



**MONTAN
UNIVERSITÄT**
WWW.UNILEOBEN.AC.AT

Montanuniversität Leoben
Department Product Engineering
Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau



**Prinzipielle Anwendung des Eurocodes
auf Komponenten einer ESU-Anlage**

Diplomarbeit

Christoph Hofbauer

Betreuer:

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Stoschka
(Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau)
Dipl. –Ing. Michael Breitler
(Inteco special melting technologies)

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Für die Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Stoschka von der Montanuniversität Leoben sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Breitler, dem Leiter der Abteilung für Mechanik / Sondermetallurgie, bei der Firma Inteco special melting technologies, sehr herzlichst bedanken.

Weiters möchte ich noch den Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Harald Holzgruber und Ing. Gerhard Reithofer von der Firma Inteco special melting technologies sowie Dipl.-Ing. Georg Fiedler vom Ingenieurbüro Fiedler GmbH meinen Dank aussprechen. Ohne sie wäre diese Diplomarbeit nicht zustande gekommen.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird anhand der Drehsäule des Ofenkopfes einer ESU-Anlage die Anwendung des Eurocode 3 aufgezeigt. Die grundlegenden Anforderungen des Eurocode 3 bauen auf den Eurocode 0 bzw. den Eurocode 1 auf, weshalb im Speziellen folgende Normenwerke für die Bemessung herangezogen wurden: DIN EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung, DIN EN 1991-1-1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, DIN EN 1991-3 – Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen infolge von Kranen, DIN EN 1993-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau, DIN EN 1993-1-5 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile sowie die DIN EN 1993-1-9 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Ermüdung.

Die höchstbelastete Stelle wurde mittels der Methode der finiten Elemente lokalisiert. Dieser Bereich wurde einem umfassenden analytischen Nachweis gemäß dem Eurocode unterzogen. Es wurden die Nachweisführungen mittels Grenzzuständen der Tragfähigkeit (Lagesicherheit, Beanspruchbarkeit von Querschnitten, Stabilitätsnachweis), Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (Verschiebungen) sowie der Ermüdungsnachweis erbracht, wobei die Beanspruchbarkeit von Querschnitten unter Berücksichtigung der Methode der reduzierten Spannungen erfolgt ist.

Abstract

This thesis illustrates how the Eurocode 3 principle is applied on the electrode column of an electrode arm in an ESR-plant. The general requirements of the Eurocode 3 are based on the Eurocode 0 and Eurocode 1, therefore the following standards are used: DIN EN 1990 – Basis of structural design, DIN EN 1991-1-1 – Actions on structures – General actions – Densities, self-weight, imposes loads for buildings, DIN EN 1991-3 – Actions on structures – Actions induced by cranes, DIN EN 1993-1-1 – General rules and rules for buildings, DIN EN 1993-1-5 – General rules – Plated structural elements, DIN EN 1993-1-9 – General rules – Fatigue.

The area with the highest load was localized by means of the finite element model. This area was then analytically assessed by the application of the Eurocode standards. The verification for the ultimate limit state (Static equilibrium, Cross-sectional resistance, Flexural buckling resistance), the serviceability limit state (displacements) as well as for fatigue were adduced. The verification of the cross-sectional resistance was designed with consideration of the reduced stress method.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	5
2	Aufgabenstellung	8
3	Lösungsansatz	9
4	Gliederung der Arbeit	10
5	ESU – Anlagen – Einführung	11
5.1	<i>Allgemeines</i>	11
5.2	<i>Prozessablauf</i>	11
5.3	<i>Aufbau einer ESU – Anlage (Xingtai)</i>	12
6	Einführung in den Eurocode	18
6.1	<i>EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung</i>	18
6.1.1	Anforderungen	18
6.1.1.1	Grundlegende Anforderungen	18
6.1.1.2	Behandlung der Zuverlässigkeit	18
6.1.1.3	Geplante Nutzungsdauer.....	19
6.1.1.4	Dauerhaftigkeit	19
6.1.2	Grundsätzliches zur Bemessung mit Grenzzuständen.....	19
6.1.2.1	Allgemeines.....	19
6.1.2.2	Bemessungssituation.....	19
6.1.2.3	Grenzzustände der Tragfähigkeit.....	19
6.1.2.4	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.....	20
6.1.2.5	Bemessung nach Grenzzuständen.....	20
6.1.3	Basisvariable	20
6.1.3.1	Einwirkungen.....	20
6.1.3.2	Eigenschaften von Baustoffen	20
6.1.3.3	Geometrische Angaben.....	20
6.1.4	Statische Berechnung	20
6.1.4.1	Statische Einwirkung	20
6.1.4.2	Dynamische Einwirkung.....	21
6.1.5	Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten.....	21
6.1.5.1	Allgemeines.....	21
6.1.5.2	Einschränkungen.....	21
6.1.5.3	Bemessungswerte	21
6.1.5.4	Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit.....	24
6.1.5.5	Nachweis für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.....	26
6.2	<i>EN 1991-1-1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Eigengewicht und Nutzlasten</i>	28
6.2.1	Einteilung der Einwirkungen.....	28
6.2.1.1	Eigengewicht	28
6.2.1.2	Nutzlasten	28
6.2.1.3	Außergewöhnliche Lasten	28
6.2.2	Bemessungssituationen	28
6.2.2.1	Allgemein	28
6.2.2.2	Eigengewicht	28
6.2.2.3	Nutzlasten	28
6.3	<i>EN 1991-3 – Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen infolge von Kranen</i>	29
6.3.1	Einwirkungen aus Hebezeugen und Kranen auf Kranbahnträger.....	29

6.3.1.1	Einteilung der Einwirkungen	29
6.3.1.2	Lastanordnungen.....	31
6.3.1.3	Vertikale Kranlasten – charakteristische Werte.....	33
6.3.1.4	Horizontale Kranlasten – charakteristische Werte.....	34
6.4	<i>EN 1993-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln</i>	40
6.4.1	Grundlagen für die Tragwerksplanung.....	40
6.4.1.1	Anforderungen.....	40
6.4.1.2	Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten.....	40
6.4.2	Werkstoffe.....	40
6.4.2.1	Allgemeines.....	40
6.4.2.2	Baustahl.....	40
6.4.3	Tragwerksberechnung.....	42
6.4.3.1	Statische Systeme.....	42
6.4.3.2	Untersuchung von Gesamttragwerken.....	42
6.4.3.3	Imperfektionen.....	43
6.4.3.4	Berechnungsmethoden.....	44
6.4.3.5	Klassifizierung von Querschnitten.....	45
6.4.4	Grenzzustände der Tragfähigkeit.....	48
6.4.4.1	Allgemeines.....	48
6.4.4.2	Beanspruchbarkeit von Querschnitten.....	49
6.4.4.3	Zugbeanspruchung.....	49
6.4.4.4	Druckbeanspruchung.....	50
6.4.4.5	Biegebeanspruchung.....	50
6.4.4.6	Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft.....	51
6.4.5	Stabilitätsnachweis.....	51
6.4.5.1	Gleichförmige Bauteile mit planmäßig zentrischem Druck.....	51
6.4.5.2	Gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse.....	55
6.4.5.3	Auf Biegung und Druck beanspruchte gleichförmige Bauteile.....	58
6.4.5.4	Allgemeines Verfahren für Knick- und Biegedrillknicknachweise für Bauteile.....	60
6.5	<i>EN1993-1-5 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile</i>	61
6.5.1	Grundlagen für die Tragwerksplanung und Verfahren.....	61
6.5.2	Methode der reduzierten Spannungen.....	61
6.6	<i>EN1993-1-9 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Ermüdung</i>	65
6.6.1	Bemessungskonzepte.....	65
6.6.2	Berechnung der Spannungsschwingbreiten.....	65
6.6.2.1	Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Nennspannungen.....	65
6.6.2.2	Bemessungswert der Spannungsschwingbreite korrigierter Nennspannungen.....	67
6.6.2.3	Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Strukturspannungen (Kerbspannungen).....	67
6.6.3	Ermüdungsfestigkeit.....	67
6.6.4	Ermüdungsnachweis.....	68
7	Anwendung des Eurocode	71
7.1	<i>Problembeschreibung</i>	71
7.1.1	Werkstoff.....	72
7.1.2	Einwirkungen.....	73
7.1.3	Abmessungen.....	73
7.2	<i>Lastfall 1</i>	75
7.2.1	Ermittlung der maßgebenden Kräfte.....	75
7.2.1.1	Elektrodenwagen.....	75
7.2.1.2	Haubenwagen.....	77
7.2.1.3	Säule.....	79
7.2.2	Tragwerksberechnung.....	81
7.2.2.1	Einfluss der Tragwerksverformung.....	81
7.2.2.2	Imperfektionen.....	81
7.2.2.3	Querschnitt.....	82
7.2.2.4	Spannungen im betrachteten Querschnitt.....	84
7.2.2.5	Methode der reduzierten Spannungen.....	88
7.2.2.6	Grenzzustände der Tragfähigkeit.....	96

7.2.2.7	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	105
7.2.2.8	Ermüdungsnachweis am betrachteten Querschnitt	110
7.3	<i>Lastfall 2</i>	114
7.3.1	Ermittlung der maßgebenden Kräfte	114
7.3.1.1	Elektrodenwagen	114
7.3.1.2	Haubenwagen	118
7.3.1.3	Säule	122
7.3.2	Tragwerksberechnung	124
7.3.2.1	Einfluss der Tragwerksverformung	124
7.3.2.2	Imperfektionen.....	124
7.3.2.3	Querschnitt.....	125
7.3.2.4	Spannungen im betrachteten Querschnitt:	125
7.3.2.5	Methode der reduzierten Spannungen	130
7.3.2.6	Grenzzustände der Tragfähigkeit	136
7.3.2.7	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	146
7.3.2.8	Ermüdungsnachweis am betrachteten Querschnitt	151
8	Zusammenfassung.....	158
9	Anhang	159
9.1	<i>Literaturverzeichnis</i>	159
9.2	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	162
9.3	<i>Tabellenverzeichnis</i>	163
9.4	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	164

2 Aufgabenstellung

Durch die Einbindung des Eurocode in das nationale Normenwerk kommt es zu einer mehrjährigen (5-jährigen) Übergangsfrist, in welcher sowohl die nationalen Normen als auch der Eurocode seine Gültigkeit haben, auch wenn sich diese in gewissen Bereichen widersprechen.

Mit Ablauf dieser Übergangsfrist tritt jedoch der Eurocode voll in Kraft und löst somit alle anderen nationalen Normen, welche sich vom Eurocode unterscheiden, ab.

Jene Bauwerke, welche bis zum Ablauf dieser Übergangsfrist hin noch nach der veralteten Normschrift DIN 18800 ausgelegt wurden, behalten ihre Gültigkeit, wogegen alle neuen Bauwerke und Anlagen nach den Gesetzmäßigkeiten des Eurocode ausgelegt werden müssen.

In Österreich wird der Eurocode seit dem 30. Juni 2009 anerkannt und in vollem Ausmaß akzeptiert, wodurch im Rahmen dieser Diplomarbeit für die Firma *Inteco special melting technologies* die prinzipielle Anwendung des Eurocode (Eurocode 3) ausgearbeitet wird.

Im Zuge dieser Arbeit ist für eine ESU-Anlage, im Speziellen für den Ofenkopf der Anlage, nachzuweisen ob das Bauteil den Anforderungen der Richtlinien des Eurocode (Eurocode 3) gerecht wird. Dabei sollen die gängigen Normschriften des Eurocodes studiert, ausgearbeitet sowie anhand eines Beispiels aus der Industrie gezeigt werden, wie der Eurocode anzuwenden ist.

Weiters sollen die analytisch gewonnen Ergebnisse mittels einer Finite-Elemente-Analyse verglichen und ausgewertet werden.

3 Lösungsansatz

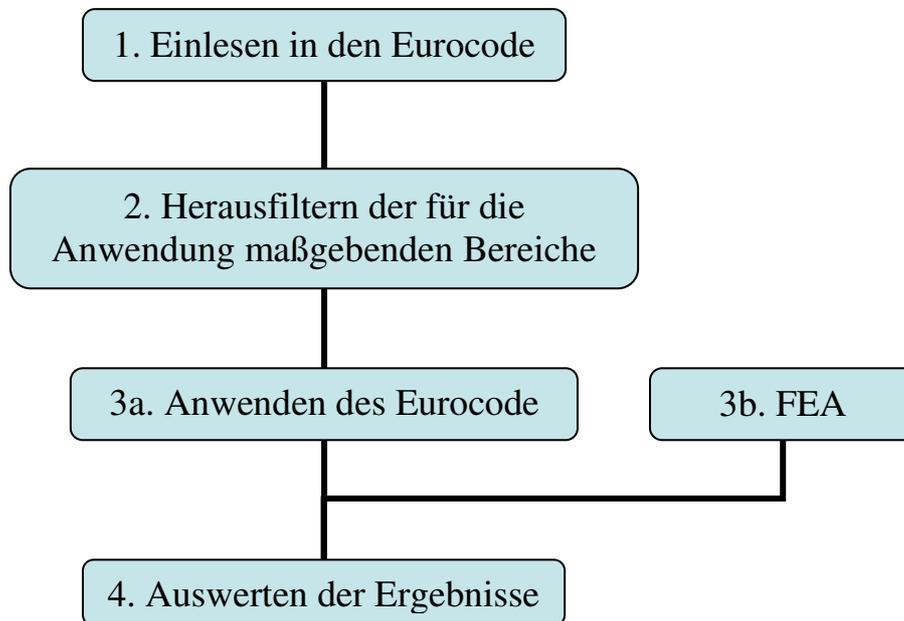


Abbildung 3-1: Abfolge der Tätigkeiten

Zu Beginn dieser Arbeit soll zunächst ein grober Überblick über den gesamten Eurocode gegeben werden. Im weiteren Verlauf sind jene Kapitel zu studieren und auszuarbeiten, welche für die praktische Anwendung im Bereich von ESU-Anlagen benötigt werden.

Die erarbeiteten Kenntnisse sind auf den Ofenkopf der ESU-Anlage umzulegen, wobei darauf zu achten ist, dass folgende Kriterien, welche für die Bemessung der kritischen Bereiche im Bauwerk wie:

- Beanspruchbarkeit von Querschnitten,
- Auftretende Verschiebungen,
- Knicken, Biegedrillknicken,
- Beulen

sowie

- Ermüdung

berücksichtigt werden.

Durch Zuhilfenahme einer Finite-Elemente-Analyse können die analytisch gewonnen Ergebnisse verglichen werden.

4 Gliederung der Arbeit

Eine Einführung in ESU-Anlagen wird in Kapitel 5 gegeben. Das Funktionsprinzip sowie der Aufbau einer Anlage nach dem heutigen Stand der Technik werden dargestellt.

In Kapitel 6 wurden jene normativen Teile des Eurocodes angewendet, welche für die prinzipielle Bemessung notwendig sind. Dazu gehören die DIN EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung, DIN EN 1991-1-1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, DIN EN 1991-3 – Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen infolge von Kranen, DIN EN 1993-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau, DIN EN 1993-1-5 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile sowie die DIN EN 1993-1-9 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Ermüdung.

Kapitel 7 umfasst die Anwendung des Eurocode auf den Ofenkopf einer ESU-Anlage. Dabei wurde zwischen zwei Lastfällen (Betriebszustände) unterschieden. Der Lastfall Nr. 1 beschreibt eine statische Einwirkung auf den Ofenkopf, wogegen der Lastfall Nr. 2 eine dynamische Einwirkung darstellt. Der Berechnungsablauf für die beiden Lastfälle verläuft ähnlich, jedoch kommen im Lastfall Nr. 2 die Einwirkungen infolge von bewegten Lasten zur Geltung, welche in Form der Berechnung von Kranen nach DIN EN 1991-3 abläuft.

Der umfassende Berechnungsablauf ist wie folgt gegliedert:

- Ermittlung der Kräfte aufs System (infolge der Einwirkungen)
- Ermittlung der auftretenden Spannungen im betrachteten Querschnitt
- Ermittlung der Grenzzustände der Tragfähigkeit (Lagesicherheit, Beanspruchbarkeit von Querschnitten und Stabilitätsnachweis)
- Ermittlung der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (Verschiebungen)
- Ermüdungsnachweis

5 ESU – Anlagen – Einführung

5.1 Allgemeines

Der Elektro-Schlacke-Umschmelzprozess (ESU-Prozess) wurde zur Herstellung von hochgradigem Stahl im Jahre 1958 in der ehemaligen Sowjetunion entwickelt und eingeführt. In den sechziger Jahren wurden in Österreich und Großbritannien unabhängige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt. Zeitgleich wurden in West-Europa und den USA die ersten ESU-Anlagen in Betrieb genommen.

5.2 Prozessablauf

Während des ESU-Prozesses wird ein Block durch Abschmelzen einer verzehrbaren Stahlelektrode in einer den Metallspiegel abdeckenden Schlacke der in einer wassergekühlten Kokille oder einem Tiegel kontrolliert und gesteuert aufgebaut.

Die für den Abschmelzprozess notwendige Energie wird durch den Stromdurchgang durch die flüssige Schlacke, die als elektrischer-ohmscher Widerstand wirkt, erzeugt.

Durch die Wahl von geeigneten Schmelzparametern (Stromstärke, Spannung, Schmelzrate-Leistung, Eintauchtiefe, ...) kann die Ausbildung des flüssigen Metallsumpfes so beeinflusst werden, dass man einen homogenen und seigerungsfreien, dichten Block erhält.

Die flüssigen Metalltropfen, die an der Elektrodenspitze gebildet werden, passieren die flüssige und metallurgisch aktive Schlacke wodurch hervorragende Bedingungen für Metall-Schlacke-Reaktionen, wie den Abbau von Schwefel oder Sauerstoff bestehen.

Durch den Einsatz einer geeigneten Schutzgashaube kann weiters die Aufnahme von Wasserstoff sowie die Zunderbildung an der Elektrodenspitze vermieden werden, was zu bestem Reinheitsgrad führt.

Weiters können Qualitäten mit hohen Ti-Gehalten oder niedrigsten Al- und Si-Werten ohne größere Schwierigkeiten reproduzierbar erzeugt werden.

Blöcke werden heute im Standtiegel aus einer Elektrode und auch mittels Elektrodenwechseltechnik im Gleittiegelverfahren erschmolzen.

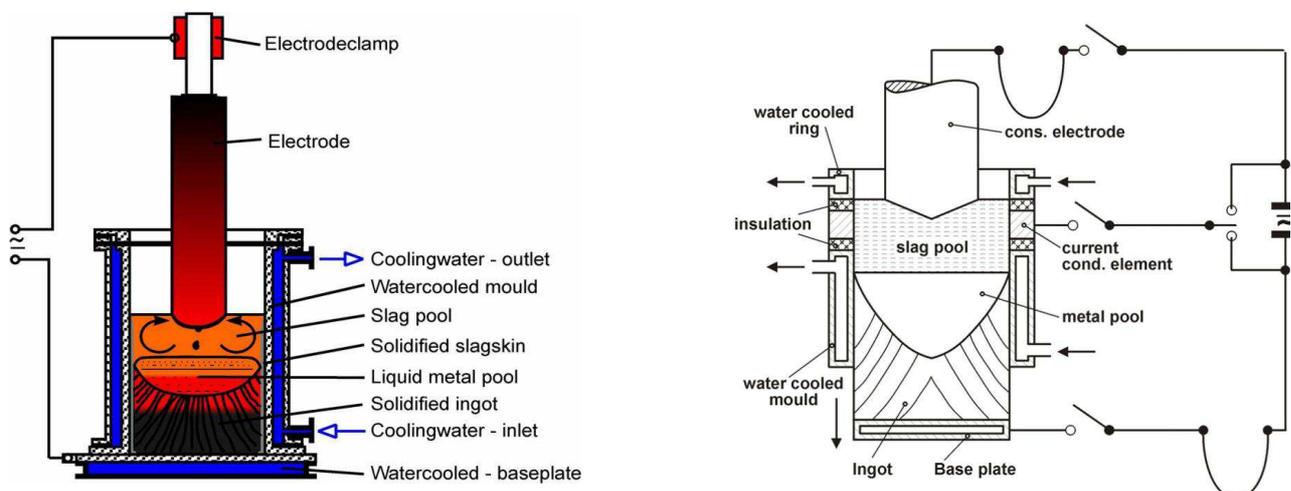


Abbildung 5-1: Prinzipielle Funktionsweise einer ESU-Anlage [9]

Vorteile eines ESU-Blockes gegenüber eines konventionell gegossenen Stahl-Blockes:

- Dichte Struktur ohne Lunker oder Porosität
- Höherer Reinheitsgrad (weniger und kleinere Einschlüsse)
- Homogene Zusammensetzung über die gesamte Blocklänge
- Höherer Ertrag an umgeschmolzenen Material
- Allgemeine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften
- Gleichmäßige Oberfläche (i.a. keine Oberflächenbearbeitung für die weitere Verarbeitung notwendig)
- Kontrollierte Verfestigung (verbesserte Makro- und Mikrostrukturen)
- Durch das Schlackenbad wird das umgeschmolzene Material vor Oxidation geschützt

5.3 Aufbau einer ESU – Anlage (Xingtai)

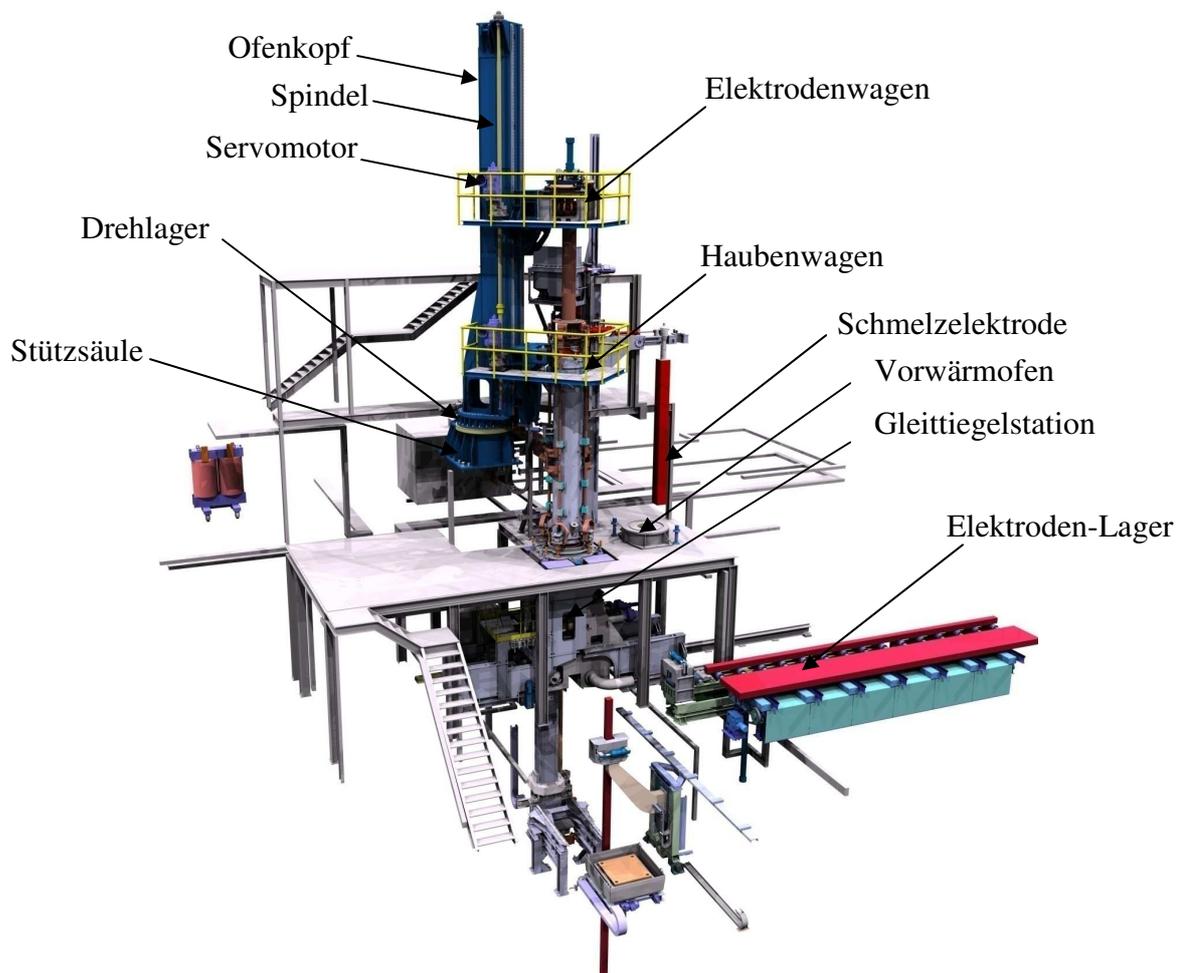


Abbildung 5-2: Darstellung der Gesamtanlage Xingtai [8]

Die vorliegende ESU-Anlage ist im Wesentlichen durch Folgendes gekennzeichnet:

1) Technologie

Die Inteco ESR/ESRR-Anlage ist eine Schutzgas (Inertgas) ESR/ESRR-Anlage und besteht aus zwei zu betreibenden Anlagen (ESR-ESRR), welche im Wesentlichen aus einem Ofenkopf (Abbildung 5-2) mit Schmelzstromversorgung, Mediensystemen und individueller Steuerung an einem Schmelzstand eingesetzt werden kann.

2) ESU-Anlage

Die ESR/ESRR-Anlage arbeitet mit dem Ofenkopf auf der Schmelzstation (Gleittiegel).

Weiters kann mit dem Ofenkopf durch Austausch der Schmelzstation (T-Kokille) umgeschmolzen werden.

3) Schmelzstände

Die Schmelzstation ESR ist ein Schmelzstand mit einer Gleitkokille (Abbildung 5-5) mit einem Abzugstisch und durch Austausch der Station durch eine T-Kokille (Abbildung 5-6) auch eine ESRR Anlage. Die Station ist für die Produktion von ESR/ESRR-Blöcken mittels Elektrodenwechseltechnologie gebaut.

4) Ofenkopf

Der Ofenkopf der ESR/ESRR-Anlage ist in Säulenbauweise konstruiert.

Die Bewegung des Ofenkopfes (Säule) zu den einzelnen Stationen erfolgt durch das Schwenken der Säulen zu den einzelnen Positionen.

5) Elektroden- und Haubenwagen

Der Ofenkopf ist mit einem Elektrodenwagen (Abbildung 5-3) ausgerüstet, der aus einem Rahmen mit Arm, der X-Y-Verstellung mit Wiegezellen und einer Elektrodenstange mit Elektrodenklemme besteht.

Die X-Y-Verstellung (Abbildung 5-3) hat die Aufgabe die Elektrode während des Schmelzvorganges im Tiegel in horizontaler Richtung zu zentrieren, damit in jedem Betriebszustand ein optimales Schmelzen möglich ist. Die Elektrodenstange hingegen ist für den Stromübergang von Gleitkontakt auf die Elektrode verantwortlich.

Der Elektrodenwagen ist auf der Drehsäule (Abbildung 5-2) montiert, die auch den Haubenwagen (Abbildung 5-4) mit der Schutzgashaube, der koaxialen Stromführung, den Gleitkontakt und die Hochstromklemme trägt.

Der Antrieb des Elektrodenwagens wird durch mit einem Servo-Motor (Abbildung 5-2) betriebenen Spindeltrieb realisiert.

Der Haubenwagen wird ebenfalls wie der Elektrodenwagen mittels Servo-Motor angetrieben.

Die Drehsäule ist mittels Drehlager mit der Säule verbunden.

Die Stützsäule ist am Fundament verankert.

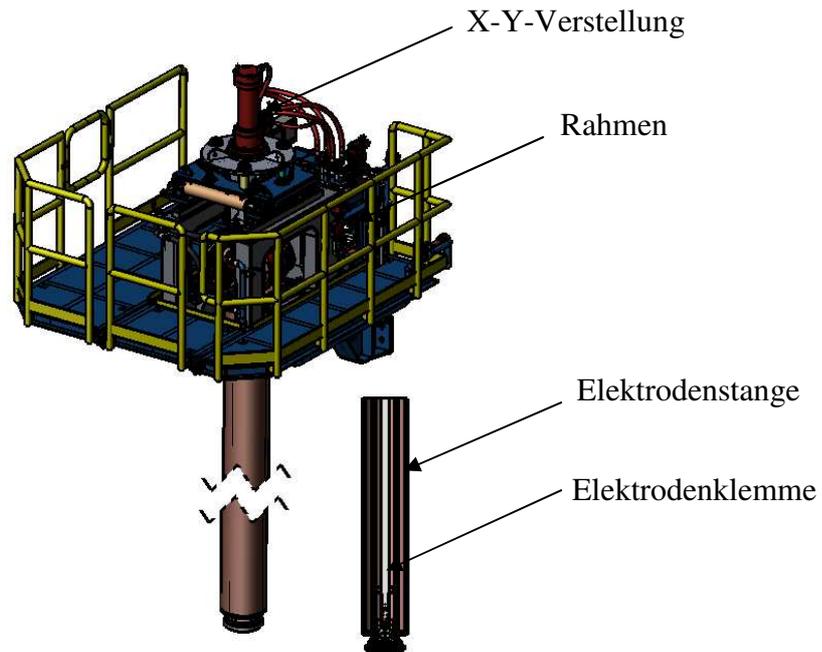


Abbildung 5-3: Elektrodenwagen (Elektrodenstange in Schnittdarstellung)

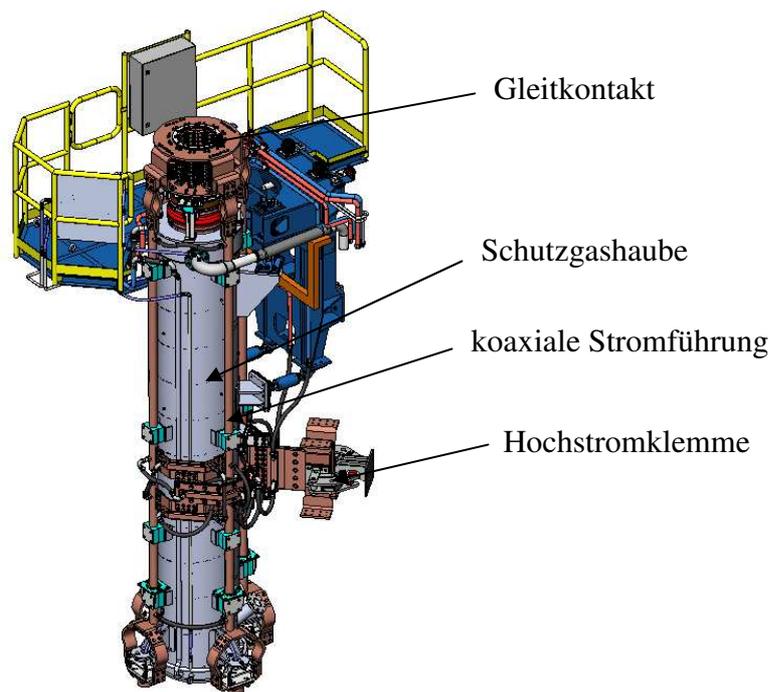


Abbildung 5-4: Haubenwagen

6) Gleit- und Stand-Tiegelstation

In der Gleittiegelstation (ESR) ist die Kupfer-Bodenplatte auf dem verfahrbaren Blockwagen montiert, der das Verfahren und das einfache Herausheben des Blocks mit der Blockzange und dem Kran ermöglicht. Wogegen bei der Standtiegelstation (ESRR) die Kupfer-Bodenplatte direkt in der T-Kokille verbaut ist.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Stationen besteht darin, dass bei der Gleittiegelstation während des Schmelzvorganges der Schmelzbadspiegel auf konstantem Level bleibt, wobei er sich beim Standtiegel mit abschmelzender Elektrode anhebt.

Weiters ist beim Schmelzen mittels Standtiegel die umgeschmolzene Blockgröße durch die Tiegelbauhöhe begrenzt. Im Gleittiegelverfahren wird der Block über den Blockwagen durch die Tiegelstation hindurch aufgebaut und kann in weiterer Folge mit der Blockzange von unten abgeführt werden. Die Blockgröße wird durch den Hub des Blockwagens begrenzt.

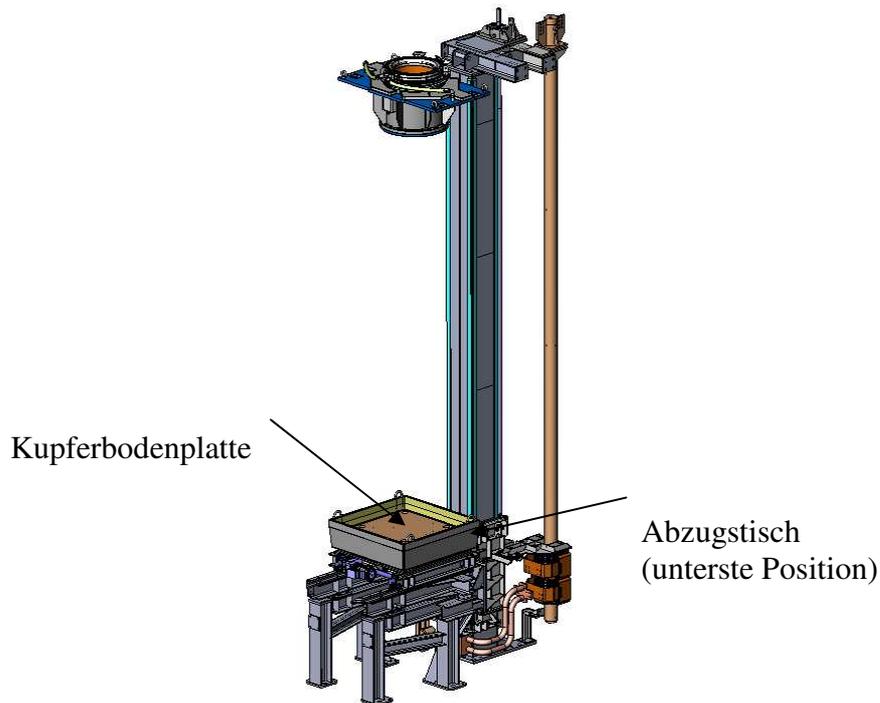


Abbildung 5-5: Gleittiegelstation

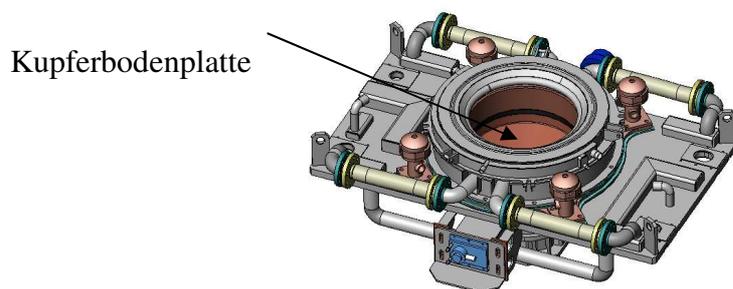


Abbildung 5-6: Standtiegelstation (T-Kokille)

7) Kontrollsystem

Das gesamte System des Anlagenkopfes einschließlich der Medienzuleitung ist so ausgelegt, dass der unabhängige Betrieb des Anlagenkopfes in der Schmelzstation gewährleistet ist.

Das Kontrollsystem und alle untergeordneten Systeme ermöglichen einen unabhängigen Betrieb des Anlagenkopfes in der Schmelzstation.

8) Stromversorgung

Die ESR/ESRR-Anlage ist mit einphasigen Transformatoren ausgestattet. Diese sind stufenlos unter Last verstellbar. Um einen Leistungsfaktor von $> 0,9$ zu erreichen ist die Stromversorgung mit einer Kompensation ausgestattet.

Die Hochstromverbindung zu den einzelnen Transformatoren wird über eine hydraulisch betätigte Klemme (Abbildung 5-4) realisiert, die den entsprechenden Ofenkopf, wenn sich dieser an seiner Schmelzstation befindet, verbindet.

Das bedeutet, dass die komplette ESR/ESRR-Anlage nicht mit der Stromversorgung verbunden ist, wenn sich der Ofenkopf nicht auf einer Schmelzstation befindet.

Diese Maßnahme dient unter anderem auch zur Erhöhung der Sicherheit bei Instandhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten.

Die Hochstromversorgung vom Transformator zur Elektrode besteht aus wassergekühlten Kupferschienen in voll koaxialer Ausführung.

Diese Kupferschienen werden mit einer Hochstromklemme zum jeweiligen Ofenkopf verbunden.

Von dort fließt der Strom über den Gleitkontakt (Abbildung 5-4) zur äußeren und weiter zur inneren Elektrodenstange bis hin zur Elektrodenklemme.

Der Stromfluss geht weiter über den Stub, die Elektroden spitze in die Schlacke und über den Block in die Kupferbodenplatte (Abbildung 5-5/5-6).

Mit einem zentralen Stromtransport von der Klemme zu vier Gleitkontakten (nur bei der Gleittiegelstation), zu vier parallel zur Blockachse verlaufenden Stromrohren, weiter zum Ofenoberteil und mit verschiedenen wassergekühlten Kupferelementen zum Transformator schließt sich die Hochstromschleife.

Diese so kurz als mögliche Ausführung der Hochstromschleife mit 100 %ig koaxialen Design, garantiert minimale Magnetfelder und minimierte elektrische Verluste, die wiederum einen niedrigen spezifischen Energieverbrauch beim Umschmelzen zur Folge haben.

9) Emissionen

Der Elektro-Schlacke-Umschmelzprozess ist im Allgemeinen ein sehr ruhiger Prozess.

Durch den Einsatz einer Schutzgashaube ist der gesamte Raum oberhalb der flüssigen Schlacke abgedeckt und dadurch werden die Lärm- und Staubemissionen im Anlagenumfeld stark reduziert.

10) Emissionsabsaugung / Staubemissionen

Die Emissionen (Abgase) des Umschmelzprozesses enthalten Staub und Fluorverbindungen die abgesaugt werden müssen.

Alle produzierten Emissionen der Anlagen werden von einer zentralen Absaugung zusammengefasst.

11) Lärmemission

Anlagenkomponenten mit einer Lärmentwicklung > 75 dBA sind entweder eingehaust oder in separaten Räumen installiert, z.B. Kühlwasserpumpen, Hydraulik, Stromversorgung, etc.

Im Allgemeinen wird während des Betriebes ein durchschnittlicher Lärmpegel von ~ 65 dBA auftreten.

6 Einführung in den Eurocode

In diesem Abschnitt werden kurz jene Kapitel des Eurocodes erläutert, welche für die grundlegende Anwendung von Stahlkonstruktionen im Bereich des Anlagenbaus von ESU-Anlagen benötigt werden. Im Kapitel 7 - Anwendung - findet sich ein Berechnungsbeispiel an welchem dies noch verdeutlicht wird.

Für die Bemessung der Stahlsäule der ESU-Anlage Xingtai (Berechnungsbeispiel im Anhang) wurden folgende Eurocodes herangezogen:

- EN 1990 [1]
- EN 1991-1-1 [2]
- EN 1991-3 [3]
- EN 1993-1-1 [4]
- EN 1993-1-5 [5]
- EN 1993-1-9 [6]

Alle Begriffsdefinitionen sowie Symbole und Formelzeichen wurden aus dem aktuellen Eurocode (Auflage Dezember 2010) übernommen.

6.1 EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung

Grundlegend für die Tragwerksplanung ist die Bemessung auf zulässige Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit sowie Dauerhaftigkeit. Dabei muss für die Bemessung ein sogenannter Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt werden, damit die Bemessung einer Anlage stets auf der sicheren Seite liegt.

Für die Auslegung und die Berechnung von Bauteilen ist die EN 1990 in direkter Verbindung mit den EN 1991 bis EN 1999 anzuwenden.

6.1.1 Anforderungen

6.1.1.1 Grundlegende Anforderungen

Für die Bemessung der Anlage (Säule) ist zu beachten, dass eine ausreichende Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie Dauerhaftigkeit über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet ist.

Es ist ebenfalls darauf zu achten, dass es durch Einwirkungen wie z.B. Anprall mittels Kran bzw. durch menschliches Versagen zu keinen Schadensfolgen kommt, welche die Gebrauchstauglichkeit der Anlage beeinflussen.

Weiters sollten Bauelemente vermieden werden, die einen plötzlichen Funktionsausfall zur Folge haben könnten.

6.1.1.2 Behandlung der Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks ist dann gegeben, wenn die anzuwendenden Eurocodes (EN 1990 bis EN 1999), für den Entwurf und die Berechnung sowie für geeignete Ausführungs- und Qualitätsmanagementmaßnahmen herangezogen werden.

Als Zuverlässigkeitsniveau kommen entweder die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit einer Baugruppe in Frage.

6.1.1.3 Geplante Nutzungsdauer

Die geplante Nutzungsdauer ist aus der unten angeführten Tabelle (Tabelle 6-1) zu entnehmen.

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit ^a
2	10–25	Austauschbare Tragwerksteile, z. B. Kranbahnträger, Lager
3	15–30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

^a ANMERKUNG Tragwerke oder Teile eines Tragwerks, die mit der Absicht der Wiederverwendung demontiert werden können, sollten nicht als Tragwerke mit befristeter Standzeit betrachtet werden.

Tabelle 6-1: Klassifizierung der Nutzungsdauer; Tabelle 2.1 aus [1]

6.1.1.4 Dauerhaftigkeit

Während der gesamten Nutzungsdauer einer Anlage darf sich keine Veränderung in ihrem Arbeitsverhalten ergeben. Dies gilt sowohl während der Einwirkung einer statischen bzw. quasistatischen sowie für die Einwirkung einer dynamischen bzw. zeitlich veränderlichen Last.

6.1.2 Grundsätzliches zur Bemessung mit Grenzzuständen

6.1.2.1 Allgemeines

Es ist der Nachweis der Grenzzustände zu erfüllen (Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit). Dabei sind die auftretenden Belastungen in ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Belastungen einzuteilen.

6.1.2.2 Bemessungssituation

Die Bemessungssituationen müssen für jeden Anwendungsfall der Anlage berücksichtigt und mit hinreichender Genauigkeit erfasst werden. Es müssen die so genannten Lastfälle definiert werden. Dabei sind folgende Bemessungssituationen zu unterscheiden:

- ständige Situation (übliche Nutzungsbedingung)
- vorübergehende Situation (zeitlich begrenzte Zustände)
- außergewöhnliche Situationen (z.B. Anprall eines Kranes)
- (Erdbeben)

6.1.2.3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

Die Sicherheit von Personen und des Tragwerks müssen gewährleistet sein. Nachzuweisende Grenzzustände:

- Verlust der Lagesicherheit (EQU)
- Versagen durch übermäßige Verformung (STR)
- Versagen durch Materialermüdung (FAT)

6.1.2.4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Die Funktion des Bauwerks sowie sein äußeres Erscheinungsbild (keine zu großen Durchbiegungen oder ungewollte Rissbildungen) sollte nach diesem Kriterium aufrecht erhalten werden.

Nachzuweisende Grenzzustände:

- Verformungen / Verschiebungen (Erscheinungsbild)
- Schwingungen (Funktion)
- Schäden (Rissbildung, ...)

6.1.2.5 Bemessung nach Grenzzuständen

Grenzzustände dürfen nicht überschritten werden und es müssen alle kritischen Lastfälle im Vorhinein ausreichend definiert worden sein.

Bei den Lastmodellen können entweder wirkliche physikalische Modelle oder virtuelle mathematische Modelle herangezogen werden.

6.1.3 Basisvariable

6.1.3.1 Einwirkungen

Repräsentative Werte für Einwirkungen:

- ständige Einwirkung (z.B. Eigengewicht)
- veränderliche Einwirkung (z.B. Elektrodengewicht)
- außergewöhnliche Einwirkung (z.B. Anprall eines Kranes)

Auf die einzelnen Einwirkungen wird im Kapitel 6.2 bzw. 6.3 näher eingegangen.

6.1.3.2 Eigenschaften von Baustoffen

Die bauteilspezifischen Eigenschaften, wie z.B. Zugfestigkeit oder Fließgrenze, werden anhand von genormten Prüfverfahren an genormten Proben ermittelt. Um jedoch die tatsächlichen Bauteileigenschaften zu erhalten, müssen gegebenenfalls die an der Probe ermittelten Werkstoffeigenschaften mit sogenannten Übertragungsbeiwerten (Größenfaktoren, Temperaturfaktor, Oberflächenfaktor, ...) an jene Eigenschaften des Bauteils angeglichen werden.

6.1.3.3 Geometrische Angaben

Es dürfen die geometrischen Daten direkt aus dem Engineering übernommen werden.

6.1.4 Statische Berechnung

6.1.4.1 Statische Einwirkung

Es ist das Lastverformungsverhalten der Anlage zu berücksichtigen, wobei die Randbedingungen sehr genau definiert werden müssen.

