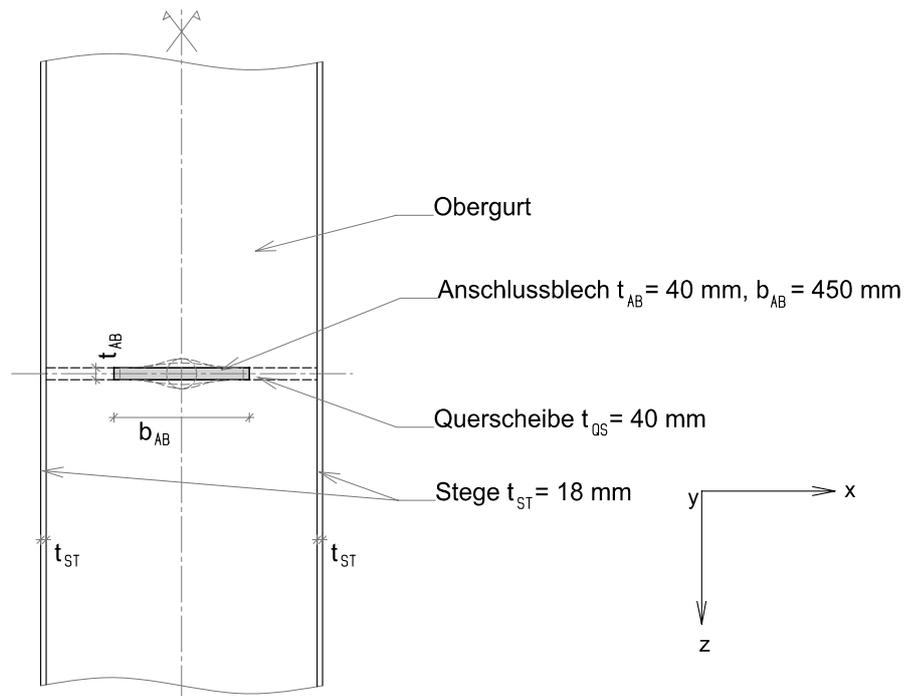


Abbildung 2.8: Detail für die Parameterstudie, Horizontalschnitt

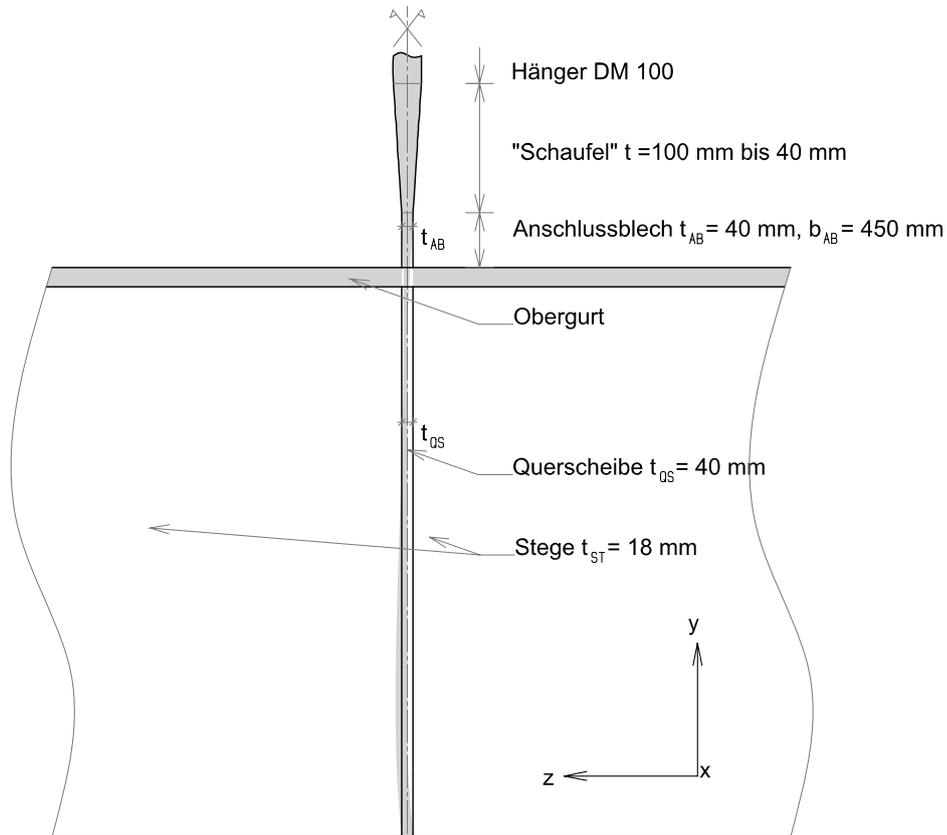


Abbildung 2.9: Detail für die Parameterstudie, Längsschnitt

### 3 Finite Elemente-Modell für die Parameterstudie

Das ausgewählte Detail wird mit Hilfe eines Finite Elemente (FE) Programms modelliert. Für die Modellbildung und die anschließende Berechnung verwendet die Autorin das Programm „Marc Mentat 2010“. Dieses ermöglicht und verlangt, im Unterschied zu vielen anderen kommerziell in der Tragwerksplanung eingesetzten FE-Programmen, die Erstellung der Netze für die Unterteilung von Flächen und Körpern „von Hand“. Das heißt, dass eine polygonale Fläche nicht automatisch per Mausklick in Elemente annähernd gleicher Größe und Form unterteilt wird, sondern dass die Netze (beispielsweise rechteckig, radial, polygonal) und damit auch der Elementtyp für einzelne Teilflächen sorgfältig zu wählen sind, um zu gewährleisten, dass alle Elemente über die Knoten richtig miteinander verknüpft sind. Das vorliegende Detail wird in die Abschnitte “Hänger mit Anschlussblech”, “Obergurt”, “Querscheibe” und “Stege” unterteilt. Zwei der für die Parameterstudie erstellten zahlreichen Modelle sind auf Abbildung 3.1 ersichtlich.

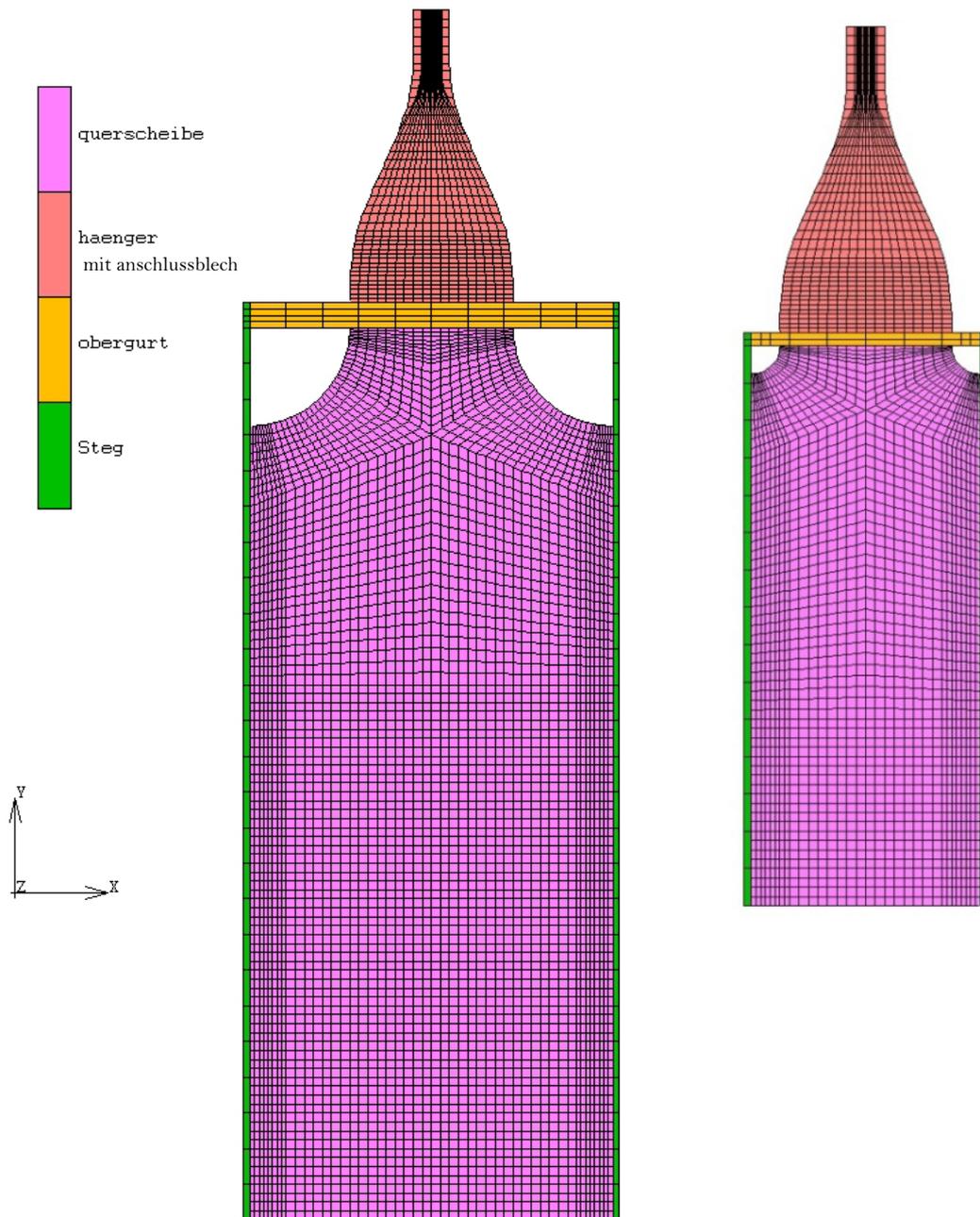


Abbildung 3.1: Zwei beispielgebende Finite Elemente-Modelle

Das FE-Modell besteht aus Volumenelementen, da sich der zu einer Schaufel auseinandergeschmiedete Hänger nicht mit Scheibenelementen abbilden lässt. Um zu diesem Modell zu gelangen, werden die Querscheibe sowie der Obergurt und die Stege des Versteifungsträgers zunächst aus vierknotigen Scheibenelementen zusammengesetzt. Für die Querscheibe wird die Gesamtfläche aus mehreren Teilflächen mit unterschiedlichen Netzen gebildet. Im Bereich der Freischnitte werden radiale Netze verwendet, der untere Teil der Querscheibe, die Stege und der Obergurt stellen sich als Rechtecke dar. Die Querscheibe weist außerdem zwischen den radialen Netzen (oben) und dem Rechteck (unten) noch eine polygonale Fläche auf. Wie bereits beschrieben, ist darauf zu achten, dass die einzelnen Teilflächen über gemeinsame Knoten miteinander verknüpft sind. Die Elementanzahl an den Netzrändern muss mit jener der Nachbarnetzränder übereinstimmen, wodurch vorerst eine grobe Elementunterteilung entsteht. Durch

Netzverfeinerung hat ein Regelscheibenelement die Größe von 25 x 25 mm. Später wird in ausgewählten Bereichen (Schweißnähte zwischen den Einzelteilen) die Elementgröße halbiert. In der Umgebung um die Querscheibe sind die Netze für den Obergurt und für die Stege gleich unterteilt wie jenes Netz der Querscheibe. Die Elemente des Obergurts und der Stege werden zum Stegende hin größer, um die Element- und Knotenanzahl für die durchzuführenden Berechnungen zu reduzieren.

Erst wenn die Unterteilung von Querscheibe, Obergurt und Stege abgeschlossen ist, werden die Scheibenelemente zu Volumenelementen extrahiert. „Extrahieren“ bedeutet hier, dass die Scheibenelemente zu Volumenelementen mit bestimmter Höhe umgewandelt werden. Durch diesen Vorgang wird aus einem vierknotigen Scheibenelement ein achtknotiges Volumenelement.

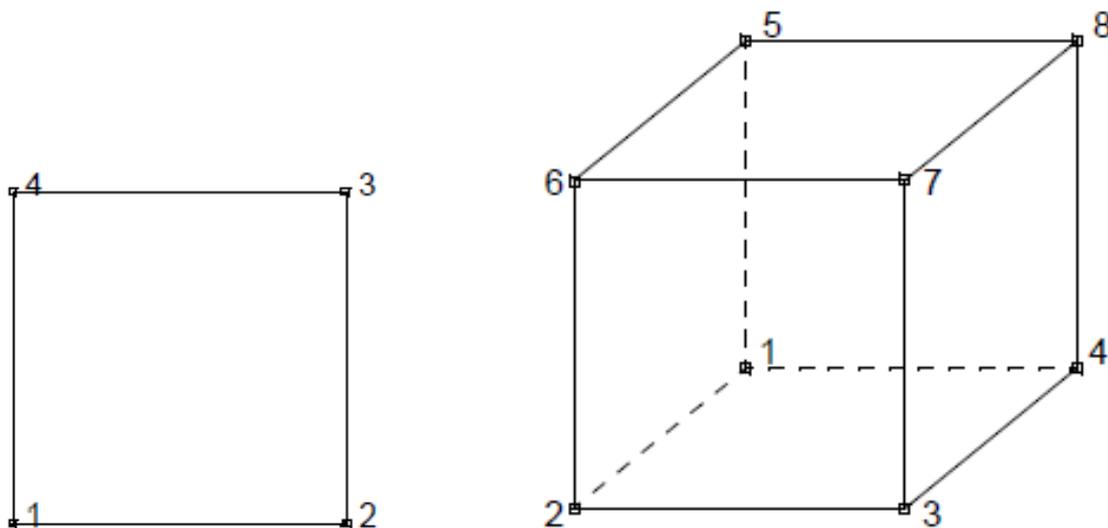


Abbildung 3.2: Vierknotiges Scheibenelement (links), achtknotiges Volumenelement (rechts) [3]

Diese Volumenelemente werden je nach Bauteil ihrer Höhe nach in mehrere „Lagen“ oder „Schichten“ unterteilt. Der Obergurt weist je nach Modell zwischen zwei und sechs Lagen von Volumenelementen auf. Die Stege sind nur ein Element dick. Die Querscheibe und das Anschlussblech werden in vier Lagen von Volumenelementen geteilt. Der Hänger und die auseinandergeschmiedete Schaufel werden aufgrund ihrer komplizierten Geometrie in zahlreiche Teilbereiche mit den Abmessungen aus dem Projekt (ersichtlich in Anhang A 4), zerlegt und aus achtknotigen Volumenelementen zusammengesetzt.

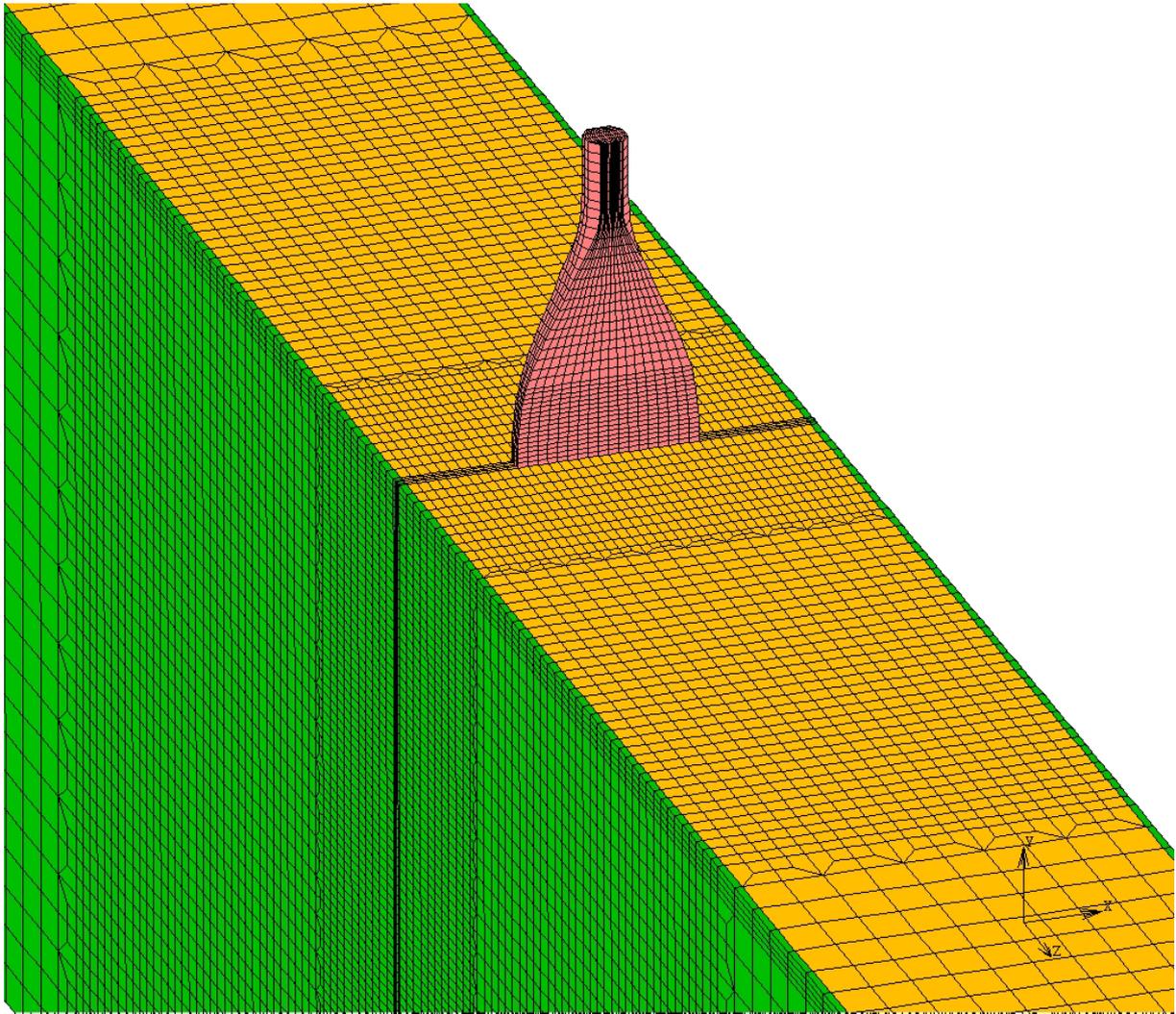


Abbildung 3.3: Ausschnitt FE-Modell, Bereich Querscheibe und des Hängers

### 3.1.1. Modellbildung und Randbedingungen

Für die Modellbildung ist zunächst die Frage zu beantworten, wie groß der mittels Finiter Elemente abgebildete Bereich rund um das zu betrachtende Detail sinnvollerweise gewählt werden soll. Zu diesem Zweck werden Modelle des Details angefertigt, die sich in ihren geometrischen Abmessungen nur durch verschiedene Steglängen unterscheiden. Mit Steglänge wird die Abmessung des Steges längs der z-Achse zwischen der Querscheibe und dem Stegende bezeichnet (siehe Abbildung 3.4). Diese soll bei den später durchgeführten Parameterstudien unverändert bleiben, also kein Parameter sein. Die Parameter Obergurtdicke, Querscheibenbreite und Querscheibenhöhe werden innerhalb der Grenzen der Parameterstudien gewählt und bleiben für die Modelle in diesem Kapitel unverändert.

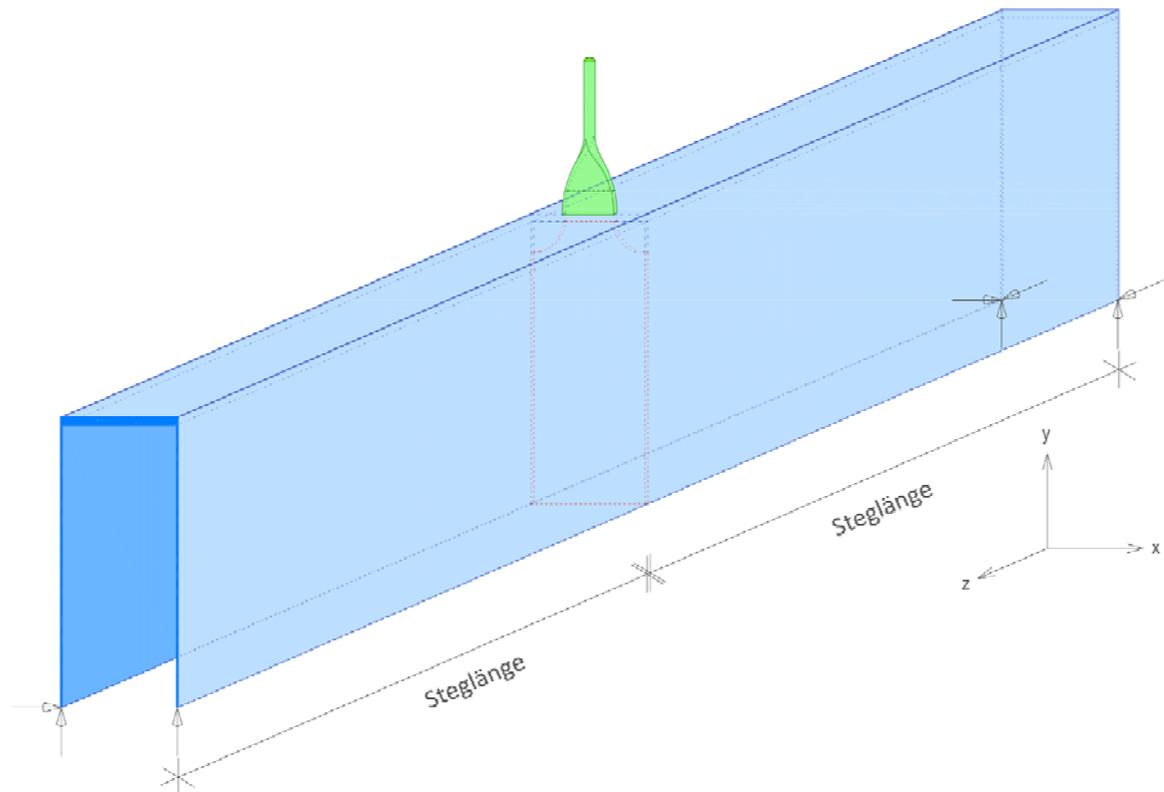


Abbildung 3.4: Statische Randbedingungen für das untersuchte Detail

Das Modell wird an den vier unteren Eckpunkten des Steges gelagert. Alle vier Knoten sind unverschieblich in y-Richtung. Zusätzlich ist das Modell durch unverschiebliche Lager in x-Richtung und in z-Richtung für jeweils zwei Knoten gegen Verdrehungen und Verschiebungen im Raum fixiert.

Die Parameter Obergurtdicke, Querscheibenbreite bzw. Freischnittradius und Querscheibenhöhe werden wie folgt gewählt:

Obergurtdicke	$t_{OG} = 70 \text{ mm}$
Querscheibenbreite	$b_{QS} = 1000 \text{ mm}$
Freischnittradius	$r_{FS} = 275 \text{ mm}$
Querscheibenhöhe	$h_{QS} = 2500 \text{ mm}$

Der Hänger wird mit einer Zugkraft von 1000N (= „Einheitskraft“) beansprucht. Die Einheitskraft wird über die Hängerquerschnittsfläche ( $78,5 \text{ cm}^2$ ) gleichmäßig verteilt angenommen. Die aufgebrachte Zugspannung ergibt sich zu  $0,127 \text{ N/mm}^2$ .

Folgende Ansprüche werden an das Modell gestellt, das als Ausgangsmodell für die Parameterstudie verwendet wird:

- ◆ Mit zunehmender Steglänge sollen die Spannungsverläufe im Bereich der Querscheibe zu einer Grenzverteilung konvergieren (dafür wird der Schubspannungsverlauf im Schnitt „Querscheibe vertikal“ betrachtet, siehe Abbildung 3.7).
- ◆ Die Steglänge soll so gewählt werden, dass sich im Steg ein Bereich zwischen Auflager und Querscheibe ergibt, der eine Spannungsverteilung gemäß der „technischen Biegelehre“ aufweist (linearer Normalspannungsverlauf und parabelförmiger Schubspannungsverlauf über die Steghöhe).

Das Kräftegleichgewicht wird über zusätzlich aufgebrauchte Spannungen erzeugt, damit sich die Auflagerreaktionen zu vernachlässigbar geringen Größen ergeben. Für die Herstellung des Gleichgewichts in Vertikalrichtung werden unterschiedliche Möglichkeiten untersucht. Die zunächst gewählte Lösung, beschrieben mit dem Modell „g“, stellt sich als nicht brauchbar für die Parameterstudien heraus, bei der die Steglänge konstant bleiben soll. Das Modell „g“, die Randbedingungen und die Ergebnisse sind im Kapitel 3.1.1 beschrieben. Nach dieser Sackgasse im Bezug auf die Randbedingungen in den Spannungen wird eine neue Möglichkeit gesucht, ein sinnvolles Modell für die Parameterstudie zu erhalten. Das Modell „h“ (beschrieben im Kapitel 3.1.2) mit seinen Randbedingungen erfüllt die an das Modell gestellten Ansprüche. Es wird für die Parameterstudien weiterverwendet und entsprechend variiert.

### **3.1.1. Modell “g”**

*Wie bereits erwähnt, ist das Modell „g“ für die Durchführung der Parameterstudien nicht geeignet. Trotzdem möchte die Autorin das Modell erläutern und darauf hinweisen, weshalb es nicht weiter verwendet wird. Dieses Kapitel ist aus diesem Grund kursiv geschrieben.*

*Das Gleichgewicht in Vertikalrichtung (y-Achse) wird durch entsprechende Schubspannungen, welche an den Enden der Stege angebracht werden, hergestellt. Es werden zwei unterschiedliche Schubspannungsverteilungen an den Stegenden untersucht. Die Modelle werden mit „g2“ und „g3“ bezeichnet.*

*Beim Modell “g2” (siehe Abbildung 3.5) ist die Schubspannung über die gesamte Steghöhe konstant (Steghöhe 2500 mm, Stegdicke 18 mm). Die Schubspannung  $\tau$  ergibt sich zu*

$$\tau = \frac{1000N}{4} \cdot \frac{1}{2500mm} \cdot \frac{1}{18mm} = 0,00556 \frac{N}{mm^2}$$

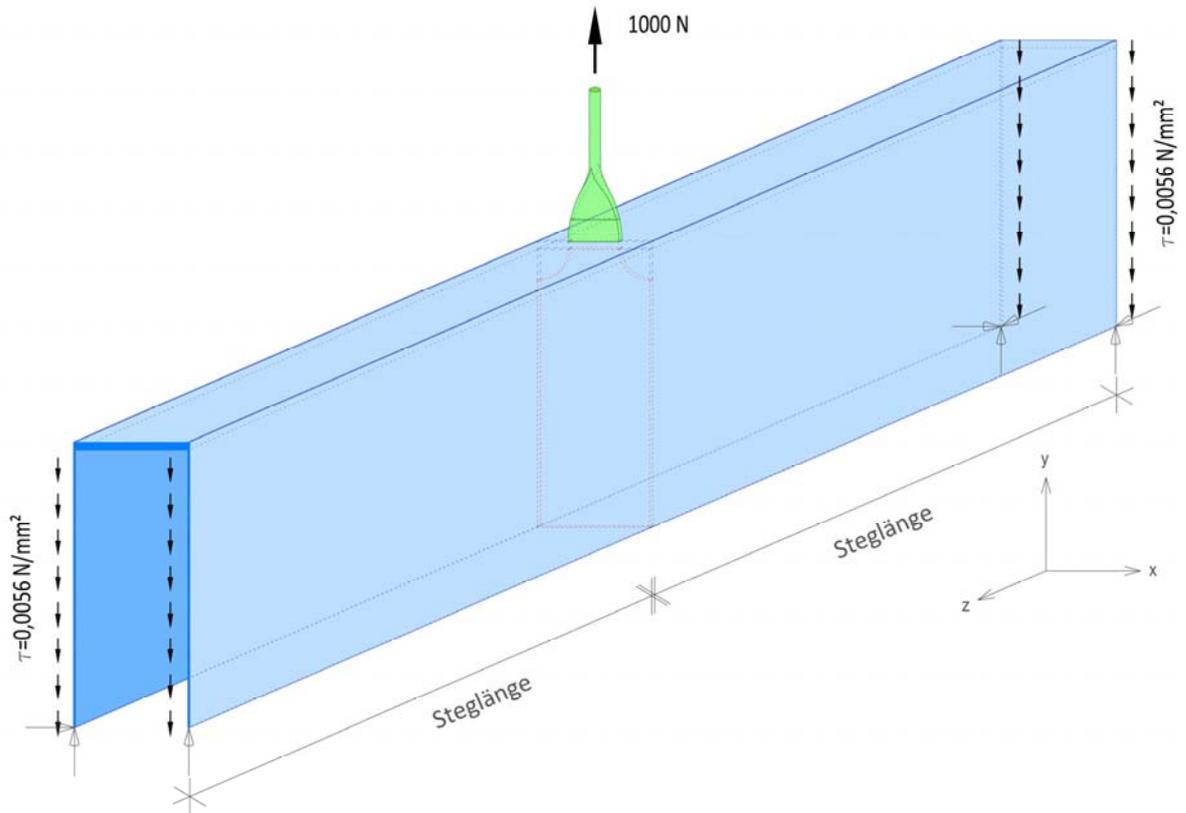


Abbildung 3.5: Randbedingungen Modell "g2"

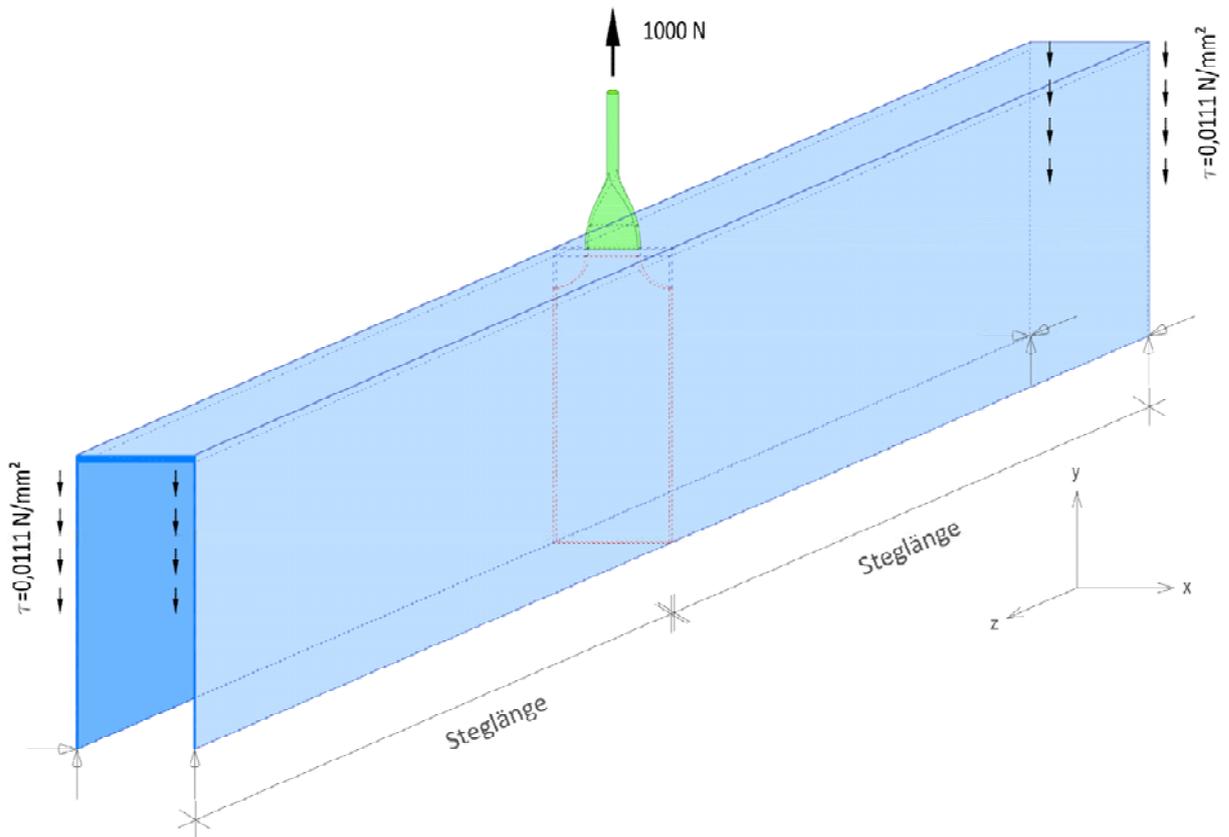


Abbildung 3.6: Randbedingungen Modell "g3"

Ebenfalls konstant, aber nur über die obere Steghälfte, wird die Schubspannung beim Modell "g3" aufgebracht (siehe Abbildung 3.6). Die Schubspannung ergibt sich zu

$$\tau = \frac{1000\text{N}}{4} \cdot \frac{1}{2500\text{mm}/2} \cdot \frac{1}{18\text{mm}} = 0,011111 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Modelle "g2" und "g3" variieren hinsichtlich ihrer Steglängen. Modelle mit den Steglängen 500 mm, 1000 mm, 2000 mm, 4000 mm, 12000 mm und 24000 mm werden untersucht. Es erfolgt ein Vergleich der über die Querscheibendicke gemittelten Schubspannungen des Schnitts "Querscheibe vertikal" (in Abbildung 3.7 mit "QSv" bezeichnet).

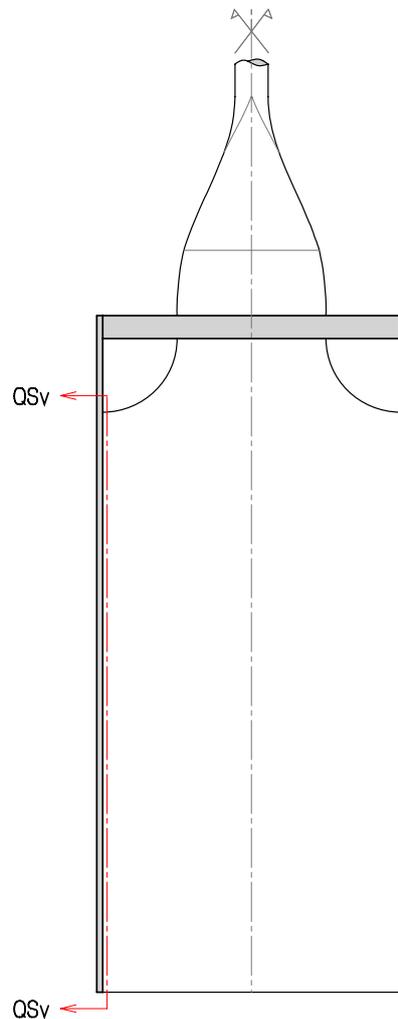


Abbildung 3.7: Schnittführung "Querscheibe vertikal"

Zunächst wurde versucht festzustellen, ab welcher Steglänge die Verteilung der aufgetragenen Schubspannungen am Stegende keinen Einfluss mehr auf den Spannungsverlauf der Schubspannungen im Schnitt "Querscheibe vertikal" haben. Zusätzlich sollte überprüft werden, ab welcher Steglänge die Verteilung der Schubspannungen im Schnitt "Querscheibe vertikal" konvergieren und so eine Grenze für die Steglänge des Modells gezogen werden kann.

In den nachstehenden Tabellen sind die Modellvarianten von "g2" und "g3" beschrieben, wobei die Zahl nach dem Unterstrich im Modellnamen auf die Steglänge hinweist:

Modell „g2“	Steglänge	Schubspannung an den Stegenden
g2_0	500 mm	0,00556 N/mm <sup>2</sup>
g2_1	1000 mm	
g2_2	2000 mm	
g2_4	4000 mm	
g2_8	8000 mm	
g2_12	12000 mm	
g2_24	24000 mm	

Tabelle 3.1: Modellvariationen von "g2"

Modell „g3“	Steglänge	Schubspannung an den Stegenden
g3_0	500 mm	0,01111 N/mm <sup>2</sup>
g3_1	1000 mm	
g3_2	2000 mm	
g3_4	4000 mm	
g3_8	8000 mm	

Tabelle 3.2 Modellvariationen von "g3"

Die Spannungsverläufe der Schubspannung im Schnitt „Querscheibe vertikal“ aller berechneten Modellvariationen „g2“ (durchgezogene Linie) und „g3“ (strichlierte Linie) sind im Diagramm in Abbildung 3.8 ersichtlich.

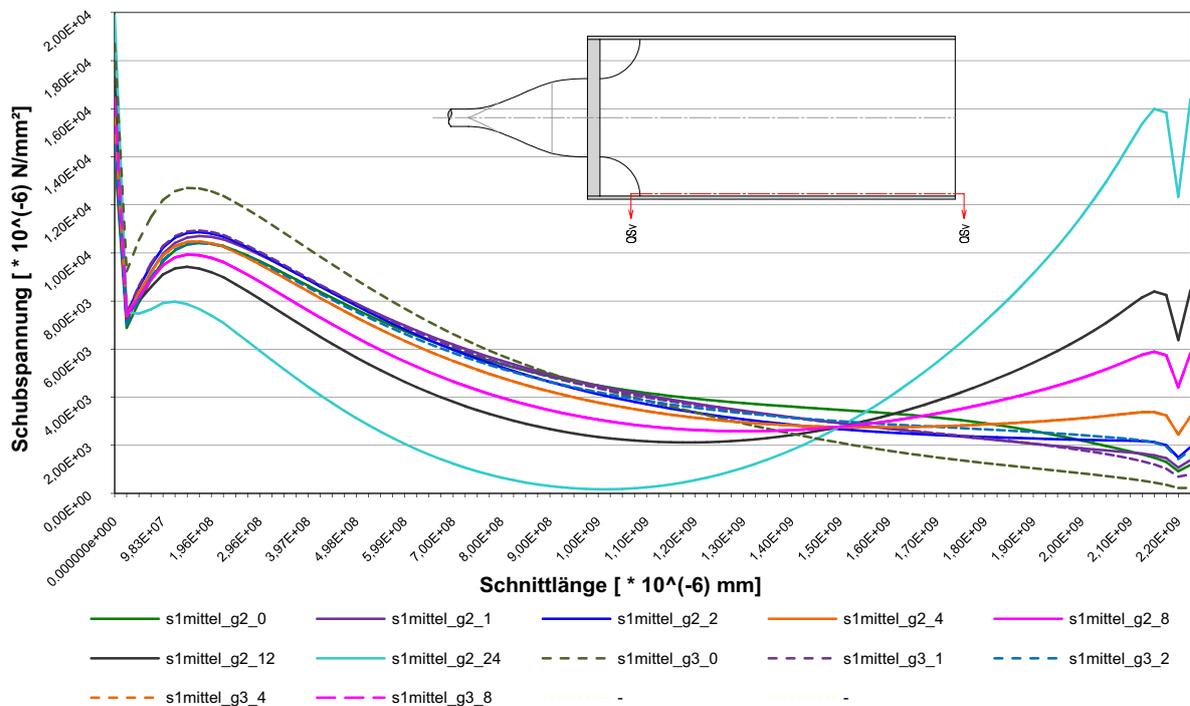


Abbildung 3.8: Schubspannung, Schnitt „Qsv“, Modell "g2" und "g3"

Ab einer Steglänge von 4000 mm (siehe orangefarbene Kurve in Abbildung 3.8) ist der Schubspannungsverlauf im Schnitt „Querscheibe vertikal“ nicht mehr abhängig vom Verlauf der Schubspannungen an den Stegenden. Im Diagramm ist ersichtlich, dass sich ab dieser Steglänge die Kurven des Modells „g2“ mit jenen des Modells „g3“ decken. Die Verläufe der Schubspannungen im Schnitt „Querscheibe vertikal“ nähern sich jedoch mit zunehmender Steglänge nicht gegenseitig an. Je größer die Steglänge, desto „entarteter“ zeigen sich die Schubspannungsverteilungen (siehe türkisfarbene Kurve). Diese Feststellung stimmt zunächst nicht mit der Erwartung der Autorin überein. Das Ziel, eine sinnvolle Steglänge für die Modelle der anschließenden Parameterstudien zu finden, kann mit den Randbedingungen in den Spannungen, wie sie für das Modell „g2“ und „g3“ gewählt wurden, nicht erreicht werden.

### 3.1.2. Modell „h“

Wie in Kapitel 3.1.1 gezeigt wurde, ist das Modell „h“ für die geplanten Parameterstudien nicht geeignet. Für das Modell „h“ wurden andere Randbedingungen gefunden, die zur Erfüllung des Gleichgewichts in Vertikalrichtung beitragen.

Dazu musste zunächst die Tragwirkung der gesamten Stabbogenbrücke im Auge behalten werden. Für den Lastfall Symmetrie befindet sich eine konstant verteilte Querbelastung auf den Querträgern, die „in ausreichend großer Zahl“ zwischen den beiden Versteifungsträgern liegen. In weiterer Folge wird ein Versteifungsträger näherungsweise mit einer konstanten Last, der Auflagerkraft aus den Querträgern, belastet. Die resultierende Kraft im Versteifungsträger wird überwiegend über die Hänger in den Bogen „gehoben“ und nicht vom Versteifungsträger über Biegung abgetragen. Zuletzt leitet der Bogen die Kraft in die Widerlager ab. Stellt man sich den Weg der aufgebrachten Last bis zum Bogen vor, so steht ein Teil der Belastung im Gleichgewicht mit der Kraft, die sich im Hänger befindet.

Da für die rechnerische Untersuchung des Anschlussdetails neben dem Hänger mit Schaufel und Anschlussblech nur der Obergurt und die Stege des Versteifungsträgers sowie die Querscheibe modelliert werden, wird die Last zur Herstellung des Gleichgewichts als Zugspannung am unteren Stegrand in einem definierten Bereich aufgebracht. Im vorliegenden Projekt sind die Hänger rund alle 6 m am Versteifungsträger angeordnet. Für das Modell „i“ wird deshalb eine konstante Zugspannung auf jeweils 3 m Steglänge von der Querscheibe weg am unteren Stegrand aufgebracht (Einflusslänge pro Steglänge für die Zugspannung 3000 mm, Stegdicke 18 mm). Die Zugspannung ergibt sich zu

$$\sigma = \frac{1000N}{4} \cdot \frac{1}{3000mm} \cdot \frac{1}{18mm} = 0,00463 \frac{N}{mm^2}$$

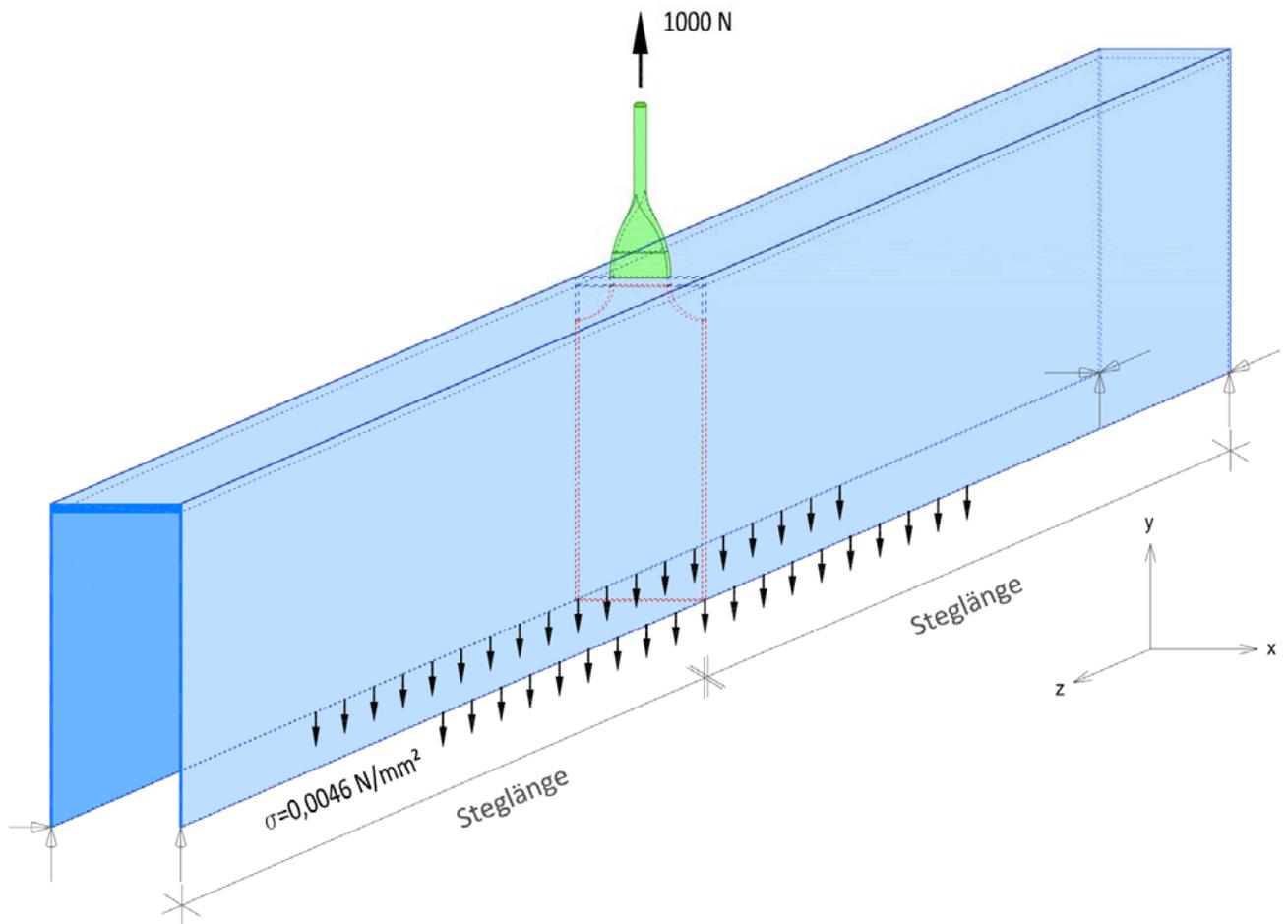


Abbildung 3.9: Randbedingungen Modell „h“

Die Steglänge variiert zwischen 3000 mm und 24000 mm. Die Schubspannungsverteilung im Schnitt „Querscheibe vertikal“ der einzelnen Modelle wird nach durchgeführter Berechnung verglichen. Da das Modell „h“ in den anschließenden Parameterstudien verwendet wird, wird dieses Modell mit den festgelegten Parametern ( $t_{OG} = 70$  mm,  $b_{QS} = 1000$  mm,  $h_{QS} = 3000$  mm) als „h1“ bezeichnet. Die Zahl nach dem Unterstrich (bspw. „h1\_4“) weist auf die Steglänge hin. In der nachstehenden Tabelle sind die Modellvarianten von „h1“ berechnet.

Modell	Steglänge	Zugspannung für Gleichgewicht
h1_3	3000 mm	0,00463 N/mm <sup>2</sup>
h1_4	4000 mm	
h1_8	8000 mm	
h1_12	12000 mm	
h1_24	24000 mm	

Tabelle 3.3: Modellvariationen von "h1"

Wie bereits beim Modell "g" zuvor beschrieben, ist das Ziel der Steglängenvariation, herauszufinden, ab welcher Steglänge die Schubspannungsverläufe im Schnitt "Querscheibe vertikal" konvergieren und sich vergleichmäßigen. Es werden noch zusätzliche vertikale Stegschnitte entlang der Steglänge geführt, um festzustellen, ab welcher Steglänge sich zwischen Querscheibenanschluss und Stegende ein linearer Spannungsverlauf für die Normalspannungen bzw. ein parabelähnlicher Verlauf für die Schubspannungen einstellt.

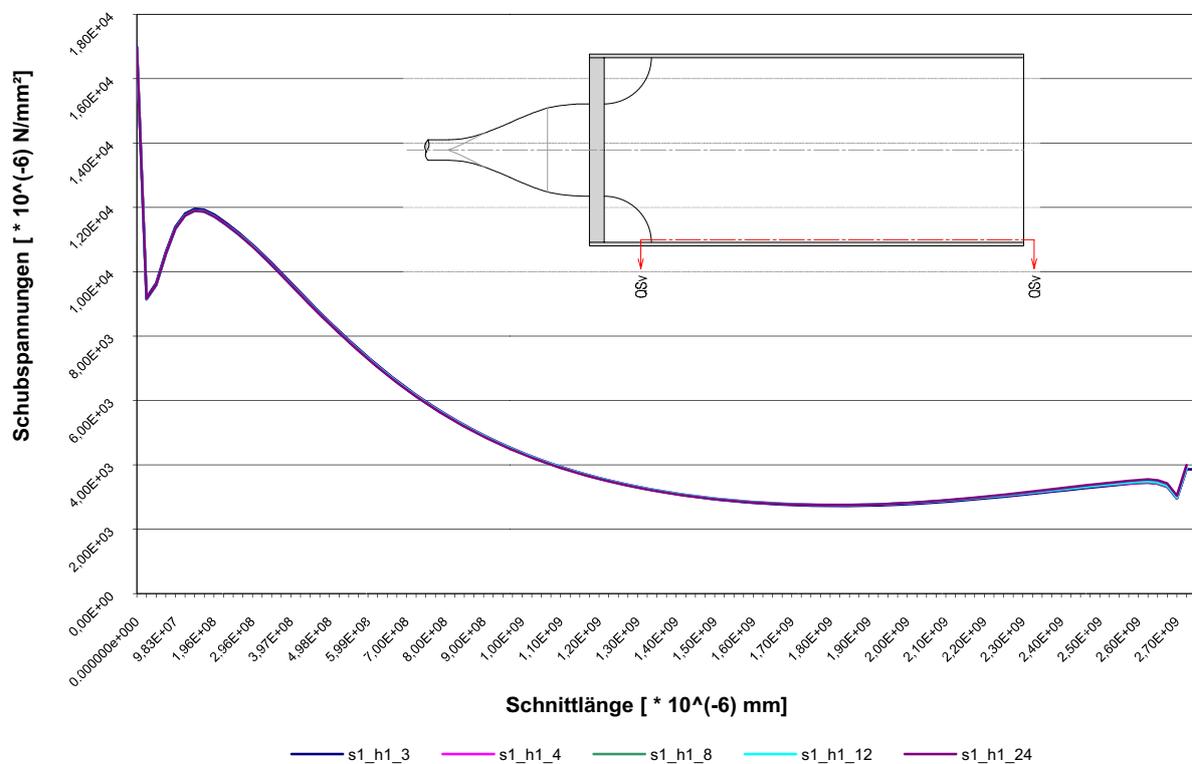


Abbildung 3.10: Schubspannung, Schnitt „Qsv“, Modell "h1"

Anhand der berechneten und ausgewiesenen Spannungsverläufe des Schnitts „Querscheibe vertikal“ zeigt sich, dass die Steglänge bei diesem Modell keinen Einfluss auf das Ergebnis im gewählten Schnitt hat (siehe Abbildung 3.10). Um die zweite der genannten Anforderungen an das Modell zu erfüllen (Bereich mit Spannungsverteilung gemäß Stabtheorie bei Biegebeanspruchung), ist eine Steglänge von 12 m erforderlich. Bei dieser Länge stellt sich im Stegbereich zwischen Querscheibe und Stegende ein Bereich ein, bei dem die erwarteten Verläufe für Schubspannung und Normalspannung auftreten, das heißt linearer Verlauf der Normalspannungen und parabelförmiger Verlauf der Schubspannungen. Das Modell mit der Steglänge 12 m, den Randbedingungen und den gewählten Parametern vom Modell “h” (ergibt die Modellbezeichnung „h1\_12“) bildet den Ausgangspunkt für die nachfolgenden Parameterstudien.

## 4 Parameter

In den Studien werden drei geometrische Größen des Details variiert, alle anderen Abmessungen bleiben in den untersuchten Modellen konstant. Die Angaben aus dem Projekt der ÖBB werden als Anhaltspunkt gewählt, die in etwa den Bereich der Parameter angeben. In Abbildung 4.1 sind die untersuchten Parameter grafisch dargestellt.

### 4.1 Parameter Querscheibenbreite “ $b_{QS}$ ” bzw. Freischnittsradius “ $r_{FS}$ ”

Der zu einer „Schaufel“ auseinandergeschmiedete Hänger endet in einem Anschlussblech mit der Breite  $b_{AB} = 450$  mm, das an der Oberseite des Obergurts angeschweißt ist. Auf der Unterseite des Obergurtes befindet sich die Querscheibe, welche an den oberen beiden Ecken freigeschnitten ist. Der Freischnittsradius ergibt sich aus der halben Differenz der Obergurtbreite und der Breite des Anschlussblechs. Es werden ausschließlich Modelle untersucht, deren Querscheibenbreiten größer als die Anschlussblechbreite sind.

Grenzen Querscheibenbreite  $b_{QS}$ :  $500 \text{ mm} \leq b_{QS} \leq 1000 \text{ mm}$

Grenzen Freischnittsradius  $r_{FS}$ :  $25 \text{ mm} \leq r_{FS} \leq 275 \text{ mm}$

Grenzen Verhältnis Anschlussblechbreite zu Querscheibenbreite  $b_{AB}/b_{QS}$ :  $0,90 \geq b_{AB}/b_{QS} \geq 0,45$

### 4.2 Parameter Querscheibenhöhe “ $h_{QS}$ ”

Die Querscheibenhöhe wird von der Unterkante der Querscheibe bis zur Unterkante des Obergurts gemessen.

Grenzen Querscheibenhöhe  $h_{QS}$ :  $1500 \text{ mm} \leq h_{QS} \leq 3000 \text{ mm}$

Grenzen Verhältnis Querscheibenbreite zu Querscheibenhöhe  $b_{QS}/h_{QS}$ :  $0,667 \geq b_{QS}/h_{QS} \geq 0,167$

### 4.3 Parameter Obergurtdicke “ $t_{OG}$ ”

Im Projekt der ÖBB weist der Obergurt Dicken zwischen 70 mm und 90 mm auf. Um einen breiteren Bereich abzudecken, werden in den Parameterstudien Obergurtdicken zwischen 35 mm und 105 mm untersucht.

Grenzen Obergurtdicke  $t_{OG}$ :  $35 \text{ mm} \leq t_{OG} \leq 105 \text{ mm}$

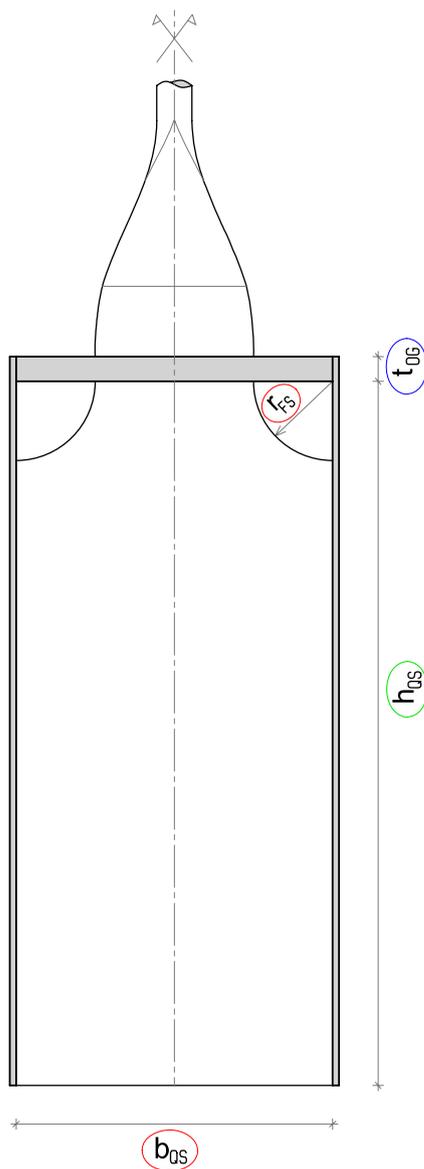


Abbildung 4.1: Der Studie zu Grunde liegende Parameter

### 4.4 Modelle für die Parameterstudie

Um alle untersuchten Modelle sinnvoll geordnet in einer Tabelle unterzubringen, müsste diese dreidimensional sein. Für die Darstellung in der vorliegenden Arbeit werden die Modelle entsprechend ihrer Eigenschaften sortiert und wie folgt zusammengefasst:

Jedes Modell wird mit einem Buchstaben und einer Zahl definiert. Die Zahl weist auf den Parameter Obergurtbreite bzw. Freischnittradius hin. Das heißt, Modelle mit der gleichen Zahl im Modellnamen haben dieselbe Querscheibenbreite bzw. denselben Freischnittradius. Einzelne Modelle bilden eine Modellreihe, die durch lateinische Buchstaben gekennzeichnet ist, wobei der Parameter Querscheibenhöhe innerhalb einer Modellreihe konstant bleibt (selber Buchstabe heißt gleiche Querscheibenhöhe). Die Summe der Modellreihen mit gleicher Obergurtdicke wird als Modellsatz bezeichnet.

Es entstehen Modellsätze, welche Modellreihen beinhalten, die wiederum aus einzelnen Modellen bestehen. Die untersuchten Modelle sind in den nachstehenden Tabellen beschrieben und im Anhang A5 bis A8 grafisch dargestellt.

#### Modellsatz $\alpha$ (Obergurtdicke 35 mm)

Modelle		Querscheibenbreite (Freischnittradius)						Modellreihe
		1000mm (275mm)	900mm (225mm)	800 mm (175mm)	700mm (125mm)	600mm (75mm)	500mm (25mm)	
Quersch.-höhe	3000mm	n 1	n 4	n 2	n 5	n 3	n 7	n
	1500mm	r 1	r 4	r 2	r 5	r 3	r 7	r

Tabelle 4.1: Modellsatz  $\alpha$

#### Modellsatz $\beta$ (Obergurtdicke 52,5 mm)

Modelle		Querscheibenbreite (Freischnittradius)						Modellreihe
		1000mm (275mm)	900mm (225mm)	800 mm (175mm)	700mm (125mm)	600mm (75mm)	500mm (25mm)	
Qsh.	3000mm	m 1	m 4	m 2	m 5	m 3	m 7	m

Tabelle 4.2: Modellsatz  $\beta$

Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke 70mm)

Modelle		Querscheibenbreite						Modellreihe
		Freischnitttradius						
		1000mm 275mm	900mm 225mm	800 mm 175mm	700mm 125mm	600mm 75mm	500mm 25mm	
Querscheibenhöhe	3000mm	h 1	h 4	h 2	h 5	h 3	h 7	h
	2750mm	hi 1	-	-	-	-	-	hi
	2500mm	i 1	i 4	i 2	i 5	i 3	i 7	i
	2250mm	ik 1	-	-	-	-	-	ik
	2000mm	k 1	k 4	k 2	k 5	k 3	k 7	k
	1750mm	kl 1	-	kl 2	-	-	-	kl
	1500mm	l 1	l 4	l 2	l 5	l 3	l 7	l

Tabelle 4.3: Modellsatz  $\gamma$ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke 105mm)

Modelle		Querscheibenbreite						Modellreihe
		Freischnitttradius						
		1000mm 275mm	900mm 225mm	800 mm 175mm	700mm 125mm	600mm 75mm	500mm 25mm	
Quersch.-höhe	3000mm	t 1	t 4	t 2	t 5	t 3	t 7	t
	1500mm	x 1	x 4	x 2	x 5	x 3	x 7	x

Tabelle 4.4: Modellsatz  $\delta$ 

Da zuerst mit eingehender Untersuchung des Modellsatzes  $\gamma$  (Obergurtdicke 70 mm) begonnen wurde und sich dabei verschiedene Regelmäßigkeiten und Tendenzen in den Ergebnissen zeigten, wurde die Modellanzahl in anderen Modellsätzen reduziert. Andererseits sind Modelle eingefügt worden, wenn dies im Zuge der Ergebnisauswertung erforderlich wurde.

## 5 Ermittlung und Auswertung der Spannungsverläufe in ausgewählten Schnitten und Entwicklung von Rechenmodellen

Um Rechenmodelle für die Berechnung der maximalen Spannungen (und in weiterer Folge für die Dimensionierung der Schweißnähte) in den ausgewählten Schnitten entwickeln zu können, sind die Spannungsverläufe der FE-Modelle in den entsprechenden Schnitten erforderlich.

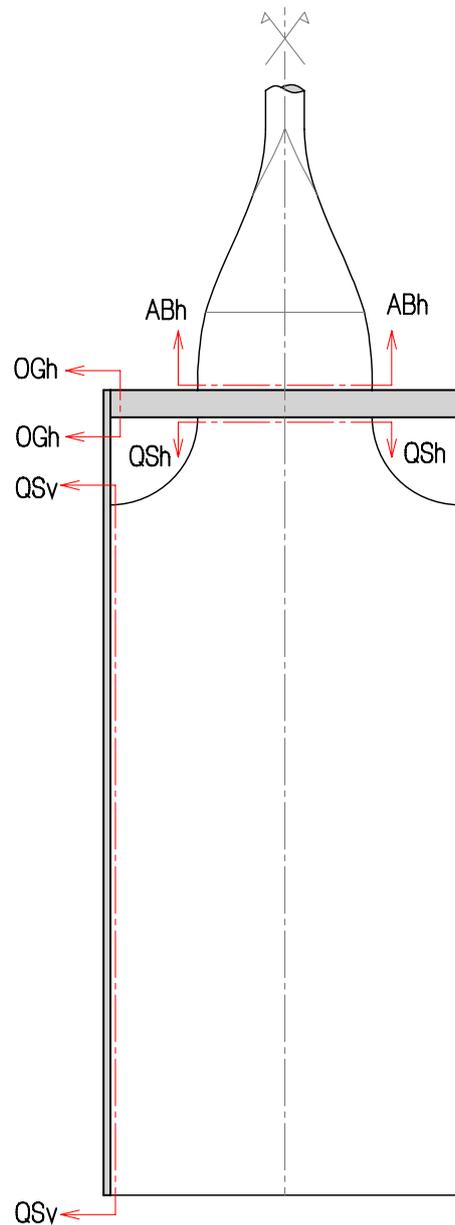


Abbildung 5.1: Betrachtete Schnitte (Querschnitt)

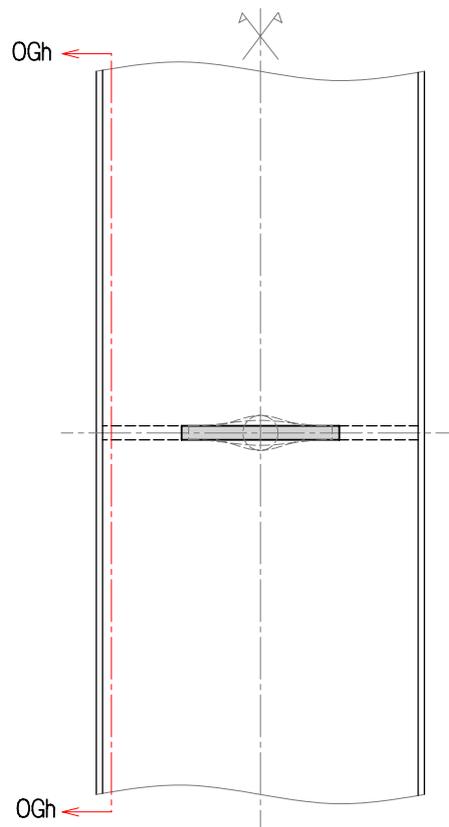


Abbildung 5.2: Betrachtete Schnitte (Horizontalschnitt)

### 5.1 Beschreibung der Schnitte und Ermittlung der Spannungsverläufe

Im Anschluss an die Berechnung der zuvor beschriebenen Modelle werden in den Schnitten „Querscheibe vertikal“, „Querscheibe horizontal“, „Anschlussblech horizontal“ und „Obergurt horizontal“ die Schubspannungen bzw. Normalspannungen ausgegeben. Die Schnitte werden jeweils eine Knotenreihe von den gemeinsamen Knoten zweier Bauteile (bspw. Steg und Querscheibe; Obergurt und Querscheibe; Obergurt und Anschlussblech; Obergurt und Steg) entfernt geführt. Die Spannungsverteilung über die Dicke des entsprechenden Bauteils ist im Allgemeinen nicht konstant, für die Bemessung der Schweißnaht ist aber das Spannungsmittel über die Bauteildicke ausreichend. In den folgenden Diagrammen und Tabellen sind die Spannungen über die Dicke des Bauteils aufintegriert worden (Anwendung der Trapezregel) und nur noch die Mittelwerte angegeben.

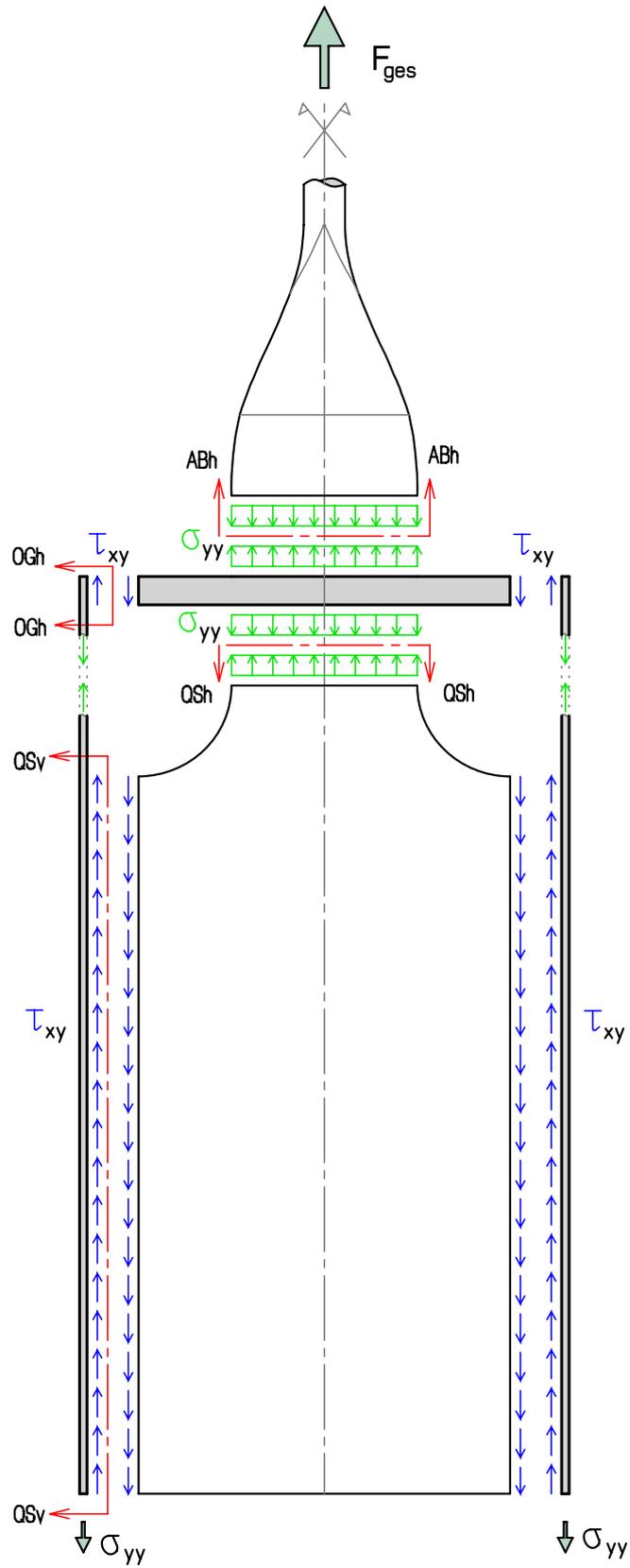


Abbildung 5.3: Schnittufer mit Spannungsgrößen

### Schnitt „Querscheibe vertikal“ („QSV“)

Die Querscheibe besteht in Dickenrichtung aus vier Volumenelementen, weshalb die Schubspannungen  $\tau_{xy}$  entlang der fünf Knotenreihen im Schnitt ausgewertet und dann zur Spannung  $\tau_{xy,mittel}$  umgerechnet werden.

### Schnitt „Querscheibe horizontal“ („QSh“)

Wie bereits beschrieben, besteht die Querscheibe in Dickenrichtung aus vier Volumenelementen. Nach Ausgabe der Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  für die fünf Knotenreihen im Schnitt wird die Spannung  $\sigma_{yy,mittel}$  berechnet.

### Schnitt „Anschlussblech horizontal“ („ABh“)

Das Anschlussblech weist wie die Querscheibe in Dickenrichtung vier Elementschichten auf. Die Normalspannung  $\sigma_{yy,mittel}$  wird analog jener im Schnitt „Querscheibe horizontal“ berechnet.

### Schnitt „Obergurt horizontal“ („OGh“)

Der Obergurt hat je nach Modellsatz eine unterschiedliche Anzahl an Elementen in Dickenrichtung, weil hier die Elementhöhe mit 17,5 mm für alle Modelle beibehalten wird.

Modellsatz	Obergurtdicke	Elementanzahl in Dickenrichtung
$\alpha$	35 mm	2
$\beta$	52,5 mm	3
$\gamma$	70 mm	4
$\delta$	105 mm	6

Tabelle 5.1: Obergurt Elementteilung

Entsprechend der vorliegenden Volumenelementanzahl in Obergurtdickenrichtung werden im Schnitt die Knotenreihen ausgewertet und die Berechnungen der Schubspannungen  $\tau_{xy,mittel}$  durchgeführt.

Da in der Arbeit nur die Spannungen  $\sigma_{yy,mittel}$  und  $\tau_{xy,mittel}$  verwendet werden, besteht keine Verwechslungsgefahr wenn einfachheitshalber der Index weggelassen wird:

$\sigma$  entspricht  $\sigma_{yy,mittel}$

$\tau$  entspricht  $\tau_{xy,mittel}$

## **5.2 Lastableitung der Zugkraft vom Hänger in die Stege**

In jedem Schnitt werden als Kontrolle der berechneten Spannungen die Spannungsverläufe über die Schnittfläche aufintegriert. Die Hängerkraft (Einheitskraft 1000N) wird zum Teil über den Obergurt in die Stege eingeleitet und geht zum anderen Teil über die Querscheibe in die Stege. Die Summe der Kraft im Schnitt „Querscheibe horizontal“ und die Kraft im Schnitt „Obergurt horizontal“ (mit Berücksichtigung der Symmetrie) ergibt die Hängerkraft. Außerdem muss die Kraft im Schnitt „Querscheibe horizontal“ gleich jener im Schnitt „Querscheibe vertikal“ (mit Berücksichtigung der Symmetrie) sein.

Vereinfacht wird dies mit Hilfe einer Formel ausgedrückt:

$$F_{\text{ges}} = F_{\text{OG}} + F_{\text{QS}}$$

$F_{\text{ges}}$ : Hängerkraft

$F_{\text{OG}}$ : Anteil der Hängerkraft, die über den Obergurt in die Stege geleitet wird

$F_{\text{QS}}$ : Anteil der Hängerkraft, die über die Querscheibe in die Stege geleitet wird

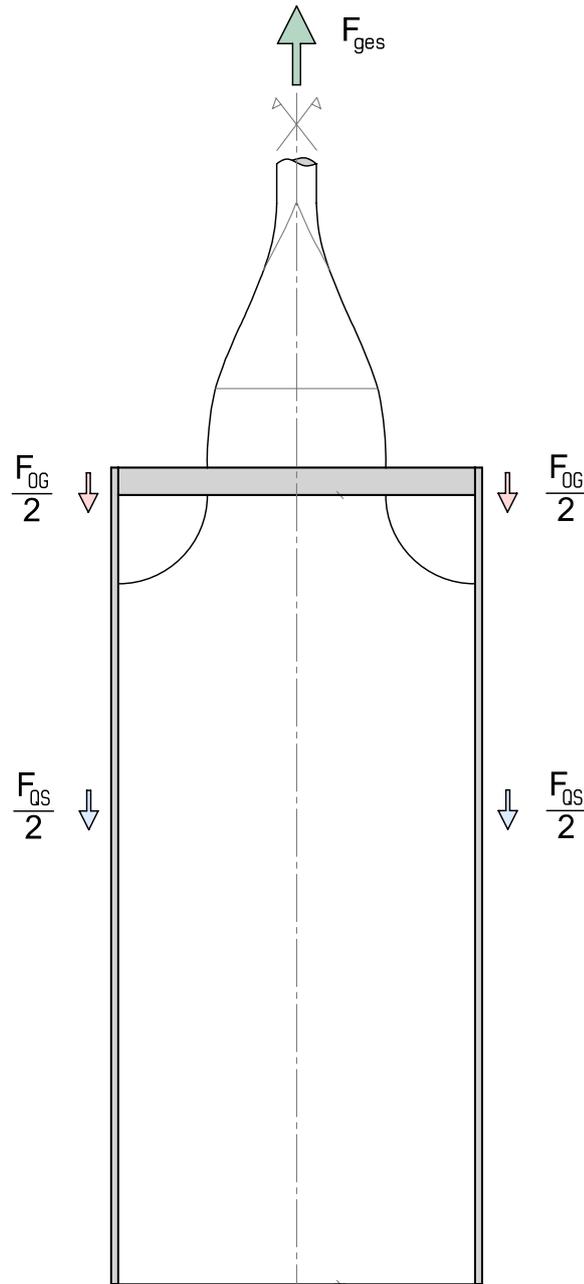


Abbildung 5.4: Lastableitung im Detail

### 5.3 Rechenmodell für den Faktor $f$

Bevor die Erstellung von Rechenmodellen für eine vereinfachte Spannungsverteilung in den ausgewählten Schnitten vorgenommen wird, ist von Interesse, wie sich die Aufteilung von der Hängerkraft  $F_{ges}$  in die Kraftanteile  $F_{OG}$  und  $F_{QS}$  in den einzelnen Modellen darstellt. Erstes Etappenziel dieses Kapitels ist die Bestimmung des Faktors  $f$ , der das Verhältnis  $F_{QS}$  zu  $F_{ges}$  in Abhängigkeit von den Parametern angibt.

Der Faktor  $f$  wird für alle untersuchten Modelle berechnet (in Anhang A9 bis A11 befinden sich ausführlichere Tabellen, die auch alle Interpolationen zwischen den Modellen enthalten):

◆ Modellsatz  $\alpha$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 35$  mm)

Modell	Quer- scheiben- breite	Quer- scheiben- höhe	Anschluss- blech- breite	Frei- schnitt- radius	Hänger- kraft	Kraft über Querscheibe in Stege	Kraft über Obergurt in Stege	$b_{AB}/b_{QS}$	$f = F_{QS}/F_{ges}$
	$b_{QS}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$b_{AB}$ [mm]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{ges}$ [N]	$F_{QS}$ [N]	$F_{OG}$ [N]		
<b>r1</b>	1000	1,50	450	275	1000	979	21	<b>0,450</b>	<b>0,979</b>
<b>n1</b>	1000	3,00	450	275	1000	983	17	<b>0,450</b>	<b>0,983</b>
<b>l4</b>	900	1,50	450	225	1000	973	27	<b>0,500</b>	<b>0,973</b>
<b>n4</b>	900	3,00	450	225	1000	978	22	<b>0,500</b>	<b>0,978</b>
<b>r2</b>	800	1,50	450	175	1000	962	38	<b>0,563</b>	<b>0,962</b>
<b>n2</b>	800	3,00	450	175	1000	970	30	<b>0,563</b>	<b>0,970</b>
<b>r5</b>	700	1,50	450	125	1000	942	58	<b>0,643</b>	<b>0,942</b>
<b>n5</b>	700	3,00	450	125	1000	949	51	<b>0,643</b>	<b>0,949</b>
<b>r3</b>	600	1,50	450	75	1000	900	100	<b>0,750</b>	<b>0,900</b>
<b>n3</b>	600	3,00	450	75	1000	909	91	<b>0,750</b>	<b>0,909</b>
<b>r7</b>	500	1,50	450	25	1000	822	178	<b>0,900</b>	<b>0,822</b>
<b>n7</b>	500	3,00	450	25	1000	832	168	<b>0,900</b>	<b>0,832</b>

Tabelle 5.2: Berechnung des Faktors  $f$ , Modellsatz  $\alpha$

◆ Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 70$  mm)

Modell	Quer- scheiben- breite	Quer- scheiben- höhe	Anschluss- blech- breite	Frei- schnitt- radius	Hänger- kraft	Kraft über Querscheibe in Stege	Kraft über Obergurt in Stege	$b_{AB}/b_{QS}$	$f = F_{QS}/F_{ges}$
	$b_{QS}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$b_{AB}$ [mm]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{ges}$ [N]	$F_{QS}$ [N]	$F_{OG}$ [N]		
<b>l1</b>	1000	1,50	450	275	1000	879	121	<b>0,450</b>	<b>0,879</b>
<b>kl1</b>	1000	1,75	450	275	1000	885	115	<b>0,450</b>	<b>0,885</b>
<b>k1</b>	1000	2,00	450	275	1000	888	112	<b>0,450</b>	<b>0,888</b>
<b>ik1</b>	1000	2,25	450	275	1000	891	109	<b>0,450</b>	<b>0,891</b>
<b>i1</b>	1000	2,50	450	275	1000	892	108	<b>0,450</b>	<b>0,892</b>
<b>hi1</b>	1000	2,75	450	275	1000	895	105	<b>0,450</b>	<b>0,895</b>
<b>h1</b>	1000	3,00	450	275	1000	898	102	<b>0,450</b>	<b>0,898</b>
<b>l4</b>	900	1,50	450	225	1000	860	140	<b>0,500</b>	<b>0,860</b>
<b>k4</b>	900	2,00	450	225	1000	868	132	<b>0,500</b>	<b>0,868</b>
<b>i4</b>	900	2,50	450	225	1000	871	129	<b>0,500</b>	<b>0,871</b>
<b>h4</b>	900	3,00	450	225	1000	873	127	<b>0,500</b>	<b>0,873</b>
<b>l2</b>	800	1,50	450	175	1000	824	176	<b>0,563</b>	<b>0,824</b>
<b>kl2</b>	800	1,75	450	175	1000	830	170	<b>0,563</b>	<b>0,830</b>
<b>k2</b>	800	2,00	450	175	1000	832	168	<b>0,563</b>	<b>0,832</b>
<b>i2</b>	800	2,50	450	175	1000	836	164	<b>0,563</b>	<b>0,836</b>
<b>h2</b>	800	3,00	450	175	1000	846	154	<b>0,563</b>	<b>0,846</b>
<b>l5</b>	700	1,50	450	125	1000	784	216	<b>0,643</b>	<b>0,784</b>
<b>k5</b>	700	2,00	450	125	1000	792	208	<b>0,643</b>	<b>0,792</b>
<b>i5</b>	700	2,50	450	125	1000	793	207	<b>0,643</b>	<b>0,793</b>
<b>h5</b>	700	3,00	450	125	1000	799	201	<b>0,643</b>	<b>0,799</b>
<b>l3</b>	600	1,50	450	75	1000	728	272	<b>0,750</b>	<b>0,728</b>
<b>k3</b>	600	2,00	450	75	1000	736	264	<b>0,750</b>	<b>0,736</b>
<b>i3</b>	600	2,50	450	75	1000	740	260	<b>0,750</b>	<b>0,740</b>
<b>h3</b>	600	3,00	450	75	1000	748	252	<b>0,750</b>	<b>0,748</b>
<b>l7</b>	500	1,50	450	25	1000	643	357	<b>0,900</b>	<b>0,643</b>
<b>k7</b>	500	2,00	450	25	1000	651	349	<b>0,900</b>	<b>0,651</b>
<b>i7</b>	500	2,50	450	25	1000	655	345	<b>0,900</b>	<b>0,655</b>
<b>h7</b>	500	3,00	450	25	1000	658	342	<b>0,900</b>	<b>0,658</b>

Tabelle 5.3: Berechnung des Faktors  $f$ , Modellsatz  $\gamma$

◆ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 105 \text{ mm}$ )

Modell	Querscheibenbreite	Querscheibenhöhe	Anschlussblechbreite	Freischnittradius	Kraft im Hänger	Kraft über Querscheibe in Stege	Kraft über Obergurt in Stege	$b_{AB}/b_{QS}$	$f = F_{QS}/F_{ges}$
	$b_{QS} [mm]$	$h_{QS} [m]$	$b_{AB} [mm]$	$r_{FS} [mm]$	$F_{ges} [N]$	$F_{QS} [N]$	$F_{OG} [N]$		
<b>x1</b>	1000	1,50	450	275	1000	723	277	<b>0,450</b>	<b>0,723</b>
<b>t1</b>	1000	3,00	450	275	1000	746	254	<b>0,450</b>	<b>0,746</b>
<b>x4</b>	900	1,50	450	225	1000	686	314	<b>0,500</b>	<b>0,686</b>
<b>t4</b>	900	3,00	450	225	1000	715	285	<b>0,500</b>	<b>0,715</b>
<b>x2</b>	800	1,50	450	175	1000	654	346	<b>0,563</b>	<b>0,654</b>
<b>t2</b>	800	3,00	450	175	1000	672	328	<b>0,563</b>	<b>0,672</b>
<b>x5</b>	700	1,50	450	125	1000	608	392	<b>0,643</b>	<b>0,608</b>
<b>t5</b>	700	3,00	450	125	1000	631	369	<b>0,643</b>	<b>0,631</b>
<b>x3</b>	600	1,50	450	75	1000	550	450	<b>0,750</b>	<b>0,550</b>
<b>t3</b>	600	3,00	450	75	1000	584	416	<b>0,750</b>	<b>0,584</b>
<b>x7</b>	500	1,50	450	25	1000	510	490	<b>0,900</b>	<b>0,510</b>
<b>t7</b>	500	3,00	450	25	1000	529	471	<b>0,900</b>	<b>0,529</b>

Tabelle 5.4: Berechnung des Faktors  $f$ , Modellsatz  $\delta$

Anhand der Tabellen zeigt sich, dass der Faktor  $f$  deutlich von den Parametern Obergurtdicke ( $t_{OG}$ ) und Querscheibenbreite ( $b_{QS}$ ) bzw. Freischnittradius ( $r_{FS}$ ), aber im Vergleich dazu nur wenig vom Parameter Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ) abhängt. Die erste Vereinfachung vor der Erstellung eines Diagramms ist, den Faktor  $f$  vom Parameter Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ) unabhängig zu machen und nur die Modelle mit der Querscheibenhöhe 3 m auszuwerten. Damit sind alle Modelle mit derselben Obergurtdicke und Querscheibenbreite abgedeckt. Bei der Ermittlung von  $F_{QS}$  ( $= f \cdot F_{ges}$ ) liegt diese Vereinfachung somit auf der „sicheren Seite“. Bei der Berechnung von  $F_{OG}$  aufgrund der Kenntnis von  $F_{QS}$  über den Faktor  $f$  muss die entstandene Abweichung jedoch berücksichtigt werden, um mit dieser Angabe nicht auf der „unsicheren Seite“ zu liegen.

Nach Eintragung der Ergebnisse der FE-Analyse in ein Diagramm können die entstandenen Kurven durch parallele Geraden angenähert werden (siehe Abbildung 5.5). Der Faktor  $f$  kann maximal den Wert 1,00 annehmen.

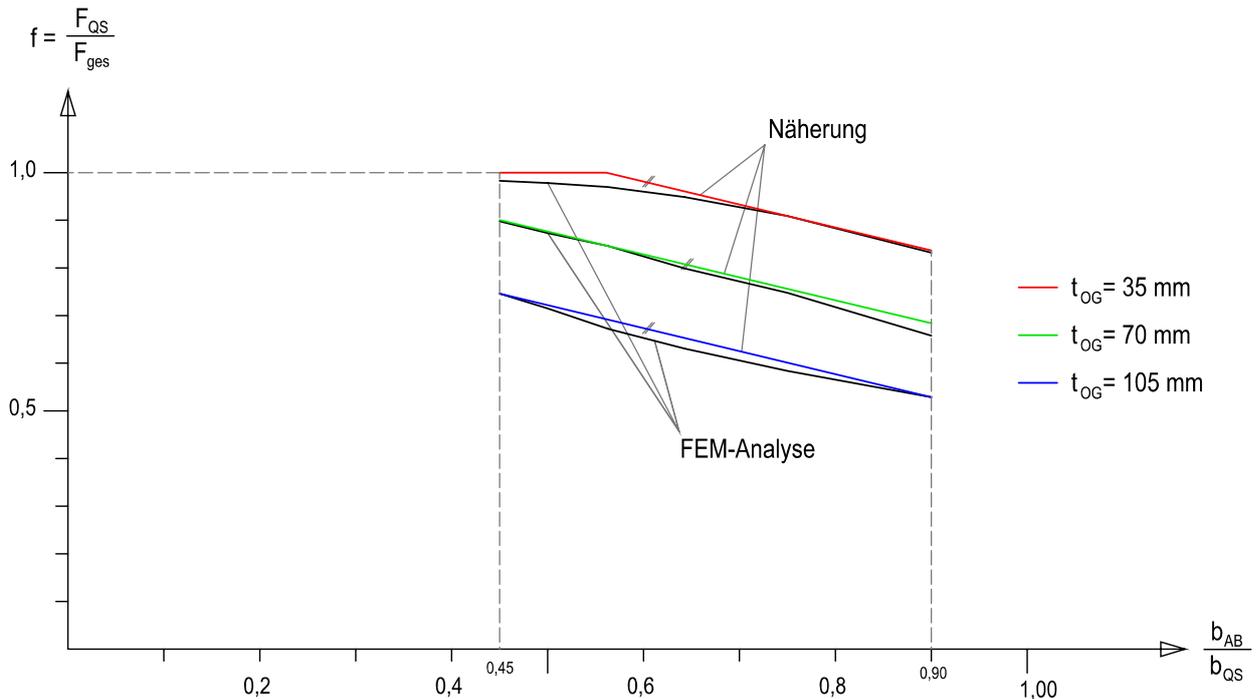


Abbildung 5.5: Ermittlung des Faktors f

Beschreibung der Näherungsgeraden mit der Funktion  $y = k \cdot x + d$ :

$$f = -0,482 \cdot (b_{AB}/b_{QS}) + d$$

für  $t_{OG} = 105\text{mm}$ :  $d = 0,96$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,90$

für  $t_{OG} = 70\text{mm}$ :  $d = 1,12$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,90$

für  $t_{OG} = 35\text{mm}$ :  $d = 1,27$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,56$

$f = 1,0$   $0,56 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,90$

$b_{AB}$ : Breite Anschlussblech  $b_{AB} = 450 \text{ mm}$

$b_{QS}$ : Breite Querscheibe  $500 \text{ mm} \leq b_{QS} \leq 1000 \text{ mm}$

$t_{OG}$ : Obergurtdicke  $35 \text{ mm} \leq t_{OG} \leq 105 \text{ mm}$

Wenn die Geometrie des Details festgelegt ist, kann das Verhältnis  $b_{AB}/b_{QS}$  berechnet und je nach Obergurtdicke der Faktor f im Diagramm abgelesen bzw. mit Hilfe der Funktionsgleichungen berechnet werden. Ermittlung von  $F_{QS}$  und  $F_{OG}$  bei Kenntnis von f:

$$F_{QS} = f \cdot F_{ges}$$

$$F_{OG} = (1,05 - f) \cdot F_{ges}$$

$F_{ges}$ : Gesamtkraft im Hänger

$F_{OG}$ : Kraft, die über den Obergurt in die Stege geleitet wird

$F_{QS}$ : Kraft, die über die Querscheibe in die Stege geleitet wird

f: Faktor aus Diagramm/ Funktionsgleichung

Da die maximale Abweichung von der Näherung zu den Ergebnissen der FE-Analyse rund 3,5% beträgt, wird für die Berechnung von  $F_{OG}$  eine Reserve von 5% in den Rechenansatz mit hineingenommen, der die erwähnte Abweichung zwischen Näherung und FE-Analyse abdeckt, um nicht mit  $F_{OG}$  auf der „unsicheren Seite“ zu liegen.

Es wird für alle untersuchten Fälle mit Hilfe der oben angeführten Näherung der Faktor  $f$  berechnet und in einem Diagramm (siehe Abbildung 5.6) mit dem Wert aus der FE-Analyse in Beziehung gebracht. Die Ergebnisse des Rechenmodells werden auf der Horizontalachse, jene aus der FE-Analyse auf der Vertikalachse aufgetragen. Befinden sich alle Diagrammpunkte auf oder unterhalb der Linie zwischen den Wertepaaren (0|0) und (1|1), so liegt man als Anwender des Rechenmodells mit seinen Ergebnissen für den Faktor  $f$  auf der „sicheren Seite“. Aus dem Diagramm ist abzulesen, wie gut die Näherung mit der FE-Analyse übereinstimmt (das heißt, wie nahe die Diagrammpunkte an der Geraden liegen).

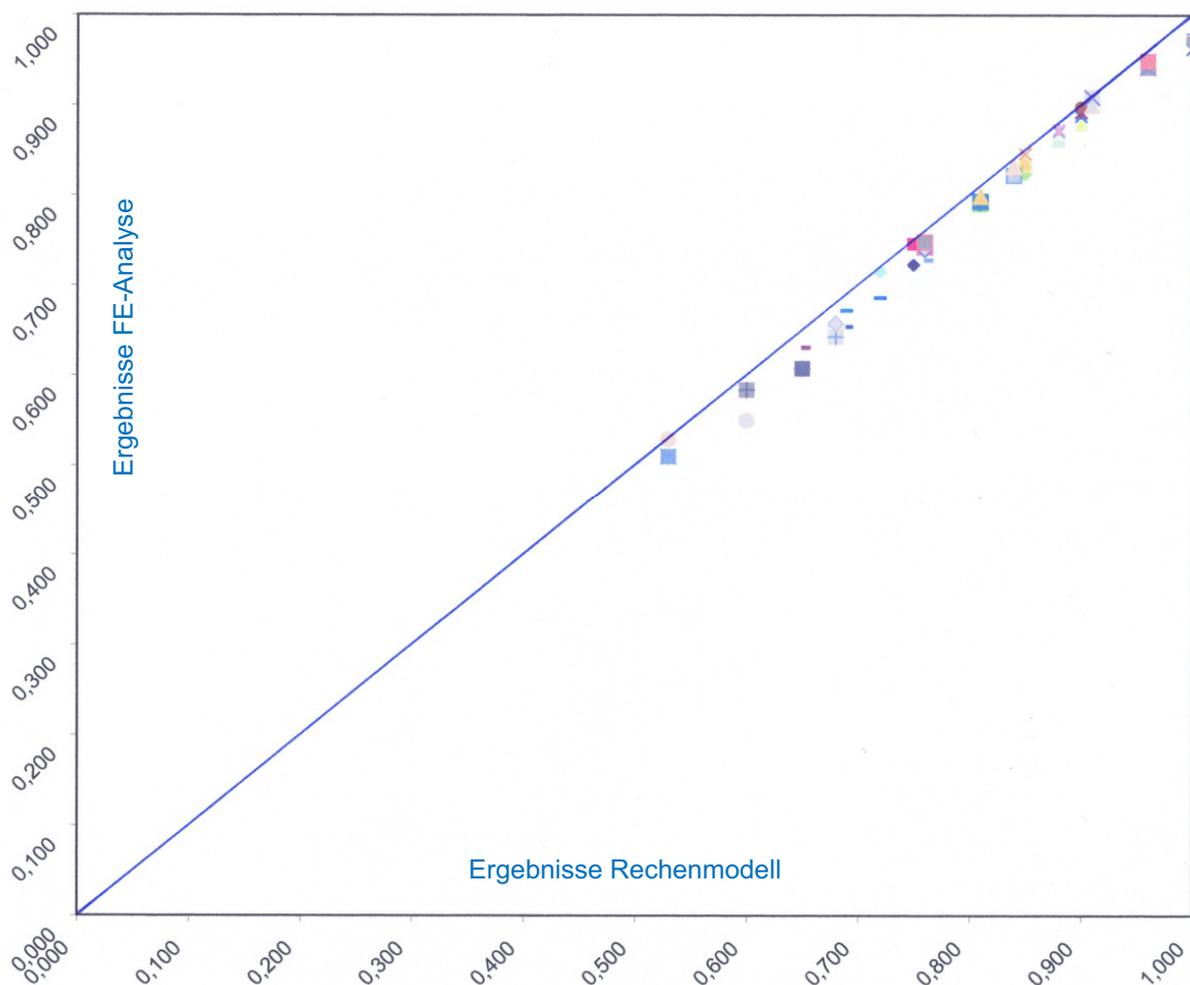


Abbildung 5.6: Ergebnisse Faktor  $f$

#### 5.4 Schnitt „Querscheibe vertikal“ – Spannungsverteilung

Der Schnitt „Querscheibe vertikal“ befindet sich ein Element von jenem Querscheibenrand entfernt, der an den Steg grenzt. Der in diesem Schnitt vorhandene Anteil der Hängerkraft wird mit Schubspannungen übertragen. Für die Bemessung der Schweißnaht (doppelte Kehlnaht) ist die maximale Schubspannung erforderlich.

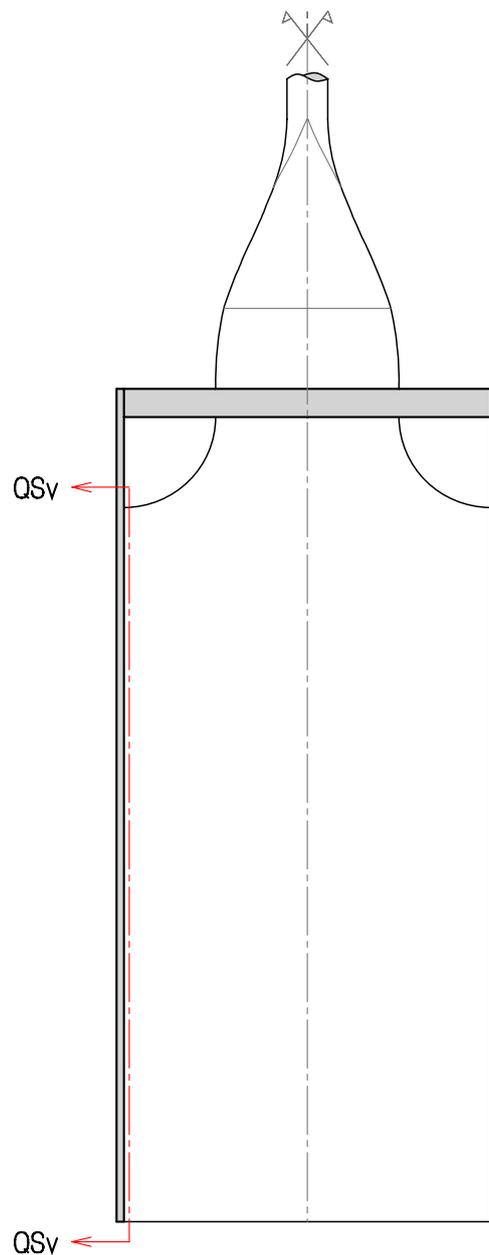


Abbildung 5.7: Schnitt „Querschnitt vertikal“

Durch die Auswertung der Schubspannungsverteilungen der FE-Modelle in diesem Schnitt möchte die Autorin die Zusammenhänge zwischen den Parametern und den maximalen Schubspannungen herausfinden. Mit Kenntnis dieser Zusammenhänge wird ein einfaches Rechenmodell aufgestellt, sodass geometrisch einfache Schubspannungsverläufe (bspw. Dreieck, Rechteck oder Trapez) berechnet werden können, welche

die Schubspannungsmaxima abdecken. Ist die maximale Schubspannung bekannt, kann die Schweißnaht im Schnitt „Querscheibe vertikal“ bemessen werden.

Aufgrund der Fülle von untersuchten Modellen sind in den folgenden Diagrammen nur einige Schubspannungsverteilungen ausgewählt (die Ergebnisse aller FE-Modelle sind für die Untersuchung in Tabellen zusammengefasst). Ein Diagramm beinhaltet die ermittelten Schubspannungsverläufe einer Modellreihe, wobei die durchgezogenen Linien die Ergebnisse der FE-Analyse aufzeigen. Zur besseren Orientierung, wie die Spannungsverteilungen dem Schnitt zuzuordnen sind, befindet sich im ersten Diagramm eine kleine Abbildung des Modells in entsprechender Lage und mit eingezeichneter Schnittführung.

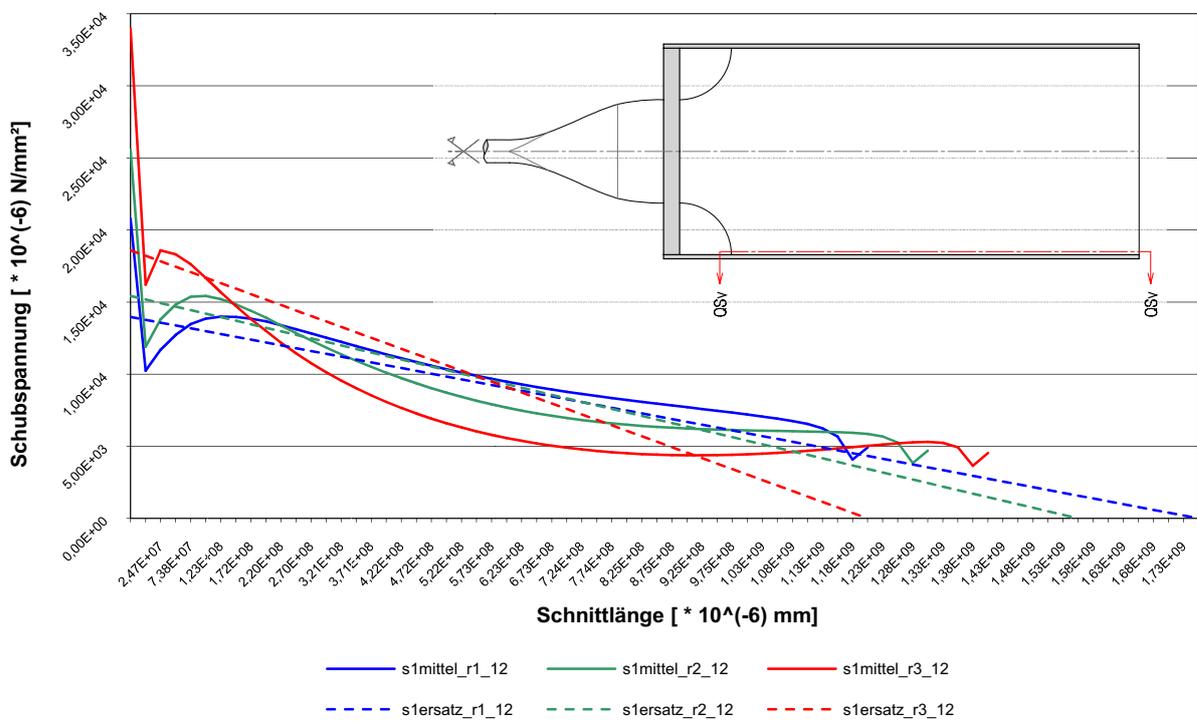


Abbildung 5.8: Schubspannung, Schnitt "QSV", Modellreihe "r" ( $t_{OG}=35 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )

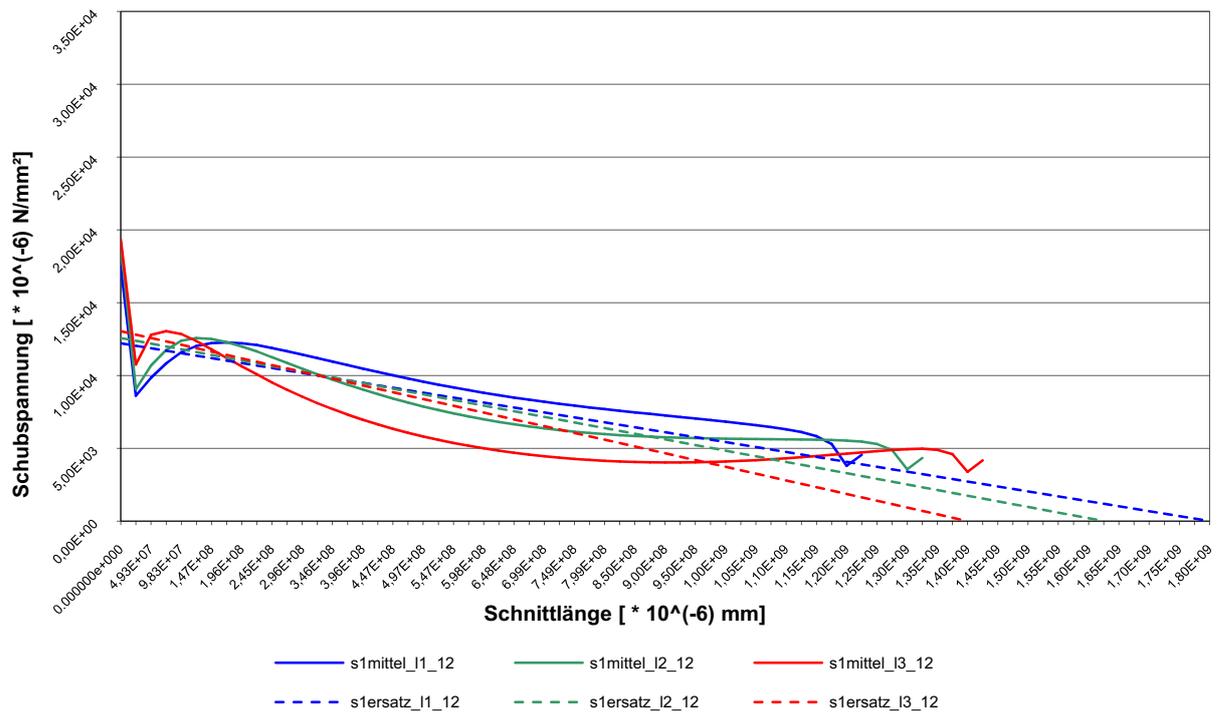


Abbildung 5.9: Schubspannung, Schnitt "QSv", Modellreihe "l" ( $t_{OG}=70 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )

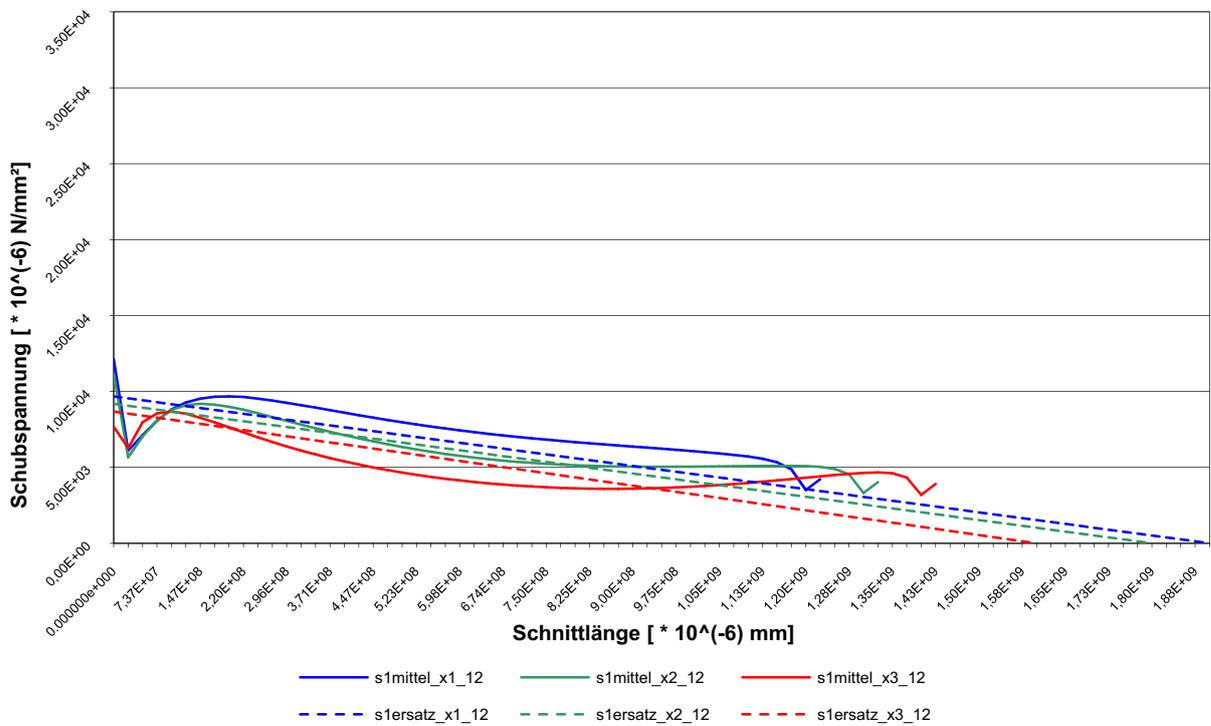


Abbildung 5.10: Schubspannung, Schnitt "QSv", Modellreihe "x" ( $t_{OG}=105 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )

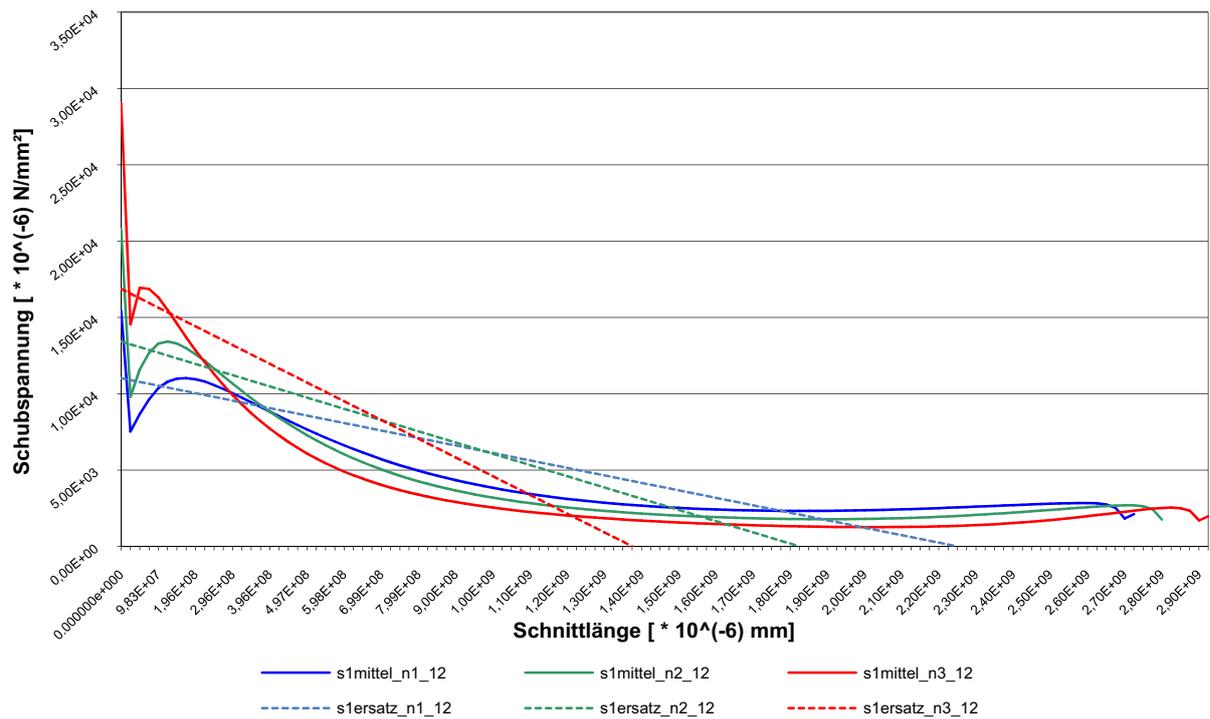


Abbildung 5.11: Schubspannung, Schnitt "QSv", Modellreihe "n" ( $t_{OG}=35$  mm,  $h_{QS}=3000$  mm)

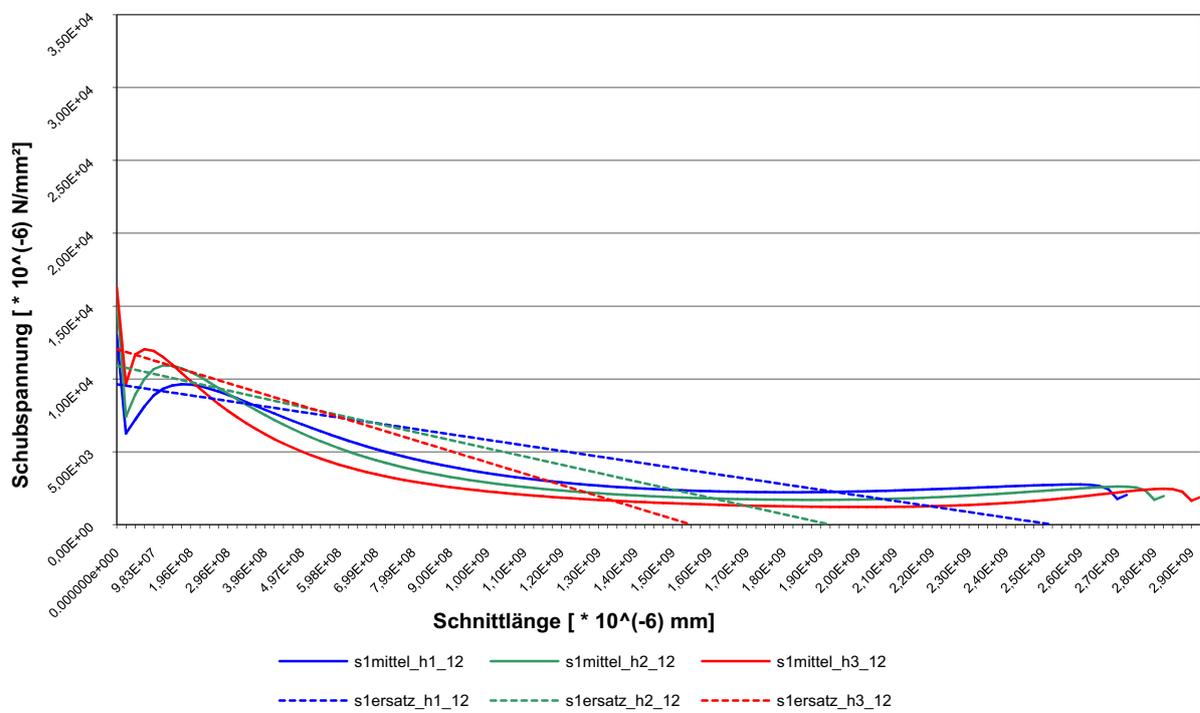


Abbildung 5.12: Schubspannung, Schnitt "QSv", Modellreihe "h" ( $t_{OG}=70$  mm,  $h_{QS}=3000$  mm)

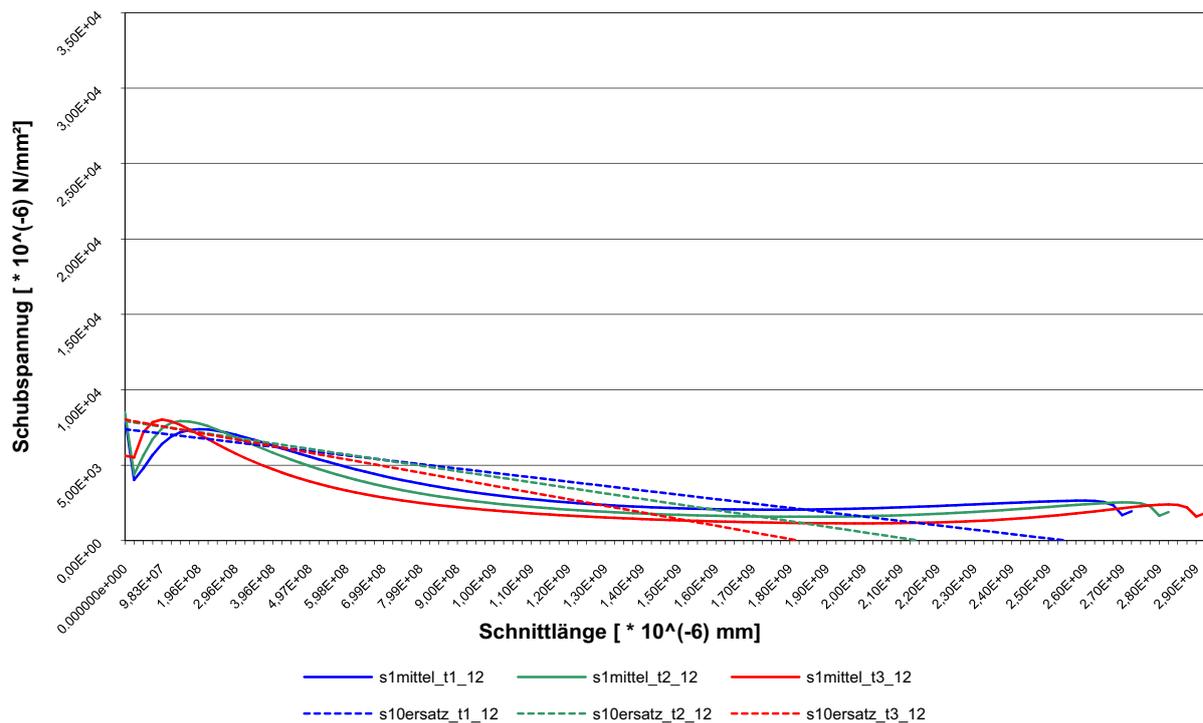


Abbildung 5.13: Schubspannung, Schnitt „QSV“, Modellreihe „r“ ( $t_{OG}=105$  mm,  $h_{QS}=3000$  mm)

Die Spannungsverteilung im Schnitt „Querscheibe vertikal“ zeigt keine geometrisch einfache Form, sondern eine Kurve, die in der Nähe des Freischnitts ihr Maximum hat, in der weiteren Schnitttrichtung fällt und sich einem beinahe konstanten Wert annähert. Die Kurve läuft nicht auf den Wert 0 aus. Die Spannungsspitze zu Beginn des Verlaufs wird vernachlässigt und der Eigenheit des FE-Programms zugeschrieben. Die Begründung dafür ist, dass am freien Rand keine Spannungen aus Randbedingungen eingetragen werden, daher sind Schubspannung und Normalspannung dort Null. Unter der Annahme, dass der Satz der zugeordneten Schubspannungen gilt ( $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ), kann am Beginn des Schnitts (Randelement)

$$\hat{C}$$

Die denkbar einfachste Spannungsverteilung für ein Rechenmodell ist ein Dreieck, mit dem Spannungsmaximum am Freischnitttrand und einer gleichmäßigen Spannungsabnahme entlang des Schnitts. Der maximale Spannungswert von der FE-Analyse und dem Rechenmodell liegen im allgemeinen Fall nicht an derselben Stelle, jedoch in mittelbarer Nähe. Die Abweichung der Maximalstellen voneinander ist für die Bemessung der Schweißnaht (doppelte Kehlnaht an dieser Stelle vorgesehen) unerheblich, da die Naht mit dem Maximalwert der einwirkenden Schubspannung bemessen und über die volle Länge mit der gleichen Dicke ausgeführt wird.