Grundsätzlich ist die Bemessung nach der Theorie I. Ordnung zu führen. Die Theorie II. Ordnung ist nur dann zu berücksichtigen, wenn die Verformungen einen erheblichen Einfluss auf die Schnittgrößen zeigen.

6.1.4.2 Dynamische Einwirkung

Es sind alle Massen, Tragfähigkeiten, Steifigkeiten sowie Dämpfungseigenschaften der Anlage zu berücksichtigen.

Bei quasi-statischer Einwirkung sind die dynamischen Anteile entweder im quasi-statischen Anteil enthalten oder über zusätzliche Schwingbeiwerte (Teilsicherheitsbeiwerte) in der statischen Einwirkung zu berücksichtigen.

6.1.5 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten

6.1.5.1 Allgemeines

Mit diesem Nachweisverfahren ist nachzuweisen, dass die Grenzzustände, welche durch die Bemessungssituationen auftreten, nicht überschritten werden.

6.1.5.2 Einschränkungen

Diese Anwendung nach EN 1990 gilt ausschließlich für Tragfähigkeits- bzw. Gebrauchstauglichkeitsnachweise mit statischer Belastung, dies inkludiert sowohl quasi-statische Lasten als auch statische Lasten mit Schwingbeiwerten. Ermüdungsnachweise bzw. nichtlineare Berechnungen sind nach EN 1993-1-9 zu bemessen.

6.1.5.3 Bemessungswerte

6.1.5.3.1 Bemessungswerte für Einwirkungen

Für eine Einwirkung F ist der Bemessungswert F_d :

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (Gl.1)$$

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k \quad (Gl.2)$$

F_k	charakteristischer Wert der Einwirkung
F_{rep}	maßgebender repräsentativer Wert der Einwirkung
γ_f	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen; berücksichtigt ungünstige Größenabweichungen
ψ	Kombinationsbeiwert; 1,00 oder ψ_0 , ψ_1 oder ψ_2 ; nach DIN EN 1990 / Tabelle A.1.1

Tabelle 6-2: Empfehlungen zu Kombinationsbeiwerten; Tabelle A.1.1 aus [1]

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-1)			
Kategorie A: Wohngebäude	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: Bürogebäude	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: Versammlungsbereiche	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: Verkaufsflächen	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: Lagerflächen	1,0	0,9	0,8
Fahrzeugverkehr im Hochbau Kategorie F: Fahrzeuggewicht $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Kategorie G: 30kN < Fahrzeuggewicht $\leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Kategorie H : Dächer	0	0	0
Schneelasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-3) ^a			
— Finnland, Island, Norwegen, Schweden	0,7	0,5	0,2
— Für Orte in CEN-Mitgliedsstaaten mit einer Höhe über 1000 m ü. NN	0,7	0,5	0,2
— Für Orte in CEN-Mitgliedsstaaten mit einer Höhe niedriger als 1000 m ü. NN	0,5	0,2	0
Windlasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperaturanwendungen (ohne Brand) im Hochbau, siehe EN 1991-1-5	0,6	0,5	0
ANMERKUNG Die Festlegung der Kombinationsbeiwerte erfolgt im Nationalen Anhang.			
^a Bei nicht ausdrücklich genannten Ländern sollten die maßgebenden örtlichen Bedingungen betrachtet werden.			

6.1.5.3.2 Bemessungswerte für die Auswirkungen von Einwirkungen

Allgemeine Darstellung der Auswirkungen E_d von Einwirkungen:

$$E_d = \gamma_{Sd} E \{ \gamma_{f,i} F_{rep,i} ; a_d \} \quad i \geq 1 \quad (Gl.3)$$

a_d Bemessungswert der geometrischen Größe (siehe 6.1.5.3.4)

γ_{Sd} Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Vereinfachung:

$$E_d = E \{ \gamma_{F,i} F_{rep,i} ; a_d \} \quad i \geq 1 \quad (Gl.4)$$

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{Sd} \gamma_{f,i} \quad (Gl.5)$$

$\gamma_{F,i}$ gesamter Teilsicherheitsfaktor; nach Tabelle 6-3, Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5

6.1.5.3.3 Bemessung für Eigenschaften von Bauteilen

Die Bemessung von Bauteileigenschaften wird mit dem Bemessungswert X_d berücksichtigt:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (Gl.6)$$

X_k	charakteristischer Wert einer Bauteileigenschaft
η	Umrechnungsfaktor zwischen Probeneigenschaft und Bauteileigenschaft
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert für die Bauteileigenschaft

6.1.5.3.4 Bemessung geometrischer Größen

Die Bemessungswerte von geometrischen Größen (Abmessungen der Bauteile), dürfen aus dem Engineering übernommen werden:

$$a_d = a_{\text{nom}} \quad (\text{Gl.7})$$

Unter Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung:

$$a_d = a_{\text{nom}} \pm \Delta_a \quad (\text{Gl.8})$$

a_{nom}	Abmaße aus dem Engineering
Δ_a	ungünstige Abweichungen vom charakteristischen Wert oder Nennwert

6.1.5.3.5 Bemessung der Tragfähigkeit

Für die Tragfähigkeit ist der Bemessungswert R_d wie folgt zu ermitteln:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \{X_{d,i}; a_d\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}} ; a_d \right\} \quad i \geq 1 \quad (\text{Gl.9})$$

γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheit des Widerstandmodells
$X_{d,i}$	Bemessungswert der Bauteileigenschaft

Vereinfacht:

$$R_d = R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}} ; a_d \right\} \quad i \geq 1 \quad (\text{Gl.10})$$

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_{m,i} \quad (\text{Gl.11})$$

Für Bauteile aus einem Baustoff gilt für die Bemessung der Tragfähigkeit R_d :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (\text{Gl.12})$$

6.1.5.4 Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit

6.1.5.4.1 Allgemeines

Es müssen grundsätzlich folgende Grenzzustände für den Nachweis der Tragfähigkeit nachgewiesen werden:

- EQU: Verlust der Lagesicherheit
- STR: Versagen oder übermäßige Verformungen
- FAT: Ermüdungsversagen (nach 6.6)

6.1.5.4.2 Nachweis der Lagesicherheit und der Tragfähigkeit

Für den Nachweis der Lagesicherheit hat folgende Beziehung zu gelten:

$$E_{d,dst} \leq R_{d,stab} \quad (Gl.13)$$

$E_{d,dst}$ Bemessungswert für die Auswirkung der destabilisierenden Einwirkung

$R_{d,stab}$ Bemessungswert für die Auswirkung der stabilisierenden Einwirkung

Für den Nachweis der Grenzzustände bezüglich der Tragfähigkeit eines Querschnittes, Bauteils oder einer Baugruppe gilt folgendes:

$$E_d \leq R_d \quad (Gl.14)$$

E_d Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung

R_d Bemessungswert der zugehörigen Tragfähigkeit

6.1.5.4.3 Kombinationsregeln für Einwirkungen (ohne Ermüdung)

- a) Allgemeines
- b) Kombinationen bei ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituationen (Grundkombination)
- c) Kombinationen von Einwirkungen bei außergewöhnlichen Bemessungssituationen

zu a)

Für alle kritischen Lastfälle sind die Bemessungswerte E_d der Auswirkung der Einwirkung für die verschiedenen Lastfallkombinationen zu definieren. Zur Beurteilung der Bemessung wird jener Wert mit der schlechtesten Auswirkung herangezogen.

zu b)

Die Kombinationen der Auswirkung sind im Allgemeinen wie folgt zu bestimmen:

$$E_d = E \{ \gamma_{g,j} G_{k,j} ; \gamma_p P ; \gamma_{Q,1} Q_{k,1} ; \gamma_{Q_i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i > 1 \quad (Gl.15)$$

Die Kombination in der Klammer { } kann wie folgt ausgedrückt werden, entweder durch:

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ “+” } \gamma_p P \text{ “+” } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ “+” } \sum_{(i > 1)} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (Gl.16)$$

oder für STR durch die ungünstigere der beiden Kombinationen

$$\sum_{(j \geq 1)} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{“+“} \gamma_p P \text{“+“} \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} \text{“+“} \sum_{(i \geq 1)} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (Gl.17)$$

$$\sum_{(j \geq 1)} \zeta_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{“+“} \gamma_p P \text{“+“} \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{“+“} \sum_{(i \geq 1)} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (Gl.18)$$

“+“ ist zu kombinieren
 \sum gemeinsame Auswirkung von
 ζ der Reduktionsbeiwert für ungünstig wirkende ständige Einwirkungen G

zu c)

Die Auswirkung der Einwirkung wird wie folgt bestimmt:

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P ; A_d ; (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} ; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i > 1 \quad (Gl.19)$$

Die Kombination in der Klammer { } kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sum_{(j \geq 1)} G_{k,j} \text{“+“} P \text{“+“} A_d \text{“+“} (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \text{“+“} \sum_{(i \geq 1)} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (Gl.20)$$

Tabelle 6-3: Bemessungswerte der Einwirkungen für EQU; Tabelle A1.2(A) aus [1]

Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen	Ständige Einwirkungen		Leit-einwirkung ^a	Begleiteinwirkungen	
	Ungünstig	Günstig		Vorherrschende (gegebenenfalls)	Weitere
Gl.16	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
<p>ANMERKUNG 1 Die γ-Werte können im Nationalen Anhang festgelegt werden. Die folgenden Werte gelten als Empfehlungswerte für γ.</p> <p>$\gamma_{G,j,sup} = 1,10$ $\gamma_{G,j,inf} = 0,90$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung)</p> <p>ANMERKUNG 2 Für den Fall, dass der Nachweis des statischen Gleichgewichtes auch den Widerstand der tragenden Bauteile einschließt, darf alternativ zu den zwei getrennten Nachweisen nach den Tabellen A1.2(A) und A1.2(B) ein kombinierter Nachweis basierend auf Tabelle A1.2 (A) durchgeführt werden – sofern dies nach dem Nationalen Anhang zulässig ist –, wobei die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte empfohlen werden. Die empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte dürfen im Nationalen Anhang geändert werden.</p> <p>$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$ $\gamma_{G,j,inf} = 1,15$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung)</p> <p>vorausgesetzt, dass der Nachweis mit $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$ für den ungünstig und den günstig wirkenden Teil der ständigen Einwirkung nicht maßgebend wird.</p>					
<p>^a Die veränderlichen Einwirkungen sind die in Tabelle 3-2 angegebenen.</p>					

Tabelle 6-4: Bemessungswerte der Einwirkung für STR; Tabelle A1.2(B) aus [1]

Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen	Ständige Einwirkungen		Leiteinwirkung	Begleiteinwirkungen ^a		Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen	Ständige Einwirkungen		Leiteinwirkung ^a	Begleiteinwirkungen ^a	
	Ungünstig	Günstig		Vorherrschende (gegebenfalls)	Weitere		Ungünstig	Günstig		Einwirkung	Vorherrschende
Gl.16	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	Gl.17	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$		$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
						Gl.18	$\xi \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

ANMERKUNG 1 Die verbindliche Festlegung aus der Auswahl 6.10 oder 6.10 a) und 6.10 b) erfolgt im Nationalen Anhang. Im Falle von 6.10 a) und 6.10 b) kann der Nationale Anhang 6.10 a) so verändern, dass nur ständige Einwirkungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Die Festlegung der γ - und ξ -Werte erfolgt im Nationalen Anhang. Bei Wahl der Ausdrücke 6.10 oder 6.10 a) und 6.10 b) wurden die folgenden γ - und ξ -Werte empfohlen.

$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$
 $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung)
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ bei ungünstiger Wirkung (0 bei günstiger Wirkung)
 $\xi = 0,85$ (so dass $\xi \gamma_{G,j,sup} = 0,85 \times 1,35 = 1,15$)

Zu γ -Werten für eingeprägte Verformungen siehe auch EN 1991 bis EN 1999.

ANMERKUNG 3 Die charakteristischen Werte aller ständigen Einwirkungen, die den gleichen Ursprung besitzen, werden mit $\gamma_{G,sup}$ multipliziert, wenn ihre gesamte Auswirkung ungünstig ist; für den Fall, dass alle ständigen Einwirkungen eine günstige Wirkung verursachen, ist $\gamma_{G,inf}$ zu verwenden. Zum Beispiel können alle Einwirkungen aus dem Eigengewicht des Tragwerks als aus einem Ursprung herrührend betrachtet werden; dies gilt auch bei Verwendung unterschiedlicher Materialien.

ANMERKUNG 4 Im Sonderfall können die Werte γ_G und γ_Q in γ_G und γ_Q und die Werte γ_{Gd} für die Modellunsicherheit aufgeteilt werden. In den meisten Fällen kann für γ_{Gd} ein Wert im Bereich von 1,05 bis 1,15 verwendet werden, wobei diese Festlegung im Nationalen Anhang geändert werden kann.

^a Die veränderlichen Einwirkungen sind die in Tabelle 6.2 gegeben.

6.1.5.5 Nachweis für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

6.1.5.5.1 Nachweise

Nachzuweisen ist, dass:

$$E_d \leq C_d \tag{Gl.21}$$

C_d	Bemessungswert der Grenze für das maßgebende Gebrauchstauglichkeitskriterium
E_d	Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung in der Dimension des Gebrauchstauglichkeitskriteriums

6.1.5.5.2 Kombination der Einwirkungen

Je nachdem wie sich die Anlage verhält, sind die Kombinationen der Einwirkungen zu wählen. Kombinationen für die Einwirkungen welche einen Gebrauchstauglichkeitsnachweis liefern, sind wie folgt definiert:

- a) Charakteristische Kombination
- b) Häufige Kombination
- c) Quasi – ständige Kombination

zu a) (i.d.R. für nicht umkehrbare Auswirkungen)

$$E_d = E \{ G_{k,j} ; P_k ; Q_{k,1} ; \psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1 ; i > 1 \tag{Gl.22}$$

Die Kombination in der Klammer { } kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sum_{(j \geq 1)} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{(i \geq 1)} \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{Gl.23}$$

zu b) (i.d.R. für umkehrbare Auswirkungen)

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; \psi_{1,1} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (Gl.24)$$

Die Kombination in der Klammer { } kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sum_{(j \geq 1)} G_{k,j} \text{ “+“ } P \text{ “+“ } \psi_{1,1} Q_{k,1} \text{ “+“ } \sum_{(i \geq 1)} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (Gl.25)$$

zu c) (i.d.R. für Langzeitauswirkungen)

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (Gl.26)$$

Die Kombination in der Klammer { } kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sum_{(j \geq 1)} G_{k,j} \text{ “+“ } P \text{ “+“ } \sum_{(i \geq 1)} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (Gl.27)$$

Tabelle 6-5: Bemessungswerte der Einwirkungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit; Tabelle A1.4 aus [1]

Kombination	Ständige Einwirkungen G_d		Veränderliche Einwirkungen Q_d	
	Ungünstig	Günstig	Leiteinwirkung	Weitere
Charakteristisch	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Häufig	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Quasi-ständig	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

6.2 EN 1991-1-1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Eigengewicht und Nutzlasten

6.2.1 Einteilung der Einwirkungen

6.2.1.1 Eigengewicht

Unter dem Eigengewicht versteht man eine dauerhafte, nicht veränderliche ortsfeste Einwirkung auf ein Tragwerk bzw. auf eine Anlage. Kurzzeitig auftretende Einwirkungen sind dabei als außergewöhnliche Lasten zu erfassen und nicht permanent einwirkende Lasten sind als Nutzlasten zu deklarieren.

6.2.1.2 Nutzlasten

Unter Nutzlasten versteht man alle veränderlichen frei einwirkenden Lasten. Sie werden jedoch als quasi statische Lasten behandelt. Einwirkungen wie z.B. Explosionen oder Anprallen eines Kranes fallen in die Kategorie der außergewöhnlichen Einwirkungen.

6.2.1.3 Außergewöhnliche Lasten

Als außergewöhnliche Lasten werden all jene Einwirkungen bezeichnet, welche nicht als Eigengewicht bzw. Nutzlasten eingestuft werden.

6.2.2 Bemessungssituationen

6.2.2.1 Allgemein

Es sind für jede Bemessungssituation sämtliche Eigen-, Nutz- sowie außergewöhnliche Lasten zu definieren.

6.2.2.2 Eigengewicht

Für eine Lastkombination ist das gesamte Eigengewicht als eine einzeln auftretende Last anzusehen. Es sind bei der Bestimmung des Eigengewichtes ebenfalls die Medien an der Anlage (z.B. Wasserstände) zu berücksichtigen.

6.2.2.3 Nutzlasten

Für unterschiedliche Nutzungsarten ist bei der Bemessung der ungünstigste Lastfall anzusetzen. Für den Fall, dass neben der üblichen Nutzlast noch weitere veränderliche Einwirkungen (z.B. Windlasten, ...) auftreten, ist für den gewählten Lastfall eine Gesamtnutzlast anzuwenden.

6.3 EN 1991-3 – Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen infolge von Kranen

6.3.1 Einwirkungen aus Hebezeugen und Kranen auf Kranbahnträger

6.3.1.1 Einteilung der Einwirkungen

6.3.1.1.1 Allgemeines

Alle Einwirkungen auf einen Kranbahnträger welche von Kranen oder Hebezeugen resultieren, sind als veränderlich oder außergewöhnlich zu deklarieren.

6.3.1.1.2 Veränderliche Einwirkungen

Im Verlaufe des Arbeitens mit einem Kran ergeben sich mehrere zeitlich und örtlich veränderliche Einwirkungen, wie z.B. Hublasten, Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte sowie Kräfte welche aus dem Schräglauf resultieren.

Man unterteilt die verschiedenen veränderlichen Kraneinwirkungen in vertikale und in horizontale veränderliche Einwirkungen.

Statische Lasten, welche beispielsweise aufgrund von Schwingungen einen dynamischen Anteil erhalten, sind mit einem dynamischen Faktor φ_i zu multiplizieren.

$$F_{\varphi,k} = \varphi_i \cdot F_k \quad (\text{Gl.28})$$

$F_{\varphi,k}$	charakteristischer Wert der Kraneinwirkung
φ_i	dynamischer Faktor; siehe Tabelle 6-6
F_k	charakteristischer statischer Anteil der Kraneinwirkung

Die Kombination der einzelnen Kranlastanteile erfolgt durch die Bildung von sogenannten Lastgruppen. In den einzelnen Lastgruppen wird berücksichtigt, dass zum jeweiligen Zeitpunkt nur eine horizontale Krafteinwirkung auftritt; siehe Tabelle 6-7.

Dynamische Faktoren	Einfluss, der berücksichtigt wird	Anzuwenden auf
φ_1	– Schwingungsanregung des Krantragwerks infolge Anheben der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans
φ_2 oder φ_3	– dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden – dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast, wenn zum Beispiel Greifer oder Magneten benutzt werden	Hublast
φ_4	– dynamische Wirkung hervorgerufen durch Fahren auf Schienen oder Fahrbahnen	Eigengewicht des Krans und Hublast
φ_5	– dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte
φ_6	– dynamische Wirkungen infolge einer Prüflast, die durch die Antriebe entsprechend den Einsatzbedingungen bewegt wird	Prüflast
φ_7	– dynamische elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte

Tabelle 6-6: Dynamische Faktoren φ_i ; Tabelle 2.1 aus [3]

		Symbol	Abschnitt	Lastgruppen									
				ULS							Prüflast	Außerwöhnlich	
				1	2	3	4	5	6	7			
1	Eigengewicht des Krans	Q_c	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Hublast	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Beschleunigung der Kranbrücke	H_L, H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Schräglauf der Kranbrücke	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Beschleunigen oder Bremsen der Laufkatze oder Hubwerk	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Wind in Betrieb	F_W^*	Anhang A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Prüflast	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Pufferkraft	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Kippkraft	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

ANMERKUNG Zu Wind außerhalb Betrieb, siehe Anhang A.

¹⁾ η ist der Anteil der Hublast, der nach Entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist.

Tabelle 6-7: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren, die als eine einzige charakteristische Einwirkung anzusehen sind; Tabelle 2.2 aus [3]

6.3.1.1.3 Außergewöhnliche Einwirkungen

Außergewöhnliche Einwirkungen resultieren aus z.B. Puffer- oder Kippkräften.

Die Kombination der einzelnen außergewöhnlichen Kräfte erfolgt durch die Bildung von sogenannten Lastgruppen; siehe Tabelle 6-7.

6.3.1.2 Lastanordnungen

6.3.1.2.1 Brückenlaufkrane

6.3.1.2.1.1 Vertikale Lasten

Die Bestimmung der vertikalen Lasten sollte unter Berücksichtigung der kritischen Lastanordnung erfolgen; siehe Abbildung 6-1 und 6-2.

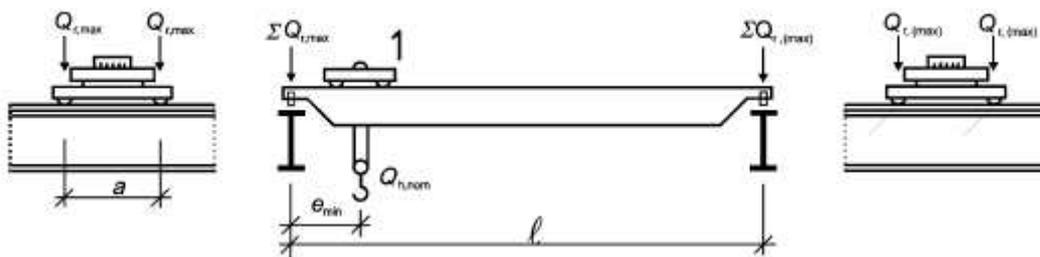


Abbildung 6-1: Lastanordnung des belasteten Krans zur Bestimmung der maximalen Belastung des Kranbahnträgers; Bild 2.1 aus [3]

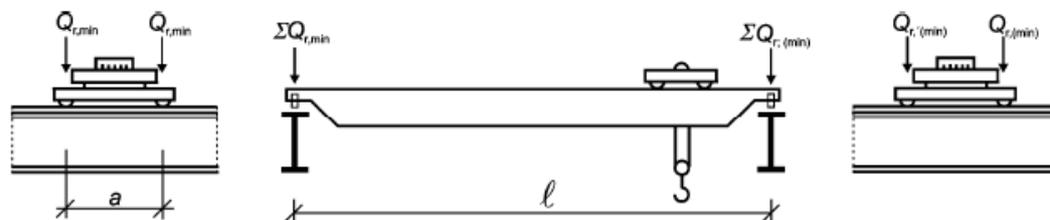


Abbildung 6-2: Lastanordnung des unbelasteten Krans zur Bestimmung der minimalen Belastung des Kranbahnträgers; Bild 2.1 aus [3]

$Q_{r,max}$	maximale Last je Rad des belasteten Krans
$Q_{r,(max)}$	zugehörige Last je Rad des belasteten Krans
$\Sigma Q_{r,max}$	Summe der maximalen Radlasten $Q_{r,max}$ des belasteten Krans je Kranbahn
$\Sigma Q_{r,(max)}$	Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(max)}$ des belasteten Krans je Kranbahn
$Q_{r,min}$	minimale Last je Rad des unbelasteten Krans
$Q_{r,(min)}$	zugehörige Last je Rad auf dem mehrbelasteten Kranbahnträger
$\Sigma Q_{r,min}$	Summe der minimalen Radlasten $Q_{r,min}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn
$\Sigma Q_{r,(min)}$	Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(min)}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn
$Q_{h,nom}$	Nennhublast

6.3.1.2.1.2 Horizontalkräfte

Folgende horizontale Kräfte, welche berücksichtigt werden müssen, treten einzeln in den oben genannten Lastgruppen auf:

- Kräfte aus Beschleunigung / Verzögerung; Abbildung 6-3
- Kräfte aus Schräglauf; Abbildung 6-4
- Pufferkräfte.

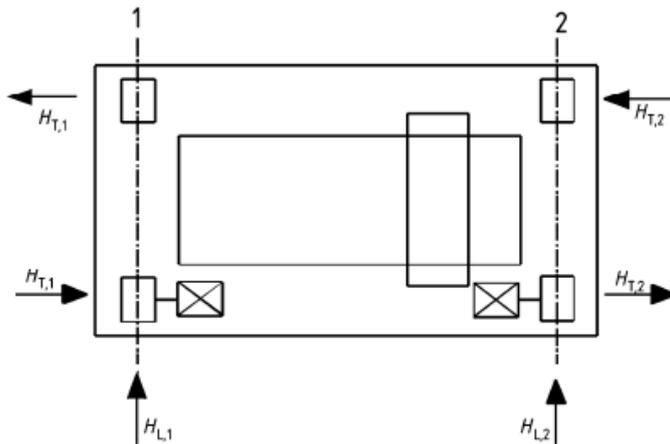


Abbildung 6-3: Anordnung der horizontalen Radlast infolge von Beschleunigung und Verzögerung längs und quer zur Fahrbahn; Bild 2.3 aus [3]

Kräfte aus dem Schräglauf treten bei konstanter Geschwindigkeit auf (siehe Abbildung 6-4).

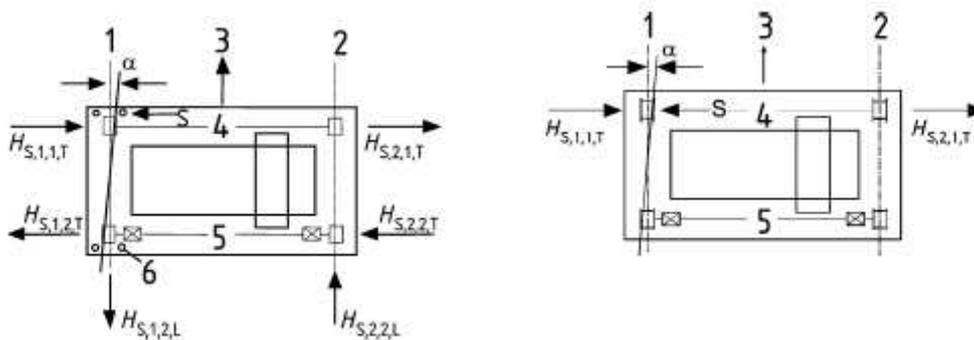


Abbildung 6-4: Anordnung der horizontalen Radlast aus Schräglauf längs und quer zu Fahrbahn (links: mit zusätzlichen Führungsmitteln / rechts: Spurführung mittels Spurkränzen) ; Bild 2.4 aus [3]

-
- | | |
|---|-------------------|
| 1 | Schiene $i = 1$ |
| 2 | Schiene $i = 2$ |
| 3 | Bewegungsrichtung |
| 4 | Radpaar $j = 1$ |
| 5 | Radpaar $j = 2$ |
| 6 | Führungsmittel |
-

6.3.1.3 Vertikale Kranlasten – charakteristische Werte

Die charakteristischen Werte für die vertikalen Kranlasten werden im Allgemeinen nach Tabelle 6-8 bestimmt.

Werte für dynamische Faktoren	
φ_1	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ Die beiden Werte 1,1 und 0,9 decken die unteren und oberen Werte des Schwingungsimpulses ab.
φ_2	$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h$ v_h - konstante Hubgeschwindigkeit in m/s $\varphi_{2,min}$ und β_2 siehe Tabelle 5
φ_3	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} (1 + \beta_3)$ Dabei ist Δm der losgelassene oder abgesetzte Teil der Masse der Hublast; m die Masse der gesamten Hublast; $\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen; $\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen;
φ_4	$\varphi_4 = 1,0$ vorausgesetzt, dass die in EN 1993-6 festgelegten Toleranzen für Kranschiene eingehalten werden.
ANMERKUNG Für den Fall, dass die in EN 1993-6 festgelegten Toleranzen nicht eingehalten werden, kann der Faktor φ_4 mit dem in CEN/TS 13001-2 enthaltenen Modell bestimmt werden.	

Tabelle 6-8: Dynamische Faktoren φ_i für vertikale Lasten; Tabelle 2.4 aus [3]

Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

ANMERKUNG Die Krane werden zur Berücksichtigung der dynamischen Wirkungen beim Aufheben der Last vom Boden in die Hubklassen HC1 bis HC4 eingestuft. Die Auswahl der Hubklasse hängt vom jeweiligen Krantyp ab.

Tabelle 6-9: Werte für β_2 und $\varphi_{2,min}$; Tabelle 2.5 aus [3]

6.3.1.4 Horizontale Kranlasten – charakteristische Werte

6.3.1.4.1 Horizontale Kräfte $H_{L,i}$ längs der Fahrbahn und $H_{T,i}$ quer zur Fahrbahn aus Beschleunigung und Bremsen eines Krans

Horizontale Last entlang des Kranbahnträgers:

$$H_{L,i} = \varphi_5 \cdot K \cdot \frac{1}{n_r} \quad (\text{Gl.29})$$

n_r	Anzahl der Kranbahnträger
K	Antriebskraft; siehe Kapitel 6.3.1.4.2
φ_5	dynamischer Faktor; siehe Tabelle 6-10
i	Kranbahnträger ($i=1;2$)

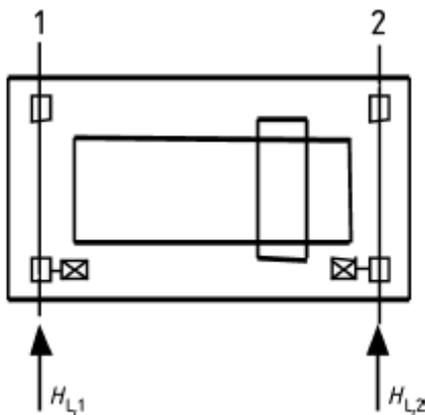


Abbildung 6-5: Horizontale Lasten $H_{L,i}$ längs der Fahrbahn; Bild 2.5 aus [3]

Durch die Antriebskraft K greift im Massenschwerpunkt ein Moment M an. Dieses Moment steht im Gleichgewicht mit den horizontalen Kräften quer zur Fahrbahn; siehe Abbildung 6-6.

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \zeta_2 \cdot \frac{M}{a} \quad (\text{Gl.30})$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \zeta_1 \cdot \frac{M}{a} \quad (\text{Gl.31})$$

$$\zeta_1 = \frac{\sum_i Q_{r,\max}}{\sum_i Q_r} \quad ; \quad \zeta_2 = 1 - \zeta_1 \quad (\text{Gl.32); (Gl.33)}$$

$$\sum_i Q_r = \sum_i Q_{r,\max} + \sum_i Q_r^{(\max)} \quad (\text{Gl.34})$$

$\sum_i Q_{r,\max}$ siehe Abbildung 6-1

$\sum_i Q_r^{(\max)}$ siehe Abbildung 6-1

a Abstand zwischen den Führungsrollen

$M = K \cdot l_s$ Drehmoment verursacht durch Antriebskraft (Gl.35)

$l_s = (\zeta_1 - 0,5) \cdot l$ Hebelarm der Antriebskraft (Gl.36)

l Spannweite der Kranbrücke

φ_5 dynamischer Faktor; nach Tabelle 6-10

K Antriebskraft; siehe Kapitel 6.3.1.4.2

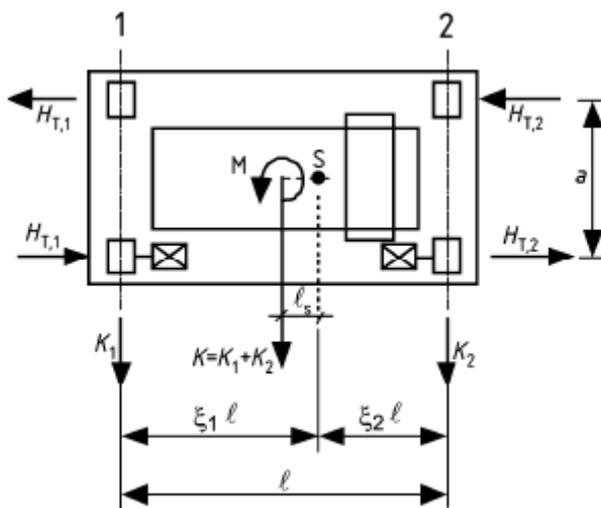


Abbildung 6-6: Horizontale Kräfte $H_{T,i}$ quer zur Fahrbahn; Bild 2.6 aus [3]

Zahlenwerte für für den Faktor φ_5	Anzuwenden auf
$\varphi_5 = 1,0$	Fliehkräfte
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	wenn plötzliche Veränderungen der Kräfte auftreten
$\varphi_5 = 3,0$	bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel

Tabelle 6-10: Dynamischer Faktor φ_5

6.3.1.4.2 Antriebskraft K

Die Antriebskraft K kann wie folgt berechnet werden:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \sum Q_{r,\min}^* \quad (\text{Gl.37})$$

μ	Reibungsbeiwert; $\mu=0,2$ für Stahl/Stahl und $\mu=0,5$ für Stahl/Gummi
	-Einzelantrieb: $\sum Q_{r,\min}^* = m_w Q_{r,\min}$; dabei ist m_w die Anzahl der einzeln angetriebenen Räder
	-Zentralantrieb: $\sum Q_{r,\min}^* = Q_{r,\min} + Q_{r,(\min)}$

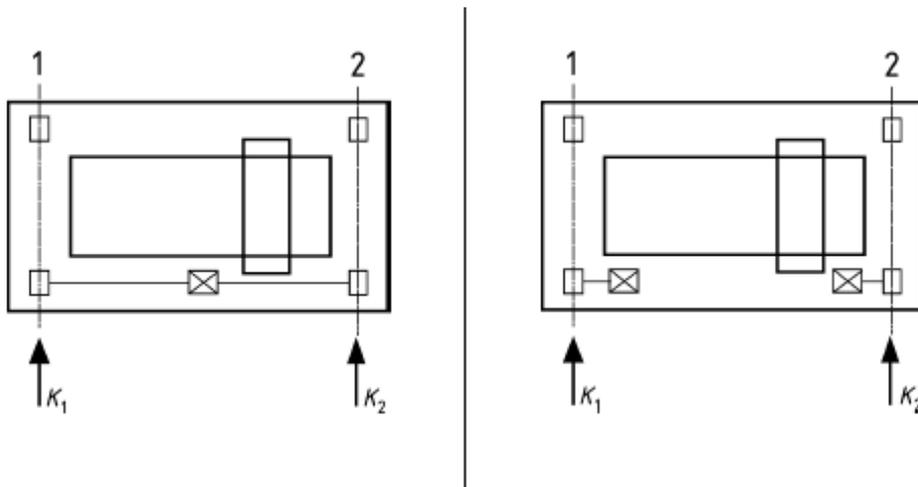


Abbildung 6-7: Definition der Antriebskraft K (links: Zentralantrieb / rechts: Einzelantrieb) ; Bild 2.7 aus [3]

6.3.1.4.3 Horizontale Kräfte $H_{S,i,j,k}$ und Führungskraft S infolge von Schräglauf eines Krans

Die Führungs- und Seitenkräfte können nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$S = f \lambda_{S,j} \sum Q_r \quad (\text{Gl.38})$$

$$H_{S,1,j,L} = f \lambda_{S,1,j,L} \sum Q_r \quad (j \text{ angetriebene Radpaarachse}) \quad (\text{Gl.39})$$

$$H_{S,2,j,L} = f \lambda_{S,2,j,L} \sum Q_r \quad (j \text{ angetriebene Radpaarachse}) \quad (\text{Gl.40})$$

$$H_{S,1,j,T} = f \lambda_{S,1,j,T} \sum Q_r \quad (\text{Gl.41})$$

$$H_{S,2,j,T} = f \lambda_{S,2,j,T} \sum Q_r \quad (\text{Gl.42})$$

f	Kraftschlussbeiwert
$\lambda_{S,2,j,k}$	Kraftbeiwert; nach Tabelle 6-13
i	Schienenachse
j	Radpaarachse
k	Kraftrichtung (L = Längsrichtung; T = Querrichtung)

Kraftschlussbeiwert:

$$f = 0,3 (1 - \exp (-250 \alpha)) \leq 0,3 \quad (\text{Gl.43})$$

α Schräglaufwinkel

Schräglaufwinkel:

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad} \quad (\text{Gl.44})$$

α_F , α_V und α_0 ; nach Tabelle 6-11

Winkel α_i	Mindestwerte von α_i
$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{\text{ext}}}$	$0,75x \geq 5 \text{ mm}$ bei Führungsrollen
	$0,75x \geq 10 \text{ mm}$ bei Spurkränzen
$\alpha_V = \frac{y}{a_{\text{ext}}}$	$y \geq 0,03b$ in mm bei Führungsrollen
	$y \geq 0,10b$ in mm bei Spurkränzen
α_0	$\alpha_0 = 0,001$
Dabei ist	
a_{ext}	der Abstand der äußeren Führungsrollen bzw. Spurkränze an der Schiene;
b	die Schienenkopfbreite;
x	der Freiraum zwischen Schiene und Führungsmittel (Querschlupf);
y	die Abnutzung der Schiene und Führungsmittel;
α_0	die Toleranz für Rad und Schienenrichtung.

Tabelle 6-11: Definition von α_F , α_V und α_0 ; Tabelle 2.7 aus [3]

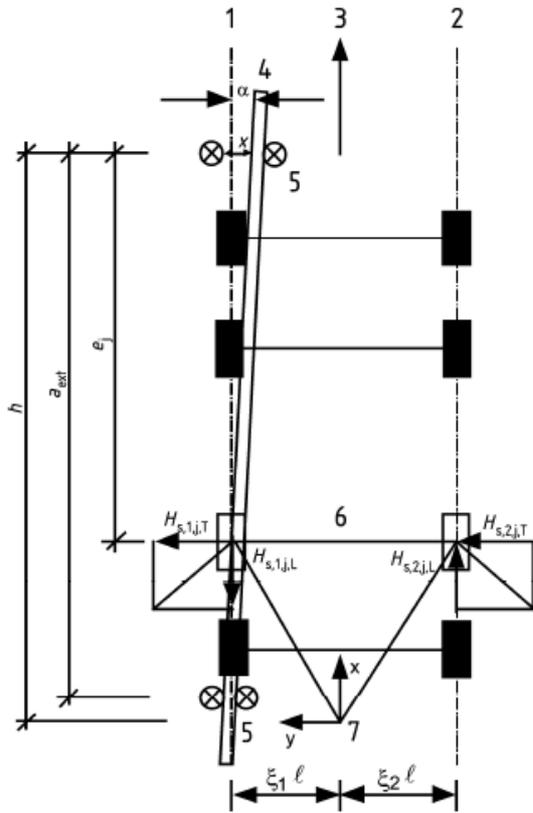


Abbildung 6-8: Definition des Winkels α und des Abstandes h ; Bild 2.8 aus [3]

-
- 1 Schiene $i = 1$
 - 2 Schiene $i = 2$
 - 3 Bewegungsrichtung
 - 4 Richtung der Schiene
 - 5 Führungsmittel
 - 6 Radpaar i
 - 7 Momentaner Gleitpol
-

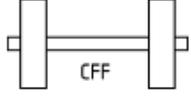
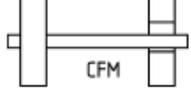
Befestigung des Rades bezüglich seitlicher Bewegung	Kombination von Radpaaren		h
	gekoppelt (c)	unabhängig (i)	
Fest/Fest FF			$\frac{m \xi_1 \xi_2 \ell^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$
Fest/Beweglich FM			$\frac{m \xi_1 \ell^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$
Dabei ist			
h	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und dem relevanten Führungsmittel;		
m	die Anzahl der Paare mit gekoppelten Rädern ($m = 0$ für unabhängige Radpaare);		
$\xi_1 \ell$	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahnachse 1;		
$\xi_2 \ell$	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahnachse 2;		
ℓ	die Spannweite des Krans;		
e_j	der Abstand zwischen der Radpaarachse j und dem relevanten Führungsmittel.		

Tabelle 6-12: Bestimmung des Abstandes h ; Tabelle 2.8 aus [3]

System	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,j,L}$	$\lambda_{S,1,j,T}$	$\lambda_{S,2,j,L}$	$\lambda_{S,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0
Dabei ist					
n	die Anzahl der Radpaare;				
$\xi_1 \ell$	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahnachse 1;				
$\xi_2 \ell$	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und der Kranbahnachse 2;				
ℓ	die Spannweite des Krans;				
e_j	der Abstand zwischen der Radpaarachse j und dem relevanten Führungsmittel;				
h	der Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und dem relevanten Führungsmittel.				

Tabelle 6-13: Definition von $\lambda_{S,i,j,k}$ – Werten; Tabelle 2.9 aus [3]

6.4 EN 1993-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln

6.4.1 Grundlagen für die Tragwerksplanung

6.4.1.1 Anforderungen

6.4.1.1.1 Grundlegende Anforderungen

Für die Tragwerksplanungen gilt grundsätzlich die DIN EN 1990 / 1991, wobei in diesem Abschnitt speziell auf Tragwerke aus Stahlbauteilen eingegangen wird.

6.4.1.1.2 Nutzungsdauer, Dauerhaftigkeit und Robustheit

Es sind folgende Punkte zu erfüllen um die Nutzungsdauer, Dauerhaftigkeit sowie Robustheit einer Anlage zu gewährleisten:

- Korrosionsgerechte Gestaltung
- Gestaltung auf ausreichende Ermüdungssicherheit
- Möglichst verschleißarme Konstruktionen
- Außergewöhnliche Einwirkungen sollten berücksichtigt werden
- Inspektions- und Wartungsmaßnahmen

6.4.1.2 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten

6.4.1.2.1 Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit

Für Stahlbauteile gilt für die Bemessung der Beanspruchbarkeit die Definition nach EN 1990 (Gl.12):

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

R_k	charakteristischer Wert einer Beanspruchbarkeit
γ_M	globaler Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit

6.4.2 Werkstoffe

6.4.2.1 Allgemeines

Alle angegebenen Werkstoffdaten werden nach diesem Abschnitt als charakteristische Werte behandelt.

6.4.2.2 Baustahl

6.4.2.2.1 Werkstoffeigenschaften

Die Streckgrenze f_y (R_{eH}) sowie die Zugfestigkeit f_u (R_m) werden entweder direkt aus der Produktnorm oder vereinfacht aus der Tabelle 6-14 entnommen.

Werkstoffnorm und Stahlsorte	Erzeugnisdicke t mm			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	$\boxed{\text{AC}} 490 \boxed{\text{AC}}$	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	$\boxed{\text{AC}} 490 \boxed{\text{AC}}$	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Tabelle 6-14: Nennwerte der Streckgrenze f_y und Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl; Tabelle 3.1 aus [4]

6.4.2.2.2 Anforderungen an die Duktilität

Mindestduktilitätswerte für Stahl:

- $f_u / f_y \geq 1,10$
- Bruchdehnung mindestens 15 % ; $5,65 \sqrt{A_{10}}$;

A_0 entspricht der Ausgangsquerschnittsfläche

- Gleichmaßdehnung $\epsilon_u \geq 15 \epsilon_y$;
 ϵ_u ist der Zugfestigkeit f_u zugeordnet; Fließdehnung $\epsilon_y = f_y / E$

Bei den angegebenen Stahlsorten aus der Tabelle 6-14 dürfen jene Anforderungen als erfüllt angesehen werden.

6.4.2.2.3 Bemessungswerte der Materialkonstanten

Für die Bemessung sind folgende Werte anzunehmen:

- Elastizitätsmodul $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
- Schubmodul $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81\,000 \text{ N/mm}^2$
- Poissonsche Zahl $\nu = 0,3$
- Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (für $T \leq 100^\circ\text{C}$)

6.4.3 Tragwerksberechnung

6.4.3.1 Statische Systeme

Das statische Berechnungsmodell ist so zu wählen, dass es für die geforderten Grenzzustände sowie für das Tragwerksverhalten im betrachteten Grenzzustand mit der vorgegebenen Genauigkeit ausreicht.

6.4.3.2 Untersuchung von Gesamttragwerken

6.4.3.2.1 Einflüsse der Tragwerksverformung

Die Berechnung der Schnittgrößen kann nach folgenden beiden Theorien erfolgen:

- Theorie I. Ordnung; über die Ausgangsgeometrie des Tragwerks
- Theorie II. Ordnung; Berücksichtigung der Tragwerksverformung

Wenn die durch die Verformung hervorgerufene Erhöhung der Schnittgröße das Tragwerksverhalten maßgeblich beeinflusst, so ist das Tragwerk nach der Theorie II. Ordnung zu bemessen. Können die durch die Verformung hervorgerufenen Erhöhungen der Schnittgrößen jedoch vernachlässigt werden, so ist die Theorie I. Ordnung zulässig, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$ für die elastische Berechnung (Gl.45)

- $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15$ für die plastische Berechnung (Gl.46)

α_{cr}	Faktor, um den der Bemessungswert der Belastung erhöht werden muss um die ideale Verzweigungslast (kritische Last) zu erreichen
F_{Ed}	Bemessung der Einwirkung auf das Tragwerk
F_{cr}	ideale Verzweigungslast des Gesamttragwerks; es ist von der elastischen Anfangssteifigkeit auszugehen

6.4.3.2.2 Stabilität von Tragwerken

Ist die Auslegung eines Bauwerks nach der Theorie I. Ordnung zulässig, so dürfen die Schnittgrößen ohne auftretende Imperfektionen ermittelt werden.

6.4.3.3 Imperfektionen

6.4.3.3.1 Grundlagen

Imperfektionen werden angesetzt um Einflüsse wie z.B. Eigenspannungen, geometrische Schiefstellungen, Abweichungen von der Geradheit sowie grundlegenden Toleranzen, welche größer sind als jene nach EN 1090-2, zu berücksichtigen.

6.4.3.3.2 Imperfektionen für die Tragwerksberechnung

Weist das Tragwerk aufgrund seiner Eigenform eine anfängliche Schiefstellung auf, so kann bei der Berechnung der Einfluss der Imperfektionen über eine äquivalente Ersatzverformung berücksichtigt werden. Dabei werden die Imperfektionen wie folgt ermittelt:

Globale Anfangsschiefstellung, siehe Abbildung 6-9:

$$\Phi = \Phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (\text{Gl.47})$$

$$\Phi_0 \quad \text{Ausgangswert: } \Phi_0 = 1/200 \quad (\text{Gl.48})$$

$$\alpha_h \quad \text{Abminderungsfaktor für die Höhe h von Stützen: } \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{jedoch } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (\text{Gl.49})$$

h Höhe des Tragwerks [m]

$$\alpha_m \quad \text{Abminderungsfaktor für die Anzahl der Stützen in einer Reihe: } \alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (\text{Gl.50})$$

m Anzahl der Stützen in einer Reihe; lediglich Stützen mit einer Vertikalbelastung größer als 50% der durchschnittlichen Stützlast

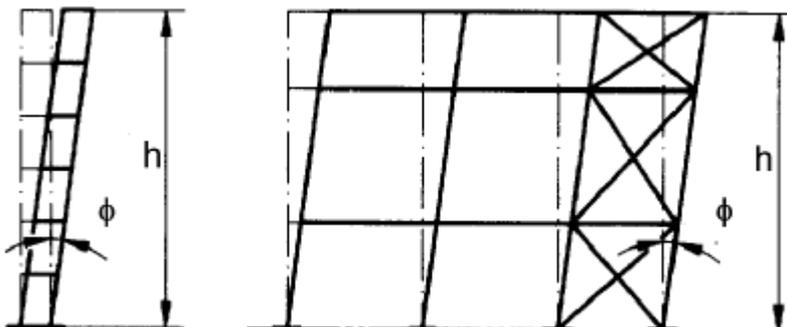


Abbildung 6-9: Äquivalente Schiefstellung; Bild 5.2 aus [4]

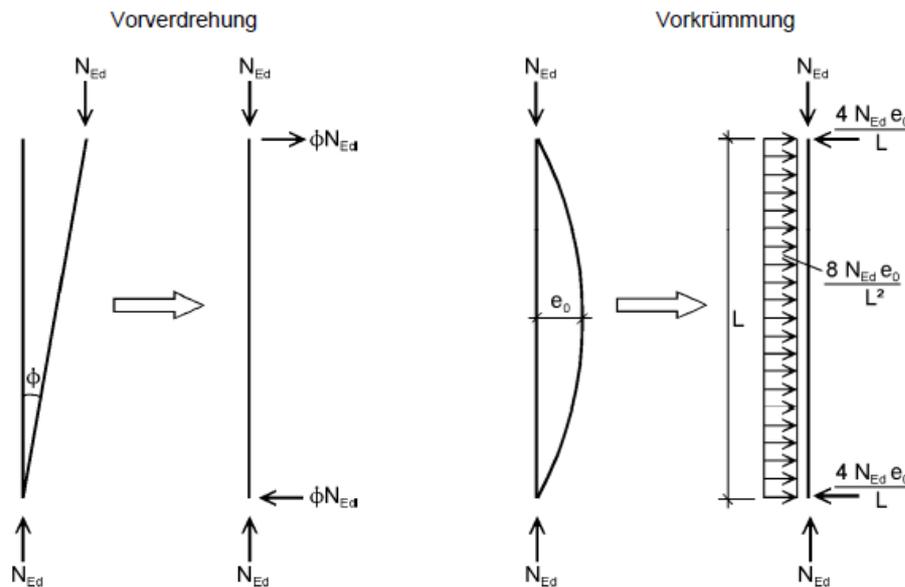


Abbildung 6-10: Ersatz der Vorverformung durch äquivalente horizontale Ersatzlasten; Bild 5.4 aus [4]

Anfangsschiefstellungen dürfen wie in Abbildung 6-10 durch äquivalente Ersatzlasten an den Stützen ersetzt werden. Die auftretenden Verformungen sind für alle maßgebenden Richtungen zu untersuchen, jedoch immer nur für eine Richtung zugleich.

Anfangsschiefstellungen dürfen vernachlässigt werden wenn folgende Beziehung erfüllt wird:

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed} \quad (\text{Gl.51})$$

6.4.3.4 Berechnungsmethoden

6.4.3.4.1 Allgemeines

Ermittlung der Schnittgrößen entweder nach:

- Elastischen Tragwerksberechnung
oder
- Plastischen Tragwerksberechnung

Die Anwendung der elastischen Tragwerksberechnung ist immer gültig, wogegen eine plastische Tragwerksberechnung nur dann angewendet werden darf, wenn das Bauteil über ausreichend Rotationskapazität an den Stellen verfügt an denen sich ein plastisches Gelenk bildet.

6.4.3.4.2 Elastische Tragwerksberechnung

Bei der elastischen Tragwerksberechnung verlaufen die Spannungs-Dehnungsbeziehungen in jedem Spannungszustand linear. Die Berechnung darf ebenfalls dort angewandt werden wo die Beanspruchbarkeit durch lokales Beulen begrenzt wird.

6.4.3.4.3 *Plastische Tragwerksberechnung*

Die plastische Tragwerksberechnung berücksichtigt bei der Bemessung des Tragwerkes den Einfluss aus dem nichtlinearen Werkstoffverhalten.

6.4.3.5 *Klassifizierung von Querschnitten*

6.4.3.5.1 *Grundlagen*

Durch die Klassifizierung werden die Querschnitte je nach zulässiger Beanspruchbarkeit einer der folgenden vier Querschnittsklassen zugeordnet.

6.4.3.5.2 *Klassifizierung*

Die Querschnitte werden nach dem c/t -Verhältnis ihrer druckbeanspruchten Teile klassifiziert. Es werden vier Querschnittsklassen definiert:

- „Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke oder Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastische Berechnung ausbilden“;
- „Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber aufgrund örtlichen Beulens nur eine begrenzte Rotationskapazität“;
- „Querschnitte der Klasse 3 erreichen für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber wegen örtlichen Beulens die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln“;
- „Querschnitte der Klasse 4 sind solche, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auftritt“.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 6-15, 6-16 und 6-17) sind die Grenzwerte für die druckbeanspruchten Querschnittsteile für die Klassen 1, 2 und 3 aufgelistet. Jene Querschnittsteile, welche die Anforderungen der Klasse 3 nicht mehr erfüllen, müssen als Klasse 4 Querschnitte eingestuft werden.

Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile						
				Biegeachse		
				Biegeachse		
Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
1	$clt \leq 72\varepsilon$	$clt \leq 33\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$clt \leq 83\varepsilon$	$clt \leq 38\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
3	$clt \leq 124\varepsilon$	$clt \leq 42\varepsilon$	für $\psi > -1$: $clt \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ für $\psi \leq -1^a$: $clt \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
^a Es gilt $\psi \leq -1$ falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > \frac{f_y}{E}$ sind.						

Tabelle 6-15: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (1/3) ; Tabelle 5.2 aus [4]

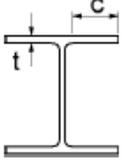
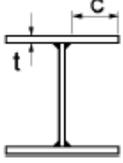
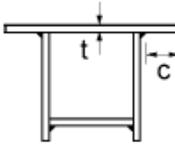
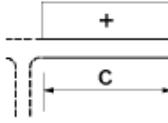
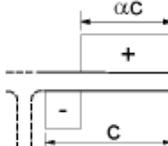
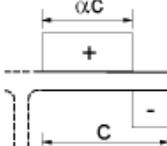
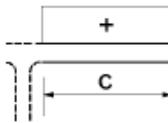
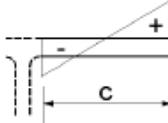
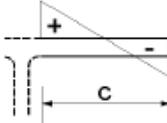
Einseitig gestützte Flansche							
							
Gewalzte Querschnitte		Geschweißte Querschnitte					
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile					
		freier Rand im Druckbereich		freier Rand im Zugbereich			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
1	$clt \leq 9\varepsilon$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$clt \leq 10\varepsilon$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
3	$clt \leq 14\varepsilon$	$clt \leq 21\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$					
		Für k_σ siehe EN 1993-1-5					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275	355	420	460
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tabelle 6-16: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (2/3); Tabelle 5.2 aus [4]

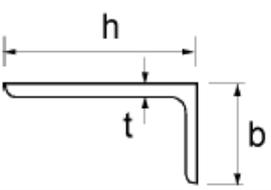
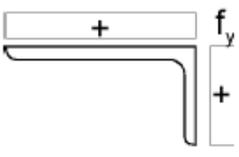
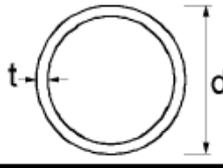
Winkel																			
Siehe auch „einseitig gestützte Flansche“ in Tabelle 5.2, oben																			
	gilt nicht für Winkel mit durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen																		
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile																		
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)																			
3	$h/t \leq 15\varepsilon$ <small>[AC]</small> und <small>[AC]</small> $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$																		
Runde Hohlquerschnitte																			
																			
Klasse	auf Biegung und/oder Druck beanspruchte Querschnittsteile																		
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$																		
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$																		
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$																		
	ANMERKUNG Für $d/t > 90\varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6.																		
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	<table border="1"> <tr> <td>f_y</td> <td>235</td> <td>275</td> <td>355</td> <td>420</td> <td>460</td> </tr> <tr> <td>ε</td> <td>1,00</td> <td>0,92</td> <td>0,81</td> <td>0,75</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>ε^2</td> <td>1,00</td> <td>0,85</td> <td>0,66</td> <td>0,56</td> <td>0,51</td> </tr> </table>	f_y	235	275	355	420	460	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51
f_y	235	275	355	420	460														
ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71														
ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51														

Tabelle 6-17: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (3/3); Tabelle 5.2 aus [4]

6.4.4 Grenzzustände der Tragfähigkeit

6.4.4.1 Allgemeines

Für die Teilsicherheitsbeiwerte nach diesem Abschnitt werden, falls nicht anders vorgeschrieben, folgende Werte empfohlen:

- $\gamma_{M0}=1,00$ Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten (unabhängig von seiner Querschnittsklasse)
- $\gamma_{M1}=1,00$ Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen
- $\gamma_{M2}=1,25$ Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung

6.4.4.2 Beanspruchbarkeit von Querschnitten

6.4.4.2.1 Allgemeines

Es darf in keinem Querschnitt der Bemessungswert der Belastung die zulässigen Bemessungswerte überschreiten. Für den Nachweis mit der Elastizitätstheorie darf jenes Fließkriterium für einen kritischen Punkt eines Querschnittes verwendet werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right) \leq 1 \quad (Gl.52)$$

$\sigma_{x.Ed}$	Bemessungswert der Normalspannung in Längsrichtung
$\sigma_{z.Ed}$	Bemessungswert der Normalspannung in Querrichtung
τ_{Ed}	Bemessungswert der Schubspannung

Als konservative Lösung kann für den Ausnutzungsgrad folgende Näherung herangezogen werden:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} \leq 1 \quad (Gl.53)$$

N_{Rd} ; $M_{y,Rd}$ und $M_{z,Rd}$ Bemessungswerte der Tragfähigkeit

6.4.4.2.2 Querschnittswerte

- Bruttoquerschnitte; Nennwerte der Abmessungen – Löcher von z.B. Verbindungsmittel müssen nicht abgezogen werden, jedoch größere Öffnungen
- Nettofläche; Bruttoquerschnittsfläche abzüglich Löcher von z.B. Verbindungsmittel
- Mitragende Breite; ist in EN 1993-1-5 geregelt (findet Anwendung bei Querschnitten der Klasse 4 – wird jedoch nicht näher ausgeführt; im weiteren Verlauf wird mit dem Verfahren der reduzierten Spannungen gerechnet, wodurch die Zulässigkeit von Querschnitten der Klasse 3 gegeben ist)

6.4.4.3 Zugbeanspruchung

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \quad (Gl.54)$$

N_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft
 $N_{t,Rd}$ Bemessungswert der Zugbeanspruchbarkeit; es ist i.d.R. der kleinere der folgenden Werte anzusetzen:

a) der Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.55)$$

b) der Bemessungswert der Zugbeanspruchbarkeit des Nettoquerschnitts längs der kritischen Risslinie durch die Löcher:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (Gl.56)$$

6.4.4.4 Druckbeanspruchung

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (Gl.57)$$

N_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft

$N_{c,Rd}$ Bemessungswert der Druckbeanspruchbarkeit:

Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3:
$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.58)$$

Querschnitte der Klasse 4:
$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.59)$$

Sind Löcher mit Verbindungsmitteln gefüllt, so müssen sie vom Querschnitt nicht abgezogen werden, außer übergroße bzw. Langlöcher nach EN 1090.

6.4.4.5 Biegebeanspruchung

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (Gl.60)$$

M_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Biegemomente

$M_{c,Rd}$ Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit:

Querschnitte der Klasse 1 oder 2:
$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.61)$$

Querschnitte der Klasse 3:
$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.62)$$

Querschnitte der Klasse 4:
$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.63)$$

$W_{el,min}$ und $W_{eff,min}$ Widerstandsmomente für die Querschnittsfaser mit der maximalen Normalspannung

Für zweiachsige Biegung ist das Verfahren nach 6.4.4.6 anzuwenden.

Löcher für Verbindungsmittel dürfen im zugbeanspruchten Flansch vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{A_{f,net} \cdot 0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.64)$$

A_f Fläche des zugbeanspruchten Flansches

6.4.4.6 Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft

Für Querschnitte der Klasse 3 ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (Gl.65)$$

$\sigma_{x,Ed}$ Bemessungswert der größten einwirkenden Normalspannung aus Biegung und Normalkraft

6.4.5 Stabilitätsnachweis

6.4.5.1 Gleichförmige Bauteile mit planmäßig zentrischem Druck

6.4.5.1.1 Biegeknicken

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (Gl.66)$$

N_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft
 $N_{b,Rd}$ Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit

Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (Gl.67)$$

Querschnitte der Klasse 4
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (Gl.68)$$

6.4.5.1.2 Knicklinien

Für eine zentrische Belastung ist der Abminderungsbeiwert χ wie folgt zu bestimmen:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{aber} \quad \chi \leq 1 \quad (Gl.69)$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad (Gl.70)$$

Der Abminderungsbeiwert χ kann ebenfalls aus der Abbildung 6-11 herausgelesen werden.

Φ Funktion zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ
 λ Schlankheitsgrad

für Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3
$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (Gl.71)$$

für Querschnitte der Klasse 4
$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (Gl.72)$$

α Imperfektionsbeiwert, lt. Tabelle 6-18

N_{cr} ideale Verzweigungslast (kritische Last) [10]

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2} \quad (Gl.73)$$

L_{cr} Knicklänge

I Axiale Flächenträgheitsmoment

$\lambda \leq 0,2$ oder $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0,04$; Biegeknicknachweis darf entfallen; es sind ausschließlich Querschnittsnachweise zu führen

Knicklinie	a_0	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 6-18: Imperfektionsbeiwerte der Knicklinie; Tabelle 6.1 aus [4]

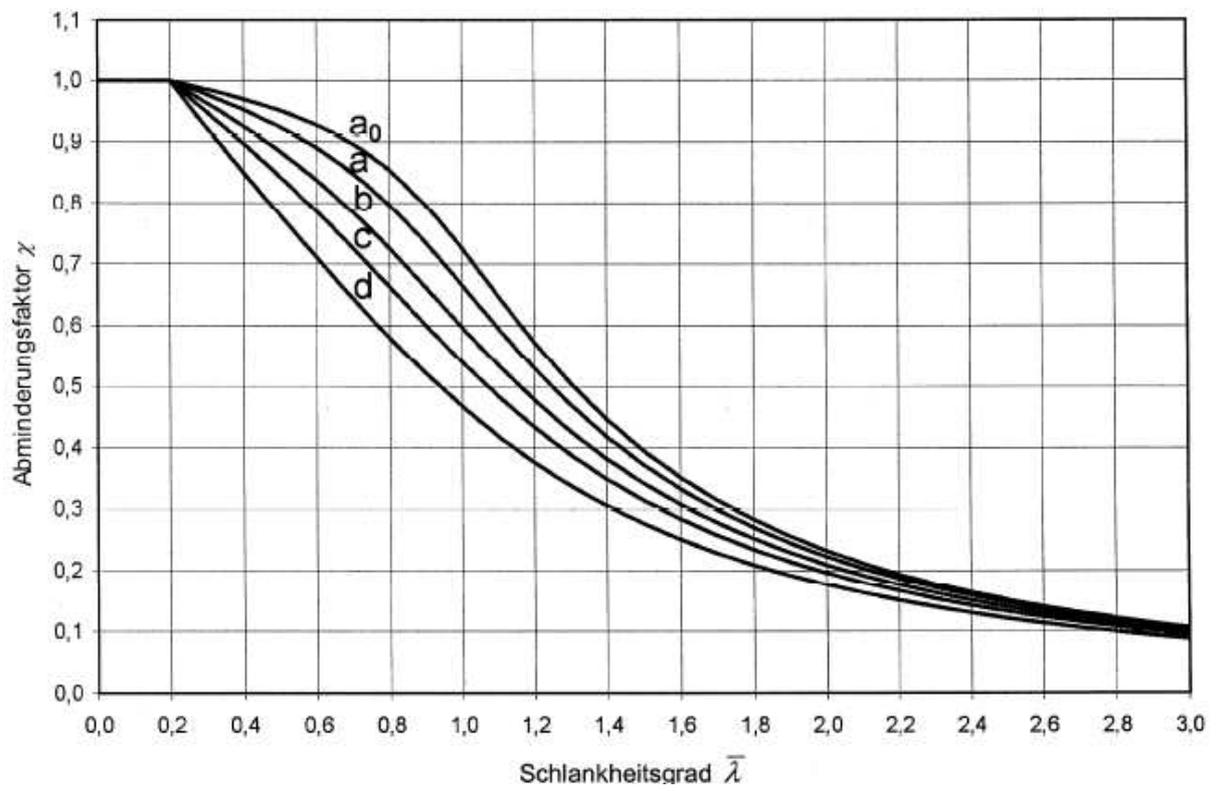


Abbildung 6-11: Knicklinien; Bild 6.4 aus [4]

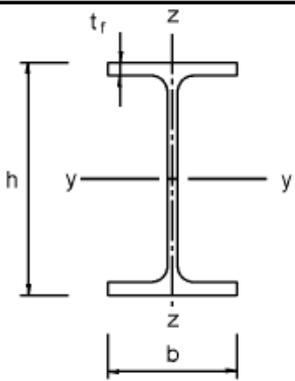
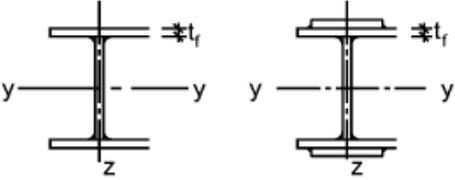
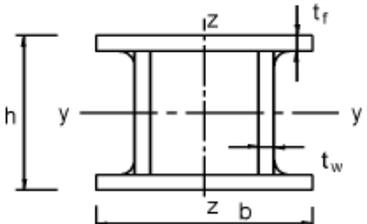
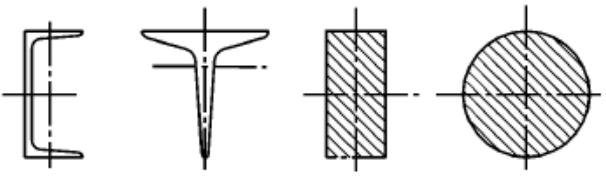
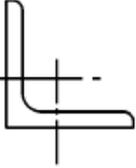
Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	
Hohlquerschnitte 	warmgefertigte	jede	a	
	kaltgefertigte	jede	c	
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $bt_f < 30$ $hlt_w < 30$	jede	c	
U-, T- und Vollquerschnitte 		jede	c	
L-Querschnitte 		jede	b	

Tabelle 6-19: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts; Tabelle 6.2 aus [4]

6.4.5.1.3 Schlankheitsgrad für Biegeknicken

Der Schlankheitsgrad ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

- Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3
$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (\text{Gl.74})$$

- Querschnitte der Klasse 4
$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (\text{Gl.75})$$

L_{cr} Knicklänge

i Trägheitsradius unter Verwendung des Bruttoquerschnittes

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon; \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235 \frac{N}{mm^2}}{f_y}} \quad (\text{Gl.76}); (\text{Gl.77})$$

6.4.5.1.4 Schlankheitsgrad für Drillknicken oder Biegedrillknicken

Der Schlankheitsgrad ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

- Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3
$$\lambda_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (\text{Gl.78})$$

- Querschnitte der Klasse 4
$$\lambda_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (\text{Gl.79})$$

$N_{cr} = N_{cr,TF}$ jedoch $N_{cr} < N_{cr,T}$

$N_{cr,TF}$ ideale Verzweigungslast für Biegedrillknicken

$N_{cr,T}$ ideale Verzweigungslast für Drillknicken

6.4.5.2 Gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse

6.4.5.2.1 Biegedrillknicken

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (\text{Gl.80})$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{Gl.81})$$

M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
$M_{b,Rd}$	Bemessungswert der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit
W_y	Widerstandsmoment <ul style="list-style-type: none"> • Querschnitte der Klasse 1 oder 2: $W_y = W_{p1,y}$ • Querschnitte der Klasse 3: $W_y = W_{e1,y}$ • Querschnitte der Klasse 4: $W_y = W_{eff,y}$
χ_{LT}	Abminderungsfaktor

6.4.5.2.2 Knicklinie für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall

Die Ermittlung der Knicklinie ist mit Ausnahme von 6.4.5.2.3 nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT} \leq 1 \quad (\text{Gl.82})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] \quad (\text{Gl.83})$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (\text{Gl.84})$$

α_{LT}	Imperfektionsbeiwert
M_{cr}	ideales Biegedrillknickmoment; Ermittlung unter Berücksichtigung des Bruttoquerschnittes $M_{cr} = \alpha_{cr} \cdot M$ [11] (Gl.85)
α_{cr}	Verzweigungslastfaktor; Ermittlung mittels FEM
M	einwirkendes Biegemoment

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 6-20: Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken; Tabelle 6.3 aus [4]

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
andere Querschnitte	—	d

Tabelle 6-21: Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken nach Gl.81; Tabelle 6.4 aus [4]

$\lambda_{LT} \leq \lambda_{LT,0}$ oder $M_{Ed}/M_{cr} \leq \lambda_{LT,0}^2$; Biegeknicknachweis darf entfallen; es sind ausschließlich Querschnittsnachweise zu führen

6.4.5.2.3 Biegedrillknicken gewalzter Querschnitte oder gleichartiger geschweißter Querschnitte

Die Ermittlung der Knicklinie ist nach folgender Gleichung zu führen:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT} \leq 1$$

$$\chi_{LT} \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} \quad (Gl.86)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \lambda_{LT}^2 \right] \quad (Gl.87)$$

$\lambda_{LT,0} = 0,4$ (Höchstwert)

$\beta = 0,75$ (Mindestwert)

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Tabelle 6-22: Empfohlene Biegedrillknicklinien nach Gl.84; Tabelle 6.5 aus [4]

Modifizierung des Abminderungsfaktors um Momentenverteilung zu berücksichtigen:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1$$

$$\chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} \quad (Gl.88)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2 \cdot (\lambda_{LT} - 0,8)^2 \right] \quad \text{jedoch} \quad f \leq 1 \quad (Gl.89)$$

Momentenverteilung	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
  	0,94 0,90 0,91
  	0,86 0,77 0,82

Tabelle 6-23: Empfohlene Korrekturbeiwerte k_c ; Tabelle 6.6 aus [4]

6.4.5.3 Auf Biegung und Druck beanspruchte gleichförmige Bauteile

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (Gl.90)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (Gl.91)$$

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$	Bemessungswerte der einwirkenden Druckkraft und Momente
$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$	Momente aus der Verschiebung der Querschnittsachsen; Querschnittsklasse 4 nach Tabelle 6-24
χ_y und χ_z	Abminderungsbeiwerte für Biegeknicken nach 6.4.5.1
χ_{LT}	Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken nach 6.4.5.2
k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz}	Interaktionsfaktoren nach Tabelle 6-25

Klasse	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{\text{pl},y}$	$W_{\text{pl},y}$	$W_{\text{el},y}$	$W_{\text{eff},y}$
W_z	$W_{\text{pl},z}$	$W_{\text{pl},z}$	$W_{\text{el},z}$	$W_{\text{eff},z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Tabelle 6-24: Werte für $N_{Rk} = f_y A_i$; $M_{i,Rk} = f_y W_i$ und $\Delta M_{i,Ed}$; Tabelle 6.7 aus [4]

Bemessungsannahmen			
Interaktionsbeiwerte	Art des Querschnitts	elastische Querschnittswerte der Klasse 3, Klasse 4	plastische Querschnittswerte der Klasse 1, Klasse 2
k_{yy}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	I-Querschnitte	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	rechteckige Hohlquerschnitte		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Für I- und H-Querschnitte und rechteckige Hohlquerschnitte, die auf Druck und einachsige Biegung $M_{y,Ed}$ belastet sind, darf der Beiwert $k_{zy} = 0$ angenommen werden.

Tabelle 6-25: Interaktionsbeiwerte für verdrehsteife Bauteile; Tabelle B.1 aus [4]

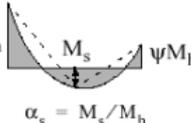
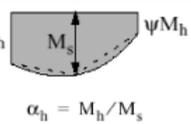
Momentenverlauf	Bereich		C_{my} und C_{mz} und C_{mLT}	
			Gleichlast	Einzellast
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
$-1 \leq \psi < 0$		$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
$-1 \leq \psi < 0$		$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$	$\boxed{AC} 0,90 + 0,10\alpha_h(1 + 2\psi) \boxed{AC}$	
Für Bauteile mit Knicken in Form seitlichen Ausweichens sollte der äquivalente Momentenbeiwert als $C_{my} = 0,9$ bzw. $C_{mz} = 0,9$ angenommen werden.				
C_{my} , C_{mz} und C_{mLT} sind in der Regel unter Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den maßgebenden seitlich gehaltenen Punkten wie folgt zu ermitteln:				
Momentenbeiwert	Biegeachse	In der Ebene gehalten		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

Tabelle 6-26: Äquivalente Momentenbeiwerte C_m zu Tabelle 6-25; Tabelle B.3 aus [4]

6.4.5.4 Allgemeines Verfahren für Knick- und Biegedrillknicknachweise für Bauteile

Dieses Verfahren kommt zur Anwendung, wenn die oben angeführten Verfahren nicht zutreffen.

Der Widerstand gegen Knicken kann mit folgendem Kriterium nachgewiesen werden:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} \geq 1 \quad \text{und} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} < \chi_{op} \quad (G1.92)$$

Der Schlankheitsgrad wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult.k}}{\alpha_{cr.op}}} \quad (G1.93)$$

$\alpha_{ult,k}$ kleinster Vergrößerungsfaktor für die Bemessungswerte der Belastung, mit dem die charakteristische Tragfähigkeit der Bauteile mit Verformungen in der Tragwerksebene erreicht wird.

$$\frac{1}{\alpha_{ult.k.xy}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$$

α_{cr} kleinster Vergrößerungsfaktor für die Bemessungswerte der Belastung, mit dem die ideale Verzweigungslast mit Verformungen aus der Haupttragwerksebene erreicht wird.

χ_{op} Abminderungsfaktor für den Schlankheitsgrad λ_{op}

6.5 EN1993-1-5 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile

6.5.1 Grundlagen für die Tragwerksplanung und Verfahren

In welchem Ausmaß sich das Beulen von Platten bei auftretenden Längsdruckspannungen auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit sowie der Ermüdung auswirkt, kann mit folgenden Kriterien ermittelt werden:

- Verfahren der „Wirksamen Breiten“
- Methode der reduzierten Spannungen

Das Verfahren der „Wirksamen Breiten“ findet Anwendung für Querschnitte der Querschnittsklasse 4. Der Nachteil bei diesem Verfahren besteht darin, dass der Querschnitt nach bestimmten Regeln des Eurocode EN 1993-1-5 abgemindert werden muss. Dabei wird der Querschnitt auf sogenannte „Wirksame Breiten“ reduziert, wodurch sich eine neue Geometrie des Querschnittes ergibt. Diese neue Geometrie, welche eine Verschiebung des Schwerpunktes von seiner ursprünglichen Lage zur Folge hat, übt nun ein zusätzliches Biegemoment auf das Bauwerk aus.

Der gesamte Aufwand für das Verfahren der „Effektiven Breiten“ kann jedoch unberücksichtigt bleiben, wenn das Verfahren für die „Methode der reduzierten Spannungen“ zulässig ist. Es ist lediglich der nachfolgend angeführte Nachweis zu erbringen. Hat das Verfahren für die „Methode der reduzierten Spannungen“ Gültigkeit, so darf mit Querschnitten der Querschnittsklasse 3 gerechnet werden. Der große Vorteil bei Querschnitten der Klasse 3 besteht darin, dass der Querschnitt mit seiner ursprünglichen Ausgangsgeometrie für die weitere Berechnung herangezogen werden darf.

6.5.2 Methode der reduzierten Spannungen

Folgendes Kriterium muss bei den gemeinsam wirkenden Spannungen $\sigma_{x,Ed}$ und $\sigma_{z,Ed}$ erfüllt werden:

$$\frac{\rho \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1 \quad (Gl.94)$$

$\alpha_{ult,k}$	kleinster Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslast, um den charakteristischen Wert der Beanspruchbarkeit am kritischen Punkt des Blechfeldes zu erreichen
ρ	Reduktionsbeiwert (Abhängig vom Schlankheitsgrad des Blechfeldes)
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert nach Kapitel 6.4

Um den Reduktionsbeiwert bestimmen zu können, muss zunächst der modifizierte Schlankheitsgrad nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (Gl.95)$$

α_{cr} kleinster Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslast, um die elastische Verzweigungsbelastung für das gesamte einwirkende Spannungsfeld zu erreichen

Das Fließkriterium kommt zur Anwendung um $\alpha_{ult,k}$ bestimmen zu können:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right) \quad (Gl.96)$$

$\sigma_{x.Ed}, \sigma_{z.Ed}$ Komponenten des Spannungsfeldes im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Der Abminderungsbeiwert ρ darf wie folgt ermittelt werden:

$$\rho = (\rho_b - \chi_c) \cdot \zeta \cdot (2 - \zeta) + \chi_c \quad (Gl.97)$$

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{jedoch} \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (Gl.98)$$

χ_c Abminderungsbeiwert, berücksichtigt knickstabähnliches Verhalten; nach Abbildung 6-11

ρ_b Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens:

$$\rho_b = 1 \quad \text{für} \quad \lambda_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

$$\rho_b = \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1 \quad \text{für} \quad \lambda_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (Gl.99)$$

$\sigma_{cr,p}$ elastische Plattenbeulspannung:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E \quad (Gl.100)$$

dabei ist der Beulwert:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot \left[(1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1 \right]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} \quad \text{für} \quad \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4 \cdot (1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} \quad \text{für} \quad \alpha > \sqrt[4]{\gamma} \quad (Gl.101)$$

mit

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}; \quad \delta = \frac{A_{sl}}{A_p}; \quad \alpha = \frac{a}{b} \geq 0,5; \quad I_p = \frac{b \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{b \cdot t^3}{10,92} \quad (Gl.102); (Gl.103); (Gl.104); (Gl.105)$$

I_{sl} Flächenträgheitsmoment des gesamten längsversteiften Blechfeldes

I_p Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung

und

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 190000 \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (Gl.106)$$

$\sigma_{cr,c}$ elastische kritische Knickspannung:

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{b_{sl,1}} \quad (Gl.107)$$

mit der Knickspannung für den Ersatzdruckstab nach Abbildung 6-12:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \quad (Gl.108)$$

$I_{sl,1}$ Flächenträgheitsmoment des Ersatzdruckstabes

$A_{sl,1}$ Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes

a Länge des ausgesteiften Blechfeldes

Es muss jedoch folgendes Kriterium erfüllt werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\gamma_{M1}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \right) \leq \rho^2 \quad (Gl.109)$$

Die Werte für α_{cr} können nach dem folgenden Kriterium für das gesamte Blechfeld ermittelt werden:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1 - \psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (Gl.110)$$

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (Gl.111)$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}} \quad (Gl.112)$$

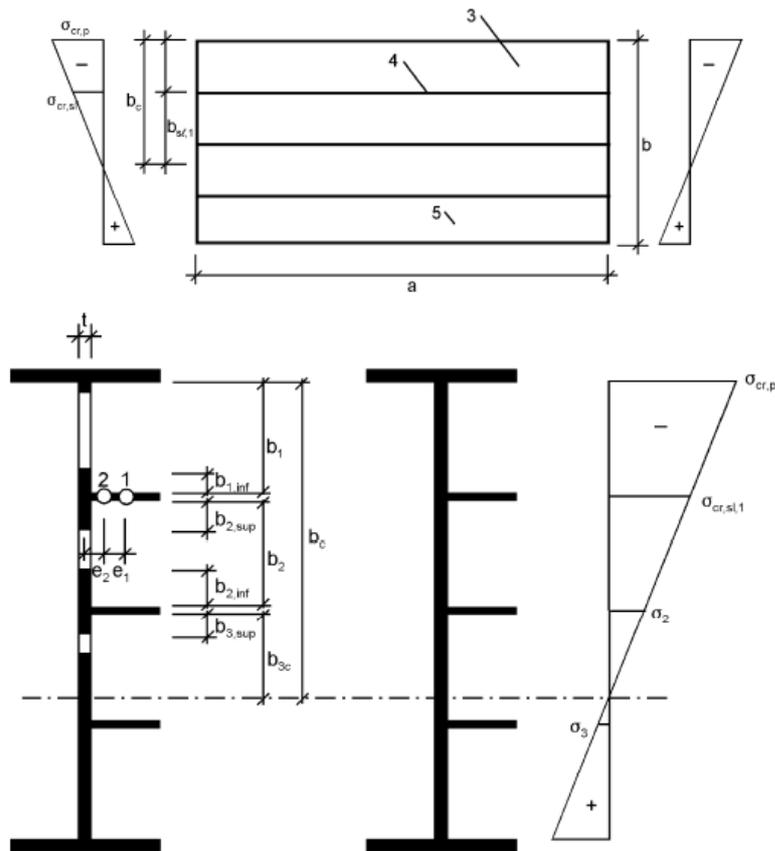


Abbildung 6-12: Längsausgesteiftes Blechfeld / Ersatzdruckstab; Bild A.1 aus [5]

- 1 Schwerlinie der Längssteife
- 2 Schwerlinie des Ersatzdruckstabes
- 3 Einzelfeld
- 4 Längssteife
- 5 Blechdicke

Tabelle 6-27: Bezeichnungen des längsausgesteiften Blechfeldes; Bild A.1 aus [5]

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen	Bedingung für ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

6.6 EN1993-1-9 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Ermüdung

6.6.1 Bemessungskonzepte

Man unterscheidet zwischen folgenden zwei Kriterien:

- Konzept der Schadenstoleranz
und
- Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung.

Die beiden Konzepte unterscheiden sich dadurch, dass bei dem Konzept der Schadenstoleranz in regelmäßigen Abständen Inspektionen und Wartungen durchgeführt werden müssen, wogegen man bei dem Konzept der ausreichenden Sicherheit von einer Zuverlässigkeit über die gesamte Nutzungsdauer ausgeht.

Tabelle 6-28: γ_{MF} -Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit; Tabelle 3.1 aus [6]

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

6.6.2 Berechnung der Spannungsschwingbreiten

Der Ermüdungsnachweis wird auf Basis der Spannungsschwingbreiten nach folgenden Verfahren ermittelt:

- Nennspannungen
- Korrigierte Nennspannungen (bei z.B. Querschnittsübergängen)
- Strukturspannungen (Kerbspannungen)

6.6.2.1 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Nennspannungen

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{FF} \cdot Q_k) \quad (\text{Gl.113})$$

$\Delta\sigma_{E,2}$	schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf 2×10^6 Schwingspiele
γ_{FF}	γ -Faktor für die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_E$
$\Delta\sigma(\gamma_{FF} Q_k)$	Spannungsschwingbreite; nach EN 1991
λ_i	Schadensäquivalenzfaktor; nach EN 1993

Für den Fall, dass keine λ_i – Werte vorhanden sind, darf folgendes Kriterium nach Palmgren-Miner angewendet werden:

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad \text{für} \quad D_d \leq 1$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \sqrt{D_d} \cdot \frac{\Delta \sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad \text{mit} \quad m=3 \quad (\text{Gl.114})$$

D_d	Schädigung nach Palmgren-Miner
n_{Ei}	Anzahl der Spannungsschwingspiele i bezogen auf die Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_i$ γ_{Ff}
N_{Ri}	Lebensdauer für die Anzahl der Schwingspiele der Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_i$ γ_{Ff} , bezogen auf die Bemessungs-Wöhlerlinie $\Delta \sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$
m	Steigung der Zeitfestigkeitlinie im Wöhlerdiagramm
$\Delta \sigma_C$	Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspielen

N_{Ri} darf jedoch nur unter der Voraussetzung ermittelt werden, dass die Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_i$ mit γ_{Ff} multipliziert und der Ermüdungsfestigkeitskennwert $\Delta \sigma_C$ durch γ_{Mf} dividiert wird.

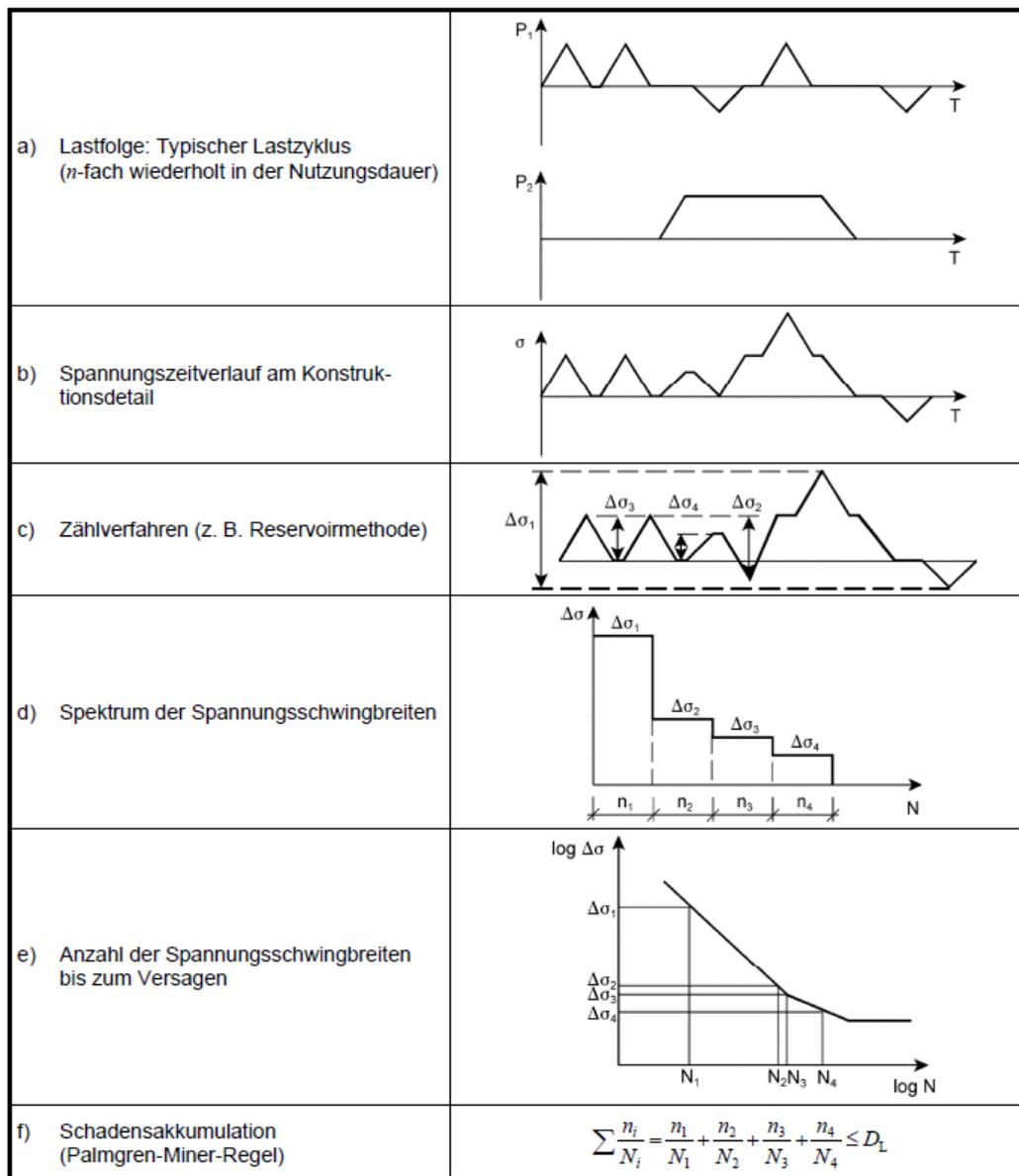


Abbildung 6-13: Prinzipieller Ablauf der Schadensakkumultion nach Palmgren-Miner; Bild A.1 aus [6]

6.6.2.2 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite korrigierter Nennspannungen

$$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{FF} \cdot Q_k) \quad (Gl.115)$$

k_f Spannungskonzentrationsfaktor; berücksichtigt die lokale Spannungserhöhung
 Q_k charakteristischer Wert einer einzeln auftretenden variablen Last

6.6.2.3 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite der Strukturspannungen (Kerbspannungen)

$$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_f(\gamma_{FF} \cdot Q_{E,2}) \quad (Gl.116)$$

k_f Spannungskonzentrationsfaktor

6.6.3 Ermüdungsfestigkeit

Für eine konstante Spannungsschwingbreite sind für unterschiedliche Kerbfallkategorien die Ermüdungsfestigkeitskurven (Wöhlerkurven) wie folgt definiert:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \text{mit} \quad m = 3 \quad \text{für} \quad N \leq 5 \cdot 10^6 \quad \text{siehe Abbildung 6-14} \quad (Gl.117)$$

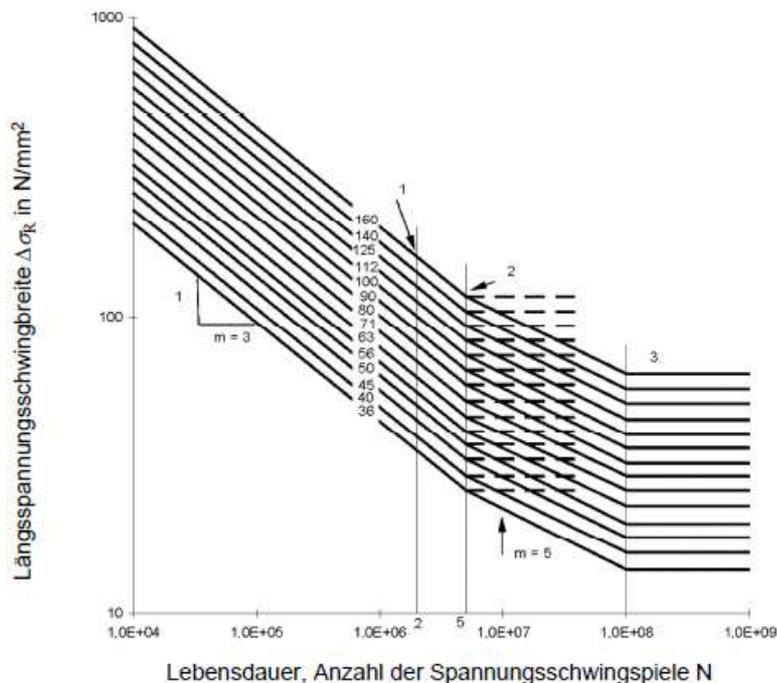


Abbildung 6-14: Ermüdungskurve für Längsspannungsschwingbreiten; Bild 7.1 aus [6]

-
- 1 Kerbfall $\Delta\sigma_C$
 - 2 Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$
 - 3 Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$
 - 4 Ertragbare Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\sigma_R$
-

6.6.4 Ermüdungsnachweis

Die auftretenden Spannungsschwingbreiten sind in der Regel zu begrenzen durch:

$$\Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y \quad \text{für Längsspannungen} \quad (\text{Gl.118})$$

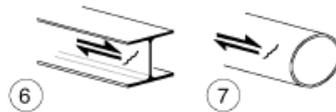
Zu erfüllendes Ermüdungskriterium:

$$\frac{\gamma_{\text{FF}} \cdot \Delta\sigma_{\text{E.2}}}{\frac{\Delta\sigma_{\text{C}}}{\gamma_{\text{Mf}}}} \leq 1 \quad (\text{Gl.119})$$

γ_{FF} Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung des einwirkenden Belastungskollektivs; bezogen auf die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{E}}$; siehe Tabelle 6-31 und Abbildung 6-16

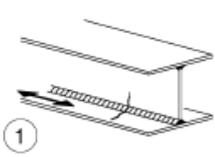
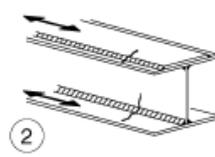
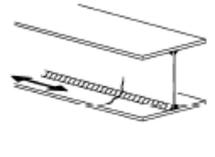
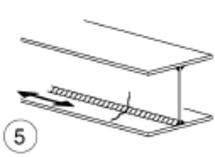
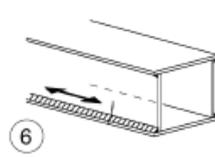
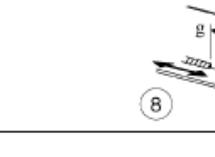
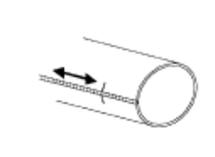
Für den Ermüdungsnachweis muss das Bauteil einer Kerbfallkategorie zugeordnet werden. Dabei unterscheidet man zwischen geschweißten und ungeschweißten Bauteilen bzw. Anschlüssen. In den folgenden Tabellen werden Beispiele für einzelne Kerbfallkategorien dargestellt:

Tabelle 6-29: Kerbfälle von ungeschweißten Bauteilen; Tabelle 8.1 aus [6]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.</p> 	<p>(AC) Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse: (AC)</p> <p>1) (AC) Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten; (AC)</p> <p>2) (AC) Walzprofile mit gewalzten Kanten; (AC)</p> <p>3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3): Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.</p>
140		<p>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</p> <p>4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p> <p>5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung.</p> <p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.</p>
125		<p>5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung.</p> <p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>Kerbfälle 4) und 5): Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut</p>
100 $m = 5$		<p>6) und 7)</p> <p>(AC) Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) (AC)</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7): Δr berechnet nach: $r = \frac{V S(r)}{I r}$</p>

Für Kerbfall 1–5 ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden.