Aus der FE-Analyse sind für jedes berechnete Modell die maximale Schubspannung und die aufintegrierte Spannung über die gesamte Schnittfläche bekannt. Aus der Forderung, dass die dreieckige Spannungsverteilung des Rechenmodells und jene der FE-Analyse die gleiche maximale Schubspannung besitzen und dass die Fläche unter beiden Kurven gleich ist, lässt sich eine Einflusslänge (in Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 mit  $L_E$  bezeichnet) für jedes Modell ermitteln. Ziel der Untersuchung ist, einen Faktor  $n$

zu finden, der das Verhältnis der Einflusslänge zu einer charakteristischen Länge des Modells in Abhängigkeit von geometrischen Größen des Details darstellt. Als charakteristische Länge wird die Höhe der Querscheibe abzüglich des Freischnittradius (= Schnittlänge bzw. Schweißnahtlänge) herangezogen.

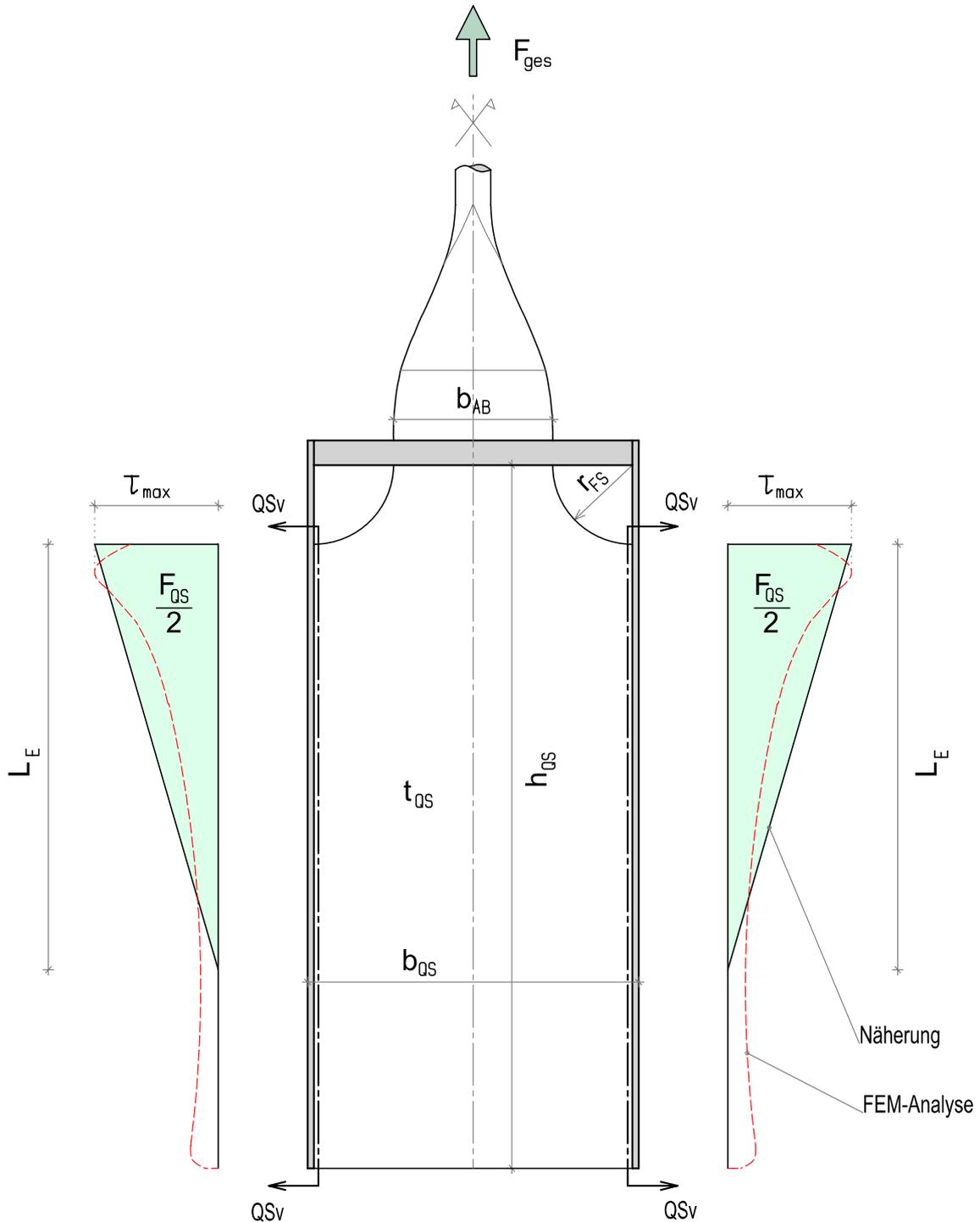


Abbildung 5.14: Schnitt "Querscheibe vertikal" mit Schubspannungsverteilung,  $L_E \leq (h_{QS} - r_{FS})$

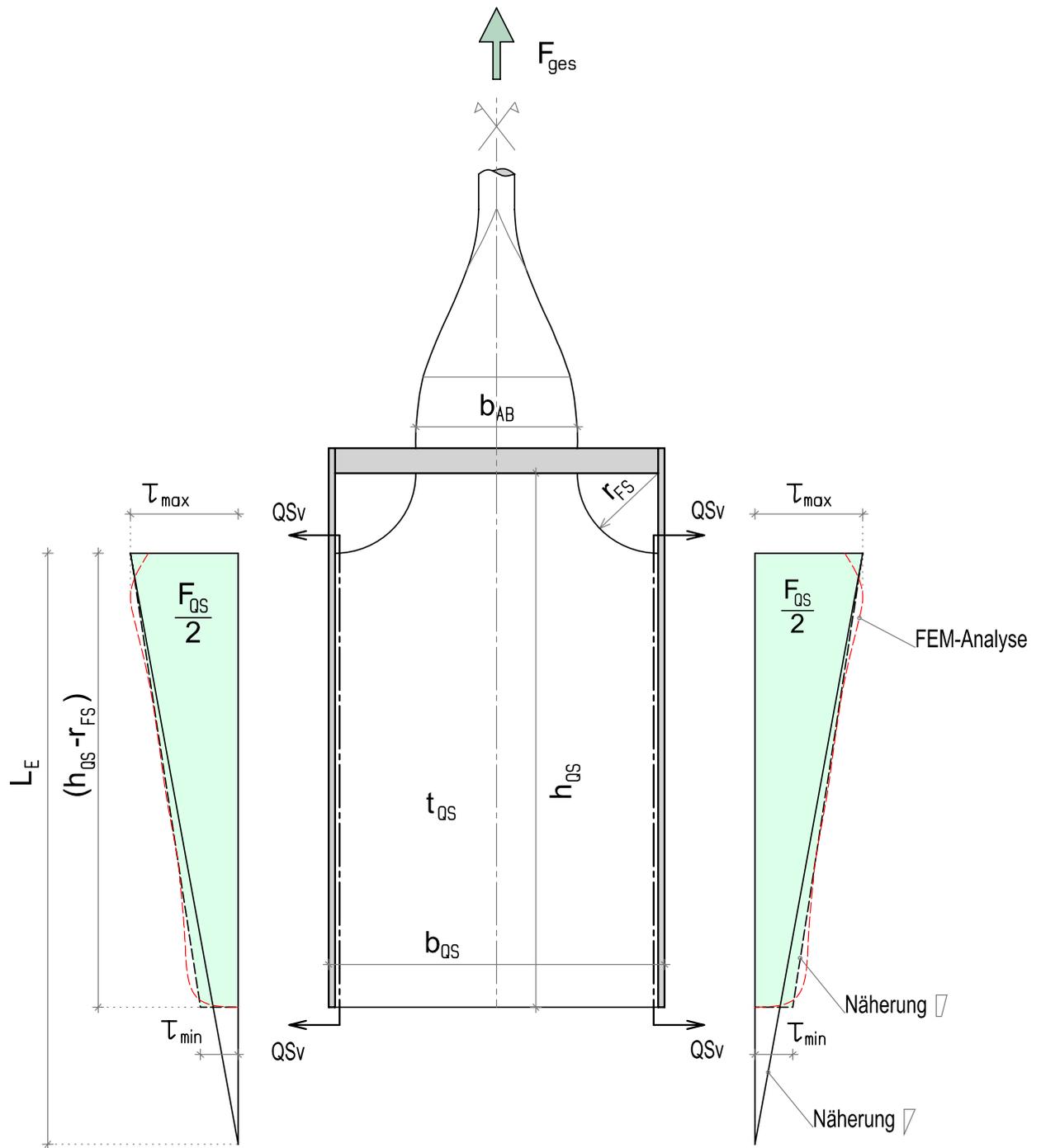


Abbildung 5.15: Schnitt "Querscheibe vertikal" mit Schubspannungsverteilung,  $L_E \geq (h_{\text{QS}} - r_{\text{FS}})$

Die folgenden Tabellen beinhalten für die gerechneten Modelle die ermittelten Einflusslängen und damit den Faktor  $n$  (in Anhang A9 bis A11 befinden sich ausführlichere Tabellen, in denen auch alle Interpolationen zwischen den Modellen angeführt sind, die für das Zeichnen der Diagramme erforderlich sind):

◆ Modellsatz  $\alpha$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 35\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Schnittlänge	maximale Schubspannung	Kraft über Querscheibe in Stege	Einflusslänge	$b_{AB}/b_{QS}$	$n = L_E / (h_{QS} - r_{FS})$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$h_{QS} - r_{FS}$ [m]	$\tau_{max}$ [ $10^{-3} \text{ N/mm}^2$ ]	$F_{QS}$ [N]	$L_E$ [m]		
<b>r1</b>	1000	450	1,50	275	1,225	13,97	979	1,752	<b>0,667</b>	<b>1,430</b>
<b>n1</b>	1000	450	3,00	275	2,725	10,99	983	2,238	<b>0,333</b>	<b>0,821</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	1,275	14,51	973	1,676	<b>0,600</b>	<b>1,315</b>
<b>n4</b>	900	450	3,00	225	2,775	12,10	978	2,021	<b>0,300</b>	<b>0,728</b>
<b>r2</b>	800	450	1,50	175	1,325	15,43	962	1,560	<b>0,533</b>	<b>1,177</b>
<b>n2</b>	800	450	3,00	175	2,825	13,42	970	1,806	<b>0,267</b>	<b>0,639</b>
<b>r5</b>	700	450	1,50	125	1,375	16,77	942	1,404	<b>0,467</b>	<b>1,021</b>
<b>n5</b>	700	450	3,00	125	2,875	15,08	949	1,573	<b>0,233</b>	<b>0,547</b>
<b>r3</b>	600	450	1,50	75	1,425	18,59	900	1,210	<b>0,400</b>	<b>0,849</b>
<b>n3</b>	600	450	3,00	75	2,925	16,87	909	1,348	<b>0,200</b>	<b>0,461</b>
<b>r7</b>	500	450	1,50	25	1,475	20,47	822	1,004	<b>0,333</b>	<b>0,681</b>
<b>n7</b>	500	450	3,00	25	2,975	18,95	832	1,098	<b>0,167</b>	<b>0,369</b>

Tabelle 5.5: Berechnung des Faktors  $n$ , Modellsatz  $\alpha$

◆ Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 70\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnittradius	Schnittlänge	maximale Schubspannung	Kraft über Querscheibe in Stege	Einflusslänge	$b_{AB}/b_{QS}$	$n = L_E / (h_{QS} - r_{FS})$
	$b_{QS} [\text{mm}]$	$b_{AB} [\text{mm}]$	$h_{QS} [\text{m}]$	$r_{FS} [\text{mm}]$	$h_{QS} - r_{FS} [\text{m}]$	$\tau_{max} [10^{-3} \text{ N/mm}^2]$	$F_{QS} [\text{N}]$	$L_E [\text{m}]$		
<b>l1</b>	1000	450	1,50	275	1,225	12,26	879	1,792	<b>0,667</b>	<b>1,463</b>
<b>kl1</b>	1000	450	1,75	275	1,475	11,31	885	1,956	<b>0,571</b>	<b>1,326</b>
<b>k1</b>	1000	450	2,00	275	1,725	10,72	888	2,071	<b>0,500</b>	<b>1,201</b>
<b>ik 1</b>	1000	450	2,25	275	1,975	10,31	891	2,161	<b>0,444</b>	<b>1,094</b>
<b>i1</b>	1000	450	2,50	275	2,225	10,02	892	2,226	<b>0,400</b>	<b>1,000</b>
<b>hi1</b>	1000	450	2,75	275	2,475	9,80	895	2,282	<b>0,364</b>	<b>0,922</b>
<b>h1</b>	1000	450	3,00	275	2,725	9,63	898	2,330	<b>0,333</b>	<b>0,855</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	1,275	12,35	860	1,741	<b>0,600</b>	<b>1,366</b>
<b>k4</b>	900	450	2,00	225	1,775	11,16	868	1,944	<b>0,450</b>	<b>1,095</b>
<b>i4</b>	900	450	2,50	225	2,275	10,56	871	2,062	<b>0,360</b>	<b>0,906</b>
<b>h4</b>	900	450	3,00	225	2,775	10,26	873	2,129	<b>0,300</b>	<b>0,767</b>
<b>l2</b>	800	450	1,50	175	1,325	12,57	824	1,638	<b>0,533</b>	<b>1,236</b>
<b>kl2</b>	800	450	1,75	175	1,575	11,98	830	1,732	<b>0,457</b>	<b>1,100</b>
<b>k2</b>	800	450	2,00	175	1,825	11,67	832	1,782	<b>0,400</b>	<b>0,976</b>
<b>i2</b>	800	450	2,50	175	2,325	11,17	836	1,871	<b>0,320</b>	<b>0,805</b>
<b>h2</b>	800	450	3,00	175	2,825	10,91	846	1,938	<b>0,267</b>	<b>0,686</b>
<b>l5</b>	700	450	1,50	125	1,375	12,88	784	1,522	<b>0,467</b>	<b>1,107</b>
<b>k5</b>	700	450	2,00	125	1,875	12,20	792	1,623	<b>0,350</b>	<b>0,866</b>
<b>i5</b>	700	450	2,50	125	2,375	11,78	793	1,683	<b>0,280</b>	<b>0,708</b>
<b>h5</b>	700	450	3,00	125	2,875	11,56	799	1,728	<b>0,233</b>	<b>0,601</b>
<b>l3</b>	600	450	1,50	75	1,425	13,04	728	1,397	<b>0,400</b>	<b>0,980</b>
<b>k3</b>	600	450	2,00	75	1,925	12,53	736	1,469	<b>0,300</b>	<b>0,763</b>
<b>i3</b>	600	450	2,50	75	2,425	12,23	740	1,513	<b>0,240</b>	<b>0,624</b>
<b>h3</b>	600	450	3,00	75	2,925	12,04	748	1,552	<b>0,200</b>	<b>0,531</b>
<b>l7</b>	500	450	1,50	25	1,475	13,22	643	1,216	<b>0,333</b>	<b>0,824</b>
<b>k7</b>	500	450	2,00	25	1,975	12,75	651	1,276	<b>0,250</b>	<b>0,646</b>
<b>i7</b>	500	450	2,50	25	2,475	12,47	655	1,314	<b>0,200</b>	<b>0,531</b>
<b>h7</b>	500	450	3,00	25	2,975	12,29	658	1,338	<b>0,167</b>	<b>0,450</b>

Tabelle 5.6: Berechnung des Faktors  $n$ , Modellsatz  $\gamma$

◆ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 105\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnittradius	Schnittlänge	maximale Schubspannung	Kraft über Querscheibe in Stege	Einflusslänge	$b_{AB}/b_{QS}$	$n = L_E / (h_{QS} - r_{FS})$
	$b_{QS} [\text{mm}]$	$b_{AB} [\text{mm}]$	$h_{QS} [\text{m}]$	$r_{FS} [\text{mm}]$	$h_{QS} - r_{FS} [\text{m}]$	$\tau_{max} [10^{-3} \text{ N/mm}^2]$	$F_{QS} [\text{N}]$	$L_E [\text{m}]$		
<b>x1</b>	1000	450	1,50	275	1,225	9,67	723	1,871	<b>0,667</b>	<b>1,527</b>
<b>t1</b>	1000	450	3,00	275	2,725	7,39	746	2,524	<b>0,333</b>	<b>0,926</b>
<b>x4</b>	900	450	1,50	225	1,275	9,40	686	1,823	<b>0,600</b>	<b>1,430</b>
<b>t4</b>	900	450	3,00	225	2,775	7,74	715	2,310	<b>0,300</b>	<b>0,832</b>
<b>x2</b>	800	450	1,50	175	1,325	9,18	654	1,779	<b>0,533</b>	<b>1,343</b>
<b>t2</b>	800	450	3,00	175	2,825	7,92	672	2,121	<b>0,267</b>	<b>0,751</b>
<b>x5</b>	700	450	1,50	125	1,375	8,98	608	1,693	<b>0,467</b>	<b>1,231</b>
<b>t5</b>	700	450	3,00	125	2,875	8,06	631	1,958	<b>0,233</b>	<b>0,681</b>
<b>x3</b>	600	450	1,50	75	1,425	8,68	550	1,584	<b>0,400</b>	<b>1,112</b>
<b>t3</b>	600	450	3,00	75	2,925	8,03	584	1,819	<b>0,200</b>	<b>0,622</b>
<b>x7</b>	500	450	1,50	25	1,475	8,43	510	1,514	<b>0,333</b>	<b>1,026</b>
<b>t7</b>	500	450	3,00	25	2,975	7,84	529	1,688	<b>0,167</b>	<b>0,567</b>

Tabelle 5.7: Berechnung des Faktors  $n$ , Modellsatz  $\delta$

Die errechneten Ersatzspannungsverteilungen sind in den Diagrammen der Schubspannungsverteilung mit strichlierten Linien eingezeichnet (Abbildung 5.8 bis Abbildung 5.13). Besonders für die Modelle mit kleinerer Querscheibenhöhe ist es möglich, dass die errechnete Einflusslänge größer als die tatsächliche Schnittlänge (Querscheibenhöhe abzüglich Freischnittradius) des Modells ist. Für die Ermittlung der maximalen Schubspannung ist diese Tatsache aber nicht von Belang. Für solche Spannungsverteilungen kann im Anschluss die dreieckige Spannungsverteilung in ein flächengleiches Trapez umgerechnet werden, wobei die maximale Schubspannung unverändert bleibt, die Einflusslänge gleich der Schnittlänge ist und sich am Schnittende eine minimale Schubspannung errechnet (siehe Abbildung 5.15).

Die Tabellen zeigen, dass der Faktor  $n$  von den drei Parametern wesentlich abhängig ist. Zunächst gibt es für jeden Modellsatz ein Diagramm, in dem die Ergebnisse der FE-Analyse zu Kurven verbunden sind. Eine Kurve spiegelt die Ergebnisse für die Modelle einer bestimmten Obergurtdicke und Querscheibebreite mit allen Abstufungen für die Querscheibenhöhe wider (das heißt Parameter  $t_{OG}$  und  $b_{QS}$  bleiben innerhalb einer Kurve konstant, Parameter  $h_{QS}$  wird durchlaufen) und ist im Diagramm mit der entsprechenden Ziffer gekennzeichnet.

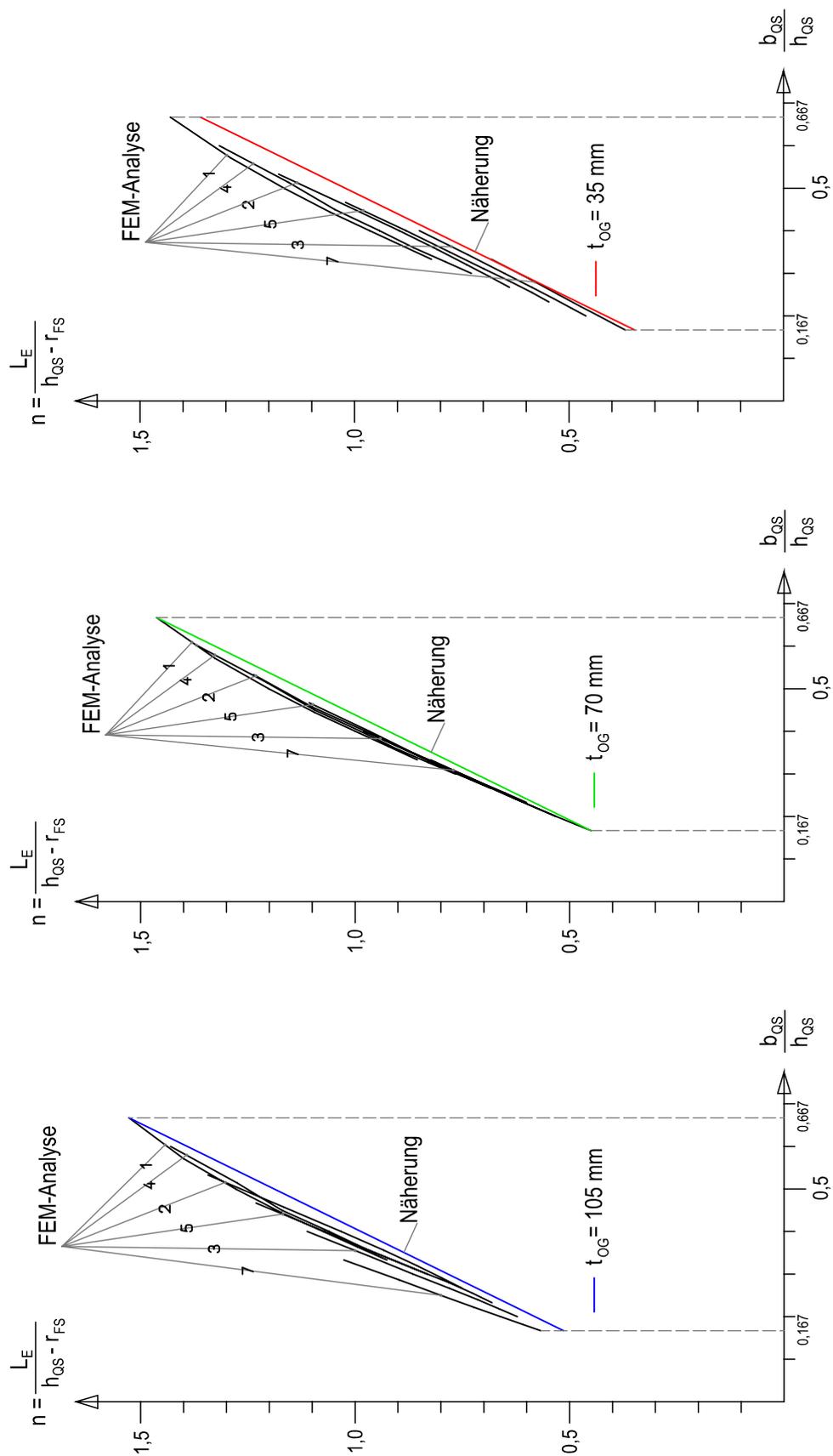


Abbildung 5.16: Ermittlung des Faktors n

Für jeden Modellsatz gibt es eigene Näherungsgeraden, die dann in ein Diagramm zusammengefügt werden. Die Wahl der Geraden erfolgt so, dass sie zueinander parallel sind.

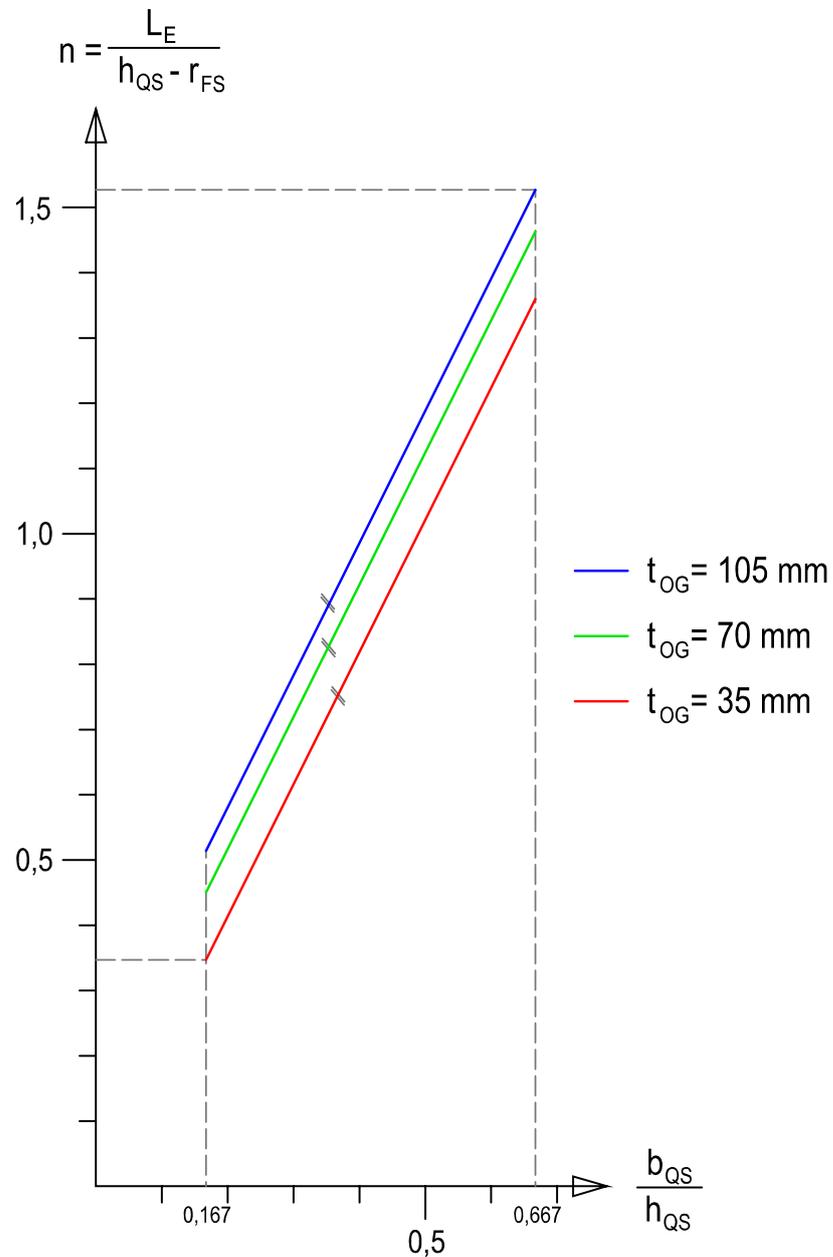


Abbildung 5.17: Ermittlung des Faktors  $n$ , Zusammenfassung aller Näherungen

Beschreibung der Näherungsgeraden mit der Funktion  $y = k \cdot x + d$  ergibt:

$$n = 2,03 \cdot (b_{QS}/h_{QS}) + d \quad 0,167 \leq (b_{QS}/h_{QS}) \leq 0,667$$

für  $t_{OG} = 105\text{mm}$ :  $d = 0,18$

für  $t_{OG} = 70\text{mm}$ :  $d = 0,11$

für  $t_{OG} = 35\text{mm}$ :  $d = 0,01$

$h_{QS}$ : Querscheibenhöhe	$1500 \text{ mm} \leq h_{QS} \leq 3000 \text{ mm}$
$b_{QS}$ : Querscheibenbreite	$500 \text{ mm} \leq b_{QS} \leq 1000 \text{ mm}$
$t_{OG}$ : Obergurtdicke	$35 \text{ mm} \leq t_{OG} \leq 105 \text{ mm}$

Das Diagramm in Abbildung 5.17 ist die Grundlage für die Ermittlung der Einflusslänge für das Rechenmodell im Schnitt „Querscheibe vertikal“. Wenn die Einflusslänge und die Kraft, die in einem Schnitt „steckt“, bekannt ist (die Hälfte von  $F_{QS}$ , siehe dazu Kapitel 5.3), kann in einfacher Weise die maximale Schubspannung errechnet werden. Diese ist für die Bemessung der Schweißnähte erforderlich.

$$L_E = n \cdot (h_{QS} - r_{FS})$$

$$\tau_{\max} = \frac{F_{QS}}{(t_{QS} \cdot L_E)}$$

$L_E$ : Einflusslänge

$h_{QS}$ : Querscheibenhöhe

$r_{FS}$ : Freischnitttradius

$t_{OG}$ : Obergurtdicke

$F_{QS}$ : Kraft, die über die Querscheibe in die Stege geleitet wird

$\tau_{\max}$ : maximale Schubspannung

n: Faktor aus Diagramm/ Funktionsgleichung

Wie bereits für den Faktor  $f$  wird auch für die maximale Schubspannung im Schnitt „Querscheibe vertikal“ ein Vergleich zwischen FE-Analyse und Rechenmodell in Form eines Diagramms, in dem alle Ergebnisse eingetragen sind, hergestellt. Dies ist gleichzeitig die Überprüfung des Rechenmodells, ob die damit ermittelte maximale Schubspannung gleich oder größer jener vom berechneten FE-Modell ist.

Die Kontrollrechnung wird mit der maximalen Hängerkraft (Annahme S460 für Hänger, restliche Konstruktion S355) durchgeführt, damit im Anschluss die maximal erforderlichen Schweißnahtdicken für die einzelnen Modelle berechnet werden können und Bezug zur Praxis hergestellt wird (siehe Kapitel 6.1). Im Diagramm sind die maximalen Schubspannungen aus der FE-Analyse auf der Vertikalachse aufgetragen. Die mit Hilfe der Rechenmodelle ermittelten Ergebnisse liegen auf der Horizontalachse.

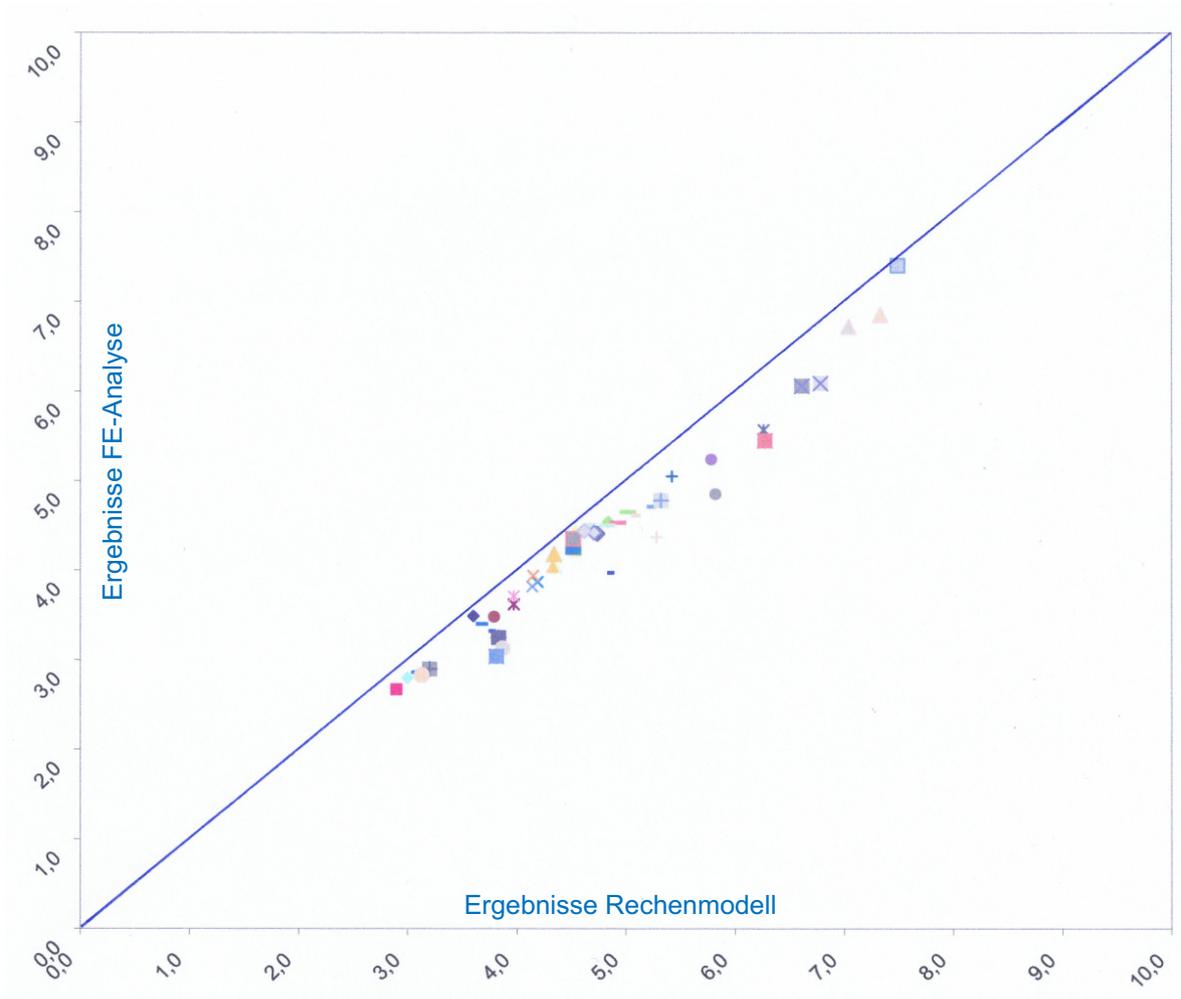


Abbildung 5.18: Ergebnisse  $\tau_{\max}$  [kN/cm<sup>2</sup>] im Schnitt „QSv“

### 5.5 Schnitt „Querscheibe horizontal“ - Spannungsverteilung

Der Schnitt „Querscheibe horizontal“ liegt ein Element unter dem Anschluss der Querscheibe an den Obergurt. In diesem Schnitt wird die Kraft  $F_{QS}$  über Normalspannungen weitergeleitet.

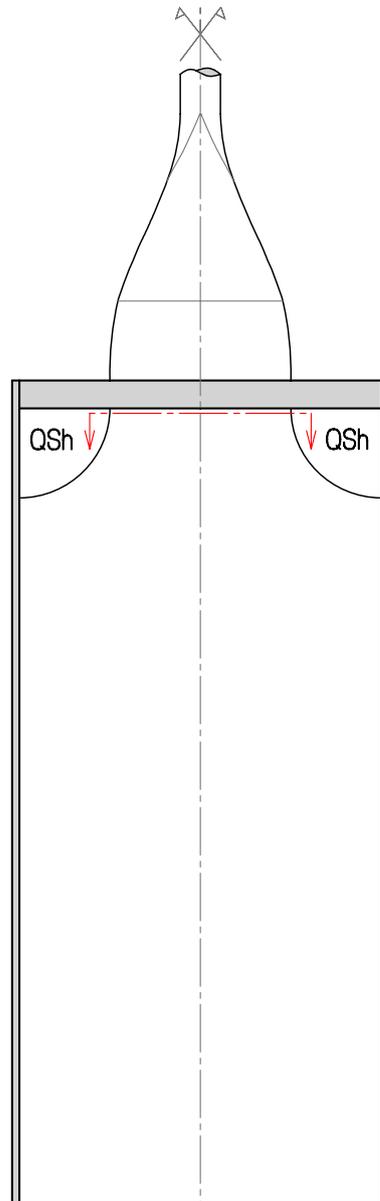


Abbildung 5.19: Schnitt „Querscheibe horizontal“

Die Schweißnaht wird normal zu ihrer Länge auf Zug beansprucht. Aus Gründen der Schweißnahtprüfbarkeit ist eine durchgeschweißte Naht (K-Naht) erforderlich. Für diesen Schnitt ist ein Nachweis für den Werkstoff mit den maximalen Normalspannungen zu erbringen. Um an ein einfaches Rechenmodell zur Abschätzung der maximalen Normalspannungen zu gelangen, werden zuerst die Normalspannungsverläufe im Schnitt „Querscheibe vertikal“ aller berechneten Modelle ausgewertet. Im Anschluss daran wird ein Rechenmodell aufgestellt, mit dem sich die maximalen Normalspannungen aufgrund geometrischer Eigenschaften des Details abschätzen lassen.

In den folgenden Diagrammen sind die Spannungsverläufe von repräsentativen Modellen ersichtlich (alle FE-Ergebnisse werden mit Hilfe von Tabellen ausgewertet). Ein Diagramm beinhaltet die Normalspannungsverläufe einer Modellreihe.

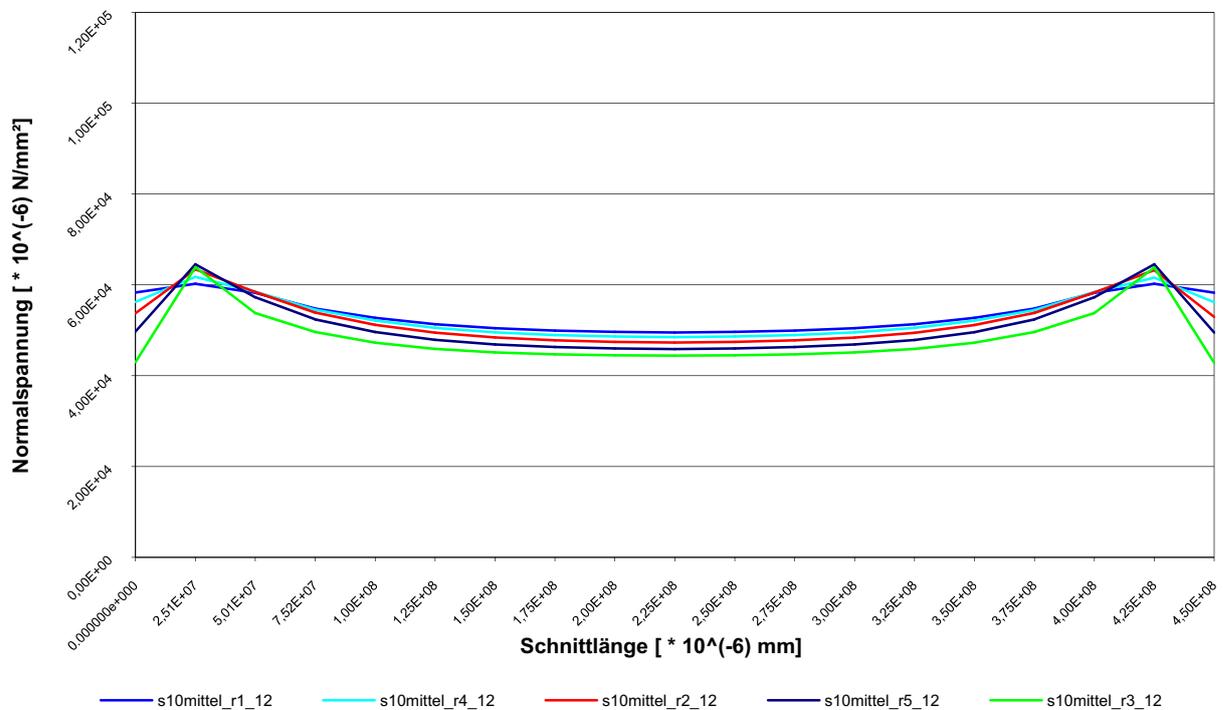
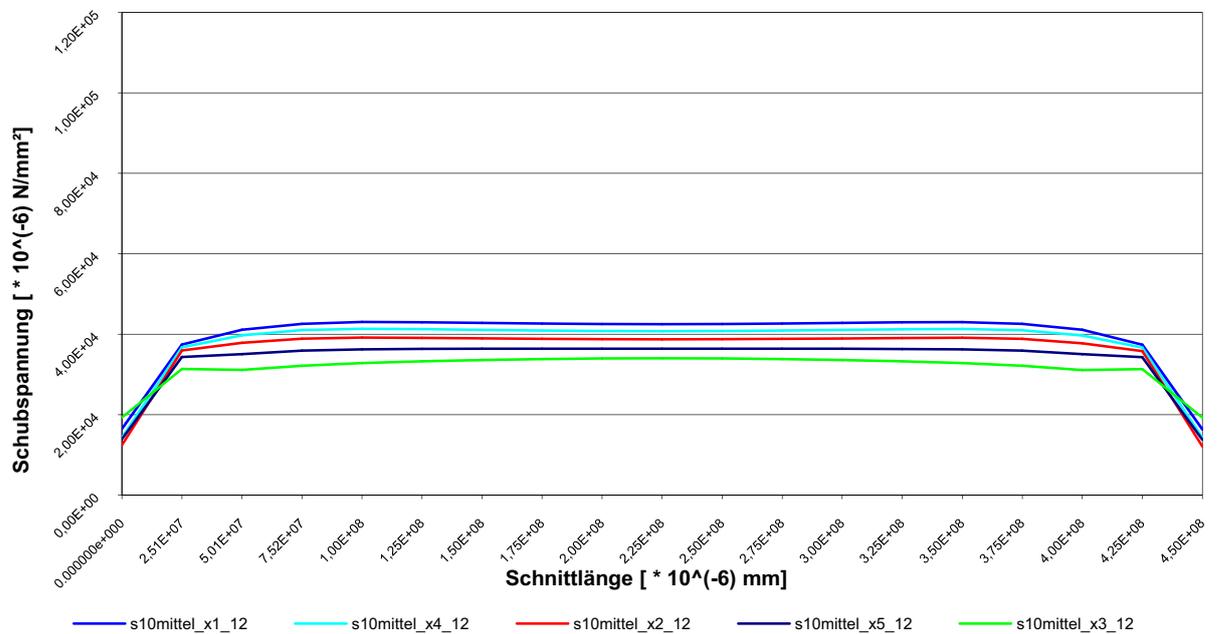
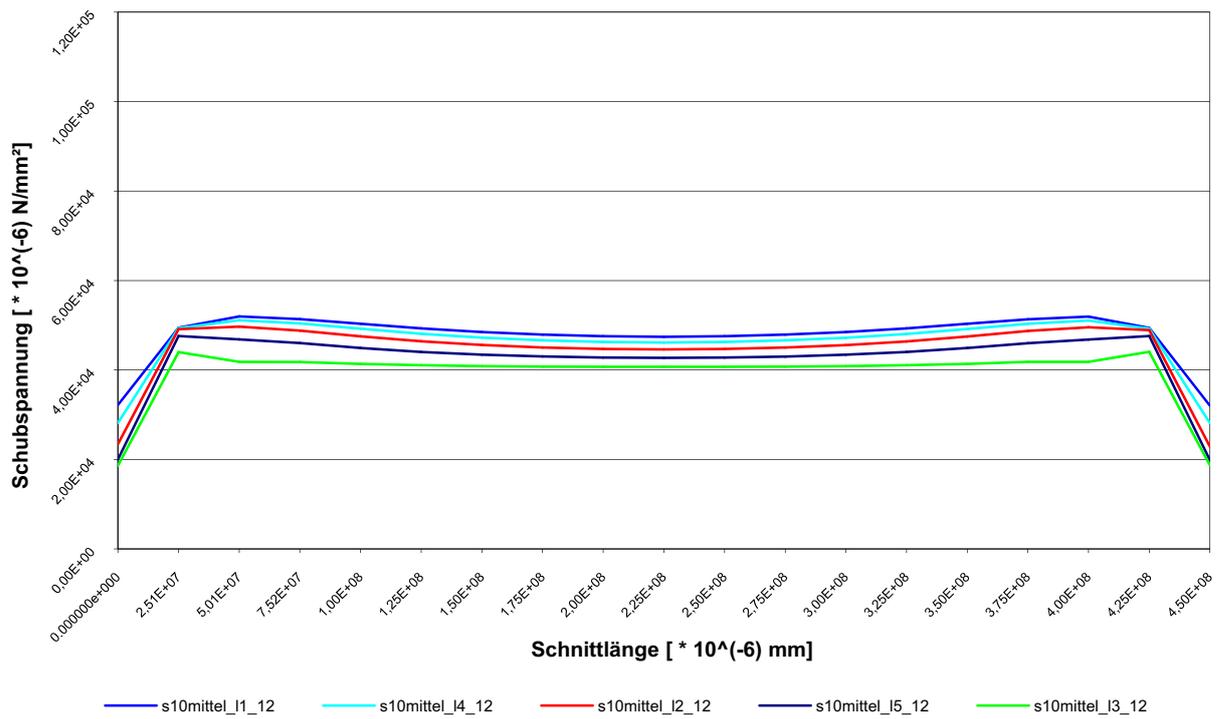


Abbildung 5.20: Normalspannung, Schnitt „QSh“, Modellreihe „r“ ( $t_{OG}=35 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )





In den folgenden Tabellen wird für die untersuchten Modelle der Faktor  $e$ , der das Verhältnis maximale Normalspannung zur mittleren Normalspannung (über die Schnittlänge gemittelter Wert) darstellt, berechnet.

◆ Modellsatz  $\alpha$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 35\text{mm}$ )

Modell	Querscheibenbreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Querscheibe in Stege	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$e = \sigma_{\max}/\sigma_{\text{mit}}$
	$b_{QS} [\text{mm}]$	$b_{AB} [\text{mm}]$	$h_{QS} [\text{m}]$	$r_{FS} [\text{mm}]$	$F_{QS} [\text{N}]$	$\sigma_{\text{mit}} [10^{-2} \text{ N/mm}^2]$	$\sigma_{\max} [10^{-2} \text{ N/mm}^2]$		
<b>r1</b>	1000	450	1,50	275	979	5,44	6,02	<b>0,450</b>	<b>1,11</b>
<b>n1</b>	1000	450	3,00	275	983	5,46	6,38	<b>0,450</b>	<b>1,17</b>
<b>r4</b>	900	450	1,50	225	973	5,41	6,17	<b>0,500</b>	<b>1,14</b>
<b>n4</b>	900	450	3,00	225	978	5,43	6,18	<b>0,500</b>	<b>1,14</b>
<b>r2</b>	800	450	1,50	175	962	5,34	6,34	<b>0,563</b>	<b>1,19</b>
<b>n2</b>	800	450	3,00	175	970	5,39	6,34	<b>0,563</b>	<b>1,18</b>
<b>r5</b>	700	450	1,50	125	942	5,23	6,45	<b>0,643</b>	<b>1,23</b>
<b>n5</b>	700	450	3,00	125	949	5,27	6,43	<b>0,643</b>	<b>1,22</b>
<b>r3</b>	600	450	1,50	75	900	5,00	6,39	<b>0,750</b>	<b>1,28</b>
<b>n3</b>	600	450	3,00	75	909	5,05	6,34	<b>0,750</b>	<b>1,25</b>

Tabelle 5.8: Berechnung des Faktors  $e$ , Modellsatz  $\alpha$

◆ Modellsatz  $\beta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 52,5\text{mm}$ )

Modell	Querscheibenbreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Querscheibe in Stege	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$e = \sigma_{\max}/\sigma_{\text{mit}}$
	$b_{QS} [\text{mm}]$	$b_{AB} [\text{mm}]$	$h_{QS} [\text{m}]$	$r_{FS} [\text{mm}]$	$F_{QS} [\text{N}]$	$\sigma_{\text{mit}} [10^{-2} \text{ N/mm}^2]$	$\sigma_{\max} [10^{-2} \text{ N/mm}^2]$		
<b>m1</b>	1000	450	3,00	275	948	5,27	5,68	<b>0,450</b>	<b>1,08</b>
<b>m2</b>	800	450	3,00	175	916	5,09	5,57	<b>0,563</b>	<b>1,10</b>
<b>m3</b>	600	450	3,00	75	834	4,63	5,35	<b>0,750</b>	<b>1,16</b>

Tabelle 5.9: Berechnung des Faktors  $e$ , Modellsatz  $\beta$

◆ Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 70\text{mm}$ )

Modell	Querscheibenbreite	Anschluss-blechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Querscheibe in Stege	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$e = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{QS}$ [N]	$\sigma_{mit}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]		
<b>l1</b>	1000	450	1,50	275	879	4,88	5,19	<b>0,450</b>	<b>1,06</b>
<b>h1</b>	1000	450	3,00	275	898	4,99	5,29	<b>0,450</b>	<b>1,06</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	860	4,78	5,11	<b>0,500</b>	<b>1,07</b>
<b>h4</b>	900	450	3,00	225	873	4,85	5,20	<b>0,500</b>	<b>1,07</b>
<b>l2</b>	800	450	1,50	175	824	4,58	4,97	<b>0,563</b>	<b>1,09</b>
<b>h2</b>	800	450	3,00	175	846	4,70	5,05	<b>0,563</b>	<b>1,07</b>
<b>l5</b>	700	450	1,50	125	784	4,36	4,76	<b>0,643</b>	<b>1,09</b>
<b>h5</b>	700	450	3,00	125	799	4,44	4,84	<b>0,643</b>	<b>1,09</b>
<b>l3</b>	600	450	1,50	75	728	4,04	4,40	<b>0,750</b>	<b>1,09</b>
<b>h3</b>	600	450	3,00	75	748	4,16	4,45	<b>0,750</b>	<b>1,07</b>

Tabelle 5.10: Berechnung des Faktors e, Modellsatz  $\gamma$

◆ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 105\text{mm}$ )

Modell	Querscheibenbreite	Anschluss-blechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Querscheibe in Stege	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$e = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{QS}$ [N]	$\sigma_{mit}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]		
<b>x1</b>	1000	450	1,50	275	723	4,02	4,30	<b>0,450</b>	<b>1,07</b>
<b>t1</b>	1000	450	3,00	275	746	4,14	4,38	<b>0,450</b>	<b>1,06</b>
<b>x4</b>	900	450	1,50	225	686	3,81	4,13	<b>0,500</b>	<b>1,08</b>
<b>t4</b>	900	450	3,00	225	715	3,97	4,24	<b>0,500</b>	<b>1,07</b>
<b>x2</b>	800	450	1,50	175	654	3,63	3,91	<b>0,563</b>	<b>1,08</b>
<b>t2</b>	800	450	3,00	175	672	3,73	4,02	<b>0,563</b>	<b>1,08</b>
<b>x5</b>	700	450	1,50	125	608	3,38	3,64	<b>0,643</b>	<b>1,08</b>
<b>t5</b>	700	450	3,00	125	631	3,51	3,74	<b>0,643</b>	<b>1,07</b>
<b>x3</b>	600	450	1,50	75	550	3,06	3,40	<b>0,750</b>	<b>1,11</b>
<b>t3</b>	600	450	3,00	75	584	3,24	3,51	<b>0,750</b>	<b>1,08</b>

Tabelle 5.11: Berechnung des Faktors e, Modellsatz  $\delta$

Die maximalen Normalspannungen sind kaum vom Parameter Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ), dafür aber von den beiden anderen Parametern Obergurtdicke ( $t_{OG}$ ) und Querscheibenbreite ( $b_{QS}$ ) wesentlich abhängig. Für die Erstellung eines Rechenmodells wird ein konstanter Spannungsverlauf über die Schnittlänge gewählt, der die Spannungsmaxima abdecken soll. Ziel ist es, einen Erhöhungsfaktor zu finden, der die mittlere Normalspannung durch Multiplikation soweit erhöht, dass die Maxima des jeweiligen Modells abgedeckt sind. Der Parameter Querscheibenhöhe wird für die Erstellung der Diagramme konstant angenommen, die

Ergebnisse der Modelle mit der Querscheibenhöhe 1,5 m decken auch die maximalen Spannungen der Modelle mit größerer Querscheibenhöhe ab.

Der Faktor  $e$  der berechneten Modelle wird in einem Diagramm in Abhängigkeit von den Parametern Querscheibenbreite und Obergurtdicke aufgetragen. Da für die Modelle mit der Obergurtdicke 70 mm und 105 mm sehr ähnliche Ergebnisse in den maximalen Normalspannungen vorliegen, werden zusätzlich die Ergebnisse des Modellsatzes  $\beta$  (Obergurtdicke 52,5 mm) ausgegeben, um zu sehen, wie sich die Ergebnisse zwischen der Obergurtdicke 70 mm und 35 mm verhalten.