Tabelle 6-30: Kerbfälle von geschweißten zusammengesetzten Querschnitten; Tabelle 8.2 aus [6]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125	 	<u>Durchgehende Längsnähte:</u> 1) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert AC beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.	<u>Kerbfälle 1) und 2):</u> Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.
112	 	3) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert AC einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerngruppe 100 zuzuordnen.
100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) AC Von Hand oder mit Automaten oder voll mechanisiert AC einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.	5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschärfen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
100		7) AC Ausgebesserte automaten- oder voll mechanisiert geschweißte AC oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte nach Kerbfall 1) bis 6).	7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.
80	 $g/h \leq 2,5$	8) Unterbrochene Längsnähte.	8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
71		9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.	9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnäht, beidseitig in Lastrichtung blechen geschliffen, 100 % ZFP.	
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.	
90		10) Mit Ansatzstellen.	
140		11) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) AC gestrichener Text AC Wanddicke $t \leq 12,5$ mm
125		11) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Wanddicke $t > 12,5$ mm
90		11) Mit Ansatzstellen.	

Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfallkategorien für Automaten-schweißung.

Ermittlung der schadensäquivalenten konstanten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_E$:

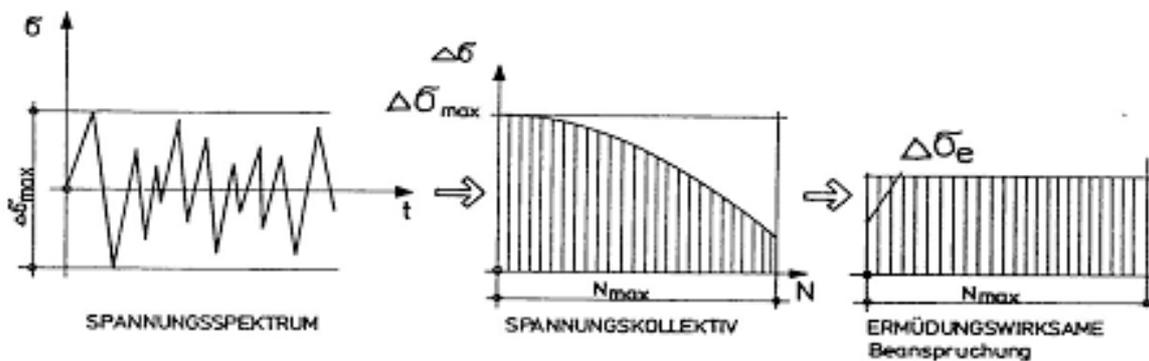


Abbildung 6-15: Überführung eines einwirkenden Belastungskollektivs in ein schadensäquivalentes Spannungskollektiv mit konstanter Belastungsamplitude; Kapitel 7 aus [13]

$$\Delta\sigma_E = \gamma_{Ff} \Delta\sigma_{\max} \quad (\text{Gl.120})$$

$\Delta\sigma_{\max}$	Maximal auftretende Spannungsschwingbreite des Belastungskollektivs
$\Delta\sigma_E$	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite bezogen auf n_{\max}

γ_{Ff} ist abhängig vom auftretenden Belastungskollektiv und für einige Belastungsfälle standardisiert:

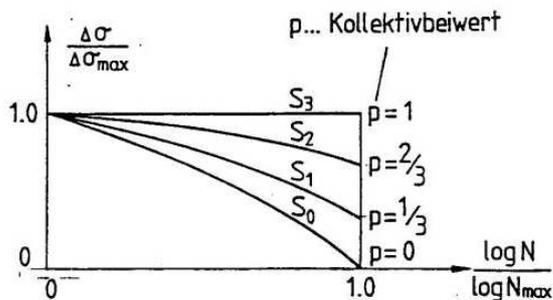


Abbildung 6-16: Standardisierte Belastungskollektive; Kapitel 7 aus [13]

Tabelle 6-31: Beiwerte γ_{Ff} für die Belastungskollektive; Kapitel 7 aus [13]

	$m = 3$	$m = 5$
S_0	0,26	0,33
S_1	0,47	0,49
S_2	0,73	0,73
S_3	1,0	1,0

7 Anwendung des Eurocode

7.1 Problembeschreibung

Es soll die prinzipielle Anwendung des Eurocode 3 anhand der Drehsäule einer ESU – Anlage aufgezeigt werden. Dabei wurde zwischen zwei Lastfällen unterschieden.

- Lastfall 1: Elektroden- und Haubenwagen befinden sich an ihrer jeweils obersten Position an der Säule und verharren in Lage. Es kommt zu zweierlei Einwirkungen:
 - 1) ständige Belastung durch das Eigengewicht und
 - 2) Nutzlast durch die Schmelzelektrode.
- Lastfall 2: Es wird eine Not-Aus-Situation dargestellt. Elektroden- und Haubenwagen befinden sich ebenfalls an ihrer obersten Position an der Säule und werden bei der Abwärtsbewegung abrupt abgebremst (zum Stillstand gebracht). Dabei kommt zusätzlich zu der ständigen Belastung und der Nutzlast noch eine außergewöhnliche Belastung, welche aus der Beschleunigung bzw. der Verzögerung herrührt.

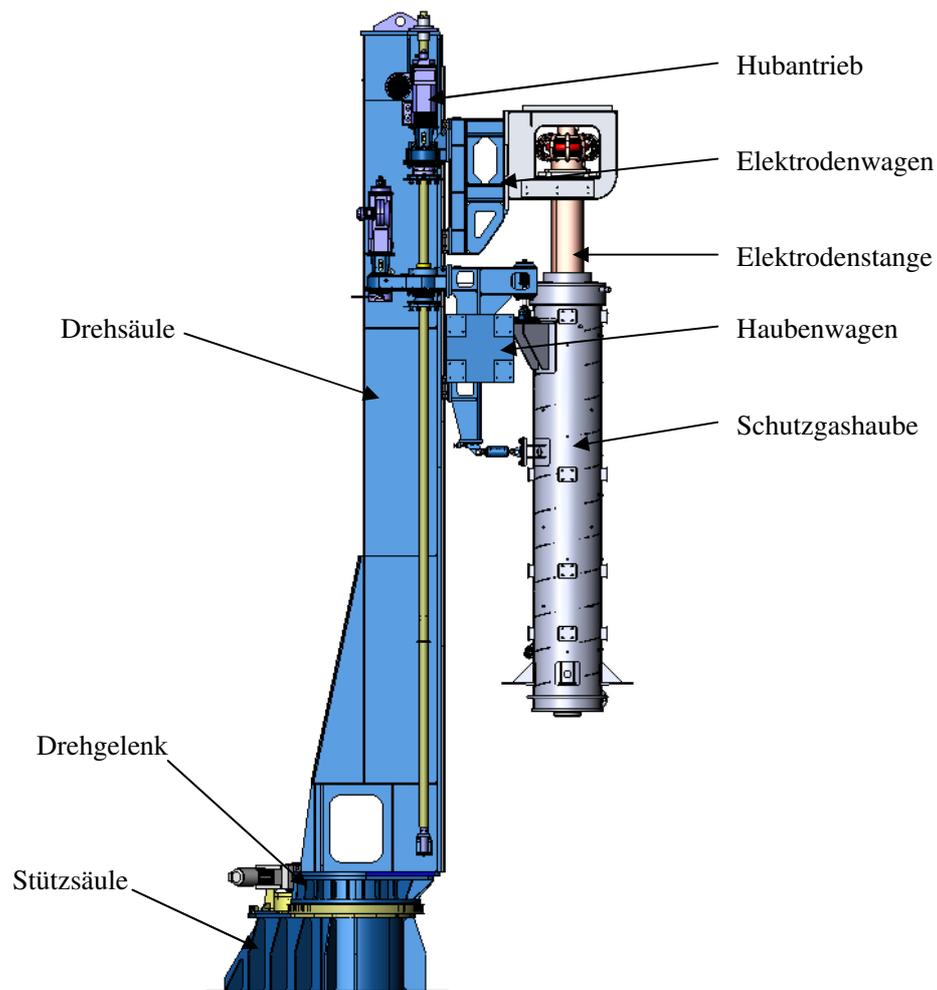


Abbildung 7-1: Ofenkopf einer ESU-Anlage; Allgemeine Darstellung

In beiden Lastfällen sind folgende Nachweise zu erbringen:

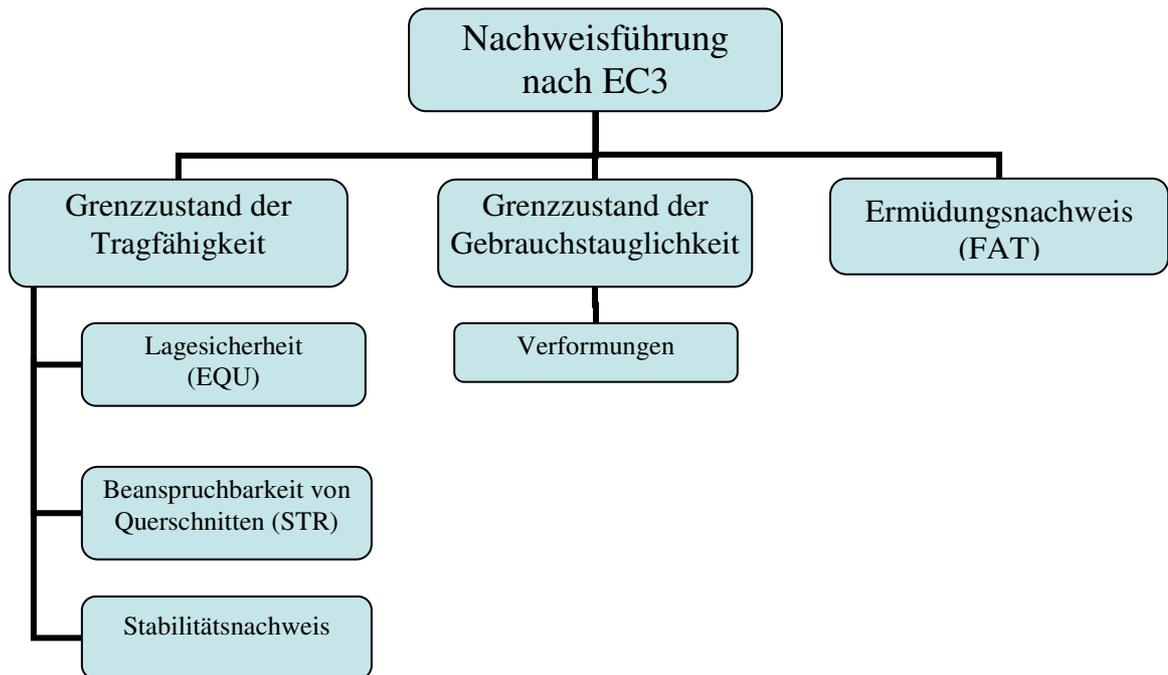


Abbildung 7-2: Nachweisführung nach Eurocode 3

Dabei erfolgt die Nachweisführung nach dem Prinzip Elastisch – Elastisch, was soviel bedeutet wie, dass die Schnittgrößen bzw. die daraus resultierenden Spannungen sowie die Beanspruchbarkeit von Querschnitten nach der Elastizitätstheorie ermittelt werden [12]. Der Berechnungsablauf ist in beiden Lastfällen derselbe. Jedoch wird im Lastfall 2 die Anwendung zur DIN EN 1991-3 [3] (Berücksichtigung von außergewöhnlichen Kräften) näher gebracht.

7.1.1 Werkstoff

Die gesamte Säule besteht aus einer Blech-Schweißkonstruktion mit dem Werkstoff S235 (1.0038)

$f_y=$	235	N/mm ²	Streckgrenze
$f_u=$	360	N/mm ²	Zugfestigkeit
$E=$	210000	N/mm ²	Elastizitätsmodul
$G=$	81000	N/mm ²	Schubmodul
$\nu=$	0,3		Poissonsche Zahl
$\alpha=$	$12 \cdot 10^{-6}$	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient

Tabelle 7-1: Werkstoffdaten S235 (1.0038)

7.1.2 Einwirkungen

Einwirkungen:

Ständige-Lasten			
Elektrodenwagen-Eigengewicht	G_{EW}	5200 kg	52000 N
Haubenwagen-Eigengewicht	G_{HW}	6200 kg	62000 N
Hubantrieb-Eigengewicht	G_{Hub}	2000 kg	20000 N
Säule-oben	G_{S1}	3710 kg	37100 N
Säule-mitte	G_{S2}	1965 kg	19650 N
Säule-unten	G_{S3}	870 kg	8700 N
Säule-Eigengewicht	G_S	6545 kg	65450 N

Nutz-Lasten			
Elektrodenmasse	Q_{EL}	5000 kg	50000 N

7.1.3 Abmessungen

x-Achse			
Obere zu untere Führungsschiene	x_{IEW}	1200	mm
Obere zu untere Führungsschiene	x_{IHW}	1200	mm
Säuleneinspannung-betrachteter Querschnitt	x_{0S}	255	mm
betrachteter Querschnitt-Haubenwagen	x_{1S}	5660	mm
Haubenwagen-Elektrodenwagen	x_{2S}	417	mm
Obere Säule	x_{1S-OS}	5770	mm
Mittlere Säule	x_{2S-MS}	2510	mm
Untere Säule	x_{3S-US}	975	mm
Säulenhöhe	h	9255	mm

y-Achse			
Spkt. Elektrodenwagen-Führungsschienen	y_{IEW}	1161	mm
Spkt. Elektrode-Führungsschienen	y_{2EW}	1361	mm
Halterung-Führungsschienen	y_{3EW}	46	mm
Spkt. Haubenwagen-Führungsschienen	y_{IHW}	1057	mm
Halterung-Führungsschienen	y_{2HW}	46	mm
Spkt. untere Säule-Führungsschiene	y_{0S}	568	mm
Halterung-Spkt. untere Säule	y_{1S}	351,5	mm
Spkt. obere Säule-Spkt. untere Säule	y_{2S}	122	mm
Spkt. mittlere Säule-Spkt. obere Säule	y_{3S}	157,5	mm

z-Achse			
Spkt. Elektrodenwagen-Führungsschienen	Z _{1EW}	268	mm
Spkt. Elektrode-Führungsschienen	Z _{2EW}	300	mm
Halterung-Führungsschienen	Z _{3EW}	290	mm
Führungsschiene-Führungsschiene	Z _{4EW}	600	mm
Spkt. Haubenwagen-Führungsschienen	Z _{1HW}	184	mm
Halterung-Führungsschienen	Z _{2HW}	290	mm
Führungsschiene-Führungsschiene	Z _{3HW}	600	mm
Halterung-Spkt. Säule	Z _{1S}	595	mm
Führungsschiene 1-Spkt. Säule	Z _{2S}	300	mm
Führungsschiene 2-Spkt. Säule	Z _{3S}	300	mm

7.2 Lastfall 1

7.2.1 Ermittlung der maßgebenden Kräfte

7.2.1.1 Elektrodenwagen

Durch Ansetzen der drei Gleichgewichtsbedingungen können die Kräfte, welche auf das System einwirken ermittelt werden. Dabei wird zwischen „Ständige Last“ (Eigengewicht) und „Nutzlast“ (Elektrodengewicht) unterschieden.

Kräfte auf Führung in x-y-Ebene:

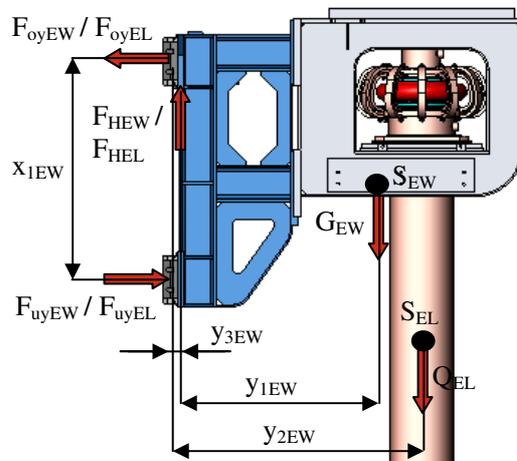


Abbildung 7-3: Elektrodenwagen x-y-Ebene; LF1

Ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad G_{EW} y_{1EW} - F_{oyEW} x_{1EW} - F_{HEW} y_{3EW} = 0 \\ & \quad F_{oyEW} = (G_{EW} y_{1EW} - F_{HEW} y_{3EW}) / x_{1EW} \quad F_{oyEW} = 48316,7 \text{ N} \\ \sum F_y=0 & \quad F_{oyEW} - F_{uyEW} = 0 \\ & \quad F_{uyEW} = F_{oyEW} \quad F_{uyEW} = 48316,7 \text{ N} \\ \sum F_x=0 & \quad G_{EW} - F_{HEW} = 0 \\ & \quad F_{HEW} = G_{EW} \quad F_{HEW} = 52000 \text{ N} \end{aligned}$$

Nutzlast:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad Q_{EL} y_{2EW} - F_{oyEL} x_{1EW} - F_{HEL} y_{3EW} = 0 \\ & \quad F_{oyEL} = (Q_{EL} y_{2EW} - F_{HEL} y_{3EW}) / x_{1EW} \quad F_{oyEL} = 54791,7 \text{ N} \\ \sum F_y=0 & \quad F_{oyEL} - F_{uyEL} = 0 \\ & \quad F_{uyEL} = F_{oyEL} \quad F_{uyEL} = 54791,7 \text{ N} \\ \sum F_x=0 & \quad Q_{EL} - F_{HEL} = 0 \\ & \quad F_{HEL} = Q_{EL} \quad F_{HEL} = 50000 \text{ N} \end{aligned}$$

Kräfte auf Führung in x-z-Ebene:

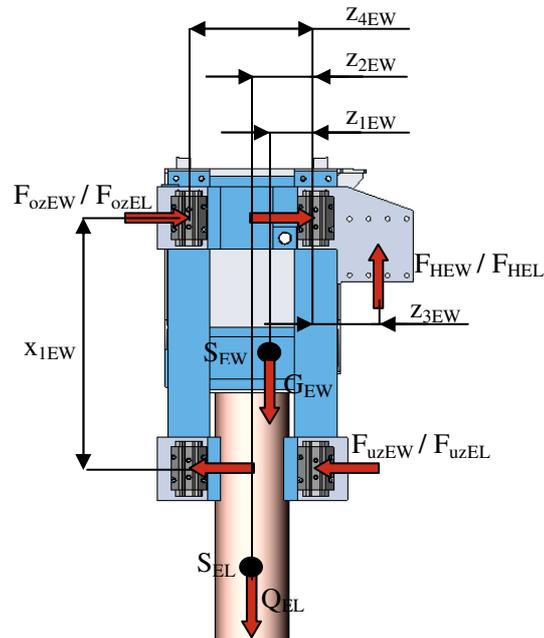


Abbildung 7-4: Elektrodenwagen x-z-Ebene; LF1

ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad G_{EW} z_{1EW} - F_{ozEW} x_{1EW} + F_{HEW} z_{3EW} = 0 \\ & \quad F_{ozEW} = (G_{EW} z_{1EW} + F_{HEW} z_{3EW}) / x_{1EW} \quad F_{ozEW} = 24180 \quad \text{N} \\ \sum F_z=0 & \quad F_{ozEW} - F_{uzEW} = 0 \\ & \quad F_{uzEW} = F_{ozEW} \quad F_{uzEW} = 24180 \quad \text{N} \\ \sum F_x=0 & \quad G_{EW} - F_{HEW} = 0 \\ & \quad F_{HEW} = G_{EW} \quad F_{HEW} = 52000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Nutzlast:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad Q_{EL} z_{2EW} - F_{ozEL} x_{1EW} + F_{HEL} z_{3EW} = 0 \\ & \quad F_{ozEL} = (Q_{EL} z_{2EW} + F_{HEL} z_{3EW}) / x_{1EW} \quad F_{ozEL} = 24583,3 \quad \text{N} \\ \sum F_z=0 & \quad F_{ozEL} - F_{uzEL} = 0 \\ & \quad F_{uzEL} = F_{ozEL} \quad F_{uzEL} = 24583,3 \quad \text{N} \\ \sum F_x=0 & \quad G_{EW} - F_{HEL} = 0 \\ & \quad F_{HEL} = Q_{EL} \quad F_{HEL} = 50000 \quad \text{N} \end{aligned}$$

7.2.1.2 Haubenwagen

Durch Ansetzen der drei Gleichgewichtsbedingungen können die Kräfte, welche auf das System einwirken ermittelt werden. Am Haubenwagen werden keine Nutzlasten eingeleitet wodurch lediglich eine „Ständige Last“ (Eigengewicht) am System wirkt.

Kräfte auf Führung in x-y-Ebene:

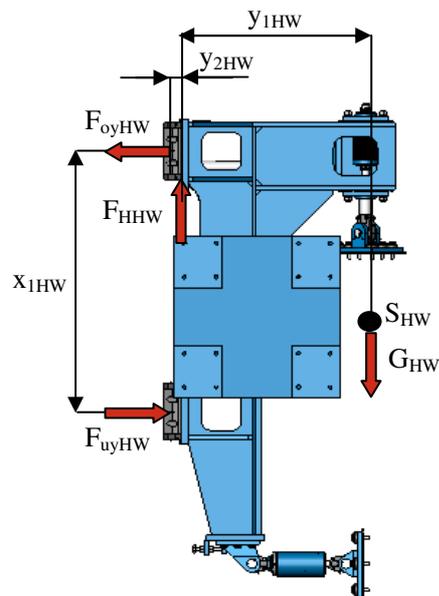


Abbildung 7-5: Haubenwagen x-y-Ebene; LF1

ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad G_{HW} y_{1HW} - F_{oyHW} x_{1HW} - F_{HHW} y_{2HW} = 0 \\ & \quad F_{oyHW} = (G_{HW} y_{1HW} - F_{HHW} y_{2HW}) / x_{1HW} \quad F_{oyHW} = 52235 \text{ N} \\ \sum F_y=0 & \quad F_{oyHW} - F_{uyHW} = 0 \\ & \quad F_{uyHW} = F_{oyHW} \quad F_{uyHW} = 52235 \text{ N} \\ \sum F_x=0 & \quad G_{HW} - F_{HHW} = 0 \\ & \quad F_{HHW} = G_{HW} \quad F_{HHW} = 62000 \text{ N} \end{aligned}$$

Kräfte auf Führung in x-z-Ebene:

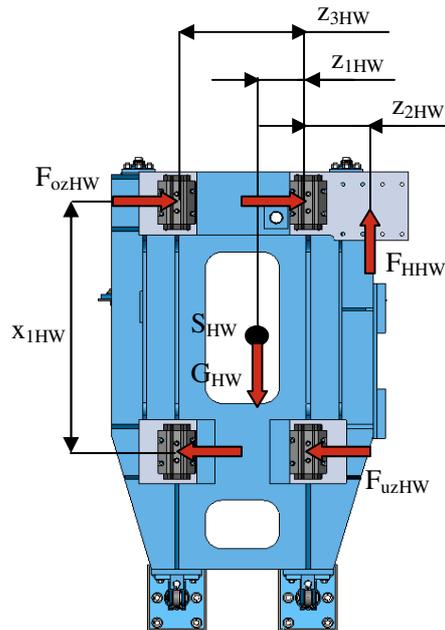


Abbildung 7-6: Haubenwagen x-z-Ebene; LF1

ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 & \quad G_{HW} z_{1HW} - F_{ozHW} x_{1HW} + F_{HHW} z_{2HW} = 0 \\ & \quad F_{ozHW} = (G_{HW} z_{1HW} + F_{HHW} z_{2HW}) / x_{1HW} \quad F_{ozHW} = 24490 \text{ N} \\ \sum F_z=0 & \quad F_{ozHW} - F_{uzHW} = 0 \\ & \quad F_{uzHW} = F_{ozHW} \quad F_{uzHW} = 24490 \text{ N} \\ \sum F_x=0 & \quad G_{HW} - F_{HHW} = 0 \\ & \quad F_{HHW} = G_{HW} \quad F_{HHW} = 62000 \text{ N} \end{aligned}$$

7.2.1.3 Säule

Die am Elektroden- und Haubenwagen ermittelten Kräfte werden im Weiteren durch das Freimachen der Bauteile auf die Drehsäule übertragen.

In der x-y-Ebene wird die Drehsäule aufgrund ihres nicht konstanten Querschnittes in drei Abschnitte unterteilt, wodurch sich durch die „Exzentrizität“ der oberen beiden Abschnitte zusätzliche Biegemomente ausbilden.

Kräfte auf Säule in x-y-Ebene:

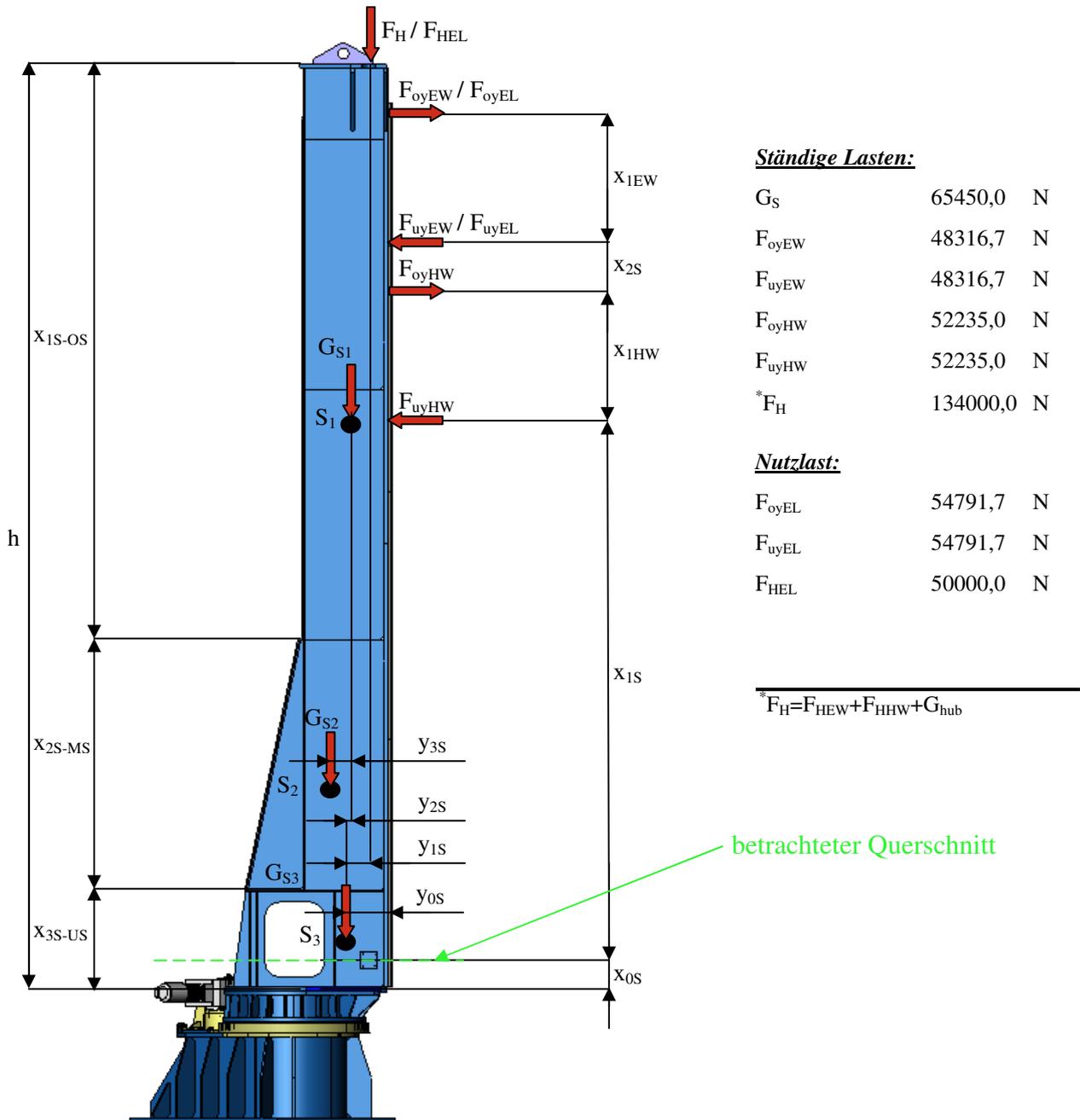
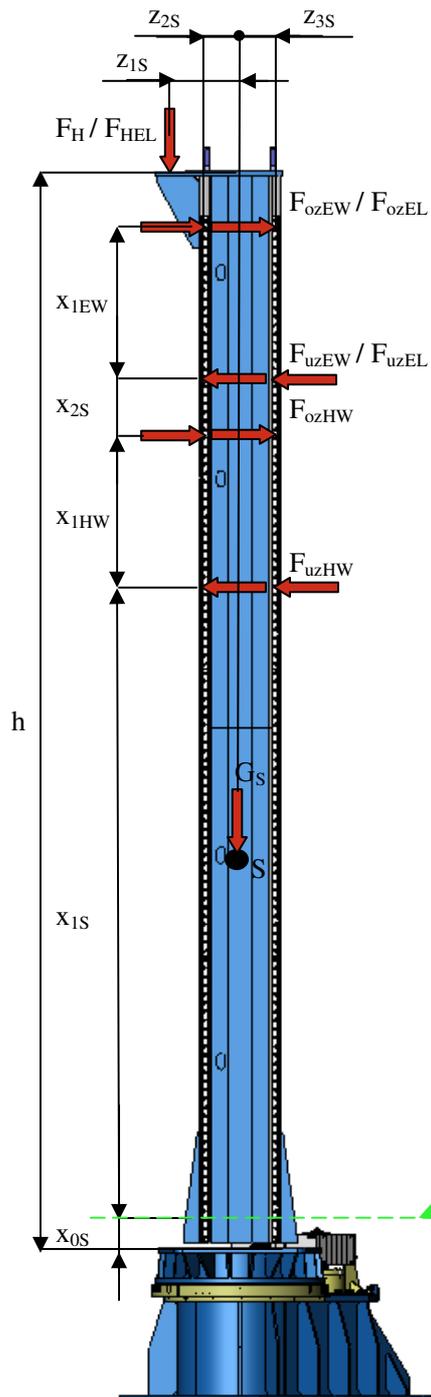


Abbildung 7-7: Drehsäule x-y-Ebene; LF1

Kräfte auf Säule in x-z-Ebene:



Ständige Lasten:

G_S	65450,0	N
F_{ozEW}	24180,0	N
F_{uzEW}	24180,0	N
F_{ozHW}	24490,0	N
F_{uzHW}	24490,0	N
$*F_H$	134000,0	N

Nutzlast:

F_{ozEL}	24583,3	N
F_{uzEL}	24583,3	N
F_{HEL}	50000,0	N

$*F_H = F_{HEW} + F_{HHW} + G_{hub}$

Abbildung 7-8: Drehsäule x-z-Ebene; LF1

7.2.2 Tragwerksberechnung

7.2.2.1 Einfluss der Tragwerksverformung

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$$

(nach Gl.45)

Aus dem Finite-Elemente-Modell ergibt sich für α_{cr} ein Wert von 35,204.

$\alpha_{cr} = 35.204 > 10 \longrightarrow$ Die elastische Berechnung des Tragwerks nach der Theorie I. Ordnung ist demnach zulässig.

7.2.2.2 Imperfektionen

Der Einfluss der Bauteil-Imperfektionen darf aufgrund der Zulässigkeit der Theorie I. Ordnung vernachlässigt werden. Sie werden jedoch bei dieser Anwendung aus Sicherheitsgründen mitberücksichtigt.

Eine globale Anfangsschiefstellung kann vernachlässigt werden, wenn folgende Beziehung nach Gl.51 erfüllt wird:

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}$$

x-v-EBENE:

$$H_{Ed,xy} = \gamma_{G,sup} (F_{oyEW} - F_{uyEW} + F_{oyHW} - F_{uyHW}) + \gamma_Q (F_{oyEL} - F_{uyEL}) \quad H_{Ed,xy} = 0 \quad N$$

$$V_{Ed,xy} = \gamma_{G,sup} (G_S + F_H) + \gamma_Q F_{HEL} \quad V_{Ed,xy} = 272395 \quad N$$

$$H_{ed,xy} \geq 0,15 V_{ed,xy} \longrightarrow \text{Schiefstellung}$$

x-z-EBENE:

$$H_{Ed,xz} = \gamma_{G,sup} (F_{ozEW} - F_{uzEW} + F_{ozHW} - F_{uzHW}) + \gamma_Q (F_{ozEL} - F_{uzEL}) \quad H_{Ed,xz} = 0 \quad N$$

$$V_{Ed,xz} = \gamma_{G,sup} (G_S + F_H) + \gamma_Q F_{HEL} \quad V_{Ed,xz} = 272395 \quad N$$

$$H_{ed,xz} \geq 0,15 V_{ed,xz} \longrightarrow \text{Schiefstellung}$$

$\gamma_{G,sup}$ und γ_Q nach Tabelle 6-3 ($\gamma_{G,sup} = 1,1 / \gamma_Q = 1,5$)

Schiefstellung nach Gl.47:

$$\phi_0 = \frac{1}{200}$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{jedoch} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1 \quad \longrightarrow \quad \alpha_h = 0,657$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad \text{mit } m=1 \quad \longrightarrow \quad \alpha_m = 1$$

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad \longrightarrow \quad \phi = 0,00329$$

Verschiebung des Schwerpunkts (Exzentrizität):

$$e_N = \square h \quad \square \ll \text{---} \rightarrow \tan(\square) \approx \square$$

$$e_{N,xy} = \square h \quad e_{N,xy} = 30,422 \text{ mm}$$

$$e_{N,xz} = \square h \quad e_{N,xz} = 30,422 \text{ mm}$$

7.2.2.3 Querschnitt

Ermittlung des Schwerpunktes und der Widerstandsmomente im betrachteten Querschnitt:

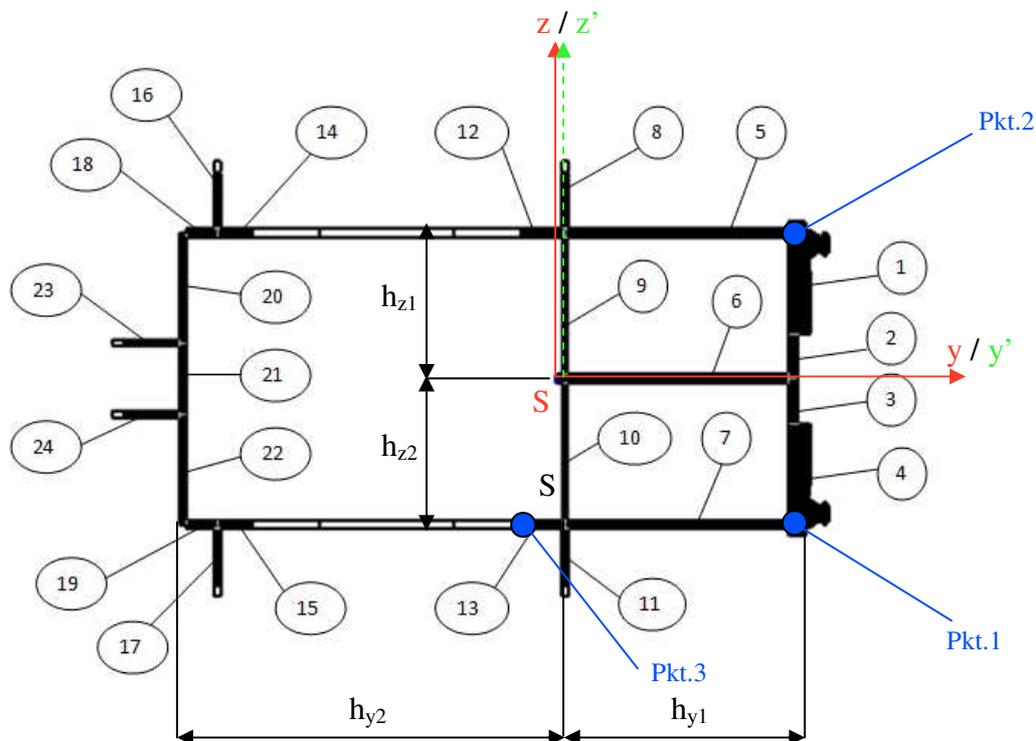


Abbildung 7-9: Betrachteter Querschnitt; LF1

Äußere Randfaser-Abstände vom fiktiven Ursprung:

$$h_{y1} = 538\text{mm} \quad h_{z1} = 460\text{mm}$$

$$h_{y2} = 990\text{mm} \quad h_{z2} = 460\text{mm}$$

Schwerpunktskoordinaten und Flächenträgheitsmomente 2.Grades:

$$y_S = \frac{\sum_i y_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} \quad ; \quad z_S = \frac{\sum_i z_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} \quad ; \quad I_y = \sum_i \left(\frac{y_i^2 \cdot z_i^3}{12} + z_{Si}^2 \cdot A_i \right) \quad ; \quad I_z = \sum_i \left(\frac{z_i^2 \cdot y_i^3}{12} + y_{Si}^2 \cdot A_i \right)$$

Tabelle 7-2: Querschnittswerte im betrachteten Querschnitt; LF1

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_y [mm ⁴]	I_z [mm ⁴]
<u>1</u>	38,0	225,0	8550,0	519,0	212,5	4437450,0	1816875,0	531,6	212,5	422156250,0	2416998655,0
<u>2</u>	20,0	100,0	2000,0	510,0	50,0	1020000,0	100000,0	522,6	50,0	6666666,7	546231184,1
<u>3</u>	20,0	100,0	2000,0	510,0	-50,0	1020000,0	-100000,0	522,6	-50,0	6666666,7	546231184,1
<u>4</u>	38,0	225,0	8550,0	519,0	-212,5	4437450,0	-1816875,0	531,6	-212,5	422156250,0	2416998655,0
<u>5</u>	519,0	20,0	10380,0	259,5	325,0	2693610,0	3373500,0	272,1	325,0	1096733500,0	1001361929,0
<u>6</u>	510,0	20,0	10200,0	255,0	0,0	2601000,0	0,0	267,6	0,0	340000,0	951355694,5
<u>7</u>	519,0	20,0	10380,0	259,5	-325,0	2693610,0	-3373500,0	272,1	-325,0	1096733500,0	1001361929,0
<u>8</u>	15,0	135,0	2025,0	0,0	392,5	0,0	794812,5	12,6	392,5	315039375,0	358067,7
<u>9</u>	10,0	325,0	3250,0	0,0	162,5	0,0	528125,0	12,6	162,5	114427083,3	540822,4
<u>10</u>	10,0	325,0	3250,0	0,0	-162,5	0,0	-528125,0	12,6	-162,5	114427083,3	540822,4
<u>11</u>	15,0	135,0	2025,0	0,0	-392,5	0,0	-794812,5	12,6	-392,5	315039375,0	358067,7
<u>12</u>	100,0	20,0	2000,0	-50,0	325,0	-100000,0	650000,0	-37,4	325,0	211316666,7	4468267,7
<u>13</u>	100,0	20,0	2000,0	-50,0	-325,0	-100000,0	-650000,0	-37,4	-325,0	211316666,7	4468267,7
<u>14</u>	79,5	20,0	1590,0	-739,8	325,0	-1176202,5	516750,0	-727,2	325,0	167996750,0	841608415,3
<u>15</u>	79,5	20,0	1590,0	-739,8	-325,0	-1176202,5	-516750,0	-727,2	-325,0	167996750,0	841608415,3
<u>16</u>	15,0	135,0	2025,0	-779,5	392,5	-1578487,5	794812,5	-766,9	392,5	315039375,0	1191097278,0
<u>17</u>	15,0	135,0	2025,0	-779,5	-392,5	-1578487,5	-794812,5	-766,9	-392,5	315039375,0	1191097278,0
<u>18</u>	70,5	20,0	1410,0	-814,8	325,0	-1148797,5	458250,0	-802,2	325,0	148978250,0	907902608,4
<u>19</u>	70,5	20,0	1410,0	-814,8	-325,0	-1148797,5	-458250,0	-802,2	-325,0	148978250,0	907902608,4
<u>20</u>	15,0	245,0	3675,0	-857,5	202,5	-3151312,5	744187,5	-844,9	202,5	169080625,0	2623659089,0
<u>21</u>	15,0	160,0	2400,0	-857,5	0,0	-2058000,0	0,0	-844,9	0,0	5120000,0	1713410018,0
<u>22</u>	15,0	245,0	3675,0	-857,5	-202,5	-3151312,5	-744187,5	-844,9	-202,5	169080625,0	2623659089,0
<u>23</u>	132,5	15,0	1987,5	-923,8	80,0	-1835953,1	159000,0	-911,2	80,0	12757265,6	1653017736,0
<u>24</u>	132,5	15,0	1987,5	-923,8	-80,0	-1835953,1	-159000,0	-911,2	-80,0	12757265,6	1653017736,0
			A_{ges} [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{y,ges}$ [mm ⁴]	$I_{z,ges}$ [mm ⁴]
			90385,0			-1136386,3	0,0			5965843614,6	25039253819,0

Schwerpunktskoordinaten im betrachteten Querschnitt:

$y_s = -12,57$ mm

$z_s = 0$ mm

Äußerer-Randfaser-Abstand:

$$h_{z,\min} = h_{z1} - z_s \quad h_{z,\min} = 460,0 \text{ mm}$$

$$h_{z,\max} = h_{z2} + z_s \quad h_{z,\max} = 460,0 \text{ mm}$$

$$h_{y,\min} = h_{y1} - y_s \quad h_{y,\min} = 550,6 \text{ mm}$$

$$h_{y,\max} = h_{y2} + y_s \quad h_{y,\max} = 977,4 \text{ mm}$$

$$W_{y,\min} = I_{y,\text{ges}} / h_{z,\max} \quad W_{y,\min} = 12969225,3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,\max} = I_{y,\text{ges}} / h_{z,\min} \quad W_{y,\max} = 12969225,3 \text{ mm}^3$$

$$W_{z,\min} = I_{z,\text{ges}} / h_{y,\max} \quad W_{z,\min} = 25617511,0 \text{ mm}^3$$

$$W_{z,\max} = I_{z,\text{ges}} / h_{y,\min} \quad W_{z,\max} = 45478557,9 \text{ mm}^3$$