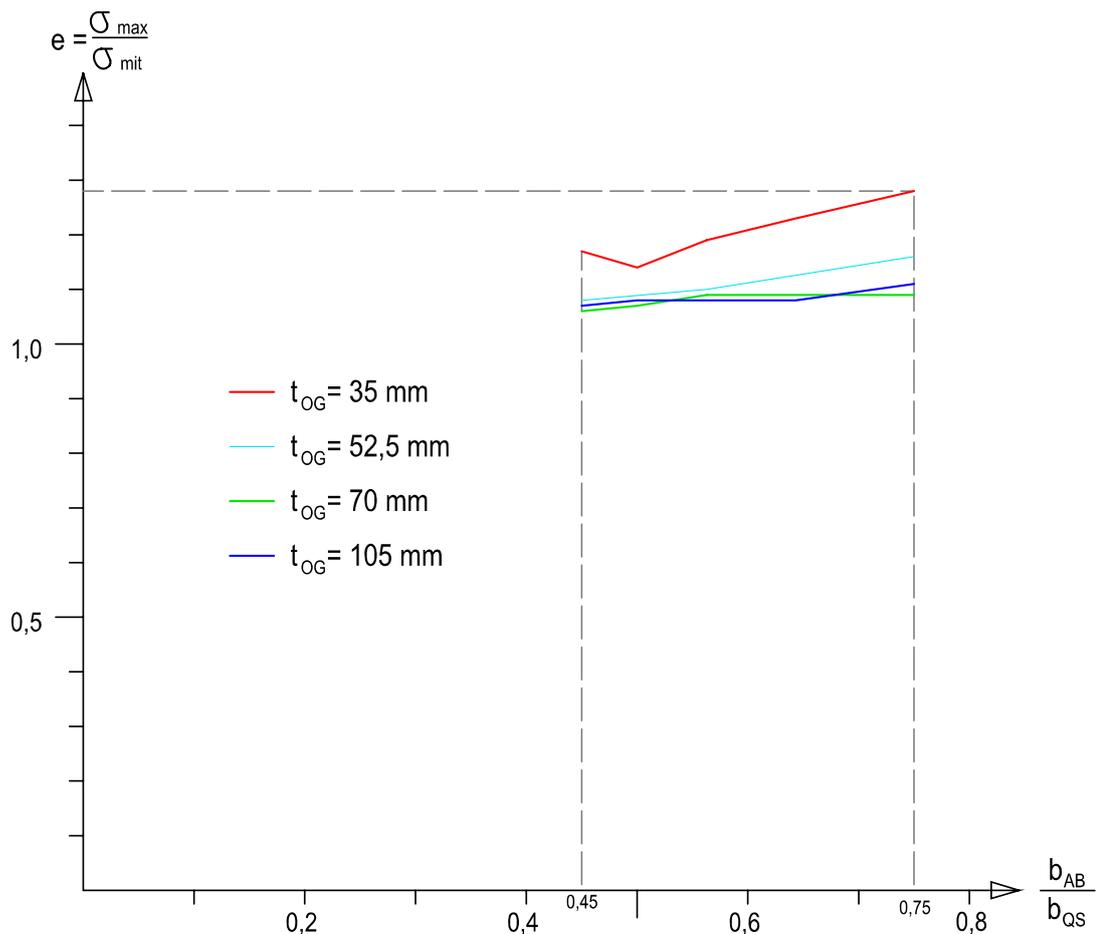


Abbildung 5.24: Ermittlung des Faktors  $e$ , Ergebnisse FE-Analyse

Es werden Geraden als Näherung für die Kurven  $t_{OG} = 35 \text{ mm}$  und  $t_{OG} \geq 70 \text{ mm}$  gesucht, sodass auch die Kurve mit  $t_{OG} = 52,5 \text{ mm}$  mit Hilfe linearer Interpolationen abgedeckt ist. Als grobe Näherung lässt sich der Erhöhungsfaktor mit  $e_{\max} = 1,3$  angeben. Dabei werden die maximalen Spannungen für die Modelle mit den Obergurtdicken größer gleich 70 mm und jene mit Obergurtdicke 35 mm, welche einen großen Freischnittradius aufweisen, überschätzt. Eine bessere Näherung für den Faktor  $e$  ist im Diagramm auf Abbildung 5.25 ersichtlich.

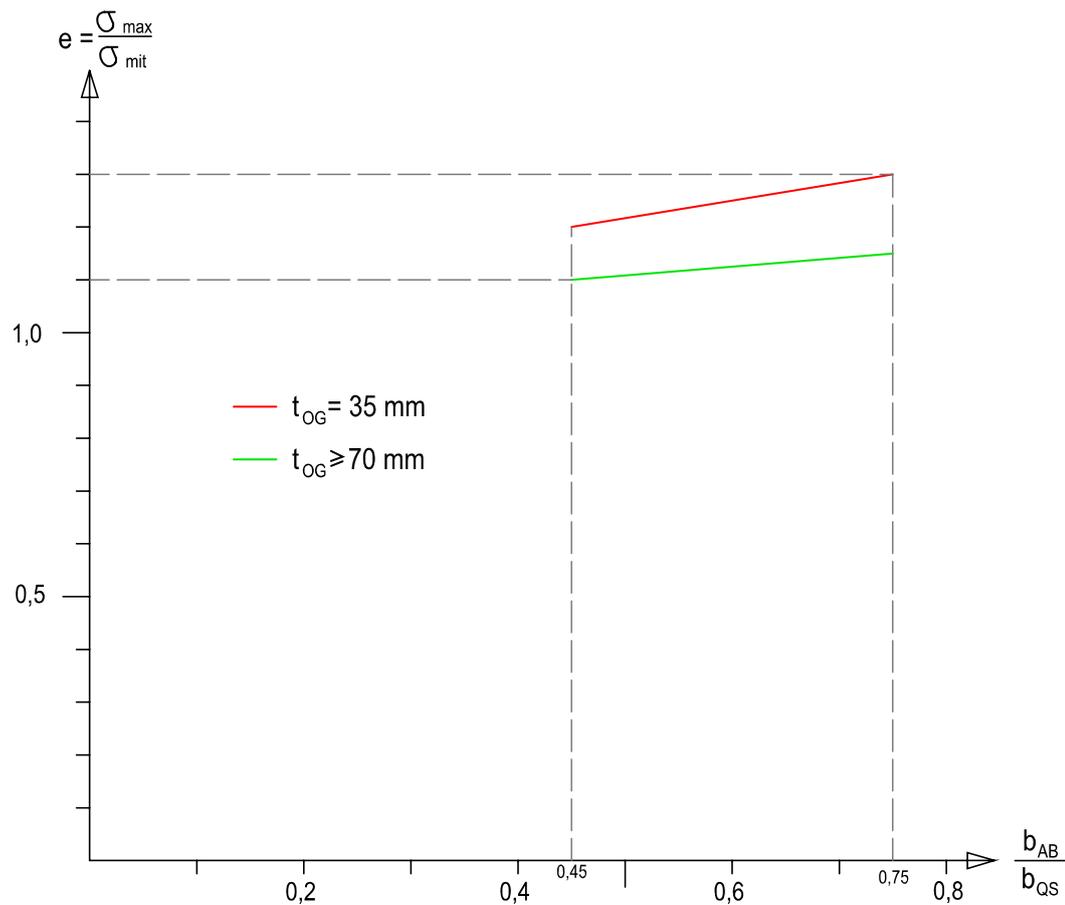


Abbildung 5.25: Ermittlung des Faktors e, Näherungen

Beschreibung der Näherungsgeraden mit der Funktion  $y = k \cdot x + d$  ergibt:

$$\text{für } t_{\text{OG}} \geq 70 \text{ mm:} \quad e = 0,167 \cdot (b_{\text{AB}}/b_{\text{QS}}) + 1,02 \quad 0,45 \leq (b_{\text{AB}}/b_{\text{QS}}) \leq 0,75$$

$$\text{für } t_{\text{OG}} = 35 \text{ mm:} \quad e = 0,333 \cdot (b_{\text{AB}}/b_{\text{QS}}) + 1,05 \quad 0,45 \leq (b_{\text{AB}}/b_{\text{QS}}) \leq 0,75$$

$$b_{\text{AB}}: \text{Anschlussblechbreite} \quad b_{\text{AB}} = 450 \text{ mm} (= b_{\text{QS}} - 2 \cdot r_{\text{FS}})$$

$$b_{\text{QS}}: \text{Querscheibenbreite} \quad 600 \text{ mm} \leq b_{\text{QS}} \leq 1000 \text{ mm}$$

$$t_{\text{OG}}: \text{Querscheibendicke} \quad 35 \text{ mm} \leq t_{\text{OG}} \leq 105 \text{ mm}$$

Bei bekannter Kraft  $F_{\text{QS}}$  (siehe Kapitel 5.3) und den geometrischen Abmessungen des Details lässt sich die maximale Normalspannung im Schnitt „Querscheibe horizontal“ abschätzen:

$$\sigma_{\text{mit}} = \frac{F_{\text{QS}}}{(b_{\text{AB}} \cdot t_{\text{QS}})}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{mit}} \cdot e$$

- $b_{AB}$ : Anschlussblechbreite
- $t_{OG}$ : Querscheibendicke
- $F_{QS}$ : Kraft, die über die Querscheibe in die Stege geleitet wird
- $\sigma_{mit}$ : mittlere Normalspannung
- $\sigma_{max}$ : maximale Normalspannung
- e: Erhöhungsfaktor aus Diagramm/ Funktionsgleichung

Im Diagramm für den Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Analyse mit jenen aus der ingenieurmäßigen Berechnung (Rechenmodell) sind die maximalen Normalspannungen, welche bei vollausgenutzten Hängern auftreten (Annahme S460 für Hänger, restliche Konstruktion S355, siehe Kapitel 6.3), aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass alle ermittelten Punkte unter der Geraden, die zwischen den Wertepaaren (0|0) und (25|25) aufgespannt ist, liegen. Somit ist gezeigt, dass man bei der Anwendung des Rechenmodells auf der „sicheren Seite“ liegt.

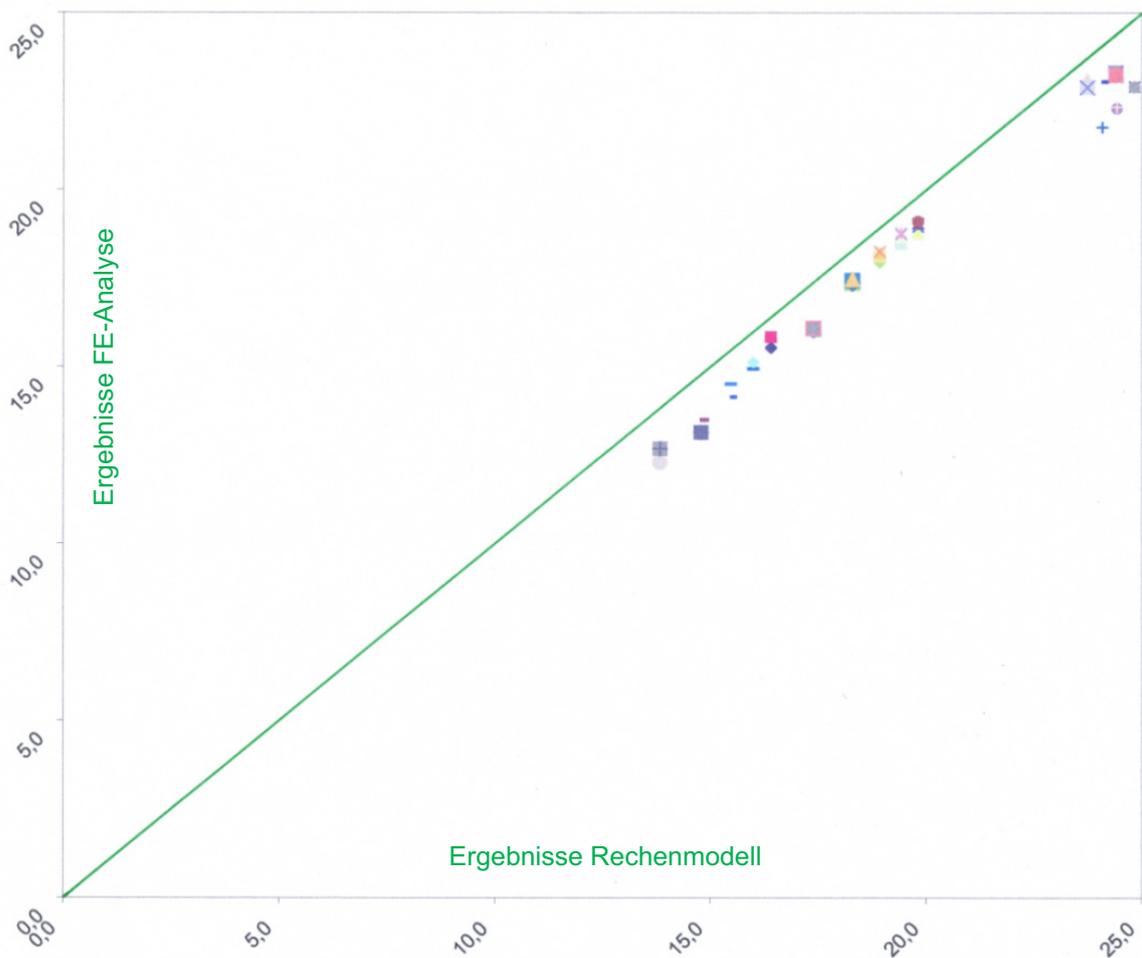


Abbildung 5.26: Ergebnisse  $\sigma_{max}$  [kN/cm<sup>2</sup>] im Schnitt „QSh“

### 5.6 Schnitt „Obergurt horizontal“ – Spannungsverteilung

Der Schnitt erfolgt längs des Obergurts, ein Element vom Rand zum Steg entfernt. In diesem Schnitt wird die Kraft  $F_{OG}$  über Schubspannungen vom Obergurt in die Stege weitergeleitet (mit Beachtung der Symmetrie).

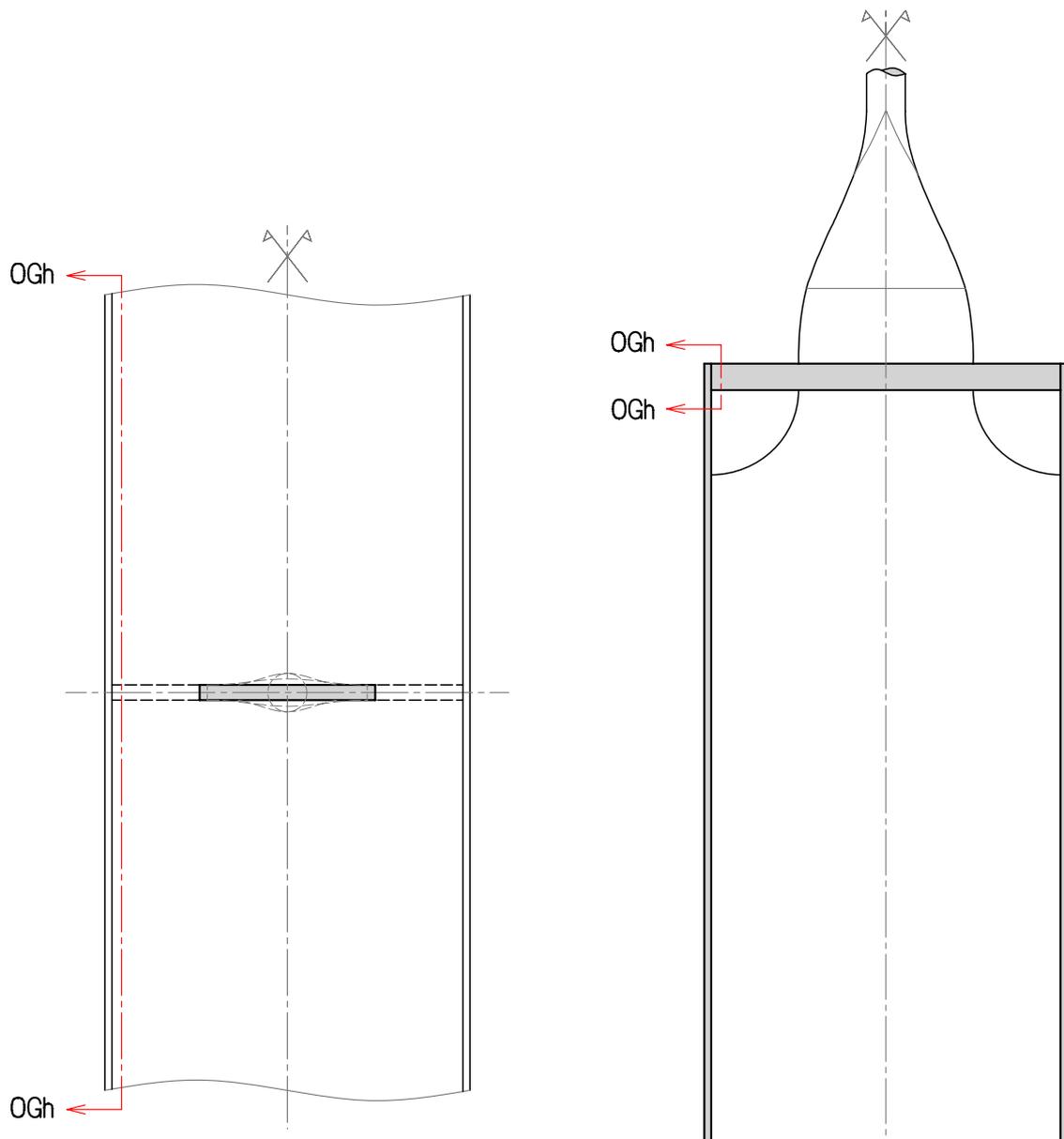


Abbildung 5.27: Schnitt „Obergurt horizontal“ Horizontalschnitt (links) und Querschnitt (rechts)

Die Auswertung der Schubspannungsverläufe der FE-Modelle im betrachteten Schnitt soll zeigen, wie die Form des Spannungsverlaufs aussieht, wie groß die Schubspannungsbereiche entlang des Schnitts in Querscheibennähe infolge der Kraftübertragung vom Obergurt in den Steg sind und welche maximalen Schubspannungen auftreten. In den folgenden Diagrammen sind die Schubspannungsverläufe für ausgewählte Modelle ersichtlich (durchgezogene Linien, die Auswertung aller FE-Ergebnisse erfolgt anhand von Tabellen). In den Diagrammen ist nur die Spannungsverteilung im Bereich der Querscheibe dargestellt, da entlang des restlichen Schnittes keine Schubspannungen infolge des Kraftflusses zwischen Steg und Hänger vorhanden sind.

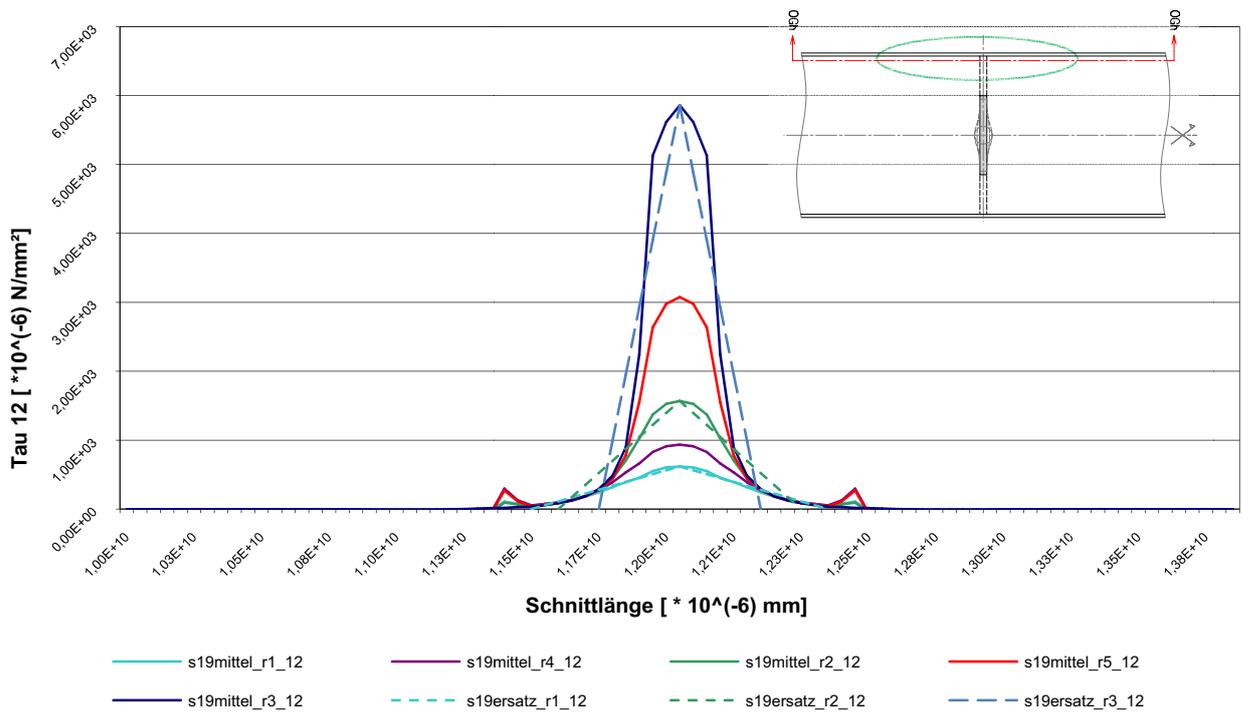


Abbildung 5.28: Schubspannung, Schnitt "OGh", Modellreihe "r" ( $t_{OG} = 35$  mm,  $h_{QS} = 1500$  mm)

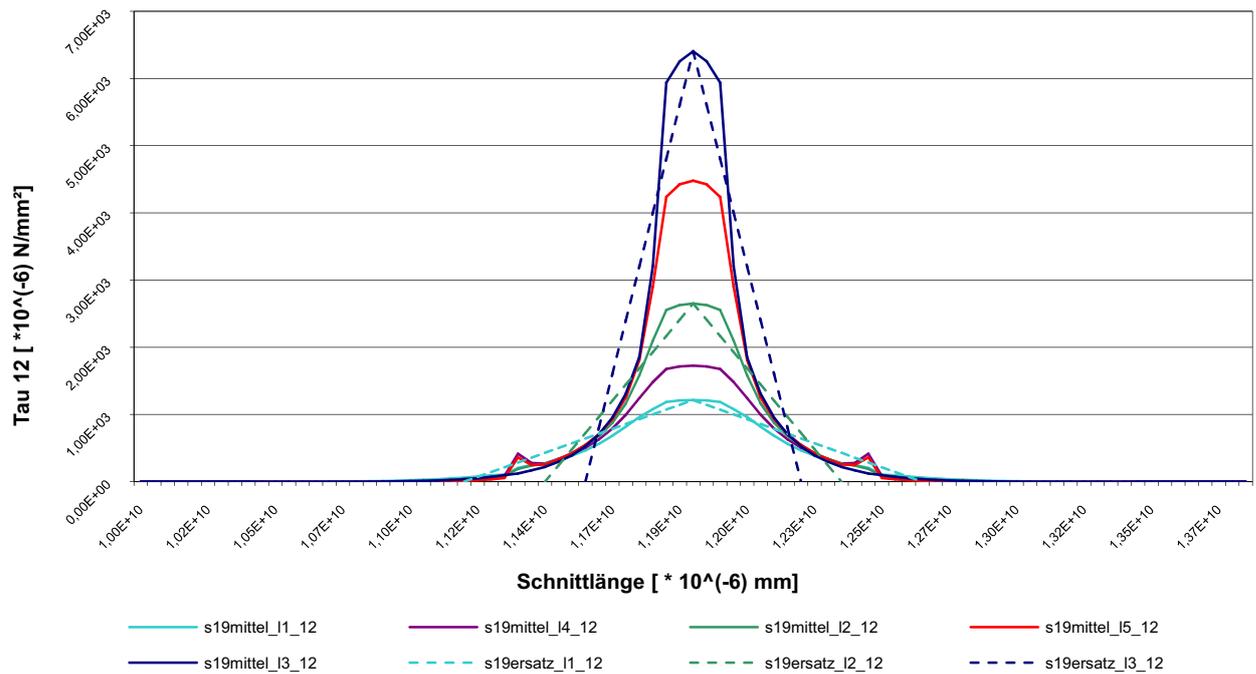


Abbildung 5.29: Schubspannung, Schnitt „OGh“, Modellreihe „l“ ( $t_{OG} = 70 \text{ mm}$ ,  $h_{QS} = 1500 \text{ mm}$ )

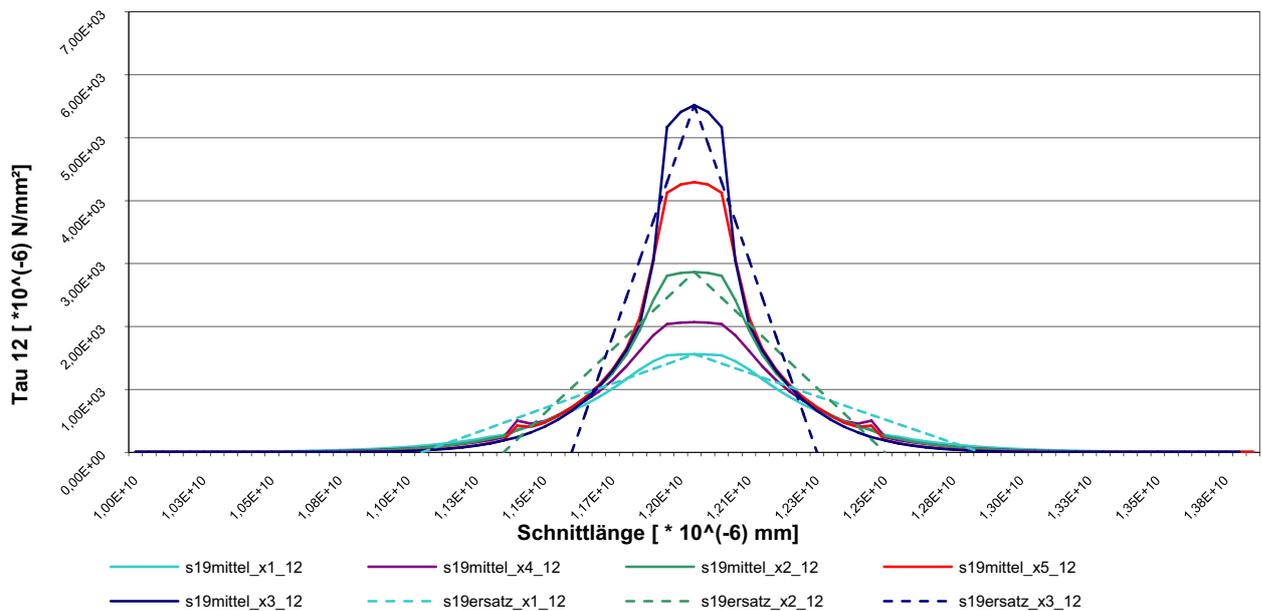


Abbildung 5.30: Schubspannung, Schnitt „OGh“, Modellreihe „x“ ( $t_{OG} = 105 \text{ mm}$ ,  $h_{QS} = 1500 \text{ mm}$ )

Bei bekannter Kraft im Obergurt – die im Schnitt „Obergurt horizontal“ steckt und in die Stege geleitet wird – und bekannter maximaler Schubspannung, kann eine fiktive Einflusslänge längs des Obergurts berechnet werden (in den Diagrammen auf Abbildung 5.35 bis Abbildung 5.38 sind die über die Einflusslänge ermittelten Schubspannungsverläufe strichliert eingezeichnet). Für alle Modelle lässt sich ein Ausbreitungswinkel  $\varphi$  als Tangens vom Verhältnis Einflusslänge zu Freischnitttradius ermitteln (Einflusslänge  $L_H$  ist auf der Skizze in Abbildung 5.31 eingezeichnet).

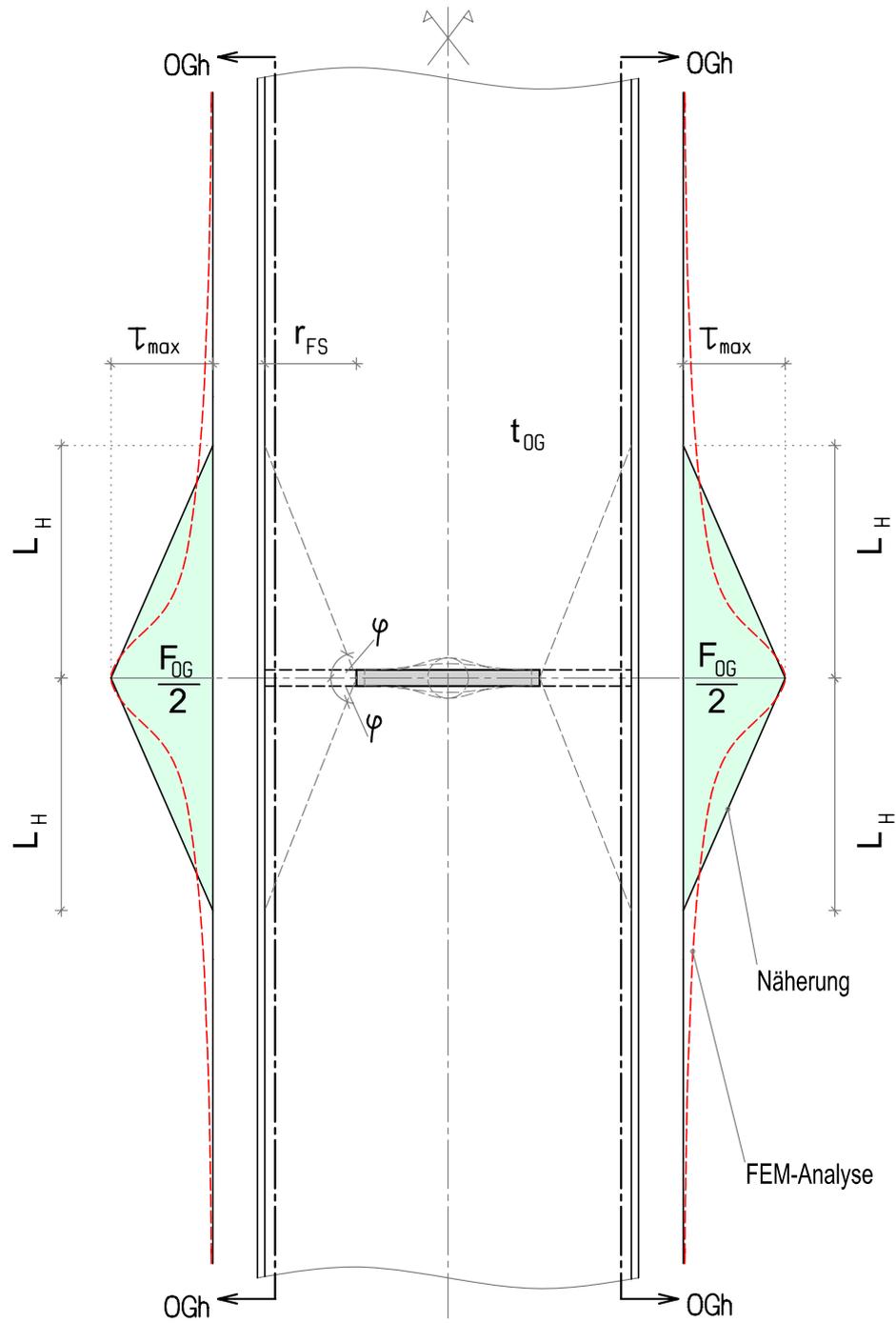


Abbildung 5.31: Schnitt "Obergurt horizontal" mit Schubspannungsverteilung

In den folgenden Tabellen ist der Ausbreitungswinkel der konkreten Modelle berechnet.

◆ Modellsatz  $\alpha$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 355\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Obergurt in Stege	maximale Schubspannung	Einflusslänge horizontal	$b_{AB}/b_{QS}$	$\varphi = \arctan(L_H/r_{FS})$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{OG}$ [N]	$\tau_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$L_H$ [mm]		
<b>r1</b>	1000	450	1,50	275	21	0,62	484,956	<b>0,45</b>	<b>60,44</b>
<b>n1</b>	1000	450	3,00	275	17	0,54	452,586	<b>0,45</b>	<b>58,72</b>
<b>r4</b>	900	450	1,50	225	27	0,94	412,212	<b>0,50</b>	<b>61,37</b>
<b>n4</b>	900	450	3,00	225	22	0,83	377,694	<b>0,50</b>	<b>59,22</b>
<b>r2</b>	800	450	1,50	175	38	1,57	345,949	<b>0,56</b>	<b>63,17</b>
<b>n2</b>	800	450	3,00	175	30	1,43	300,722	<b>0,56</b>	<b>59,80</b>
<b>r5</b>	700	450	1,50	125	58	3,08	269,437	<b>0,64</b>	<b>65,11</b>
<b>n5</b>	700	450	3,00	125	51	2,84	256,560	<b>0,64</b>	<b>64,02</b>
<b>r3</b>	600	450	1,50	75	100	5,86	243,778	<b>0,75</b>	<b>72,90</b>
<b>n3</b>	600	450	3,00	75	91	5,45	238,316	<b>0,75</b>	<b>72,53</b>

Tabelle 5.12: Berechnung des Ausbreitungswinkels  $\varphi$ , Modellsatz  $\alpha$

◆ Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 70\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Obergurt in Stege	maximale Schubspannung	Einflusslänge horizontal	$b_{AB}/b_{QS}$	$\varphi = \arctan(L_H/r_{FS})$
	$b_{QS} [\text{mm}]$	$b_{AB} [\text{mm}]$	$h_{QS} [\text{m}]$	$r_{FS} [\text{mm}]$	$F_{OG} [\text{N}]$	$\tau_{max} [10^{-2} \text{ N/mm}^2]$	$L_H [\text{mm}]$		
<b>l1</b>	1000	450	1,50	275	121	1,22	710,831	<b>0,45</b>	<b>68,85</b>
<b>k1</b>	1000	450	2,00	275	112	1,15	698,383	<b>0,45</b>	<b>68,51</b>
<b>i1</b>	1000	450	2,50	275	108	1,11	693,763	<b>0,45</b>	<b>68,38</b>
<b>h1</b>	1000	450	3,00	275	102	1,09	666,605	<b>0,45</b>	<b>67,58</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	140	1,73	578,874	<b>0,50</b>	<b>68,76</b>
<b>k4</b>	900	450	2,00	225	132	1,65	573,026	<b>0,50</b>	<b>68,56</b>
<b>i4</b>	900	450	2,50	225	129	1,60	574,323	<b>0,50</b>	<b>68,61</b>
<b>h4</b>	900	450	3,00	225	127	1,58	573,838	<b>0,50</b>	<b>68,59</b>
<b>l2</b>	800	450	1,50	175	176	2,65	474,223	<b>0,56</b>	<b>69,74</b>
<b>k2</b>	800	450	2,00	175	168	2,55	470,789	<b>0,56</b>	<b>69,61</b>
<b>i2</b>	800	450	2,50	175	164	2,50	469,361	<b>0,56</b>	<b>69,55</b>
<b>h2</b>	800	450	3,00	175	154	2,46	446,258	<b>0,56</b>	<b>68,59</b>
<b>l5</b>	700	450	1,50	125	216	4,48	344,472	<b>0,64</b>	<b>70,06</b>
<b>k5</b>	700	450	2,00	125	208	4,34	342,570	<b>0,64</b>	<b>69,95</b>
<b>i5</b>	700	450	2,50	125	207	4,26	347,078	<b>0,64</b>	<b>70,19</b>
<b>h5</b>	700	450	3,00	125	201	4,21	340,642	<b>0,64</b>	<b>69,85</b>
<b>l3</b>	600	450	1,50	75	272	6,40	303,336	<b>0,75</b>	<b>76,11</b>
<b>k3</b>	600	450	2,00	75	264	6,26	301,206	<b>0,75</b>	<b>76,02</b>
<b>i3</b>	600	450	2,50	75	260	6,18	300,511	<b>0,75</b>	<b>75,99</b>
<b>h3</b>	600	450	3,00	75	252	6,13	293,544	<b>0,75</b>	<b>75,67</b>

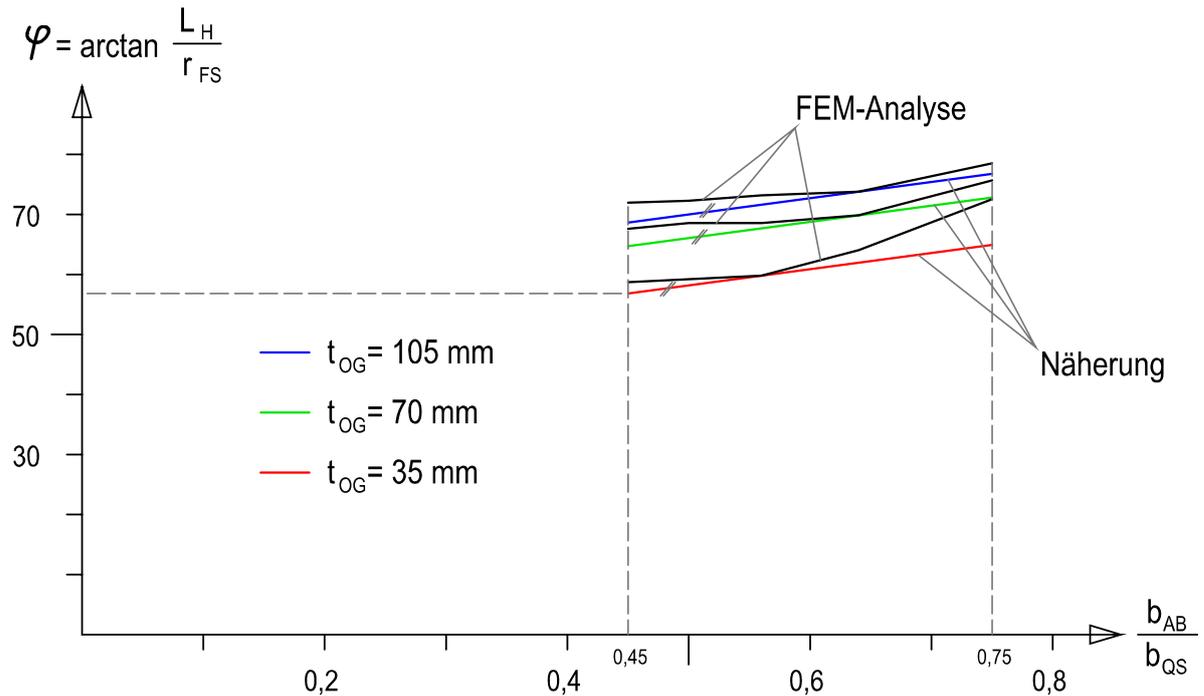
Tabelle 5.13: Berechnung des Ausbreitungswinkels  $\varphi$ , Modellsatz  $\gamma$

◆ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 105\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	Kraft über Obergurt in Stege	maximale Schubspannung	Einflusslänge horizontal	$b_{AB}/b_{QS}$	$\varphi = \arctan(L_H/r_{FS})$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{OG}$ [N]	$\tau_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$L_H$ [mm]		
<b>x1</b>	1000	450	1,50	275	277	1,56	845,979	<b>0,45</b>	<b>71,99</b>
<b>t1</b>	1000	450	3,00	275	254	1,43	844,229	<b>0,45</b>	<b>71,96</b>
<b>x4</b>	900	450	1,50	225	314	2,07	723,062	<b>0,50</b>	<b>72,72</b>
<b>t4</b>	900	450	3,00	225	285	1,93	704,730	<b>0,50</b>	<b>72,29</b>
<b>x2</b>	800	450	1,50	175	346	2,87	575,076	<b>0,56</b>	<b>73,07</b>
<b>t2</b>	800	450	3,00	175	328	2,70	578,887	<b>0,56</b>	<b>73,18</b>
<b>x5</b>	700	450	1,50	125	392	4,30	434,601	<b>0,64</b>	<b>73,95</b>
<b>t5</b>	700	450	3,00	125	369	4,09	429,714	<b>0,64</b>	<b>73,78</b>
<b>x3</b>	600	450	1,50	75	450	5,52	388,341	<b>0,75</b>	<b>79,07</b>
<b>t3</b>	600	450	3,00	75	416	5,37	368,970	<b>0,75</b>	<b>78,51</b>

Tabelle 5.14: Berechnung des Ausbreitungswinkels  $\varphi$ , Modellsatz  $\delta$

Leider kann kein allgemein gültiger Winkel gefunden werden. Es sei denn, der Winkel wird auf das Minimum mit  $58^\circ$  festgelegt. Damit überschätzt man bei einem Großteil der berechneten Modelle die maximale Schubspannung allerdings um ein Vielfaches. Andererseits kann je nach Parameterwahl die errechnete Schubspannung bei Hängevolllast (Annahme S460 für Hänger, restliche Konstruktion S355, siehe Kapitel 6.2) für die Schweißnahtbemessung (hier ist eine versenkte Kehlnaht vorgesehen) trotz großer Überschätzung noch immer zur Mindestschweißnaht ( $a=3\text{mm}$ ) führen, unter deren Grenze eine sinnvolle Naht nicht möglich ist. Bei Modellen mit großer Obergurtdicke und kleinem Freischnitt ist eine genauere Näherung im Sinne der Wirtschaftlichkeit aber von Vorteil, da die berechneten Schweißnähte hier über der Mindestschweißnahtdicke liegen.

Abbildung 5.32: Ausbreitungswinkel  $\varphi$  im Schnitt "Obergurt vertikal"

Beschreibung der Näherungsgeraden mit der Funktion  $y = k \cdot x + d$  ergibt:

$$\varphi = 27 \cdot (b_{AB}/b_{QS}) + d$$

für  $t_{OG} = 105 \text{ mm}$ :  $d = 56,55$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,75$

für  $t_{OG} = 70 \text{ mm}$ :  $d = 52,55$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,75$

für  $t_{OG} = 35 \text{ mm}$ :  $d = 44,64$   $0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,75$

$b_{AB}$ : Anschlussblechbreite  $b_{AB} = 450 \text{ mm}$

$b_{QS}$ : Querscheibenbreite  $600 \text{ mm} \leq b_{QS} \leq 1000 \text{ mm}$

$t_{OG}$ : Querscheibendicke  $35 \text{ mm} \leq t_{OG} \leq 105 \text{ mm}$

Aufgrund gegebener Detailabmessungen lässt sich der Ausbreitungswinkel mit Hilfe von Näherungsgeraden abschätzen. Über Ausbreitungswinkel und Freischnitttradius kann die horizontale Einflusslänge berechnet werden. Die maximale Schubspannung lässt sich bei bekannter Kraft  $F_{OG}$ , die vom Obergurt in die Stege übertragen wird (siehe Kapitel 5.3) und berechneter Einflusslänge einfach ermitteln.

$$L_H = \tan \varphi \cdot r_{FS}$$

$$\tau_{\max} = \frac{F_{OG}}{2} \cdot \frac{1}{L_H \cdot t_{OG}}$$

$$\tau_{\max} = \frac{F_{OG}}{2} \cdot \frac{1}{(\tan \varphi \cdot r_{FS} \cdot t_{OG})}$$

$r_{FS}$ : Freischnittradius

$L_H$ : horizontale Einflusslänge

$t_{OG}$ : Obergurtdicke

$F_{OG}$ : Kraft, die über den Obergurt in die Stege geleitet wird

$\tau_{max}$ : maximale Schubspannung

$\varphi$ : Ausbreitungswinkel aus Diagramm/ Funktionsgleichung

Besonders bei den Modellen mit der Obergurtdicke 35 mm und kleinen Freischnitten wird die maximale Schubspannung bei Anwendung des Rechenmodells stark überschätzt. Dies spiegelt sich auch beim Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Analyse mit jenen aus dem Rechenmodell im Diagramm auf Abbildung 5.33 wider. Die Modelle mit dünnem Obergurt und kleinem Freischnitt („r5“, „n5“, „r3“ und „n3“) liegen gegenüber den restlichen Modellen weit auf der „sicheren Seite“. Die Ergebnisse für die maximalen Schubspannungen im unten abgebildeten Diagramm resultieren aus der Berechnung des Lastfalls „Hängervolllast“ (Annahme Hänger mit S460, restliche Konstruktion mit S355, siehe Kapitel 6.2).

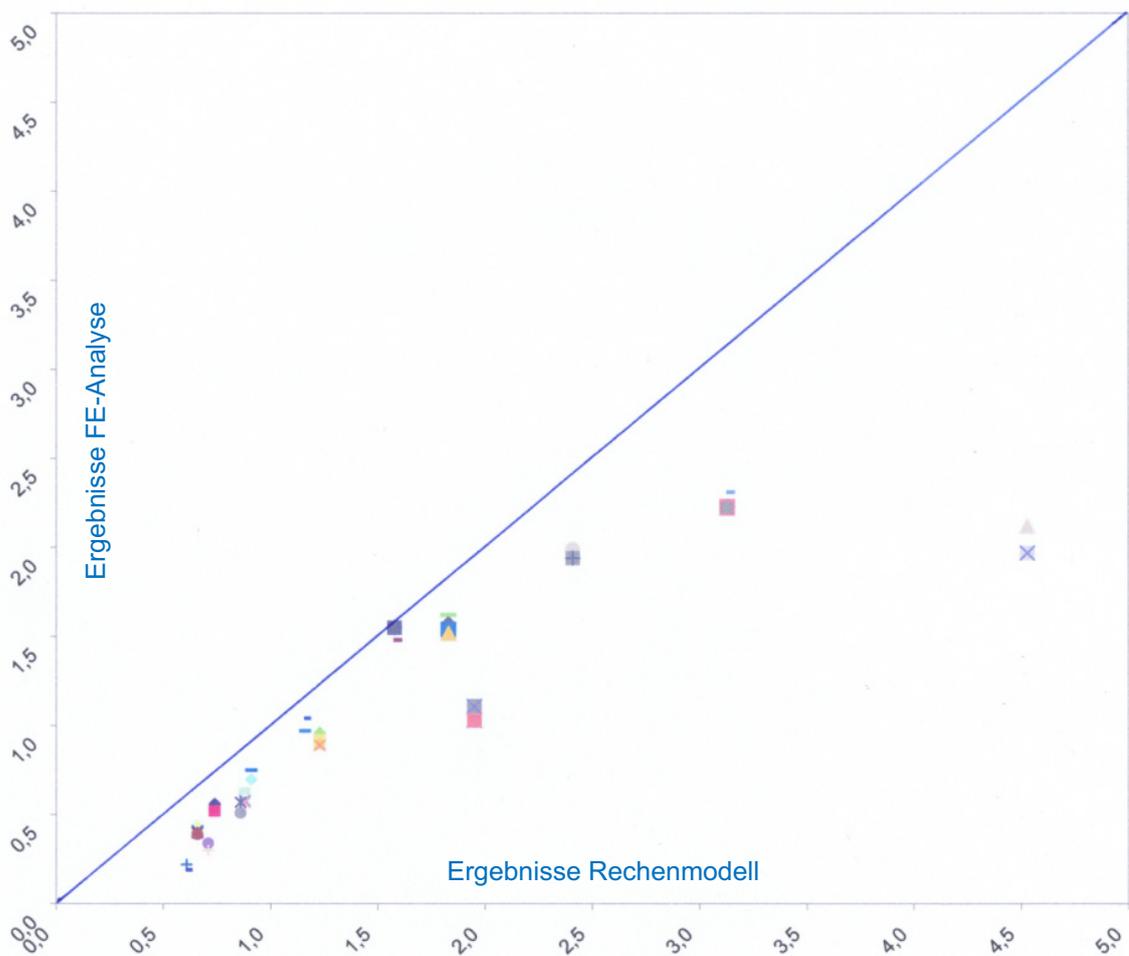


Abbildung 5.33: Ergebnisse  $\tau_{max}$  [kN/cm<sup>2</sup>] im Schnitt „OGh“



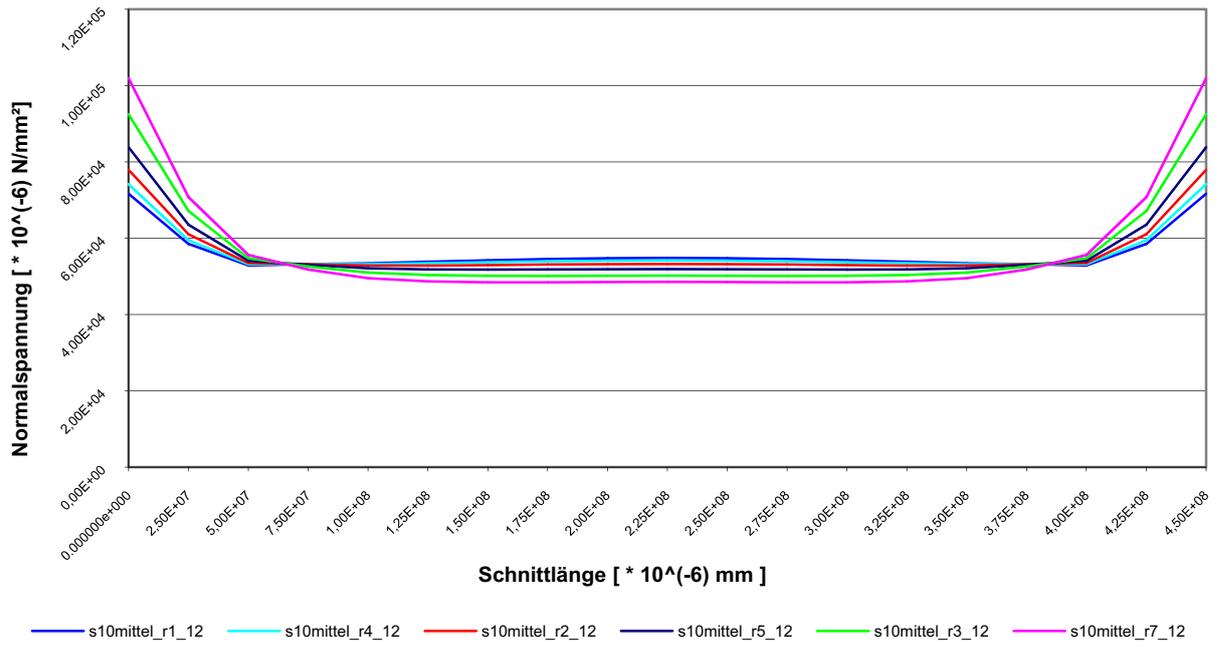


Abbildung 5.35: Normalspannung, Schnitt "ABh", Modellreihe "r" ( $t_{OG}=35 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )

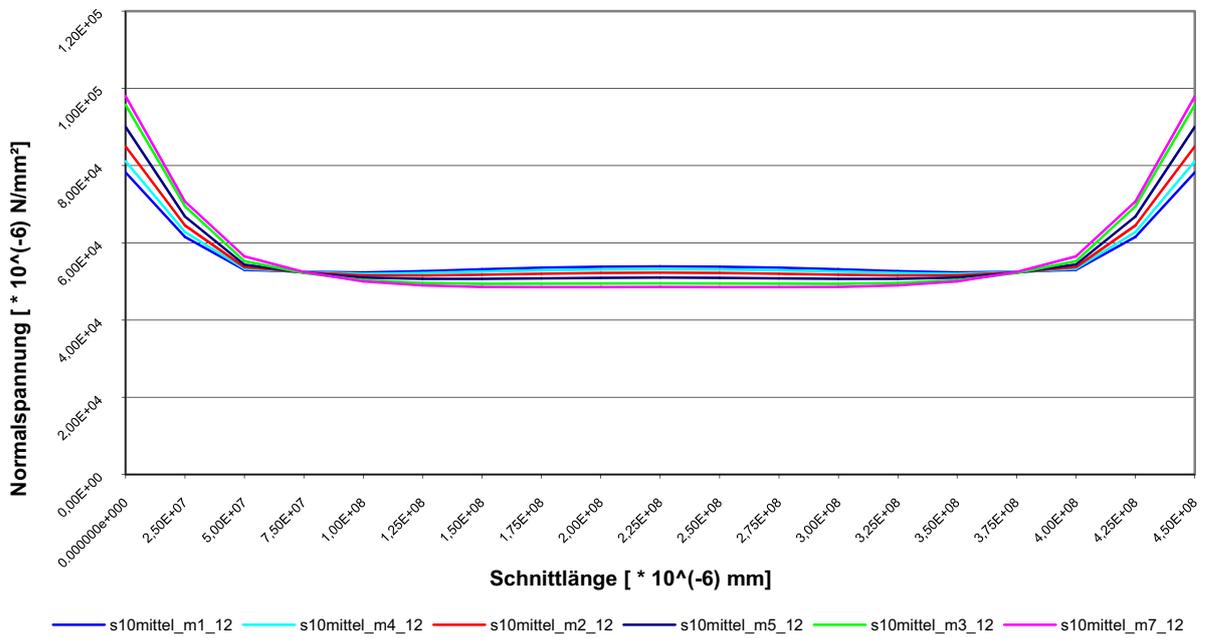


Abbildung 5.36: Normalspannung, Schnitt "ABh", Modellreihe "m" ( $t_{OG}=52,5 \text{ mm}$ ,  $h_{QS}=1500 \text{ mm}$ )

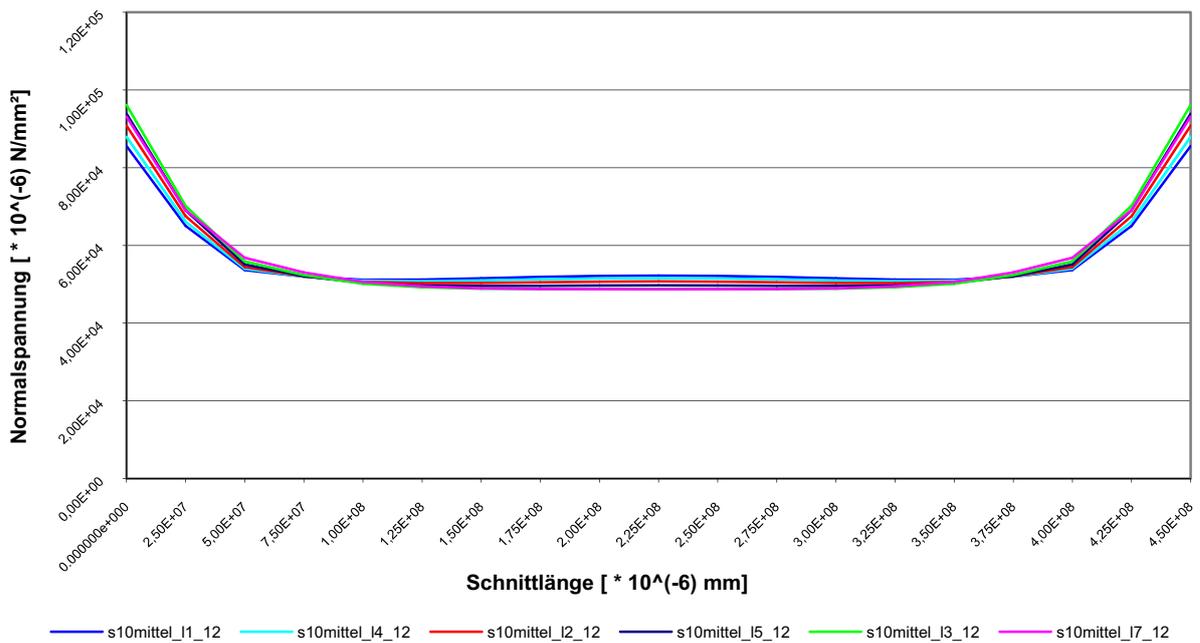


Abbildung 5.37: Normalspannung, Schnitt "ABh", Modellreihe "I" ( $t_{OG}=70$  mm,  $h_{QS}=1500$  mm)

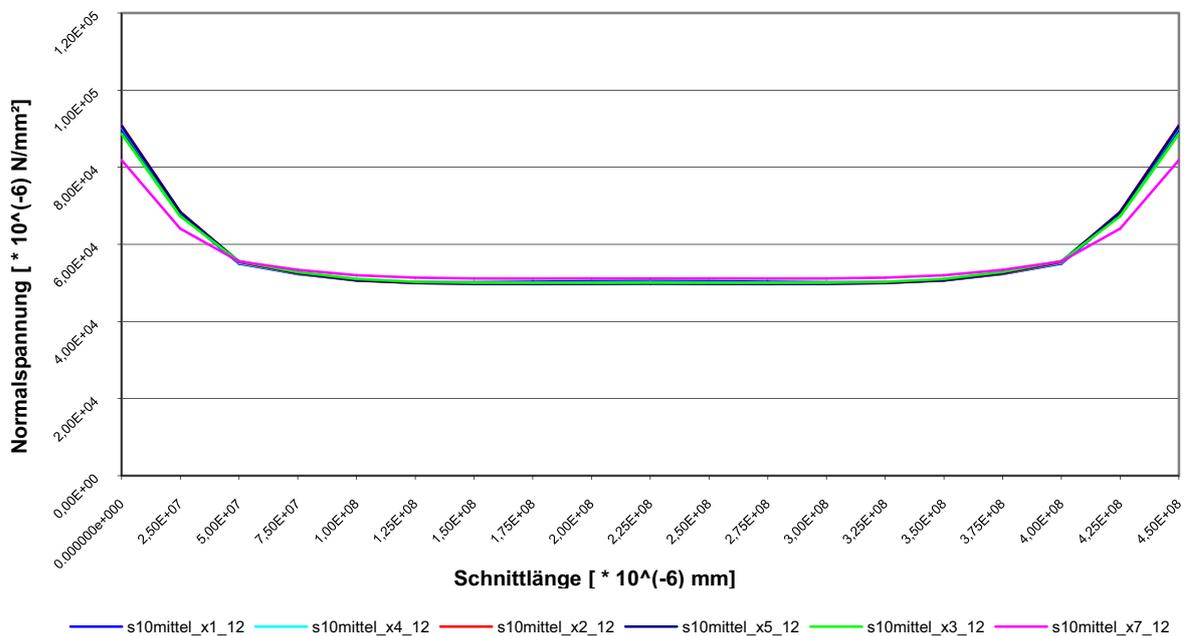


Abbildung 5.38: Normalspannung, Schnitt "ABh", Modellreihe "x" ( $t_{OG}=105$  mm,  $h_{QS}=1500$  mm)

Alle untersuchten Modelle weisen in diesem Schnitt an den Rändern des Anschlussblechs deutliche Spannungsspitzen auf. Die Spannungsverläufe zeigen, dass, je dünner der Obergurt ist, desto größer wird die Abhängigkeit der Spannungsspitze von der Querschnittbreite bzw. vom Freischnitttradius. Im Gegensatz dazu hat der Parameter Querschnittbreite bzw. Freischnitttradius bei Modellen mit dickem Obergurt kaum einen

Einfluss auf die Größe der Spannungsspitzen (siehe Abbildung 5.38). Der einzige „Ausreißer“ in dieser Modellreihe ist das Modell mit dem Freischnitttradius  $r_{FS} = 25 \text{ mm}$  (Modell „x7“)

Wie im Schnitt „Querscheibe horizontal“ ist das einfachste Rechenmodell, um die maximalen Normalspannungen abzudecken, die Erhöhung der mittleren Spannung (gemittelte Spannung längs des Schnitts) um einen Faktor, hier mit  $d$  bezeichnet.