7.2.2.4 Spannungen im betrachteten Querschnitt

Analytische Ermittlung der Spannungen:

ständige Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,st} = (F_H + G_S) / A_{\text{ges}}$$

$$\sigma_{d,xy,st} = -2,21 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,st} = M_{xy,st} / W_z$$

$$\sigma_{b1,xy,st} = -3,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xy,st} = -3,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xy,st} = 0,63 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,st} = M_{xz,st} / W_y$$

$$\sigma_{b1,xz,st} = -2,11 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xz,st} = 2,11 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xz,st} = -2,11 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,st} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyHW} x_{1S} + F_H (y_{1S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$M_{xy,st} = 1790544449,18 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,st} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzHW} x_{1S} - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$M_{xz,st} = -27393674,18 \text{ Nmm}$$

Nutz-Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,EL} = F_{HEL} / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,EL} = -0,55 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,EL} = M_{xy,EL} / W_z$$

$$\sigma_{b1,xy,EL} = -1,78 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xy,EL} = -1,78 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xy,EL} = 0,30 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,EL} = M_{xz,EL} / W_y$$

$$\sigma_{b1,xz,EL} = -0,14 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xz,EL} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xz,EL} = -0,14 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,EL} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{HEL} (y_{1S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL} = 84846101,57 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,EL} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,zy})$$

$$M_{xz,EL} = -1771101,57 \text{ Nmm}$$

Spannungen im Querschnitt:

Maximale Spannung im Punkt 1:

$$\sigma_{x,max,1} = (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b1,xy,st} + \sigma_{b1,xz,st}) + (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b1,xy,EL} + \sigma_{b1,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,max,1} = -10,81 \text{ N/mm}^2$$

Maximale Spannung im Punkt 2:

$$\sigma_{x,max,2} = (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b2,xy,st} + \sigma_{b2,xz,st}) + (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b2,xy,EL} + \sigma_{b2,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,max,2} = -6,31 \text{ N/mm}^2$$

Maximale Spannung im Punkt 3:

$$\sigma_{x,max,3} = (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b3,xy,st} + \sigma_{b3,xz,st}) + (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b3,xy,EL} + \sigma_{b3,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,max,3} = -4,09 \text{ N/mm}^2$$

Bemessung der Spannung im Punkt 1:

$$\sigma_{x,Ed,1} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b1,xy,st} + \sigma_{b1,xz,st}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b1,xy,EL} + \sigma_{b1,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,Ed,1} = -14,98 \text{ N/mm}^2$$

Bemessung der Spannung im Punkt 2:

$$\sigma_{x,Ed,2} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b2,xy,st} + \sigma_{b2,xz,st}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b2,xy,EL} + \sigma_{b2,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,Ed,2} = -8,87 \text{ N/mm}^2$$

Bemessung der Spannung im Punkt 3:

$$\sigma_{x,Ed,3} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b3,xy,st} + \sigma_{b3,xz,st}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b3,xy,EL} + \sigma_{b3,xz,EL})$$

$$\sigma_{x,Ed,3} = -5,58 \text{ N/mm}^2$$

$\gamma_{G,j,sup}$ und $\gamma_{Q,1}$ nach Tabelle 6-4 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,35 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

Ermittlung der Spannungen mittels FEM:

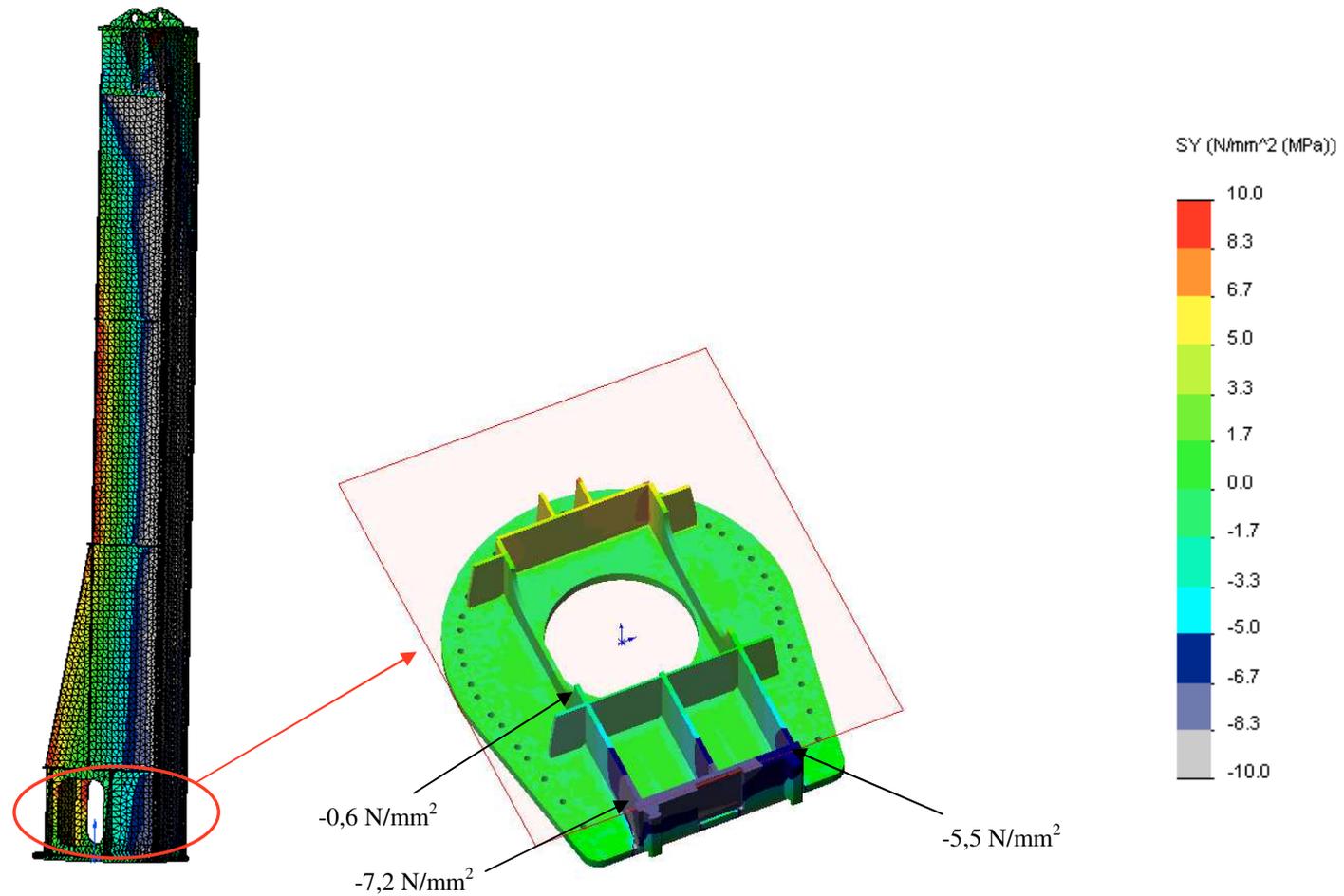


Abbildung 7-10: Längsspannungen im betrachteten Querschnitt nach FEM; LF1

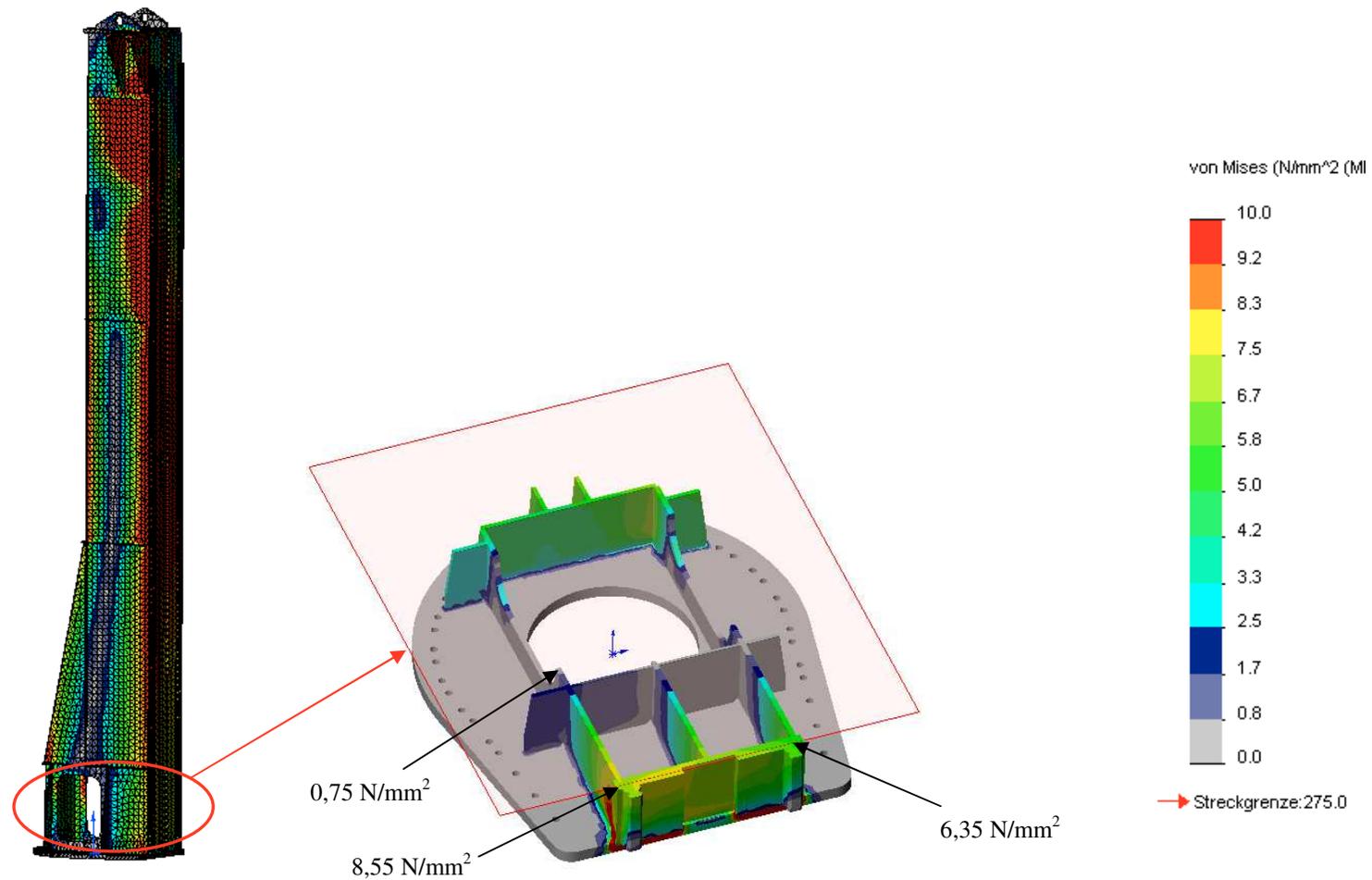


Abbildung 7-11: Spannungsverteilung nach von Mises im betrachteten Querschnitt; LF1

Beurteilung der Spannungen:

Die Spannungen aus der analytischen und der FEM Berechnung stimmen sehr gut überein. Die geringen Unterschiede resultieren aus einer geringfügigen Idealisierung des Querschnittes in der analytischen Betrachtung.

7.2.2.5 Methode der reduzierten Spannungen

Es wird der Nachweis erbracht, dass die Bemessung des Bauwerks mit Querschnitten der Klasse 3 zulässig ist. Dabei werden zwei Blechfelder näher betrachtet.

Blechfeld 1:

a) Ausgesteiftes Blechfeld:

Zur Bestimmung des Flächenträgheitsmoments für das gesamte längsversteifte Blechfeld 1, welches in weiterer Folge zur Ermittlung des Beulwertes benötigt wird.

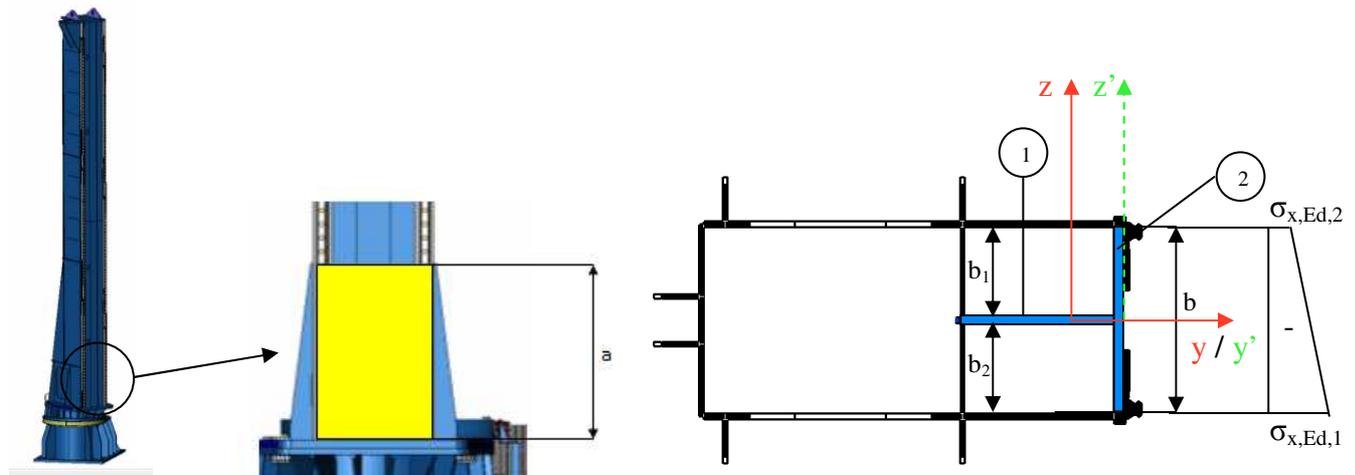


Abbildung 7-12: Ausgesteiftes Blechfeld 1; LF1

Tabelle 7-3: Querschnittswerte für das ausgesteifte Blechfeld 1; LF1

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
<u>1</u>	495	20	9900	-267,5	0	-2648250	0	-144,20	0	408002661
<u>2</u>	20	630	12600	-10	0	-126000	0	113,30	0	162164814
			A_{ges} [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{st}$ [mm ⁴]
			22500			-2774250	0			570167475

b= 630 mm
a= 960 mm
b₁= 305 mm
b₂= 305 mm

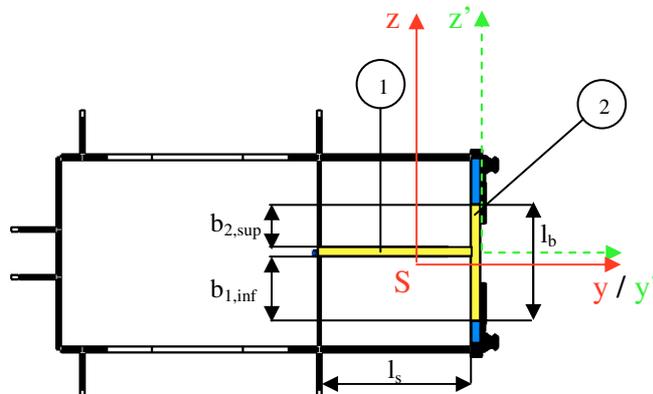
Schwerpunktskoordinaten für das ausgesteifte Blechfeld 1:

$$y_s = -123,30 \text{ mm}$$

$$z_s = 0,00 \text{ mm}$$

b) Ersatzdruckstab:

Ermittlung des Flächenträgheitsmoments des Ersatzdruckstabes zur Bestimmung der kritischen Knickspannung.



$$b_{1,inf} = (3 - \Psi_x) / (5 - \Psi_x) b_1 \quad b_{1,inf} = 166,56 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = 2 / (5 - \Psi_x) b_2 \quad b_{2,sup} = 138,44 \text{ mm}$$

1. Steife: $t_s = 20,00 \text{ mm}$
 $l_s = 495,00 \text{ mm}$

2. Blech: $t_b = 20,00 \text{ mm}$
 $l_b = 325,00 \text{ mm}$

Abbildung 7-13: Ersatzdruckstab Blechfeld 1; LF1

Tabelle 7-4: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF1

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
<u>1</u>	495	20	9900	-267,5	0	-2648250	0	-102,06	-5,57	305262247
<u>2</u>	20	325	6500	-10	-14,06	-65000	-91373,52	-155,44	-8,49	157271214
			$A_{ges} = A_{sl,1}$ [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{sl,1}$ [mm ⁴]
			16400			-2713250	-91373,5			462533461

Schwerpunktskoordinaten des Ersatzdruckstabes:

$$y_s = -165,44 \text{ mm}$$

$$z_s = -5,57 \text{ mm}$$

Nachweis der Zulässigkeit der Methode der reduzierten Spannungen:

Ermittlung von $\alpha_{ult,k}$ über das Fließkriterium nach Gl.96:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) \quad \sigma_{z,Ed} = 0$$

$$\longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = \min \left(\frac{f_y}{\sigma_{x,Ed}} \right) \longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = 15,61$$

$\sigma_{x,Ed}$ ist die größte auftretende Längsspannung im Blechfeld

Ermittlung des modifizierten Schlankheitsgrades nach Gl.95:

-Spannungsverhältnis im Blechfeld nach Abschnitt 6.5.2:

$$\Psi_x = \sigma_2 / \sigma_1 = \sigma_{x,Ed,2} / \sigma_{x,Ed,1} \quad \Psi_x = 0,59$$

$$\Psi_z = 0,00$$

-Elastische kritische Knickspannung nach Abschnitt 6.5.2:

$$\sigma_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \cdot \frac{b}{\frac{b}{2}} = 126854,50 \frac{N}{mm^2} \quad \longrightarrow \quad \alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = 8428,97$$

-Ermittlung von α_{cr} nach Gl.110:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1 - \psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{cr} = 8428,97$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = 0,043$$

Ermittlung der elastischen kritischen Plattenbeulspannung nach Gl.100:

-Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung nach Gl.105:

$$I_p = \frac{b \cdot t_b^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 461538,46 mm^4$$

-Beulwert der orthotropen Platte nach Gl.101:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot \left[(1 + \alpha^2) + \gamma - 1 \right]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = 376,89 \quad \longrightarrow \quad \sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 72093,42 \frac{N}{mm^2}$$

mit:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 191,28 \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = 1235,36 \quad ; \quad \delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = 0,79 \quad ; \quad \alpha = \frac{a}{b} = 1,52 \geq 0,5 \quad \longrightarrow \quad \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

Ermittlung des endgültigen Abminderungsbeiwertes ρ_c nach Gl.97:

$$\rho = (\rho_b - \chi_c) \cdot \zeta \cdot (2 - \zeta) + \chi_c = 1$$

Bedingung:

$$\left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) = 0,0041 < \rho^2$$

mit:

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr.p}}{\sigma_{cr.x}} - 1 = -0,432 \longrightarrow \zeta = 0$$

$$\lambda_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi_x} = 0,73 \longrightarrow \rho_b = 1$$

$$\chi_c = 1$$

$$\frac{\rho \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 15,61 > 1 \longrightarrow \text{Methode der reduzierten Spannungen ist zulässig}$$

Blechfeld 2:

a) Ausgesteiftes Blechfeld:

Zur Bestimmung des Flächenträgheitsmoments für das gesamte längsversteifte Blechfeld 2, welches in weiterer Folge zur Ermittlung des Beulwertes benötigt wird.

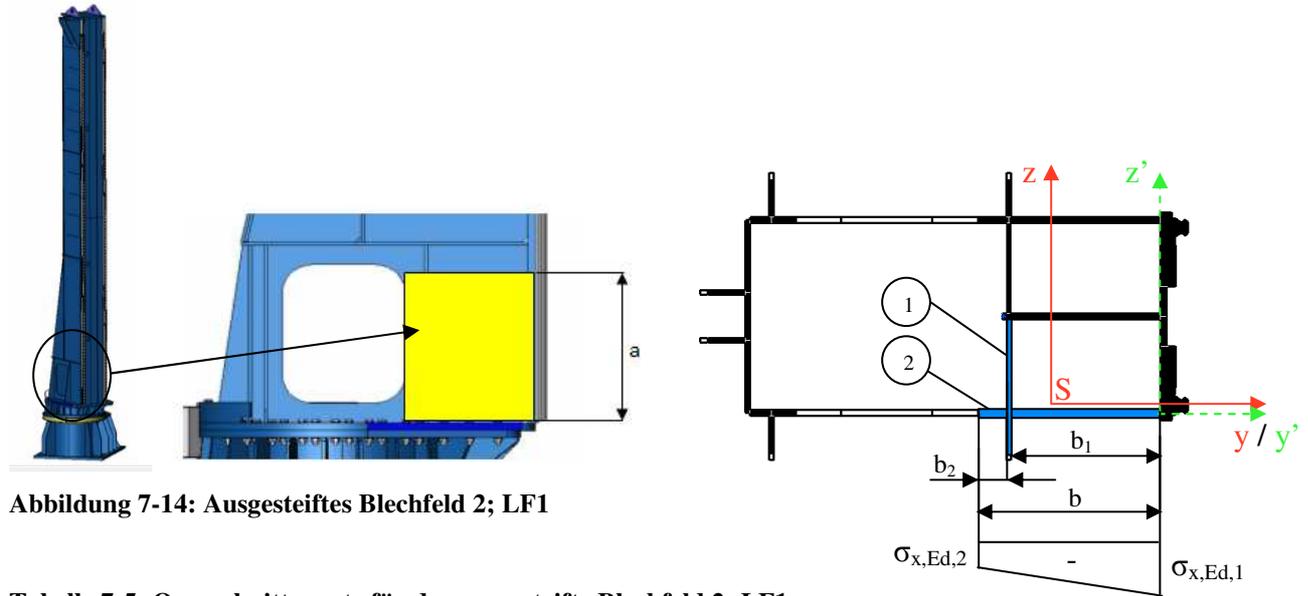


Abbildung 7-14: Ausgesteiftes Blechfeld 2; LF1

Tabelle 7-5: Querschnittswerte für das ausgesteifte Blechfeld 2; LF1

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
<u>1</u>	10	450	4500	-500	90	-2250000	405000	-145,45	65,45	95216838,8
<u>2</u>	600	20	12000	-300	0	-3600000	0	54,55	24,55	7629752,1
			A_{ges} [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{sl}$ [mm ⁴]
			16500			-5850000	405000			102846590,9

b= 600 mm
a= 450 mm
b₁= 495 mm
b₂= 95 mm

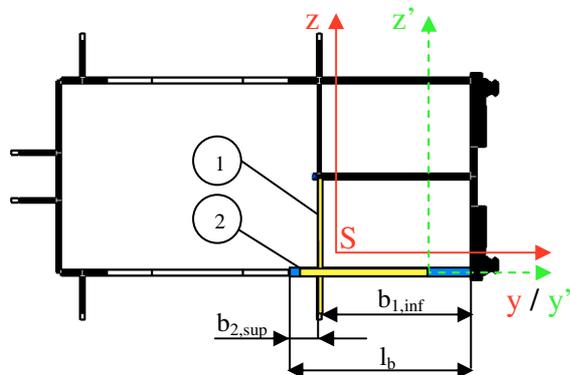
Schwerpunktskoordinaten für das ausgesteifte Blechfeld 2:

$y_s = -354,55$ mm

$z_s = 24,55$ mm

b) Ersatzdruckstab:

Ermittlung des Flächenträgheitsmoments des Ersatzdruckstabes zur Bestimmung der kritischen Knickspannung.



$$b_{1,inf} = (3 - \Psi_x) / (5 - \Psi_x) \cdot b_1 \quad b_{1,inf} = 281,19 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = 2 / (5 - \Psi_x) \cdot b_2 \quad b_{2,sup} = 41,03 \text{ mm}$$

1. Steife: $t_s = 10,00 \text{ mm}$
 $l_s = 450,00 \text{ mm}$

2. Blech: $t_b = 20,00 \text{ mm}$
 $l_b = 332,22 \text{ mm}$

Abbildung 7-15: Ersatzdruckstab Blechfeld 2; LF1

Tabelle 7-6: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF1

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
1	10	450	4500	-286,19	90	-1287838,43	405000	71,59	53,66	88894278,3
2	332,22	20	6644,43	-166,11	0	-1103709,71	0	-48,49	36,34	8996581,65
			$A_{ges} = A_{sl,1}$ [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{sl,1}$ [mm ⁴]
			11144,43			-2391548,14	405000			97890859,9

Schwerpunktskoordinaten des Ersatzdruckstabes:

$$y_s = -214,60 \text{ mm}$$

$$z_s = 36,34 \text{ mm}$$

Nachweis der Zulässigkeit der Methode der reduzierten Spannungen:

Ermittlung von $\alpha_{ult,k}$ über das Fließkriterium nach Gl.96:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) \quad \sigma_{z,Ed} = 0$$

$\sigma_{x,Ed}$ ist die größte auftretende Längsspannung im Blechfeld

$$\longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = \min \left(\frac{f_y}{\sigma_{x,Ed}} \right) \longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = 15,61$$

Ermittlung des modifizierten Schlankheitsgrades nach Gl.95:

-Spannungsverhältnis im Blechfeld nach Abschnitt 6.5.2:

$$\Psi_x = \sigma_2 / \sigma_1 = \sigma_{x,Ed,2} / \sigma_{x,Ed,1} \quad \Psi_x = 0,37$$

$$\Psi_z = 0,00$$

-Elastische kritische Knickspannung nach Abschnitt 6.5.2:

$$\sigma_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \cdot \frac{b_1 + \frac{t_S}{2} + y_s}{b_1 + \frac{t_S}{2}} = 92164,56 \frac{N}{mm^2} \longrightarrow \alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = 6123,96$$

-Ermittlung von α_{cr} nach Gl.110:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1 - \psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{cr} = 6123,96$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = 0,050$$

Ermittlung der elastischen Plattenbeulspannung nach Gl.100:

-Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung nach Gl.105:

$$I_p = \frac{b \cdot t_b^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 439560,44 mm^4$$

-Beulwert der orthotropen Platte nach Abschnitt Gl.101:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot [(1 + \alpha^2) + \gamma - 1]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = 444,41 \longrightarrow \sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 93721,64 \frac{N}{mm^2}$$

mit:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 210,89 \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = 233,98 \quad \delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = 0,38 \quad \alpha = \frac{a}{b} = 0,75 \geq 0,5 \longrightarrow \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

Ermittlung des endgültigen Abminderungsbeiwertes ρ nach Gl.97:

$$\rho = (\rho_b - \chi_c) \cdot \zeta \cdot (2 - \zeta) + \chi_c = 1$$

Bedingung:

$$\left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) = 0,0041 < \rho^2$$

mit:

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr.p}}{\sigma_{cr.x}} - 1 = 0,017$$

$$\lambda_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi_x} = 0,75 \quad \longrightarrow \quad \rho_b = 1$$

$$\chi_c = 1$$

$$\frac{\rho_c \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 15,61 > 1 \quad \longrightarrow \quad \text{Methode der reduzierten Spannungen ist zulässig}$$

7.2.2.6 Grenzzustände der Tragfähigkeit

7.2.2.6.1 Lagesicherheit (EQU)

Der Nachweis der Lagesicherheit, die Sicherheit gegen das Abheben des Auflagers von seiner ursprünglichen Position, erfolgt nach Abschnitt 6.1.5.4.2:

x-y-EBENE:

Destabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{dstxyyst} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{dstxyyst} = 793553158 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{dstxyEL} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{dstxyEL} = 478440833 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed,dstxy} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxyyst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxyEL} \quad M_{Ed,dstxy} = 1590569724 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$ und $\gamma_{Q,EQU}$ nach Tabelle 3-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,1 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

Stabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{stbxyyst} = F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{uHW} (x_{1S} + x_{0S}) + F_H (y_{0S} - y_{1S} - e_{N,xy}) + G_{S3} (y_{0S} - e_{N,xy}) + G_{S2} (y_{0S} - y_{2S} + y_{3S} - e_{N,xy}) + G_{S1} (y_{0S} - y_{2S} - e_{N,xy})$$

$$M_{stbxyyst} = 729181459 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{stbxyEL} = F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{HEL} (y_{0S} - y_{1S} - e_{N,xy})$$

$$M_{stbxyEL} = 421994732 \text{ Nmm}$$

$$M_{Rd,stbxy} = \gamma_{G,inf,EQU} M_{stbxyyst} + \gamma_{Q,EQU} M_{stbxyEL} \quad M_{Rd,stbxy} = 1289255411 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$ und $\gamma_{Q,EQU}$ nach Tabelle 6-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 0,9 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

$M_{Ed,dst,xy} \leq M_{Rd,stb,xy} + M_{Rd,xy}$ $M_{Rd,xy} = 301314313 \text{ Nmm}$ Widerstand, welcher durch die Verschraubung (50 x M20 Schrauben) zwischen Drehsäule und Drehlager aufgebracht werden muss.

x-z-EBENE:

Leiteinwirkung Nutzlast:

Destabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{dstxzst} = F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{uzHW} (x_{1S} + x_{0S}) + F_H (z_{1S} + e_{N,xz})$$

$$M_{dstxzst} = 410788662,22 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{dstxzEL} = F_{uzELEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz})$$

$$M_{dstxzEL} = 216432768,24 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed,dstxz} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxzst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxzEL}$$

$$M_{Ed,dstxz} = 776516680,8 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$ und $\gamma_{Q,EQU}$ nach Tabelle 6-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,1 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

Stabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{stbxzst} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + G_S * (z_{2S} - e_{N,xz})$$

$$M_{stbxzst} = 403029988 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{stbxzEL} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{stbxzEL} = 214661667 \text{ Nmm}$$

$$M_{Rd,stbxz} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{stbxzst} + \gamma_{Q,EQU} M_{stbxzEL}$$

$$M_{Rd,stbxz} = 684719489 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$ und $\gamma_{Q,EQU}$ nach Tabelle 6-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 0,9 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

$$M_{Ed,dst,xz} \leq M_{Rd,stb,xz} + M_{Rd,xz}$$

$$M_{Rd,xz} = 91797191,6 \text{ Nmm}$$

Widerstand, welcher durch die Verschraubung (50 x M20) zwischen Drehsäule und Drehlager aufgebracht werden muss.

Nachweis der Zulässigkeit der Schraubverbindung nach DIN EN 1993-1-8 [14]:

Die Schwenksäule wird mit der Stützsäule über ein Drehgelenk mittels fünfzig M20-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verbunden.

Werkstoffkennwerte:

$$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yb} = 900 \text{ N/mm}^2$$

Resultierendes Moment:

$$M_{res} = (M_{Rd,xy}^2 + M_{Rd,xz}^2)^{1/2} \quad M_{res} = 314987364 \text{ Nmm}$$

Minimaler Normalabstand der Schrauben zur Kippkante:

$$L = 300 \text{ mm}$$

Anzahl der Schrauben:

$$n = 50$$

Einwirkung auf eine einzelne Schraube:

$$F_E = M_{res} / (L \cdot n) \quad F_E = 20999 \text{ N}$$

Bemessung der Vorspannkraft:

$$F_V = 0,7 f_{ub} A_s / \gamma_{M7} \quad F_V = 137757 \text{ N} \quad \text{mit } \gamma_{M7} = 1,1$$

Zugtragfähigkeit der Schraubverbindung:

$$k_2 = 0,9$$

$$d_s = 17,5 \text{ mm} \quad \text{Kerndurchmesser einer M20-Schraube}$$

$$A_s = 240,5 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{t,Rd} = 173180,3 \text{ N}$$

Schraubkraft:

$$F_S = 140570 \text{ N} \quad \text{aus Verspannungsdreieck; Abbildung 7-16}$$

Nachweis der Schraubverbindung:

$$F_S / F_{t,Rd} = 0,81 < 1$$

Verspannungsdreieck:

-Ermittlung der Nachgiebigkeit der Schraube:

$$\delta_S = \delta_K + \delta_1 + \delta_M = 2,415 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

mit

$$\delta_K = \frac{0,4 \cdot d_s}{E \cdot A} = 1,386 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}} ; \quad \delta_1 = \frac{1}{E \cdot A} = 1,980 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}} ; \quad \delta_M = \frac{l_M}{E \cdot A} = 2,970 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

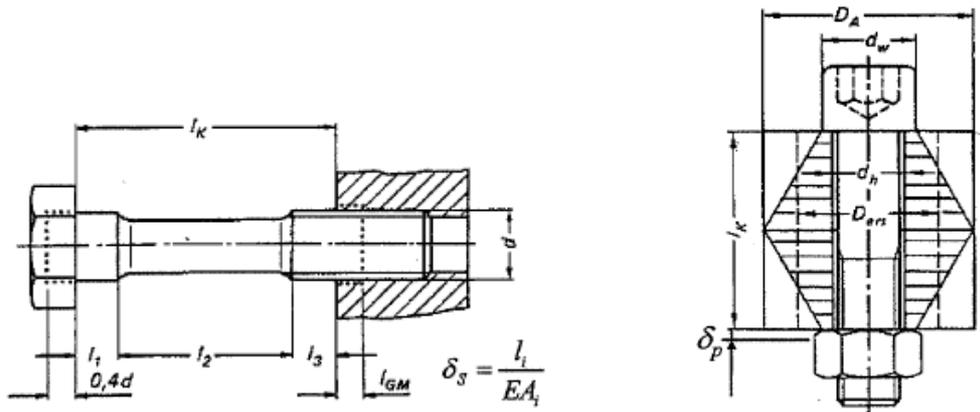


Abbildung 7-16: Prinzipdarstellung der Nachgiebigkeit einer Schraube und der verspannten Bauteile; Kapitel 8.1.8 aus [15]

-Ermittlung der Nachgiebigkeit der verspannten Teile:

$$\delta_p = \frac{l_k}{E \cdot A_{\text{ers}}} = 3,731 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

mit

$$A_{\text{ers}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(1,5 \cdot d_w)^2 - d^2 \right]$$

-Ermittlung von dem Verspannungsbild:

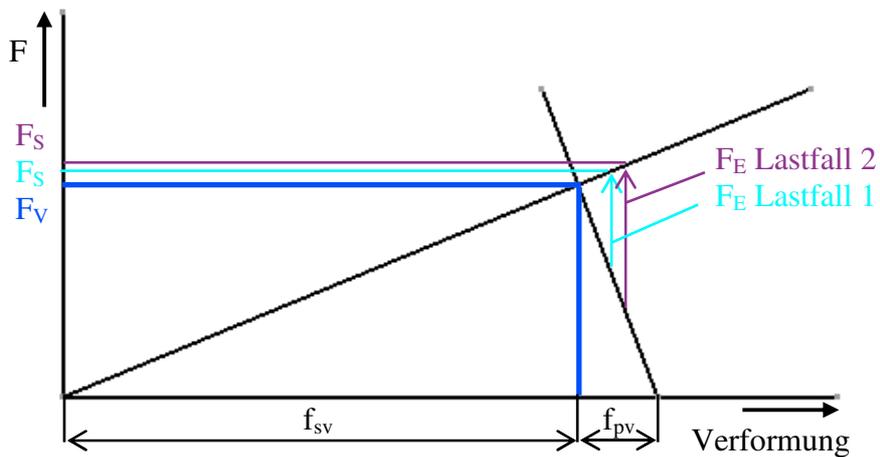


Abbildung 7-17: Verspannungsdreieck bei statischer Belastung für den Lastfall 1 und 2

-Elastische Verformung der Schraube und der Bauteile:

$$f_{sv} = \delta_s \cdot F_V ; f_{pv} = \delta_p \cdot F_V$$

7.2.2.6.2 Beanspruchbarkeit von Querschnitten

Die Beanspruchbarkeit von Querschnitten untersucht, ob das Bauteil den Belastungen im betrachteten Querschnitt standhält. Dabei muss die Zulässigkeit sowohl in den einzelnen Ebenen als auch für die zusammengesetzte Beanspruchung gegeben sein.

Allgemein:

Fließkriterium im Punkt 1 des betrachteten Querschnitts nach Gl.52:

$$\left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right) = 0,0041 < 1$$

konservative Lösung nach Gl.53:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} = 0,064 < 1$$

Grenznormalkraft:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 0,016 < 1 \quad (\text{nach Gl.57})$$

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2124047 \text{ N} \quad (\text{nach Gl.58})$$

$$N_{Ed} = \gamma_{G,sup,STR} \cdot (G_S + F_{Hst}) + \gamma_{Q,STR} \cdot F_{HEL} = 344257,5 \text{ N} \quad (\text{nach 6.1.5.4.2})$$

Grenzbiegemoment um die z-Achse:

$$\frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} = 0,035 < 1 \quad (\text{nach Gl.60})$$

$$M_{z.Rd} = \frac{W_{z,max} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1068746111 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.62})$$

$$M_{z.Ed} = \gamma_{G,sup,STR} \cdot M_{xy,st} + \gamma_{Q,STR} \cdot M_{xy,EL} = 3722290138 \text{ Nmm} \quad (\text{nach 6.1.5.4.2})$$

Grenzbiegemoment um die y-Achse:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} = 0,013 < 1 \quad (\text{nach Gl.60})$$

$$M_{y.Rd} = \frac{W_{y,max} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3047768014 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.62})$$

$$M_{y.Ed} = \gamma_{G,sup,STR} \cdot M_{xz,st} + \gamma_{Q,STR} \cdot M_{xz,EL} = 3963811251 \text{ Nmm} \quad (\text{nach 6.1.5.4.2})$$

Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft:

$$\sigma_{x.Ed} = 15,05 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{nach Gl.65})$$

7.2.2.6.3 Stabilitätsnachweis

Der Nachweis für die Stabilität eines Bauteils ist zu bringen um sicherzustellen, dass es zu keinem Versagen aufgrund von Knicken bzw. Biegedrillknicken kommt. Im Allgemeinen sind Bauteile wie die Drehsäule, welche in Form eines Kastenprofils aufgebaut ist, nicht gegen Knicken oder Biegedrillknicken gefährdet.

Gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse:

Biegedrillknicken:

x-y-Ebene:

$$\frac{M_{z.Ed}}{M_{b.Rd}} = 0,079 < 1 \quad (\text{nach Gl.80})$$

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} W_{z,max} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 4612551310 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.81})$$

Knicklinie für Biegedrillknicken – allgemeiner Fall:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,43 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.82})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] = 1,41 \quad \text{mit} \quad \alpha_{LT} = 0,76 \quad (\text{nach Gl.83})$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_z \cdot f_y}{M_{cr,xy}}} = 1,073 \quad (\text{nach Gl.84})$$

mit

$$M_{cr.xy} = \alpha_{cr} \cdot M_z = 9290354989 \text{ Nmm} \quad \text{für} \quad \alpha_{cr} = 35.204 \quad \text{aus FEA} \quad (\text{nach Gl.85})$$

x-z-Ebene:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{b.Rd}} = 0,058 < 1 \quad (\text{nach Gl.80})$$

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,max} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 6833007631 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.81})$$

Knicklinie für Biegedrillknicken – allgemeiner Fall:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,22 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.82})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] = 2,56 \quad \text{mit} \quad \alpha_{LT} = 0,76 \quad (\text{nach Gl.83})$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr.xz}}} = 1.723 \quad (\text{nach G.84})$$

mit

$$M_{cr.xz} = \alpha_{cr} \cdot M_y = 1026716766 \text{ Nmm} \quad \text{für} \quad \alpha_{cr} = 35.204 \quad \text{aus FEA} \quad (\text{nach Gl.85})$$

Auf Biegung und Druck beanspruchte gleichförmige Bauteile:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = 0,055 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.90})$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = 0,049 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.91})$$

mit

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,85 \quad k_{yz} = k_{zz} = 0,76 \quad (\text{nach Tabelle 6-25})$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,76 \quad k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,68$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,84 > 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \psi_z = 0,75 > 0,4$$

Allgemeines Verfahren für Knick- und Biegedrillknicknachweise:

x-y-Ebene:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 12,06 > 1 \quad \text{und} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = 0,051 < \chi_{op} \quad (\text{nach Gl.92})$$

mit

$$\frac{1}{\alpha_{ult.k.xy}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} \quad \longrightarrow \quad \alpha_{ult.k.xy} = 19,71 \quad (\text{nach 6.4.5.4})$$

$$\chi_{op} = \frac{1}{\Phi_{op} + \sqrt{\Phi_{op}^2 - \lambda_{op}^2}} = 0,61 < 1,0 \quad (\text{nach 6.4.5.2})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{op} \cdot (\lambda_{op} - 0,2) + \lambda_{op}^2 \right] = 0,99 \quad \text{mit} \quad \alpha_{op} = 0,76 \quad (\text{nach 6.4.5.2})$$

und

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult.k}}{\alpha_{cr.op}}} = 0,75 \quad \text{mit} \quad \alpha_{cr.op} = 35,204 \quad \text{aus FEA} \quad (\text{nach Gl.93})$$

x-z-Ebene:

$$\frac{\chi_{\text{op}} \cdot \alpha_{\text{ult.k}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 16,23 > 1 \quad \text{und} \quad \frac{\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{Rd}}}}{\gamma_{\text{M1}}} + \frac{\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{y.Rd}}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 0,029 < \chi_{\text{op}}$$

(nach Gl.92)

mit

$$\frac{1}{\alpha_{\text{ult.k.xy}}} = \frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{Rk}}} + \frac{M_{\text{y.Ed}}}{M_{\text{y.Rk}}} \quad \longrightarrow \quad \alpha_{\text{ult.k.xy}} = 34,23$$

(nach 6.4.5.4)

$$\chi_{\text{op}} = \frac{1}{\Phi_{\text{op}} + \sqrt{\Phi_{\text{op}}^2 - \lambda_{\text{op}}^2}} = 0,47 < 1,0$$

(nach 6.4.5.2)

$$\Phi_{\text{LT}} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{\text{op}} \cdot (\lambda_{\text{op}} - 0,2) + \lambda_{\text{op}}^2 \right] = 1,28 \quad \text{mit} \quad \alpha_{\text{op}} = 0,76$$

(nach 6.4.5.2)

und

$$\lambda_{\text{op}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ult.k}}}{\alpha_{\text{cr.op}}}} = 0,99 \quad \text{mit} \quad \alpha_{\text{cr.op}} = 35,204 \quad \text{aus FEA}$$

(nach Gl.93)

7.2.2.7 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit müssen die Verschiebungen des Bauwerks innerhalb der vorgegebenen zulässigen Werte liegen. Die auftretenden Verschiebungen wurden sowohl analytisch als auch mittels der Finite-Elemente-Analyse ermittelt.