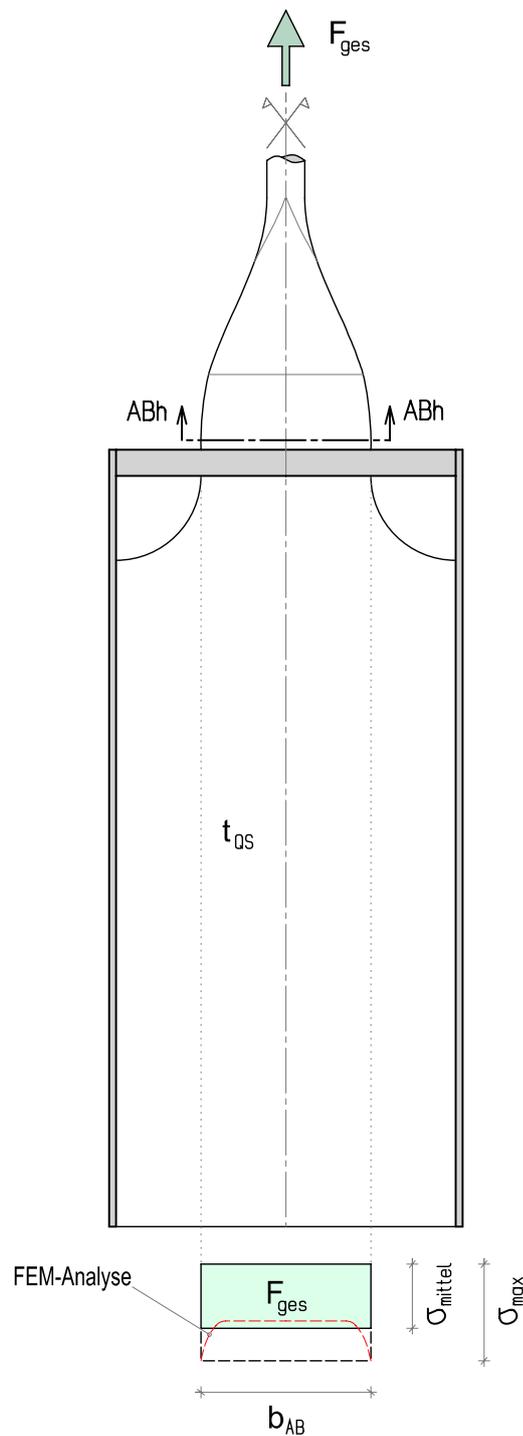


Abbildung 5.39: Schnitt „Anschlussblech horizontal“ mit Normalspannungsverteilung

In den folgenden Tabellen wird für die untersuchten Modelle der Faktor  $d$  berechnet, der das Verhältnis maximale Normalspannung zu mittlerer Normalspannung darstellt.

◆ Modellsatz  $\alpha$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 35\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	gesamte Hängerkraft	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$d = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS} [mm]$	$b_{AB} [mm]$	$h_{QS} [m]$	$r_{FS} [mm]$	$F_{ges} [N]$	$\sigma_{mit} [10^{-2} N/mm^2]$	$\sigma_{max} [10^{-2} N/mm^2]$		
<b>r1</b>	1000	450	1,50	275	1000	5,63	7,17	<b>0,450</b>	<b>1,27</b>
<b>n1</b>	1000	450	3,00	275	1000	5,63	7,10	<b>0,450</b>	<b>1,26</b>
<b>r4</b>	900	450	1,50	225	1000	5,64	7,42	<b>0,500</b>	<b>1,32</b>
<b>n4</b>	900	450	3,00	225	1000	5,64	7,36	<b>0,500</b>	<b>1,30</b>
<b>r2</b>	800	450	1,50	175	1000	5,66	7,79	<b>0,563</b>	<b>1,38</b>
<b>n2</b>	800	450	3,00	175	1000	5,66	7,73	<b>0,563</b>	<b>1,37</b>
<b>r5</b>	700	450	1,50	125	1000	5,68	8,38	<b>0,643</b>	<b>1,48</b>
<b>n5</b>	700	450	3,00	125	1000	5,69	8,32	<b>0,643</b>	<b>1,46</b>
<b>r3</b>	600	450	1,50	75	1000	5,73	9,25	<b>0,750</b>	<b>1,62</b>
<b>n3</b>	600	450	3,00	75	1000	5,73	9,16	<b>0,750</b>	<b>1,60</b>
<b>r7</b>	500	450	1,50	25	1000	5,77	10,19	<b>0,900</b>	<b>1,77</b>
<b>n7</b>	500	450	3,00	25	1000	5,77	10,09	<b>0,900</b>	<b>1,75</b>

Tabelle 5.15: Berechnung des Faktors  $d$ , Modellsatz  $\alpha$

◆ Modellsatz  $\beta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 52,5\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	gesamte Hängerkraft	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$d = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS} [mm]$	$b_{AB} [mm]$	$h_{QS} [m]$	$r_{FS} [mm]$	$F_{ges} [N]$	$\sigma_{mit} [10^{-2} N/mm^2]$	$\sigma_{max} [10^{-2} N/mm^2]$		
<b>m1</b>	1000	450	3,00	275	1000	5,66	7,83	<b>0,450</b>	<b>1,38</b>
<b>m4</b>	900	450	3,00	225	1000	5,67	8,11	<b>0,500</b>	<b>1,43</b>
<b>m2</b>	800	450	3,00	175	1000	5,69	8,50	<b>0,563</b>	<b>1,49</b>
<b>m5</b>	700	450	3,00	125	1000	5,72	9,00	<b>0,643</b>	<b>1,57</b>
<b>m3</b>	600	450	3,00	75	1000	5,74	9,57	<b>0,750</b>	<b>1,67</b>
<b>m7</b>	500	450	3,00	25	1000	5,75	9,79	<b>0,900</b>	<b>1,70</b>

Tabelle 5.16: Berechnung des Faktors  $d$ , Modellsatz  $\beta$

◆ Modellsatz  $\gamma$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 70\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	gesamte Hängerkraft	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$d = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{ges}$ [N]	$\sigma_{mit}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]		
<b>l1</b>	1000	450	1,50	275	1000	5,69	8,56	<b>0,450</b>	<b>1,50</b>
<b>h1</b>	1000	450	3,00	275	1000	5,68	8,38	<b>0,450</b>	<b>1,47</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	1000	5,70	8,80	<b>0,500</b>	<b>1,54</b>
<b>h4</b>	900	450	3,00	225	1000	5,70	8,64	<b>0,500</b>	<b>1,52</b>
<b>l2</b>	800	450	1,50	175	1000	5,71	9,08	<b>0,563</b>	<b>1,59</b>
<b>h2</b>	800	450	3,00	175	1000	5,71	8,96	<b>0,563</b>	<b>1,57</b>
<b>l5</b>	700	450	1,50	125	1000	5,73	9,39	<b>0,643</b>	<b>1,64</b>
<b>h5</b>	700	450	3,00	125	1000	5,73	9,29	<b>0,643</b>	<b>1,62</b>
<b>l3</b>	600	450	1,50	75	1000	5,74	9,61	<b>0,750</b>	<b>1,68</b>
<b>h3</b>	600	450	3,00	75	1000	5,74	9,55	<b>0,750</b>	<b>1,66</b>
<b>l7</b>	500	450	1,50	25	1000	5,72	9,31	<b>0,900</b>	<b>1,63</b>
<b>h7</b>	500	450	3,00	25	1000	5,72	9,30	<b>0,900</b>	<b>1,63</b>

Tabelle 5.17: Berechnung des Faktors d, Modellsatz  $\gamma$

◆ Modellsatz  $\delta$  (Obergurtdicke  $t_{OG} = 105\text{mm}$ )

Modell	Querscheibebreite	Anschlussblechbreite	Querscheibenhöhe	Freischnitt-radius	gesamte Hängerkraft	mittlere Normalspannung	maximale Normalspannung	$b_{AB}/b_{QS}$	$d = \sigma_{max}/\sigma_{mit}$
	$b_{QS}$ [mm]	$b_{AB}$ [mm]	$h_{QS}$ [m]	$r_{FS}$ [mm]	$F_{ges}$ [N]	$\sigma_{mit}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [ $10^{-2}$ N/mm <sup>2</sup> ]		
<b>l1</b>	1000	450	1,50	275	1000	5,69	8,56	<b>0,450</b>	<b>1,50</b>
<b>h1</b>	1000	450	3,00	275	1000	5,68	8,38	<b>0,450</b>	<b>1,47</b>
<b>l4</b>	900	450	1,50	225	1000	5,70	8,80	<b>0,500</b>	<b>1,54</b>
<b>h4</b>	900	450	3,00	225	1000	5,70	8,64	<b>0,500</b>	<b>1,52</b>
<b>l2</b>	800	450	1,50	175	1000	5,71	9,08	<b>0,563</b>	<b>1,59</b>
<b>h2</b>	800	450	3,00	175	1000	5,71	8,96	<b>0,563</b>	<b>1,57</b>
<b>l5</b>	700	450	1,50	125	1000	5,73	9,39	<b>0,643</b>	<b>1,64</b>
<b>h5</b>	700	450	3,00	125	1000	5,73	9,29	<b>0,643</b>	<b>1,62</b>
<b>l3</b>	600	450	1,50	75	1000	5,74	9,61	<b>0,750</b>	<b>1,68</b>
<b>h3</b>	600	450	3,00	75	1000	5,74	9,55	<b>0,750</b>	<b>1,66</b>
<b>l7</b>	500	450	1,50	25	1000	5,72	9,31	<b>0,900</b>	<b>1,63</b>
<b>h7</b>	500	450	3,00	25	1000	5,72	9,30	<b>0,900</b>	<b>1,63</b>

Tabelle 5.18: Berechnung des Faktors d, Modellsatz  $\delta$

Anhand der berechneten Modelle ist ersichtlich, dass die maximalen Normalspannungen im Wesentlichen nur von den Parametern Obergurtdicke ( $t_{OG}$ ) und Querscheibenbreite ( $b_{QS}$ ) bzw. Freischnittradius ( $r_{FS}$ ) abhängen. Für das Diagramm, das den Faktor  $d$  in Abhängigkeit von den geometrischen Größen Anschlussblechbreite und Querscheibenbreite darstellt, werden nur die Modelle mit der Querschnittshöhe 1,5 m verwendet. Damit sind auch die Spannungsspitzen der Modelle mit größeren Querscheibenhöhen abgedeckt.

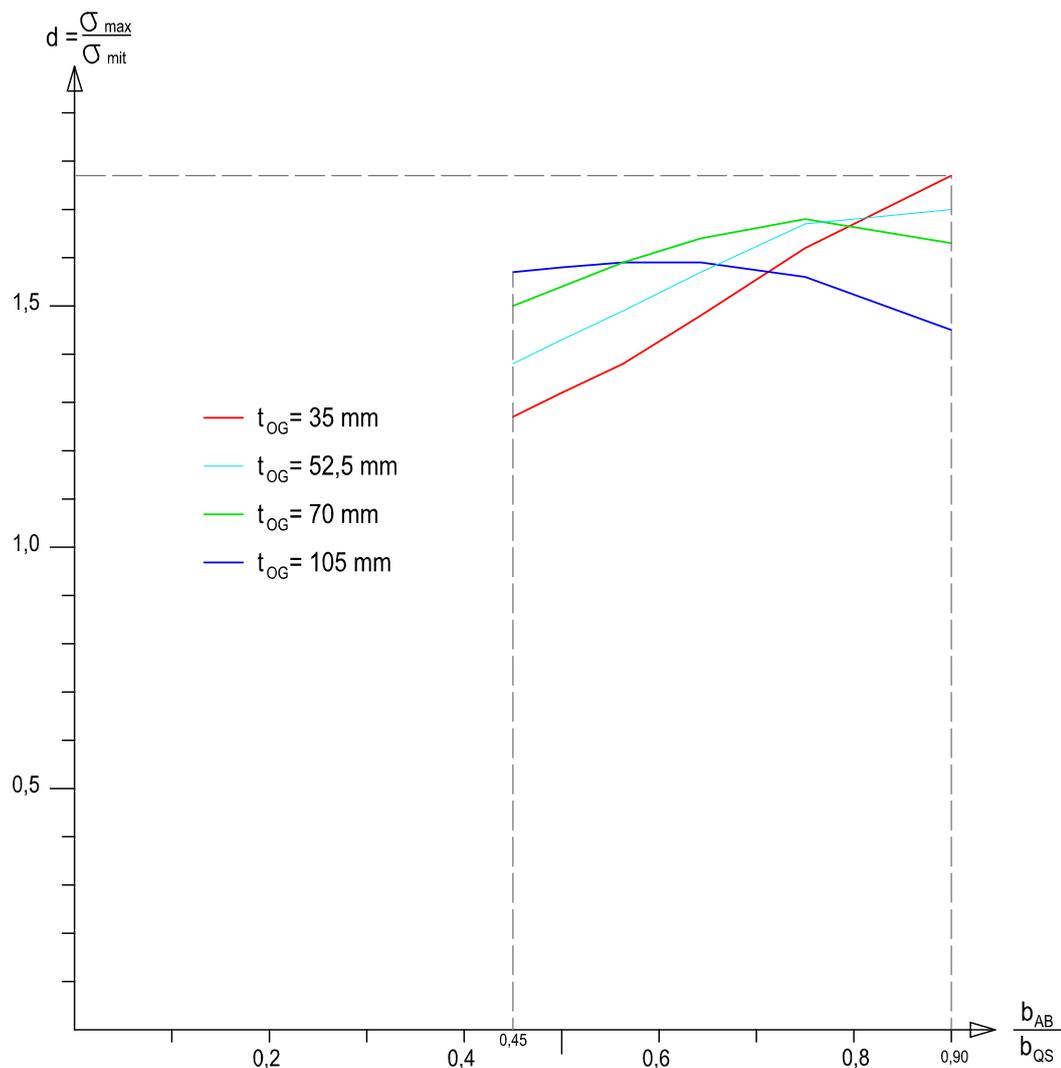


Abbildung 5.40: Ermittlung des Faktors  $d$ , Ergebnisse FE-Analyse

Während die Kurve für die Modelle mit der Obergurtdicke 35 mm nahezu linear verläuft und beim größten Verhältnis Anschlussblechbreite zu Querscheibenhöhe den größten Wert erreicht, verhalten sich die Kurven mit der Obergurtdicke 70 mm und 105 mm deutlich anders. Um zu erkennen, wie die Veränderung der Kurven von  $t_{OG} = 70 \text{ mm}$  zu  $t_{OG} = 35 \text{ mm}$  stattfindet, werden die Ergebnisse des Modellsatzes  $\beta$  ( $t_{OG} = 52,5 \text{ mm}$ ) ausgewertet. Es wird nach Lösungen in Form von Näherungsgeraden für die Modelle mit  $t_{OG} = 35 \text{ mm}$  und  $t_{OG} \geq 70 \text{ mm}$  gesucht, die mit Hilfe linearer Interpolationen die Maximalspannungen für die

Modelle mit  $t_{OG} = 52,5$  mm abdecken. Für die Obergurtdicke 35 mm wird eine linear ansteigende Gerade gewählt, für die Obergurtdicken  $t_{OG} \geq 70$  mm findet man mit einer Konstanten das Auslangen.

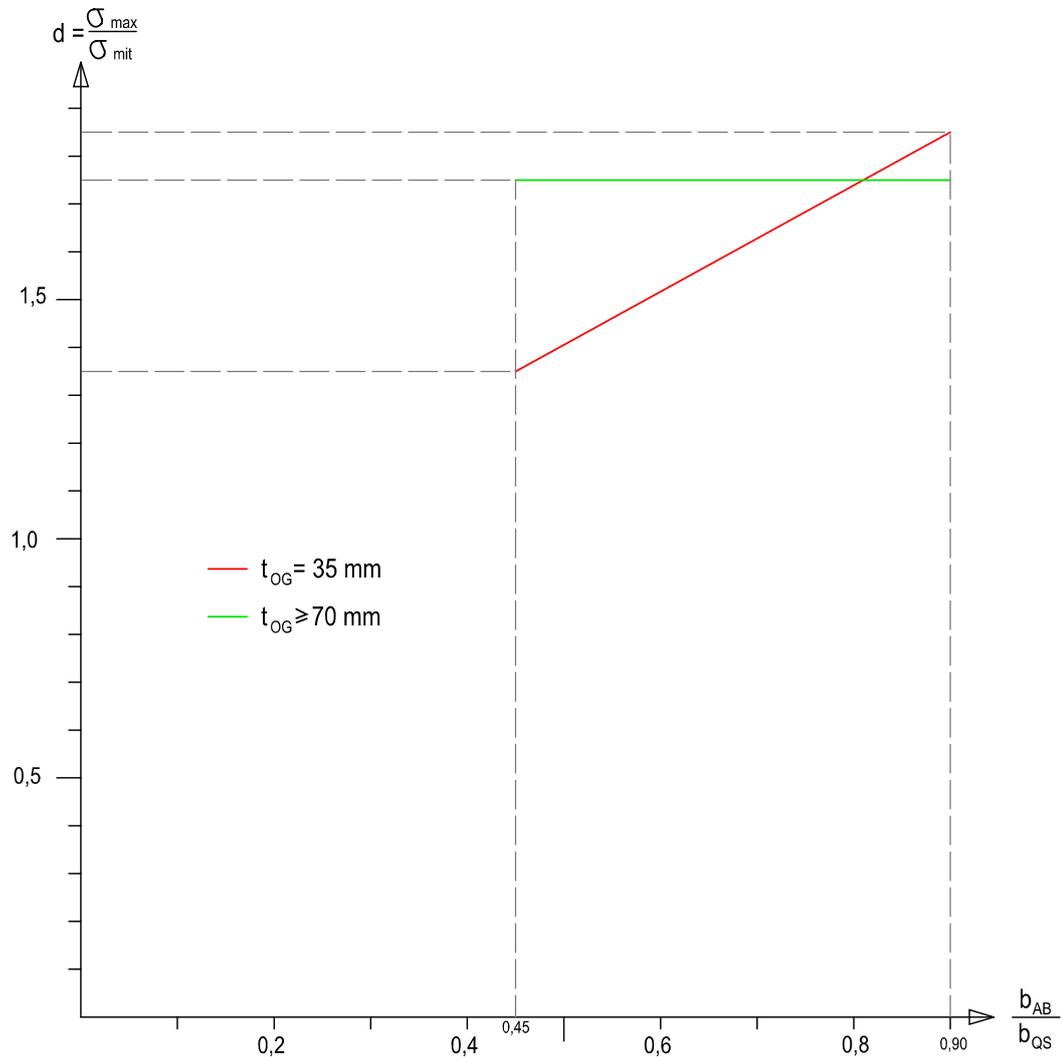


Abbildung 5.41: Ermittlung des Faktors  $d$ , Näherungen

Beschreibung der Näherungsgeraden mit der Funktion  $y = k \cdot x + d$  ergibt:

$$\text{für } t_{OG} \geq 70\text{mm:} \quad d = 1,75 \quad 0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,90$$

$$\text{für } t_{OG} = 35\text{mm:} \quad d = 1,11 \cdot (b_{AB}/b_{QS}) + 0,85 \quad 0,45 \leq (b_{AB}/b_{QS}) \leq 0,90$$

$b_{AB}$ : Anschlussblechbreite	$b_{AB} = 450$ mm
$b_{QS}$ : Querscheibenbreite	$500 \text{ mm} \leq b_{QS} \leq 1000$ mm
$t_{OG}$ : Querscheibendicke	$35 \text{ mm} \leq t_{OG} \leq 105$ mm

Bei bekannter Hängerkraft und den geometrischen Abmessungen des Details lässt sich die maximale Normalspannung im Schnitt „Anschlussblech horizontal“ abschätzen:

$$\sigma_{\text{mit}} = \frac{F_{\text{ges}}}{(b_{\text{AB}} \cdot t_{\text{AB}})}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{mit}} \cdot d$$

$b_{\text{AB}}$ : Anschlussblechbreite

$t_{\text{AB}}$ : Anschlussblechdicke

$F_{\text{ges}}$ : gesamte Hängerkraft

$\sigma_{\text{mit}}$ : mittlere Normalspannung

$\sigma_{\text{max}}$ : maximale Normalspannung

$d$ : Erhöhungsfaktor aus Diagramm/ Funktionsgleichung

Das Rechenmodell wird auf seine Funktion überprüft, indem die berechneten maximalen Normalspannungen der Rechenmodelle denen aus der FE-Analyse gegenüber gestellt werden. Im folgenden Diagramm ist die Kontrolle grafisch dargestellt. Die Berechnung der Normalspannungen erfolgt für den Lastfall „Hängervolllast“ (Annahme Hänger S460, restliche Konstruktion S355, siehe Kapitel 6.4). Wie bereits mehrfach zuvor beschrieben, sollen alle Diagrammpunkte unterhalb der Linie liegen, hier zwischen den Wertepaaren (0|0) und (40|40). Damit ist die praktische Anwendbarkeit des Rechenmodells gezeigt.

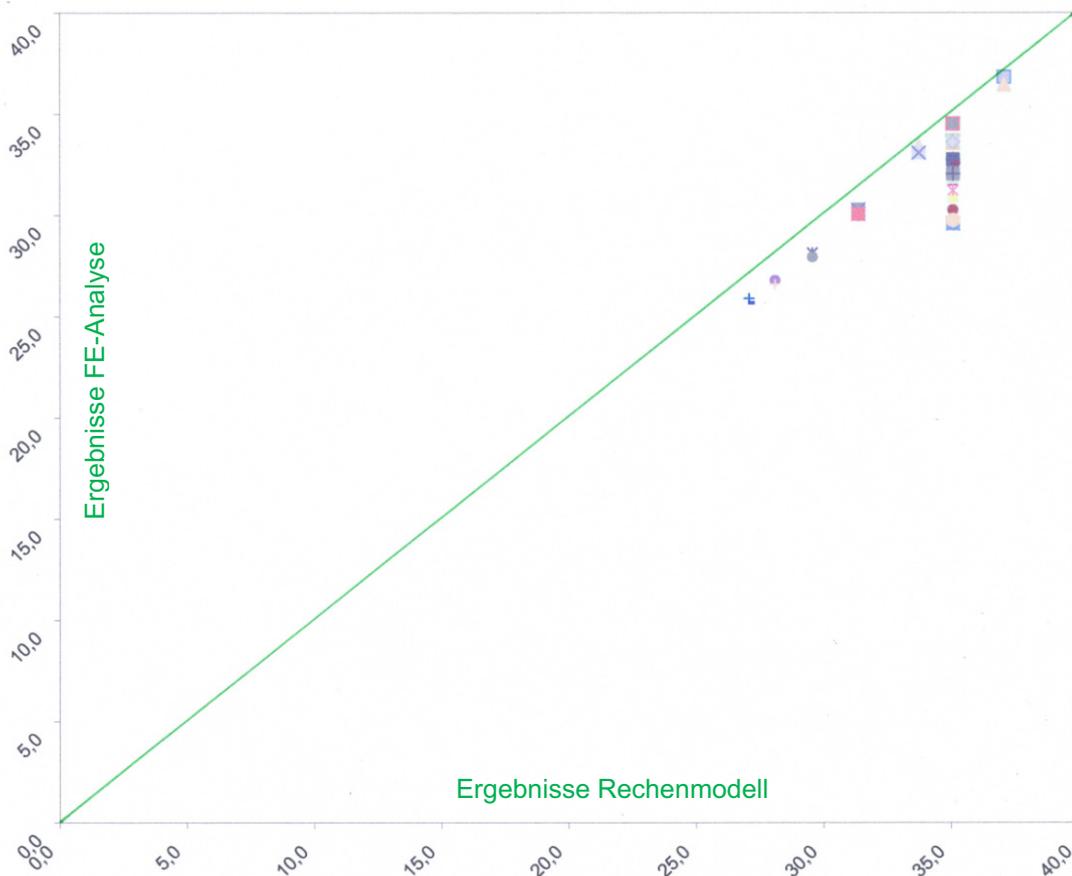


Abbildung 5.42: Ergebnisse  $\sigma_{\text{max}}$  [kN/cm<sup>2</sup>] im Schnitt „ABh“

## 6 Schweißnahtdimensionierung und Spannungsnachweis für einen konkreten Lastfall

Die Berechnung mittels FE-Modellen und die Ausarbeitung der Rechenmodelle wurden mit einer Hängerlast von 1000 N, als Einheitslast bezeichnet, durchgeführt. In diesem Kapitel erfolgen die Dimensionierung der Schweißnähte (Schnitte „Querscheibe vertikal“ und „Obergurt horizontal“) und der Nachweis des Werkstoffs (Schnitte „Querscheibe horizontal“ und „Anschlussblech horizontal“) für einen konkreten Lastfall für alle Modelle der Parameterstudien. Folgende Annahmen werden für die Bemessungslast und die Stahlgüten der Bauteile getroffen:

Bauteil	Stahlgüte
Hänger mit Schaufel	S 460
Anschlussblech	S 355
Obergurt	
Querscheibe	
Stege	

Tabelle 6.1: Werkstoffannahmen für Schweißnahtbemessung

Die maximale Normalkraft im Hänger ergibt sich zu (= Lastfall „Hängervolllast“):

$$F_{\text{ges,max}} = A_{\text{Hänger}} \cdot f_{y,\text{Hänger}} = 78,54 \cdot 46,0 = 3613 \text{ kN}$$

Die Ergebnisse für den Faktor  $f$  und die Spannungen ( $\sigma_{\text{max}}$  und  $\tau_{\text{max}}$ ) aus der FE-Analyse werden mit denen aus den Rechenmodellen verglichen. Für die FE-Ergebnisse brauchen die bereits berechneten Größen nur noch mit dem Faktor 3613 multipliziert zu werden. Für die mit den Rechenmodellen abgeschätzten Ergebnisse werden alle Modelle mit der Hängerlast  $F_{\text{ges,max}}$  berechnet. Mit den Ergebnissen aus der FE-Analyse und durch Anwendung der Rechenmodelle können Diagramme angefertigt werden, die über die Güte und die Anwendbarkeit der aufgestellten Näherungslösungen Auskunft geben (siehe im vorigen Kapitel Abbildung 5.5, Abbildung 5.18, Abbildung 5.26, Abbildung 5.33 und Abbildung 5.42).

Die Rechenmodellergebnisse werden für die Dimensionierung der Schweißnähte in den Schnitten „Querscheibe vertikal“ und „Obergurt horizontal“, sowie für den Werkstoffnachweis in den Schnitten „Querscheibe horizontal“ und „Anschlussblech horizontal“ herangezogen. Die Schweißnahtdimensionierung erfolgt nach ÖNORM EN 1993-1-8 [4].

### 6.1 Doppelte Kehlnaht im Schnitt „Querscheibe vertikal“

Das Rechenmodell für die Spannungsabschätzung im Schnitt „Querscheibe vertikal“ befindet sich in Kapitel 5.4. Die Berechnung der Kehlnaht erfolgt nach dem „Richtungsbezogenen Verfahren“ (siehe ÖNORM EN 1993-1-8, Punkt 4.5.3.2 [4]).

Gegeben:        maximale Schubspannung  $\tau_{\text{max}}$   
                   Zugfestigkeit  $f_u = 51 \text{ kN/cm}^2$   
                   Korrelationsbeiwert  $\beta_w = 0,9$

Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{m2} = 1,25$

Querscheibendicke  $t_{QS} = 40 \text{ mm}$

Gesucht: Kehlnahtdicke  $a$

$$\tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} = 45,33 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \cdot t_{QS} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} \cdot a_{\text{erf,ges}}$$

$$a_{\text{erf,ges}} = \tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \cdot t_{QS} \cdot \frac{\beta_w \cdot \gamma_{m2}}{f_u}$$

$$a \geq \frac{a_{\text{erf,ges}}}{2}$$

In Anhang A23 bis A26 befinden sich die ausführlichen Tabellen zur Berechnung der erforderlichen Gesamtschweißnahtdicken für alle untersuchten Modelle. Die erforderliche Gesamtschweißnaht wird berechnet und im Anschluss eine entsprechende Kehlnaht (ausgeführt wird eine doppelte Kehlnaht, hier ist das Maß für eine Seite angegeben) gewählt. In der nachstehenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Modelle mit den Grenzparametern angeführt. Die untere Grenze für die Querscheibenbreite der Parameterstudien ist 500 mm. Der zugehörige Freischnitt beträgt 25 mm, welcher baupraktisch zu gering ist. Deshalb werden die Schweißnähte erst ab den Modellen mit Querscheibenbreite 600 mm (Freischnittradius 75 mm) berechnet.

Modell				erforderliche Gesamt- schweißnahtdicke	gewählte Schweißnahtdicke
Name	$t_{OG}$ [mm]	$b_{QS}$ [m]	$h_{QS}$ [m]	$a_{\text{erf,ges}}$ [mm]	$a$ [mm]
r 1	35	1000	1,5	8,3	4,5
n 1	35	1000	3,0	7,4	4,0
r 3	35	600	1,5	10,8	5,5
n 3	35	600	3,0	10,4	5,5
l 1	70	1000	1,5	6,9	3,5
h 1	70	1000	3,0	5,8	3,0
l 3	70	600	1,5	7,9	4,0
h 3	70	600	3,0	6,9	3,5
x 1	105	1000	1,5	5,5	3,0
t 1	105	1000	3,0	4,4	3,0
x 3	105	600	1,5	5,9	3,0
t 3	105	600	3,0	4,9	3,0

Tabelle 6.2: Bemessung Kehlnähte, Schnitt „Querscheibe vertikal“

Für den Lastfall „Hängervolllast“ beträgt die maximale Kehlnahtdicke 5,5 mm (Modell mit dünnstem Obergurt, baupraktisch kleinstem Freischnitt und geringster Querscheibenhöhe).

## 6.2 Versenkte Kehlnaht im Schnitt „Obergurt horizontal“

Das Rechenmodell für die Spannungsabschätzung im Schnitt „Obergurt horizontal“ befindet sich in Kapitel 5.6. Die Berechnung der Kehlnaht erfolgt nach dem „Richtungsbezogenen Verfahren“ (siehe ÖNORM EN 1993-1-8, Punkt 4.5.3.2 [4]).

Gegeben: maximale Schubspannung  $\tau_{\max}$   
 Zugfestigkeit  $f_u = 51 \text{ kN/cm}^2$   
 Korrelationsbeiwert  $\beta_w = 0,9$   
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{m2} = 1,25$

Gesucht: Kehlnahtdicke  $a$

$$\tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} = 45,33 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \cdot t_{QS} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} \cdot a_{\text{erf}}$$

$$a_{\text{erf}} = \tau_{\max} \cdot \sqrt{3} \cdot t_{QS} \cdot \frac{\beta_w \cdot \gamma_{m2}}{f_u}$$

$$a \geq a_{\text{erf}}$$

In Anhang A23 bis A26 befinden sich die ausführlichen Tabellen zur Berechnung der erforderlichen Schweißnahtdicken für alle untersuchten Modelle. An dieser Stelle ist eine versenkte Kehlnaht vorgesehen. Anschließend sind die Ergebnisse für die Modelle mit den Grenzparametern angeführt:

Modell				erforderliche Schweißnahtdicke	gewählte Schweißnahtdicke
Name	$t_{OG}$ [mm]	$b_{QS}$ [m]	$h_{QS}$ [m]	$a_{\text{erf}}$ [mm]	$a$ [mm]
r 1	35	1000	1,5	0,8	3,0
n 1	35	1000	3,0	0,8	3,0
r 3	35	600	1,5	6,1	6,5
n 3	35	600	3,0	6,1	6,5
l 1	70	1000	1,5	1,8	3,0
h 1	70	1000	3,0	1,8	3,0
l 3	70	600	1,5	8,4	8,5
h 3	70	600	3,0	8,4	8,5
x 1	105	1000	1,5	3,0	3,0
t 1	105	1000	3,0	3,0	3,0
x 3	105	600	1,5	9,7	10,0
t 3	105	600	3,0	9,7	10,0

Tabelle 6.3: Bemessung versenkte Kehlnähte, Schnitt „Obergurt horizontal“

Anhand der Ergebnisse in der Tabelle ist ersichtlich, dass für die Berechnung der maximalen Schubspannung im Schnitt „Obergurt horizontal“ ein Rechenmodell aufgestellt wurde, das vom Parameter

Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ) unabhängig ist. Für den Lastfall „Hängervolllast“ beträgt die maximale versenkte Kehlnahtdicke 10,0 mm (Modell mit dickstem Obergurt und kleinstem Freischnitt).

### 6.3 Durchgeschweißte Naht im Schnitt „Querscheibe horizontal“

Das Rechenmodell für die Spannungsabschätzung im Schnitt „Querscheibe horizontal“ befindet sich in Kapitel 5.5. Die Tragfähigkeit einer durchgeschweißten Stumpfnahht wird mit dem Nachweis am Grundwerkstoff gezeigt (siehe ÖNORM EN 1993-1-8, Punkt 4.7.1 [4]).

Gegeben: maximale Normalspannung  $\sigma_{\max}$   
 Fließspannung  $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$   
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{m0} = 1,0$

Gesucht: Werkstoffnachweis

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_y}{\gamma_{m0}} = 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Ausnutzung in \%} = \frac{\sigma_{\max}}{\frac{f_y}{\gamma_{m0}}} \cdot 100$$

In Anhang A23 bis A26 befinden sich die ausführlichen Tabellen zur Berechnung der Werkstoffausnutzung für alle untersuchten Modelle. Anschließend sind die Ergebnisse für die Modelle mit den Grenzparametern angeführt:

Modell				Ausnutzung des Werkstoffs
Name	$t_{OG}$ [mm]	$b_{QS}$ [m]	$h_{QS}$ [m]	[%]
r 1	35	1000	1,5	68
n 1	35	1000	3,0	68
r 3	35	600	1,5	67
n 3	35	600	3,0	67
l 1	70	1000	1,5	56
h 1	70	1000	3,0	56
l 3	70	600	1,5	49
h 3	70	600	3,0	49
x 1	105	1000	1,5	46
t 1	105	1000	3,0	46
x 3	105	600	1,5	39
t 3	105	600	3,0	39

Tabelle 6.4: Werkstoffnachweis, Schnitt „Querscheibe horizontal“

Anhand der Tabelle ist ersichtlich, dass für die Berechnung der maximalen Normalspannung im Schnitt „Querscheibe horizontal“ ein Rechenmodell aufgestellt wurde, das vom Parameter Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ) unabhängig ist. Für den Lastfall „Hängervolllast“ beträgt die maximale Ausnutzung des Werkstoffes rund 70% (Modell mit dünnstem Obergurt und größtem Freischnitt).

#### 6.4 Durchgeschweißte Naht im Schnitt „Anschlussblech horizontal“

Das Rechenmodell für die Spannungsabschätzung im Schnitt „Anschlussblech horizontal“ befindet sich in Kapitel 5.7. Die Tragfähigkeit einer durchgeschweißten Stumpfnahnt wird mit dem Nachweis am Grundwerkstoff gezeigt (siehe ÖNORM EN 1993-1-8, Punkt 4.7.1 [4]).

Gegeben: maximale Normalspannung  $\sigma_{\max}$   
 Fließspannung  $f_y = 35,5 \text{ kN/cm}^2$   
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{m0} = 1,00$

Gesucht: Werkstoffnachweis

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_y}{\gamma_{m0}} = 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Ausnutzung in \%} = \frac{\sigma_{\max}}{\frac{f_y}{\gamma_{m0}}} \cdot 100$$

In Anhang A23 bis A26 befinden sich die ausführlichen Tabellen zur Berechnung der Ausnutzung für alle untersuchten Modelle. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Modelle mit den Grenzparametern angeführt. Aus baupraktischen Gründen werden nur die Modelle ab einer Querscheibenbreite von 600 mm berechnet, da der Freischnitt bei einer Querscheibenbreite von 500 mm nur 25 mm beträgt.

Modell				Ausnutzung des Werkstoffs
Name	$t_{OG}$ [mm]	$b_{QS}$ [m]	$h_{QS}$ [m]	[%]
r 1	35	1000	1,5	76
n 1	35	1000	3,0	76
r 3	35	600	1,5	95
n 3	35	600	3,0	95
l 1	70	1000	1,5	99
h 1	70	1000	3,0	99
l 3	70	600	1,5	99
h 3	70	600	3,0	99
x 1	105	1000	1,5	99
t 1	105	1000	3,0	99
x 3	105	600	1,5	99
t 3	105	600	3,0	99

Tabelle 6.5: Werkstoffnachweis, Schnitt „Anschlussblech horizontal“

Anhand der Tabelle ist ersichtlich, dass für die Berechnung der maximalen Normalspannung im Schnitt „Anschlussblech horizontal“ ein Rechenmodell aufgestellt wurde, das vom Parameter Querscheibenhöhe ( $h_{QS}$ ) unabhängig ist. Das verwendete Anschlussblech ist beim Lastfall „Hängervolllast“ beim Großteil der Modelle zur Gänze ausgenutzt.

## 7 Zusammenfassung und offene Punkte

Die mit Hilfe von hier entwickelten Rechenmodellen abgeschätzten Spannungen in den untersuchten Schnitten des Details sind Resultate der Kraftübertragung zwischen Hänger und Versteifungsträger. Spannungen aus Biegebeanspruchungen des Versteifungsträgers oder etwaige Druckbelastungen aus den Lastfällen „Transport“ und „Montage“ wurden in der Untersuchung zur Erstellung der Rechenmodelle nicht berücksichtigt. Bei der Schweißnahtdimensionierung sind solche zusätzlichen Spannungen auf jeden Fall zu berücksichtigen.

Die vorliegenden Parameterstudien zeigen, dass die Schweißnähte für die Anschlüsse „Anschlussblech an Obergurt“, „Querscheibe an Obergurt“ sowie „Obergurt an Stege“ vom Parameter „Querscheibenhöhe“ in vernachlässigbarer Größe abhängen. Für die Abschätzung der Schubspannungen im Anschluss „Querscheibe an Stege“ sind die drei untersuchten Parameter (Querscheibenbreite bzw. Freischnitttradius, Obergurtdicke, Querscheibenhöhe) wesentlich. Die vorliegende Arbeit lässt die Frage unbeantwortet, wie die geometrischen Detailabmessungen mit den Spannungen bei Variationen von Querscheiben-, Anschlussblech- und Stegdicke zusammenhängen, da diese Größen für die durchgeführte Parameterstudie konstant angenommen wurden.

Der Anschluss „Anschlussblech an Obergurt“ weist bei dünnen Obergurtblechen deutliche Spannungsspitzen an den Anschlussblechrändern auf (bis zu einem Faktor von ca. 1,8 gegenüber der mittleren Spannung). Hier wären Untersuchungen interessant, wie sich eine geänderte Anschlussblechform und der Unterschied der Blechdicken von Anschlussblech und Querscheibe auswirken. Eine alternative Anschlussblechform würde ermöglichen, dass die Anschlussblechränder weniger Steifigkeit aufweisen und so möglicherweise weniger Spannungen „anziehen“.

Die angeführten offenen Punkte sollen zum Ausdruck bringen, dass die Autorin sich mit weiterführenden Überlegungen zum Thema beschäftigt hat, deren Bearbeitung jedoch den Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit sprengen würde.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Standort der Eisenbahnbrücke über den Rhein [1] .....	4
Abbildung 2.2: Visualisierung der neuen Brücke über den Rhein [2].....	4
Abbildung 2.3: Längsschnitt der Stabbogenbrücke .....	5
Abbildung 2.4: Grundriss der Stabbogenbrücke.....	5
Abbildung 2.5: Hänger „H1“: Hänger mit Versteifungsträger .....	6
Abbildung 2.6: Hänger „H2“: Anschlussausbildung Hänger an Obergurt .....	7
Abbildung 2.7: Detail für die Parameterstudie, Querschnitt.....	9
Abbildung 2.8: Detail für die Parameterstudie, Horizontalschnitt.....	9
Abbildung 2.9: Detail für die Parameterstudie, Längsschnitt .....	10
Abbildung 3.1: Zwei beispielgebende Finite Elemente-Modelle .....	11
Abbildung 3.2: Vierknotiges Scheibenelement (links), achtknotiges Volumenelement (rechts) [3].....	12
Abbildung 3.3: Ausschnitt FE-Modell, Bereich Querscheibe und des Hängers.....	13
Abbildung 3.4: Statische Randbedingungen für das untersuchte Detail.....	14
<i>Abbildung 3.5: Randbedingungen Modell “g2” .....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 3.6: Randbedingungen Modell “g3” .....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 3.7: Schnittführung “Querscheibe vertikal” .....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 3.8: Schubspannung, Schnitt „QSV“, Modell “g2” und “g3” .....</i>	<i>18</i>
Abbildung 3.9: Randbedingungen Modell “h” .....	20
Abbildung 3.10: Schubspannung, Schnitt „QSV“, Modell “h1” .....	21
Abbildung 4.1: Der Studie zu Grunde liegende Parameter.....	23
Abbildung 5.1: Betrachtete Schnitte (Querschnitt).....	26
Abbildung 5.2: Betrachtete Schnitte (Horizontalschnitt).....	27
Abbildung 5.3: Schnittufer mit Spannungsgrößen.....	28
Abbildung 5.4: Lastableitung im Detail.....	30
Abbildung 5.5: Ermittlung des Faktors f .....	34
Abbildung 5.6: Ergebnisse Faktor f.....	35
Abbildung 5.7: Schnitt „Querschnitt vertikal“ .....	36
Abbildung 5.8: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “r” ( $t_{OG}=35$ mm, $h_{QS}=1500$ mm) .....	37
Abbildung 5.9: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “l” ( $t_{OG}=70$ mm, $h_{QS}=1500$ mm) .....	38
Abbildung 5.10: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “x” ( $t_{OG}=105$ mm, $h_{QS}=1500$ mm).....	38
Abbildung 5.11: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “n” ( $t_{OG}=35$ mm, $h_{QS}=3000$ mm).....	39
Abbildung 5.12: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “h” ( $t_{OG}=70$ mm, $h_{QS}=3000$ mm).....	39
Abbildung 5.13: Schubspannung, Schnitt “QSV”, Modellreihe “t” ( $t_{OG}=105$ mm, $h_{QS}=3000$ mm) .....	40
Abbildung 5.14: Schnitt “Querscheibe vertikal” mit Schubspannungsverteilung, $L_E \leq (h_{QS} - r_{FS})$ .....	41
Abbildung 5.15: Schnitt “Querscheibe vertikal” mit Schubspannungsverteilung, $L_E \geq (h_{QS} - r_{FS})$ .....	42
Abbildung 5.16: Ermittlung des Faktors n.....	46
Abbildung 5.17: Ermittlung des Faktors n, Zusammenfassung aller Näherungen .....	47

Abbildung 5.18: Ergebnisse $\tau_{\max}$ [kN/cm <sup>2</sup> ] im Schnitt „QSV“ .....	49
Abbildung 5.19: Schnitt „Querscheibe horizontal“ .....	50
Abbildung 5.20: Normalspannung, Schnitt “QSh”, Modellreihe “r” ( $t_{OG}=35$ mm, $h_{QS}=1500$ mm) .....	51
Abbildung 5.21: Normalspannung, Schnitt “QSh”, Modellreihe “l” ( $t_{OG}=70$ mm, $h_{QS}=1500$ mm) .....	52
Abbildung 5.22: Normalspannung, Schnitt “QSh”, Modellreihe “x” ( $t_{OG}=105$ mm, $h_{QS}=1500$ mm) .....	52
Abbildung 5.23: Schnitt “Querscheibe horizontal” mit Normalspannungsverteilung.....	53
Abbildung 5.24: Ermittlung des Faktors e, Ergebnisse FE-Analyse .....	56
Abbildung 5.25: Ermittlung des Faktors e, Näherungen .....	57
Abbildung 5.26: Ergebnisse $\sigma_{\max}$ [kN/cm <sup>2</sup> ] im Schnitt „QSh“ .....	58
Abbildung 5.27: Schnitt „Obergurt horizontal“ Horizontalschnitt (links) und Querschnitt (rechts) .....	59
Abbildung 5.28: Schubspannung, Schnitt “OGh”, Modellreihe “r” ( $t_{OG} = 35$ mm, $h_{QS} = 1500$ mm).....	60
Abbildung 5.29: Schubspannung, Schnitt “OGh”, Modellreihe “l” ( $t_{OG} = 70$ mm, $h_{QS} = 1500$ mm).....	61
Abbildung 5.30: Schubspannung, Schnitt “OGh”, Modellreihe “x” ( $t_{OG} = 105$ mm, $h_{QS} = 1500$ mm).....	61
Abbildung 5.31: Schnitt “Obergurt horizontal” mit Schubspannungsverteilung.....	62
Abbildung 5.32: Ausbreitungswinkel $\varphi$ im Schnitt “Obergurt vertikal” .....	66
Abbildung 5.33: Ergebnisse $\tau_{\max}$ [kN/cm <sup>2</sup> ] im Schnitt „OGh“ .....	67
Abbildung 5.34: Schnitt „Anschlussblech horizontal“ .....	68
Abbildung 5.35: Normalspannung, Schnitt “ABh”, Modellreihe “r” ( $t_{OG}=35$ mm, $h_{QS}=1500$ mm).....	69
Abbildung 5.36: Normalspannung, Schnitt “ABh”, Modellreihe “m” ( $t_{OG}=52,5$ mm, $h_{QS}=1500$ mm).....	69
Abbildung 5.37: Normalspannung, Schnitt “ABh”, Modellreihe “l” ( $t_{OG}=70$ mm, $h_{QS}=1500$ mm).....	70
Abbildung 5.38: Normalspannung, Schnitt “ABh”, Modellreihe “x” ( $t_{OG}=105$ mm, $h_{QS}=1500$ mm).....	70
Abbildung 5.39: Schnitt “Anschlussblech horizontal” mit Normalspannungsverteilung.....	71
Abbildung 5.40: Ermittlung des Faktors d, Ergebnisse FE-Analyse .....	74
Abbildung 5.41: Ermittlung des Faktors d, Näherungen .....	75
Abbildung 5.42: Ergebnisse $\sigma_{\max}$ [kN/cm <sup>2</sup> ] im Schnitt „ABh“ .....	76

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Detailabmessungen im Projekt .....	8
<i>Tabelle 3.1: Modellvariationen von "g2"      Tabelle: 3.2 Modellvariationen von "g3"</i> .....	18
Tabelle 3.3: Modellvariationen von "h1" .....	21
Tabelle 4.1: Modellsatz $\alpha$ .....	24
Tabelle 4.2: Modellsatz $\beta$ .....	24
Tabelle 4.3: Modellsatz $\gamma$ .....	25
Tabelle 4.4: Modellsatz $\delta$ .....	25
Tabelle 5.1: Obergurt Elementteilung.....	29
Tabelle 5.2: Berechnung des Faktors $f$ , Modellsatz $\alpha$ .....	31
Tabelle 5.3: Berechnung des Faktors $f$ , Modellsatz $\gamma$ .....	32
Tabelle 5.4: Berechnung des Faktors $f$ , Modellsatz $\delta$ .....	33
Tabelle 5.5: Berechnung des Faktors $n$ , Modellsatz $\alpha$ .....	43
Tabelle 5.6: Berechnung des Faktors $n$ , Modellsatz $\gamma$ .....	44
Tabelle 5.7: Berechnung des Faktors $n$ , Modellsatz $\delta$ .....	45
Tabelle 5.8: Berechnung des Faktors $e$ , Modellsatz $\alpha$ .....	54
Tabelle 5.9: Berechnung des Faktors $e$ , Modellsatz $\beta$ .....	54
Tabelle 5.10: Berechnung des Faktors $e$ , Modellsatz $\gamma$ .....	55
Tabelle 5.11: Berechnung des Faktors $e$ , Modellsatz $\delta$ .....	55
Tabelle 5.12: Berechnung des Ausbreitungswinkels $\varphi$ , Modellsatz $\alpha$ .....	63
Tabelle 5.13: Berechnung des Ausbreitungswinkels $\varphi$ , Modellsatz $\gamma$ .....	64
Tabelle 5.14: Berechnung des Ausbreitungswinkels $\varphi$ , Modellsatz $\delta$ .....	65
Tabelle 5.15: Berechnung des Faktors $d$ , Modellsatz $\alpha$ .....	72
Tabelle 5.16: Berechnung des Faktors $d$ , Modellsatz $\beta$ .....	72
Tabelle 5.17: Berechnung des Faktors $d$ , Modellsatz $\gamma$ .....	73
Tabelle 5.18: Berechnung des Faktors $d$ , Modellsatz $\delta$ .....	73
Tabelle 6.1: Werkstoffannahmen für Schweißnahtbemessung.....	77
Tabelle 6.2: Bemessung Kehlnähte, Schnitt „Querscheibe vertikal“ .....	78
Tabelle 6.3: Bemessung versenkte Kehlnähte, Schnitt „Obergurt horizontal“ .....	79
Tabelle 6.4: Werkstoffnachweis, Schnitt „Querscheibe horizontal“ .....	80
Tabelle 6.5: Werkstoffnachweis, Schnitt „Anschlussblech horizontal“ .....	81

---

## 10 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Internet, *Presseinformation der ÖBB-Infrastruktur AG vom 23.11.2010*  
[www.oebb.at/infrastruktur/de/Presse/Presseinformationen](http://www.oebb.at/infrastruktur/de/Presse/Presseinformationen)
- [2] Internet, *Google Earth, Grenze Schweiz (St. Margrethen)/ Österreich (Lustenau)*
- [3] Programm „Marc Mentat 2010“, *Product documentation: Volume B Element library*
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1993-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 8: Bemessung von Anschlüssen*, Ausgabe 2005-11-01
- [5] Josef Fink, *Studienblätter zu Vorlesung Stahlbau 1*, Technische Universität Wien – Institut für Tragkonstruktionen Stahlbau, 2008
- [6] Josef Fink, *Studienblätter zu Vorlesung Brückenbau*, Technische Universität Wien – Institut für Tragkonstruktionen Stahlbau, 2010
- [7] Herbert Mang, *Unterlagen für die Übungen aus Finite Elemente 1*, Technische Universität Wien – Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, 2010
- [8] ÖBB Infrastruktur, *Stahlbaupläne des Ausführungsprojekts „Umbau St.Margrethen (CH) – Lustenau (A) Rheinbrücke“*, 2010

## 11 Anhang A

A1	Brückenübersicht Grundriss, Längsschnitt 1:200
A2	allgemeines Detail für Parameterstudie
A3	Parameter, Schnittführungen
A4	Regeldetail „Schaufel“ mit Anschlussblech
A5	Detail Modellsatz $\alpha$ ( $t_{OG} = 35$ mm) 1:20
A6	Detail Modellsatz $\beta$ ( $t_{OG} = 52,5$ mm) 1:20
A7	Detail Modellsatz $\gamma$ ( $t_{OG} = 70$ mm) 1:20
A8	Detail Modellsatz $\delta$ ( $t_{OG} = 105$ mm) 1:20
A9	Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse), $t_{OG} = 35$ mm
A10	Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse), $t_{OG} = 70$ mm
A11	Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse), $t_{OG} = 105$ mm
A12	Diagramm für die Ermittlung des Faktors f (Rechenmodell)
A13	Diagramm für die Ermittlung des Faktors n (Rechenmodell)
A14	Diagramm für die Ermittlung des Faktors e (Rechenmodell)
A15	Diagramm für die Ermittlung des Faktors d (Rechenmodell)
A16	Diagramm für die Ermittlung des Ausbreitungswinkels $\varphi$ (Rechenmodell)
A17	Skizze und Rechenmodell für den Faktor f
A18	Schnitt „Querscheibe vertikal“ und Rechenmodell für den Faktor n, $L_E \leq (h_{QS} - r_{FS})$
A19	Schnitt „Querscheibe vertikal“ und Rechenmodell für den Faktor n, $L_E \geq (h_{QS} - r_{FS})$
A20	Schnitt „Querscheibe horizontal“ und Rechenmodell für den Faktor e
A21	Schnitt „Anschlussblech horizontal“ und Rechenmodell für den Faktor d
A22	Schnitt „Obergurt horizontal“ und Rechenmodell für den Ausbreitungswinkel $\varphi$
A23	Tabelle mit Ergebnissen für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle, $t_{OG} = 35$ mm
A24	Tabelle mit Ergebnissen für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle, $t_{OG} = 70$ mm (1)
A25	Tabelle mit Ergebnissen für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle, $t_{OG} = 70$ mm (2)
A26	Tabelle mit Ergebnissen für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle, $t_{OG} = 105$ mm
A27	Diagramm Vergleich FE-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, Faktor f

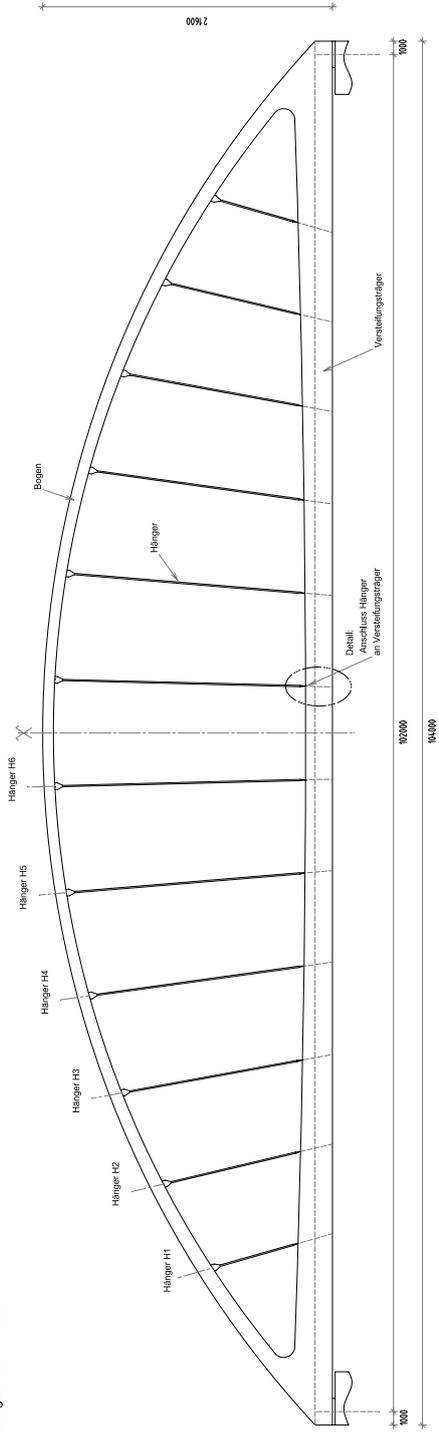
- A28 Diagramm Vergleich FE-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Schubspannung im Schnitt “Querscheibe vertikal”
- A29 Diagramm Vergleich FE-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Normalspannung im Schnitt “Querscheibe horizontal”
- A30 Diagramm Vergleich FE-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Normalspannung im Schnitt “Anschlussblech horizontal”
- A31 Diagramm Vergleich FE-Analyse/Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Schubspannung im Schnitt “Obergurt horizontal”

## 12 Anhang B

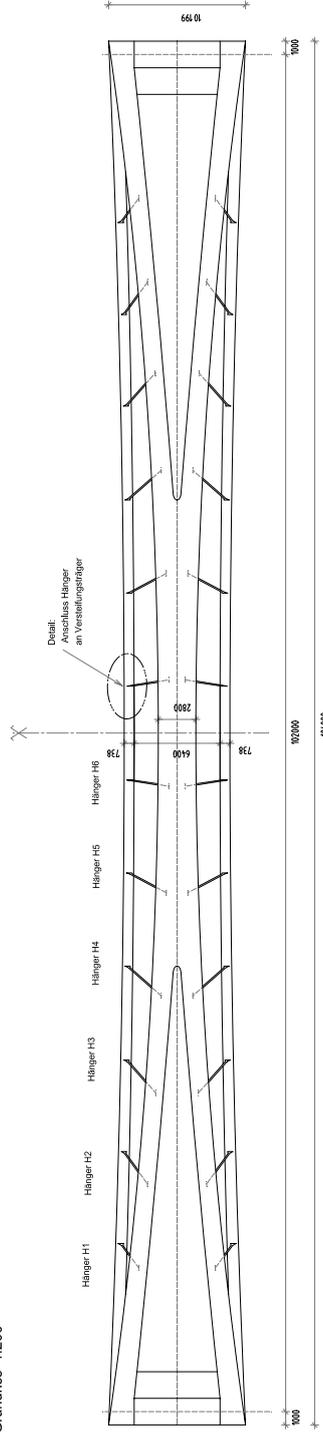
- B1 Plankopf mit Projektangaben
- B2 Brücke Ausschnitt Längsansicht
- B3 Brücke Ausschnitt Grundriss
- B4 Brücke Queransicht
- B5 Detail Hänger „H1“ und Versteifungsträger
- B6 Detail Hänger „H1“ und Anschluss an Versteifungsträger
- B7 Detail Hänger „H2“ und Versteifungsträger
- B8 Detail Hänger „H2“ und Anschluss an Versteifungsträger
- B9 Detail Hänger „H3“ und Versteifungsträger
- B10 Detail Hänger „H3“ und Anschluss an Versteifungsträger
- B11 Detail Hänger „H4“ und Versteifungsträger
- B12 Detail Hänger „H4“ und Anschluss an Versteifungsträger
- B13 Detail Hänger „H5“ und Versteifungsträger
- B14 Detail Hänger „H5“ und Anschluss an Versteifungsträger
- B15 Detail Hänger „H6“ und Versteifungsträger
- B16 Detail Hänger „H6“ und Anschluss an Versteifungsträger

Übersicht Brücke

Längsansicht 1:200



Grundriss 1:200



DIPLOMARBEIT: HERLEITUNG VON RECHENMODELLEN ZUR SPANNUNGSBERECHNUNG FÜR EIN HÄNGERANSCHLUSS-DETAIL EINER STÄBBOGENBRÜCKE AUF BASIS VON PARAMETERSTUDIEN

INHALT: ÜBERSICHT BRÜCKE  
LÄNGSANSICHT  
GRUNDRISS

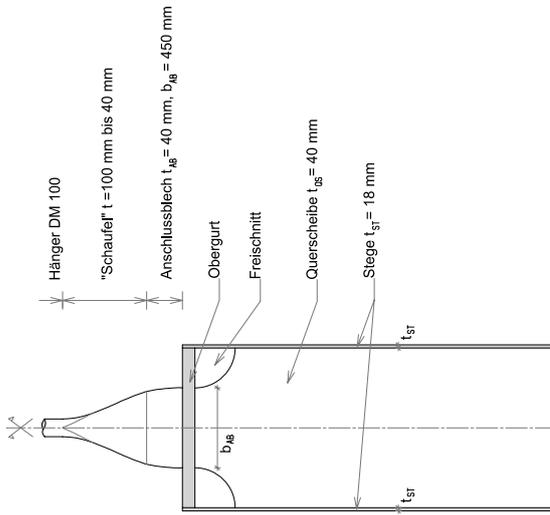
GEZ: BIRGIT HAUER

KENZÄHL: 066 465  
MATR.-NR.: 0625730

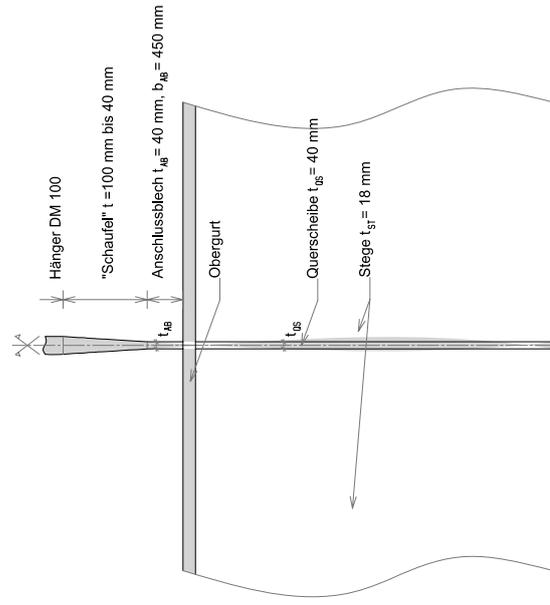
MASSSTAB: 1:200  
DATUM: 03.10.2011

ANHANG: A1

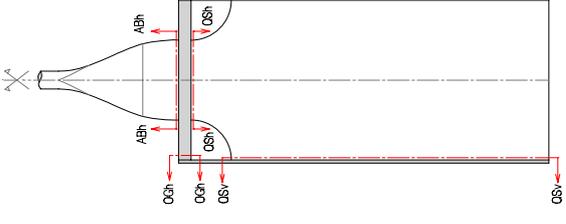
**Detail**



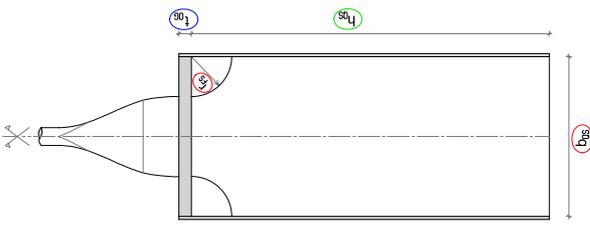
**Längsschnitt**



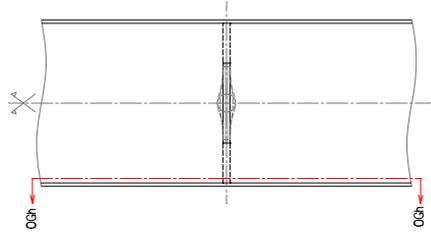
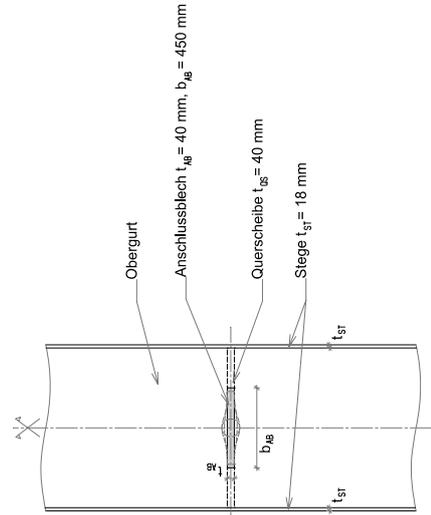
**Schnitte**



**Parameter**



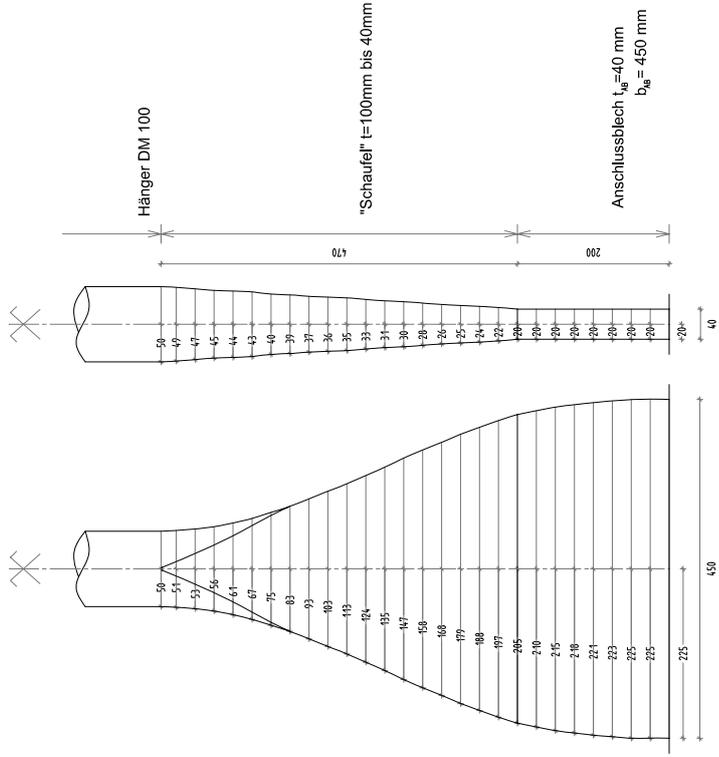
**Horizontalschnitt**



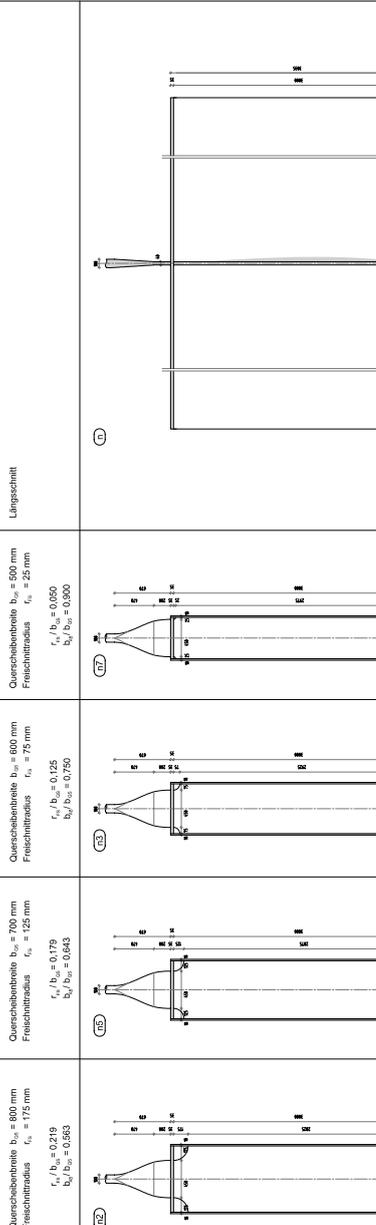
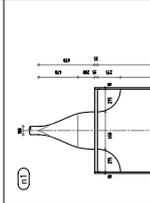
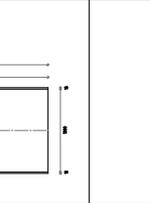
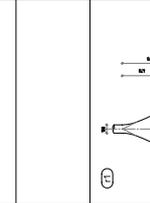
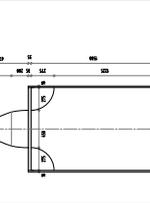
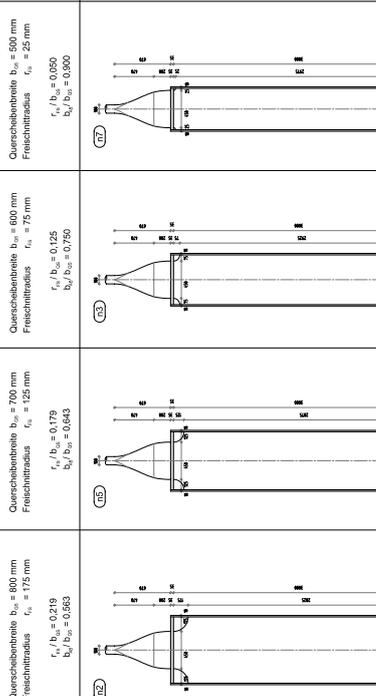
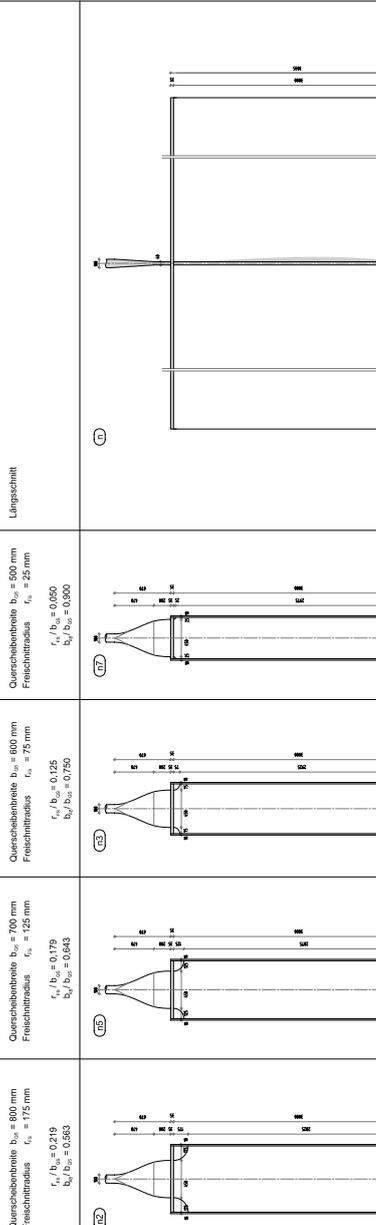
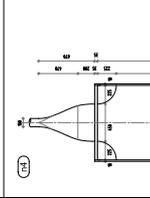
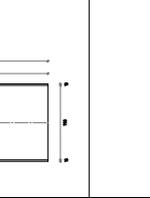
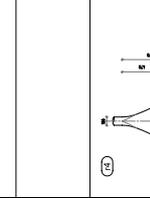
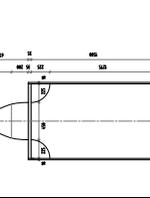
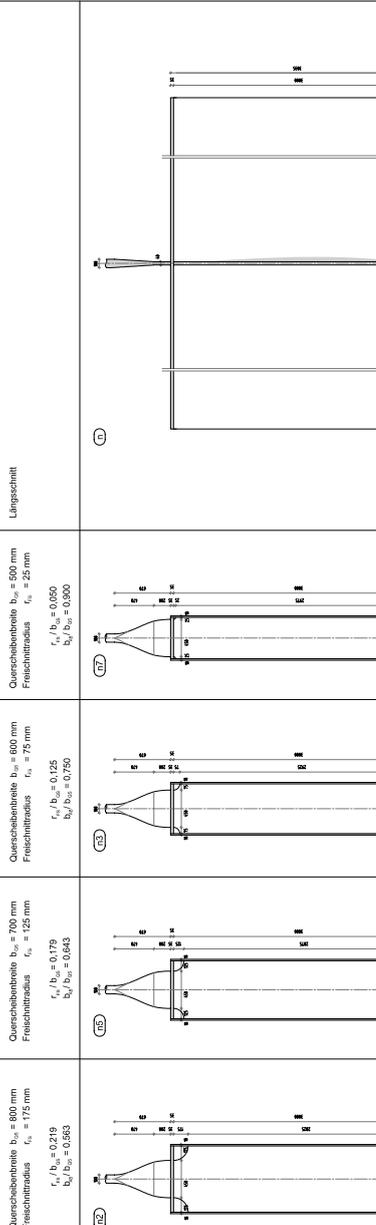
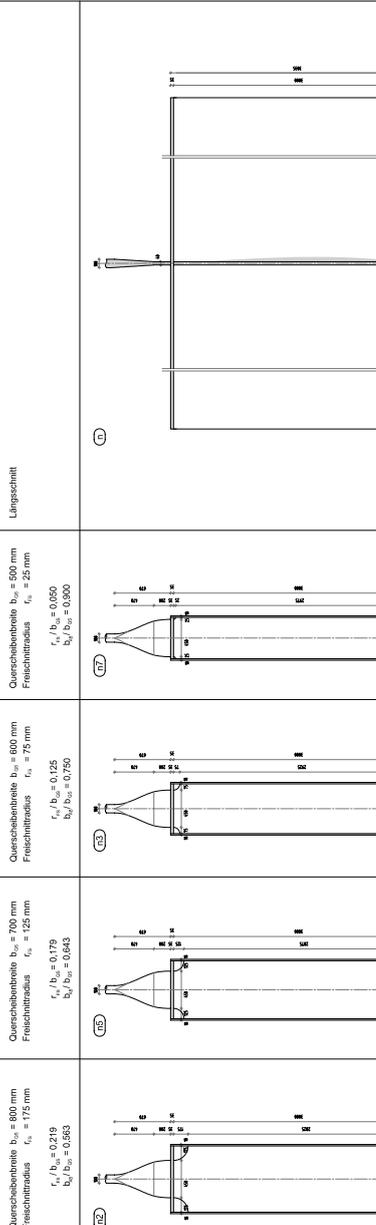
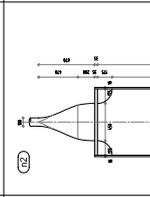
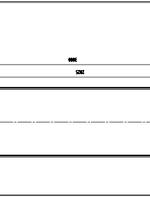
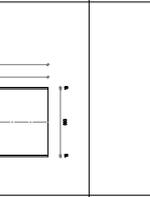
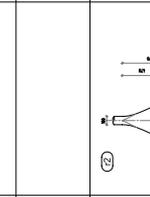
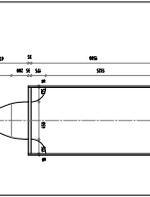
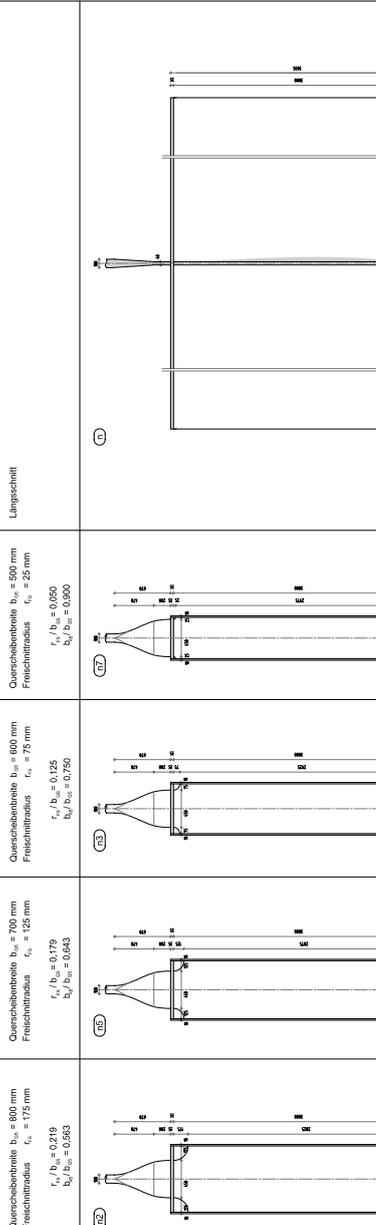
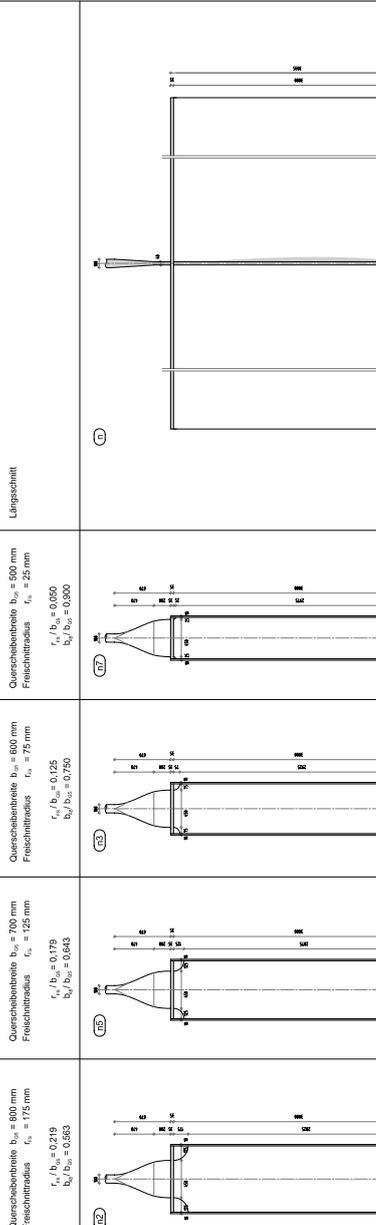
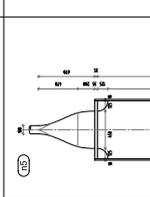
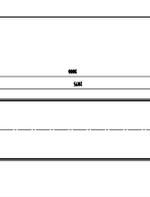
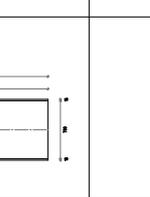
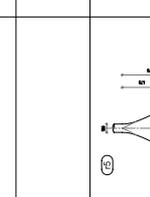
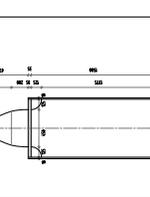
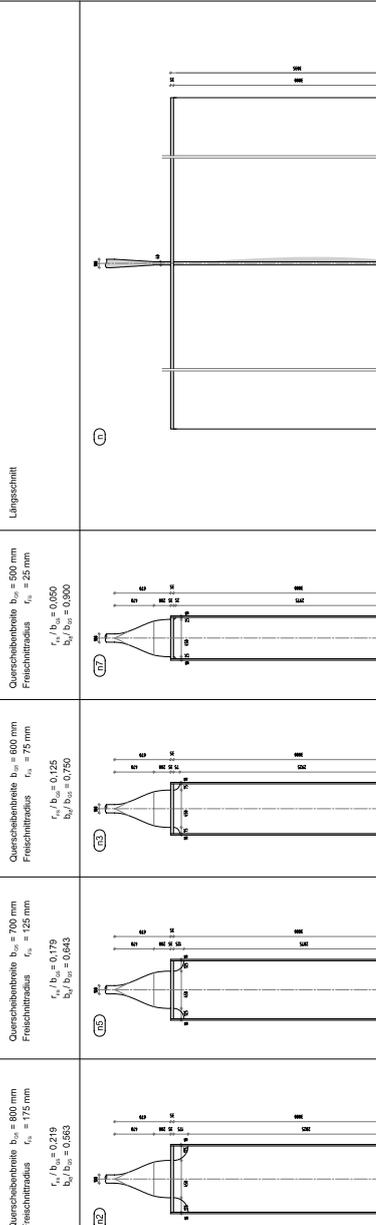
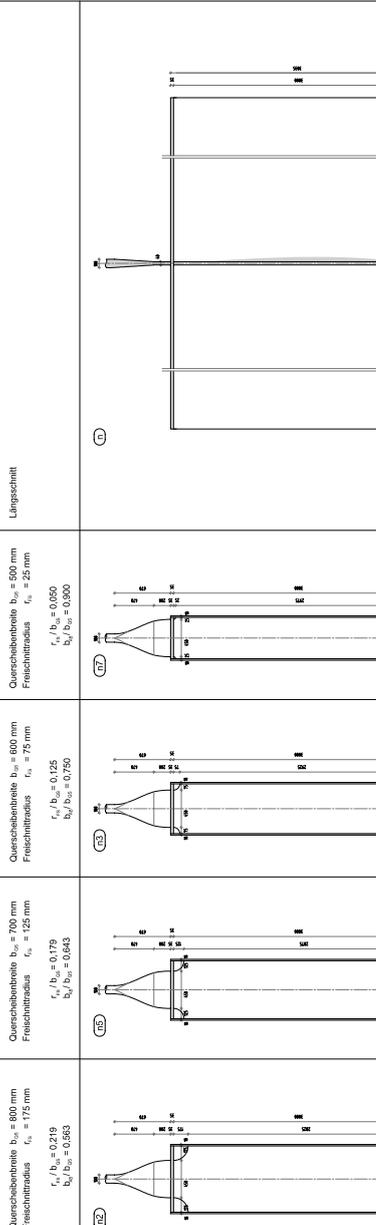
DIPLOMARBEIT:  
 SPANNUNGSRECHNUNG FÜR EIN  
 HÄNGERANSCHLUSS-DETAIL  
 EINER STABBOGENBRÜCKE  
 AUF BASIS VON PARAMETERSTUDIEN

INHALT:	DETAIL ALLGEMEIN	GEZ:	BIRGIT HAUER
	SCHNITTFÜHRUNGEN	KENNZAHL:	066 465
	PARAMETER	MATR.-NR.:	0625730
MASSSTAB:	-	DATUM:	03.10.2011
		ANHANG:	A 2, A3

Regeldetail 1:5



DIPLOMARBEIT:		HERLEITUNG VON RECHENMODELLEN ZUR SPANNUNGSBERECHNUNG FÜR EIN HÄNGERANSCHLUSS-DETAIL EINER STABBOGENBRÜCKE AUF BASIS VON PARAMETERSTUDIEN	
INHALT:	REGELDETAIL	GEZ: BIRGIT HAUER	
	"SCHAUFEL" MIT ANSCHLUSSBLECH	KENNZAHL: 066 465	MATR.-NR.: 0625730
MASSSTAB: 1:5	DATUM: 03.10.2011	ANHANG: A 4	

<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 35 \text{ mm}</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 100 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 27,5 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,275</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,450</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 500 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 225 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,250</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,500</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 600 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 175 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,219</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,583</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 700 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 125 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,179</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,643</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 800 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 75 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,125</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,750</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 500 \text{ mm}</math> Flächenträgheitsmoment <math>I_{\text{Qu}} = 25 \text{ mm}^4</math> <math>r_x / h_{\text{Qu}} = 0,050</math> <math>b_y / b_{\text{St}} = 0,900</math></p>	<p>Längsschnitt</p> 	<p>DIPLOMARBET: HERLEITUNG VON RECHENMODELEN ZUR SPANNUNGSRECHNUNG FÜR EIN HÄNGERANSCHLUSS-DETAIL EINER STABGERÜBRÜCKE AUF BASIS VON PARAMETERSTUDIEN</p> <p>INHAULT: DETAIL MODELLSATZ 0x (<math>l_{\text{St}} = 35 \text{ mm}</math>)</p> <p>REF.: BRIGIT HALER</p> <p>KENNZÄHL: MTR-NR.: 096-465 0929730</p> <p>ANHAANG: A 5</p> <p>DAITM: 03.12.2011</p> <p>MASSSTAB: 1:20</p>
<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 3000 \text{ mm}</math></p>								
<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 2500 \text{ mm}</math></p>								
<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 2000 \text{ mm}</math></p>								
<p>Querschnittshöhe <math>h_{\text{Qu}} = 1500 \text{ mm}</math></p>								

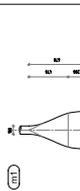
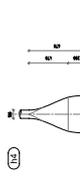
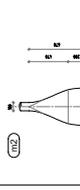
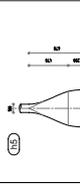
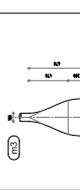
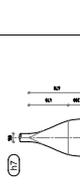
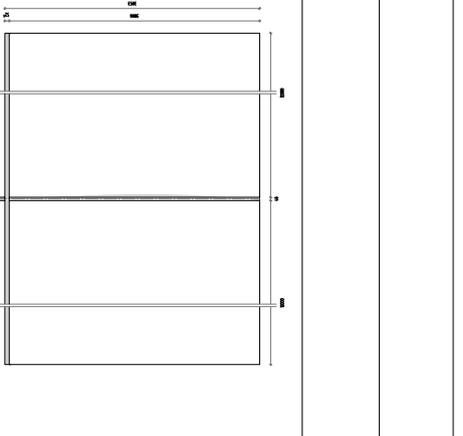
<p>Querschnitt <math>l_{cr} = 62,5 \text{ mm}</math></p>	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 1000 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 270 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,275</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,450</math></p> 	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 650 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 220 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,250</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,500</math></p> 	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 600 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 170 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,219</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,563</math></p> 	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 750 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 120 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,179</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,643</math></p> 	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 600 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 90 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,125</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,750</math></p> 	<p>Querschnittsbeiwert <math>b_{cr} = 500 \text{ mm}</math>          Flächenträgheitsmoment <math>I_{cr} = 60 \text{ mm}^4</math>  <math>r_{cr}/b_{cr} = 0,050</math>  <math>b_{cr}/b_{st} = 0,900</math></p> 	<p>Längsschnitt</p> 	<p><b>DIPLOMARBEIT:</b> HERLEITUNG VON RECHENMODELLEN ZUR SPANNUNGSBEREICHNUNG FÜR EIN EINEGELAGERTES STABBOGENBRÜCKE AUF BASIS VON PARAMETERSTUDIEN</p> <p><b>INHALT:</b> DETAIL          MODELLSATZ <math>\beta</math>  <math>(l_{cr} = 62,5 \text{ mm})</math></p> <p><b>BEZ:</b> BRIGITTHAUER  <b>KONVNR:</b> 006 465          0625730</p> <p><b>MESSSTAB:</b> 1:20  <b>ANLAGE:</b> A 6  <b>DATUM:</b> 03.10.2011</p>
<p>Querschnittshöhe <math>h_{st} = 3000 \text{ mm}</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{st} = 2500 \text{ mm}</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{st} = 2000 \text{ mm}</math></p>	<p>Querschnittshöhe <math>h_{st} = 1500 \text{ mm}</math></p>					





Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse),  $t_{0G} = 35$  mm

Modell	Quer-scheiben- höhe	Quer-scheiben- breite	Quer-scheiben- breite	Anschluss- blech- breite	Schnitt- länge	Freischnitt- radius	maximale Schubspannung	Gesamt- kraft im Hänger	Kraft über Querscheibe in Stange	Einluss- länge	$b_{02}/b_{03}$	$n = L_0/(b_{02} \cdot r_{13})$	$b_{02}/b_{03}$	$F = F_{02}/F_{03}$
	$h_{03}$ [m]	$t_{0G}$ [mm]	$b_{02}$ [mm]	$b_{03}$ [mm]	$h_{02} - r_{13}$ [m]	$r_{13}$ [mm]	$\tau_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{ges}$ [N]	$F_{02}$ [N]	$L_e$ [m]				
r1	1.50	35	1000	450	1.225	275	13,97	1000	979	1,752	0,667	1,430	0,450	0,979
-	1,75	35	1000	450	1,475	275	12,89	1000	980	1,901	0,571	1,289	0,450	0,980
-	2,00	35	1000	450	1,725	275	12,22	1000	981	2,007	0,500	1,164	0,450	0,981
-	2,25	35	1000	450	1,975	275	11,76	1000	982	2,087	0,444	1,057	0,450	0,982
-	2,50	35	1000	450	2,225	275	11,43	1000	982	2,148	0,400	0,965	0,450	0,982
-	2,75	35	1000	450	2,475	275	11,18	1000	983	2,197	0,364	0,888	0,450	0,983
n1	3,00	35	1000	450	2,725	275	10,99	1000	983	2,238	0,333	0,821	0,450	0,983
l4	1,50	35	900	450	1,275	225	14,51	1000	973	1,676	0,600	1,315	0,500	0,973
-	1,75	35	900	450	1,525	225	13,82	1000	974	1,762	0,514	1,155	0,500	0,974
-	2,00	35	900	450	1,775	225	13,14	1000	976	1,856	0,450	1,046	0,500	0,976
-	2,25	35	900	450	2,025	225	12,79	1000	976	1,908	0,400	0,942	0,500	0,976
-	2,50	35	900	450	2,275	225	12,45	1000	977	1,962	0,360	0,862	0,500	0,977
-	2,75	35	900	450	2,525	225	12,27	1000	977	1,991	0,327	0,788	0,500	0,977
n4	3,00	35	900	450	2,775	225	12,10	1000	978	2,021	0,300	0,728	0,500	0,978
r2	1,50	35	800	450	1,325	175	15,43	1000	962	1,560	0,533	1,177	0,563	0,962
-	1,75	35	800	450	1,575	175	15,09	1000	965	1,598	0,457	1,015	0,563	0,965
-	2,00	35	800	450	1,825	175	14,76	1000	965	1,635	0,400	0,896	0,563	0,965
-	2,25	35	800	450	2,075	175	14,42	1000	966	1,674	0,356	0,807	0,563	0,966
-	2,50	35	800	450	2,325	175	14,09	1000	967	1,715	0,320	0,738	0,563	0,967
-	2,75	35	800	450	2,575	175	13,76	1000	968	1,760	0,291	0,663	0,563	0,968
n2	3,00	35	800	450	2,825	175	13,42	1000	970	1,806	0,267	0,639	0,563	0,970
r5	1,50	35	700	450	1,375	125	16,77	1000	942	1,404	0,467	1,021	0,643	0,942
-	1,75	35	700	450	1,625	125	16,49	1000	944	1,431	0,400	0,880	0,643	0,944
-	2,00	35	700	450	1,875	125	16,21	1000	945	1,458	0,350	0,778	0,643	0,945
-	2,25	35	700	450	2,125	125	15,92	1000	946	1,485	0,311	0,699	0,643	0,946
-	2,50	35	700	450	2,375	125	15,64	1000	946	1,512	0,280	0,636	0,643	0,946
-	2,75	35	700	450	2,625	125	15,36	1000	947	1,542	0,255	0,587	0,643	0,947
n5	3,00	35	700	450	2,875	125	15,08	1000	949	1,573	0,233	0,547	0,643	0,949
r3	1,50	35	600	450	1,425	75	18,59	1000	900	1,210	0,400	0,849	0,750	0,900
-	1,75	35	600	450	1,675	75	18,30	1000	902	1,232	0,343	0,735	0,750	0,902
-	2,00	35	600	450	1,925	75	18,02	1000	904	1,254	0,300	0,651	0,750	0,904
-	2,25	35	600	450	2,175	75	17,73	1000	905	1,276	0,267	0,587	0,750	0,905
-	2,50	35	600	450	2,425	75	17,44	1000	906	1,298	0,240	0,535	0,750	0,906
-	2,75	35	600	450	2,675	75	17,15	1000	908	1,323	0,218	0,494	0,750	0,908
n3	3,00	35	600	450	2,925	75	16,87	1000	909	1,348	0,200	0,461	0,750	0,909
r7	1,50	35	500	450	1,475	25	20,47	1000	822	1,004	0,333	0,681	0,900	0,822
-	1,75	35	500	450	1,725	25	20,22	1000	825	1,020	0,286	0,591	0,900	0,825
-	2,00	35	500	450	1,975	25	19,97	1000	828	1,036	0,250	0,525	0,900	0,828
-	2,25	35	500	450	2,225	25	19,71	1000	829	1,052	0,222	0,473	0,900	0,829
-	2,50	35	500	450	2,475	25	19,46	1000	831	1,067	0,200	0,431	0,900	0,831
-	2,75	35	500	450	2,725	25	19,20	1000	831	1,082	0,182	0,397	0,900	0,831
n7	3,00	35	500	450	2,975	25	18,95	1000	832	1,098	0,167	0,369	0,900	0,832

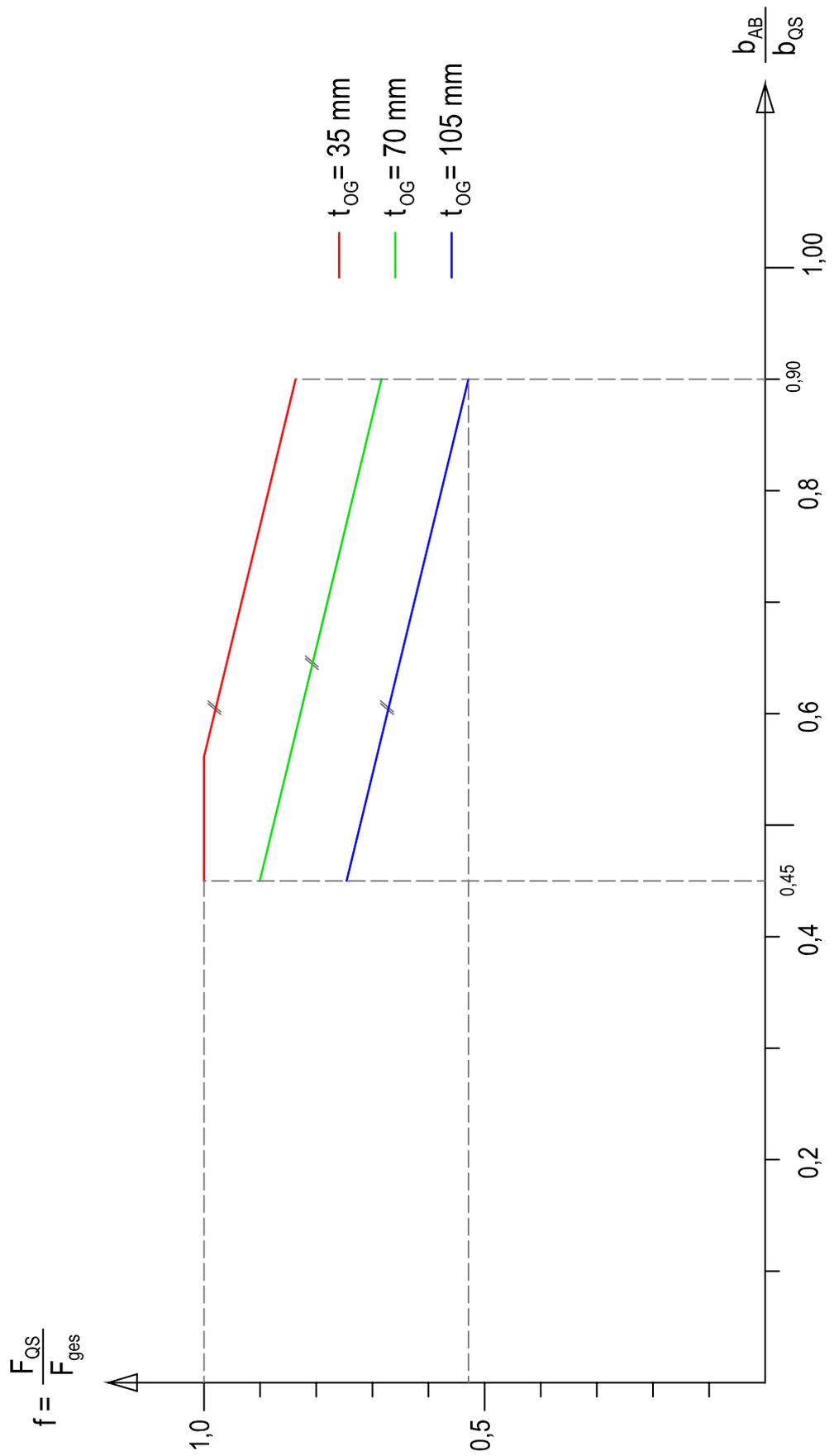
Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse),  $t_{0G} = 70$  mm

Modell	Quer-scheiben-höhe	Quer-scheiben-breite	Anschluss-blech-breite	Schnitt-länge	Freischnitt-radius	maximale Schubspannung	Gesamt-kraft im Hänger	Kraft über Querscheibe in Stege	Einfluss-länge	$b_{02}/b_{03}$	$n = L_0/(b_{02} \cdot r_{13})$	$b_{02}/b_{03}$	$f = F_{02}/F_{03}$
	$h_{03}$ [m]	$b_{02}$ [mm]	$b_{03}$ [mm]	$h_{03} - r_{13}$ [m]	$r_{13}$ [mm]	$\tau_{\text{max}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{\text{ges}}$ [N]	$F_{02}$ [N]	$L_e$ [m]				
i1	1.50	1000	450	1.225	275	12,26	1000	879	1,792	0,667	1,463	0,450	0,879
k1	1.75	1000	450	1,475	275	11,31	1000	885	1,956	0,571	1,326	0,450	0,885
k1	2.00	1000	450	1,725	275	10,72	1000	888	2,071	0,500	1,201	0,450	0,888
ik1	2.25	1000	450	1,975	275	10,31	1000	891	2,161	0,444	1,094	0,450	0,891
il	2.50	1000	450	2,225	275	10,02	1000	892	2,226	0,400	1,000	0,450	0,892
hi1	2.75	1000	450	2,475	275	9,80	1000	895	2,282	0,364	0,922	0,450	0,895
h1	3.00	1000	450	2,725	275	9,63	1000	898	2,330	0,333	0,855	0,450	0,898
i4	1.50	900	450	1,275	225	10,41	1000	860	1,741	0,600	1,366	0,500	0,860
-	1.75	900	450	1,525	225	11,76	1000	864	1,838	0,514	1,205	0,500	0,864
k4	2.00	900	450	1,775	225	11,16	1000	868	1,944	0,450	1,095	0,500	0,868
-	2.25	900	450	2,025	225	10,86	1000	870	2,002	0,400	0,988	0,500	0,870
i4	2.50	900	450	2,275	225	10,56	1000	871	2,062	0,360	0,906	0,500	0,871
-	2.75	900	450	2,525	225	10,41	1000	872	2,095	0,327	0,830	0,500	0,872
h4	3.00	900	450	2,775	225	10,26	1000	873	2,129	0,300	0,767	0,500	0,873
i2	1.50	800	450	1,325	175	12,57	1000	824	1,638	0,533	1,236	0,563	0,824
k2	1.75	800	450	1,575	175	11,98	1000	830	1,732	0,457	1,100	0,563	0,830
-	2.00	800	450	1,825	175	11,67	1000	832	1,782	0,400	0,976	0,563	0,832
-	2.25	800	450	2,075	175	11,42	1000	834	1,826	0,356	0,880	0,563	0,834
i2	2.50	800	450	2,325	175	11,17	1000	836	1,871	0,320	0,805	0,563	0,836
-	2.75	800	450	2,575	175	11,04	1000	841	1,904	0,291	0,740	0,563	0,841
h2	3.00	800	450	2,825	175	10,91	1000	846	1,938	0,267	0,686	0,563	0,846
i5	1.50	700	450	1,375	125	12,88	1000	784	1,522	0,467	1,107	0,643	0,784
-	1.75	700	450	1,625	125	12,54	1000	788	1,571	0,400	0,967	0,643	0,788
k5	2.00	700	450	1,875	125	12,20	1000	792	1,623	0,350	0,866	0,643	0,792
-	2.25	700	450	2,125	125	11,99	1000	793	1,652	0,311	0,778	0,643	0,793
i5	2.50	700	450	2,375	125	11,78	1000	793	1,683	0,280	0,708	0,643	0,793
-	2.75	700	450	2,625	125	11,67	1000	796	1,705	0,255	0,650	0,643	0,796
h5	3.00	700	450	2,875	125	11,56	1000	799	1,728	0,233	0,601	0,643	0,799
i3	1.50	600	450	1,425	75	13,04	1000	728	1,397	0,400	0,980	0,750	0,728
-	1.75	600	450	1,675	75	12,78	1000	732	1,432	0,343	0,855	0,750	0,732
k3	2.00	600	450	1,925	75	12,53	1000	736	1,469	0,300	0,763	0,750	0,736
-	2.25	600	450	2,175	75	12,38	1000	738	1,491	0,267	0,685	0,750	0,738
i3	2.50	600	450	2,425	75	12,23	1000	740	1,513	0,240	0,624	0,750	0,740
-	2.75	600	450	2,675	75	12,13	1000	744	1,533	0,218	0,573	0,750	0,744
h3	3.00	600	450	2,925	75	12,04	1000	748	1,552	0,200	0,531	0,750	0,748
i7	1.50	500	450	1,475	25	13,22	1000	643	1,216	0,333	0,824	0,900	0,643
-	1.75	500	450	1,725	25	12,99	1000	647	1,246	0,286	0,722	0,900	0,647
k7	2.00	500	450	1,975	25	12,75	1000	651	1,276	0,250	0,646	0,900	0,651
-	2.25	500	450	2,225	25	12,61	1000	653	1,295	0,222	0,582	0,900	0,653
i7	2.50	500	450	2,475	25	12,47	1000	655	1,314	0,200	0,531	0,900	0,655
-	2.75	500	450	2,725	25	12,38	1000	657	1,326	0,182	0,487	0,900	0,657
h7	3.00	500	450	2,975	25	12,29	1000	658	1,338	0,167	0,450	0,900	0,658

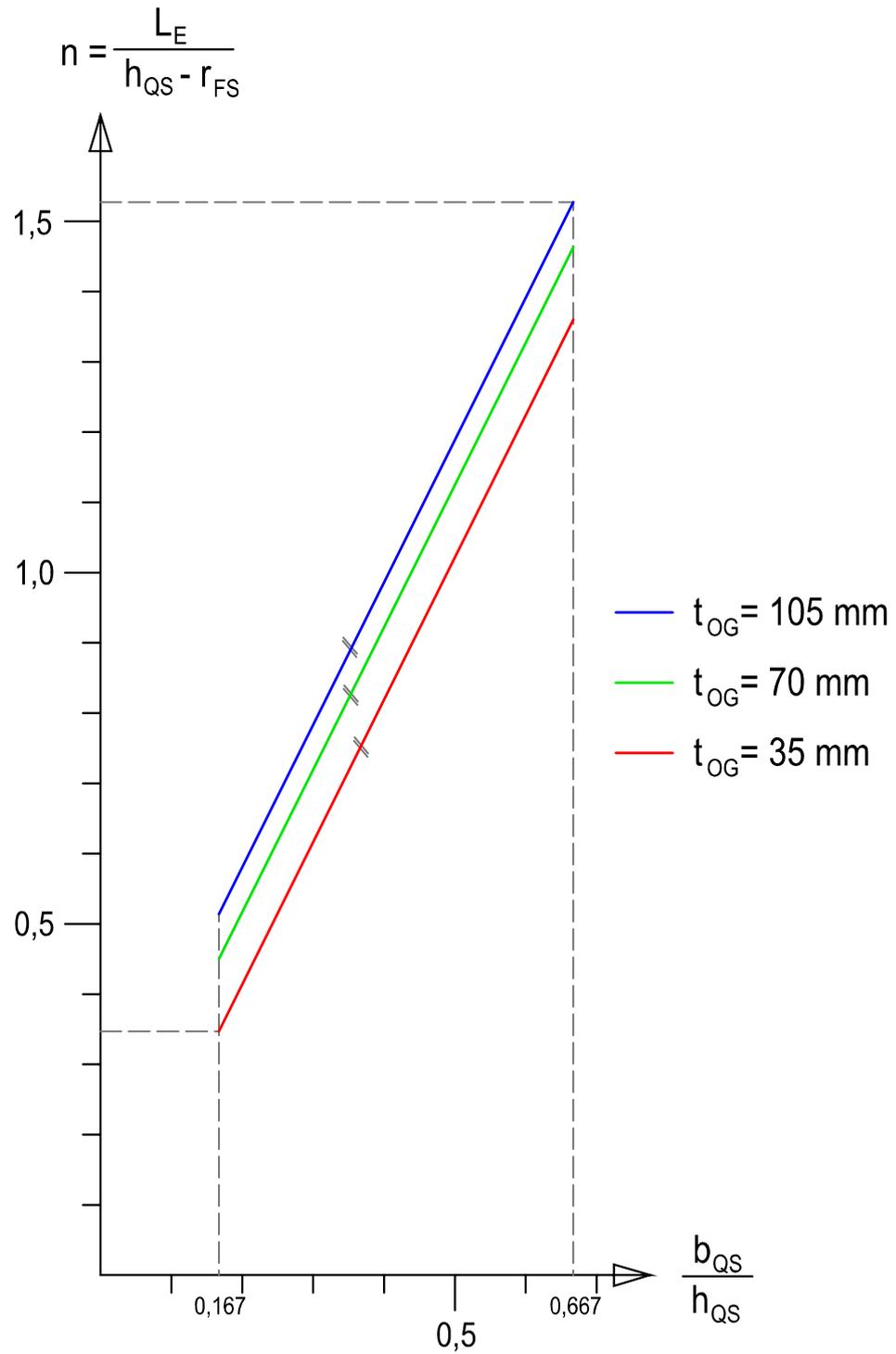
Tabelle für die Ermittlung der Faktoren f und n (FE-Analyse),  $t_{0G} = 105 \text{ mm}$

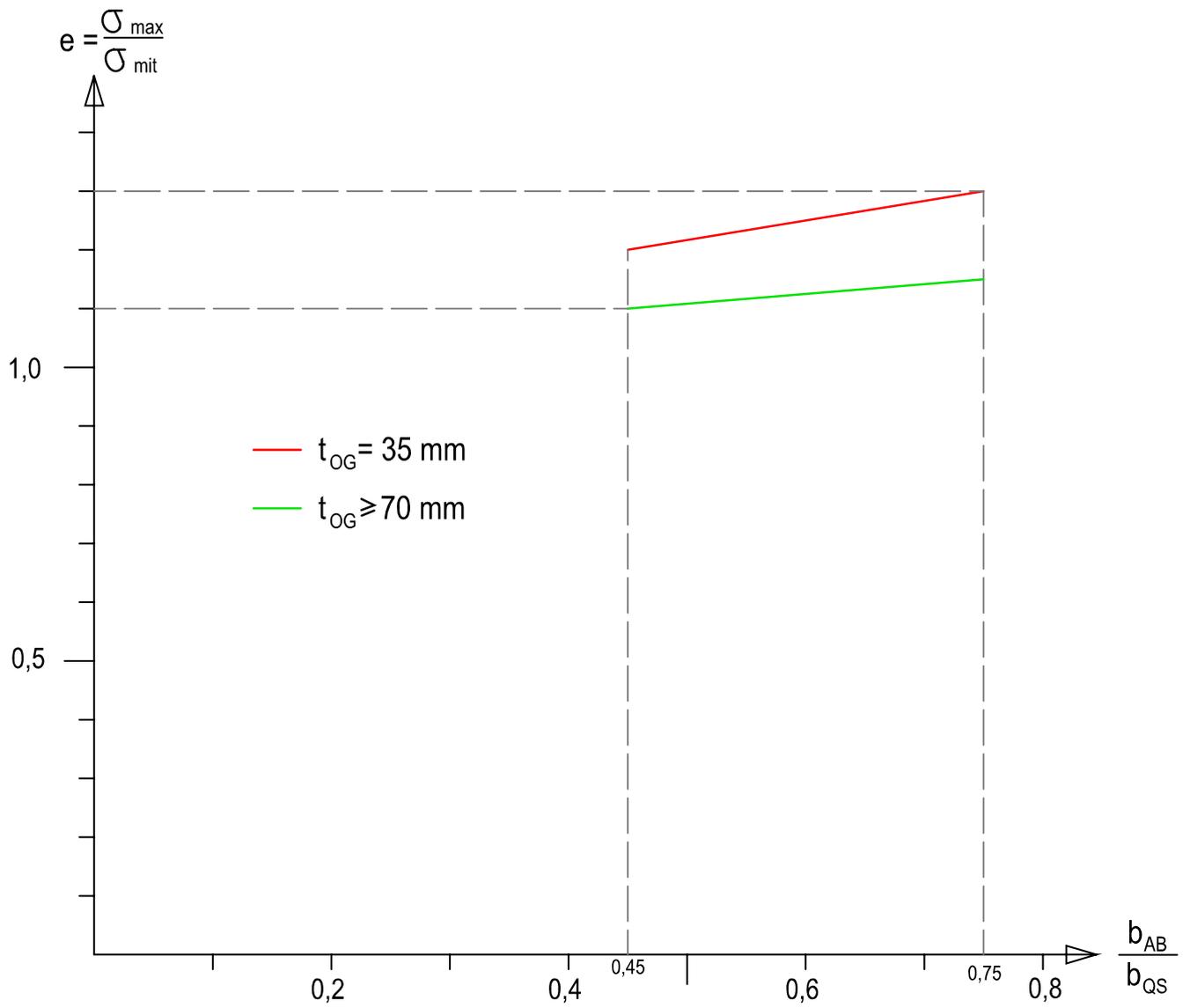
Modell	Quer-scheiben-höhe	Ober-gurt-dicke	Quer-scheiben-breite	Anschluss-blech-breite	Schnitt-länge	Freischnitt-radius	maximale Schubspannung		Gesamt-kraft im Hänger	Kraft über Querschiebe in Stege	Einfluss-länge	$b_{0S}/h_{0S}$	$n = L_d / (h_{0S} \cdot r_{fs})$	$b_{0S}/b_{0S}$	$f = F_{0S} / F_{0S}$
	$h_{0S}$ [mm]						$t_{0G}$ [mm]	$b_{0S}$ [mm]							
x1	1,50	105	1000	450	1,225	275	9,67	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	723	1,871	0,667	1,527	0,450	0,723
-	1,75	105	1000	450	1,475	275	8,85	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	731	2,065	0,571	1,400	0,450	0,731
-	2,00	105	1000	450	1,725	275	8,33	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	735	2,204	0,500	1,278	0,450	0,735
-	2,25	105	1000	450	1,975	275	7,98	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	739	2,313	0,444	1,171	0,450	0,739
-	2,50	105	1000	450	2,225	275	7,73	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	739	2,392	0,400	1,075	0,450	0,739
-	2,75	105	1000	450	2,475	275	7,54	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	742	2,462	0,364	0,995	0,450	0,742
t1	3,00	105	1000	450	2,725	275	7,39	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	746	2,524	0,333	0,926	0,450	0,746
x4	1,50	105	900	450	1,275	225	9,40	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	686	1,823	0,600	1,430	0,500	0,686
-	1,75	105	900	450	1,525	225	8,93	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	694	1,944	0,514	1,275	0,500	0,694
-	2,00	105	900	450	1,775	225	8,46	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	703	2,079	0,450	1,171	0,500	0,703
-	2,25	105	900	450	2,025	225	8,22	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	706	2,149	0,400	1,061	0,500	0,706
-	2,50	105	900	450	2,275	225	7,98	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	710	2,223	0,360	0,977	0,500	0,710
-	2,75	105	900	450	2,525	225	7,86	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	712	2,266	0,327	0,897	0,500	0,712
t4	3,00	105	900	450	2,775	225	7,74	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	715	2,310	0,300	0,832	0,500	0,715
x2	1,50	105	800	450	1,325	175	9,18	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	654	1,779	0,533	1,343	0,563	0,654
-	1,75	105	800	450	1,575	175	8,97	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	659	1,837	0,457	1,166	0,563	0,659
-	2,00	105	800	450	1,825	175	8,76	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	661	1,885	0,400	1,033	0,563	0,661
-	2,25	105	800	450	2,075	175	8,55	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	663	1,937	0,356	0,933	0,563	0,663
-	2,50	105	800	450	2,325	175	8,34	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	665	1,991	0,320	0,856	0,563	0,665
-	2,75	105	800	450	2,575	175	8,13	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	668	2,054	0,291	0,798	0,563	0,668
t2	3,00	105	800	450	2,825	175	7,92	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	672	2,121	0,267	0,751	0,563	0,672
x5	1,50	105	700	450	1,375	125	8,98	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	608	1,693	0,467	1,231	0,643	0,608
-	1,75	105	700	450	1,625	125	8,83	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	615	1,740	0,400	1,071	0,643	0,615
-	2,00	105	700	450	1,875	125	8,68	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	621	1,789	0,350	0,954	0,643	0,621
-	2,25	105	700	450	2,125	125	8,52	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	621	1,823	0,311	0,858	0,643	0,621
-	2,50	105	700	450	2,375	125	8,37	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	622	1,858	0,280	0,782	0,643	0,622
-	2,75	105	700	450	2,625	125	8,22	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	627	1,907	0,255	0,726	0,643	0,627
t5	3,00	105	700	450	2,875	125	8,06	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	631	1,958	0,233	0,681	0,643	0,631
x3	1,50	105	600	450	1,425	75	8,68	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	550	1,584	0,400	1,112	0,750	0,550
-	1,75	105	600	450	1,675	75	8,57	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	557	1,624	0,343	0,970	0,750	0,557
-	2,00	105	600	450	1,925	75	8,46	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	564	1,665	0,300	0,865	0,750	0,564
-	2,25	105	600	450	2,175	75	8,35	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	567	1,698	0,267	0,781	0,750	0,567
-	2,50	105	600	450	2,425	75	8,24	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	571	1,732	0,240	0,714	0,750	0,571
-	2,75	105	600	450	2,675	75	8,14	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	578	1,775	0,218	0,663	0,750	0,578
t3	3,00	105	600	450	2,925	75	8,03	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	584	1,819	0,200	0,622	0,750	0,584
x7	1,50	105	500	450	1,475	25	8,43	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	510	1,514	0,333	1,026	0,900	0,510
-	1,75	105	500	450	1,725	25	8,33	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	515	1,547	0,286	0,897	0,900	0,515
-	2,00	105	500	450	1,975	25	8,23	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	520	1,580	0,250	0,800	0,900	0,520
-	2,25	105	500	450	2,225	25	8,13	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	523	1,608	0,222	0,723	0,900	0,523
-	2,50	105	500	450	2,475	25	8,04	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	526	1,636	0,200	0,661	0,900	0,526
-	2,75	105	500	450	2,725	25	7,94	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	528	1,662	0,182	0,610	0,900	0,528
t7	3,00	105	500	450	2,975	25	7,84	*10 <sup>-3</sup> (-3)	1000	529	1,688	0,167	0,567	0,900	0,529