Analytische Ermittlung der Verschiebungen:

Vereinfacht wurde angenommen, dass die Säule einen konstanten Querschnitt über die Höhe aufweist. Ihr Flächenträgheitsmoment um die z-Achse wird mit $2/3$ und um die y-Achse mit 1 des Flächenträgheitsmomentes des betrachteten Querschnittes (Abbildung 7-9) angenommen.

a) Verschiebungen in x-y-Ebene:

Biegelinie allgemein: $E I w'' = -M_{b(x)}$

Randbedingungen:

$$w(x=X)=0$$

$$w'(x=X)=0$$

$$\text{mit } X=x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}+x_{1S}+x_{0S}$$

Ständige Lasten:

$$M_{b(x)} = F_{oyEW} x - F_{uyEW} (x - x_{1EW}) + F_{oyHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S})) - F_{uyHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW})) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{oyEW} x^2/2 - F_{uyEW} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{oyHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S}) x) - F_{uyHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) x + G_S e_{N,xy} x + G_{S1} y_{2S} x + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) x + C_1$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{oyEW} x^3/6 - F_{uyEW} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{oyHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S}) x^2/2) - F_{uyHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x^2/2) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 + G_S e_{N,xy} x^2/2 + G_{S1} y_{2S} x^2/2 + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) x^2/2 + C_1 x + C_2$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,st(x=0)} = \frac{F_{oyEW} X^3/3 - F_{uyEW} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{oyHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S}) X^2/2) - F_{uyHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) X^2/2) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy})}{X^2/2 + G_S e_{N,xy} X^2/2 + G_{S1} y_{2S} X^2/2 + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) X^2/2} = 2,26 \text{ mm}$$

Nutzlasten:

$$M_{b(x)} = F_{oyEL} x - F_{uyEL} (x - x_{1EW}) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy})$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{oyEL} x^2/2 - F_{uyEL} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) x + C_3$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{oyEL} x^3/6 - F_{uyEL} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 + C_3 x + C_4$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,EL(x=0)} = \frac{F_{oyEL} X^3/3 - F_{uyEL} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) X^2/2}{1} = 1,04 \text{ mm}$$

$$\text{Gesamtverschiebung in x-y-Ebene: } w_{xy(x=0)} = w_{xy,st(x=0)} + w_{xy,EL(x=0)} = 3,30 \text{ mm}$$

$$\text{Bemessung der Verschiebung in x-y-Ebene: } w_{xy,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xy,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xy,EL(x=0)} = 3,30 \text{ mm}$$

γ_G und γ_Q nach Tabelle 3-5 ($\gamma_G = 1,0$ / $\gamma_Q = 1,0$)

b) Verschiebungen in x-z-Ebene:

Biegelinie allgemein: $E I w'' = -M_{b(x)}$

Randbedingungen:

$$w(x=X) = 0$$

$$w'(x=X) = 0$$

mit $X = x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}$

Ständige Lasten:

$$\begin{aligned} M_{b(x)} &= F_{ozEW} x - F_{uzEW} (x - x_{1EW}) + F_{ozHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S})) - F_{uzHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW})) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz} \\ \int M_{b(x)} dx &= F_{ozEW} x^2/2 - F_{uzEW} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{ozHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S}) x) - F_{uzHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) x - G_S e_{N,xz} x + C_5 \\ \int (\int M_{b(x)} dx) dx &= F_{ozEW} x^3/6 - F_{uzEW} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{ozHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S}) x^2/2) - F_{uzHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x^2/2) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) x^2/2 - G_S e_{N,xz} x^2/2 + C_5 x + C_6 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xz,st(x=0)} = F_{ozEW} X^3/3 - F_{uzEW} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{ozHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S}) X^2/2) - F_{uzHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) X^2/2) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) X^2/2 - G_S e_{N,xz} X^2/2 = -0,83 \text{ mm}$$

Nutzlasten:

$$\begin{aligned} M_{b(x)} &= F_{ozEL} x - F_{uzEL} (x - x_{1EW}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) \\ \int M_{b(x)} dx &= F_{ozEL} x^2/2 - F_{uzEL} (x^2/2 - x_{1EW} x) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) x + C_7 \\ \int (\int M_{b(x)} dx) dx &= F_{ozEL} x^3/6 - F_{uzEL} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) x^2/2 + C_7 x + C_8 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xz,EL(x=0)} = F_{ozEL} X^3/3 - F_{uzEL} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) X^2/2 = -0,05 \text{ mm}$$

$$\text{Gesamtverschiebung in } x\text{-}z\text{-Ebene: } w_{xz(x=0)} = w_{xz,st(x=0)} + w_{xz,EL(x=0)} = -0,88 \text{ mm}$$

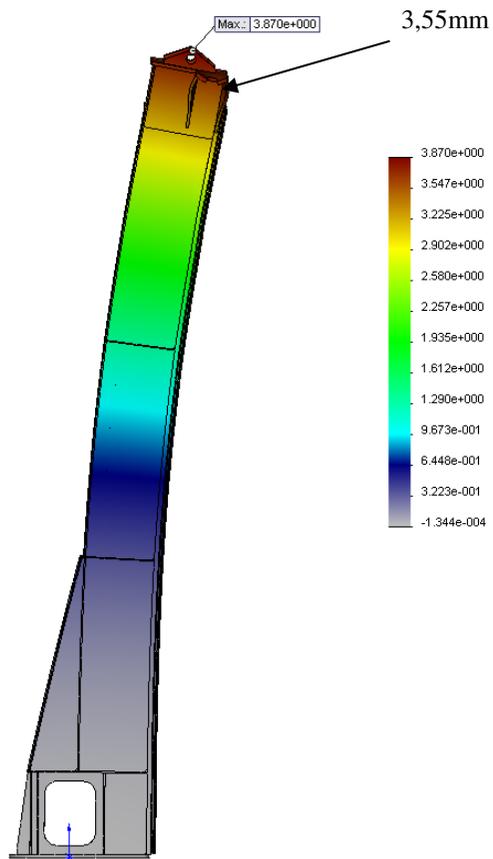
$$\text{Bemessung der Verschiebung in } x\text{-}y\text{-Ebene: } w_{xy,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xy,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xy,EL(x=0)} = -0,88 \text{ mm}$$

γ_G und γ_Q nach Tabelle 6-5 ($\gamma_G = 1,0$ / $\gamma_Q = 1,0$)

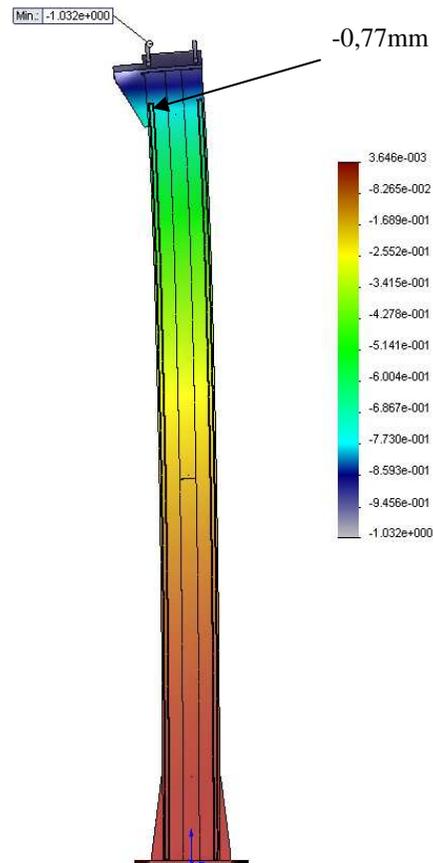
$$\text{Resultierende Gesamtverschiebung: } w_{ges(x=0)} = 3,42 \text{ mm}$$

Ermittlung der Verschiebungen mittels FEM:

Verschiebung in x-y-Ebene:



Verschiebung in x-z-Ebene:



Resultierende Gesamtverschiebung:

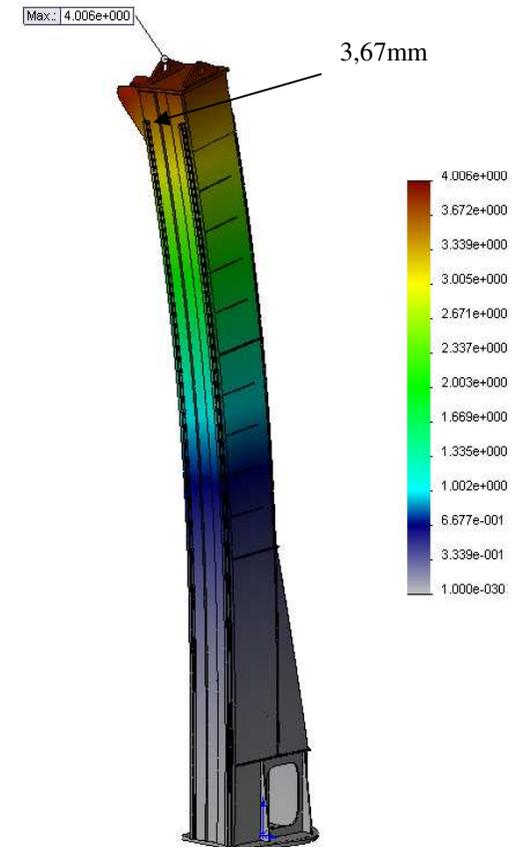


Abbildung 7-18: a) Verschiebung in x-y-Ebene; LF1 ; b) Verschiebung in x-z-Ebene; LF1 ; c) Resultierende Verschiebung; LF1

Beurteilung der Verschiebungen:

Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus der FEA und der analytischen Berechnung sind sehr gering, wodurch man davon ausgehen kann, dass die Annäherung für die analytische Berechnung richtig getroffen wurde.

Weiters sind die auftretenden Verschiebungen verschwindend gering und liegen weit unter dem zulässigen Bereich. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist demnach gegeben.

7.2.2.8 Ermüdungsnachweis am betrachteten Querschnitt

Es wird ein Einstufenlastkollektiv dargestellt, in welchem sich die Spannungsschwingbreite zwischen ständiger Last und ständiger Last plus Nutzlast einstellt.

Spannungsschwingbreite (Amplitudenspannung):

ständige Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,st} = (F_H + G_S) / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,st} = -2,21 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,st} = M_{xy,st} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,st} = 6,99 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,st} = M_{xz,st} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,st} = 2,11 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,st} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyHW} x_{1S} + F_H (y_{1S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$M_{xy,st} = 179054449,18 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,st} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzHW} x_{1S} - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$M_{xz,st} = -27393674,18 \text{ Nmm}$$

Nutz-Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,EL} = F_{HEL} / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,EL} = -0,55 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,EL} = M_{xy,EL} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,EL} = 3,31 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,EL} = M_{xz,EL} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,EL} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,EL} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{HEL} (y_{1S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL} = 84846101,57 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,EL} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,zy})$$

$$M_{xz,EL} = -1771101,57 \text{ Nmm}$$

Spannung im betrachteten Punkt:

Unterspannung:	$\sigma_u = (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b,xy,st} + \sigma_{b,xz,st})$	$\sigma_u = 6,90 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:	$\sigma_o = (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b,xy,st} + \sigma_{b,xz,st}) + (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b,xy,EL} + \sigma_{b,xz,EL})$	$\sigma_o = 9,79 \text{ N/mm}^2$
Spannungsverhältnis:	$R = \sigma_u / \sigma_o$	$R = 0,71$
Mittelspannung:	$\sigma_m = (\sigma_u + \sigma_o) / 2$	$\sigma_m = 8,35 \text{ N/mm}^2$
Spannungsamplitude:	$\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$	$\sigma_a = 1,45 \text{ N/mm}^2$

Bemessung der Spannung im betrachteten Punkt:

Unterspannung:	$\sigma_{u,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b,xy,st} + \sigma_{b,xz,st})$	$\sigma_{u,Ed} = 9,31 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:	$\sigma_{o,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,xy,st} + \sigma_{b,xy,st} + \sigma_{b,xz,st}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,xy,EL} + \sigma_{b,xy,EL} + \sigma_{b,xz,EL})$	$\sigma_{o,Ed} = 13,65 \text{ N/mm}^2$
Spannungsverhältnis:	$R_{Ed} = \sigma_{u,Ed} / \sigma_{o,Ed}$	$R_{Ed} = 0,68$
Mittelspannung:	$\sigma_{m,Ed} = (\sigma_{u,Ed} + \sigma_{o,Ed}) / 2$	$\sigma_{m,Ed} = 11,48 \text{ N/mm}^2$
Spannungsamplitude:	$\sigma_{a,Ed} = (\sigma_{o,Ed} - \sigma_{u,Ed}) / 2$	$\sigma_{a,Ed} = 2,17 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{G,j,sup}$ und $\gamma_{Q,1}$ nach Tabelle 6-4 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,35 / \gamma_{Q,1} = 1,5$)

Ermüdungsfestigkeit:

a) Ermittlung der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\sigma_R$:

Der betrachtete Querschnitt der geschweißten Blechkonstruktion wird nach Tabelle 6.30 der Kerbfallklasse 6 ($\Delta\sigma_C = 100 \text{ N/mm}^2$) zugeordnet. Aus Gl.117 lässt sich schließlich die ertragbare Ermüdungsbeanspruchung, für eine auftretende Lastspielzahl von $N_R = 7,3 \cdot 10^4$, ermitteln:

$$\Delta\sigma_R = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N_R} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \Delta\sigma_C \longrightarrow \Delta\sigma_R = 301,46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

b) Ermittlung der zulässigen Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\sigma_D$ nach Gl.117:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \Delta\sigma_C \longrightarrow \Delta\sigma_D = 73,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

c) Ermittlung der zulässigen Ermüdungsbeanspruchung aus dem Smith-Diagramm:

Für eine Mittelspannung von $11,61 \text{ N/mm}^2$ und dem Werkstoff S235 erhält man aus dem Smith-Diagramm für die Biegedauerfestigkeit eine Biegewechselfestigkeit von 173 N/mm^2 . Unter Berücksichtigung des Größeneinflusses (0,8) und der Kerbwirkung (2) kann man von einer zulässigen Spannung von 69 N/mm^2 ausgehen. Es ist ersichtlich, dass der Bemessungswert der auftretenden Spannungsschwingbreite ($2,17 \text{ N/mm}^2$) deutlich unter der zulässigen Spannung (69 N/mm^2) liegt, wodurch es zu keiner Ermüdungserscheinung kommt.

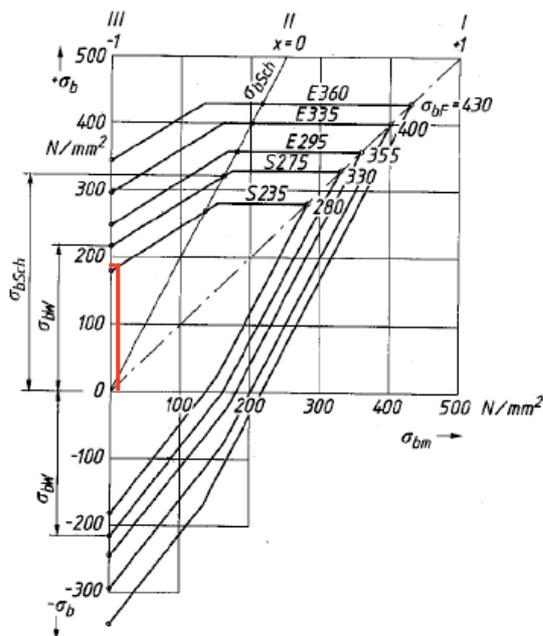


Abbildung 7-19: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für Biegedauerfestigkeit [7]

Ermüdungsnachweis:

Für ein Einstufen-Lastkollektiv ergibt sich nach Gl.120 eine schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma_E=4,34\text{N/mm}^2$.

Durch die lineare Beziehung der Wöhlerkurve im Zeitfestigkeitsbereich kann man auf die schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel schließen.

$$\Delta\sigma_E^m \cdot N_R = \Delta\sigma_{E,2}^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \longrightarrow \quad \Delta\sigma_{E,2} = 1,44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}} = 0,028 < 1$$

Dadurch ist der Ermüdungsnachweis für das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen mit einem γ_{Mf} – Faktor von 1,35 nach Tabelle 6-28 mit ausreichender Sicherheit gegeben.

Schädigung nach Miner:

Es wird von zehn Elektrodenwechseln pro Tag über 365 Tage im Jahr auf eine Laufzeit von zwanzig Jahren ausgegangen.

Die Spannungsamplitude ($2,17 \text{ N/mm}^2$) liegt weit unter der zulässigen Biegewechselfestigkeit wodurch als zulässige Lastspielzahl die Ecklastspielzahl N_D von $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln herangezogen wurde.

Somit ergibt sich für das Einstufen-Kollektiv über die gesamte Laufzeit eine Schädigung, welche nicht von Relevanz ist.

Schädigung nach Miner:

$$D_d = \sum_i \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = 1,46\%$$

Dynamische Sicherheit:

$$S_{\text{dyn}} = \frac{\sigma_{\text{zul}}}{\sigma_a} = 31,94$$

7.3 Lastfall 2

7.3.1 Ermittlung der maßgebenden Kräfte

7.3.1.1 Elektrodenwagen

Durch Ansetzen der drei Gleichgewichtsbedingungen können die Kräfte, welche auf das System einwirken, ermittelt werden. Dabei wird zwischen „Ständiger Last“ (Eigengewicht), „Nutzlast“ (Elektroden-gewicht) sowie „Außergewöhnliche Last“ (Kräfte aus Beschleunigung/Verzögerung und Seitenführung) unterschieden.

Kräfte auf Führung in x-y-Ebene:

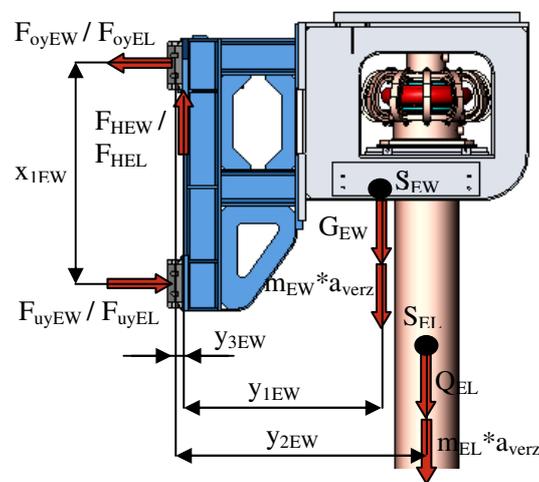


Abbildung 7-20: Elektrodenwagen x-y-Ebene; LF2

Ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 \quad & G_{EW} y_{1EW} - F_{oyEW} x_{1EW} - F_{HEW} y_{3EW} + m_{EW} a_{verz} y_{1EW} = 0 \\ & F_{oyEL} = (G_{EW} y_{1EW} - F_{HEW} y_{3EW} + m_{EW} a_{verz} y_{1EW}) / x_{1EW} \quad F_{oyEW} = 67643,3 \text{ N} \\ \sum F_y=0 \quad & F_{oyEW} - F_{oyEL} = 0 \\ & F_{uyEW} = F_{oyEW} \quad F_{uyEL} = 67643,3 \text{ N} \\ \sum F_x=0 \quad & G_{EW} + m_{EW} a_{verz} - F_{HEW} = 0 \\ & F_{HEW} = G_{EW} + m_{EW} a_{verz} \quad F_{HEW} = 72800,0 \text{ N} \end{aligned}$$

Nutzlast:

$$\begin{aligned} \sum M=0 \quad & Q_{EL} y_{2EW} - F_{oyEL} x_{1EW} - F_{HEL} y_{3EW} + m_{EL} a_{verz} y_{2EW} = 0 \\ & F_{oyEL} = (Q_{EL} y_{2EW} - F_{HEL} y_{3EW} + m_{EL} a_{verz} y_{2EW}) / x_{1EW} \quad F_{oyEL} = 76708,3 \text{ N} \\ \sum F_y=0 \quad & F_{oyEL} - F_{uyEL} = 0 \\ & F_{uyEL} = F_{oyEL} \quad F_{uyEL} = 76708,3 \text{ N} \\ \sum F_x=0 \quad & Q_{EL} - F_{HEL} + m_{EL} a_{verz} = 0 \\ & F_{HEL} = Q_{EL} + m_{EL} a_{verz} \quad F_{HEL} = 70000,0 \text{ N} \end{aligned}$$

Kräfte auf Führung in x-z-Ebene:

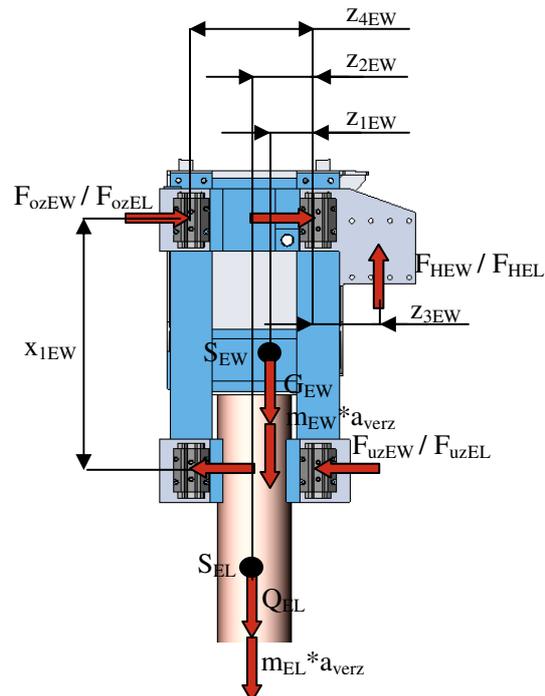


Abbildung 7-21: Elektrodenwagen x-z-Ebene; LF2

ständige Last:

$$\begin{aligned} \sum M=0 \quad & G_{EW} z_{1EW} - F_{ozEW} x_{1EW} + F_{HEW} z_{3EW} + m_{EW} a_{verz} z_{1EW} = 0 \\ & F_{ozEW} = (G_{EW} z_{1EW} + F_{HEW} z_{3EW} + m_{EW} a_{verz} z_{1EW}) / x_{1EW} \quad F_{ozEW} = 33852 \quad \text{N} \\ \sum F_z=0 \quad & F_{ozEW} - F_{uzEW} = 0 \\ & F_{uzEW} = F_{ozEW} \quad F_{uzEW} = 33852 \quad \text{N} \\ \sum F_x=0 \quad & G_{EW} - F_{HEW} + m_{EW} a_{verz} = 0 \\ & F_{HEW} = G_{EW} + m_{EW} a_{verz} \quad F_{HEW} = 72800 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Nutzlast:

$$\begin{aligned} \sum M=0 \quad & Q_{EL} z_{2EW} - F_{ozEL} x_{1EW} + F_{HEL} z_{3EW} + m_{EL} a_{verz} z_{2EW} = 0 \\ & F_{ozEL} = (Q_{EL} z_{2EW} + F_{HEL} z_{3EW} + m_{EL} a_{verz} z_{2EW}) / x_{1EW} \quad F_{ozEL} = 34416,7 \quad \text{N} \\ \sum F_z=0 \quad & F_{ozEL} - F_{uzEL} = 0 \\ & F_{uzEL} = F_{ozEL} \quad F_{uzEL} = 34416,7 \quad \text{N} \\ \sum F_x=0 \quad & G_{EW} - F_{HEL} + m_{EL} a_{verz} = 0 \\ & F_{HEL} = Q_{EL} + m_{EL} a_{verz} \quad F_{HEL} = 70000,0 \quad \text{N} \end{aligned}$$

Außergewöhnliche Kräfte auf Führung:

a) Kräfte aus Beschleunigung und Verzögerung:

$K_{EW}=(m_{EW}+m_{EL}) a_{verz}$	$K_{EW} =$	40800,0	N
$\Sigma G_r = \Sigma G_{r,max} + \Sigma G_{r,min} = (F_{uyEW} + F_{uyEL}) + (F_{oyEW} + F_{oyEL})$	$\Sigma G_r =$	288703,3	N
$\Sigma G_{r,max} = F_{uyEW} + F_{uyEL}$	$\Sigma G_{r,max} =$	144351,7	N
$M_{EW} = K_{EW} (z_{2EW} + z_{3EW})$	$M_{EW} =$	24072000,0	Nmm
$\xi_1 = \Sigma G_{r,max} / \Sigma G_r$	$\xi_1 =$	0,5	
$\xi_2 = 1 - \xi_1$	$\xi_2 =$	0,5	
"vertikal": $H_{L,1,EW} = \varphi_5 K_{EW} / n_r$	$H_{L,1,EW} =$	30600,0	N
$H_{L,2,EW} = \varphi_5 K_{EW} / n_r$	$H_{L,2,EW} =$	30600,0	N
quer: $H_{T,1,EW} = \varphi_5 \xi_2 M_{EW} / x_{1EW}$	$H_{T,1,EW} =$	15045,0	N
$H_{T,2,EW} = \varphi_5 \xi_1 M_{EW} / x_{1EW}$	$H_{T,2,EW} =$	15045,0	N

φ_5 nach Tabelle 3-10 / $n_r = 2$

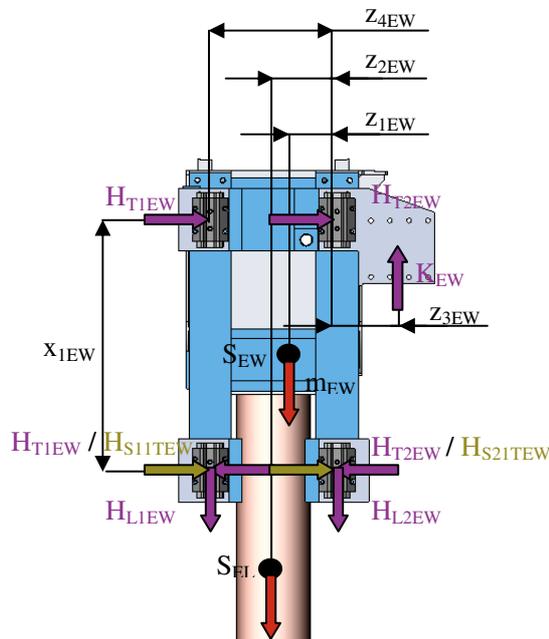


Abbildung 7-22: Elektrodenwagen; Kräfte aus Beschleunigung und Schräglauf

b) Kräfte aus Schräglauf:

$\alpha_F = 0,75 \cdot x/x_{1EW}$	$\alpha_F =$	0,000625
$\alpha_V = y/x_{1EW}$	$\alpha_V =$	0,000083
$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad}$	$\alpha =$	0,001707
$f = 0,3 (1 - \exp(-250 \alpha)) \leq 0,3$	$f =$	0,104277

"vertikal": $H_{S,1,1,L,EW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,1,1,L} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,1,1,L,EW} =$	0,0	N
$H_{S,1,2,L,EW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,1,2,L} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,1,2,L,EW} =$	0,0	N
$H_{S,2,1,L,EW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,2,1,L} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,2,1,L,EW} =$	0,0	N
$H_{S,2,2,L,EW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,2,2,L} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,2,2,L,EW} =$	0,0	N

$\lambda_{S,1,1,L} = 0$	$\lambda_{S,2,1,L} = 0$	Tabelle 3-13
$\lambda_{S,1,2,L} = 0$	$\lambda_{S,2,2,L} = 0$	Tabelle 3-13

quer: $S_{EW} = f \cdot \lambda_{S,1} \cdot \Sigma G_r$	$S_{EW} =$	15052,6	N
$H_{S,1,1,T,EW} = f \cdot \lambda_{S,1,1,T} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,1,1,T,EW} =$	7526,3	N
$H_{S,1,2,T,EW} = f \cdot \lambda_{S,1,2,T} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,1,2,T,EW} =$	0,0	N
$H_{S,2,1,T,EW} = f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,2,1,T,EW} =$	7526,3	N
$H_{S,2,2,T,EW} = f \cdot \lambda_{S,2,2,T} \cdot \Sigma G_r$	$H_{S,2,2,T,EW} =$	0,0	N

$\lambda_{S,1,1,T} = \xi_2/2 = 0,25$	$\lambda_{S,1,2,T} = 0$	Tabelle 3-13
$\lambda_{S,2,1,T} = \xi_1/2 = 0,25$	$\lambda_{S,2,2,T} = 0$	Tabelle 3-13

$\varphi_4 = 1$ nach Tabelle 6-8

$n_r = 2$

$\alpha_0 = 0,001$ nach Tabelle 6-11

$x = 1 \text{ mm}$; gewählt

$y = 0,1 \text{ mm}$; gewählt

$e_1 = 0$ und $e_2 = x_{1EW} \rightarrow h = x_{1EW}$ nach Tabelle 6-12

7.3.1.2 Haubenwagen

Durch Ansetzen der drei Gleichgewichtsbedingungen können die Kräfte, welche auf das System einwirken, ermittelt werden. Am Haubenwagen werden keine Nutzlasten eingeleitet, wodurch lediglich eine „Ständige Last“ (Eigengewicht) sowie eine „Außergewöhnliche Last“ (Kräfte aus Beschleunigung/Verzögerung und Seitenführung) am System wirken.

Kräfte auf Führung in x-y-Ebene:

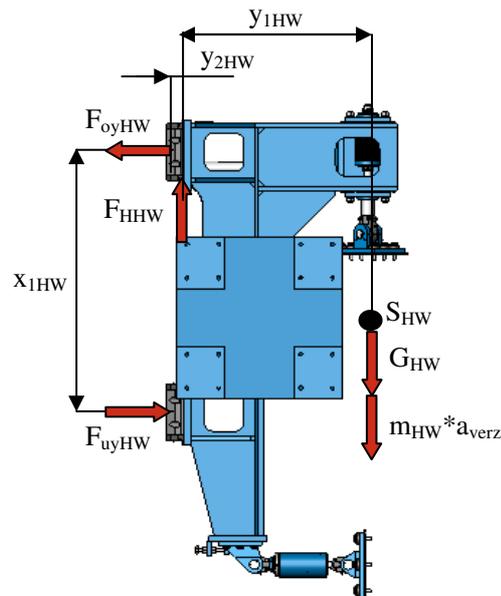


Abbildung 7-23: Haubenwagen x-y-Ebene; LF2

ständige Last:

$$\sum M=0 \quad G_{HW} y_{1HW} - F_{oyHW} x_{1HW} - F_{HHW} y_{2HW} + m_{HW} a_{verz} y_{1HW} = 0$$

$$F_{oyHW} = (G_{HW} y_{1HW} - F_{HHW} y_{2HW} + m_{HW} a_{verz} y_{1HW}) / x_{1HW} \quad F_{oyHW} = 73129,0 \text{ N}$$

$$\sum F_y=0 \quad F_{oyHW} - F_{uyHW} = 0$$

$$F_{uyHW} = F_{oyHW} \quad F_{uyHW} = 73129,0 \text{ N}$$

$$\sum F_x=0 \quad G_{HW} - F_{HHW} + m_{HW} a_{verz} = 0$$

$$F_{HHW} = G_{HW} + m_{HW} a_{verz} \quad F_{HHW} = 86800,0 \text{ N}$$

Kräfte auf Führung in x-z-Ebene:

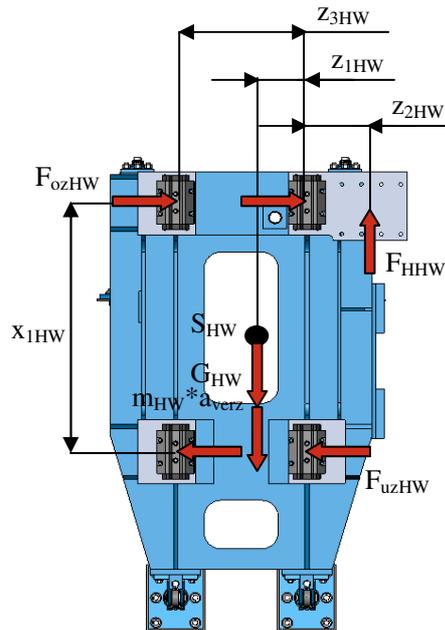


Abbildung 7-24: Haubenwagen x-z-Ebene; LF2

ständige Last:

$$\sum M=0 \quad G_{HW} z_{1HW} - F_{ozHW} x_{1HW} + F_{HHW} z_{2HW} + m_{HW} a_{verz} z_{1HW} = 0$$

$$F_{ozHW} = (G_{HW} z_{1HW} + F_{HHW} z_{2HW} + m_{HW} a_{verz} z_{1HW}) / x_{1HW} \quad F_{ozHW} = 34286,0 \text{ N}$$

$$\sum F_z=0 \quad F_{ozHW} - F_{uzHW} = 0$$

$$F_{uzHW} = F_{ozHW} \quad F_{uzHW} = 34286,0 \text{ N}$$

$$\sum F_x=0 \quad G_{HW} - F_{HHW} + m_{HW} a_{verz} = 0$$

$$F_{HHW} = G_{HW} + m_{HW} a_{verz} \quad F_{HHW} = 86800,0 \text{ N}$$

Außergewöhnliche Kräfte auf Führung:

a) Kräfte aus Beschleunigung und Verzögerung:

$K_{HW}=m_{HW} a_{verz}$	$K_{HW}= 24800,0$	N
$\Sigma G_r=\Sigma G_{r,max}+\Sigma G_{r,min}=F_{uyHW}+F_{oyHW}$	$\Sigma G_r= 146258,0$	N
$\Sigma G_{r,max}=F_{uyHW}$	$\Sigma G_{r,max}= 73129,0$	N
$M_{HW}=K_{HW} (z_{1HW}+z_{2HW})$	$M_{HW}= 11755200,0$	Nmm
$\xi_1=\Sigma G_{r,max}/\Sigma G_r$	$\xi_1= 0,5$	
$\xi_2=1-\xi_1$	$\xi_2= 0,5$	
"vertikal": $H_{L,1,HW}=\varphi_5 K_{HW} 1/n_f$	$H_{L,1,HW}= 18600,0$	N
$H_{L,2,HW}=\varphi_5 K_{HW} 1/n_f$	$H_{L,2,HW}= 18600,0$	N
quer: $H_{T,1,HW}=\varphi_5 \xi_2 M_{HW}/x_{1HW}$	$H_{T,1,HW}= 7347,0$	N
$H_{T,2,HW}=\varphi_5 \xi_1 M_{HW}/x_{1HW}$	$H_{T,2,HW}= 7347,0$	N

φ_5 nach Tabelle 3-10 / $n_f=2$

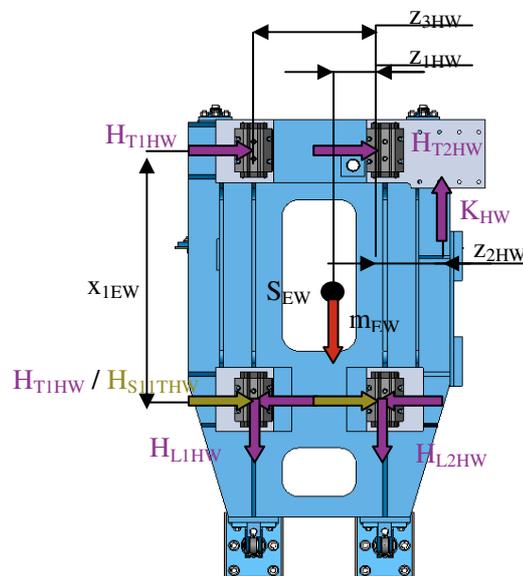


Abbildung 7-25: Haubenwagen; Kräfte aus Beschleunigung und Schräglauf

b) Kräfte aus Schräglauf:

$\alpha_F = 0,75 \cdot x/x_{1EW}$	$\alpha_F =$	0,000625
$\alpha_V = y/x_{1EW}$	$\alpha_V =$	0,000083
$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad}$	$\alpha =$	0,001707
$f = 0,3 (1 - \exp(-250 \alpha)) \leq 0,3$	$f =$	0,104277

"vertikal": $H_{S,1,1,L,HW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,1,1,L} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,1,1,L,HW} =$ 0,0 N

$H_{S,1,2,L,HW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,1,2,L} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,1,2,L,HW} =$ 0,0 N

$H_{S,2,1,L,HW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,2,1,L} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,2,1,L,HW} =$ 0,0 N

$H_{S,2,2,L,HW} = \varphi_4 \cdot f \cdot \lambda_{S,2,2,L} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,2,2,L,HW} =$ 0,0 N

$\lambda_{S,1,1,L} = 0$	$\lambda_{S,2,1,L} = 0$	Tabelle 3-13
$\lambda_{S,1,2,L} = 0$	$\lambda_{S,2,2,L} = 0$	Tabelle 3-13

quer: $S_{HW} = f \cdot \lambda_{S,1} \cdot \Sigma G_r$ $S_{HW} =$ 7625,7 N

$H_{S,1,1,T,HW} = f \cdot \lambda_{S,1,1,T} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,1,1,T,HW} =$ 3812,9,3 N

$H_{S,1,2,T,HW} = f \cdot \lambda_{S,1,2,T} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,1,2,T,HW} =$ 0,0 N

$H_{S,2,1,T,HW} = f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,2,1,T,HW} =$ 3812,9 N

$H_{S,2,2,T,HW} = f \cdot \lambda_{S,2,2,T} \cdot \Sigma G_r$ $H_{S,2,2,T,HW} =$ 0,0 N

$\lambda_{S,1,1,T} = \xi_2/2 = 0,25$	$\lambda_{S,1,2,T} = 0$	Tabelle 3-13
$\lambda_{S,2,1,T} = \xi_1/2 = 0,25$	$\lambda_{S,2,2,T} = 0$	Tabelle 3-13

$\varphi_4 = 1$ nach Tabelle 6-8

$n_r = 2$

$\alpha_0 = 0,001$ nach Tabelle 6-11

$x = 1 \text{ mm}$; gewählt

$y = 0,1 \text{ mm}$; gewählt

$e_1 = 0$ und $e_2 = x_{1EW} \rightarrow h = x_{1EW}$ nach Tabelle 6-12

7.3.1.3 Säule

Die am Elektroden- und Haubenwagen ermittelten Kräfte werden im Weiteren durch das Freimachen der Bauteile auf die Drehsäule übertragen.

In der x-y-Ebene wird die Drehsäule aufgrund ihres nicht konstanten Querschnittes in drei Abschnitte unterteilt, wodurch sich durch die „Exzentrizität“ der oberen beiden Abschnitte zusätzliche Biegemomente ausbilden.

Kräfte auf Säule in x-y-Ebene:

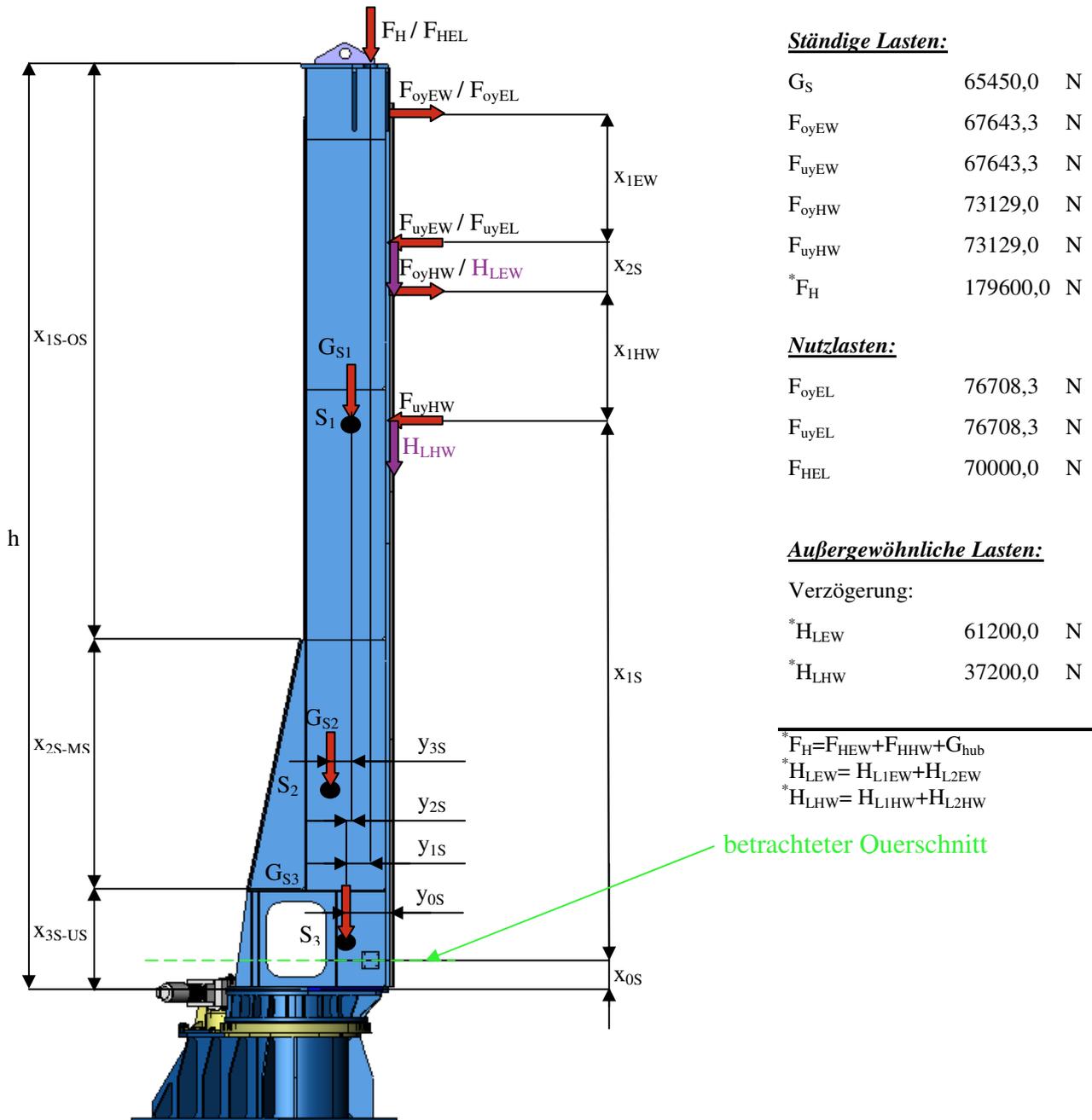
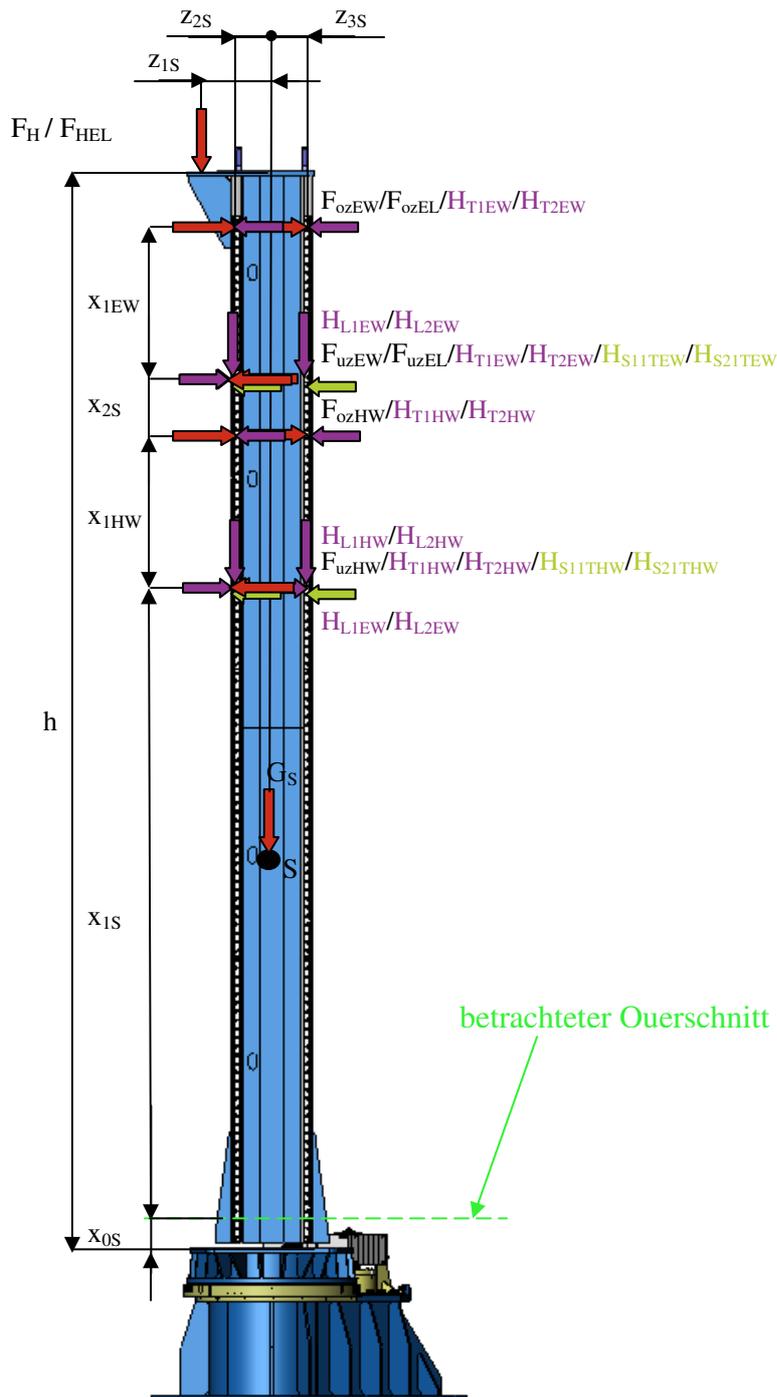


Abbildung 7-26: Drehsäule x-y-Ebene; LF2

Kräfte auf Säule in x-z-Ebene:



Ständige Lasten:

G_S	65450,0	N
F_{ozEW}	33852,0	N
F_{uzEW}	33852,0	N
F_{ozHW}	34286,0	N
F_{uzHW}	34286,0	N
$*F_H$	179600,0	N

Nutzlasten:

F_{ozEL}	34416,7	N
F_{uzEL}	34416,7	N
F_{HEL}	70000,0	N

Außergewöhnliche Lasten:

Verzögerung:

$H_{T,1,EW}$	15045,0	N
$H_{T,2,EW}$	15045,0	N
$*H_{L,EW}$	61200,0	N
$H_{T,1,HW}$	7347,0	N
$H_{T,2,HW}$	7347,0	N
$*H_{L,HW}$	37200,0	N

Schräglauf:

$H_{S,1,1,T,EW}$	7526,3	N
$H_{S,2,1,T,EW}$	7526,3	N
$H_{S,1,1,T,HW}$	3812,9	N
$H_{S,2,1,T,HW}$	3812,9	N

$*F_H = F_{HEW} + F_{HHW} + G_{hub}$
 $*H_{L,EW} = H_{L,1,EW} + H_{L,2,EW}$
 $*H_{L,HW} = H_{L,1,HW} + H_{L,2,HW}$

Abbildung 7-27: Drehsäule x-z-Ebene; LF2

7.3.2 Tragwerksberechnung

7.3.2.1 Einfluss der Tragwerksverformung

$$\alpha_{cr} = \frac{f_u}{\sigma_{x.Ed.1}} = 12,73 \quad (\text{nach Gl.45})$$

$\alpha_{cr} > 10 \quad \longrightarrow$ Die elastische Berechnung des Tragwerks nach der Theorie I. Ordnung ist demnach zulässig.