A12

Diagramm für die Ermittlung des Faktors  $f$  (Rechenmodell)

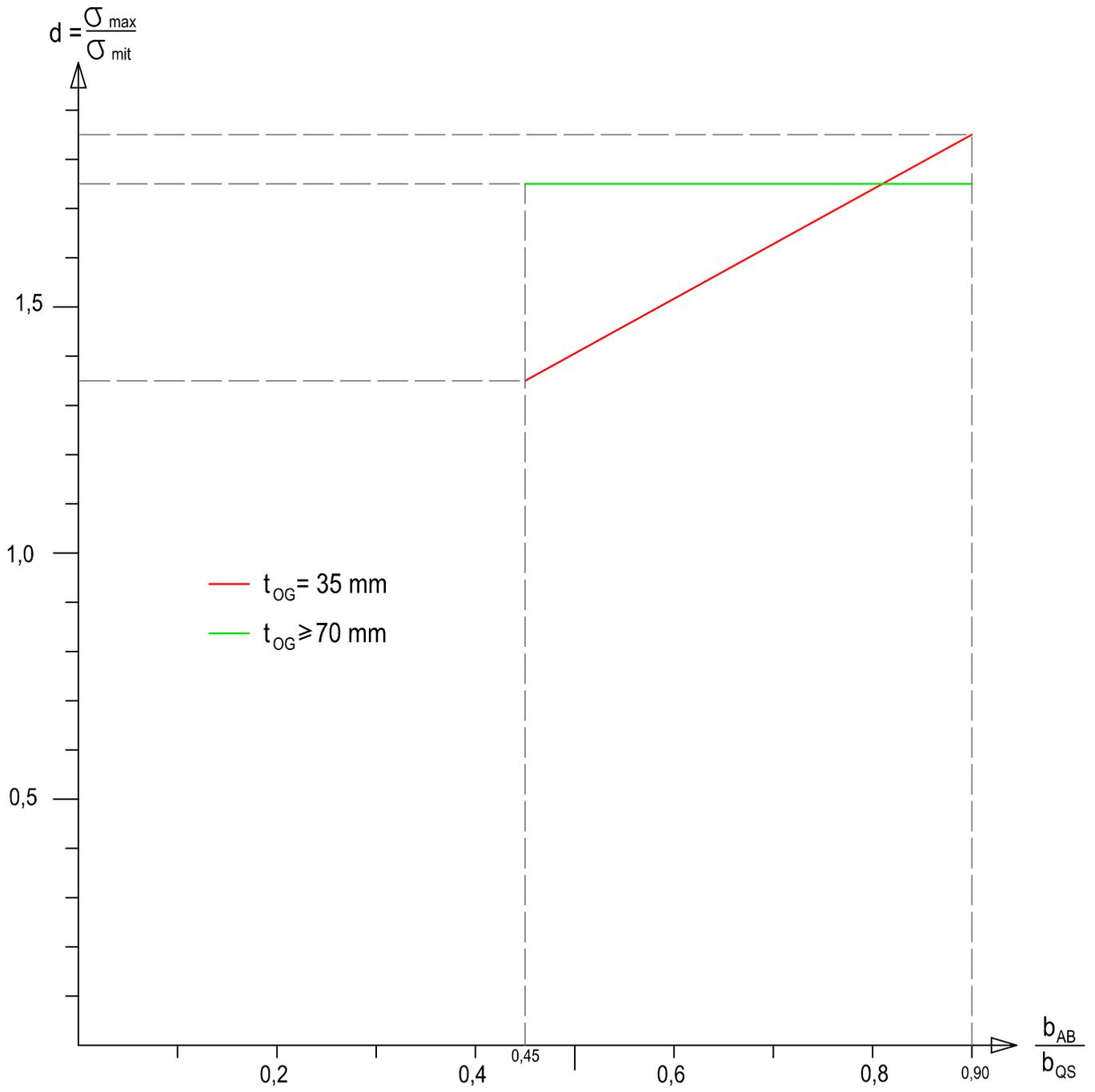
A13

Diagramm für die Ermittlung des Faktors  $n$  (fRechenmodell)

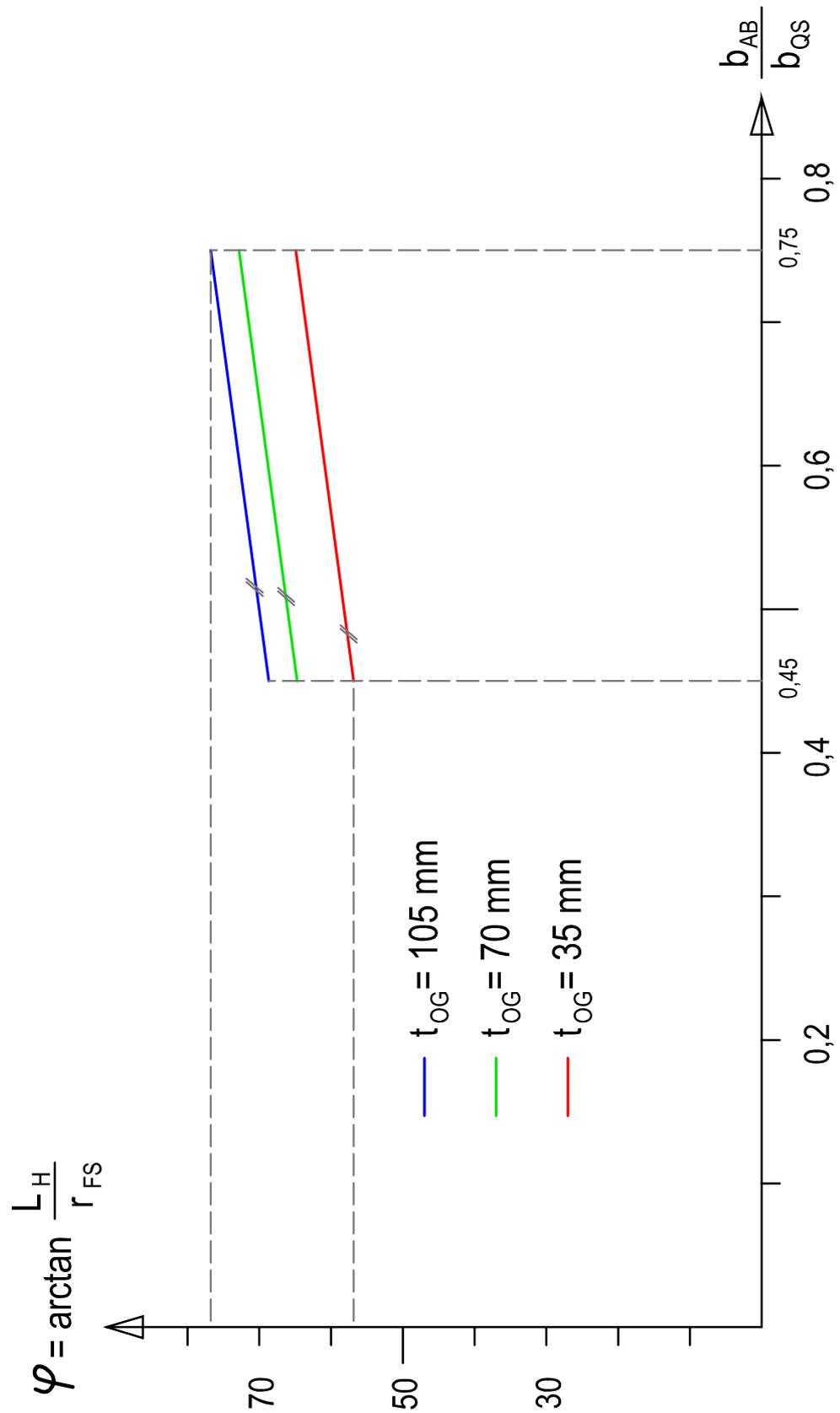
A14 Diagramm für die Ermittlung des Faktors  $e$  (Rechenmodell)

A15

Diagramm für die Ermittlung des Faktors d (Rechenmodell)



A16

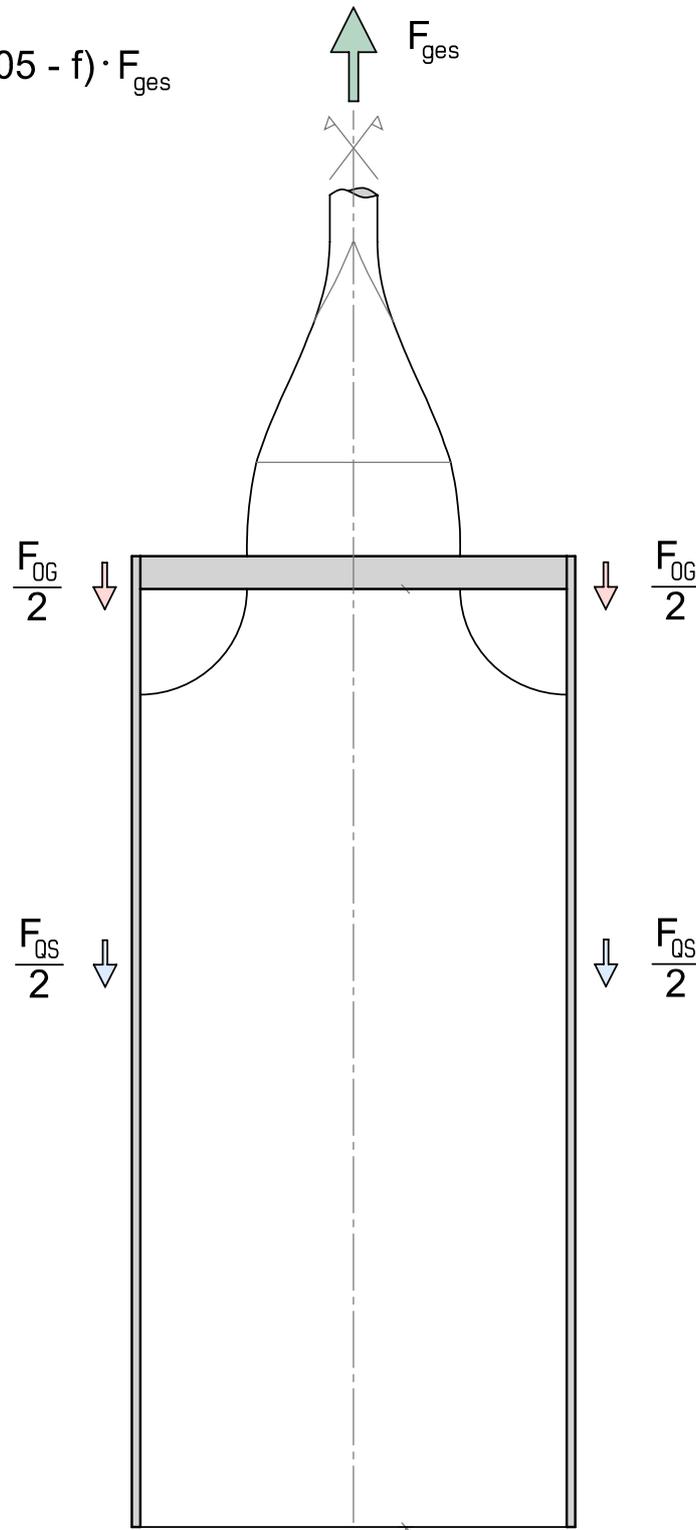
Diagramm für die Ermittlung des Ausbreitungswinkels  $\varphi$  (Rechenmodell)

A17

Skizze und Rechenmodell für den Faktor  $f$ 

$$F_{QS} = f \cdot F_{ges}$$

$$F_{OG} = (1,05 - f) \cdot F_{ges}$$





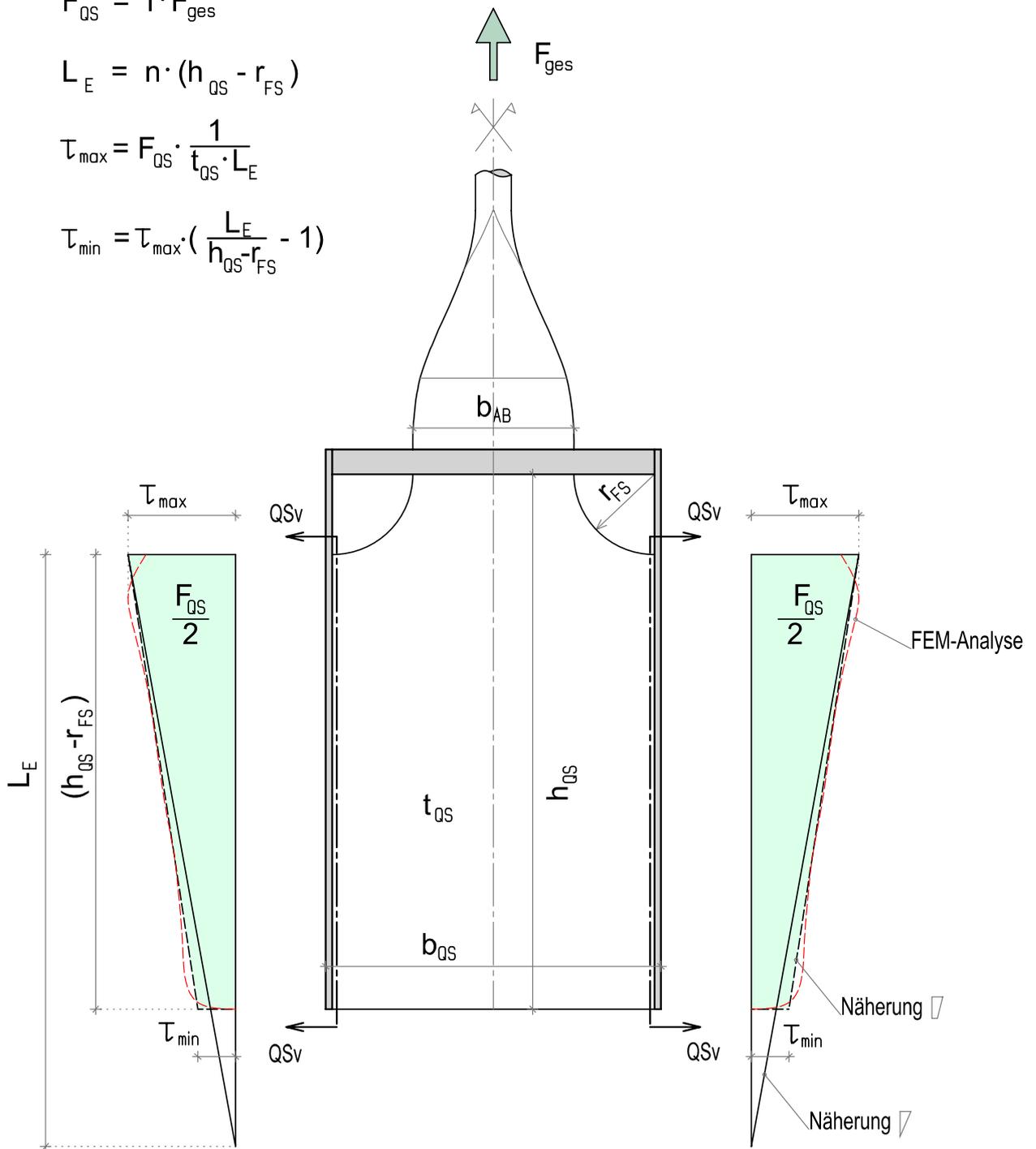
A19 Schnitt „Querscheibe vertikal“ und Rechenmodell für den Faktor  $n$ ,  $L_E \geq (h_{QS} - r_{FS})$

$$F_{QS} = f \cdot F_{ges}$$

$$L_E = n \cdot (h_{QS} - r_{FS})$$

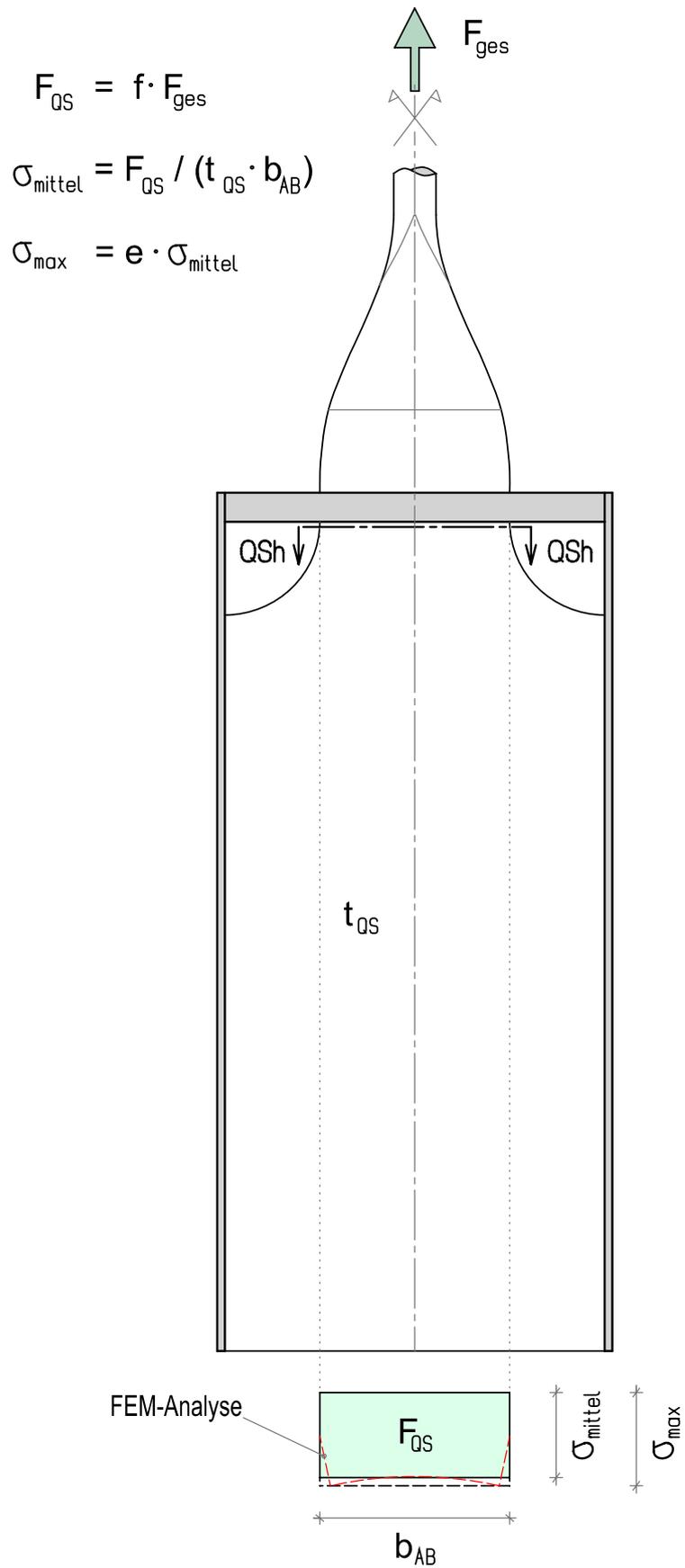
$$\tau_{max} = F_{QS} \cdot \frac{1}{t_{QS} \cdot L_E}$$

$$\tau_{min} = \tau_{max} \cdot \left( \frac{L_E}{h_{QS} - r_{FS}} - 1 \right)$$



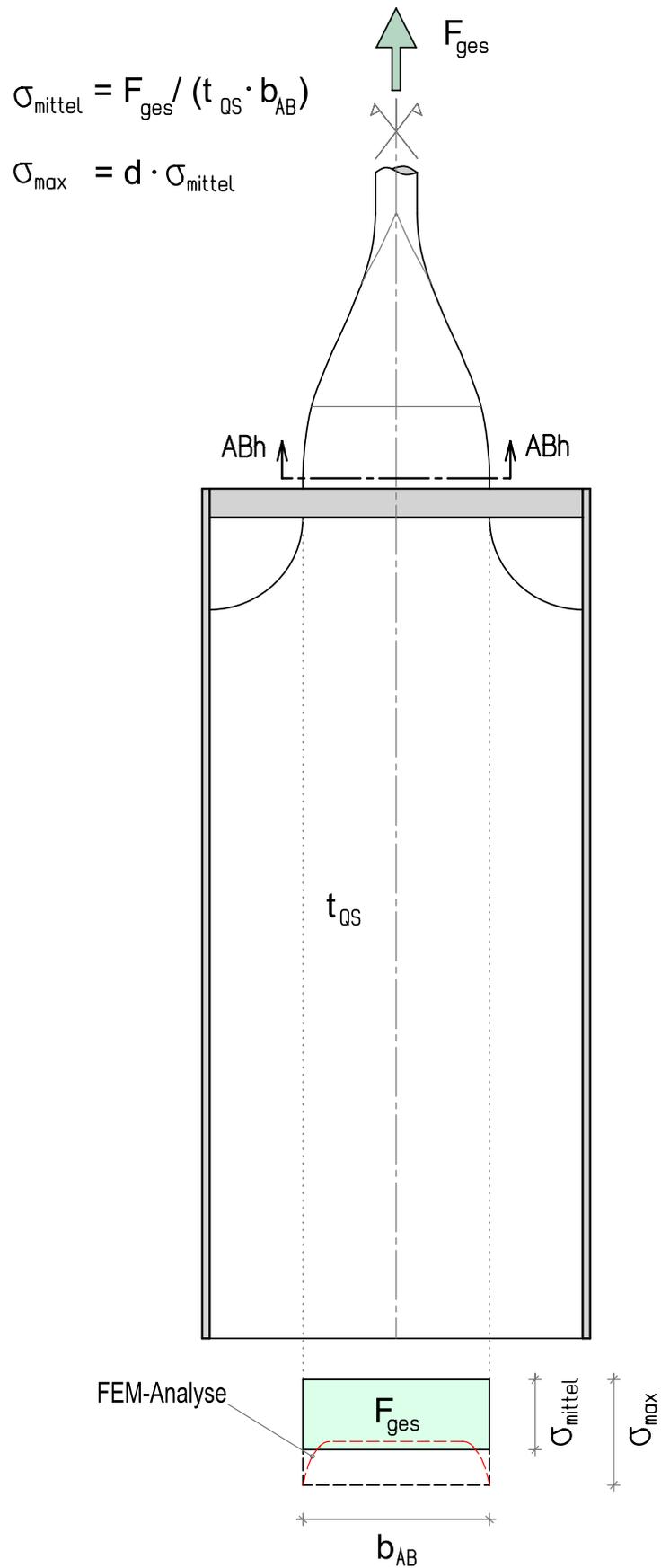
A20

Schnitt „Querscheibe horizontal“ und Rechenmodell für den Faktor e



A21

Schnitt „Anschlussblech horizontal“ und Rechenmodell für den Faktor d



A22 Schnitt „Obergurt horizontal“ und Rechenmodell für den Ausbreitungswinkel  $\varphi$

$$F_{OG} = (1,05 - f) \cdot F_{ges}$$

$$L_H = \tan \varphi \cdot r_{FS}$$

$$\tau_{max} = \frac{F_{OG}}{2} \cdot \frac{1}{t_{OG} \cdot L_H}$$

$$\tau_{max} = \frac{F_{OG}}{2} \cdot \frac{1}{t_{OG} \cdot \tan \varphi \cdot r_{FS}}$$

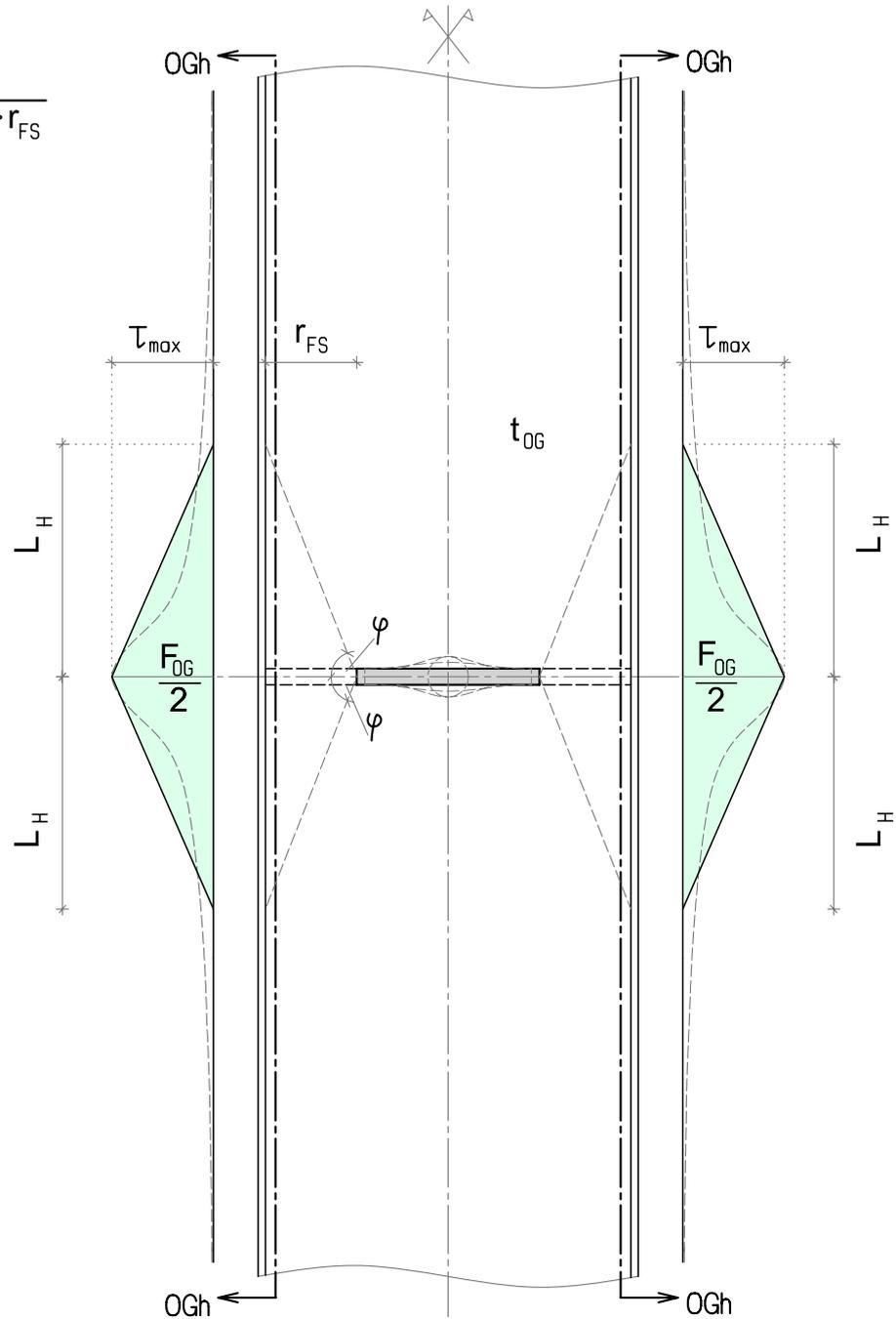


Tabelle mit Ergebnisse für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle,  $t_{OC} = 35\text{mm}$

Modell	[-]	r1	r4	r2	r5	r3	n1	n4	n2	n5	n3
<b>Hänger</b>											
DMI	[mm]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A	[cm <sup>2</sup> ]	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54
Stahlgüte	[-]	S 460									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
$F_{ges}$	[kN]	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{st}$	[mm]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
$t_{st}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
A	[cm <sup>2</sup> ]	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{oc}$	[mm]	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
$b_{oc}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
$b_{oc}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{st}$	[mm]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{oc}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
$h_{oc}$	[mm]	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
$r_{15}$	[mm]	275	225	175	125	75	275	225	175	125	75
$r_{18}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$t_{oc}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$b_{st}/b_{oc}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
f	[-]	1,00	1,00	1,00	0,96	0,91	1,00	1,00	1,00	0,96	0,91
F <sub>oc</sub>	[kN]	3612,83	3612,83	3472,45	3285,87	3612,83	3612,83	3472,45	3285,87	3612,83	3472,45
F <sub>oc</sub>	[kN]	180,64	180,64	181,09	321,03	507,60	180,64	180,64	181,09	321,03	507,60
$b_{oc}/h_{oc}$	[-]	0,67	0,60	0,53	0,47	0,40	0,33	0,30	0,27	0,23	0,20
n	[-]	1,22	1,09	0,95	0,82	0,68	0,62	0,55	0,48	0,41	0,35
$L_E$	[mm]	1665,6	1561,4	1443,6	6,26	6,61	7,04	4,84	5,28	5,82	6,27
$L_E$	[mm]	1665,6	1561,4	1443,6	6,26	6,61	7,04	4,84	5,28	5,82	6,27
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[-]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$V_{m2}$	[-]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_{d,1}/(\beta_w \cdot V_{m2})$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{arbeits}$	[mm]	8,29	8,84	9,56	10,11	10,75	7,40	8,06	8,89	9,58	10,36
$b_{st}/b_{oc}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
e	[-]	1,20	1,22	1,24	1,26	1,30	1,20	1,22	1,24	1,26	1,30
$\sigma_{m1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	20,07	20,07	20,07	19,29	18,25	20,07	20,07	20,07	19,29	18,25
$\sigma_{m1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	24,08	24,42	24,83	24,39	23,73	24,08	24,42	24,83	24,39	23,73
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	68	69	70	69	67	68	69	70	69	67
$b_{st}/b_{oc}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
d	[-]	1,35	1,41	1,47	1,56	1,68	1,35	1,41	1,47	1,56	1,68
$\sigma_{m1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07
$\sigma_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	27,10	28,21	29,60	31,40	33,78	27,10	28,21	29,60	31,40	33,78
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	76	79	83	88	95	76	79	83	88	95
$b_{st}/b_{oc}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
g	[°]	56,80	58,15	59,84	62,01	64,90	56,80	58,15	59,84	62,01	64,90
$L_{Ht}$	[mm]	420,2	362,2	301,1	235,2	160,1	420,2	362,2	301,1	235,2	160,1
$T_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	0,61	0,71	0,86	1,05	1,35	0,61	0,71	0,86	1,05	1,35
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[-]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$V_{m2}$	[-]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_{d,1}/(\beta_w \cdot V_{m2})$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{arbeits}$	[mm]	0,82	0,95	1,15	1,41	1,81	0,82	0,95	1,15	1,41	1,81

- Projektangaben/ Annahmen
- Parameter
- Rechenmodellergebnisse
- maximale Spannungen, Rechenmodell
- erforderliche Schweißnahtdicke
- Werkstoffausnutzung

Tabelle mit Ergebnissen für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle,  $t_{oc} = 70 \text{ mm}$  (I)

Modell	[ ]	r1	r4	r2	r5	r3	n1	n4	n2	n5	n3
<b>Hänger</b>											
DWR	[mm]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A	[cm <sup>2</sup> ]	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54	78.54
Stahlgüte	[ ]	S 460									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
$F_{\text{res}}$	[kN]	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{\text{as}}$	[mm]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
$t_{\text{as}}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
A	[cm <sup>2</sup> ]	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{\text{oc}}$	[mm]	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
$b_{\text{oc}}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{\text{cr}}$	[mm]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{\text{os}}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
$h_{\text{os}}$	[mm]	1500	1500	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000
$f_{\text{os}}$	[mm]	275	225	175	125	75	275	225	175	125	75
$t_{\text{os}}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$b_{\text{w}}/b_{\text{os}}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
f	[kN]	0,90	0,88	0,85	0,81	0,76	0,90	0,88	0,85	0,81	0,76
$F_{\text{os}}$	[kN]	3255,52	3168,45	3059,62	2919,68	2733,11	3255,52	3168,45	3059,62	2919,68	2733,11
$F_{\text{os}}$	[kN]	537,95	625,02	733,86	873,79	1060,37	537,95	625,02	733,86	873,79	1060,37
$b_{\text{os}}/h_{\text{os}}$	[ ]	0,67	0,60	0,53	0,47	0,40	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
n	[ ]	1,46	1,33	1,19	1,06	0,92	1,13	1,02	0,92	0,82	0,72
$L_t$	[cm]	179,18	169,27	158,01	145,40	131,44	194,06	181,71	168,34	153,96	138,56
$\tau_{\text{max}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	4,54	4,68	4,84	5,02	5,20	4,19	4,36	4,54	4,74	4,93
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[ ]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\gamma_{\text{max}}$	[ ]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_w/(B_w \cdot \gamma_{\text{max}})$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$a_{\text{erf,ges}}$	[mm]	6,94	7,15	7,40	7,67	7,94	6,41	6,66	6,94	7,25	7,54
$b_{\text{w}}/b_{\text{os}}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
e	[ ]	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15
$\sigma_m$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	18,09	17,60	17,00	16,22	15,18	18,09	17,60	17,00	16,22	15,18
$\sigma_{\text{max}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	19,81	19,42	18,93	18,29	17,39	19,81	19,42	18,93	18,29	17,39
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	56	55	53	52	49	56	55	53	52	49
$b_{\text{w}}/b_{\text{os}}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
d	[ ]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
$\sigma_m$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07
$\sigma_{\text{max}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
$b_{\text{w}}/b_{\text{os}}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
$\phi$	[°]	64,70	66,05	67,74	69,91	72,80	64,70	66,05	67,74	69,91	72,80
$L_{\text{tr}}$	[cm]	58,18	50,65	42,75	34,17	24,23	58,18	50,65	42,75	34,17	24,23
$\tau_{\text{max}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	0,66	0,88	1,23	1,83	3,13	0,66	0,88	1,23	1,83	3,13
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[ ]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\gamma_{\text{max}}$	[ ]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_w/(B_w \cdot \gamma_{\text{max}})$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$a_{\text{erf,ges}}$	[mm]	1,77	2,36	3,28	4,88	8,36	1,77	2,36	3,28	4,88	8,36

Projektangaben/ Annahmen  
 Parameter  
 Rechenmodellergebnisse  
 maximale Spannungen, Rechenmodell  
 erforderliche Schweißnahtdicke  
 Werkstoffausnutzung

Tabelle mit Ergebnisse für Lastfall „Hängervolllast“, Rechenmodelle,  $t_{OC} = 70 \text{ mm}$  (2)

Modell	[ ]	r1	r4	r2	r5	r3	n1	n4	n2	n5	n3
<b>Hänger</b>											
DM	[mm]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A	[cm <sup>2</sup> ]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Stahlgüte	[ ]	S 460									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
$F_{Rst}$	[kN]	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{as}$	[mm]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
$t_{ab}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
A	[cm <sup>2</sup> ]	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{OC}$	[mm]	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
$b_{OC}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{ST}$	[mm]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{OC}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
$b_{OC}$	[mm]	2500	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000	3000
$r_{IS}$	[mm]	275	225	175	125	75	275	225	175	125	75
$t_{OS}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$b_{Stg}/b_{Stg}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
f	[ ]	0,90	0,88	0,85	0,81	0,76	0,90	0,88	0,85	0,81	0,76
$F_{OS}$	[kN]	3255,52	3168,45	3059,62	2919,68	2733,11	3255,52	3168,45	3059,62	2919,68	2733,11
$F_{OC}$	[kN]	537,95	625,02	733,86	873,79	1060,37	537,95	625,02	733,86	873,79	1060,37
$b_{Stg}/b_{OC}$	[ ]	0,40	0,36	0,32	0,28	0,24	0,33	0,30	0,27	0,23	0,20
n	[ ]	0,92	0,84	0,76	0,68	0,60	0,79	0,72	0,65	0,58	0,52
$L_E$	[cm]	205,23	191,41	176,77	161,33	145,07	214,55	199,74	184,27	168,11	151,28
$T_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	3,97	4,14	4,33	4,52	4,71	3,79	3,97	4,15	4,34	4,52
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[ ]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$\gamma_{w2}$	[ ]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_y/(\beta_w \cdot \gamma_{w2})$	[N/mm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{herf,ges}$	[mm]	6,06	6,32	6,61	6,91	7,20	5,80	6,06	6,34	6,64	6,90
$b_{Stg}/b_{OC}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
e	[ ]	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15
$\sigma_{n1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	18,09	17,60	17,00	16,22	15,18	18,09	17,60	17,00	16,22	15,18
$\sigma_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	19,81	19,42	18,93	18,29	17,39	19,81	19,42	18,93	18,29	17,39
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	55	53	52	49	55	55	55	53	52	49
$b_{Stg}/b_{OC}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
d	[ ]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
$\sigma_{n1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07
$\sigma_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
$b_{Stg}/b_{OC}$	[ ]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
$\phi$	[ ]	64,70	66,05	67,74	69,91	72,80	64,70	66,05	67,74	69,91	72,80
$L_{tr}$	[cm]	58,18	50,65	42,75	34,17	24,23	58,18	50,65	42,75	34,17	24,23
$T_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	0,66	0,88	1,23	1,83	3,13	0,66	0,88	1,23	1,83	3,13
Stahlgüte	[ ]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[ ]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\gamma_{w2}$	[ ]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_y/(\beta_w \cdot \gamma_{w2})$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{herf,ges}$	[mm]	1,77	2,36	3,28	4,88	8,36	1,77	2,36	3,28	4,88	8,36

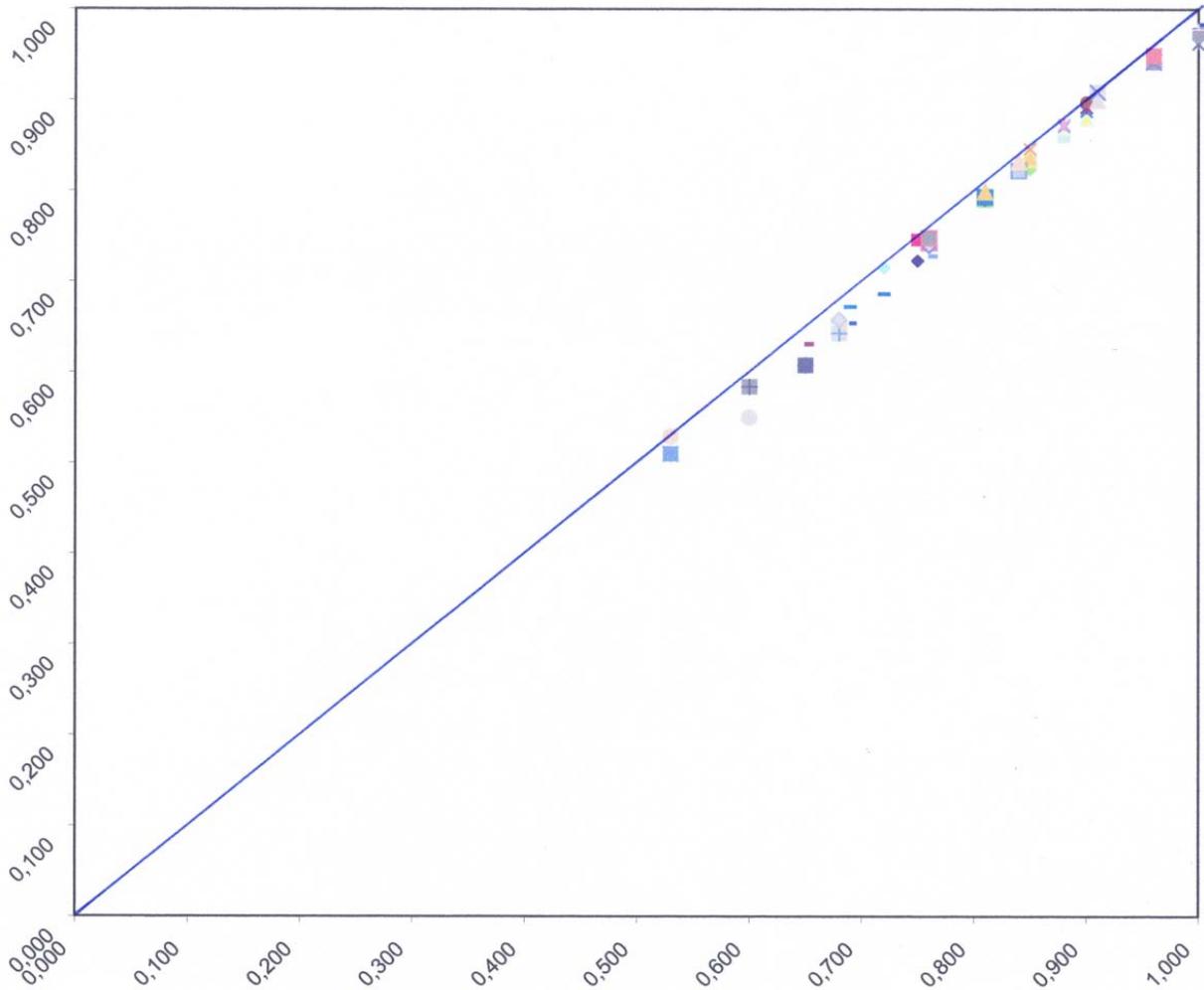
Projektangaben/ Annahmen  
 Parameter  
 Rechenmodellergebnisse  
 maximale Spannungen, Rechenmodell  
 erforderliche Schweißnahtdicke  
 Werkstoffausnutzung

Tabelle mit Ergebnisse für Lastfall „Hängervollast“, Rechenmodelle,  $t_{OC} = 105 \text{ mm}$

Modell	[-]	r1	r4	r2	r5	r3	n1	n4	n2	n5	n3
<b>Hänger</b>											
DM	[mm]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A	[cm <sup>2</sup> ]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Stahlgüte	[-]	S 460									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
$F_{Rst}$	[kN]	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83	3612,83
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{AS}$	[mm]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
$t_{AS}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
A	[cm <sup>2</sup> ]	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{OS}$	[mm]	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
$b_{OG}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$t_{SR}$	[mm]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
$b_{OS}$	[mm]	1000	900	800	700	600	1000	900	800	700	600
$b_{OS}$	[mm]	1500	1500	1500	1500	1500	3000	3000	3000	3000	3000
$r_{OS}$	[mm]	275	225	175	125	75	275	225	175	125	75
$t_{OS}$	[mm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$b_{wG}/b_{OS}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
f	[-]	0,75	0,72	0,69	0,65	0,60	0,75	0,72	0,69	0,65	0,60
$F_{OS}$	[kN]	2695,53	2608,46	2499,63	2359,70	2173,12	2695,53	2608,46	2499,63	2359,70	2173,12
$F_{OS}$	[kN]	1097,94	1185,01	1293,85	1433,78	1620,35	1097,94	1185,01	1293,85	1433,78	1620,35
$b_{wG}/b_{OS}$	[-]	0,67	0,60	0,53	0,47	0,40	0,33	0,30	0,27	0,23	0,20
n	[-]	1,53	1,39	1,26	1,12	0,99	0,85	0,78	0,72	0,65	0,58
$L_e$	[cm]	187,02	177,43	166,49	154,20	140,56	231,99	217,50	202,35	186,51	170,00
$\tau_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	3,60	3,68	3,75	3,83	3,87	2,90	3,00	3,09	3,16	3,20
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[-]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\gamma_{w2}$	[-]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_y/(\beta_w \cdot \gamma_{w2})$	[N/mm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{berlges}$	[mm]	5,51	5,62	5,74	5,85	5,91	4,44	4,58	4,72	4,83	4,88
e	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
$\sigma_{ex}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15
$\sigma_{ex}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	14,98	14,49	13,89	13,11	12,07	14,98	14,49	13,89	13,11	12,07
$\sigma_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	16,40	15,99	15,47	14,78	13,83	16,40	15,99	15,47	14,78	13,83
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	46	45	44	42	39	46	45	44	42	39
$b_{wG}/b_{OS}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
d	[-]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
$\sigma_{m1}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07	20,07
$\sigma_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12	35,12
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Ausnutzung	%	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
$b_{wG}/b_{OS}$	[-]	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75	0,45	0,50	0,56	0,64	0,75
$\phi$	[cm]	68,70	70,05	71,74	73,91	76,80	68,70	70,05	71,74	73,91	76,80
$L_{tr}$	[cm]	70,53	61,99	53,03	43,33	31,98	70,53	61,99	53,03	43,33	31,98
$\tau_{max}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	0,74	0,91	1,16	1,58	2,41	0,74	0,91	1,16	1,58	2,41
Stahlgüte	[-]	S 355									
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
$\beta_w$	[-]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$\gamma_{w2}$	[-]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$f_y/(\beta_w \cdot \gamma_{w2})$	[N/cm <sup>2</sup> ]	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33	45,33
$\sigma_{berlges}$	[mm]	2,97	3,65	4,66	6,32	9,68	2,97	3,65	4,66	6,32	9,68

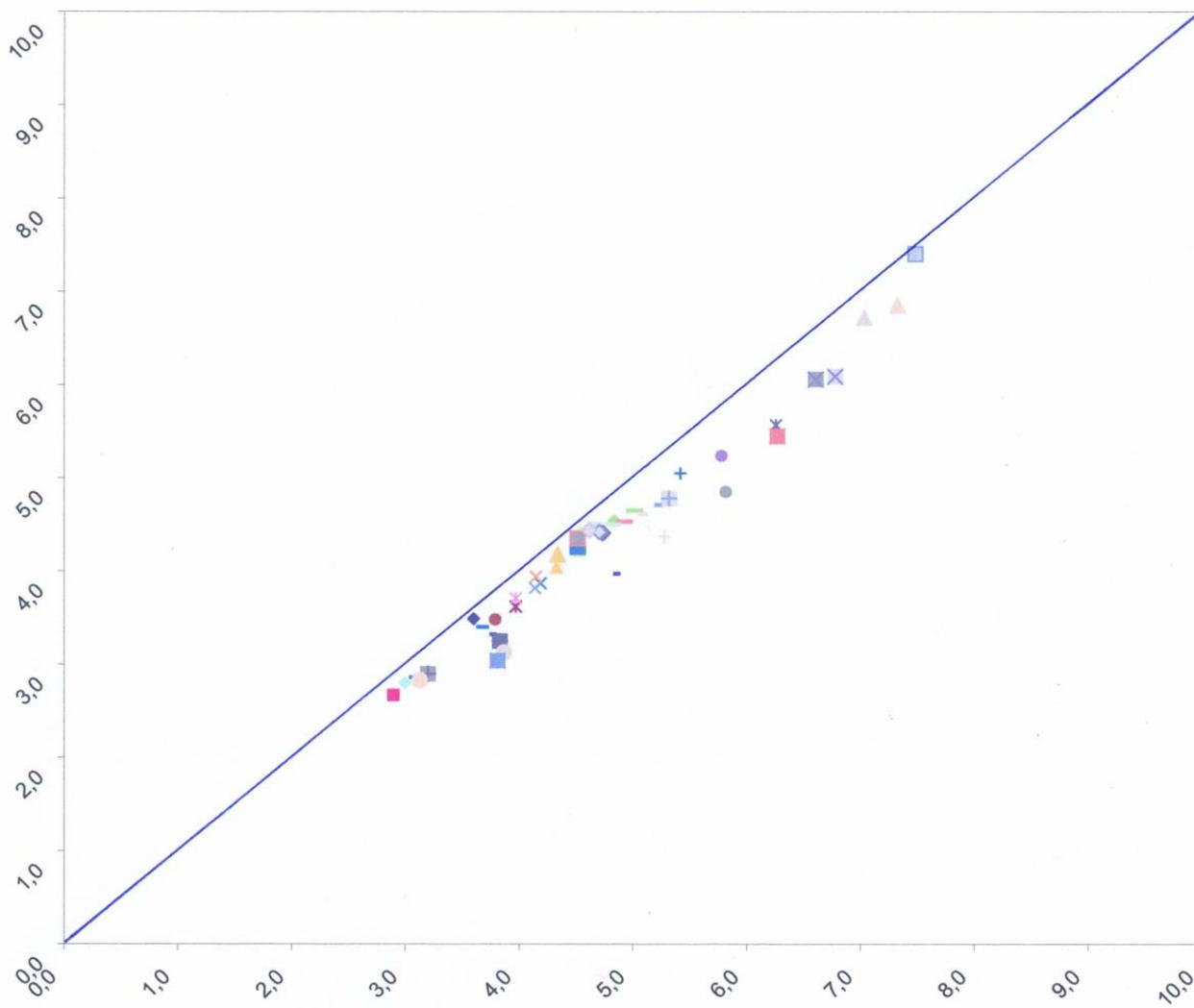
Projektangaben/ Annahmen  
 Parameter  
 Rechenmodellerggebnisse  
 maximale Spannungen, Rechenmodell  
 erforderliche Schweißnahtdicke  
 Werkstoffausnutzung

A27 Diagramm Vergleich FEM-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“  
 Faktor f



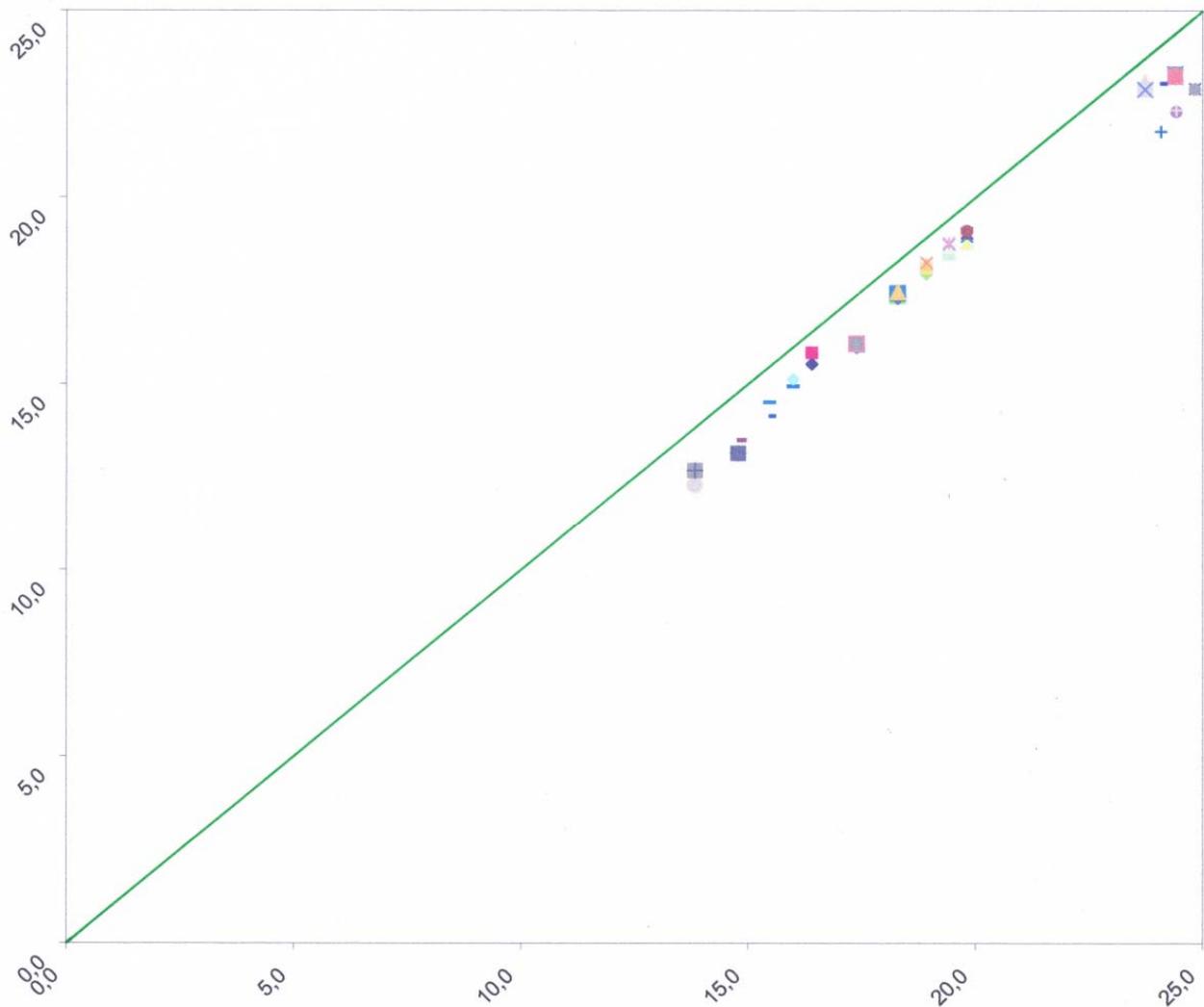
- ◆x1    ■t1    ▲l1    ×k1    ✖i1    ●h1    +r1    -n1
- x4    ◀t4    ◻l4    ▲k4    ×i4    ✖h4    ●r4    +n4
- x2    —t2    ◆l2    ■k2    ▲i2    ×h2    ✖r2    ●n2
- +x5    -t5    -l5    ◆k5    ■i5    ▲h5    ×r5    ✖n5
- x3    +t3    -l3    —k3    ◆i3    ■h3    ▲r3    ×n3
- ✖x7    ●t7    +l7    -k7    -i7    ◆h7    ■r7    ▲n7

A28 Diagramm Vergleich FEM-Analyse/ Rechenmodell für Hängervollast, maximale Schubspannung im Schnitt "Querscheibe vertikal"



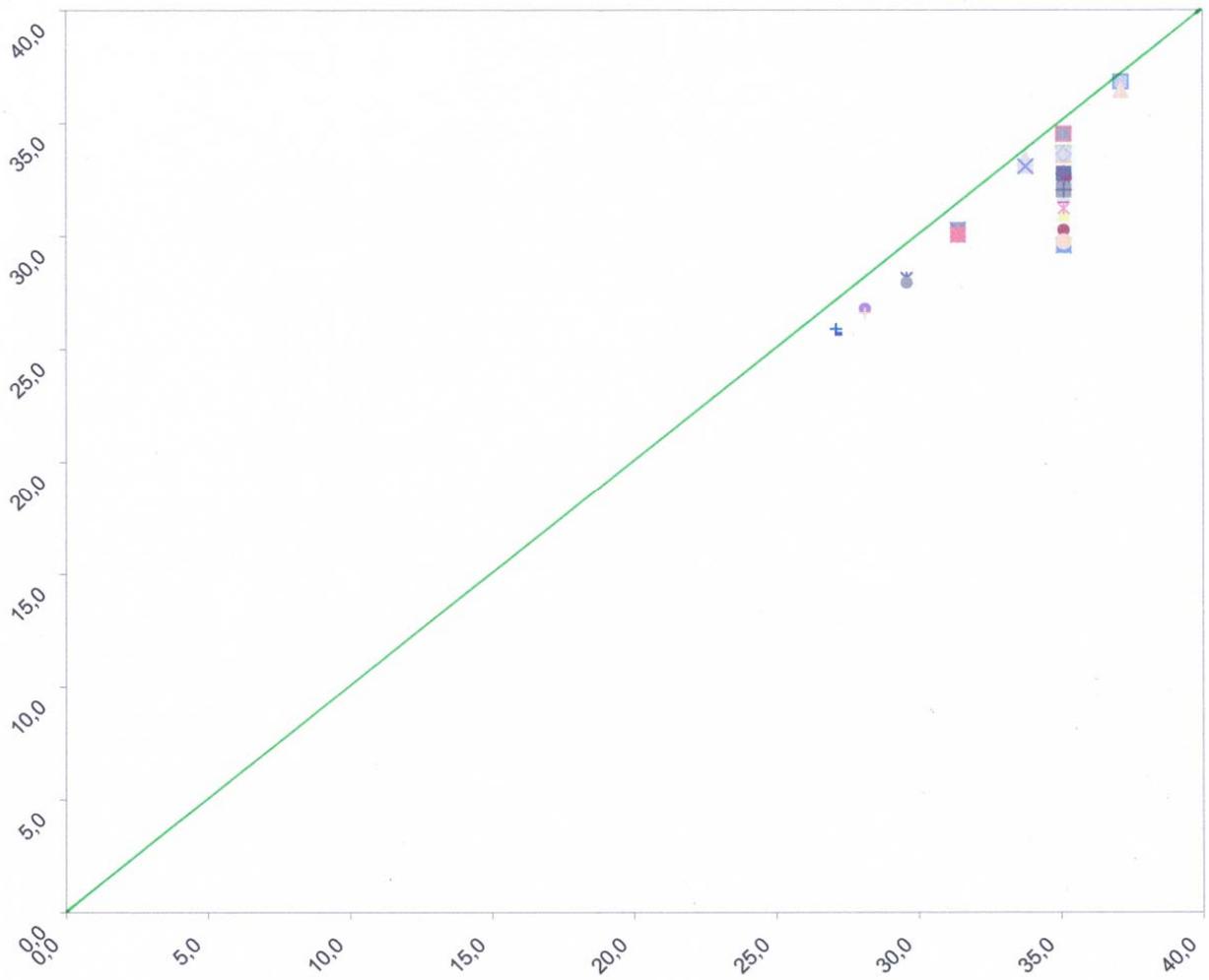
- ◆x1    ■t1    ▲l1    ×k1    ×i1    ●h1    +r1    -n1
- x4    ◆t4    ■l4    ▲k4    ×i4    ×h4    ●r4    +n4
- x2    -t2    ◆l2    ■k2    ▲i2    ×h2    ×r2    ●n2
- +x5    -t5    -l5    ◆k5    ■i5    ▲h5    ×r5    ×n5
- x3    +t3    -l3    -k3    ◆i3    ■h3    ▲r3    ×n3
- ×x7    ●t7    +l7    -k7    -i7    ◆h7    ■r7    ▲n7

A29 Diagramm Vergleich FEM-Analyse/ Rechenmodell für „Hängervolllast“, maximale Normalspannung im Schnitt „Querscheibe horizontal“



- ◆x1   ■t1   ▲l1   ×k1   ✖i1   ●h1   +r1   -n1
- x4   ◀t4   ■l4   ▲k4   ×i4   ✖h4   ●r4   +n4
- x2   →t2   ◆l2   ■k2   ▲i2   ×h2   ✖r2   ●n2
- +x5   -t5   -l5   ◆k5   ■i5   ▲h5   ×r5   ✖n5
- x3   +t3   -l3   -k3   ◆i3   ■h3   ▲r3   ×n3

A30 Diagramm Vergleich FEM-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Normalspannung im Schnitt „Anschlussblech horizontal“



◆x1    ■t1    ▲l1    ●h1    +r1    -n1

-x4    ◆t4    ■l4    ×h4    ●r4    +n4

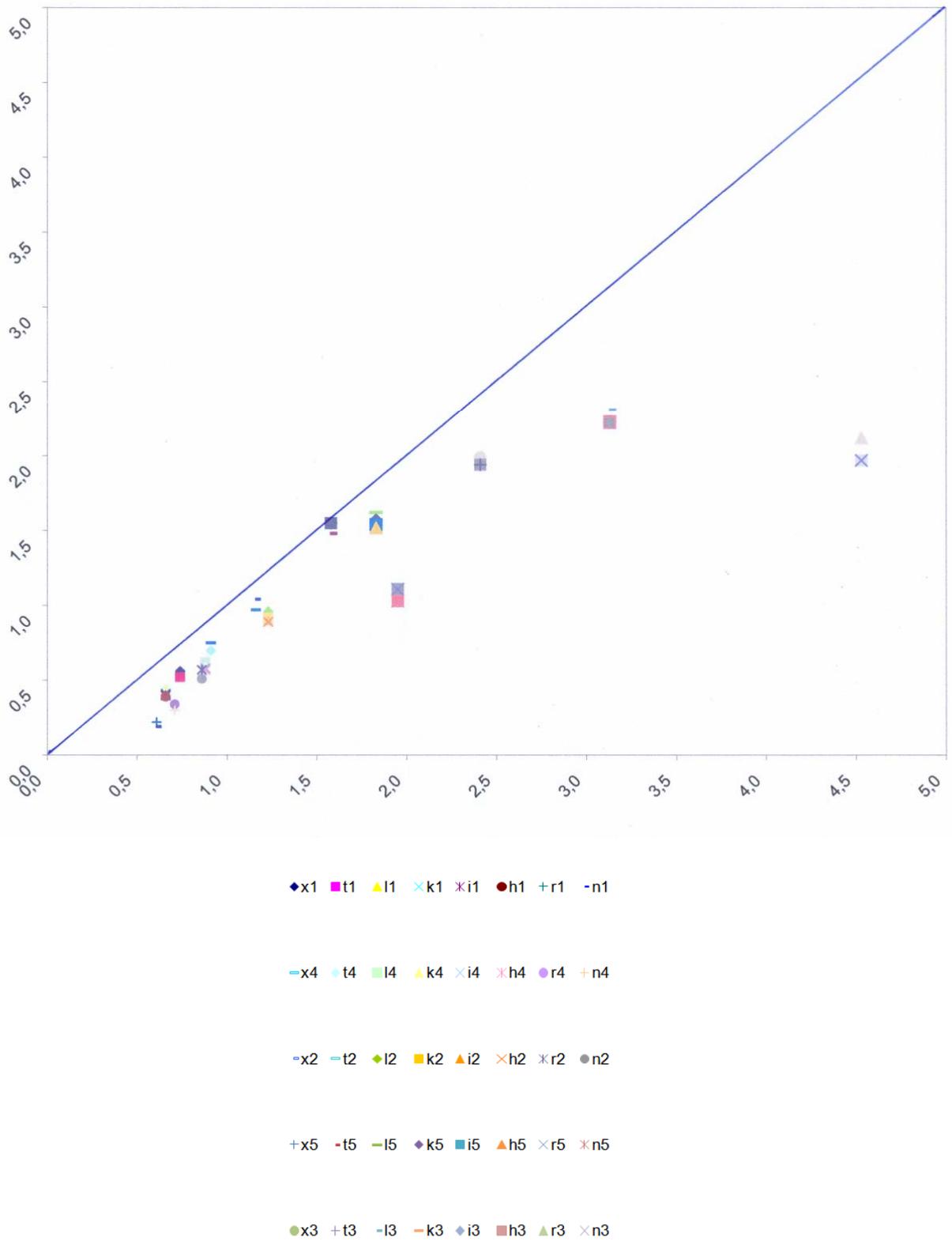
-x2    -t2    ◆l2    ×h2    ×r2    ●n2

+x5    -t5    -l5    ▲h5    ×r5    ×n5

●x3    +t3    -l3    ■h3    ▲r3    ×n3

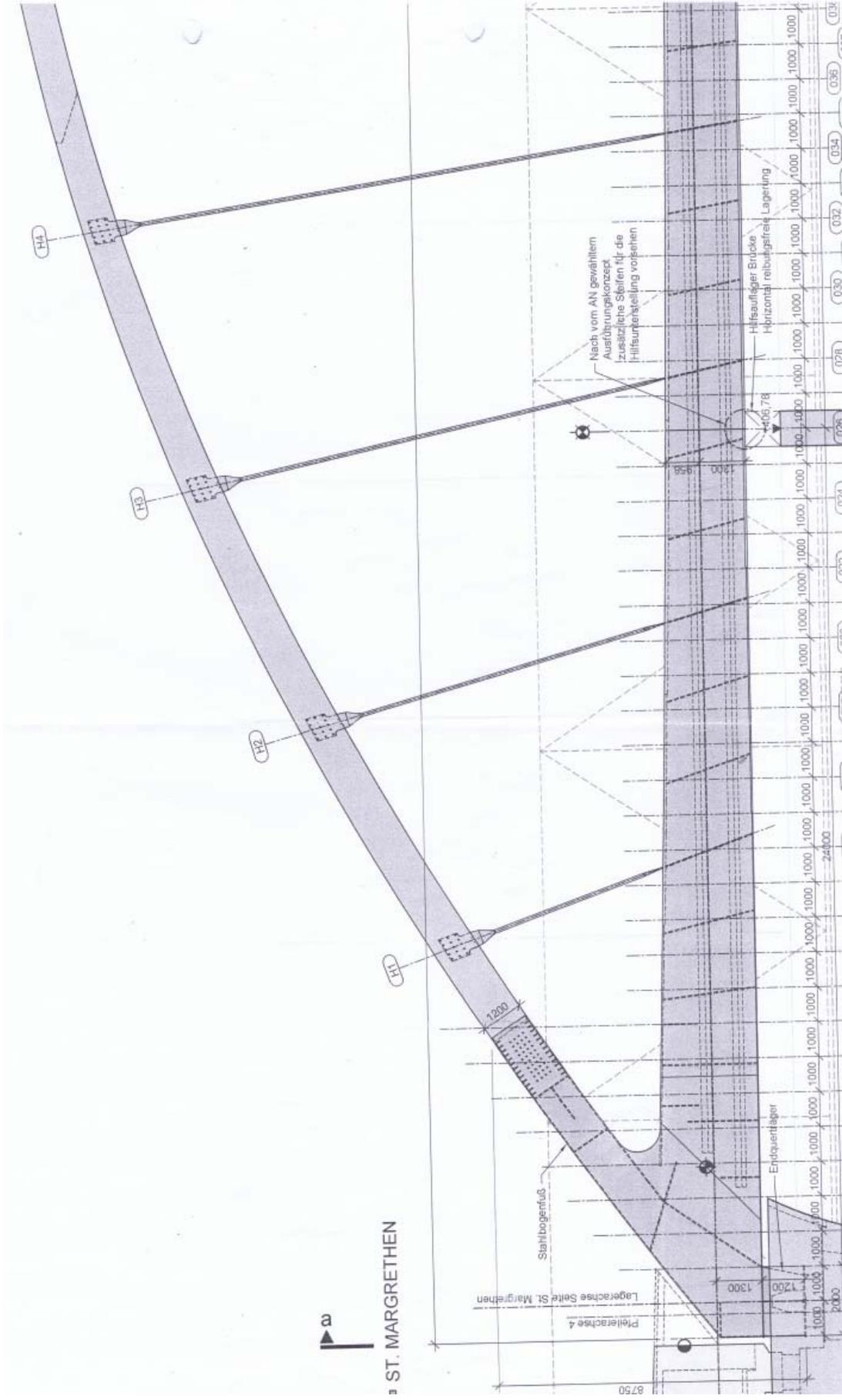
×x7    ●t7    +l7    ◆h7    ■r7    ▲n7

A31 Diagramm Vergleich FE-Analyse/ Rechenmodell für Lastfall „Hängervolllast“, maximale Schubspannung im Schnitt “Obergurt horizontal”

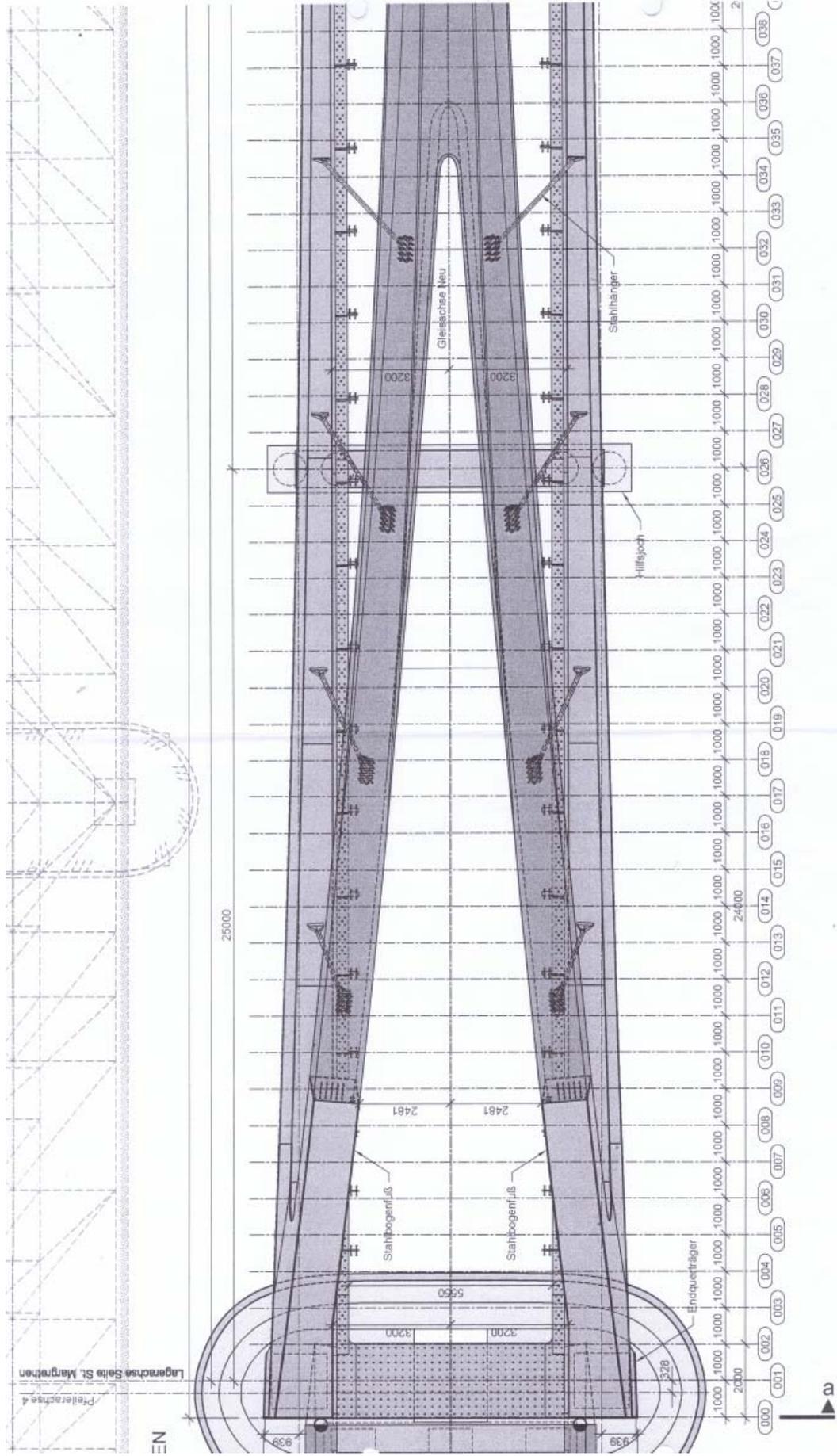




Brücke Ausschnitt Längsansicht

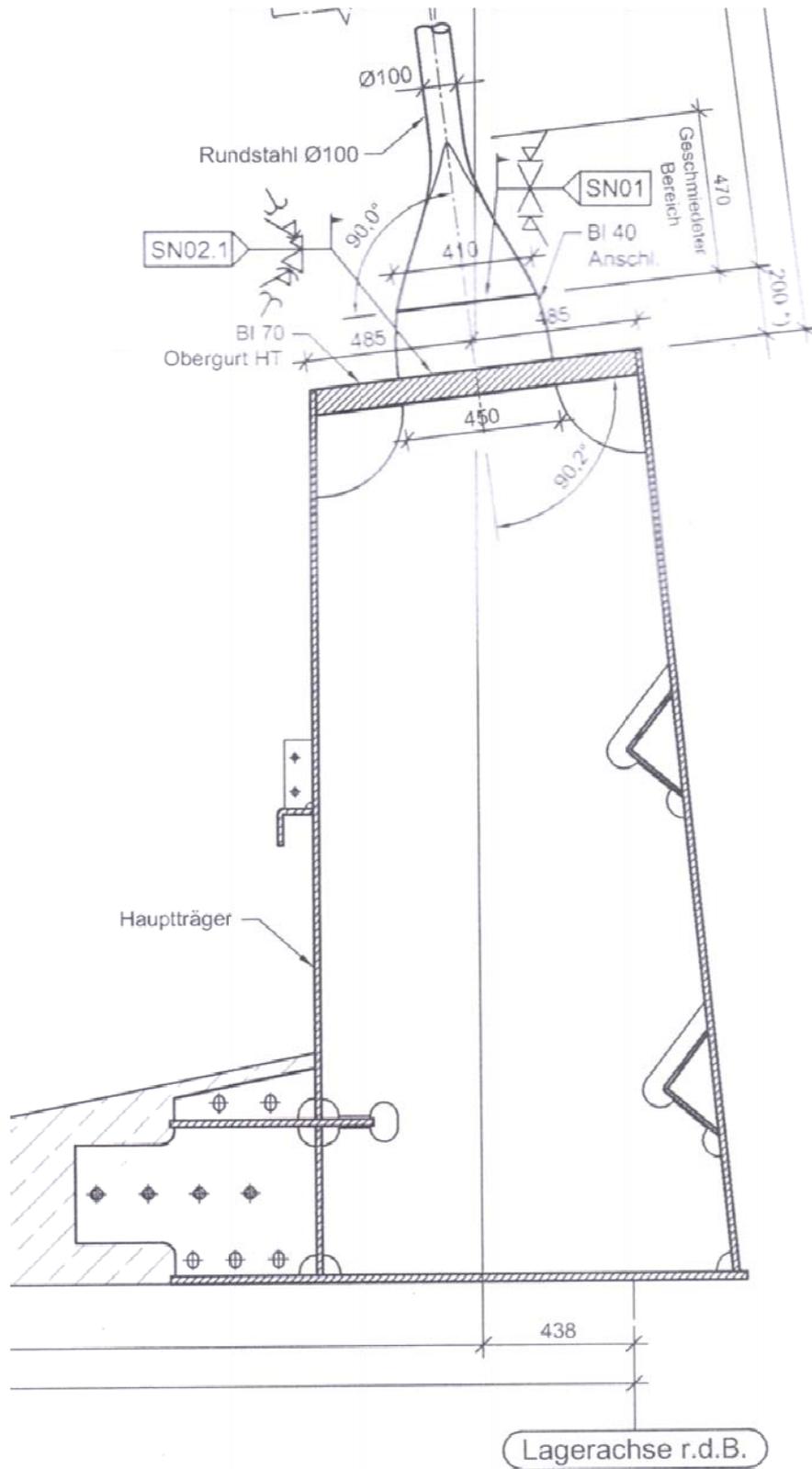


Brücke Ausschnitt Grundriss

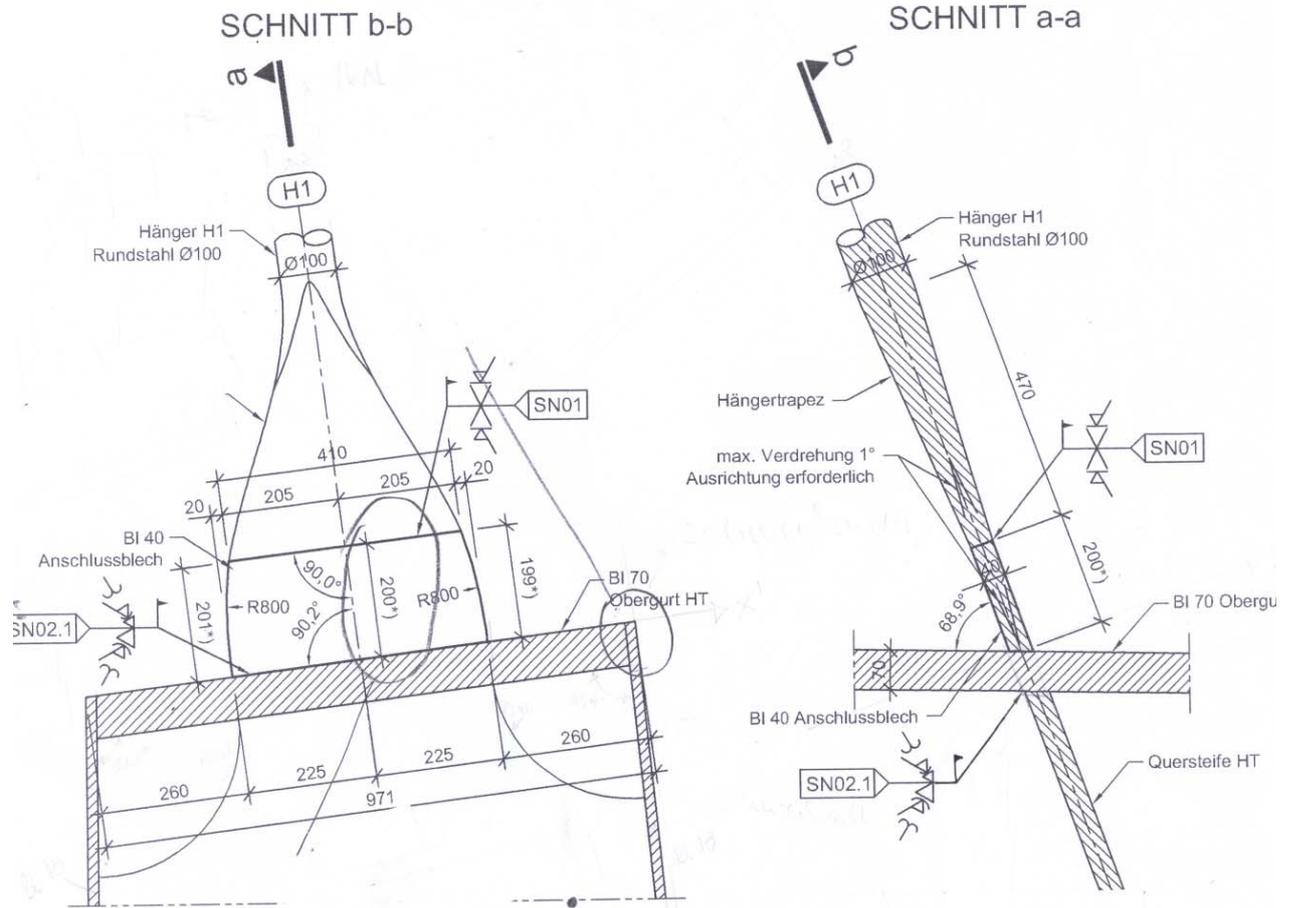




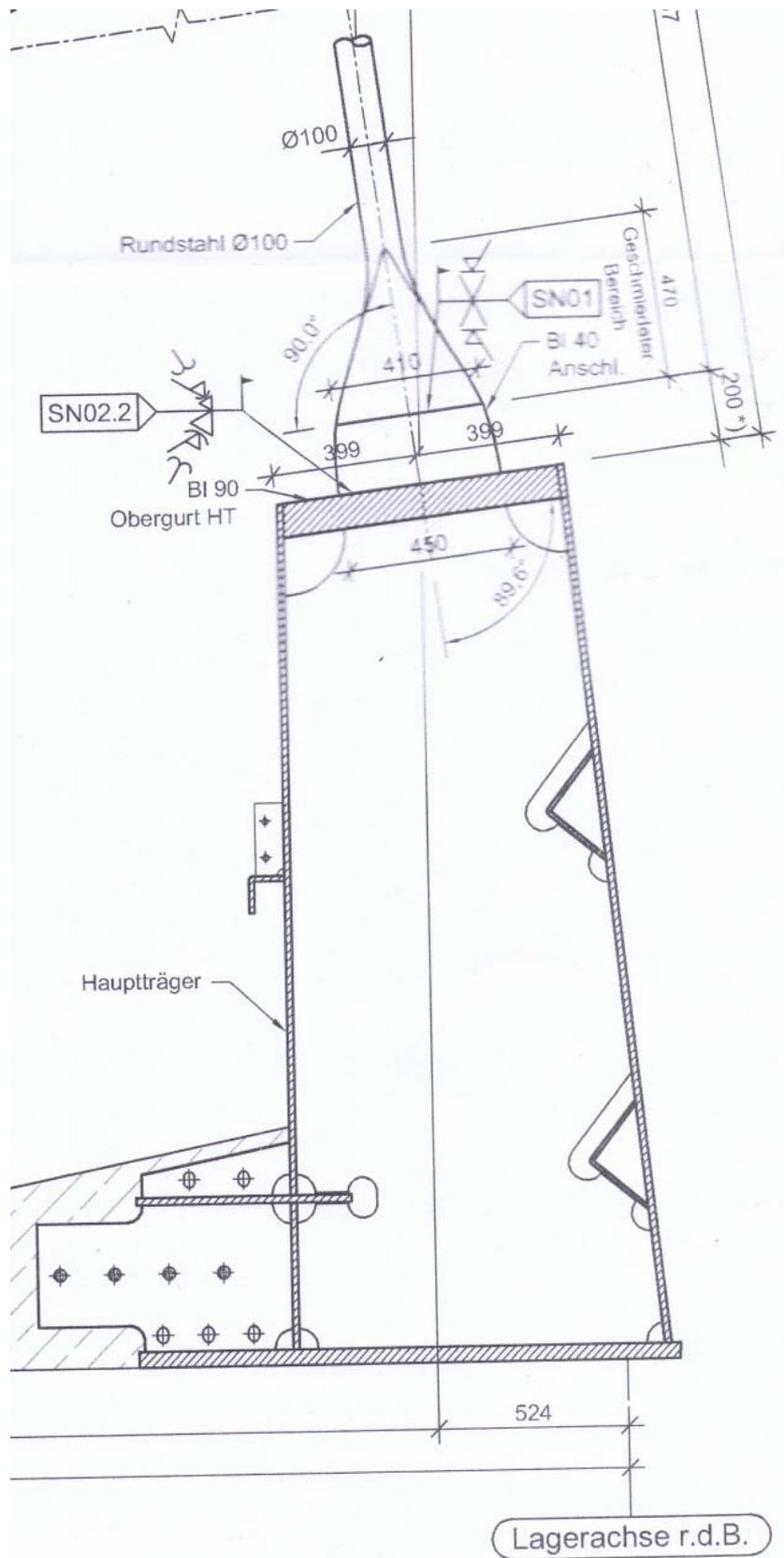
## B5 Detail Hänger „H1“ und Versteifungsträger



B6 Detail Hänger „H1“ und Anschluss an Versteifungsträger

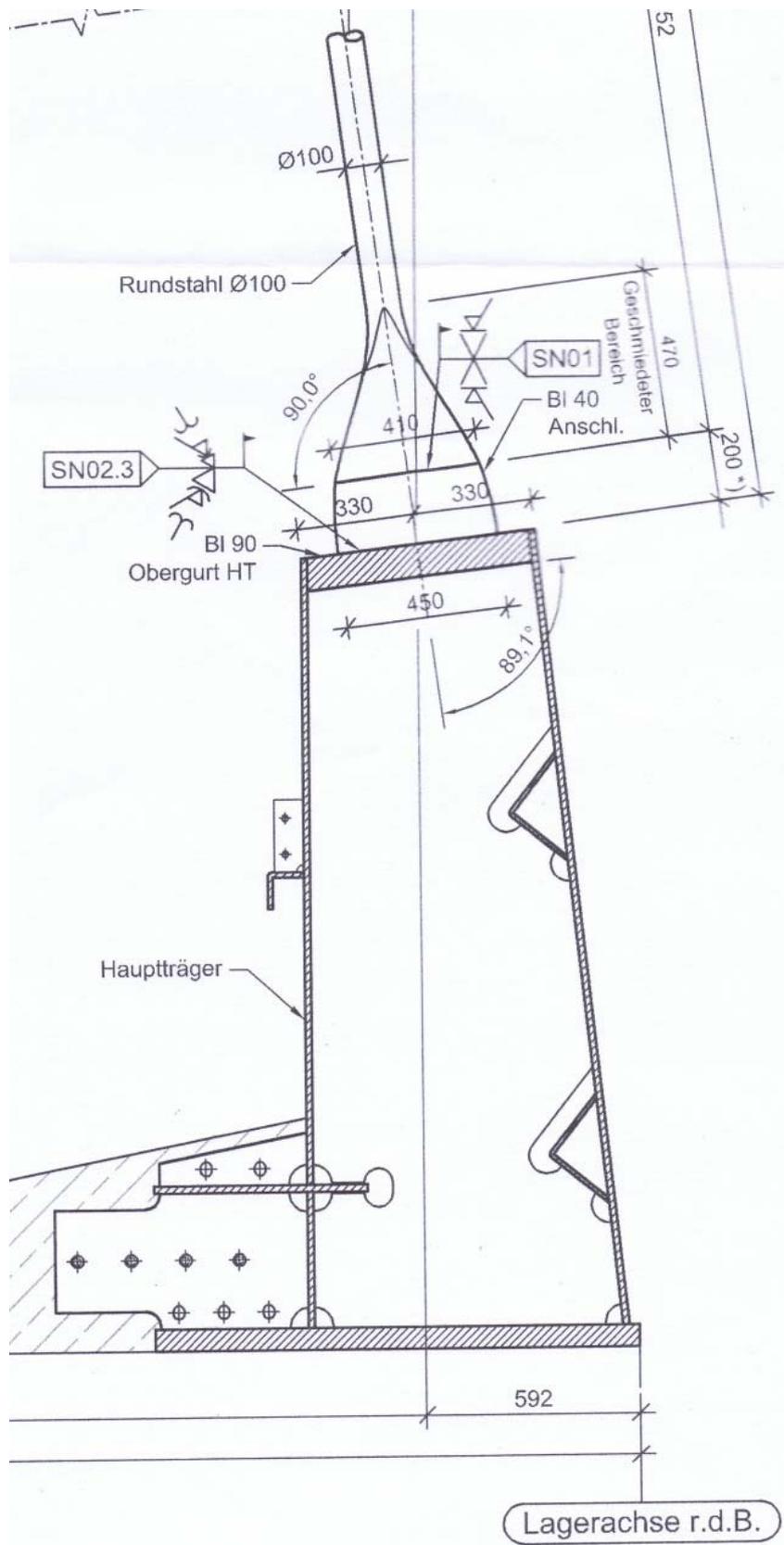


## B7 Detail Hänger „H2“ und Versteifungsträger

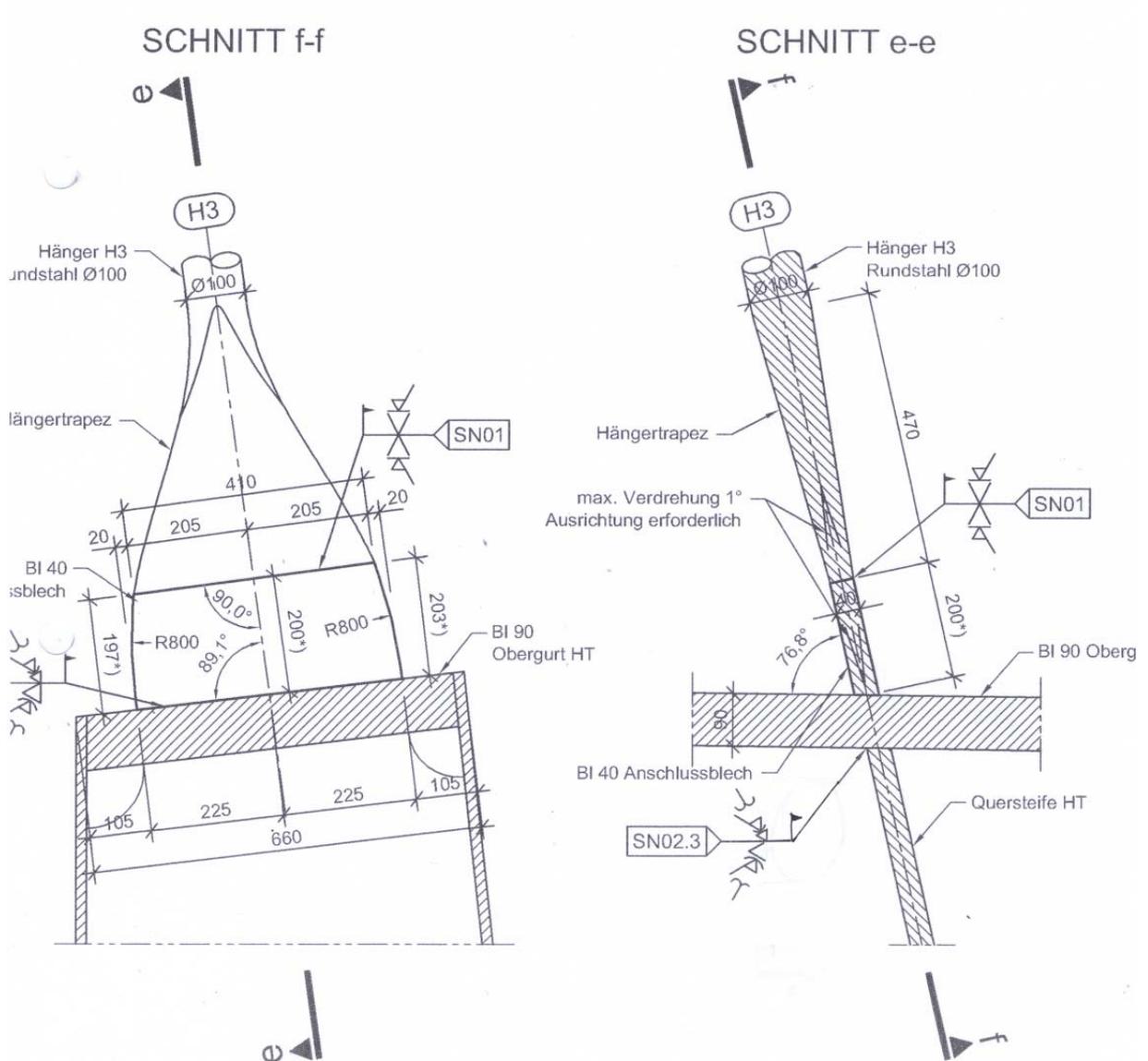




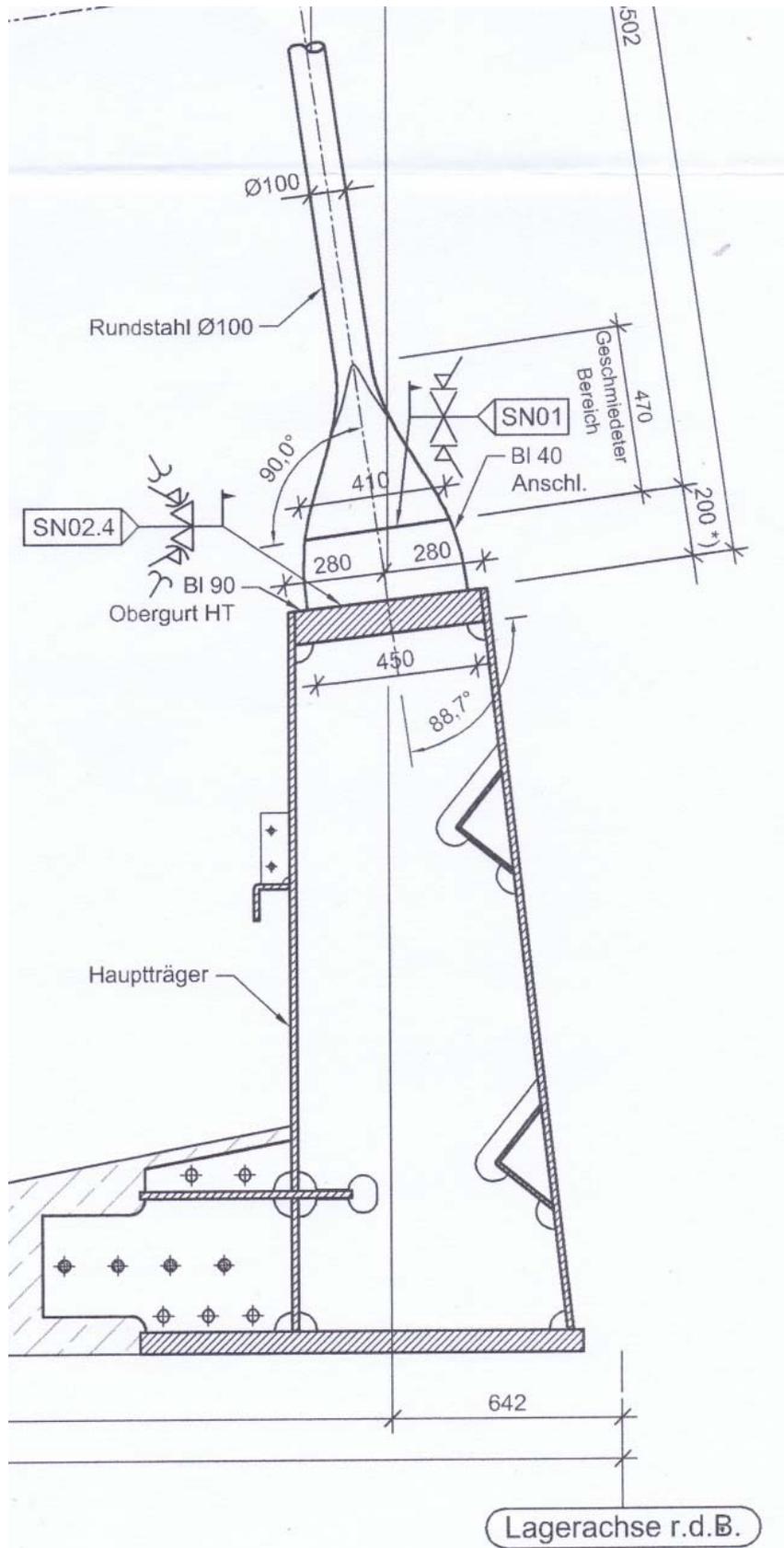
## B9 Detail Hänger „H3“ und Versteifungsträger



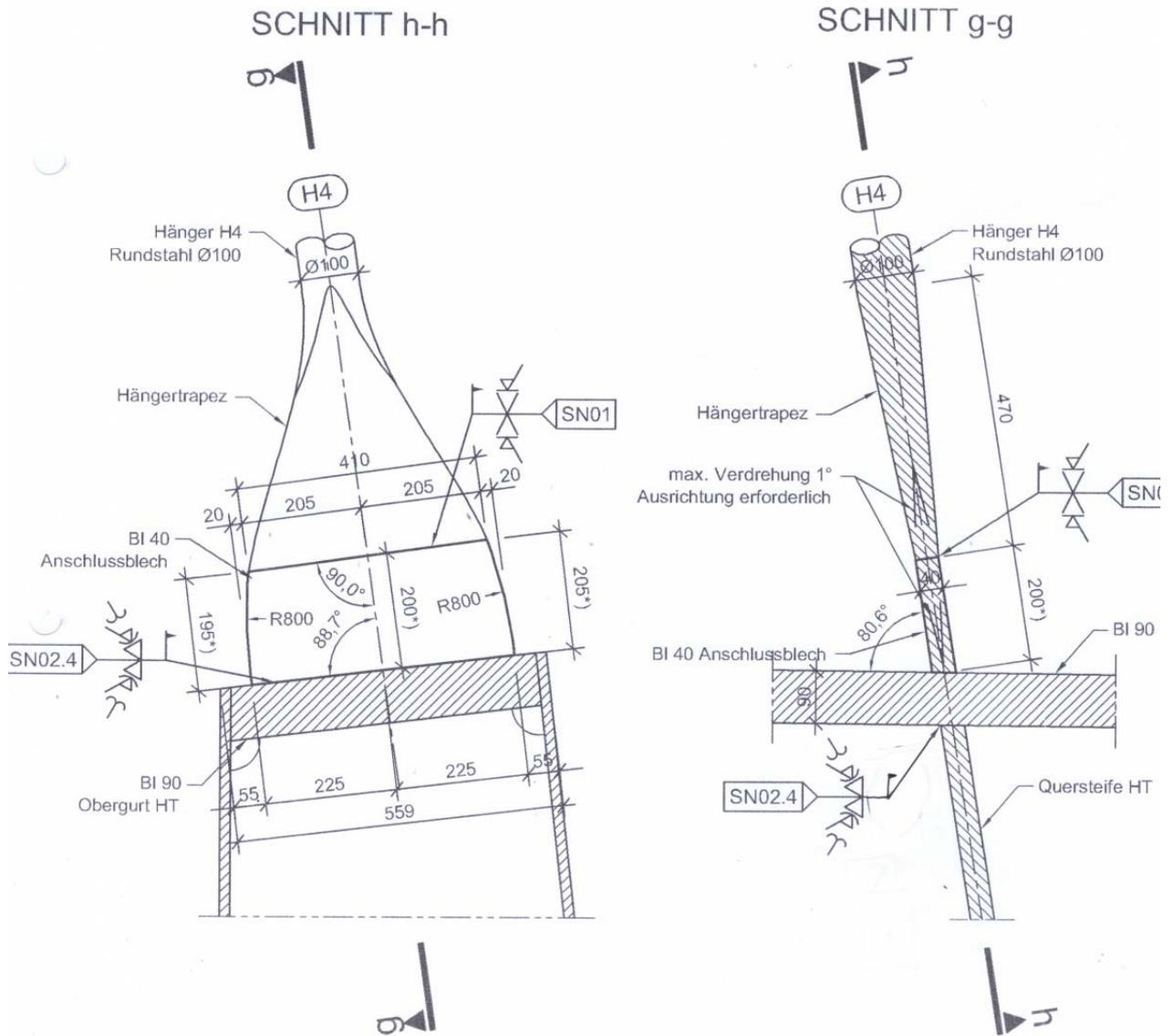
B10 Detail Hänger „H3“ und Anschluss an Versteifungsträger



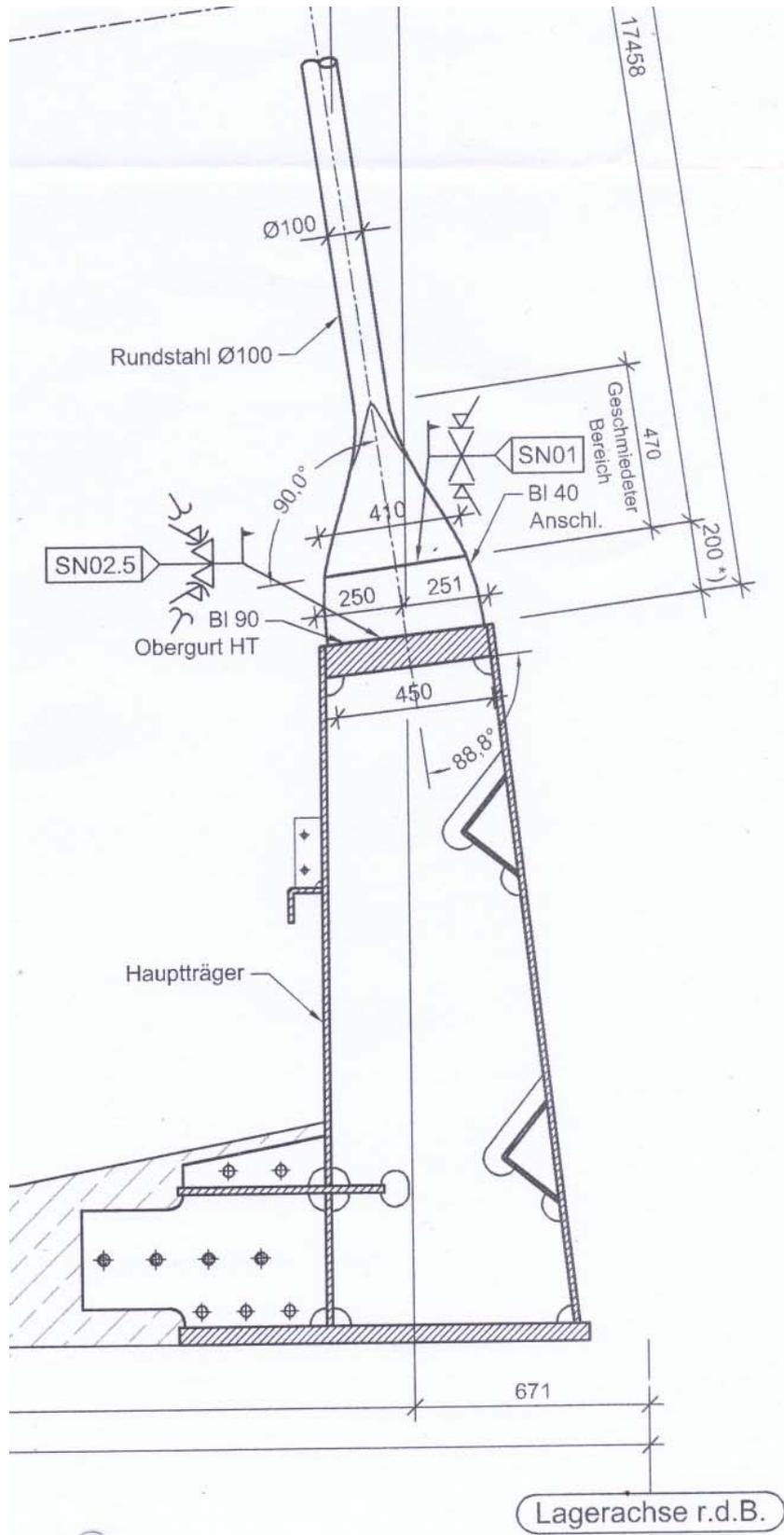
## B11 Detail Hänger „H4“ und Versteifungsträger



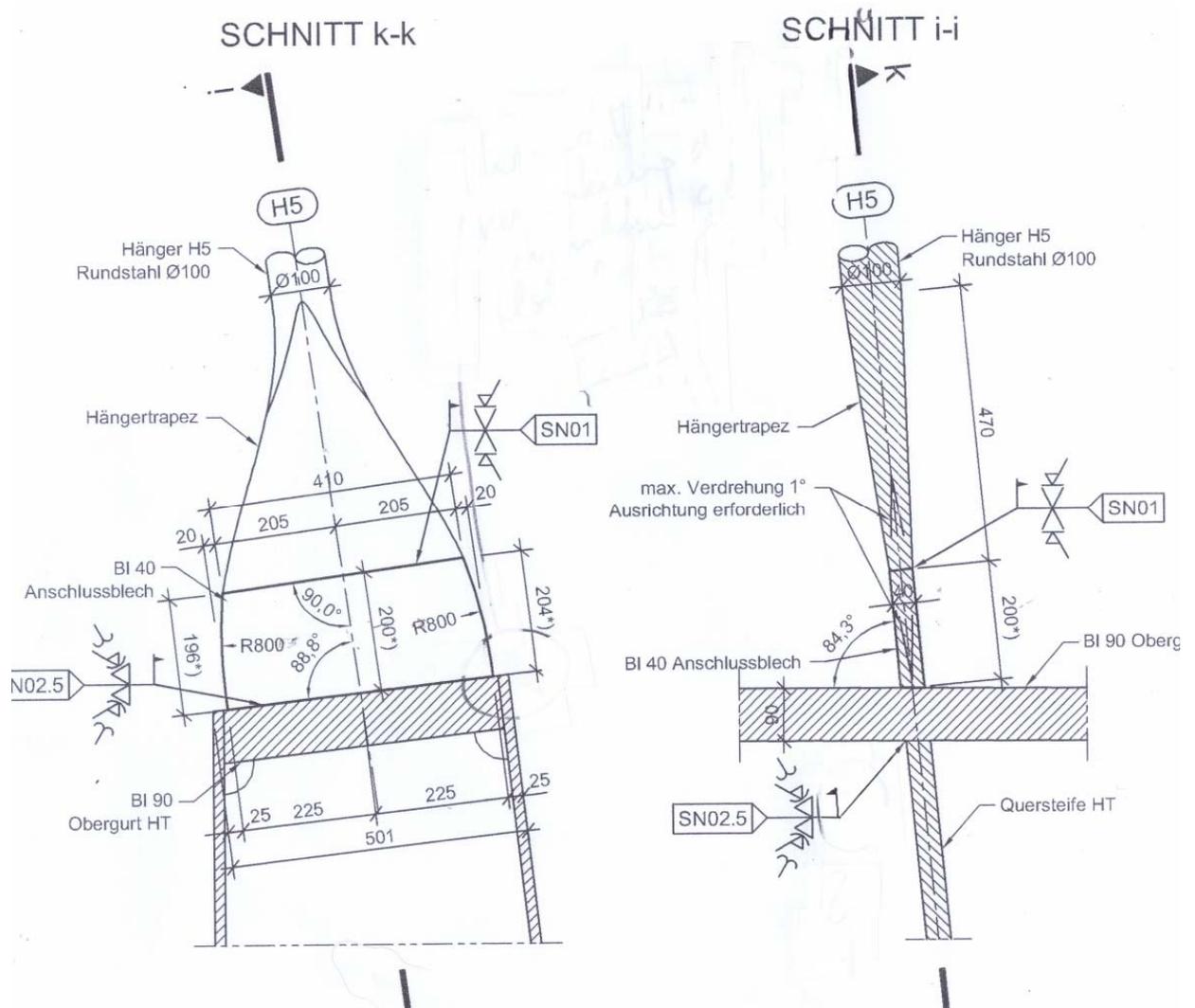
B12 Detail Hänger „H4“ und Anschluss an Versteifungsträger



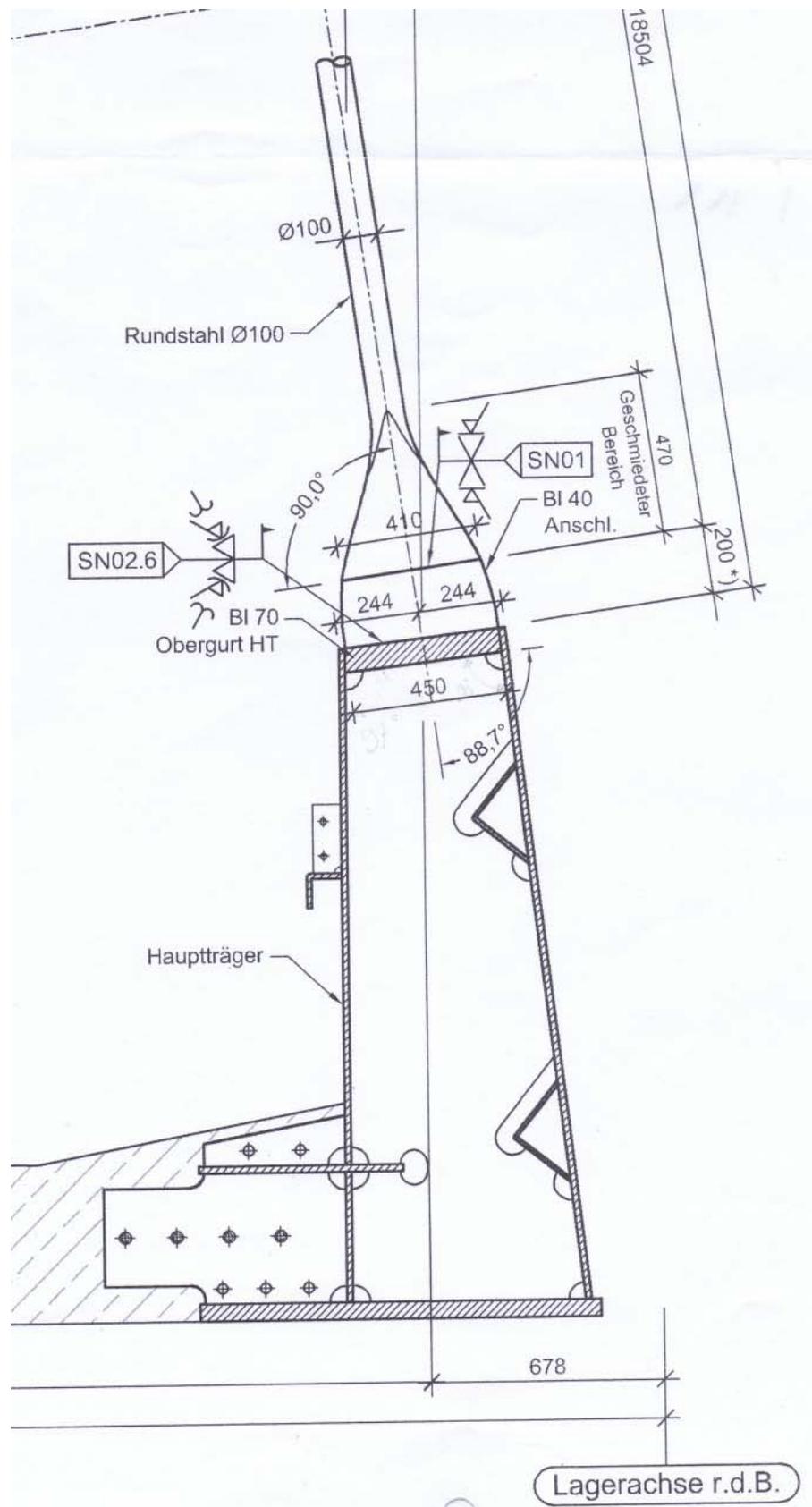
## B13 Detail Hänger „H5“ und Versteifungsträger



B14 Detail Hänger „H5“ und Anschluss an Versteifungsträger



## B15 Detail Hänger „H6“ und Versteifungsträger



B16 Detail Hänger „H6“ und Anschluss an Versteifungsträger