7.3.2.2 Imperfektionen

Der Einfluss der Bauteil-Imperfektionen darf aufgrund der Zulässigkeit der Theorie I. Ordnung vernachlässigt werden. Es wird der Einfluss jedoch bei dieser Anwendung aus Sicherheitsgründen mitberücksichtigt.

Eine globale Anfangsschiefstellung kann vernachlässigt werden wenn folgende Beziehung nach Gl.51 erfüllt wird:

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}$$

x-y-EBENE:

$$H_{Ed,xy} = \gamma_{G,sup} (F_{oyEW} - F_{uyEW} + F_{oyHW} - F_{uyHW}) + \gamma_Q (F_{oyEL} - F_{uyEL}) \quad H_{Ed,xy} = 0,0 \quad N$$

$$V_{Ed,xy} = \gamma_{G,sup} (G_S + F_H) + \gamma_Q F_{HEL} + \gamma_Q \psi_0 (H_{L,EW} + H_{L,HW}) \quad V_{Ed,xy} = 477875,0 \quad N$$

$$H_{ed,xy} \geq 0,15 V_{ed,xy} \quad \longrightarrow \quad \text{Schiefstellung}$$

x-z-EBENE:

$$H_{Ed,xz} = \gamma_{G,sup} (F_{ozEW} - F_{uzEW} + F_{ozHW} - F_{uzHW}) + \gamma_Q (F_{ozEL} - F_{uzEL}) \quad H_{Ed,xz} = 0,0 \quad N$$

$$V_{Ed,xz} = \gamma_{G,sup} (G_S + F_H) + \gamma_Q F_{HEL} + \gamma_Q \psi_0 (H_{L,EW} + H_{L,HW}) \quad V_{Ed,xz} = 477875,0 \quad N$$

$$H_{ed,xz} \geq 0,15 V_{ed,xz} \quad \longrightarrow \quad \text{Schiefstellung}$$

$\gamma_{G,sup}, \gamma_Q$ und ψ_0 nach Tabelle 6-2/6-3 ($\gamma_{G,sup} = 1,1 / \gamma_Q = 1,5 / \psi_0 = 0,7$)

Schiefstellung nach Gl.47 (siehe 7.2.2.2):

Verschiebung von Schwerpunkt (Exzentrizität):

$$e_N = \square h \quad \square \ll \quad \text{---} \gg \quad \tan(\square) \approx \square$$

$$e_{N,xy} = \square h \quad e_{N,xy} = 30,422 \text{ mm}$$

$$e_{N,xz} = \square h \quad e_{N,xz} = 30,422 \text{ mm}$$

7.3.2.3 Querschnitt

Ermittlung des Schwerpunktes wie in Abschnitt 7.2.2.3

7.3.2.4 Spannungen im betrachteten Querschnitt:

Analytische Ermittlung der Spannungen:

ständige Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,st} = (F_H + G_S) / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,st} = -2,71 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy} = M_{xy,st} / W_z$$

$$\sigma_{b1,xy,st} = -5,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xy,st} = -5,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xy,st} = 0,85 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,st} = M_{xy,st} / W_y$$

$$\sigma_{b1,xz,st} = -2,51 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xz,st} = 2,51 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xz,st} = -2,51 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,st} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyHW} x_{1S} + F_H (y_{1S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$M_{xy,st} = 244734893,82 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,st} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzHW} x_{1S} - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$M_{xz,st} = -32551318,82 \text{ Nmm}$$

Nutz-Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,EL} = F_{HEL} / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,EL} = -0,77 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,EL} = M_{xy,EL} / W_z$$

$$\sigma_{b1,xy,EL} = -2,61 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,EL} = M_{xz,EL} / W_y$$

$$\sigma_{b1,xz,EL} = -0,19 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xy,EL} = -2,61 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xy,EL} = 0,53 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xz,EL} = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xz,EL} = -0,19 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,EL} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{HEL} (y_{1S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL} = 118784542,2 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,EL} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,zy})$$

$$M_{xz,EL} = -2479542,2 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,au\beta} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,au\beta} = -1,09 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,au\beta} = M_{xy,au\beta} / W_z$$

$$\sigma_{b1,xy,au\beta} = -1,29 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xy,au\beta} = -1,29 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xy,au\beta} = 0,21 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,au\beta} = M_{xz,au\beta} / W_y$$

$$\sigma_{b1,xz,au\beta} = -4,37 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b2,xz,au\beta} = 4,37 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{b3,xz,au\beta} = -4,37 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

$$M_{xy,au\beta} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL} = 58884727,9 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

$$M_{xz,au\beta} = -(H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + (H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) (x_{1HW} + x_{1S}) + (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) x_{1S} - (H_{L,1,EW} + H_{L,1,HW}) (z_{2S} + e_{N,xz}) + (H_{L,2,EW} + H_{L,2,HW}) (z_{3S} + e_{N,xz})$$

$$M_{xz,EL} = -56734327,9 \text{ Nmm}$$

Spannungen im Querschnitt:

im Punkt 1:	$\sigma_{x,max,1}=(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b1,xy,st}+\sigma_{b1,xz,st})+(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b1,xy,EL}+\sigma_{b1,xz,EL})+(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,max,1}= -20,94 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 2:	$\sigma_{x,max,2}=(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b2,xy,st}+\sigma_{b2,xz,st})+(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b2,xy,EL}+\sigma_{b2,xz,EL})+(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,max,2}= -6,79 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 3:	$\sigma_{x,max,3}=(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b3,xy,st}+\sigma_{b3,xz,st})+(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b3,xy,EL}+\sigma_{b3,xz,EL})+(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,max,3}= -10,06 \text{ N/mm}^2$

Bemessung der auftretenden Spannungen:

Leiteinwirkung – Nutzlast:

im Punkt 1:	$\sigma_{x,Ed,1}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b1,xy,st}+\sigma_{b1,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b1,xy,EL}+\sigma_{b1,xz,EL})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,Ed,1}= -26,78 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 2:	$\sigma_{x,Ed,2}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b2,xy,st}+\sigma_{b2,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b2,xy,EL}+\sigma_{b2,xz,EL})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,Ed,2}= -10,24 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 3:	$\sigma_{x,Ed,3}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b3,xy,st}+\sigma_{b3,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b3,xy,EL}+\sigma_{b3,xz,EL})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xz,au\beta})$	$\sigma_{x,Ed,3}= -12,06 \text{ N/mm}^2$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

im Punkt 1:	$\sigma_{x,Ed,1}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b1,xy,st}+\sigma_{b1,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xy,au\beta}+\sigma_{b1,xz,au\beta})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b1,xy,EL}+\sigma_{b1,xz,EL})$	$\sigma_{x,Ed,1}= -28,21 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 2:	$\sigma_{x,Ed,2}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b2,xy,st}+\sigma_{b2,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xy,au\beta}+\sigma_{b2,xz,au\beta})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b2,xy,EL}+\sigma_{b2,xz,EL})$	$\sigma_{x,Ed,2}= -7,90 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 3:	$\sigma_{x,Ed,3}=\gamma_{G,j,sup}(\sigma_{d,xy,st}+\sigma_{b3,xy,st}+\sigma_{b3,xz,st})+\gamma_{Q,1}(\sigma_{d,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xy,au\beta}+\sigma_{b3,xz,au\beta})+\gamma_{Q,1}\psi_0(\sigma_{d,xy,EL}+\sigma_{b3,xy,EL}+\sigma_{b3,xz,EL})$	$\sigma_{x,Ed,3}= -11,87 \text{ N/mm}^2$

Bemessungswerte für die weitere Berechnung:

im Punkt 1:		$\sigma_{x,Ed,1}= -28,21 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 2:		$\sigma_{x,Ed,2}= -10,24 \text{ N/mm}^2$
im Punkt 3:		$\sigma_{x,Ed,3}= -12,06 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{G,j,sup}$, $\gamma_{Q,1}$ und ψ_0 nach Tabelle 6-2/6-4 ($\gamma_{G,j,sup}=1,35$ / $\gamma_{Q,1}=1,5$ / $\psi_0=0,7$)

Ermittlung der Spannungen mittels FEM:

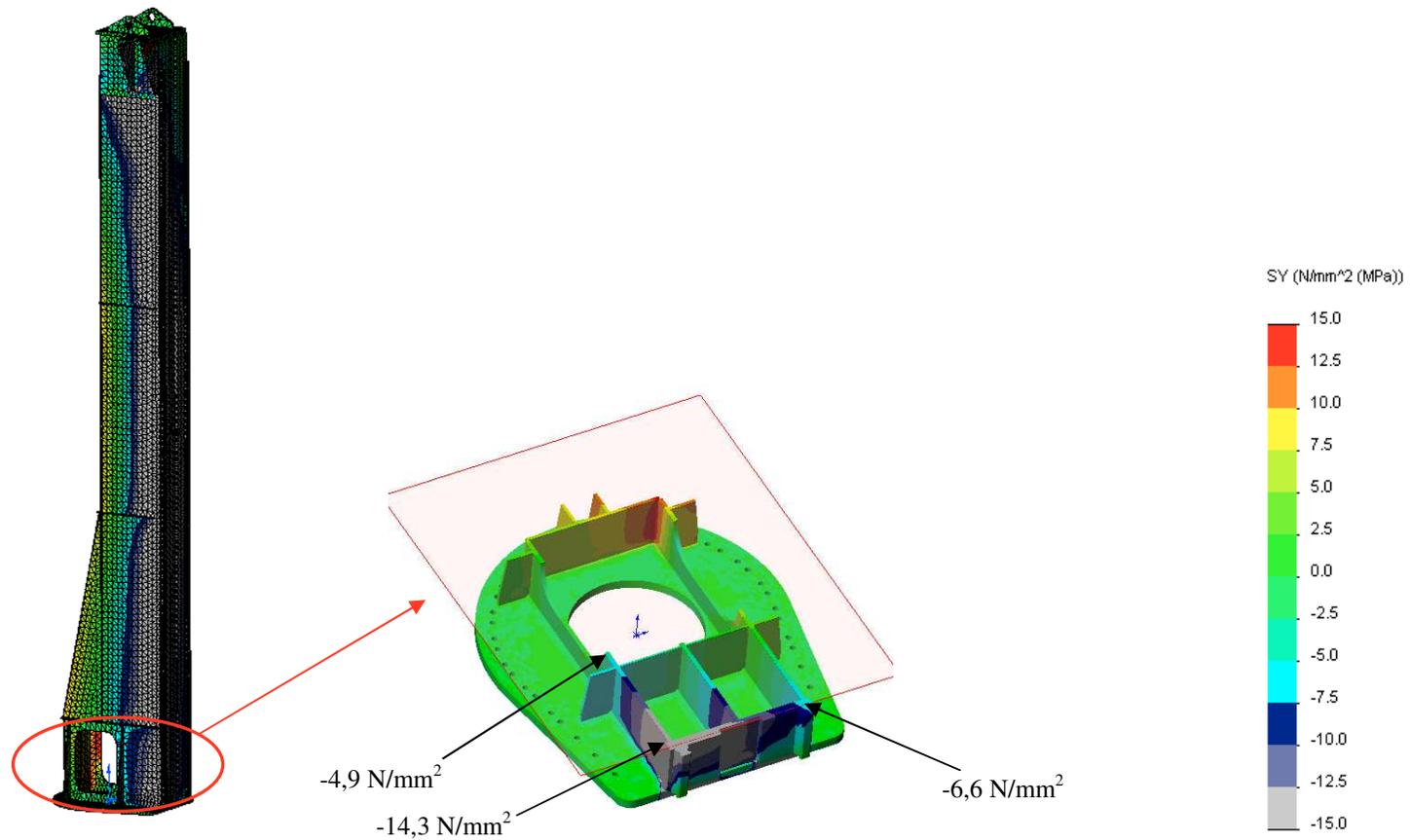


Abbildung 7-28: Längsspannungen im betrachteten Querschnitt nach FEM; LF2

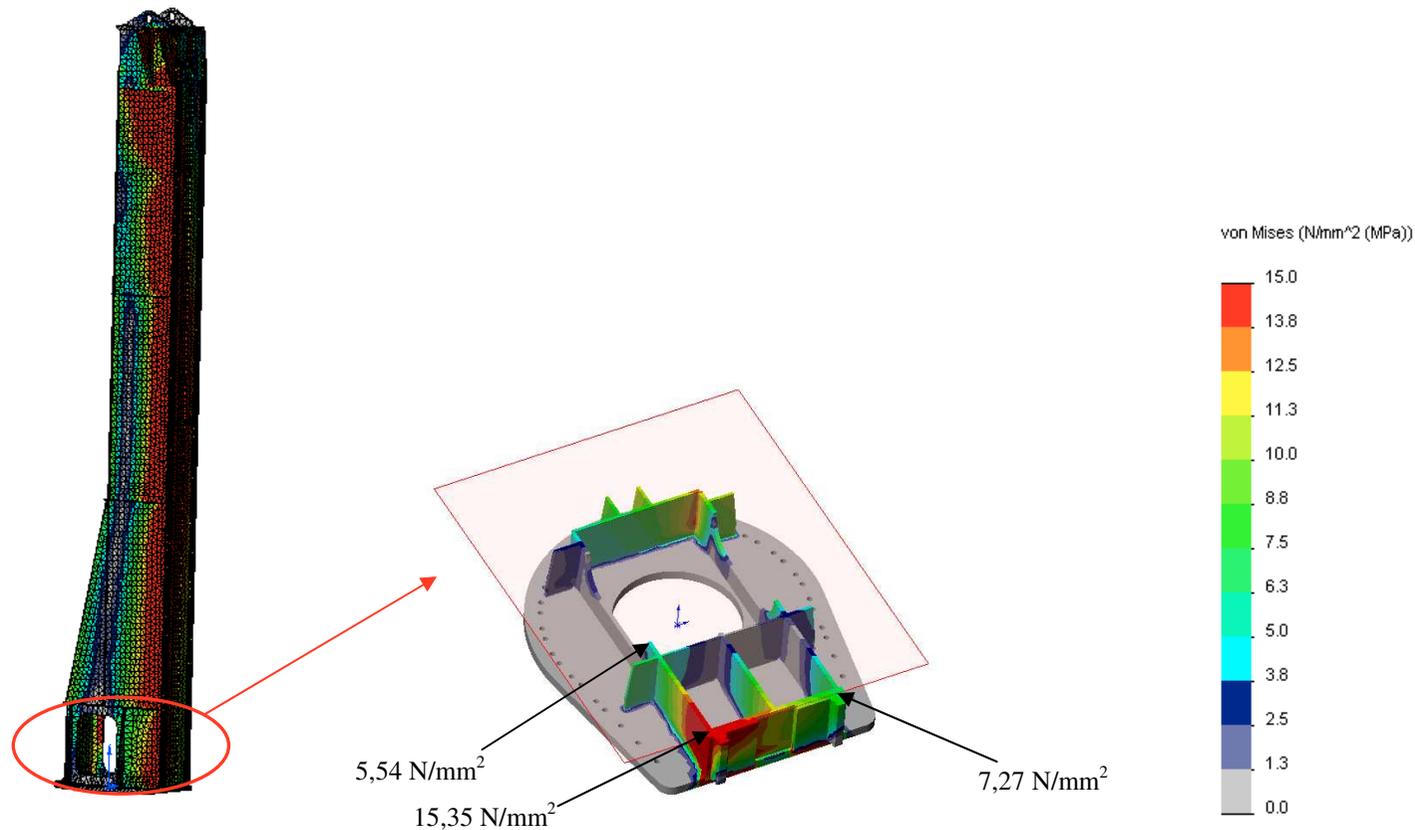


Abbildung 7-29: Spannungsverteilung nach von Mises im betrachteten Querschnitt; LF2

Beurteilung der Spannungen:

Die Spannungen aus der analytischen und der FEM-Berechnung stimmen sehr gut überein. Die geringen Unterschiede resultieren aus einer geringfügigen Idealisierung des Querschnitts in der analytischen Betrachtung.

7.3.2.5 Methode der reduzierten Spannungen

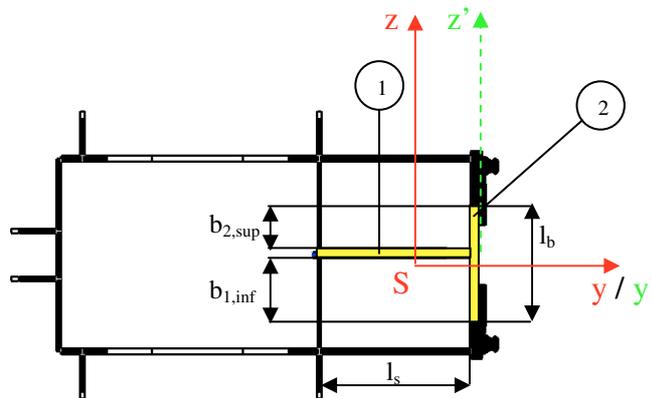
Es wird der Nachweis erbracht, dass die Bemessung des Bauwerks mit Querschnitten der Klasse 3 zulässig ist. Dabei werden zwei Blechfelder näher betrachtet.

Blechfeld 1:

a) Ausgesteiftes Blechfeld:

-Siehe Abschnitt 7.2.2.5-

b) Ersatzdruckstab:



$b_{1,inf}=(3-\Psi_x)/(5-\Psi_x) b_1$	$b_{1,inf}= 173,40 \text{ mm}$
$b_{2,sup}=2/(5-\Psi_x) b_2$	$b_{2,sup}= 131,60 \text{ mm}$
1.Steife:	$t_s= 20,00 \text{ mm}$
	$l_s= 495,00 \text{ mm}$
2.Blech:	$t_b= 20,00 \text{ mm}$
	$l_b= 325,00 \text{ mm}$

Abbildung 7-30: Ersatzdruckstab Blechfeld 1; LF2

Tabelle 7-7: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF2

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
1	495	20	9900	-267,5	0	-2648250	0	-102,06	-8,28	305262247
2	20	325	6500	-10	-20,9	-65000	-135877,99	-155,44	-12,62	157271214
			$A_{ges} = A_{sl,1}$ [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{sl,1}$ [mm ⁴]
			16400			-2713250	-91373,5			462533461

Schwerpunktskoordinaten des Ersatzdruckstabes:

$$y_s = -165,44 \text{ mm}$$

$$z_s = -8,29 \text{ mm}$$

Nachweis der Zulässigkeit der Methode der reduzierten Spannungen:

Ermittlung von $\alpha_{ult,k}$ über das Fließkriterium nach Gl.94:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) \quad \sigma_{z,Ed} = 0$$

$$\longrightarrow \alpha_{\text{ult.k,xz}} = \min\left(\frac{f_y}{\sigma_{\text{x.Ed}}}\right) \longrightarrow \alpha_{\text{ult.k,xz}} = 8,31$$

$\sigma_{\text{x.Ed}}$ ist die größte auftretende Längsspannung im Blechfeld

Ermittlung des modifizierten Schlankheitsgrades nach Gl.95:

-Spannungsverhältnis im Blechfeld nach Abschnitt 7.5.2:

$$\Psi_x = \sigma_2 / \sigma_1 = \sigma_{\text{x.Ed,2}} / \sigma_{\text{x.Ed,1}} \quad \Psi_x = 0,36$$

$$\Psi_z = 0,00$$

-Elastische kritische Knickspannung nach Abschnitt 7.5.2:

$$\sigma_{\text{cr,x}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\text{sl,1}}}{A_{\text{sl,1}} \cdot a^2} \cdot \frac{b}{\frac{b}{2}} = 126854,50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \longrightarrow \alpha_{\text{cr,x}} = \frac{\sigma_{\text{cr,x}}}{\sigma_{\text{x.Ed}}} = 4486,01$$

-Ermittlung von α_{cr} nach Gl.110:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{cr}}} = \frac{1 + \Psi_x}{4 \cdot \alpha_{\text{cr,x}}} + \frac{1 + \Psi_z}{4 \cdot \alpha_{\text{cr,z}}} + \left[\left(\frac{1 + \Psi_x}{4 \cdot \alpha_{\text{cr,x}}} + \frac{1 + \Psi_z}{4 \cdot \alpha_{\text{cr,z}}} \right)^2 + \frac{1 - \Psi_x}{2 \cdot \alpha_{\text{cr,x}}^2} + \frac{1 - \Psi_z}{2 \cdot \alpha_{\text{cr,z}}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{\text{cr}} = 4486,01$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ult,k}}}{\alpha_{\text{cr}}}} = 0,043$$

Ermittlung der elastischen Plattenbeulspannung nach Gl.100:

-Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung nach Gl.105:

$$I_p = \frac{b \cdot t_b^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 461538,46 \text{mm}^4$$

-Beulwert der orthotropen Platte nach Gl.101:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot [(1 + \alpha^2) + \gamma - 1]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = 440,21 \longrightarrow \sigma_{\text{cr,p}} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 84205,05 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

mit:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 191,28 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = 1235,36 \quad ; \quad \delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = 0,79 \quad ; \quad \alpha = \frac{a}{b} = 1,52 \geq 0,5 \quad \longrightarrow \quad \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

Ermittlung des endgültigen Abminderungsbeiwertes ρ nach Gl.97:

$$\rho = (\rho_b - \chi_c) \cdot \zeta \cdot (2 - \zeta) + \chi_c = 1$$

Bedingung:

$$\left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right) = 0,0145 < \rho^2$$

mit:

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr.p}}{\sigma_{cr.x}} - 1 = -0,336 \quad \longrightarrow \quad \zeta = 0$$

$$\lambda_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi_x} = 0,75 \quad \longrightarrow \quad \rho_b = 1$$

$$\chi_c = 1$$

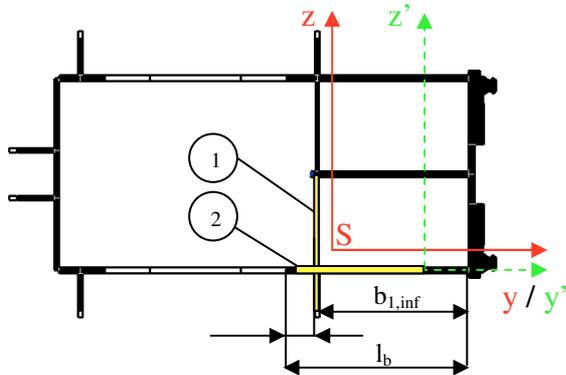
$$\frac{\rho_c \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 8,31 > 1 \quad \longrightarrow \quad \text{Methode der reduzierten Spannungen ist zulässig}$$

Blechfeld 2:

a) Ausgesteiftes Blechfeld:

-Siehe Abschnitt 7.2.2.5-

b) Ersatz Druckstab:



$$b_{1,inf} = (3 - \Psi_x) / (5 - \Psi_x) b_1 \quad b_{1,inf} = 277,47 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = 2 / (5 - \Psi_x) b_2 \quad b_{2,sup} = 41,75 \text{ mm}$$

1. Steife: $t_s = 10,00 \text{ mm}$
 $l_s = 450,00 \text{ mm}$

2. Blech: $t_b = 20,00 \text{ mm}$
 $l_b = 329,22 \text{ mm}$

Abbildung 7-31: Ersatzdruckstab Blechfeld 2; LF2

Tabelle 7-8: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF2

	y_i [mm]	z_i [mm]	A_i [mm ²]	y_{ai} [mm]	z_{ai} [mm]	$y_{ai} A_i$ [mm ³]	$z_{ai} A_i$ [mm ³]	y_{si} [mm]	z_{si} [mm]	I_z [mm ⁴]
1	10	450	4500	-282,47	90	-1271115,59	405000	70,01	53,46	88799358,65
2	329,22	20	6584,37	-164,61	0	-1083846,81	0	-47,85	36,54	9009750,54
			$A_{ges} = A_{sl,1}$ [mm ²]			$\sum(y_i A_i)$ [mm ³]	$\sum(z_i A_i)$ [mm ³]			$I_{z,ges} = I_{sl,1}$ [mm ⁴]
			11084,37			-2354962,41	405000			97809109,19

Schwerpunktskoordinaten des Ersatzdruckstabes:

$$y_s = -212,46 \text{ mm}$$

$$z_s = 36,54 \text{ mm}$$

Nachweis der Zulässigkeit der Methode der reduzierten Spannungen:

Ermittlung von $\alpha_{ult,k}$ über das Fließkriterium nach Gl.96:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) \quad \sigma_{z,Ed} = 0$$

$\sigma_{x,Ed}$ ist die größte auftretende Längsspannung im Blechfeld

$$\longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = \min \left(\frac{f_y}{\sigma_{x,Ed}} \right) \longrightarrow \alpha_{ult,k,xz} = 8,31$$

Ermittlung des modifizierten Schlankheitsgrades nach Gl.95:

-Spannungsverhältnis im Blechfeld nach Abschnitt 7.5.2:

$$\Psi_x = \sigma_2 / \sigma_1 = \sigma_{x,Ed,2} / \sigma_{x,Ed,1} \quad \Psi_x = 0,45$$

$$\Psi_z = 0,00$$

-Elastische kritische Knickspannung nach Abschnitt 7.5.2:

$$\sigma_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \cdot \frac{b_1 + \frac{t_s}{2} + y_s}{b_1 + \frac{t_s}{2}} = 91892,64 \frac{N}{mm^2} \longrightarrow \alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} = 3249,64$$

-Ermittlung von α_{cr} nach Gl.110:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \Psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \Psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1 + \Psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \Psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1 - \Psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1 - \Psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{cr} = 3249,64$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = 0,051$$

Ermittlung der elastischen Plattenbeulspannung nach Gl.100:

-Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung nach Gl.105:

$$I_p = \frac{b \cdot t_b^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 439560,44 mm^4$$

-Beulwert der orthotropen Platte nach Gl.101:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot [(1 + \alpha^2) + \gamma - 1]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = 420,15 \longrightarrow \sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 88605,07 \frac{N}{mm^2}$$

mit:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 210,89 \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} = 233,98 \quad \delta = \frac{A_{sl}}{A_p} = 0,38 \quad \alpha = \frac{a}{b} = 0,75 \geq 0,5 \longrightarrow \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

Ermittlung des endgültigen Abminderungsbeiwertes ρ nach Gl.97:

$$\rho = (\rho_b - \chi_c) \cdot \zeta \cdot (2 - \zeta) + \chi_c = 1$$

Bedingung:

$$\left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y}}{\gamma_{M1}} \right) = 0,0145 < \rho^2$$

mit:

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr.p}}{\sigma_{cr.x}} - 1 = -0,036 \longrightarrow \zeta = 0$$

$$\lambda_p < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi_x} = 0,75 \longrightarrow \rho_b = 1$$

$$\chi_c = 1$$

$$\frac{\rho_c \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 8,31 > 1 \longrightarrow \text{Methode der reduzierten Spannungen ist zulässig}$$

7.3.2.6 Grenzzustände der Tragfähigkeit

7.3.2.6.1 Lagesicherheit (EQU)

Der Nachweis der Lagesicherheit, der Sicherheit gegen das Abheben des Auflagers von seiner ursprünglichen Position, erfolgt nach Abschnitt 6.1.5.4.2:

x-y-EBENE:

Destabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{dstxyyst} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{dstxyyst} = 1110974421,7 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

$$M_{dstxyauß} = (H_{L,EW} + H_{L,EW}) e_{N,xy}$$

$$M_{dstxyauß} = 2993527,9 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{Ed,dstxy} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxyyst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxyEL} + \gamma_{Q,EQU} \psi_{0,EQU} M_{dstxyauß}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{Ed,dstxy} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxyyst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxyauß} + \gamma_{Q,EQU} \psi_{0,EQU} M_{dstxyEL}$$

Bemessung des Destabilisierenden Momentes:

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$, $\gamma_{Q,EQU}$ und $\psi_{0,EQU}$ nach Tabelle 6-2/6-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,1$ / $\gamma_{Q,1} = 1,5$ / $\psi_{0,EQU} = 0,7$)

Nutzlast:

$$M_{dstxyEL} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{dstxyEL} = 669817166,7 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed,dstxy} = 2229940818 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed,dstxy} = 1929870181 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ed,dstxy} = 2229940818 \text{ Nmm}$$

Stabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{\text{stbxyyst}} = F_{\text{uyEW}} (X_{2S} + X_{1HW} + X_{1S} + X_{0S}) + F_{\text{uyHW}} (X_{1S} + X_{0S}) + F_H (Y_{0S} - Y_{1S} - e_{N,xy}) + G_{S3} (Y_{0S} - e_{N,xy}) + G_{S2} (Y_{0S} - Y_{2S} + Y_{3S} - e_{N,xy}) + G_{S1} (Y_{0S} - Y_{2S} - e_{N,xy})$$

$$M_{\text{stbxyyst}} = 1006823077,9 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{\text{stbxyEL}} = F_{\text{uyEL}} (X_{2S} + X_{1HW} + X_{1S} + X_{0S}) + F_{\text{HEL}} (Y_{0S} - Y_{1S} - e_{N,xy})$$

$$M_{\text{stbxyEL}} = 590792624,5 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

$$M_{\text{stbxyauß}} = 0 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{\text{Rd,stbxy}} = \gamma_{G,\text{sup,EQU}} M_{\text{stbxyyst}} + \gamma_{Q,\text{EQU}} M_{\text{stbxyEL}} + \gamma_{Q,\text{EQU}} \psi_{0,\text{EQU}} M_{\text{stbxyauß}}$$

$$M_{\text{Rd,stbxy}} = 1792329707 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{\text{Rd,stbxy}} = \gamma_{G,\text{sup,EQU}} M_{\text{stbxyyst}} + \gamma_{Q,\text{EQU}} M_{\text{stbxyauß}} + \gamma_{Q,\text{EQU}} \psi_{0,\text{EQU}} M_{\text{stbxyEL}}$$

$$M_{\text{Rd,stbxy}} = 1526473026 \text{ Nmm}$$

Bemessung des stabilisierenden Momentes:

$$M_{\text{Rd,stbxy}} = 1526473026 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,\text{sup,EQU}}$, $\gamma_{Q,\text{EQU}}$ und $\psi_{0,\text{EQU}}$ nach Tabelle 3-2/3-3 ($\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,1$ / $\gamma_{Q,1} = 1,5$ / $\psi_{0,\text{EQU}} = 0,7$)

$$M_{\text{Ed,dst,xy}} \leq M_{\text{Rd,stb,xy}} + M_{\text{Rd,xy}}$$

$$M_{\text{Rd,xy}} = 703467792 \text{ Nmm}$$

Widerstand, welcher durch die Verschraubung (50 x M20 Schrauben) zwischen Drehsäule und Drehlager aufgebracht werden muss.

x-z-EBENE:

Destabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{dstxzst} = F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{uzHW} (x_{1S} + x_{0S}) + F_H (z_{1S} + e_{N,xz})$$

$$M_{dstxzst} = 570100750,9 \text{ Nmm}$$

Nutzlast:

$$M_{dstxzEL} = F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz})$$

$$M_{dstxzEL} = 30300875,5 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

$$M_{dstxzauf} = (H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) (x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + (H_{L,1,EW} + H_{L,1,HW}) (e_{N,xz})$$

$$M_{dstxzauf} = 368790454,0 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{Ed,dstxz} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxzst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxzEL} + \gamma_{Q,EQU} \psi_{0,EQU} M_{dstxzauf}$$

$$M_{Ed,dstxz} = 1468849616 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{Ed,dstxz} = \gamma_{G,sup,EQU} M_{dstxzst} + \gamma_{Q,EQU} M_{dstxzauf} + \gamma_{Q,EQU} \psi_{0,EQU} M_{dstxzEL}$$

$$M_{Ed,dstxz} = 1498452676 \text{ Nmm}$$

Bemessung des destabilisierenden Moments:

$$M_{Ed,dstxz} = 1498452676 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G,j,sup,EQU}$, $\gamma_{Q,EQU}$ und $\psi_{0,EQU}$ nach Tabelle 6-2/6-3 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,1$ / $\gamma_{Q,1} = 1,5$ / $\psi_{0,EQU} = 0,7$)

Stabilisierendes Moment:

Ständige Lasten:

$$M_{stbxzst} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + G_S (z_{2S} - e_{N,xz})$$

$$M_{stbxzst} = 557184432,0 \text{ Nmm}$$

Nutzlasten:

$$M_{stbxzEL} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S})$$

$$M_{stbxzEL} = 300526333,3 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche Nutzlasten:

$$M_{stbxzauß} = (H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S} + x_{0S}) + (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) (x_{1S} + x_{0S}) + (H_{L,2,EW} + H_{L,2,HW}) (z_{2S} + z_{3S} - e_{N,xz})$$

$$M_{stbxzauß} = 341576126,1 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{Rd, stbxz} = \gamma_{G, sup, EQU} M_{stbxzst} + \gamma_{Q, EQU} M_{stbxzEL} + \gamma_{Q, EQU} \psi_{0, EQU} M_{stbxzau\beta}$$

$$M_{Rd, stbxz} = 1310910421 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{Rd, stbxz} = \gamma_{G, sup, EQU} M_{stbxzst} + \gamma_{Q, EQU} M_{stbxzau\beta} + \gamma_{Q, EQU} \psi_{0, EQU} M_{stbxzEL}$$

$$M_{Rd, stbxz} = 1329382828 \text{ Nmm}$$

Bemessung des stabilisierenden Momentes:

$$M_{Rd, stbxz} = 1310910421 \text{ Nmm}$$

$\gamma_{G, j, sup, EQU}$, $\gamma_{Q, EQU}$ und $\psi_{0, EQU}$ nach Tabelle 3-2/3-3 ($\gamma_{G, j, sup} = 1,1$ / $\gamma_{Q, 1} = 1,5$ / $\psi_{0, EQU} = 0,7$)

$$M_{Ed, dst, xz} \leq M_{Rd, stb, xz} + M_{Rd, xz}$$

$$M_{Rd, xz} = 187542255,0 \text{ Nmm}$$

Widerstand, welcher durch die Verschraubung (50 x M20 Schrauben) zwischen Drehsäule und Drehlager aufgebracht werden muss.

Nachweis der Zulässigkeit der Schraubverbindung nach DIN EN 1993-1-8 [14]:

Die Schwenksäule wird mit der Stützsäule über ein Drehgelenk mittels fünfzig M20-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verbunden.

Werkstoffkennwerte:

$$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yb} = 900 \text{ N/mm}^2$$

Resultierendes Moment:

$$M_{res} = (M_{Rd,xy}^2 + M_{Rd,xz}^2)^{1/2} \quad M_{res} = 728037796 \text{ Nmm}$$

Minimaler Normalabstand der Schrauben zur Kippkante:

$$L = 300 \text{ mm}$$

Anzahl der Schrauben:

$$n = 50$$

Einwirkung auf eine einzelne Schraube:

$$F_E = M_{res} / (L \cdot n) \quad F_E = 48535,9 \text{ N}$$

Bemessung der Vorspannkraft:

$$F_V = 0,7 f_{ub} A_s / \gamma_{M7} \quad F_V = 153063,4 \text{ N} \quad \text{mit } \gamma_{M7} = 1,1$$

Zugtragfähigkeit der Schraubverbindung:

$$k_2 = 0,9$$

$$d_s = 17,5 \text{ mm} \quad \text{Kerndurchmesser einer M20 Schraube}$$

$$A_s = 240,5 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{t,Rd} = k_2 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \quad F_{t,Rd} = 173180,3 \text{ N}$$

Schraubkraft:

$$F_S = 144030 \text{ N} \quad \text{aus Verspannungsdreieck; Abbildung 7-16}$$

Nachweis der Schraubverbindung:

$$F_S / F_{t,Rd} = 0,83 < 1$$

7.3.2.6.2 Beanspruchbarkeit von Querschnitten

Die Beanspruchbarkeit von Querschnitten untersucht, ob das Bauteil den Belastungen im betrachteten Querschnitt standhält. Dabei muss die Zulässigkeit sowohl in den einzelnen Ebenen als auch für die zusammengesetzte Beanspruchung gegeben sein.

Allgemein:

Fließkriterium im Punkt 1 des betrachteten Querschnitts nach Gl.52:

$$\left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y} \right) = 0,0145 < 1$$

konservative Lösung nach Gl.53:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} = 0,201 < 1$$

Grenznormalkraft:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 0,104 < 1 \quad (\text{nach Gl.57})$$

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2124047 \text{ N} \quad (\text{nach Gl.58})$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$N_{Ed} = \gamma_{G,sup,STR} \cdot (G_S + F_H) + \gamma_{Q,STR} \cdot F_{HEL} + \gamma_{Q,STR} \cdot \psi_{0,STR} \cdot (H_{L,EW} + H_{L,HW}) = 539137,5 \text{ N}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$N_{Ed} = \gamma_{G,sup,STR} \cdot (G_S + F_H) + \gamma_{Q,STR} \cdot (H_{L,EW} + H_{L,HW}) + \gamma_{Q,STR} \cdot \psi_{0,STR} \cdot (F_{HEL}) = 551917,5 \text{ N}$$

Grenzbiegemoment um die z-Achse:

$$\frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd}} = 0,054 < 1 \quad (\text{nach Gl.60})$$

$$M_{z.Rd} = \frac{W_{z,max} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1068746111 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.62})$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{z.Ed} = \gamma_{G.sup.STR} \cdot M_{xy.st} + \gamma_{Q.STR} \cdot M_{xy.EL} + \gamma_{Q.STR} \cdot \psi_{0.STR} \cdot M_{xy.au\beta} = 5736342393 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{z.Ed} = \gamma_{G.sup.STR} \cdot M_{xy.st} + \gamma_{Q.STR} \cdot M_{xy.au\beta} + \gamma_{Q.STR} \cdot \psi_{0.STR} \cdot M_{xy.EL} = 5466793228 \text{ Nmm}$$

Grenzbiegemoment um die y-Achse:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} = 0,013 < 1 \quad (\text{nach Gl.60})$$

$$M_{y.Rd} = \frac{W_{y.max} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 3047768014 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.62})$$

Leiteinwirkung – Nutzlast:

$$M_{y.Ed} = \gamma_{G.sup.STR} \cdot M_{xz.st} + \gamma_{Q.STR} \cdot M_{xz.EL} + \gamma_{Q.STR} \cdot \psi_{0.STR} \cdot M_{xz.au\beta} = 1072346380 \text{ Nmm}$$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

$$M_{y.Ed} = \gamma_{G.sup.STR} \cdot M_{xz.st} + \gamma_{Q.STR} \cdot M_{xz.au\beta} + \gamma_{Q.STR} \cdot \psi_{0.STR} \cdot M_{xz.EL} = 1316492916 \text{ Nmm}$$

Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft:

$$\sigma_{x.Ed} = 28,28 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{nach Gl.65})$$

7.3.2.6.3 Stabilitätsnachweis

Der Nachweis für die Stabilität eines Bauteils ist zu bringen um sicherzustellen, dass es zu keinem Versagen aufgrund von Knicken bzw. Biegedrillknicken kommt. Im Allgemeinen sind Bauteile wie die Drehsäule, welche in Form eines Kastenprofils aufgebaut ist, nicht gegen Knicken oder Biegedrillknicken gefährdet.

Gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse:

Biegedrillknicken:

x-y-Ebene:

$$\frac{M_{z.Ed}}{M_{b.Rd}} = 0,136 < 1 \quad (\text{nach Gl.80})$$

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} W_{z.max} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 419518952 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.81})$$

Knicklinie für Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,39 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.82})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] = 1,54 \quad \text{mit} \quad \alpha_{LT} = 0,76 \quad (\text{nach Gl.83})$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_z \cdot f_y}{M_{cr.xy}}} = 1,16 \quad (\text{nach Gl.84})$$

mit

$$M_{cr.xy} = \alpha_{cr} \cdot M_z = 793908626 \text{ Nmm} \quad \text{für} \quad \alpha_{cr} = 18,795 \quad \text{aus FEA} \quad (\text{nach Gl.85})$$

x-z-Ebene:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{b.Rd}} = 0,107 < 1 \quad (\text{nach Gl.80})$$

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} W_{y,max} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1000885039 \text{ Nmm} \quad (\text{nach Gl.81})$$

Knicklinie für Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} = 0,33 \leq 1 \quad (\text{nach Gl.82})$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] = 1,81 \quad \text{mit} \quad \alpha_{LT} = 0,76 \quad (\text{nach Gl.83})$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr.xz}}} = 1,329 \quad (\text{nach Gl.84})$$

mit

$$M_{cr.xz} = \alpha_{cr} \cdot M_y = 1724726726 \text{ Nmm} \quad \text{für} \quad \alpha_{cr} = 18,795 \quad \text{aus FEA} \quad (\text{nach Gl.85})$$

Auf Biegung und Druck beanspruchte gleichförmige Bauteile:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,178 \leq 1$$

(nach Gl.90)

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,170 \leq 1$$

(nach Gl.91)

mit

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,75 \quad k_{yz} = k_{zz} = 0,78$$

(nach Tabelle 6-25)

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,78 \quad k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,60$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,75 > 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \psi_z = 0,78 > 0,4$$

Allgemeines Verfahren für Knick- und Biegedrillknicknachweise:

x-y-Ebene:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 4,58 > 1 \quad \text{und} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = 0,158 < \chi_{op}$$

(nach Gl.92)

mit

$$\frac{1}{\alpha_{ult.k.xy}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y,Rk}} \quad \longrightarrow \quad \alpha_{ult.k.xy} = 6,34$$

(nach 3.4.5.4)

$$\chi_{op} = \frac{1}{\Phi_{op} + \sqrt{\Phi_{op}^2 - \lambda_{op}^2}} = 0,72 < 1,0$$

(nach 6.4.5.2)

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{op} \cdot (\lambda_{op} - 0,2) + \lambda_{op}^2 \right] = 0,81 \quad \text{mit} \quad \alpha_{op} = 0,76$$

(nach 6.4.5.2)

und

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult.k}}{\alpha_{cr.op}}} = 0,58 \quad \text{mit} \quad \alpha_{cr.op} = 18,795 \quad \text{aus FEA} \quad \text{(nach Gl.93)}$$

x-z-Ebene:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult.k}}{\gamma_{M1}} = 7,72 > 1 \quad \text{und} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{y.Rd}} = 0,629 < \chi_{op} \quad \text{(nach Gl.92)}$$

mit

$$\frac{1}{\alpha_{ult.k.xy}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rk}} \quad \longrightarrow \quad \alpha_{ult.k.xy} = 14,45 \quad \text{(nach 6.4.5.4)}$$

$$\chi_{op} = \frac{1}{\Phi_{op} + \sqrt{\Phi_{op}^2 - \lambda_{op}^2}} = 0,53 < 1,0 \quad \text{(nach 6.4.5.2)}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{op} \cdot (\lambda_{op} - 0,2) + \lambda_{op}^2 \right] = 1,14 \quad \text{mit} \quad \alpha_{op} = 0,76 \quad \text{(nach 6.4.5.2)}$$

und

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult.k}}{\alpha_{cr.op}}} = 0,88 \quad \text{mit} \quad \alpha_{cr.op} = 18,795 \quad \text{aus FEA} \quad \text{(nach Gl.93)}$$

7.3.2.7 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit müssen die Verschiebungen des Bauwerks innerhalb der vorgegebenen zulässigen Werte liegen. Die auftretenden Verschiebungen wurden sowohl analytisch als auch mittels der Finite-Elemente-Analyse ermittelt.

Analytische Ermittlung der Verschiebungen:

Vereinfacht wurde angenommen, dass die Säule einen konstanten Querschnitt über die Höhe aufweist. Ihr Flächenträgheitsmoment um die z-Achse wird mit $2/3$ und um die y-Achse mit 1 des Flächenträgheitsmoments des betrachteten Querschnittes (Abbildung 7-9) angenommen.

a) Verschiebungen in x-y-Ebene:

Biegelinie allgemein: $E I w'' = -M_{b(x)}$

Randbedingungen:

$$w(x=X)=0$$

$$w'(x=X)=0$$

$$\text{mit } X=x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}+x_{1S}+x_{0S}$$

Ständige Lasten:

$$M_{b(x)} = F_{oyEW} x - F_{uyEW} (x - x_{1EW}) + F_{oyHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S})) - F_{uyHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW})) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{oyEW} x^2/2 - F_{uyEW} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{oyHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S}) x) - F_{uyHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) x + G_S e_{N,xy} x + G_{S1} y_{2S} x + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) x + C_9$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{oyEW} x^3/6 - F_{uyEW} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{oyHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S}) x^2/2) - F_{uyHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x^2/2) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 + G_S e_{N,xy} x^2/2 + G_{S1} y_{2S} x^2/2 + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) x^2/2 + C_9 x + C_{10}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,st(x=0)} = F_{oyEW} X^3/3 - F_{uyEW} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{oyHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S}) X^2/2) - F_{uyHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) X^2/2) + F_H (y_{0S} + e_{N,xy}) = 3,08 \text{ mm}$$

$$X^2/2 + G_S e_{N,xy} X^2/2 + G_{S1} y_{2S} X^2/2 + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S}) X^2/2$$

Nutzlasten:

$$M_{b(x)} = F_{oyEL} x - F_{uyEL} (x - x_{1EW}) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy})$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{oyEL} x^2/2 - F_{uyEL} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) x + C_{11}$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{oyEL} x^3/6 - F_{uyEL} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 + C_{11} x + C_{12}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,EL(x=0)} = F_{oyEL} X^3/3 - F_{uyEL} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{HEL} (y_{0S} + e_{N,xy}) X^2/2 = 1,46 \text{ mm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

$$M_{b(x)} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy})$$

$$\int M_{b(x)} dx = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy}) x + C_{13}$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 + C_{12} x + C_{14}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,au\beta(x=0)} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy}) x^2/2 = 0,64 \text{ mm}$$

Gesamtverschiebung in x-y-Ebene: $w_{xy(x=0)} = w_{xy,st(x=0)} + w_{xy,EL(x=0)} + w_{xy,au\beta(x=0)} = 5,18 \text{ mm}$

Bemessung der Verschiebung in x-y-Ebene:

Leiteinwirkung Nutzlast: $w_{xy,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xy,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xy,EL(x=0)} + \gamma_Q \psi_0 w_{xy,au\beta(x=0)} = 4,99 \text{ mm}$

Leiteinwirkung außergewöhnliche Last: $w_{xy,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xy,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xy,au\beta(x=0)} + \gamma_Q \psi_0 w_{xy,EL(x=0)} = 4,74 \text{ mm}$

γ_G / γ_Q und ψ_0 nach Tabelle 6-2/6-5 ($\gamma_G = 1,0 / \gamma_Q = 1,0 / \psi_0 = 0,7$)

b) Verschiebungen in x-z-Ebene:

Biegelinie allgemein: $E I w'' = -M_{b(x)}$

Randbedingungen:

$$w(x=X)=0$$

$$w'(x=X)=0$$

$$\text{mit } X=x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}+x_{1S}+x_{0S}$$

Ständige Lasten:

$$M_{b(x)} = F_{ozEW} x - F_{uzEW} (x - x_{1EW}) + F_{ozHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S})) - F_{uzHW} (x - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW})) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{ozEW} x^2/2 - F_{uzEW} (x^2/2 - x_{1EW} x) + F_{ozHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S}) x) - F_{uzHW} (x^2/2 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) x - G_S e_{N,xz} x + C_{15}$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{ozEW} x^3/6 - F_{uzEW} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) + F_{ozHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S}) x^2/2) - F_{uzHW} (x^3/6 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) x^2/2) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) x^2/2 - G_S e_{N,xz} x^2/2 + C_{15} x + C_{16}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xz,sl(x=0)} = F_{ozEW} X^3/3 - F_{uzEW} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) + F_{ozHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S}) X^2/2) - F_{uzHW} (X^3/3 - (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW}) X^2/2) - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) X^2/2 - G_S e_{N,xz} X^2/2 = -0,99 \text{ mm}$$

Nutzlasten:

$$M_{b(x)} = F_{ozEL} x - F_{uzEL} (x - x_{1EW}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz})$$

$$\int M_{b(x)} dx = F_{ozEL} x^2/2 - F_{uzEL} (x^2/2 - x_{1EW} x) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) x + C_{17}$$

$$\int (\int M_{b(x)} dx) dx = F_{ozEL} x^3/6 - F_{uzEL} (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) x^2/2 + C_{17} x + C_{18}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xz,EL(x=0)} = F_{ozEL} X^3/3 - F_{uzEL} (X^3/3 - x_{1EW} X^2/2) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,xz}) X^2/2 = -0,08 \text{ mm}$$

Außergewöhnliche Lasten:

$$\begin{aligned}
 M_{b(x)} &= -(H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) x + (H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) (x-x_{1EW}) - (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x-(x_{1EW}+x_{2S})) + (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x-(x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW})) - (H_{L,1,EW}+H_{L,1,HW}) \\
 &\quad (z_{2S}+e_{N,xz}) + (H_{L,2,EW}+H_{L,2,HW}) (z_{3S}-e_{N,xz}) \\
 \int M_{b(x)} dx &= -(H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) x^2/2 + (H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) (x^2/2 - x_{1EW} x) - (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^2/2 - (x_{1EW}+x_{2S}) x) + (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^2/2 - (x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}) x) - \\
 &\quad (H_{L,1,EW}+H_{L,1,HW}) (z_{2S}+e_{N,xz}) x + (H_{L,2,EW}+H_{L,2,HW}) (z_{3S}-e_{N,xz}) x + C_{19} \\
 \int (\int M_{b(x)} dx) dx &= -(H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) x^3/6 + (H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) - (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^3/6 - (x_{1EW}+x_{2S}) x^2/2) + (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^3/6 - (x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}) x^2/2) - \\
 &\quad (H_{L,1,EW}+H_{L,1,HW}) (z_{2S}+e_{N,xz}) x^2/2 + (H_{L,2,EW}+H_{L,2,HW}) (z_{3S}-e_{N,xz}) x^2/2 + C_{19} x + C_{20}
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen kommt man für die Verschiebung an der Stelle $x=0$ zu folgender Lösung:

$$w_{xy,au\beta(x=0)} = \frac{-(H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) x^3/6 + (H_{T,1,EW}+H_{T,2,EW}) (x^3/6 - x_{1EW} x^2/2) - (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^3/6 - (x_{1EW}+x_{2S}) x^2/2) + (H_{T,1,HW}+H_{T,2,HW}) (x^3/6 - (x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}) x^2/2) - (H_{L,1,EW}+H_{L,1,HW}) (z_{2S}+e_{N,xz}) x^2/2 + (H_{L,2,EW}+H_{L,2,HW}) (z_{3S}-e_{N,xz}) x^2/2}{(x^3/6 - (x_{1EW}+x_{2S}+x_{1HW}) x^2/2) - (H_{L,1,EW}+H_{L,1,HW}) (z_{2S}+e_{N,xz}) x^2/2 + (H_{L,2,EW}+H_{L,2,HW}) (z_{3S}-e_{N,xz}) x^2/2} = -1,73 \text{ mm}$$

Gesamtverschiebung in x-z-Ebene: $w_{xz(x=0)} = w_{xz,st(x=0)} + w_{xz,EL(x=0)} + w_{xz,au\beta(x=0)} = -2,79 \text{ mm}$

Bemessung der Verschiebung in x-z-Ebene:

Leiteinwirkung Nutzlast: $w_{xz,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xz,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xz,EL(x=0)} + \gamma_Q \psi_0 w_{xz,au\beta(x=0)} = -1,21 \text{ mm}$

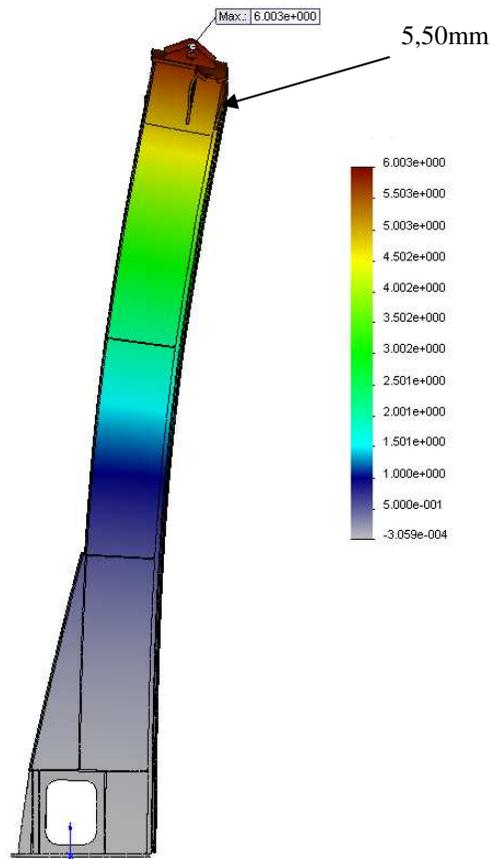
Leiteinwirkung außergewöhnliche Last: $w_{xz,Ed(x=0)} = \gamma_G w_{xz,st(x=0)} + \gamma_Q w_{xz,au\beta(x=0)} + \gamma_Q \psi_0 w_{xz,EL(x=0)} = -1,73 \text{ mm}$

γ_G / γ_Q und ψ_0 nach Tabelle 6-2/6-5 ($\gamma_G = 1,0 / \gamma_Q = 1,0 / \psi_0 = 0,7$)

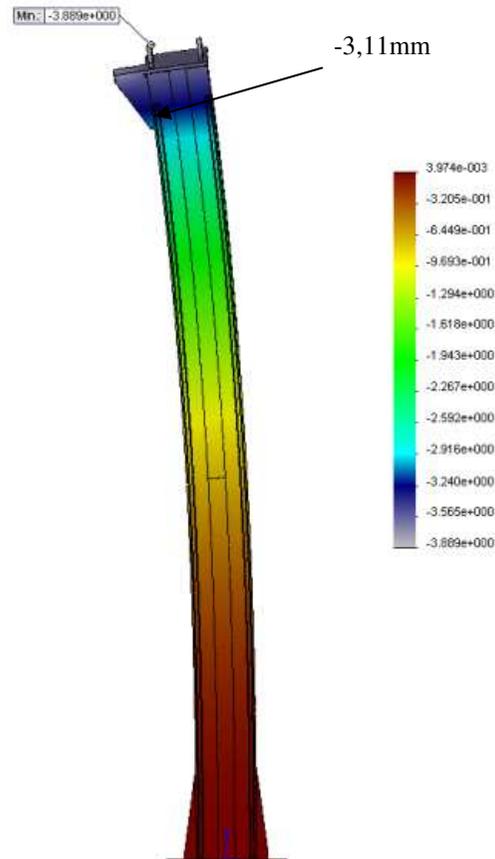
Resultierende Gesamtverschiebung: $w_{ges(x=0)} = 5,89 \text{ mm}$

Ermittlung der Verschiebungen mittels FEM:

Verschiebung in x-y-Ebene:



Verschiebung in x-z-Ebene:



Resultierende Gesamtverschiebung:

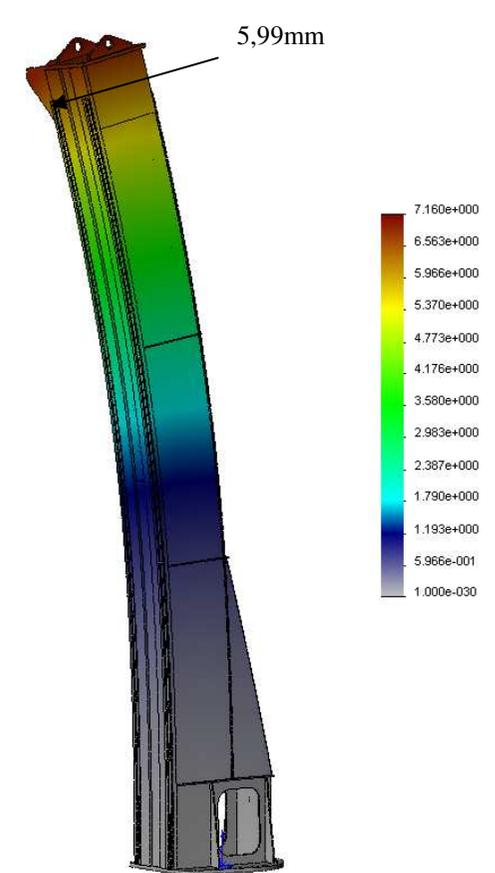


Abbildung 7-32: a) Verschiebung in x-y-Ebene; LF2 ; b) Verschiebung in x-z-Ebene; LF2 ; c) Resultierende Verschiebung; LF2

Beurteilung der Verschiebungen:

Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus der FEA und der analytischen Berechnung sind sehr gering, wodurch man davon ausgehen kann, dass die Annäherung für die analytische Berechnung richtig getroffen wurde.

Weiters sind die auftretenden Verschiebungen verschwindend gering und liegen weit unter dem zulässigen Bereich. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist demnach gegeben.

7.3.2.8 Ermüdungsnachweis am betrachteten Querschnitt

Es wird ein Einstufenkollektiv dargestellt, in dem sich eine Spannungsschwingbreite zwischen der konstanten Abwärtsbewegung und dem abrupten Abbremsen der Massen einstellt.

Spannungsschwingbreite (Amplitudenspannung):

ständige Lasten:

Konstante Abwärtsbewegung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,st,1} = (F_H + G_S) / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,st,1} = -2,21 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,st,1} = M_{xy,st,1} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,st,1} = 6,99 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,st,1} = M_{xz,st,1} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,st,1} = 2,11 \text{ N/mm}^2$$

Verzögerung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,st,2} = (F_H + G_S) / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,st,2} = -2,71 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,st,2} = M_{xy,st,2} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,st,2} = 9,55 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,st,2} = M_{xz,st,2} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,st,2} = 2,51 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xy,st,1} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyHW} x_{1S} + F_H (y_{1S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$M_{xy,st,1} = 179054449,18 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xy,st,2} = F_{oyEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{oyHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyHW} x_{1S} + F_H (y_{1S} + e_{N,xy}) + G_S e_{N,xy} + G_{S1} y_{2S} + G_{S2} (y_{3S} - y_{2S})$$

$$M_{xy,st,2} = 244734893,8 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xz,st,1} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzHW} x_{1S} - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$M_{xz,st,1} = -27393674,18 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xz,st,2} = F_{ozEW} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEW} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{ozHW} (x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzHW} x_{1S} - F_H (z_{1S} + e_{N,xz}) - G_S e_{N,xz}$$

$$M_{xz,st,2} = -32551318,82 \text{ Nmm}$$

Nutz-Lasten:

Konstante Abwärtsbewegung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,EL,1} = F_{HEL} / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,EL,1} = -0,55 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,EL,1} = M_{xy,EL,1} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,EL,1} = 3,31 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,EL,1} = M_{xz,EL,1} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,EL,1} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

Verzögerung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,EL,2} = F_{HEL} / A_{ges}$$

$$\sigma_{d,xy,EL,2} = -0,77 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy,EL,2} = M_{xy,EL,2} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy,EL,2} = 4,64 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,EL,2} = M_{xz,EL,2} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,EL,2} = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xy,EL,1} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{HEL} (y_{1S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL,1} = 84846101,57 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xy,EL,2} = F_{oyEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uyEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + F_{HEL} (y_{1S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy,EL,2} = 118784542,20 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xz,EL,1} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,zy})$$

$$M_{xz,EL,1} = -1771101,57 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xz,EL,2} = F_{ozEL} (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{uzEL} (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - F_{HEL} (z_{1S} + e_{N,zy})$$

$$M_{xz,EL,2} = -2479542,20 \text{ Nmm}$$

Außergewöhnliche-Lasten:

Konstante Abwärtsbewegung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy,au\beta,1} = 0$$

$$\sigma_{d,xy,au\beta,1} = 0,00 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,au\beta,EL,1} = M_{xy,au\beta,1} / W_z$$

$$\sigma_{b,au\beta,EL,1} = 0,00 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz,au\beta,1} = M_{xz,au\beta,1} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz,au\beta,1} = 11,77 \text{ N/mm}^2$$

Verzögerung:

Druckspannung:

$$\sigma_{d,xy, \text{ auß,2}} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) / A_{\text{ges}}$$

$$\sigma_{d,xy, \text{ auß,2}} = -1,09 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um z-Achse:

$$\sigma_{b,xy, \text{ auß,2}} = M_{xy, \text{ auß,2}} / W_z$$

$$\sigma_{b,xy, \text{ auß,2}} = 2,30 \text{ N/mm}^2$$

Biegespannung um y-Achse:

$$\sigma_{b,xz, \text{ auß,2}} = M_{xz, \text{ auß,2}} / W_y$$

$$\sigma_{b,xz, \text{ auß,2}} = 4,37 \text{ N/mm}^2$$

Biegemoment um z-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xy, \text{ auß,1}} = 0$$

$$M_{xy, \text{ auß,1}} = 0,00 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xy, \text{ auß,2}} = (H_{L,EW} + H_{L,HW}) (y_{0S} + e_{N,xy})$$

$$M_{xy, \text{ auß,2}} = 58884727,90 \text{ Nmm}$$

Biegemoment um y-Achse:

Konstante Abwärtsbewegung:

$$M_{xz, \text{ auß,1}} = -(H_{S,1,1,T,EW} + H_{S,2,1,T,EW}) (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - (H_{S,1,1,T,HW} + H_{S,2,1,T,HW}) x_{1S}$$

$$M_{xz, \text{ auß,1}} = -152699136,78 \text{ Nmm}$$

Verzögerung:

$$M_{xz, \text{ auß,2}} = -(H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{1EW} + x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) + (H_{T,1,EW} + H_{T,2,EW}) (x_{2S} + x_{1HW} + x_{1S}) - (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) (x_{1HW} + x_{1S}) + (H_{T,1,HW} + H_{T,2,HW}) x_{1S} - (H_{L,1,EW} + H_{L,1,HW}) (z_{2S} + e_{N,zz}) + (H_{L,2,EW} + H_{L,2,HW}) (z_{3S} + e_{N,zz})$$

$$M_{xz, \text{ auß,2}} = -56734327,90 \text{ Nmm}$$

Spannungen im betrachteten Punkt:

Unterspannung:	$\sigma_u = (\sigma_{d,st,2} + \sigma_{b,xy,st,2} + \sigma_{b,xz,st,2}) + (\sigma_{d,EL,2} + \sigma_{b,xy,EL,2} + \sigma_{b,xz,EL,2}) + (\sigma_{d,au\beta,2} + \sigma_{b,xy,au\beta,2} + \sigma_{b,xz,au\beta,2})$	$\sigma_u = 18,99 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:	$\sigma_o = (\sigma_{d,st,1} + \sigma_{b,xy,st,1} + \sigma_{b,xz,st,1}) + (\sigma_{d,EL,1} + \sigma_{b,xy,EL,1} + \sigma_{b,xz,EL,1}) + (\sigma_{d,au\beta,1} + \sigma_{b,xy,au\beta,1} + \sigma_{b,xz,au\beta,1})$	$\sigma_o = 21,56 \text{ N/mm}^2$
Spannungsverhältnis:	$R = \sigma_u / \sigma_o$	$R = 0,88$
Mittelspannung:	$\sigma_m = (\sigma_u + \sigma_o) / 2$	$\sigma_m = 20,28 \text{ N/mm}^2$
Spannungsamplitude:	$\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$	$\sigma_a = 1,29 \text{ N/mm}^2$

Bemessung der Spannungen im betrachteten Punkt:

Leiteinwirkung – Nutzlast:

Unterspannung:	$\sigma_{u,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,st,2} + \sigma_{b,xy,st,2} + \sigma_{b,xz,st,2}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,EL,2} + \sigma_{b,xy,EL,2} + \sigma_{b,xz,EL,2}) + \gamma_{Q,1} \psi_0 (\sigma_{d,au\beta,2} + \sigma_{b,xy,au\beta,2} + \sigma_{b,xz,au\beta,2})$	$\sigma_{u,Ed} = 24,57 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:	$\sigma_{o,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,st,1} + \sigma_{b,xy,st,1} + \sigma_{b,xz,st,1}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,EL,1} + \sigma_{b,xy,EL,1} + \sigma_{b,xz,EL,1}) + \gamma_{Q,1} \psi_0 (\sigma_{d,au\beta,1} + \sigma_{b,xy,au\beta,1} + \sigma_{b,xz,au\beta,1})$	$\sigma_{o,Ed} = 26,01 \text{ N/mm}^2$

Leiteinwirkung – Außergewöhnliche Last:

Unterspannung:	$\sigma_{u,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,st,2} + \sigma_{b,xy,st,2} + \sigma_{b,xz,st,2}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,au\beta,2} + \sigma_{b,xy,au\beta,2} + \sigma_{b,xz,au\beta,2}) + \gamma_{Q,1} \psi_0 (\sigma_{d,EL,2} + \sigma_{b,xy,EL,2} + \sigma_{b,xz,EL,2})$	$\sigma_{u,Ed} = 25,26 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:	$\sigma_{o,Ed} = \gamma_{G,j,sup} (\sigma_{d,st,1} + \sigma_{b,xy,st,1} + \sigma_{b,xz,st,1}) + \gamma_{Q,1} (\sigma_{d,au\beta,1} + \sigma_{b,xy,au\beta,1} + \sigma_{b,xz,au\beta,1}) + \gamma_{Q,1} \psi_0 (\sigma_{d,EL,1} + \sigma_{b,xy,EL,1} + \sigma_{b,xz,EL,1})$	$\sigma_{o,Ed} = 30,01 \text{ N/mm}^2$

Bemessungswerte für die weitere Berechnung:

Unterspannung:		$\sigma_{u,Ed} = 24,57 \text{ N/mm}^2$
Oberspannung:		$\sigma_{o,Ed} = 30,01 \text{ N/mm}^2$
Spannungsverhältnis:	$R_{Ed} = \sigma_{u,Ed} / \sigma_{o,Ed}$	$R_{Ed} = 0,82$
Mittelspannung:	$\sigma_{m,Ed} = (\sigma_{u,Ed} + \sigma_{o,Ed}) / 2$	$\sigma_{m,Ed} = 27,29 \text{ N/mm}^2$
Spannungsamplitude:	$\sigma_{a,Ed} = (\sigma_{o,Ed} - \sigma_{u,Ed}) / 2$	$\sigma_{a,Ed} = 2,72 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{G,j,sup} / \gamma_{Q,1}$ und ψ_0 nach Tabelle 6-2/6-4 ($\gamma_{G,j,sup} = 1,35 / \gamma_{Q,1} = 1,5 / \psi_0 = 0,7$)

Ermüdungsfestigkeit:

a) Ermittlung der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\sigma_R$:

Der betrachtete Querschnitt der geschweißten Blechkonstruktion wird nach Tabelle 6.30 der Kerbfallklasse 6 ($\Delta\sigma_C = 100 \text{ N/mm}^2$) zugeordnet. Aus Gl.117 lässt sich schließlich die ertragbare Ermüdungsbeanspruchung für eine auftretende Lastspielzahl von $N_R = 7,3 \cdot 10^4$, ermitteln:

$$\Delta\sigma_R = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N_R} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \Delta\sigma_C \longrightarrow \Delta\sigma_R = 301.46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

b) Ermittlung der zulässigen Ermüdungsbeanspruchung $\Delta\sigma_D$ nach Gl.117:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \Delta\sigma_C \longrightarrow \Delta\sigma_D = 73.68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

a) Ermittlung der zulässigen Spannung aus dem Smith-Diagramm:

Für eine Mittelspannung von $27,29 \text{ N/mm}^2$ und dem Werkstoff S235 erhält man aus dem Smith-Diagramm für die Biegedauerfestigkeit eine Biegewechselfestigkeit von 173 N/mm^2 . Unter Berücksichtigung des Größeneinflusses (0,8) und der Kerbwirkung (2) kann man von einer zulässigen Spannung von 69 N/mm^2 ausgehen. Es ist ersichtlich, dass der Bemessungswert der auftretenden Spannungsschwingbreite ($2,72 \text{ N/mm}^2$) deutlich unter der zulässigen Spannung (69 N/mm^2) liegt, wodurch es zu keiner Ermüdungserscheinung kommt.

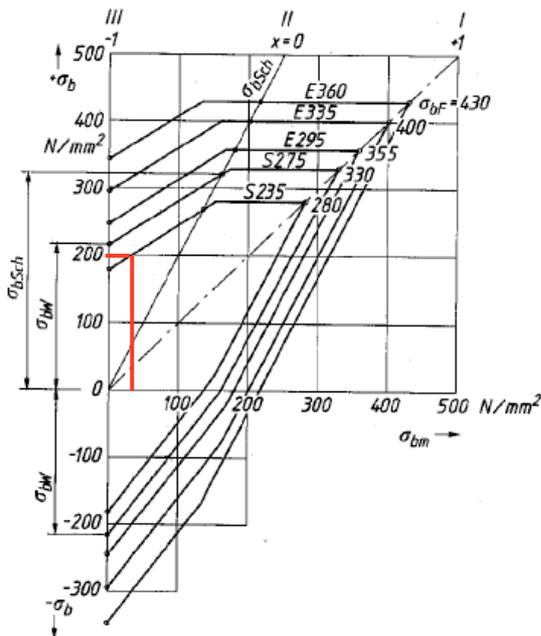


Abbildung 7-33: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für Biegedauerfestigkeit [7]

Ermüdungsnachweis:

Für ein Einstufen-Lastkollektiv ergibt sich nach Gl.120 eine schadensäquivalente, konstante Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma_E=5,44\text{N/mm}^2$.

Durch die lineare Beziehung der Wöhlerkurve im Zeitfestigkeitsbereich lässt sich auf die schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln schließen.

$$\Delta\sigma_E^m \cdot N_R = \Delta\sigma_{E,2}^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \longrightarrow \quad \Delta\sigma_{E,2} = 1,80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}} = 0,024 < 1$$

Dadurch ist der Ermüdungsnachweis für das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen mit einem γ_{Mf} – Faktor von 1,35 nach Tabelle 6-28 mit ausreichender Sicherheit gegeben.

Schädigung nach Miner:

Es wird von zehn Elektrodenwechseln pro Tag über 365 Tage im Jahr auf eine Laufzeit von zwanzig Jahren ausgegangen.

Die Spannungsamplitude ($2,17 \text{ N/mm}^2$) liegt weit unter der zulässigen Biegewechselfestigkeit wodurch als zulässige Lastspielzahl die Ecklastspielzahl N_D von $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln herangezogen wurde.

Somit ergibt sich für das Einstufen-Kollektiv über die gesamte Laufzeit eine Schädigung welche nicht von Relevanz ist.

Schädigung nach Miner:

$$D_d = \sum_i \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = 1,46\%$$

Dynamische Sicherheit:

$$S_{\text{dyn}} = \frac{\sigma_{\text{zul}}}{\sigma_a} = 25,40$$

8 Zusammenfassung

Es wurde mittels der Berechnung nach Eurocode 3 nachgewiesen, dass für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (Lagesicherheit, Beanspruchbarkeit von Querschnitten, Stabilitätsnachweis), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Verschiebungen) sowie für den Ermüdungsnachweis die Bemessungen sowohl für den Lastfall 1 als auch für den Lastfall 2 mit ausreichender Sicherheit gegeben sind. Des Weiteren wurde mittels der Methode der reduzierten Spannungen nachgewiesen, dass die Bemessung des Tragwerkes mit Querschnitten der Klasse 3 zulässig ist.

Sowohl im Lastfall 1 als auch im Lastfall 2 wird die Lagesicherheit gemäß dem Grenzzustand der Tragfähigkeit durch die fünfzig M20-Schrauben, mit welchen die Schwenksäule mit der Stützsäule verbunden ist, gewährleistet.

Für die Beanspruchbarkeit des Querschnitts gemäß dem Grenzzustand der Tragfähigkeit liegt in beiden Lastfällen die „kritischste“ Auslastung für den konservativen Lösungsansatz bei 6,4 % bzw. bei 20,1 %. Auch für den Stabilitätsnachweis sind die „kritischen“ Einwirkungen für Biegedrillknicken mit 7,9 % für den Lastfall 1 und mit 17,8 % für den Lastfall 2 weit unter der zulässigen Bemessungsgrenze von 100%.

Die auftretenden resultierenden Verschiebungen gemäß dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, welche mittels Finite-Elemente-Analyse ermittelt wurden, sind mit 3,67 mm bzw. mit 5,99 mm für Bauwerke dieser Größenordnung innerhalb der geforderten Toleranzen.

Neben der Verschiebung ist auch die Ermüdung für den Lastfall 1, welche mit einer lineare Schadensakkumulation nach Palmgren Miner von 1,46 % und mit der Nachweisführung der Ermüdung von 2,8 % gemäß Eurocode relativ niedrig. Des Weiteren ergibt sich eine dynamische Sicherheit von 32 bei gestaltfester Bemessung. Für den Lastfall 2 betragen die Schädigung ebenfalls 1,46 % sowie der Nachweis der Ermüdung 2,4 % und die Sicherheit im Gestaltfestigkeitsnachweis ergibt sich zu 25. Somit ist die dynamische Beanspruchung vergleichsweise gering. Es ist zu erwähnen, dass die Ermüdung anhand eines einstufigen Lastkollektivs repräsentativ für den höchstbelasteten Zustand ermittelt wurde. In der praktischen Anwendung von ESU-Anlagen sind gemäß den Erfahrungen des Anlagenbauers die realen Lastkollektive geringer anzusetzen. Daraus folgt, dass die Schädigung keinen wesentlichen Einfluss haben wird.

Bei der Anwendung des Eurocode im Verlaufe dieser Arbeit wurde die Lage des „kritischen“ Querschnitts, welcher für die Bemessung herangezogen wurde, zunächst aufgrund von Erfahrungen abgeschätzt. Diese Abschätzung stellte sich durch die Nachrechnungen mittels Finite-Elemente-Methode als korrekt heraus. Für die zukünftigen Anwendungen des Eurocodes sollte jedoch im Vorhinein eine Finite-Elemente-Analyse vorgenommen werden, damit anhand dieser Ergebnisse die Bemessungen optimal auf das Tragwerk übertragen werden können.

Weiters würde man durch eine vorlaufende Finite-Elemente-Analyse die kritischen bzw. nicht kritischen Stellen im System auf einen Blick erkennen und eine Strukturoptimierung wäre schnell und einfach durchzuführen. Für nachfolgende Bemessungen mit den Grenzzuständen können höhere Auslastungsgrade nach Norm erreicht werden, wodurch man wiederum an überdimensionierten Stellen Material bzw. Kosten einsparen kann, um eine technisch wirtschaftlich optimale Lösung zu erzielen.

9 Anhang

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [2] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009.
- [3] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Deutsche Fassung EN 1991-3:2006.
- [4] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009.
- [5] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009.
- [6] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [7] Professor Dr.-Ing.Dietz, Peter: Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der technischen Universität Clausthal (26.01.2004), http://www.imw.tuclausthal.de/fileadmin/Studium/SkripteundUebungen/Winter0304/KE_II/2005_08_04_014.pdf (16.01.2012).
- [8] Inteco GmbH, BHB 01-257 Xingtai (Bruck/Mur 2011)
- [9] Inteco GmbH, 01-220 ESR – Plant 16t (Bruck/Mur 2010)
- [10] DIN 18800 – Teil 2: Stahlbauten: Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken (November 1990)
- [11] Beier-Tertel, Judith: Geometrische Ersatzimperfektionen für Tragfähigkeitsnachweise zum Biegedrillknicken von Trägern aus Walzprofilen (Bochum. Dezember 2008)
- [12] Univ.-Prof.Dr.-Ing.Kindmann, Rolf: Plastische Bemessung im Stahlbau (26.04.2003), http://www.vpi-bw.com/ingenieure/derpruefung/kindmann_nr_22.pdf (16.01.2012).
- [13] Prof. Harald Unterweger, Dr. Andreas Taras: Auslegung und Berechnung schweißtechnischer Konstruktionen: TU – Graz. Version 11
- [14] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009

- [15] Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wilfried Eichelseder, Dipl.-Ing. Dr. István Gődör: MASCHINENELEMENTE Ia und Ib. Leoben: WS 2011 / SS 2012
- [16] Ioannis Vayas, John Ermopoulos, George Ioannidis: Anwendungsbeispiele zum Eurocode 3. Berlin: Ernst & Sohn. 1998
- [17] Ioannis Vayas, John Ermopoulos, George Ioannidis: Bemessungsbeispiele im Stahlbau nach Eurocode 3. Berlin: Ernst & Sohn. 11.2001
- [18] Sivo Schilling: Beispiele zur Bemessung von Stahltragwerken nach DIN EN 1993 Eurocode 3: Bauforumstahl e.V., Düsseldorf: Ernst & Sohn. 10.2011
- [19] Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 1: Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile; Deutsche Fassung EN 1090-1:2009
- [20] Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008
- [21] Erwin Piechatzek: Einführung in den Eurocode 3: Konzept, Bemessung, Beispiele, Tabellen: Vieweg. 2002
- [22] Rolf Kindmann, Jörg Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit: Grundlagen, Methoden, Berechnungsverfahren, Beispiele: Ernst & Sohn. 2003
- [23] Manfred A. Hirt, Rolf Bez, Alain Nussbaumer: Stahlbau: Grundbegriffe und Bemessungsverfahren: PPUR presses polytechniques. 2007
- [24] Gerd Wagenknecht: Stahlbau-Praxis: Tragwerksplanung – Grundlagen: Bauwerk. 2005
- [25] Richard Greiner, Andreas Lechner, Markus Kettler: Berechnungsrichtlinie für die Querschnitts- und Stabbemessung nach Eurocode 3 mit Schwerpunkt auf Semi-Kompakten Querschnitten: TU – Graz, University of Technology, Institut für Stahlbau (12.06.2011)
- [26] Frans Bijlaard: Eurocode 3, a basis for further development in joint design: Journal of Constructional Steel Research, Volume 62, Issue 11, November 2006, Pages 1060-1067
- [27] Marco Gettel, Werner Schneider: Buckling strength verification of cantilevered cylindrical shells subjected to transverse load using Eurocode 3: Journal of Constructional Steel Research, Volume 63, Issue 11, November 2007, Pages 1467-1478
- [28] C. Rebelo, N. Lopes, L. Simões da Silva, D. Nethercot, P.M.M. Vila Real: Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 1: Variability of the Eurocode 3 resistance model: Journal of Constructional Steel Research, Volume 62, Issue 12, December 2006, Pages 1290-1294
- [29] V Barreto, D Camotim: Computer-aided design of structural steel plane frames according to Eurocode 3: Journal of Constructional Steel Research, Volume 46, Issues 1–3, April–June 1998, Pages 367-368

- [30] N Boissonnade, J.-P Jaspart, J.-P Muzeau, M Villette: Improvement of the interaction formulae for beam columns in Eurocode 3: Computers & Structures, Volume 80, Issues 27–30, November 2002, Pages 2375-2385
- [31] M.P. Byfield, D.A. Nethercot: A new look at Eurocode 3: Engineering Structures, Volume 19, Issue 9, September 1997, Pages 780-787
- [32] Martin Steenhuis, Cock Dol, Leon van Gorp: Computerised calculation of force distributions in bolted end plate connections according to Eurocode 3: Journal of Constructional Steel Research, Volume 31, Issue 1, 1994, Pages 135-144

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Abfolge der Tätigkeiten	9
Abbildung 5-1: Prinzipielle Funktionsweise einer ESU-Anlage [9]	11
Abbildung 5-2: Darstellung der Gesamtanlage Xingtai [8]	12
Abbildung 5-3: Elektrodenwagen (Elektrodenstange in Schnittdarstellung)	14
Abbildung 5-4: Haubenwagen	14
Abbildung 5-5: Gleittiegelstation	15
Abbildung 5-6: Standtiegelstation (T-Kokille)	15
Abbildung 6-1: Lastanordnung des belasteten Krans zur Bestimmung der maximalen Belastung des Kranbahnträgers; Bild 2.1 aus [3]	31
Abbildung 6-2: Lastanordnung des unbelasteten Krans zur Bestimmung der minimalen Belastung des Kranbahnträgers; Bild 2.1 aus [3]	31
Abbildung 6-3: Anordnung der horizontalen Radlast infolge von Beschleunigung und Verzögerung längs und quer zur Fahrbahn; Bild 2.3 aus [3]	32
Abbildung 6-4: Anordnung der horizontalen Radlast aus Schräglauf längs und quer zu Fahrbahn (links: mit zusätzlichen Führungsmitteln / rechts: Spurführung mittels Spurkränzen) ; Bild 2.4 aus [3]	32
Abbildung 6-5: Horizontale Lasten $H_{L,i}$ längs der Fahrbahn; Bild 2.5 aus [3]	34
Abbildung 6-6: Horizontale Kräfte $H_{T,i}$ quer zur Fahrbahn; Bild 2.6 aus [3]	35
Abbildung 6-7: Definition der Antriebskraft K (links: Zentralantrieb / rechts: Einzelantrieb) ; Bild 2.7 aus [3]	36
Abbildung 6-8: Definition des Winkels α und des Abstandes h ; Bild 2.8 aus [3]	38
Abbildung 6-9: Äquivalente Schiefstellung; Bild 5.2 aus [4]	43
Abbildung 6-10: Ersatz der Vorverformung durch äquivalente horizontale Ersatzlasten; Bild 5.4 aus [4]	44
Abbildung 6-11: Knicklinien; Bild 6.4 aus [4]	53
Abbildung 6-12: Längsausgesteiftes Blechfeld / Ersatzdruckstab; Bild A.1 aus [5]	64
Abbildung 6-13: Prinzipieller Ablauf der Schadensakkumultion nach Palmgren-Miner; Bild A.1 aus [6]	66
Abbildung 6-14: Ermüdungskurve für Längsspannungsschwingbreiten; Bild 7.1 aus [6]	67
Abbildung 6-15: Überführung eines einwirkenden Belastungskollektivs in ein schadensäquivalentes Spannungskollektiv mit konstanter Belastungsamplitude; Kapitel 7 aus [13]	70
Abbildung 6-16: Standardisierte Belastungskollektive; Kapitel 7 aus [13]	70
Abbildung 7-1: Ofenkopf einer ESU-Anlage; Allgemeine Darstellung	71
Abbildung 7-2: Nachweisführung nach Eurocode 3	72
Abbildung 7-3: Elektrodenwagen x-y-Ebene; LF1	75
Abbildung 7-4: Elektrodenwagen x-z-Ebene; LF1	76
Abbildung 7-5: Haubenwagen x-y-Ebene; LF1	77
Abbildung 7-6: Haubenwagen x-z-Ebene; LF1	78
Abbildung 7-7: Drehsäule x-y-Ebene; LF1	79
Abbildung 7-8: Drehsäule x-z-Ebene; LF1	80
Abbildung 7-9: Betrachteter Querschnitt; LF1	82
Abbildung 7-10: Längsspannungen im betrachteten Querschnitt nach FEM; LF1	86
Abbildung 7-11: Spannungsverteilung nach von Mises im betrachteten Querschnitt; LF1	87
Abbildung 7-12: Ausgesteiftes Blechfeld 1; LF1	88
Abbildung 7-13: Ersatzdruckstab Blechfeld 1; LF1	89
Abbildung 7-14: Ausgesteiftes Blechfeld 2; LF1	92
Abbildung 7-15: Ersatzdruckstab Blechfeld 2; LF1	93
Abbildung 7-16: Prinzipdarstellung der Nachgiebigkeit einer Schraube und der verspannten Bauteile; Kapitel 8.1.8 aus [15]	99
Abbildung 7-17: Verspannungsdreieck bei statischer Belastung für den Lastfall 1 und 2	99
Abbildung 7-18: a) Verschiebung in x-y-Ebene; LF1 ; b) Verschiebung in x-z-Ebene; LF1 ; c) Resultierende Verschiebung; LF1	108
Abbildung 7-19: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für Biegedauerfestigkeit [7]	112
Abbildung 7-20: Elektrodenwagen x-y-Ebene; LF2	114
Abbildung 7-21: Elektrodenwagen x-z-Ebene; LF2	115
Abbildung 7-22: Elektrodenwagen; Kräfte aus Beschleunigung und Schräglauf	116
Abbildung 7-23: Haubenwagen x-y-Ebene; LF2	118
Abbildung 7-24: Haubenwagen x-z-Ebene; LF2	119
Abbildung 7-25: Haubenwagen; Kräfte aus Beschleunigung und Schräglauf	120
Abbildung 7-26: Drehsäule x-y-Ebene; LF2	122
Abbildung 7-27: Drehsäule x-z-Ebene; LF2	123

Abbildung 7-28: Längsspannungen im betrachteten Querschnitt nach FEM; LF2	128
Abbildung 7-29: Spannungsverteilung nach von Mises im betrachteten Querschnitt; LF2	129
Abbildung 7-30: Ersatzdruckstab Blechfeld 1; LF2	130
Abbildung 7-31: Ersatzdruckstab Blechfeld 2; LF2	133
Abbildung 7-32: a) Verschiebung in x-y-Ebene; LF2 ; b) Verschiebung in x-z-Ebene; LF2 ; c) Resultierende Verschiebung; LF2	150
Abbildung 7-33: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für Biegedauerfestigkeit [7]	156

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1: Klassifizierung der Nutzungsdauer; Tabelle 2.1 aus [1]	19
Tabelle 6-2: Empfehlungen zu Kombinationsbeiwerten; Tabelle A.1.1 aus [1]	22
Tabelle 6-3: Bemessungswerte der Einwirkungen für EQU; Tabelle A1.2(A) aus [1]	25
Tabelle 6-4: Bemessungswerte der Einwirkung für STR; Tabelle A1.2(B) aus [1]	26
Tabelle 6-5: Bemessungswerte der Einwirkungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit; Tabelle A1.4 aus [1]	27
Tabelle 6-6: Dynamische Faktoren φ_i ; Tabelle 2.1 aus [3]	30
Tabelle 6-7: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren, die als eine einzige charakteristische Einwirkung anzusehen sind; Tabelle 2.2 aus [3]	30
Tabelle 6-8: Dynamische Faktoren φ_i für vertikale Lasten; Tabelle 2.4 aus [3]	33
Tabelle 6-9: Werte für β_2 und $\varphi_{2,\min}$; Tabelle 2.5 aus [3]	33
Tabelle 6-10: Dynamischer Faktor φ_5	35
Tabelle 6-11: Definition von α_F , α_V und α_0 ; Tabelle 2.7 aus [3]	37
Tabelle 6-12: Bestimmung des Abstandes h; Tabelle 2.8 aus [3]	39
Tabelle 6-13: Definition von $\lambda_{S,i,j,k}$ – Werten; Tabelle 2.9 aus [3]	39
Tabelle 6-14: Nennwerte der Streckgrenze f_y und Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl; Tabelle 3.1 aus [4]	41
Tabelle 6-15: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (1/3) ; Tabelle 5.2 aus [4]	46
Tabelle 6-16: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (2/3); Tabelle 5.2 aus [4]	47
Tabelle 6-17: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile (3/3); Tabelle 5.2 aus [4]	48
Tabelle 6-18: Imperfektionsbeiwerte der Knicklinie; Tabelle 6.1 aus [4]	52
Tabelle 6-19: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts; Tabelle 6.2 aus [4]	54
Tabelle 6-20: Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken; Tabelle 6.3 aus [4]	56
Tabelle 6-21: Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken nach Gl.81; Tabelle 6.4 aus [4]	56
Tabelle 6-22: Empfohlene Biegedrillknicklinien nach Gl.84; Tabelle 6.5 aus [4]	57
Tabelle 6-23: Empfohlene Korrekturbeiwerte k_c ; Tabelle 6.6 aus [4]	58
Tabelle 6-24: Werte für $N_{Rk} = f_y A_i$; $M_{i,Rk} = f_y W_i$ und $\Delta M_{i,Ed}$; Tabelle 6.7 aus [4]	59
Tabelle 6-25: Interaktionsbeiwerte für verdrehsteife Bauteile; Tabelle B.1 aus [4]	59
Tabelle 6-26: Äquivalente Momentenbeiwerte C_m zu Tabelle 6-25; Tabelle B.3 aus [4]	60
Tabelle 6-27: Bezeichnungen des längsausgesteiften Blechfeldes; Bild A.1 aus [5]	64
Tabelle 6-28: γ_{MF} -Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit; Tabelle 3.1 aus [6]	65
Tabelle 6-29: Kerbfälle von ungeschweißten Bauteilen; Tabelle 8.1 aus [6]	68
Tabelle 6-30: Kerbfälle von geschweißten zusammengesetzten Querschnitten; Tabelle 8.2 aus [6]	69
Tabelle 6-31: Beiwerte γ_{Ff} für die Belastungskollektive; Kapitel 7 aus [13]	70
Tabelle 7-1: Werkstoffdaten S235 (1.0038)	72
Tabelle 7-2: Querschnittswerte im betrachteten Querschnitt; LF1	83
Tabelle 7-3: Querschnittswerte für das ausgesteifte Blechfeld 1; LF1	88
Tabelle 7-4: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF1	89
Tabelle 7-5: Querschnittswerte für das ausgesteifte Blechfeld 2; LF1	92
Tabelle 7-6: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF1	93
Tabelle 7-7: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF2	130
Tabelle 7-8: Querschnittswerte des Ersatzdruckstabes; LF2	133

9.4 Abkürzungsverzeichnis

Gl.	Gleichung
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEA	Finite-Elemente-Analyse
ESU	Elektro-Schlacke-Umschmelz-Anlage
ESR	Electro-Slag-Remelting-Plant
ESRR	Electro- Slag- Rapit- Remelting- Plant
i.a.	im Allgemeinen
z.B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise