

	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 1 von 171

# Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken

## 1. Ausfertigung

In bautechnischer Hinsicht geprüft

Prüfnummer

Hamburg, den

2023D122

23.11.2023

Dr.-Ing. Rainer Grzeschkowitz

Dr.-Ing. Olaf Drude (SFI)

Dipl.-Ing.(FH) Karsten Holste






Prüfingenieure für Bautechnik

gem. Prüfverordnung PVO vom 14.02.2006

Veritaskai 8 • 21079 Hamburg

Tel.: +49 40 790001-0 (Fax: -44) • www.wk-consult.com






Status	Rev.	Datum	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von	Bemerkung
4. Ausgabe	03	19.09.2023	A. F. Zakaria	S. Damarla M. A. Khamis A. Rosponi	J. de Groot	ZUR PRÜFUNG
3. Ausgabe	02	06.06.2023	A. F. Zakaria	N. Werner A. Rosponi		ZUR PRÜFUNG
2. Ausgabe	01	20.02.2023	K. Burchard	M. A. Khamis H. Koch A. Krug		ZUR INFORMATION
1. Ausgabe	00	23.01.2023	K. Burchard	M. A. Khamis H. Koch A. Krug		ZUR INFORMATION

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 2 von 171

## Inhaltsverzeichnis






<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>8</b>
1.1	Allgemein.....	8
1.2	Arbeitsumfang.....	9
1.3	Revisionsbeschreibung .....	9
1.4	Abkürzungen .....	10
1.5	Referenzdokumente.....	11
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>	<b>12</b>
2.1	Allgemeines .....	12
2.2	Globale Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) für den eingebauten Zustand .....	12
2.3	Globale Spannungsauslastungen für das Einheben Hebeanalyse .....	13
2.4	Globale Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).....	13
2.5	Ergebnisse für das Risiko gegen Wirbelinduzierte Schwingungen (VIV).....	14
2.6	Check der zulässigen Eigenfrequenzbereiche der Brücke .....	15
2.7	Brückenlager Lasten .....	16
2.8	Lokale Ergebnisse der Brückenlager .....	16
2.9	Fazit .....	16
<b>3</b>	<b>Normen und Richtlinien.....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Allgemeines.....</b>	<b>18</b>
4.1	Einheiten .....	18
4.2	Software .....	18
4.4	Allgemeine Material Eigenschaften.....	19
<b>5</b>	<b>Beschreibung der Brücken.....</b>	<b>20</b>
5.1	Terminal Layout.....	20
5.2	Brücken und Brückenlängen .....	21
5.3	Hauptabmessungen .....	21
5.4	Beschreibung der Brückenlagerung.....	25
<b>6</b>	<b>Lasten und Lastfallkombinationen.....</b>	<b>26</b>
6.1	Allgemeine Lasten und Lastkategorien .....	26
6.2	Eigengewicht (G) .....	26
6.3	Veränderliche Lasten (Q) .....	26
6.3.1	Verkehrslast (infolge Personen auf der Brücke) .....	26

Als richtig vorausgesetzt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 3 von 171

6.3.2	Windlasten .....	26
6.3.3	Schneelasten.....	27
6.3.4	Eislasten .....	27
6.3.5	Holmlast .....	27
6.3.6	Reibungslasten.....	27
6.3.7	Riser Hang-Off Lasten .....	27
6.4	Korrosionszuschlag – Stahl.....	28
<b>7</b>	<b>Design-Kriterien und Nachweis-Methoden .....</b>	<b>29</b>
7.1	Lebensdauer.....	29
7.2	Design Methode.....	29
7.2.1	Tragfähigkeitsnachweise .....	29
7.3	LRFD Methode .....	29
7.3.1	Allgemeines.....	29
7.3.2	Allgemeine Design-Last / Entwurfslast.....	29
7.3.3	Allgemeine Design-Widerstände .....	29
7.3.4	Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) .....	30
7.3.5	Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....	30
7.3.6	SLS Kriterium .....	31
7.3.7	Eigenfrequenzen .....	31
7.3.8	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	31
7.3.9	Hebeanalyse .....	32
7.3.10	Widerstandsfaktoren.....	33
<b>8</b>	<b>Nachweis der Brücke 1 – 35,8 m .....</b>	<b>34</b>
8.1	Allgemein.....	34
8.2	Modellbeschreibung.....	34
8.3	Randbedingungen.....	35
8.4	Lasten.....	36
8.4.1	Allgemein .....	36
8.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	36
8.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	36
8.4.4	Windlasten – LF WINX (0 Grad Richtung).....	37
8.4.5	Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung).....	38






Als richtig vorausgesetzt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 4 von 171

8.4.6	Schneelasten – LF SNOW .....	38
8.4.7	Eislasten – LF ICE.....	39
8.4.8	Holmlast – LF HOLM .....	39
8.4.9	Reibungslasten.....	40
8.5	Lastfallkombinationen .....	42
8.6	Ergebnisse.....	44
8.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	44
8.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....	45
8.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager .....	45
8.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	46
8.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	46
8.6.6	Hebeanalyse .....	47
<b>9</b>	<b>Nachweis der Brücke 3 – 79,2 m .....</b>	<b>50</b>
9.1	Allgemein.....	50
9.2	Modellbeschreibung.....	50
9.3	Randbedingungen.....	51
9.4	Lasten.....	51
9.4.1	Allgemein .....	51
9.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	52
9.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	52
9.4.4	Windlasten – LF WINX (0 Grad Richtung).....	53
9.4.5	Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung).....	54
9.4.6	Schneelasten – LF SNOW .....	54
9.4.7	Eislasten – LF ICE.....	55
9.4.8	Holmlast – LF HOLM .....	55
9.4.9	Reibungslasten.....	56
9.5	Lastfallkombinationen .....	57
9.6	Ergebnisse.....	57
9.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	57
9.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....	58
9.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager .....	58
9.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	59
9.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	59






Als richtig vorausgesetzt.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 5 von 171






9.6.6	Hebeanalyse .....	60
<b>10</b>	<b>Nachweis der Brücke 4 – 32,2 m .....</b>	<b>63</b>
10.1	Allgemein.....	63
10.2	Modellbeschreibung.....	63
10.3	Randbedingungen.....	64
10.4	Lasten.....	65
10.4.1	Allgemein .....	65
10.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	65
10.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	66
10.4.4	Windlasten – LF WINX (0 Grad Richtung).....	66
10.4.5	Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung).....	67
10.4.6	Schneelasten – LF SNOW.....	68
10.4.7	Eislasten – LF ICE.....	68
10.4.8	Holmlast – LF HOLM .....	69
10.4.9	Reibungslasten.....	69
10.4.10	Riser Hang-Off Lasten - LF RHOF .....	71
10.4.11	Verkehrslasten für das Access Platform – LF LL2 .....	71
10.5	Lastfallkombinationen .....	72
10.6	Ergebnisse.....	75
10.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	75
10.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....	76
10.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager .....	77
10.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	78
10.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	78
10.6.6	Hebeanalyse .....	79
10.7	Nachweis der Augplatte für Riser Hang-Offs .....	81
<b>11</b>	<b>Nachweis der Brücke 7 – 68,1 m .....</b>	<b>83</b>
11.1	Allgemein.....	83
11.2	Modellbeschreibung.....	83
11.3	Randbedingungen.....	84
11.4	Lasten.....	85
11.4.1	Allgemein .....	85

Als richtig vorausgesetzt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 6 von 171



11.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	85
11.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	85
11.4.4	Windlasten – LF WINX (0 Grad Richtung).....	86
11.4.5	Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung).....	87
11.4.6	Schneelasten – LF SNOW.....	87
11.4.7	Eislasten – LF ICE.....	88
11.4.8	Holmlast – LF HOLM.....	88
11.4.9	Reibungslasten.....	89
11.5	Lastfallkombinationen .....	90
11.6	Ergebnisse.....	90
11.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	90
11.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) .....	91
11.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager .....	91
11.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	92
11.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	92
11.6.6	Hebeanalyse .....	93
<b>12</b>	<b>Lokale Nachweise der Brückenlager.....</b>	<b>96</b>
12.1	Allgemeine Beschreibung.....	96
12.2	Strukturelle Berechnung.....	96
12.2.1	Randbedingungen .....	97
12.2.2	Lasten .....	98
12.2.3	FE-Netz.....	99
12.2.4	Ergebnisse .....	101
<b>13</b>	<b>Brückenlager Details .....</b>	<b>106</b>
13.1	Allgemeine Beschreibung.....	106
13.2	Verschub-Schuh .....	107
13.2.1	Beschreibung, Lagerung, Lasten .....	107
13.2.2	Ermittlung / Nachweis Kontaktdruck-Fläche .....	109
13.2.3	FE-Netz.....	109
13.2.4	Ergebnisse .....	112
13.3	Schlitten-Platte.....	116
13.3.1	Beschreibung, Lagerung, Lasten .....	116

Als richtig vorausgesetzt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 7 von 171

13.3.2	Ermittlung / Nachweis Kontaktdruck-Fläche .....	118
13.3.3	FE-Netz.....	119
13.3.4	Ergebnisse .....	121
13.4	Abhebesicherung am Stutzen .....	123
13.4.1	Allgemeines.....	123
13.4.2	Platte am Stutzen .....	124
13.4.3	Geschraubte Sicherungsplatte.....	130
<b>14</b>	<b>Nachweis der Hebepunkten.....</b>	<b>140</b>
14.1	Allgemeines .....	140
14.2	Beschreibung der Hebepunkten .....	142
14.3	Randbedingungen.....	143
14.4	Lasten.....	144
14.5	FE-Netz .....	147
14.6	Ergebnisse.....	149
14.6.1	Spannungsergebnisse .....	149
14.6.2	Verformungsergebnisse.....	153
<b>Anhang A.</b>	<b>Verschub-Schuh - Kontaktdruck / -fläche.....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang B.</b>	<b>Schlitten-Platte – Kontaktdruck / -fläche .....</b>	<b>157</b>
<b>Anhang C.</b>	<b>Abhebesicherung am Stutzen – Schrauben-Nachweis / Biege-Kapazität .....</b>	<b>161</b>
<b>Anhang D.</b>	<b>Nachweis der Augplatte.....</b>	<b>165</b>
<b>Anhang E.</b>	<b>Überprüfung und Vergleich der Knoten-Nachweise nach NORSOK und EC .....</b>	<b>168</b>
E.1	Allgemeines.....	168
E.2	Kritische Knoten .....	168
E.2.1	Einzelheiten.....	168
E.2.2	Lokation .....	169
E.3	Regeln und Vorschriften.....	170
E.3.1	NORSOK .....	170
E.3.2	EUROCODE-Knotennachweis nach DIN EN 1993-1-8:2010-12: "Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlkonstruktionen – Teil 1-8: Bemessung von Knoten" .....	170
E.4	Ergebnisse und Vergleich der Knoten-Nachweise .....	171

Als richtig vorausgesetzt.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 8 von 171

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemein






Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist im September 2022 an die Tree Energy Solutions GmbH (TES) herangetreten und hat die gemeinsame Realisierung eines schwimmenden Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas – LNG)-Importterminals (Floating Storage and Regasification Unit – FSRU) angefragt. Das BMWK hat dazu im Februar 2023 die FSRU „Excelsior“ für maximal 60 Monate gechartert. Das Projekt soll in Kooperation mit E.ON und ENGIE realisiert werden. Als Vorhabenträgerin wurde die „FSRU Wilhelmshaven GmbH“ gegründet.

Die Entwicklung umfasst einer schwimmenden Speicher- und Regasifizierungseinheit (Floating Storage and Regasification Unit, FSRU) zum Import von LNG. Das Terminal wird an das deutsche Gasnetz angeschlossen und als Fast-Track-Projekt ausgeführt.

Der KUNDE (ENGIE/TES) hat einen Vertrag mit IMDC. Dieser sieht technische Unterstützung durch IMDC für die Meeresarbeiten sowie für Modellierungsstudien vor, die in den Genehmigungsantrag einfließen werden.



Abbildung 1-1: Überblick Projektierungsfläche (Google Earth)

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 9 von 171

## 1.2 Arbeitsumfang

Dieser Bericht enthält die statischen Berechnungen für die Brücken zwischen den Dalben, siehe Ref. [3.]. Dieser beinhaltet die folgenden globalen Verifikationen und Analysen:

- ULS: Spannung checks im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Einheben und im eingebauten Zustand
- ULS-Nachweise der Rohrknoten
- SLS: Verformungschecks im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- Stabilitätsuntersuchungen
- Risiko gegen wirbelinduzierte Vibrationen (VIV) für die einzelnen Brückenelemente
- Check der zulässigen Frequenzbereiche
- Bestimmung der Auflagerlasten auf die Dalbenplattformen

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass hier nicht alle 9 Brücken global nachgewiesen wurden, sondern nur die maßgebenden 3 längsten Brücken (B3 mit 79,2 m Länge; B7 mit 68,1 m Länge und B1 mit 35,8 m Länge), sowie B4 welche aufgrund ihrer Funktionalität (mit exzentrischer Last aus den Riser Hang-Offs) eine Sonderstellung erhält. Die restlichen Brücken sind deutlich kürzer, erhalten dadurch geringere Beanspruchungen und sind steifer, sodass hierfür keine weiteren Nachweise erforderlich sind. Die nachgewiesenen Querschnitte für B1 werden auf die restlichen Brücken (B2, B5, B6, B8 und B9) übertragen.

Zusätzliche zu den globalen Nachweisen werden die Lagerkonstruktionen in Rahmen der Genehmigungsprüfung erstellt.






Dieser Bericht dient der Erlangung der Genehmigung zum Bau der Struktur. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei diesem Bericht nur um eine strukturelle Prüfung der Gesamtstruktur handelt.

Detaillierte Anschlüsse, Lager, Hebepunkte etc. sind noch nicht final ausgelegt und dienen nur einer ersten Orientierung, da dies in der Detail Engineering Phase thematisiert wird.

## 1.3 Revisionsbeschreibung

Revision 03:

- Ein zusätzlicher Steg mit einer Länge von 2,5 m wird an allen Brücken am Brückenende mit Gleitlagern hinzugefügt. Anschließend wurden die Brücken analysiert (siehe Kapitel 8-11)
- Nachweis der lokalen Nachweise des Brückenlagers für Brücke B4 (siehe Kapitel 12)
- Nachweis der Brückenlager-Details (siehe Kapitel 13)
- Nachweis der Hebepunkten (siehe Kapitel 14)






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 10 von 171

#### 1.4 Abkürzungen

Die folgenden Abkürzungen werden in diesem Dokument verwendet:

*Tabelle 1-1: Dokumentspezifische Abkürzungen*

Abkürzung	Beschreibung
API:	American Petroleum Institute
BD:	Bearthing Dolphins (Anlegedalben)
DIN:	Deutsche Industrie Norm
DNVGL:	Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd
EC:	Euro Code
FE:	Finite Elemente
FSRU:	Floating Storage and Regasification Unit
IMDC:	International Marine and Dredging Consultants
LAT:	Lowest Astronomical Tide / Niedrigster Gezeitenwasserstand
LF:	Load Case / Lastfall
LCOM:	Load Combination / Lastkombination
LNG:	Liquid Natural Gas / Flüssiggas
LRFD:	Load and Resistance Factored Design / Design mit Teilsicherheitsfaktoren auf Last- und Widerstandsseite
MD:	Mooring Dolphins
OS:	Offshore Standard
OV:	Tractebel Overdick GmbH
RP:	Recommended Practice / Empfohlene Praxis
SI:	System International // Internationales Einheitensystem
SLS:	Serviceability Limit State / Zustand der Gebrauchstauglichkeit
TES:	Tree Energy Solutions Belgium BV (Konsortionalpartner mit ENGIE)
ULS:	Ultimate Limit State / Zustand der Tragfähigkeit
VIV:	Vortex Induced Vibrations / Wirbelinduzierte Vibrationen






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 11 von 171

### 1.5 Referenzdokumente

Dieses Dokument basiert auf den folgenden Referenzdokumenten:

- [1.] IMDC; I/NO/16103/22.120/ABA/ABA; "Wilhelmshaven FSRU: Metocean Data Gathering"; 2022-05-20.
- [2.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2001.07; "Wilhelmshaven FSRU: Entwurfgrundlagen"; Rev. 07; 2023-08-31
- [3.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2100\_03; "Strukturzeichnung Brücke 1"; 2023-08-23
- [4.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2101\_03; "Strukturzeichnung Brücke 2"; 2023-08-23
- [5.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2102\_03; "Strukturzeichnung Brücke 3"; 2023-08-23
- [6.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2103\_02; "Strukturzeichnung Brücke 4"; 2023-08-31
- [7.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2104\_03; "Strukturzeichnung Brücke 5"; 2023-08-23
- [8.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2105\_03; "Strukturzeichnung Brücke 6"; 2023-08-23
- [9.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2106\_05; "Strukturzeichnung Brücke 7"; 2023-08-24
- [10.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2107\_03; "Strukturzeichnung Brücke 8"; 2023-08-23
- [11.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2108\_04; "Strukturzeichnung Brücke 9"; 2023-08-23



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 12 von 171

## 2 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 2.1 Allgemeines

In diesem Report werden die 4 kritischsten Brücken von insgesamt 9 Brücken detailliert nachgewiesen. Zum einen sind die Brücken B6 und B9, sowie auch B2 und B8 baugleich und zum anderen lässt sich die Geometrie der kürzeren Brücke aus B1 ableiten.

Es werden alle Nachweise wie unter Kapitel 1.2 aufgelistet nach EC bzw. DIN EN geführt. Zusätzlich finden dabei die TRAS- sowie ASR-Richtlinien Anwendung.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass insbesondere die Einhaltung der Eigenfrequenzen für die längeren Brücken als die kritischsten und maßgebenden Checks betrachtet werden können.

Die drei längsten Brücken, die hier untersucht wurden, sind:

- Brücke B1: 35,8 m
- Brücke B3: 79,2 m
- Brücke B7: 68,1 m

Außerdem wird die Brücke B4 mit 32,2 m Länge zwischen BD1 und BD2 analysiert, da dort eine exzentrische Last durch eine temporäre Riser Hang-Off wirkt.

### 2.2 Globale Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) für den eingebauten Zustand

Alle 4 untersuchten Brücken weisen Balken- und Knotenauslastungen deutlich geringer als 1,0 auf. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Spannungs- und Auslastungschecks mit der benutzten Software (SACS) erforderliche Faktoren für Stabilitätsfälle automatisch inkludiert.

#### Brücke B1

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,71. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,85 während In-place Zustand.

#### Brücke B3

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,86. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,78 während In-place Zustand.

#### Brücke B4






Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,92. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,83 während In-place Zustand.

#### Brücke B7

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,86. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,82 während In-place Zustand.

Für eine detaillierte Berechnung siehe Abschnitte 8.6.1, 9.6.1, 10.6.1 und 11.6.1.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 13 von 171

### 2.3 Globale Spannungsauslastungen für das Einheben Hebeanalyse

Auch hier weisen alle 4 untersuchten Brücken Balken- und Knotenauslastungen deutlich geringer als 1,0 auf. Die Spannungsnachweise für das Einheben werden als deutlich weniger maßgebend betrachtet als die für den eingebauten Zustand.

#### Brücke B1

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,48. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,59 während In-place Zustand.

#### Brücke B3

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,65. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,63 während In-place Zustand.

#### Brücke B4

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,64. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,56 während In-place Zustand.

#### Brücke B7

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,49. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,65 während In-place Zustand.

Für detaillierte Ergebnisse siehe Abschnitte 8.6.6, 9.6.6, 10.6.6 und 11.6.6.

### 2.4 Globale Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Für alle 4 untersuchten Brücken wird die Grenzverformung von  $L/200$  eingehalten.

#### Brücke B1

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt  $\delta = 34$  mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von  $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 35,8 \text{ m} / 200 = 179$  mm.

#### Brücke B3

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt  $\delta = 278$  mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von  $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 79,2 \text{ m} / 200 = 396$  mm.






#### Brücke B4

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt  $\delta = 93$  mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von  $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 32,2 \text{ m} / 200 = 161$  mm.

#### Brücke B7

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt  $\delta = 240$  mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von  $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 68,1 \text{ m} / 200 = 340,5$  mm.

Für eine detaillierte Berechnung siehe Abschnitte 8.6.2, 9.6.2, 10.6.2 und 11.6.2.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 14 von 171

## 2.5 Ergebnisse für das Risiko gegen Wirbelinduzierte Schwingungen (VIV)

Die wirbelinduzierten Vibrationen werden gemäß DIN EN [I.] gecheckt.

Die horizontalen Primärstrukturen am Brückenboden sowie die Diagonalen an den Brückenseiten wurden für alle 4 Brücken gecheckt. Diese werden in der aktuellen Designphase als unkritisch angesehen.

### Brücke B1

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 77,2$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 48,53$  m/s.

Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 62,9$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 49,39$  m/s.

### Brücke B3

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 56,8$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 48,53$  m/s.

Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 53,1$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 49,39$  m/s.

### Brücke B4

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 76,4$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 48,45$  m/s.






Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 58,8$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 49,39$  m/s.

### Brücke B7

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 93,3$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 48,53$  m/s.

Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt  $v_{crit} = 75,7$  m/s. Dies ist also deutlich größer als  $1,25 * 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit =  $1,25 * v_m = 49,39$  m/s.

Für eine detaillierte Berechnung siehe Abschnitte 8.6.5, 9.6.5, 10.6.5 und 11.6.5

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 15 von 171

## 2.6 Check der zulässigen Eigenfrequenzbereiche der Brücke

Da alle Brücken mit Laufstegen ausgerüstet sind, wurde zusätzlich nachgewiesen, dass keine Gefährdung ein Schwingungserregung infolge Personentransfer auf den Brücken entsteht. Diese Schwingungserregung kann vermieden werden, wenn die vertikalen und horizontalen Eigenfrequenzen der Brücken außerhalb der folgenden Grenzfrequenzen liegt:

- Vertikal:  $1,50 < f_{n,v} < 3,00$  Hz
- Horizontal:  $0,75 < f_{n,H} < 1,50$  Hz

Die ermittelten Eigenfrequenzen den Brücken sind in den folgenden Tabellen angegeben.

Da für die Berechnung der Brücken-Eigenfrequenzen auch die Massen eine entscheidende Rolle spielt, und die ermittelten Eigenfrequenzen teilweise unterhalb der zu vermeidenden Frequenzen und teilweise oberhalb der zu vermeidenden Frequenzen liegen, wurde die Berechnungen jeweils mit und ohne einen Gewichtsaufschlag von 15 % durchgeführt.

In Bezug auf die Eigenfrequenzanalysen können die Brücken unterteilt werden in die 2 „langen“ Brücken B3 und B7 und in die „kürzeren“ Brücken (alle restlichen Brücken: B1, B2, B4, B5, B6, B8 und B9).

Alle „kürzeren“ Brücken sind steif genug, sodass die zu vermeidenden Eigenfrequenzen (horizontal und vertikal) immer überschritten werden können.

Für die beiden längeren Brücken gelingt dies nicht für die vertikale Richtung. Hier wird der zu vermeidenden Frequenzbereich unterschritten.

Tabelle 2-1: Eigenfrequenzen - Vertikal






Brücke	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 15% Gewichtsaufschlag [Hz]	Grenz-Frequenz [Hz]	Check
B1	4,780 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,715</span>	4,51 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,397</span>	>3,0	Ok
B3	1,480 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,55!</span>	1,38 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,45</span>	<1,5	Ok
B4	6,440 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,70</span>	6,00 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,39</span>	>3,0	Ok
B7	1,499 <span style="color: green;">✓</span>	1,40 <span style="color: green;">✓</span>	<1,5	Ok

Die Eigenfrequenzen aller untersuchter Brücken sind außerhalb des kritischen Eigenfrequenzbereiches ( $1,50 < f_{n,v} < 3,00$  Hz) in der vertikalen Richtung.

Tabelle 2-2: Eigenfrequenzen - Horizontal

Brücke	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 15% Gewichtsaufschlag [Hz]	Grenz-Frequenz [Hz]	Check
B1	3,76 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,124</span>	3,48 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">3,846</span>	>1,5	Ok
B3	1,64 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,69</span>	1,53 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,58</span>	>1,5	Ok
B4	4,19 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,34</span>	3,90 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,14</span>	>1,5	Ok
B7	1,90 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">2,16</span>	1,77 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">2,01</span>	>1,5	Ok

Die Eigenfrequenzen aller untersuchter Brücken sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche ( $0,75 < f_{n,H} < 1,50$  Hz) in der horizontalen Richtung.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 16 von 171

## 2.7 Brückenlager Lasten

Die Reaktionslasten aus den Auflagerpunkten den Brücken sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. In der Tabelle ist für jede Brücke die maximale Reaktionslast pro Lager über alle LCOMs aufgeführt. Die gelisteten Kräfte sind Design- Werte aus Lastfallkombinationen inklusive Lastfaktoren.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nur für die Exzentrische Brücke mit dem großen Hebelarm der Riser Hang-Off-Kräfte abhebende Lasten entstehen.

Tabelle 2-1: Brückenlager Lasten

Richtung	Last [kN]			
	B1	B3	B4	B7
Vertikal (Druck) pro Lager	161	500	1.523	371
Vertikal (Druck) am anderen Lager auf gleiches Brückenende	98	290	-	230
Vertikal (Auftrieb) pro Lager	-	-	<u>-1.046</u>	-
Horizontal (y-Richtung) pro Pin	120	320	323	230
Horizontal (x-Richtung) pro Pin	47	133	216	117






## 2.8 Lokale Ergebnisse der Brückenlager

Die Brückenlager werden für die Designlasten ausgelegt. Die sich daraus ergebenden Spannungsverläufe sind moderat. Die auftretende Überspannungen sind klein und lokal. Deshalb sind sie vernachlässigbar.

Für detaillierte Ergebnisse siehe Kapitel 12.

## 2.9 Fazit






Die Festigkeit der Brückenstruktur ist für alle untersuchten Lastfälle und Konfigurationen ausreichend. Alle Checks werden erfüllt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 17 von 171

### 3 Normen und Richtlinien

Auf folgende Normen und Richtlinien wird Bezug genommen.

- [I.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1991-1-4/NA, „Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; 2010-12
- [II.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1991-1-3/NA, „Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten“; 2019-04
- [III.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1993-1-1/NA; “National Annex – Nationally determined parameters - Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings”; English translation of DIN EN 1993-1-1/NA:2018-12
- [IV.] Deutsches Institut für Normung DIN EN 1993, Eurocode 3: „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 3: Brücken; 2016
- [V.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1993-1-8; “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of Joints (includes Corrigendum AC:2009)”; 2010-12
- [VI.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 14122-2; „Sicherheit von Maschinen – ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen – Teil 2: Arbeitsbühnen und Laufstege“; 2016
- [VII.] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUV); TRAS 310; „Grundlagen für die Technische Regel für Anlagensicherheit - Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“; 01-2013
- [VIII.] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUV); TRAS 320; „Technische Regel für Anlagensicherheit - Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten“; 05-2016
- [IX.] DNV; DNV-ST-N001; “Marine Operations and Marine Warranty”; September 2021
- [X.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 10225; Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen; 2019-11
- [XI.] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 10025; Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; 2019-10
- [XII.] Deutsches Institut für Normung; DIN 18088-1; „Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen - Teil 1: Grundlagen und Einwirkungen“; 2019-01
- [XIII.] NORSOK; N-004; “Design of steel structures”; Rev. 3; 2013-02
- [XIV.] BauA / BundesAusschuss für Arbeitsstätten – „ASR A2.3 – Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan“, 08-2007

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 18 von 171

## 4 Allgemeines

### 4.1 Einheiten

In diesem Dokument werden die internationalen SI-Einheitensysteme verwendet. Die folgenden Einheiten werden in allen durchgeführten Analysen verwendet, sofern nicht anders angegeben:

*Tabelle 4-1: Maßeinheiten*






Parameter	Beschreibung	Eingabe Einheit
Länge	Meter	m
Masse	Metrische Tonne	t
Spannung	Mega Pascal	MPa
Kraft	Kilo Newton	kN
Temperatur	Grad Celsius	°C
Energie	Joule	J
Dichte	Kilogramm je Kubik Meter	kg/m <sup>3</sup>
Winkel	Grad	°

### 4.2 Software

Für die statischen Berechnungen wird folgende Software verwendet:

*Tabelle 4-2: Software*

Artikel	Software	Version	Beschreibung
[a]	SACS	14.1	Global Analyse von Offshore Strukturen
[b]	SolidWorks	2023 SP0.1	Detaillierte Finite Elemente Analyse

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 19 von 171

#### 4.4 Allgemeine Material Eigenschaften

Die folgenden Tabellen fassen die in der Analyse verwendeten Materialeigenschaften, welche in Übereinstimmung mit Ref. [X.] sind, zusammen.





Tabelle 4-3: Material Eigenschaften - Stahl

Eigenschaft	Wert
Material Typ	I, II, III
Struktur Klasse	Spezial, Primär, Sekundär (API Klassen A, B, C)
Spezifische Streck-Grenze [MPa]	<u>355</u>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	7.850
Elastizitätsmodul [MPa]	210.000
Poisson Zahl	0,30

Die Nennspannungen und die entsprechenden Mindeststreckgrenzen infolge unterschiedlicher Materialstärken sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Reduzierung der Streckgrenze aufgrund der Materialdicke ist in Ref. [XI.] definiert.

Tabelle 4-4: Nominale & Mindeststreckgrenzen

Nominale Streckgrenze, $f_{y,k}$ [MPa]	Mindeststreckgrenze $R_{eH}$ [MPa] bei Raumtemperatur abhängig von der Materialdicke [mm]									
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 25$	$25 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 120$	$120 < t \leq 150$	$150 < t \leq 200$	$150 < t \leq 200$
355	355	345	335	325	315	295	295	285	275	

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 20 von 171

## 5 Beschreibung der Brücken

### 5.1 Terminal Layout

Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Brücken und deren Positionen.

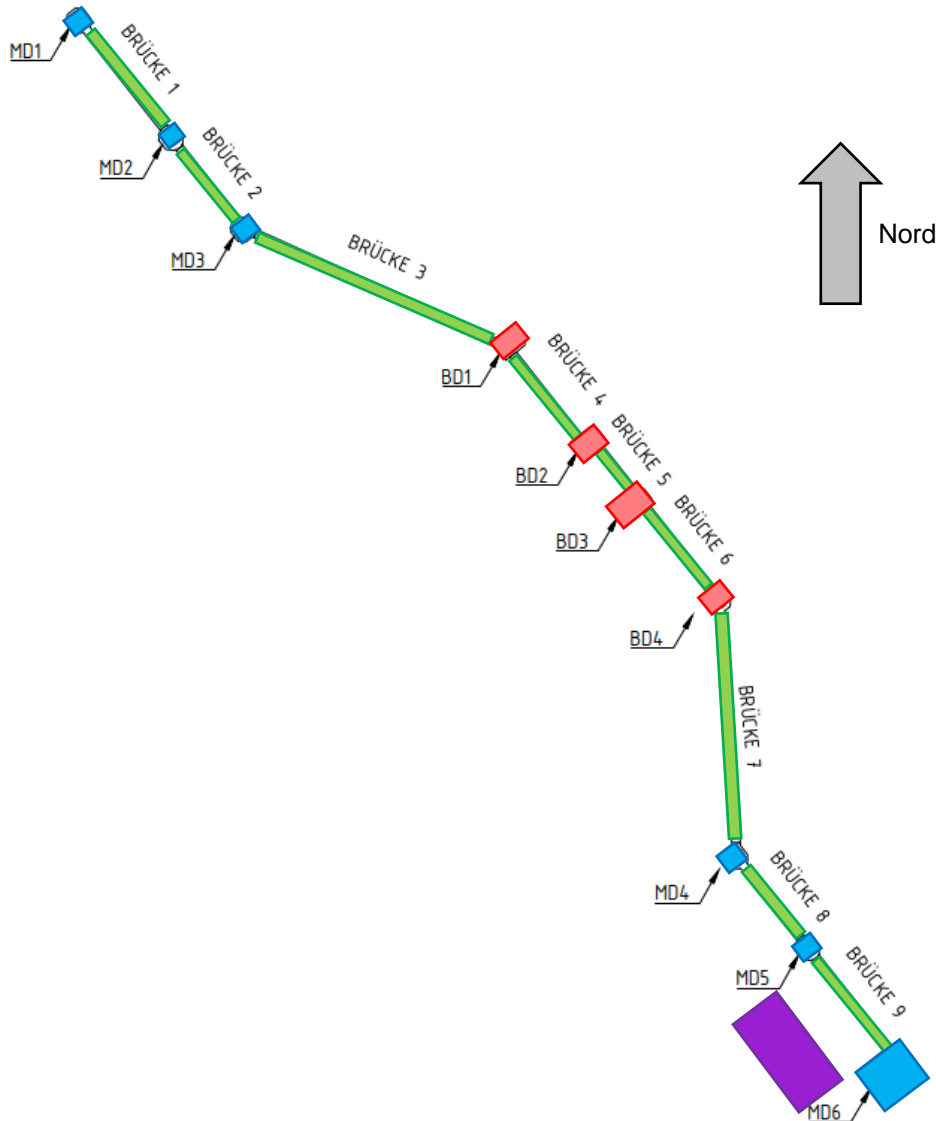





Abbildung 5-1: Definition der Dalben und Brücken

Die Brücken unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Länge. Ansonsten sind alle Brücken hinsichtlich ihrer Funktion gleich: Alle Brücken haben Laufwege und dienen als Fluchtweg für bis zu 40 Personen. Demnach, gemäß Ref. [XIV.] sind die Laufwege mit einer lichten Breite von  $B_L = 1,20$  m und einer lichten Höhe von mindestens  $H_L = 2,00$  m vorgesehen.

Die einzige Ausnahme bildet die Brücke B4: Diese Brücke dient gleichzeitig als Lagerung für die Rohrleitungen und ist deswegen zusätzlich mit 2 Riser Hang-Off Strukturen zu versehen.



	Struktur	
		
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 21 von 171

## 5.2 Brücken und Brückenlängen

Im Folgenden sind die Längen aller Brücken aus dem oben gezeigten Layout aufgeführt.

- Brücke 1: 35,8 m
- Brücke 2: 25,8 m
- Brücke 3: 79,2 m
- Brücke 4: 32,2 m
- Brücke 5: 18,0 m
- Brücke 6: 30,0 m
- Brücke 7: 68,1 m
- Brücke 8: 25,8 m
- Brücke 9: 35,8 m

Die Brücken 2 und 8, sowie die Brücken 1 und 9, sind gleich lang und somit komplett baugleich.

Da die Brücke B1 als dritt längste Brücke steif genug ist, um alle Nachweise zu erfüllen, werden alle anderen kürzeren Brücken (außer B4) von der Brocke B1 abgelitten.





Wie eingangs erläutert, werden im Folgenden nur die Nachweise für die Brücken B1, B3, B4 und B7 explizit durchgeführt.

## 5.3 Hauptabmessungen

Die Abmessungen der aller (Ref. [3.], [5.], [6.] und [9.]) sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5-1: Brückenabmessungen

Beschreibung		Abmessung [m]								
Brücke		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Spannweite	L =	35,80	25,80	79,20	32,20	18,0	30,0	68,10	25,8	<u>35,8</u>
max. Höhe (Achse zu Achse)	H <sub>max</sub> =	2,60	2,60	3,50	3,40	2,60	2,60	2,50	2,60	2,60
min. Höhe (Achse zu Achse)	H <sub>min</sub> =	2,60	2,60	2,75	3,08	2,60	2,60	2,50	2,60	2,60
max. Breite (Achse zu Achse)	B <sub>max</sub> =	2,50	2,50	5,10	2,50	2,50	2,50	4,80	2,50	2,50
min. Breite (Achse zu Achse)	B <sub>min</sub> =	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Laufweg Lichtmaße	B <sub>L</sub> x H <sub>L</sub> =	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00	1,20 x 2,00
Brückenoberkante über LAT	Z <sub>max</sub> =	14,55	14,55	15,68	16,26	14,55	14,55	14,48	14,55	14,55
Brückenlager über LAT	Z <sub>min</sub> =	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 22 von 171

Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Brücken:

ISOMETRISCHE ANSICHT

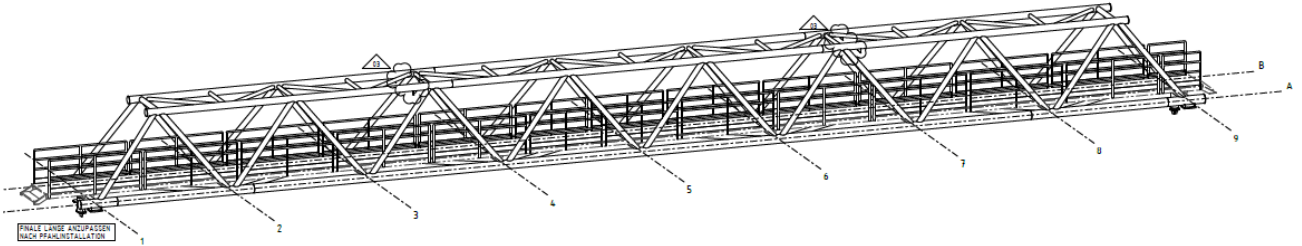


Abbildung 5-2: Brücke 1

ISOMETRISCHE ANSICHT

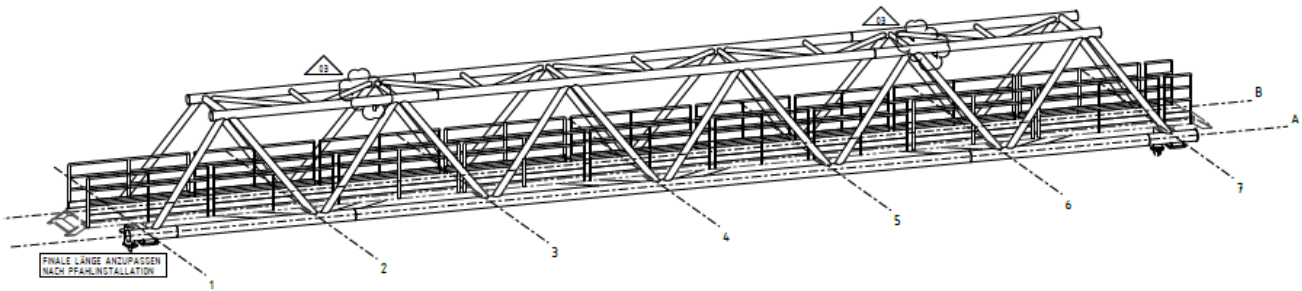


Abbildung 5-3: Brücke 2

ISOMETRISCHE ANSICHT

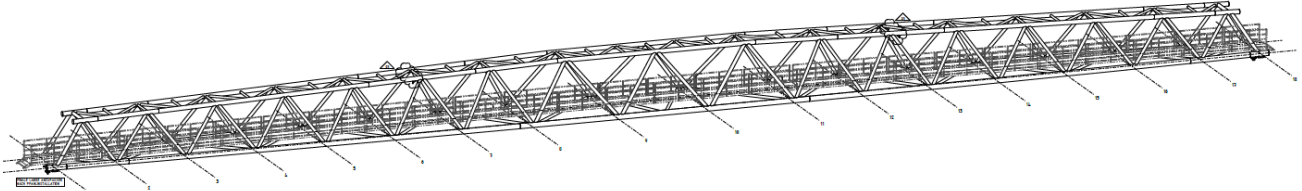






Abbildung 5-4: Brücke 3

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 23 von 171

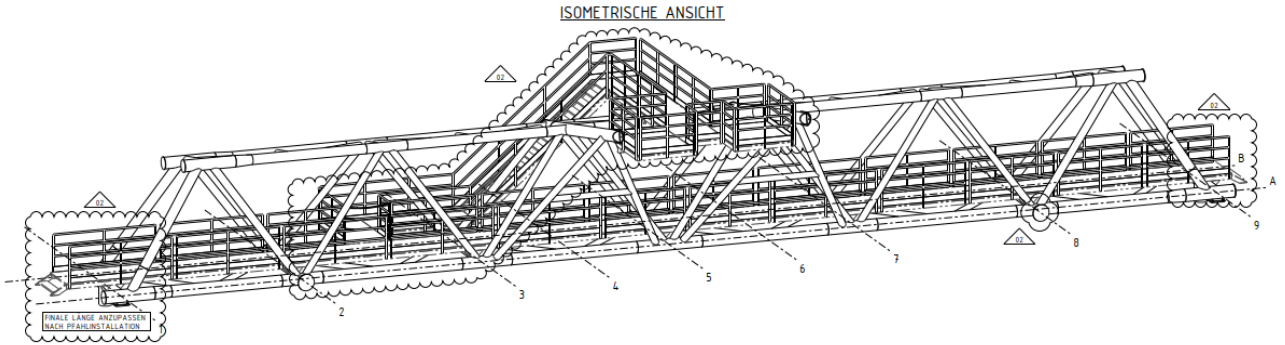


Abbildung 5-5: Brücke 4

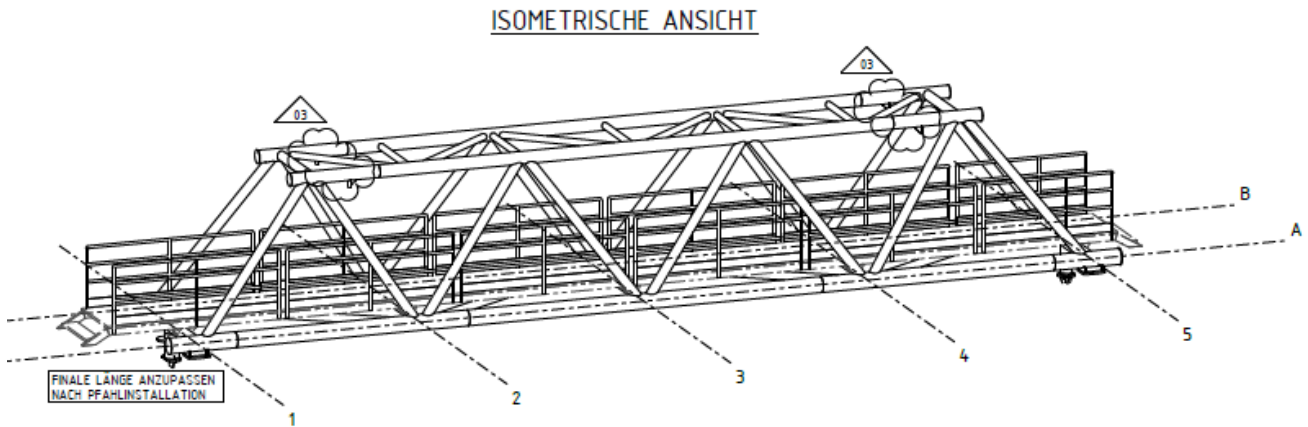


Abbildung 5-6: Brücke 5

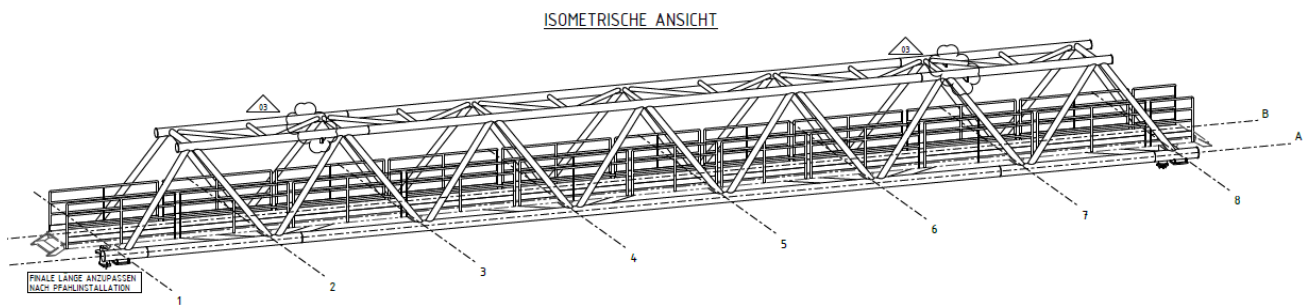






Abbildung 5-7: Brücke 6

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 24 von 171

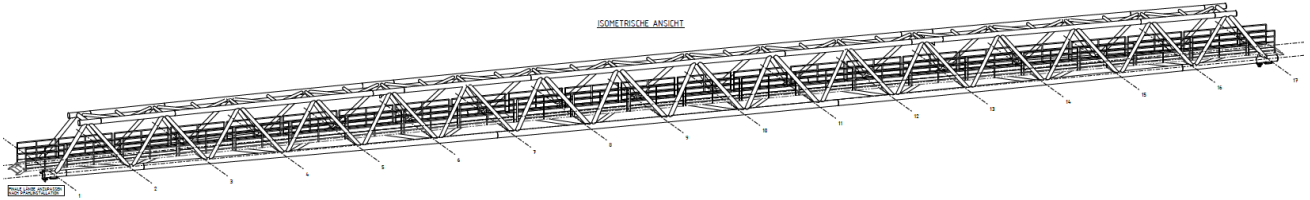


Abbildung 5-8: Brücke 7

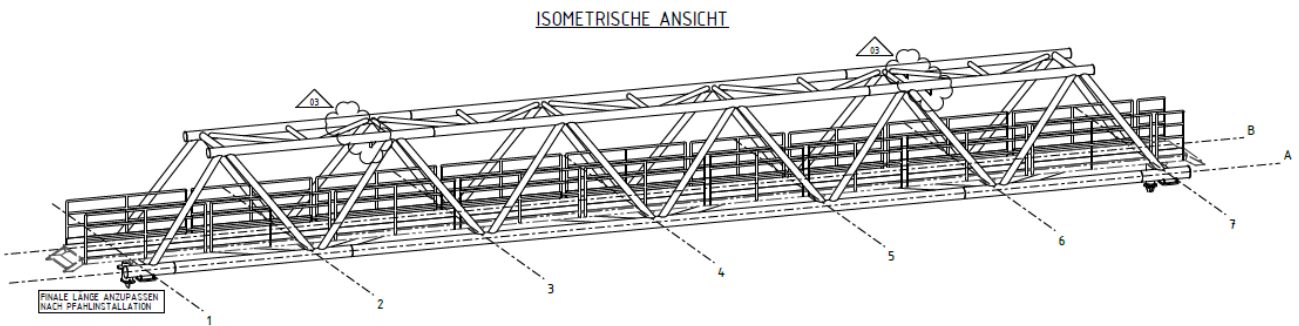


Abbildung 5-9: Brücke 8

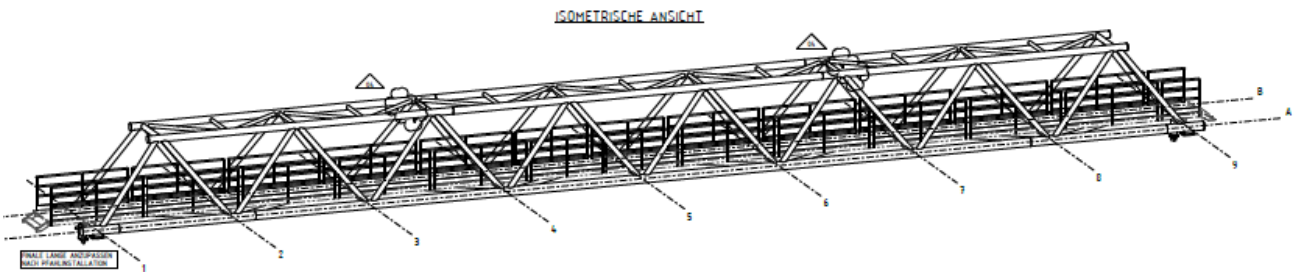




Abbildung 5-10: Brücke 9

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 25 von 171

#### 5.4 Beschreibung der Brückenlagerung

Jede Brücke hat ein in Längsrichtung verschiebliches Gleitlager und ein rotierbares Festlager. Die Unterschiede der Lagerung werden strukturell nur plattformseitig durchgebildet. Brückenseitig sind beide Brückenenden, egal ob Gleitlager oder Festlager, gleich ausgebildet:

- Mit jeweils 2 vertikalen Drucklagern mit Gleitflächen pro Brückenende unter dem Hauptlängsträgern
- Mit einem Pin unter dem horizontalen Querträger, der Horizontale Kräfte überträgt (bei B4 überträgt dieser Pin zusätzlich abhebende Kräfte)

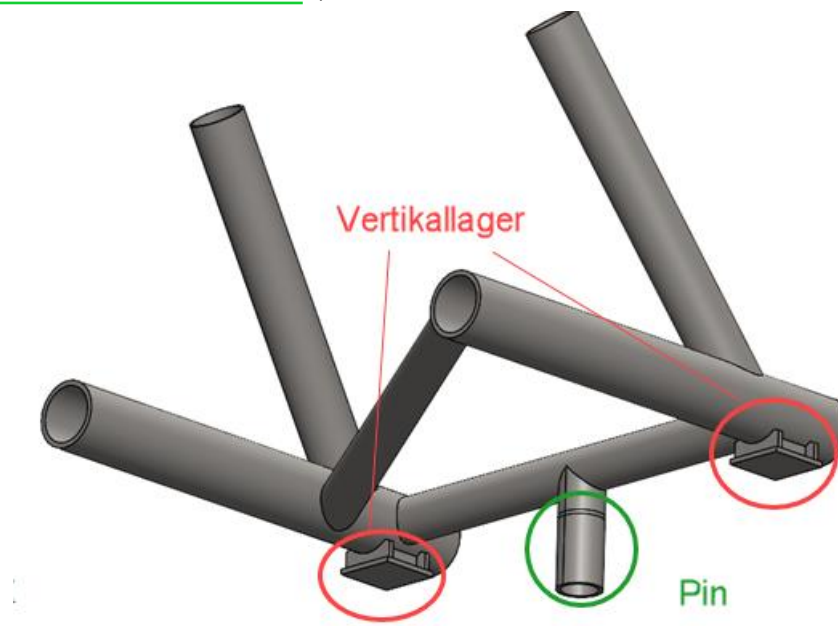







Abbildung 5-11: Brückenlager

Die Lager aller Brücken werden gleich gestaltet, außer für Brücke B4, denn hier ist ein etwas kräftigeres Lager erforderlich.

Für die strukturellen Nachweise wird an den Gleitflächen aller Vertikallager eine zusätzliche Reibungskraft berücksichtigt. Konservativ wird ein Reibbeiwert von  $\mu = 0,3$  betrachtet.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 26 von 171

## 6 Lasten und Lastfallkombinationen

### 6.1 Allgemeine Lasten und Lastkategorien

Lasten und Lasteffekte auf die Brücken entstehen infolge von:

- Eigengewicht (G)
- Veränderliche Lasten (Q)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)

### 6.2 Eigengewicht (G)

Als Eigengewichte werden berücksichtigt:

- Das Eigengewicht der tragenden Brückenstruktur
- Das Eigengewicht der Ausstattung und des Equipments (Gitterroste, Haken, Fender, etc.)

### 6.3 Veränderliche Lasten (Q)

Die hier berücksichtigten veränderlichen Lasten sind:

- Verkehrslast (infolge Personen auf der Brücke)
- Windlasten
- Schneelasten
- Eislasten
- Holmlasten
- Riser Hang-off Lasten

#### 6.3.1 Verkehrslast (infolge Personen auf der Brücke)

Gemäß Ref. [VI.], wird eine gleichmäßig verteilte Streckenlast von  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

Eine Einzellast von  $1,5 \text{ kN}$  an ungünstigster Stelle wurde ebenfalls gecheckt. Dieser Lastfall ist aber für keine Brücke maßgebend. Deswegen wird diese Verkehrslast hier nicht weiter beschrieben und nachgewiesen.

#### 6.3.2 Windlasten

Wind Lasten werden gemäß DIN EN 1991-1-4, Ref. [I.] ermittelt.

Die geplante Lokation der Brücken befindet sich in der Windzone WZ 4, siehe Ref. [I.]. Demnach sind die folgenden Windbasiswerte zu berücksichtigen:

- Basis Windgeschwindigkeit  $v_{b,0} = 30 \text{ m/s}$  (für Windzone WZ 4) ✓
- Basis Windstaudruck  $q_{b,0} = 0,56 \text{ kN/m}^2$  (für Windzone WZ 4)

Für die Brücken wird konservativ von einer maximalen Höhe über dem Wasserspiegel von  $z = 15 \text{ m}$  ausgegangen.

Gemäß Ref. [I.] ermittelt sich der anzusetzenden Böhenstaudruck demnach zu:

$$q_p = 2,3 \cdot q_{b,0} \cdot \left(\frac{z}{10\text{m}}\right)^{0,27}$$


$$q_p = 2,3 \cdot q_{b,0} \cdot \left(\frac{15\text{m}}{10\text{m}}\right)^{0,19} = 1,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Der Winddruck auf eine Struktur ergibt sich zu:

$$q_{p,lc} = q_p \cdot c_f$$

Mit:  $q_p$ : Böhenstaudruck,  $q_p = 1,44 \text{ kN/m}^2$  from above

$c_f$ : Aerodynamischer Beiwert

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 27 von 171

Aerodynamische Beiwerte für einzelne Stahlquerschnitte

Aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen

Für Fachwerkstrukturen, kann je nach Anströmrichtung und Art des Fachwerkes ein Beiwert  $c_f$  nach Ref. [I.] benutzt werden:

$c_f = 1,85$	Maximalwert für Fachwerkstrukturen
$\Psi = 1,00$	Maximum slenderness Ratio
$\varphi = 0,50$	konservative Annahme für Verbauungsgrad

Resultierende Windlast  $w$  auf gesamte Fachwerkfläche:  $w = c_f \cdot q_p \cdot \Psi \cdot \varphi = 1,85 \cdot 1,44 \text{ kN/m}^2 \cdot 1 \cdot 0,5 = 1,329 \text{ kN/m}^2$ .

### 6.3.3 Schneelasten

Schneelasten werden nach DIN EN 1991-1-3, Ref. [II.] und dem zugehörigen nationalem Anhang ermittelt.

Es wird die Schneelastzone 1 nach Ref. [II.] betrachtet. Für Zone 1 gilt eine charakteristische Schneelast am Boden von  $s_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$  (gültig bis zu einer Höhe von 400 m über Wasser).

Die Schneelast wird wie folgt bestimmt:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

mit:

$\mu_i$	Schneelast Formkoeffizient = 0,8 für Oberflächen (/Dächer) mit einem Winkel < 30°.
$C_e$	Aussetzungskoeffizient = konservativ zu 1,0 gesetzt
$C_t$	Thermischer Koeffizient = 1,0 für den Normalfall

Somit ergibt sich eine Schneelast (anzusetzen auf Gitterroste und oberen, relativ verbauten Brückenteil) von:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,65 \text{ kN/m}^2 = 0,52 \text{ kN/m}^2.$$

### 6.3.4 Eislasten

Eislasten werden nach DIN EN 1991-1-3, Ref. [II.] ermittelt. Die geplanten Brücken befinden sich in der Küstenregion und somit in der Vereisungsklasse R1 / G1.

Somit ergibt sich laut Ref. [II.] eine Eislast pro Stab mit  $D < 0,3 \text{ m}$  von  $e = 0,005 \text{ kN/m}$ .

Konservativ vereinfacht wird für Stäbe mit  $D > 0,3 \text{ m}$  (hier:  $D = 327.3 \text{ mm}$ ) eine Eislast von  $e = 0,01 \text{ kN/m}$  angesetzt.

### 6.3.5 Holmlast

Gemäß Ref. [2.], wird eine horizontale Design - Holmlast (inkl. Lastfaktor) von  $H_d = 0,52 \text{ kN/m}$  oben an allen Handläufen angesetzt.





### 6.3.6 Reibungslasten

Die Reibungslasten werden mit  $F_R = \mu \cdot F_N$  bestimmt, wo  $\mu$  ist die Reibungskoeffizient (hier: konservativ  $\mu = 0,3$ ) und  $F_N$  ist die Normalkraft.

### 6.3.7 Riser Hang-Off Lasten

Die Brücke B4 soll zusätzlich zu dem Laufweg noch 2 Riser Hang-off Lager bieten. Die Lokation dieser 2 Hang-off Lager ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Ein Access Plattform über den Riser Hang-off Struktur ist für Wartungsarbeit ausgelegt.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 28 von 171

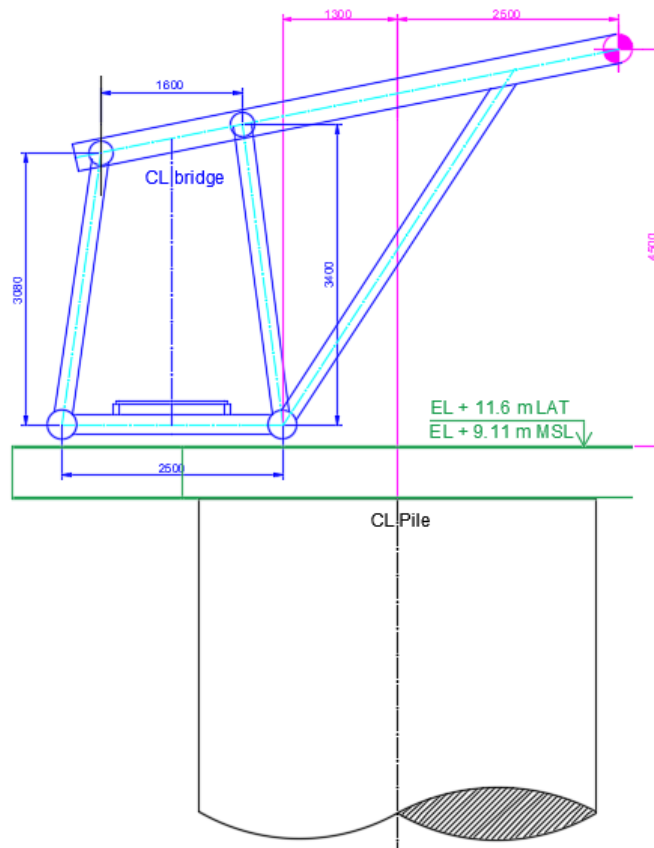


Figure 6-1 Position der Riser Hang-Offs, Seitenansicht

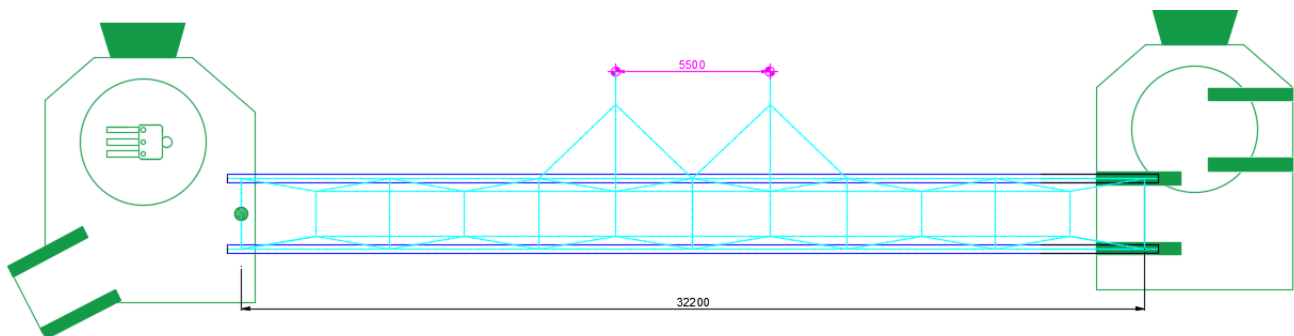


Figure 6-2 Position der Riser Hang-Offs, Draufsicht






Die Hang-off Lasten erzeugen an der Brücke B4 konservativ maximum die folgenden Lasten:

- 11 t vertikal
- 11 t horizontal quer
- 5 t horizontal längs (konservativ gewählt)

#### 6.4 Korrosionszuschlag – Stahl

Der Korrosionszuschlag des Stahls in Atmosphäre wird 0,02 mm pro Jahr nach Referenz [2.] berücksichtigt. Nach den gewünschten Lebensdauer von  $T_c = 5 \text{ Jahre}$  ist der maximale Dickenverlust 0,1 mm betrachtet.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 29 von 171

## 7 Design-Kriterien und Nachweis-Methoden

### 7.1 Lebensdauer

Die geplante Lebensdauer beträgt hier 5 Jahre.

### 7.2 Design Methode

Die Konstruktion und der Nachweis der Brücken erfolgt nach DIN EN 1991 / Euro Codes mit Kombination der TRAS.

#### 7.2.1 Tragfähigkeitsnachweise

Für den Nachweis der Tragfähigkeit werden die folgenden Nachweise erbracht:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit / Ultimate Limit State (ULS)
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit / Serviceability Limit States (SLS)

Kein Bauteil der Brücken wird relevante Ermüdungslasten bekommen. Deswegen entfällt an dieser Stelle der Nachweis gegen Ermüden / Fatigue Limit States (FLS).

### 7.3 LRFD Methode

#### 7.3.1 Allgemeines

Für alle Nachweise wird die LRFD Methode angewandt. Es handelt sich um ein Bemessungsverfahren, bei dem das angestrebte Sicherheitsniveau der Komponente erreicht wird, indem Belastungs- und Widerstandsfaktoren auf die charakteristischen Werte der Basisvariablen angewendet werden. Die grundlegenden Kennwerte sind die Folgenden:

- Lasten, die auf die Struktur wirken
- Material- und Strukturwiderstände

Das Sicherheitsniveau eines Bauteils gilt als ausreichend, wenn die Bemessungslasteinwirkung ( $S_d$ ) die Bemessungstragfähigkeit ( $R_d$ ) nicht überschreitet:

$$S_d \leq R_d$$

#### 7.3.2 Allgemeine Design-Last / Entwurfslast

Grundsätzlich ergibt sich die Design-Last ( $F_d$ ), indem die charakteristische Last ( $F_{k,i}$ ) mit einem Lastfaktor multipliziert wird ( $\gamma_{F,i}$ ):

$$F_d = \sum_i \gamma_{F,i} \cdot F_{k,i}$$

Laut DIN 18088 [XII.] sind unterschiedliche Teilsicherheitsfaktoren mit den entsprechenden Lasten zu kombinieren.

Lastkombinationen einschließlich der Lastfaktoren und Lastkombinationswerte sind für verschiedene Lasteinwirkungen im Abschnitt 5 dieses Dokuments angegeben.

#### 7.3.3 Allgemeine Design-Widerstände

Die Design-Widerstände ( $R_d$ ) werden wie folgt bestimmt:






$$R_d = \Phi R_k$$

mit:  $R_k$  = Charakteristischer Widerstand

$\Phi$  = Widerstandsfaktor.

Der Widerstandsfaktor  $\Phi$  verhält sich wie folgt zum Materialfaktor  $\gamma_M$ :

$$\Phi = 1 / \gamma_M$$

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 30 von 171

### 7.3.4 Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Die folgenden Lastfaktoren gelten für ULS: nach DIN 18088-1, Ref. [XII.]:

- Eigengewicht + veränderl. Lasten:
 
$$\gamma_G * G + \gamma_Q * Q_1 + \gamma_Q * (\sum Q_i * \psi_{0,i})$$

$$1,35 * G + 1,50 * Q_1 + 1,50 * (\sum Q_i * \psi_{0,i})$$
 Mit:
  - $\psi_{0,i} = 0,5$  für Schnee S
  - $\psi_{0,i} = 0,5$  für Eis E
  - $\psi_{0,i} = 0,6$  für Wind W
  - $\psi_{0,i} = 0,7$  für Verkehrslast V
  - $\psi_{0,i} = 0,7$  für Holmlast H

Des Weiteren ist laut TRAS (Ref. [VIII.]) neben dem Teilsicherheitsfaktor ( $\psi_{0,i}$ ) für Wind-, Schnee- und Eislasten ein Faktor von  $K_{FI} = 1,1$  zu berücksichtigen. Dies soll als zusätzliche Sicherheit gegenüber Umweltbelastungen dienen.

Zusätzlich wird ein Kontingenzfaktor von  $c_c = 1,1$  für das Eigengewicht berücksichtigt.

Hieraus ergeben sich je nachdem welche veränderliche Last maßgebend wird, die folgenden Lastfallkombinationen:

- Eigengewicht+ **Verkehr**+ Wind +Schnee + Eis:
 
$$c_c * \gamma_G * G + \gamma_Q * V + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_{0,i} * W + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_{0,i} * (S + E) + \gamma_Q * H$$

$$1,1 * 1,35 * G + 1,50 * V + 1,5 * 1,1 * 0,6 * W + 1,5 * 1,1 * 0,5 * (S+E) + 1,0 * H$$

$$1,485 * G + 1,50 * V + 0,99 * W + 0,825 * (S+E) + 1,0 * H$$
- Eigengewicht+ Verkehr+ **Wind** +Schnee + Eis:
 
$$c_c * \gamma_G * G + \gamma_Q * \psi_{0,i} * V + \gamma_Q * K_{FI} * W + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_{0,i} * (S + E) + \gamma_Q * \psi_{0,i} * H$$

$$1,1 * 1,35 * G + 1,50 * 0,7 * V + 1,5 * 1,1 * W + 1,5 * 1,1 * 0,5 * (S+E) + 1,0 * 0,7 * H$$

$$1,485 * G + 1,05 * V + 1,65 * W + 0,825 * (S+E) + 0,7 * H$$
- Eigengewicht+ Verkehr+ Wind +**Schnee + Eis**:
 
$$c_c * \gamma_G * G + \gamma_Q * \psi_{0,i} * V + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_{0,i} * W + \gamma_Q * K_{FI} * (S + E) + \gamma_Q * \psi_{0,i} * H$$

$$1,1 * 1,35 * G + 1,50 * 0,7 * V + 1,5 * 1,1 * 0,6 * W + 1,5 * 1,1 * (S+E) + 1,0 * 0,7 * H$$


$$1,485 * G + 1,05 * V + 0,99 * W + 1,65 * (S+E) + 0,7 * H$$





### 7.3.5 Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Für SLS gelten die folgenden Lastfaktoren:

- Eigengewicht + veränderl. Lasten:
 
$$\gamma_G * G + \gamma_Q * Q_1 + \gamma_Q * (\sum Q_i * \psi_{0,i})$$

$$1,0 * G + 1,0 * Q_1 + 1,0 * (\sum Q_i * \psi_{0,i})$$
 Mit:
  - $\psi_{0,i} = 0,5$  für Schnee S
  - $\psi_{0,i} = 0,5$  für Eis E
  - $\psi_{0,i} = 0,6$  für Wind W
  - $\psi_{0,i} = 0,7$  für Verkehrslast V

Des Weiteren ist laut TRAS (Ref. [VIII.]) neben dem Teilsicherheitsfaktor ( $\psi_{0,i}$ ) für Wind-, Schnee- und Eislasten ein Faktor von  $K_{FI} = 1,1$  zu berücksichtigen. Dies soll als zusätzliche Sicherheit gegenüber Umweltbelastungen dienen. 

	Struktur	
 		
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 31 von 171

Hieraus ergeben sich je nachdem welche veränderliche Last maßgebend wird, die folgenden Lastfallkombinationen:

- Eigengewicht+ **Verkehr**+ Wind +Schnee + Eis:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * V + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_o * W + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_o * (S + E)$$

$$1,0 * G + 1,0 * V + 1,0 * 1,1 * 0,6 * W + 1,0 * 1,1 * 0,5 * (S+E)$$

$$1,0 * G + 1,0 * V + 0,66 * W + 0,55 * (S+E)$$

- Eigengewicht+ Verkehr+ **Wind** +Schnee + Eis:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * \psi_o * V + \gamma_Q * K_{FI} * W + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_o * (S + E)$$

$$1,0 * G + 1,0 * 0,7 * V + 1,0 * 1,1 * W + 1,0 * 1,1 * 0,5 * (S+E)$$

$$1,0 * G + 0,7 * V + 1,1 * W + 0,55 * (S+E)$$

- Eigengewicht+ Verkehr+ Wind +**Schnee + Eis**:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * \psi_o * V + \gamma_Q * K_{FI} * \psi_o * W + \gamma_Q * K_{FI} * (S + E)$$

$$1,0 * G + 1,0 * 0,7 * V + 1,0 * 1,1 * 0,6 * W + 1,0 * 1,1 * (S+E)$$

$$1,0 * G + 0,7 * V + 0,66 * W + 1,1 * (S+E)$$

### 7.3.6 SLS Kriterium

Für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, wird das folgenden Grenzkriterium nach EC3 sowie nach DIN EN 14122-2, siehe Ref. [V.] sowie [VI.], überprüft:

- Erlaubte maximale vertikale Gesamtverformung:  $\delta < L / 200$

Für die hier untersuchten Brücken ergeben sich die folgenden maximal zulässigen vertikalen Verformungen:

- $\delta_{max,B1} = L_{B1} / 200 = 35,8 \text{ m} / 200 = 179,0 \text{ mm}$  für Brücke 1
- $\delta_{max,B3} = L_{B3} / 200 = 79,2 \text{ m} / 200 = 396,0 \text{ mm}$  für Brücke 3
- $\delta_{max,B4} = L_{B4} / 200 = 32,2 \text{ m} / 200 = 161,0 \text{ mm}$  für Brücke 4
- $\delta_{max,B7} = L_{B7} / 200 = 68,1 \text{ m} / 200 = 340,5 \text{ mm}$  für Brücke 7

### 7.3.7 Eigenfrequenzen

Für Fußgängerbrücken ist zusätzlich die Eigenfrequenz zu prüfen. Die Brücke soll nicht zu Eigenschwingungen angeregt werden, wenn Personen über die Brücke gehen oder laufen.

Dafür sollten die folgenden Eigenfrequenzbereiche vermieden werden:

- Vertikal:  $1,50 < f_{n,v} < 3,00 \text{ Hz}$

Ergo sollte die Eigenperiode der Brücke in vertikaler Richtung entweder unter 0,33 sec ( $\Delta > 3,0 \text{ Hz}$ ) oder über 0,666 sec ( $\Delta < 1,5 \text{ Hz}$ ) sein.






- Horizontal:  $0,75 < f_{n,h} < 1,50 \text{ Hz}$

Ergo sollte die Eigenperiode der Brücke in horizontaler Richtung entweder unter 0,666 sec ( $\Delta > 1,50 \text{ Hz}$ ) oder über 1,333 sec ( $\Delta < 0,75 \text{ Hz}$ ) sein.

### 7.3.8 Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)

Die schlanken Brückenelemente werden gegen das Auftreten wirbelinduzierter Vibrationen, die durch windinduzierte Wirbelablösungen entstehen können, geprüft. Strukturen, die windinduzierten Vibrationen ausgesetzt sind, haben ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden.

Das Struktur wird gemäß DIN EN [I.] ausgelegt. Die limitierenden Kriterium werden mittels der Strouhal Zahl, der Eigenfrequenz, lokalen Windgeschwindigkeit und dem Elementdurchmesser, bestimmt. Wenn die kritische

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 32 von 171

Windgeschwindigkeit des Bauteils,  $v_{crit,i}$  größer als 1,25 mal die charakteristische 10-Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit,  $v_m$  liegt, sind keine windinduzierten Vibrationen und somit Ermüdungsschäden durch Wind zu erwarten.

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m \quad \checkmark$$

Um die Eigenfrequenzen der Brückenstrukturelemente zu bestimmen, wird das DYNPAC Modul von SACS verwendet.

Die charakteristische 10-Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit,  $v_m$  wurden für jedes relevante Element der Brücke definiert, unter Berücksichtigung der Basis Windgeschwindigkeit,  $v_b$ , welche mit 30 m/s im Abschnitt 6.3.2 definiert ist.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

Der Orography Faktor beträgt  $c_o(z) = 1.0$ . Der Rauigkeitsfaktor,  $c_r(z)$  wurde unter Berücksichtigung des Terrain-Faktors,  $k_r$  und der Höhe,  $z$  bestimmt.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{for} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad \checkmark$$

mit:

$z_{0,II}$	= 0,05 m
$z_{min}$	ist die minimale Höhe
$z_{max}$	soll 200 m nehmen

Die Rauigkeitslänge,  $z_0$  beträgt 0,003 m und die minimale Höhe,  $z_{min}$  beträgt 1 m fuer die Terrain Kategorie 0 (Sea or coastal area exposed to the open sea).

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} = 0,156 \quad \checkmark$$






### 7.3.9 Hebeanalyse

Die Hebeanalyse wird für die Brücken durchgeführt.

Die Lastfaktoren werden nach Ref. [IX.] bestimmt und auf die Designlast angewandt. Zusätzlich wird eine Gewichtsaufschlag von 15 % beaufschlagt.

Table 7-1: Lastfaktoren

Faktor		Wert [-]
Dynamischer Verstärkungs-Faktor (Dynamic Amplification Factor)	$f_{DAF}$	$1 + 0,25 \cdot (100/SHL)^{0,5}$
Gewichtsungenauigkeits-Faktor	$f_m$	<u>1,15</u>
Schwerpunkt (COG) Ungenauigkeits-Faktor	$f_{COG}$	1,10
Schräglast-Faktor	$f_{SKL}$	1,25
Konsequenz-Faktor	$f_{cons}$	1,30
ULS-Faktor	$F_{ULS}$	1,35
Gesamter Lastfaktor	$f_{Total}$	$2,78 \cdot (1 + 0,25 \cdot (100/SHL)^{0,5})$

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 33 von 171

Für die Hebeanalyse wird das Designgewicht der Brücke berücksichtigt. Es wird angenommen, dass keine Windlasten auftreten, da die Hebeoperation bei ruhigem Wetter durchgeführt werden soll.

### 7.3.10 Widerstandsfaktoren

Die Materialwiderstandsfaktoren für den Tragsicherheitsnachweis (ULS) werden nach DIN EN 1993-1-1/NA, Ref. [III.] gewählt.

Für allgemeine Spannungsnachweise globaler Querschnitte für ULS, gilt ein Materialfaktor von

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






Für Stabilitätsnachweise globaler Querschnitte für ULS, gilt ein Materialfaktor von:

$$\gamma_{m1} = 1,10$$

Für Rohrknotenanschlüsse nach DIN EN 1993-1-8, Ref. [V.] und DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12 wird der folgende Materialwiderstandsfaktor benutzt:

$$\gamma_{m5} = 1,00$$



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 34 von 171

## 8 Nachweis der Brücke 1 – 35,8 m

### 8.1 Allgemein

Die Brücke 1 mit 35,8 m Länge wird mittels SACS 14,1 -FE-Analyse nachgewiesen.

### 8.2 Modellbeschreibung

Das folgende Bild zeigt das FE-Modell der Brücke 1, welches für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS), die VIV-Analyse und die Hebeanalyse verwendet wird.

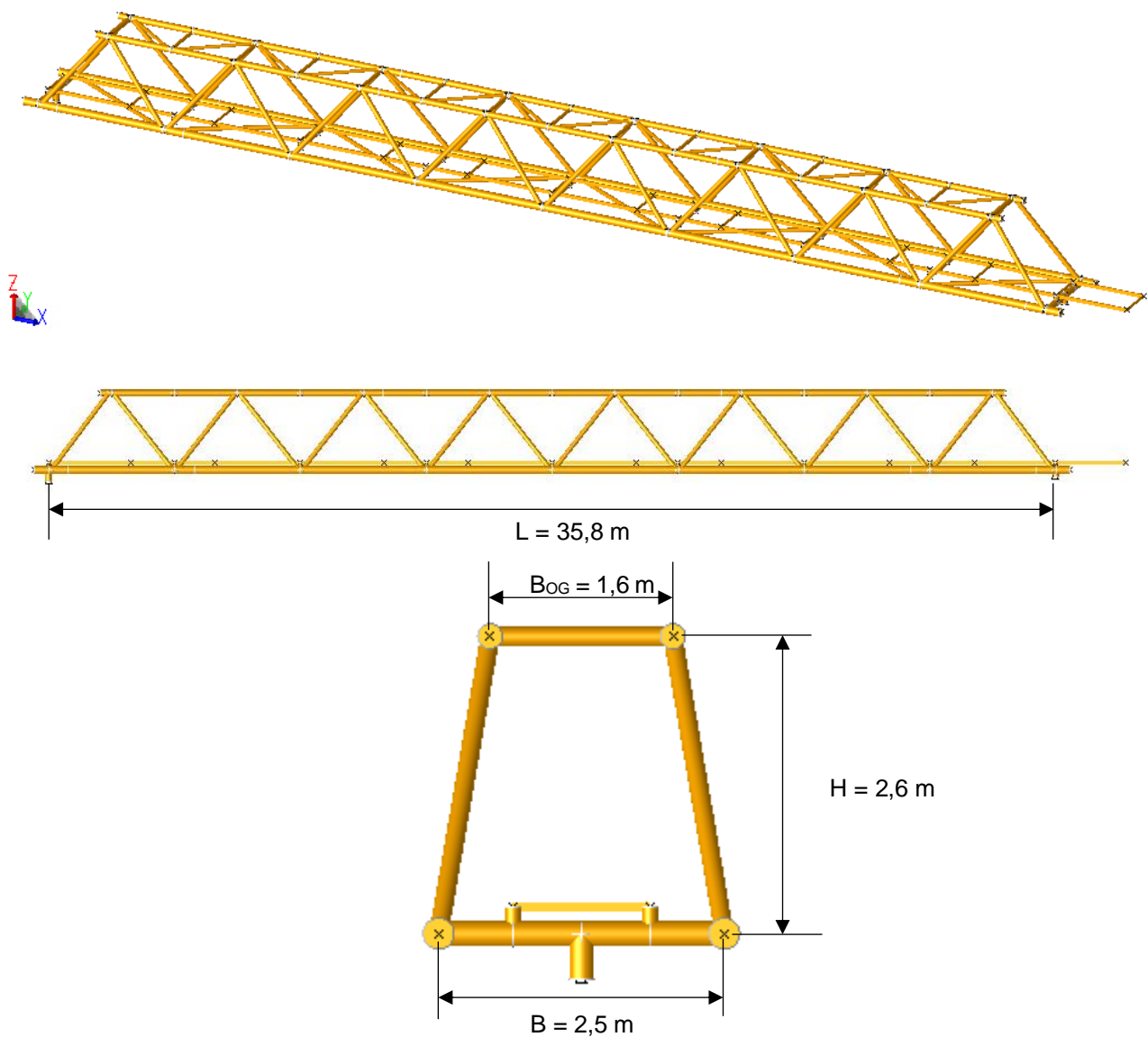






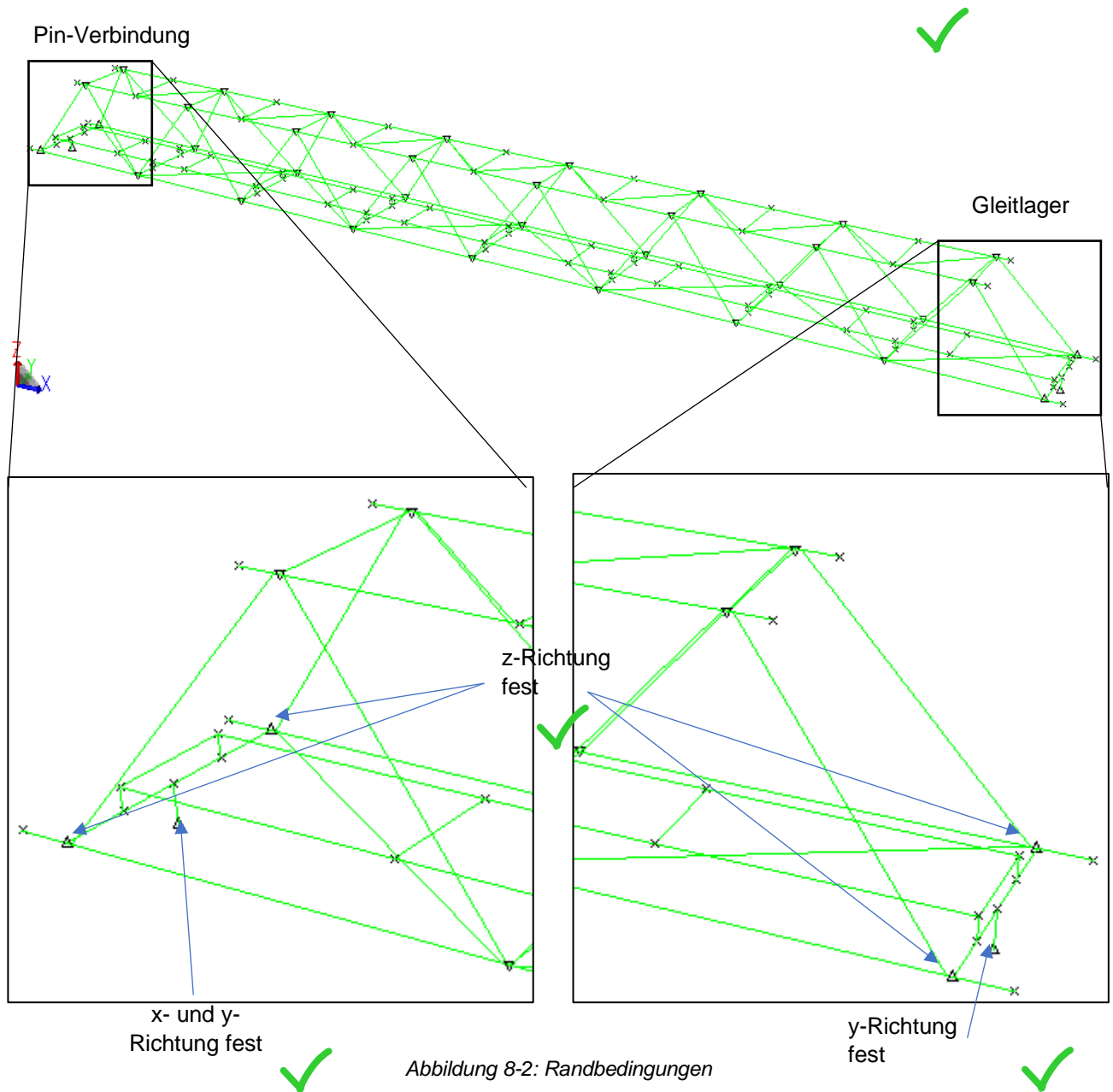
Abbildung 8-1: FE-Modell – Brücke 1

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 35 von 171






### 8.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf der einen Seite mit einer Pin-Verbindung an den Dalben befestigt, siehe linkes Bild in Abbildung 8-2. Auf der andere Seite (Bild rechts, siehe Abbildung 8-2) ist ein Gleitlager, welches die Brücke in y-Richtung festhält. Dies erlaubt ein Gleiten der Brücke in x-Richtung sowie Rotationen um die y- und z-Achse. Für jede Seite, es gibt 2 vertikale Lager, die die Brücke in z-Richtung festhält.

Für einen besseren Überblick werden die Balken im Folgenden als Linien dargestellt.





  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 36 von 171

## 8.4 Lasten

### 8.4.1 Allgemein

Die Strukturlasten werden im FE-Modell modelliert, wohingegen die variablen und Umweltlasten als verteilte Lasten auf die Balken-Elemente aufgebracht werden.

### 8.4.2 Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100

Die Strukturlasten inklusive Gitterroste und Handläufe sind wie unten zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Strukturlasten für Brücke 1

Item	Gewichte ohne Gewichtsaufschlag [ t ]
Member elements	11,10
Gitterroste	1,38
Handläufe	1,17
<b>Total</b>	<b>13,65</b>

Die Gewichte der Gitterroste sind konservativ mit  $m_{\text{Gitterroste}} = 30 \text{ kg/m}^2$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückendenen mit Gleitlager gerechnet.

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= (m / 1000) * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 35,8 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 38,3 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= (30 \text{ kg/m}^2/1000) * 38,3 \text{ m} * 1,2 \text{ m} \\
 &= 1,38 \text{ t}
 \end{aligned}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit  $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückendenen mit Gleitlager gerechnet.

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Handläufe}} &= m * 2 * L_{\text{Handläufe}} / g \\
 L_{\text{Handläufe}} &= 35,8 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 38,3 \text{ m} \\
 G_{\text{Handläufe}} &= 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 38,3 \text{ m} / g \\
 &= 1,17 \text{ t}
 \end{aligned}$$






Die Gewichte von Gitterroste und Handläufe werden auf den Laufsteg aufgebracht.

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 15% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 15% Gewichtsaufschlag wird in den Lastfallkombinationen berücksichtigt (siehe Abschnitt 8.5).

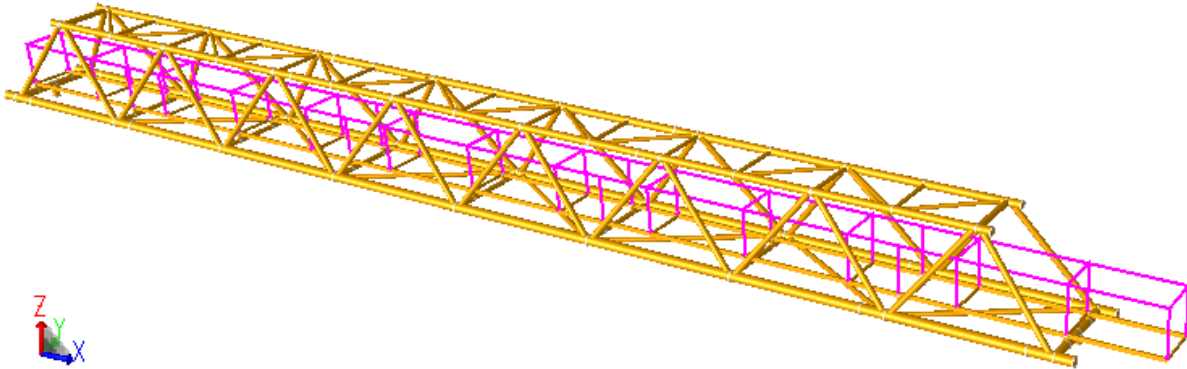
### 8.4.3 Verkehrslasten – LF LL

Die Verkehrslasten werden als eine gleichmäßig verteilte Streckenlast von  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$  auf den Laufsteg aufgebracht (wie im Abschnitt 6.3.1).



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 37 von 171

Load Condition: LL

Abbildung 8-3: Verkehrslasten für Brücke 1

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

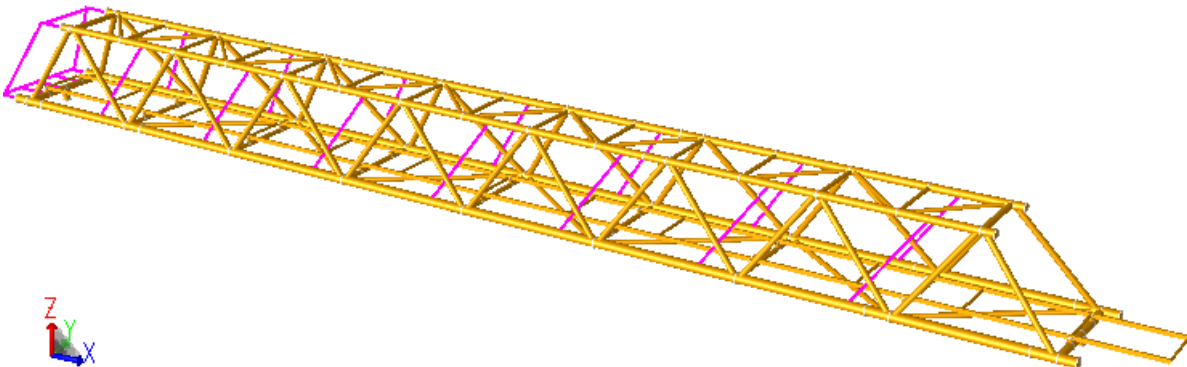
$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 35,8 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 38,3 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= 2 \text{ kN/m}^2 * 38,3 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 91,92 \text{ kN} \quad \checkmark
 \end{aligned}$$

#### 8.4.4 Windlasten – LF WINX (o Grad Richtung)

Die Windlast von 0 Grad Richtung (+x-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke und auf den diagonalen Members aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINX






welche Last wurde aufgebracht?

Abbildung 8-4: Windlasten 0 Grad Richtung für Brücke 1

Die gesamte Windlast wird mit der aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wind}} &= w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L \\
 H &= 3,4 \text{ m} \\
 L &= 6,305 \text{ m (konservativer Ansatz)} \\
 F_{\text{wind}} &= 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,4 \text{ m} * 6,305 \text{ m} = 28,49 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ansatz nicht nachvollziehbar!

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 38 von 171

#### 8.4.5 Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung)

Die Windlast von 90 Grad Richtung (+y-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINY

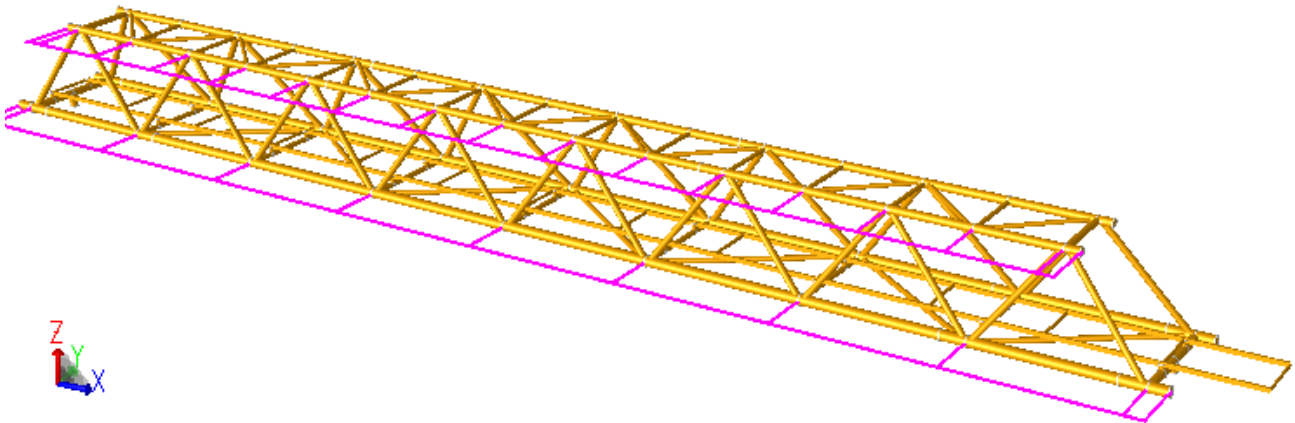


Abbildung 8-5: Windlasten 90 Grad Richtung für Brücke 1

Die gesamte Windlast wird mit der aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$F_{\text{wind}} = w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L$$

$$H = 2,846 \text{ m}$$

$$L = 35,8 \text{ m}$$

$$F_{\text{wind}} = 1,329 \text{ kN/m}^2 * 2,846 \text{ m} * 35,8 \text{ m} = 135,43 \text{ kN}$$



Die Windlast von 45 Grad Richtung ist mit Lastfallkombinationen (wie im Abschnitt 8.5) kombiniert.

#### 8.4.6 Schneelasten – LF SNOW

Die Schneelast ist auf den oberen Brückenteil sowie auf die Gitterroste aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: SNOW

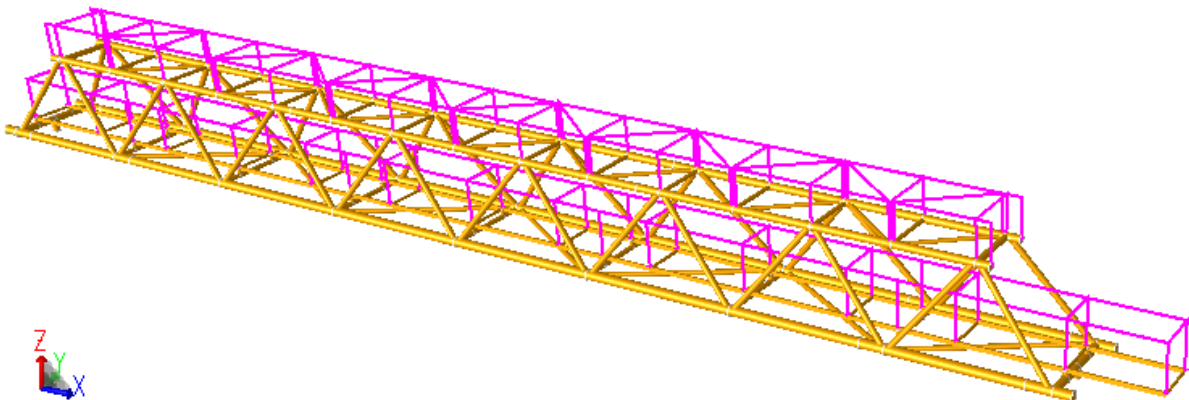






Abbildung 8-6: Schneelasten für Brücke 1

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 39 von 171

Die Schneelasten wird für die obere Brückenteil und die Gitterroste (wie im Abschnitt 6.3.3) gerechnet.

- Für die obere Brückenteil

$$F_{OB} = s * A_{OB} \quad \text{und Fläche der obere Brückteils, } A_{OB} = B_{OB} * L_{OB}$$

$$B_{OB} = 1,6 \text{ m}$$

$$L_{OB} = 32,23 \text{ m}$$

$$F_{OB} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m} * 32,23 \text{ m} = 26,82 \text{ kN} \quad \checkmark$$

- Für die Gitterroste

$$F_{GR} = s * A_{GR} \quad \text{und Fläche von Gitterroste, } A_{GR} = B_{GR} * L_{GR}$$

$$B_{GR} = 1,2 \text{ m}$$

$$L_{GR} = 35,8 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 38,3$$

$$F_{GR} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,2 \text{ m} * 38,3 \text{ m} = 23,90 \text{ kN} \quad \checkmark$$

#### 8.4.7 Eislasten – LF ICE

Die Eislast wird auf alle Balkenelemente als verteilte Last  $P$  ( $e = 0,005 \text{ kN/m}$  für  $D < 0,3 \text{ m}$  und  $e = 0,01 \text{ kN/m}$  für  $D > 0,3 \text{ m}$ ) aufgebracht unter Berücksichtigung der Rohrdurchmesser  $D$  (wie im Abschnitt 6.3.4). Die gesamte Eislasten von  $4,14 \text{ kN}$  werden in der Berechnung berücksichtigt.

Load Condition: ICE

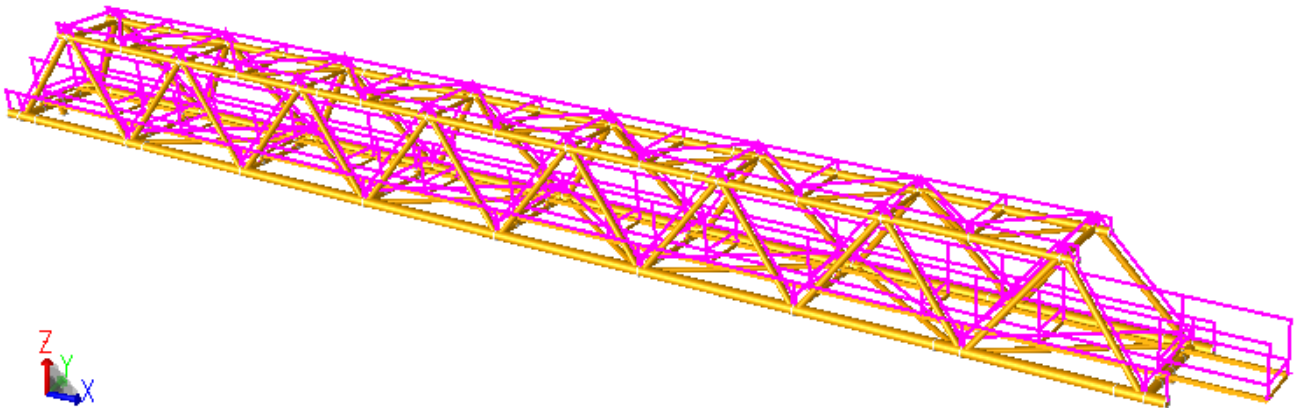







Abbildung 8-7: Eislasten für Brücke 1

#### 8.4.8 Holmlast – LF HOLM

Im Abschnitt 6.3.5, wird eine horizontale Design – Holmlast (inkl. Lastfaktor) von  $H_d = 0,525 \text{ kN/m}$  oben an allen Handläufen angesetzt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 40 von 171

Load Condition: HOLM

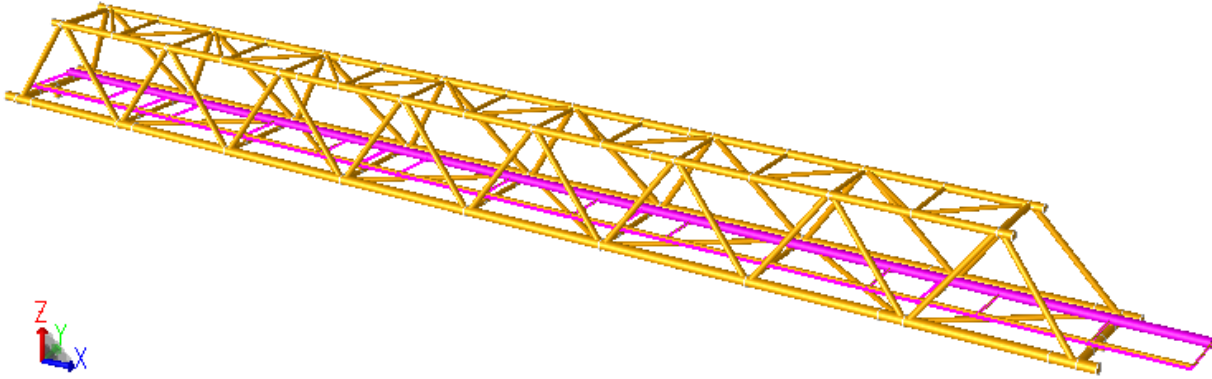


Abbildung 8-8: Holmlasten für Brücke 1

Es wird nur eine horizontale +y-Richtung gecheckt. Darüber werden die Momente infolge horizontale Holmlast berücksichtigt, da die Handläufe nicht modelliert sind. Ein Hebelarm von  $h = 1,1$  m wird angesetzt.

$$M_{HL,-x} = H_d * h = 0,525 \text{ kN/m} * 1,1 \text{ m} = 0,5775 \text{ kNm/m} \text{ (-x Rotations auf die Laufstege)}$$

#### 8.4.9 Reibungslasten

Die Reibungslasten am vertikalen Lager werden gemäß Abschnitt 6.3.6 gerechnet. Die Normalkraft wird konservativ von dem maximalen erzeugten Vertikalkraft genommen.

Die maximale erzeugte Vertikalkraft ist 161 kN wie im Abschnitt 8.6.3.. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 161 \text{ kN} = 48,3 \text{ kN}$$

Die Reibungslasten werden auf 3 verschiedene Arten überprüft:

- Reibungslast am Lager 2 x Zug (LF ZUG)
- Reibungslast am Lager 2 x Druck (LF DRUCK)
- Reibungslast am Lager 1 x Druck und 1 x Zug (LF ABWE)

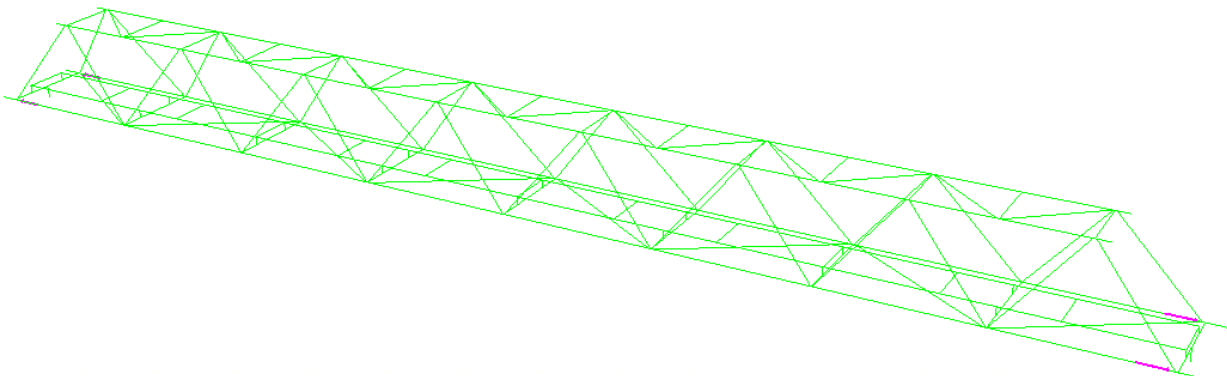






Abbildung 8-9: Reibungslasten (Zug) für Brücke 1

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 41 von 171

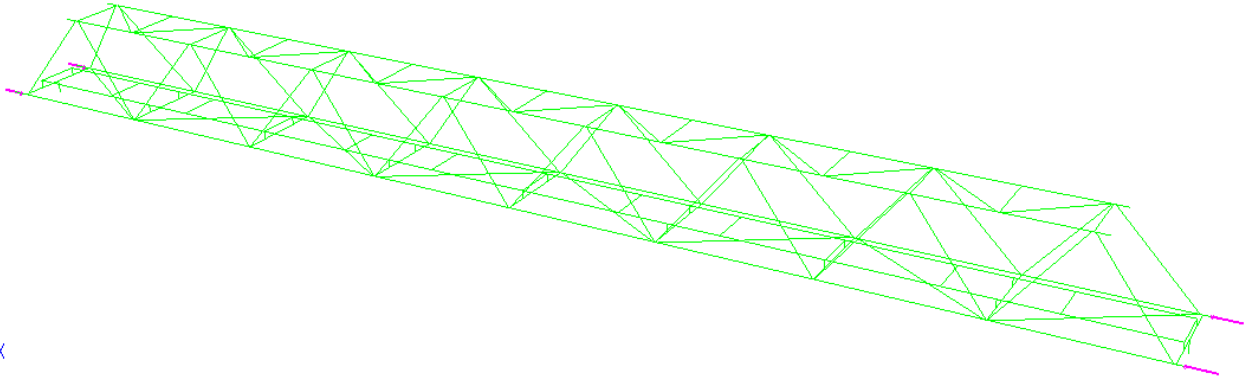


Abbildung 8-10: Reibungslasten (Druck) für Brücke 1

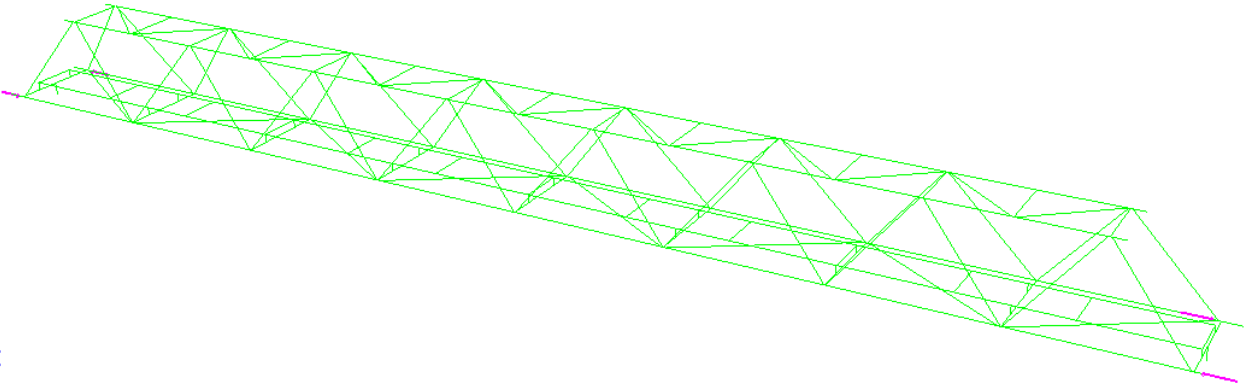







Abbildung 8-11: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 1

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 42 von 171





## 8.5 Lastfallkombinationen

Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.3.4 und 7.3.5.

Tabelle 8-2: Lastfallkombinationen






LCOM	Lastfaktoren									
	LF 100	LF LL	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 1 (Verkehr)</u>										
101	1,553*	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,553*	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
103	1,553*	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
104	1,553*	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
105	1,553*	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
106	1,553*	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
107	1,553*	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
108	1,553*	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
109	1,553*	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
<u>ULS 2 (Wind)</u>										
201	1,553*	1,05	1,65	-	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,553*	1,05	1,65	-	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
203	1,553*	1,05	1,65	-	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
204	1,553*	1,05	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
205	1,553*	1,05	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
206	1,553*	1,05	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
207	1,553*	1,05	-	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
208	1,553*	1,05	-	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
209	1,553*	1,05	-	1,65	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
<u>ULS 3 (Schnee &amp; Eis)</u>										
301	1,553*	1,05	0,99	-	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,553*	1,05	0,99	-	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
303	1,553*	1,05	0,99	-	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
304	1,553*	1,05	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
305	1,553*	1,05	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-



		Struktur			
 					
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN		Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03		
TES Code: TES-WHV-VGN-			Seite 43 von 171		

LCOM	Lastfaktoren									
	LF 100	LF LL	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
306	1,553*	1,05	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
307	1,553*	1,05	-	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
308	1,553*	1,05	-	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
309	1,553*	1,05	-	0,99	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>										
401	1,15*	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,15*	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
403	1,15*	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
404	1,15*	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
405	1,15*	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
406	1,15*	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
407	1,15*	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
408	1,15*	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
409	1,15*	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 2 (Wind)</u>										
501	1,15*	0,70	1,10	-	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,15*	0,70	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
503	1,15*	0,70	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
504	1,15*	0,70	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
505	1,15*	0,70	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
506	1,15*	0,70	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
507	1,15*	0,70	-	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
508	1,15*	0,70	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
509	1,15*	0,70	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 3 (Schnee &amp; Eis)</u>										
601	1,15*	0,70	0,66	-	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,15*	0,70	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
603	1,15*	0,70	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
604	1,15*	0,70	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 44 von 171

LCOM	Lastfaktoren									
	LF 100	LF LL	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
605	1,15*	0,70	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
606	1,15*	0,70	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
607	1,15*	0,70	-	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
608	1,15*	0,70	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
609	1,15*	0,70	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00

\*inkl. 15% Gewichtsaufschlag wie im Abschnitt 8.4.2.

## 8.6 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapitel sind alle Ergebnisse für Brücke 1 gezeigt.

### 8.6.1 Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

#### 8.6.1.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,71 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

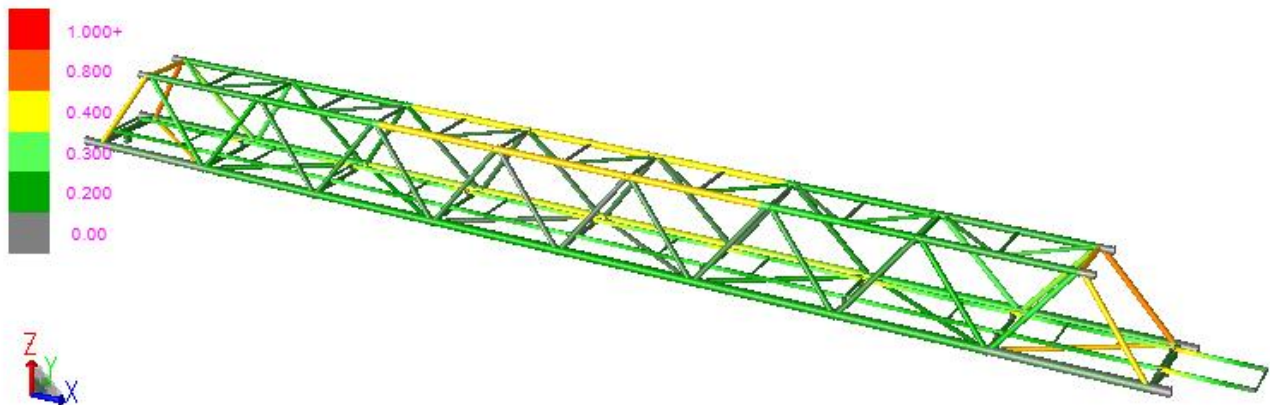







Abbildung 8-12: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 1

#### 8.6.1.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,85 während In-place Zustand.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 45 von 171

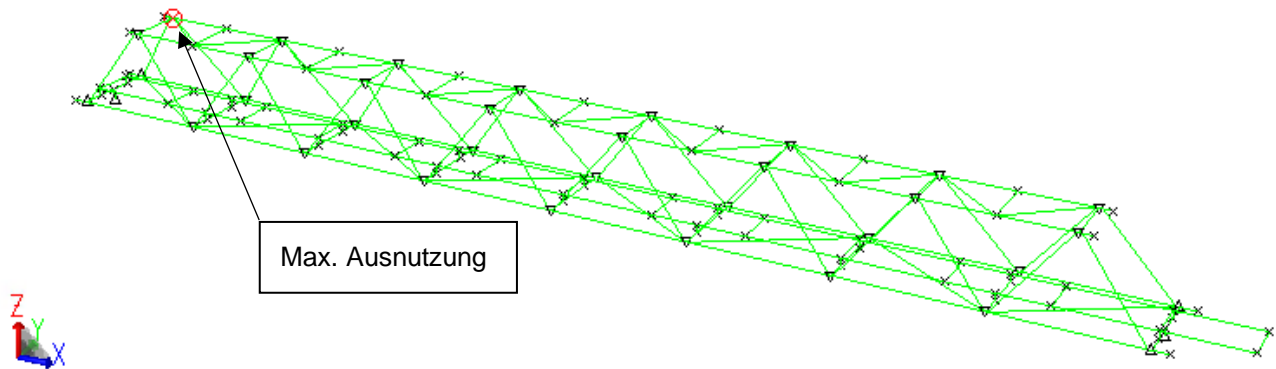


Abbildung 8-13: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 1



### 8.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 604 auf und resultiert zu -34 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als  $L/200 = 179$  mm (siehe Abschnitt 7.3.6). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

Defl. Shape LC 604

Max View Defl. at 0074

DX: 0.485

DY: 1.465

DZ: -3.397

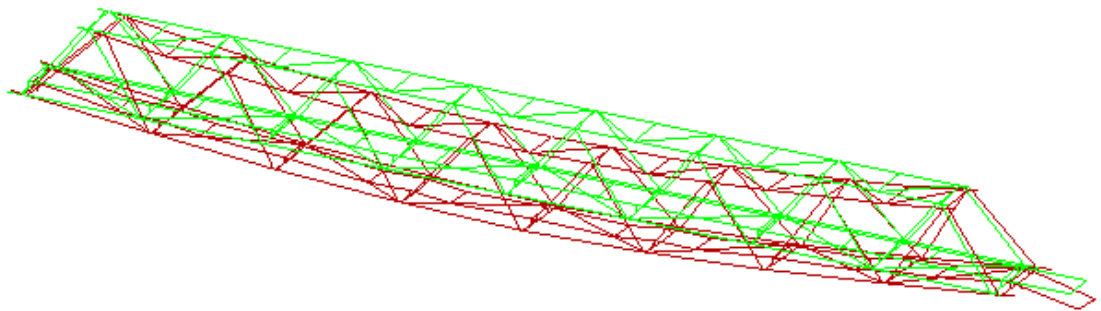


Abbildung 8-14: Verformungsergebnisse – Brücke 1

### 8.6.3 Design-Reaktionslasten an den Brückenlager

Die ausgelesenen Reaktionslager, welche zur Dimensionierung der Brückenlager benötigt werden, sind in der folgenden Tabelle gegeben. Dabei handelt es sich um das absolute Maximum über alle betrachteten Brücken und Lastkombinationen.








  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 46 von 171

Tabelle 8-3: Brückenlager Lasten – Brücke 1

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb), $V_{\max,1}$	161,0
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb) am anderen Lager auf gleiches Brückenende, $V_{\max,2}$	98,1
Horizontal (quer)	120,0
Horizontal (längs)	<del>47,0</del> 62

#### 8.6.4 Eigenfrequenzen der Brücke

Die Eigenfrequenzen der Brücke 1 sind in der folgenden Tabelle gegeben. Beide Gewichte ohne und mit Gewichtsaufschlag sind überprüft.

Tabelle 8-4: Eigenfrequenzen – Brücke 1

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 15% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Horizontal	3,76 4,124	3,48 3,846
Mode 2: Vertikal	4,78 4,715	4,51 4,397

Die Eigenfrequenzen der Brücke 1 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.3.7).

#### 8.6.5 Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)






Die schlanke Brückenelemente werden gegen das Auftreten wirbelinduzierter Vibrationen, die durch windinduzierte Wirbelablösungen entstehen können, geprüft. Strukturen, die windinduzierten Vibrationen ausgesetzt sind, haben ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden.

Tabelle 8-5: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigenfrequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeitsfaktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwindigkeit, $v_m$ [m/s]	kritische Windgeschwindigkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	1,25 * $v_m$ [m/s]
Horizontale Primärstruktur Boden	0,2730	12,0	50,88 ~60	1,294	38,82	77,2	48,53
Diagonalen	0,1683	13,9	67,55	1,317	39,51	62,9	49,39

Diese werden in der aktuellen Designphase nicht als kritisch angesehen.

Die Eigenfrequenzen der Horizontale Primärstruktur Boden und der Diagonalen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 47 von 171

Mode 6 Freq. 50.883 Hz Period 0.020 secs

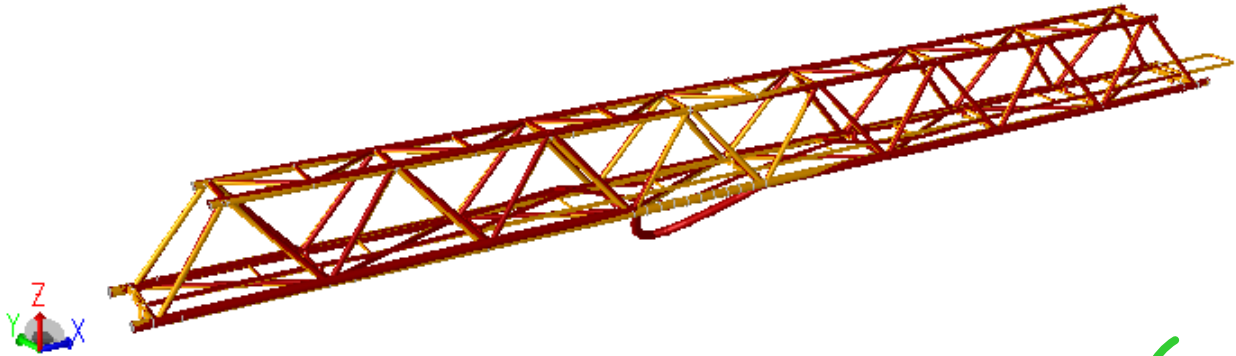


Abbildung 8-15: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

Mode 6 Freq. 67.547 Hz Period 0.015 secs

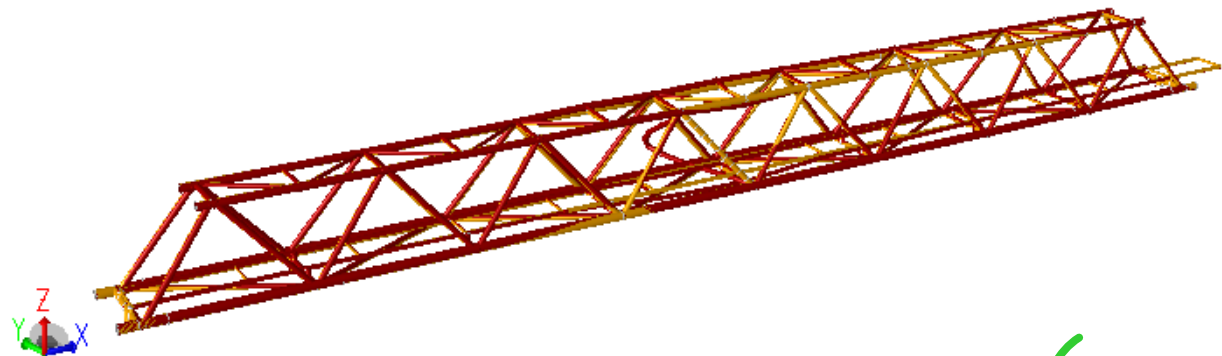




Abbildung 8-16: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

#### 8.6.6 Hebeanalyse

Im folgenden Abschnitt wird die Hebeanalyse für die Brücken durchgeführt. Eine detaillierte Auslegung der Hebepunkte ist im Kapitel 14 beschrieben. Das grobe Aussehen der Hebeanordnung sowie das Vorgehen zur Berechnung sind im Folgenden beschrieben.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 48 von 171

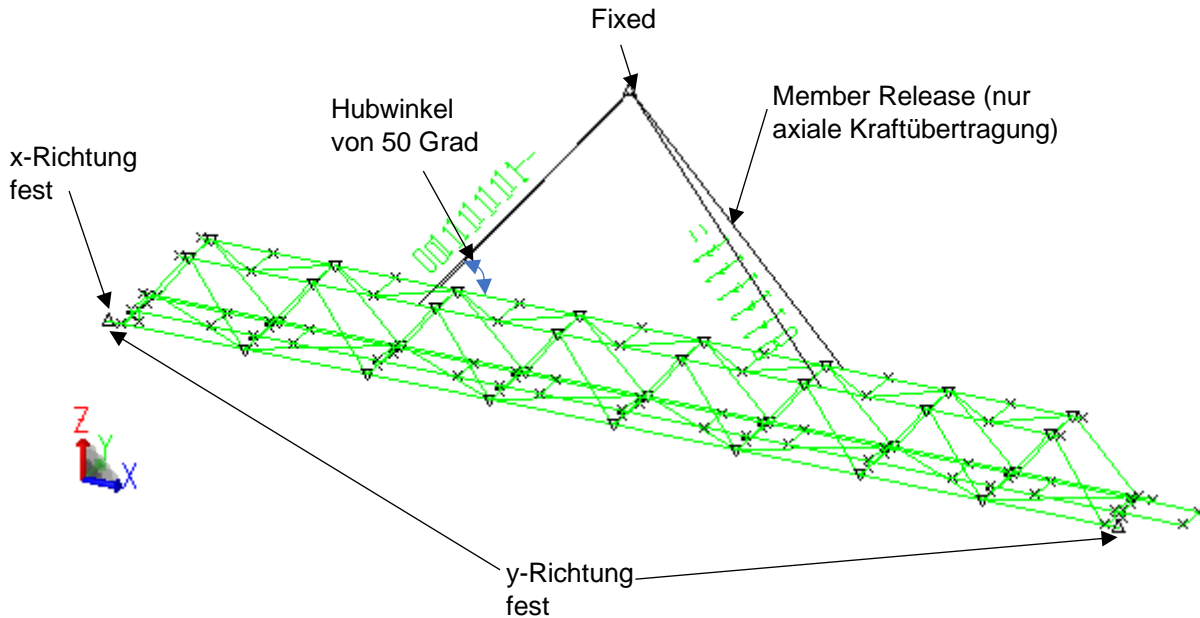


Abbildung 8-17: Hebeanordnung und Randbedingung

Für die numerische Stabilität muss das FE-Modell zusätzlich in x- und y-Richtung gehalten werden (siehe obere Abbildung). Diese Annahme ist akzeptabel, als die Reaktionslasten sehr klein sind.

Der Hubwinkel von 50 Grad ist konservativ fuer die Analyse berücksichtigt.

Der gesamte Lastfaktor,  $f_{\text{Total}}$  ist für die Hebeanalyse gerechnet (wie im Abschnitt 7.3.9).






$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / \text{SHL})^{0,5})$$

$$\text{SHL} = 13,65 \text{ t (von Abschnitt 8.4.2)}$$

$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / 13,65 \text{ t})^{0,5}) = 4,66$$

#### 8.6.6.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,48 für Hebeanalyse.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 49 von 171

### Mem Result: Combined UC

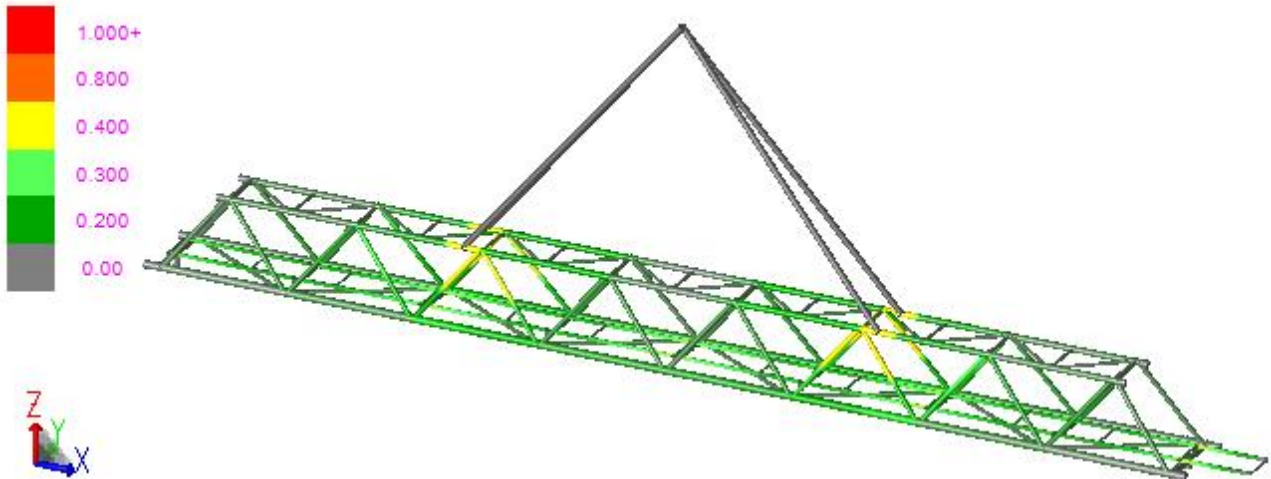


Abbildung 8-18: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 1

### 8.6.6.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,59.

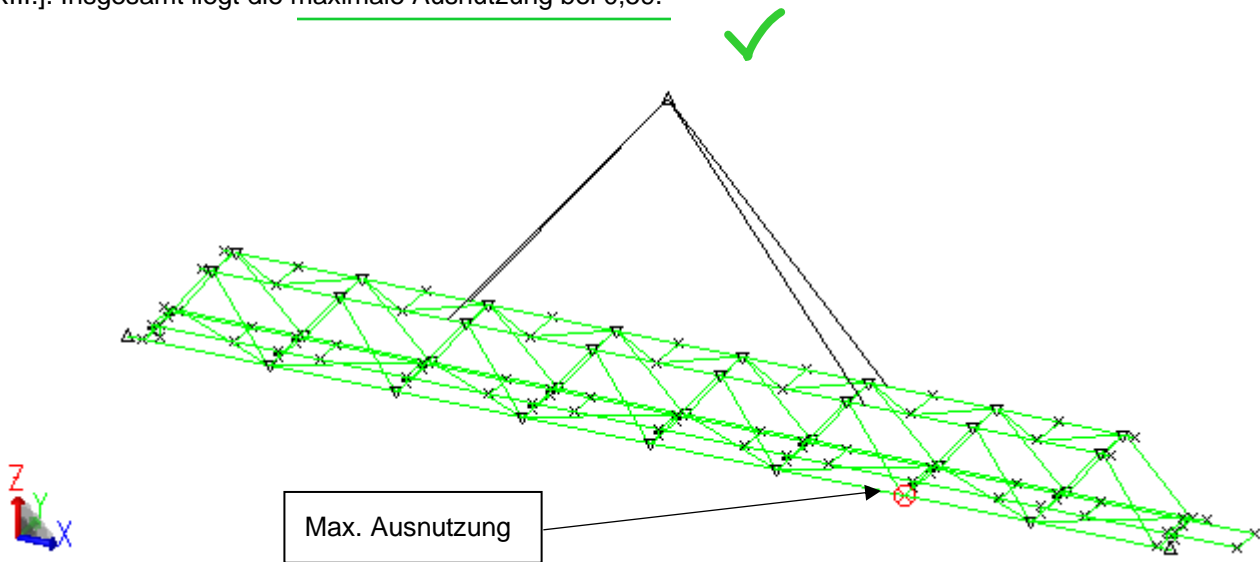







Abbildung 8-19: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 1



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 50 von 171

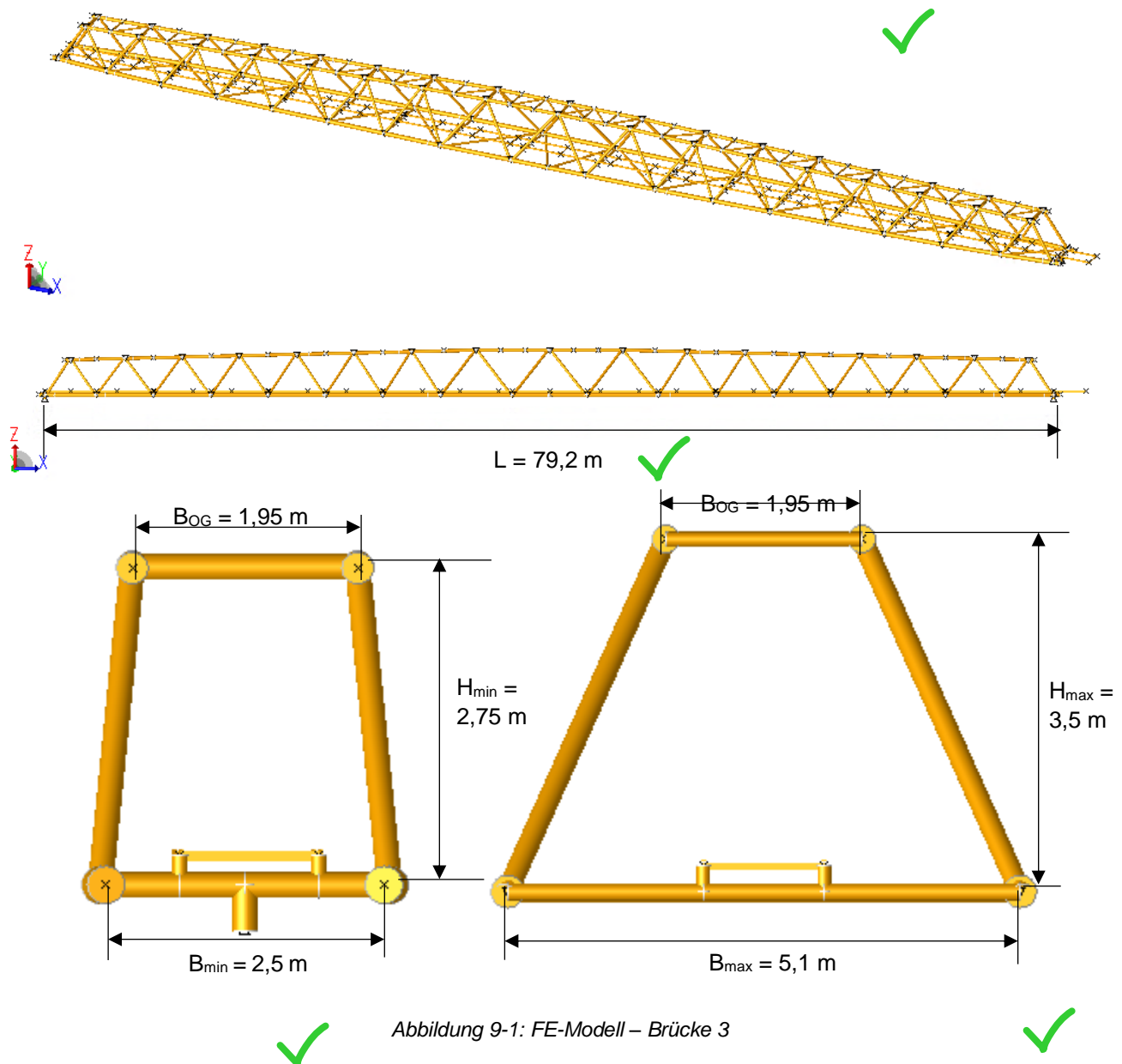
## 9 Nachweis der Brücke 3 – 79,2 m

### 9.1 Allgemein






Die Brücke 3 mit 79,2 m Länge wird mittels SACS 14,1 -FE-Analyse nachgewiesen.

### 9.2 Modellbeschreibung

Das folgende Bild zeigt das FE-Modell der Brücke 7, welches für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS), die VIV-Analyse und die Hebeanalyse verwendet wird.



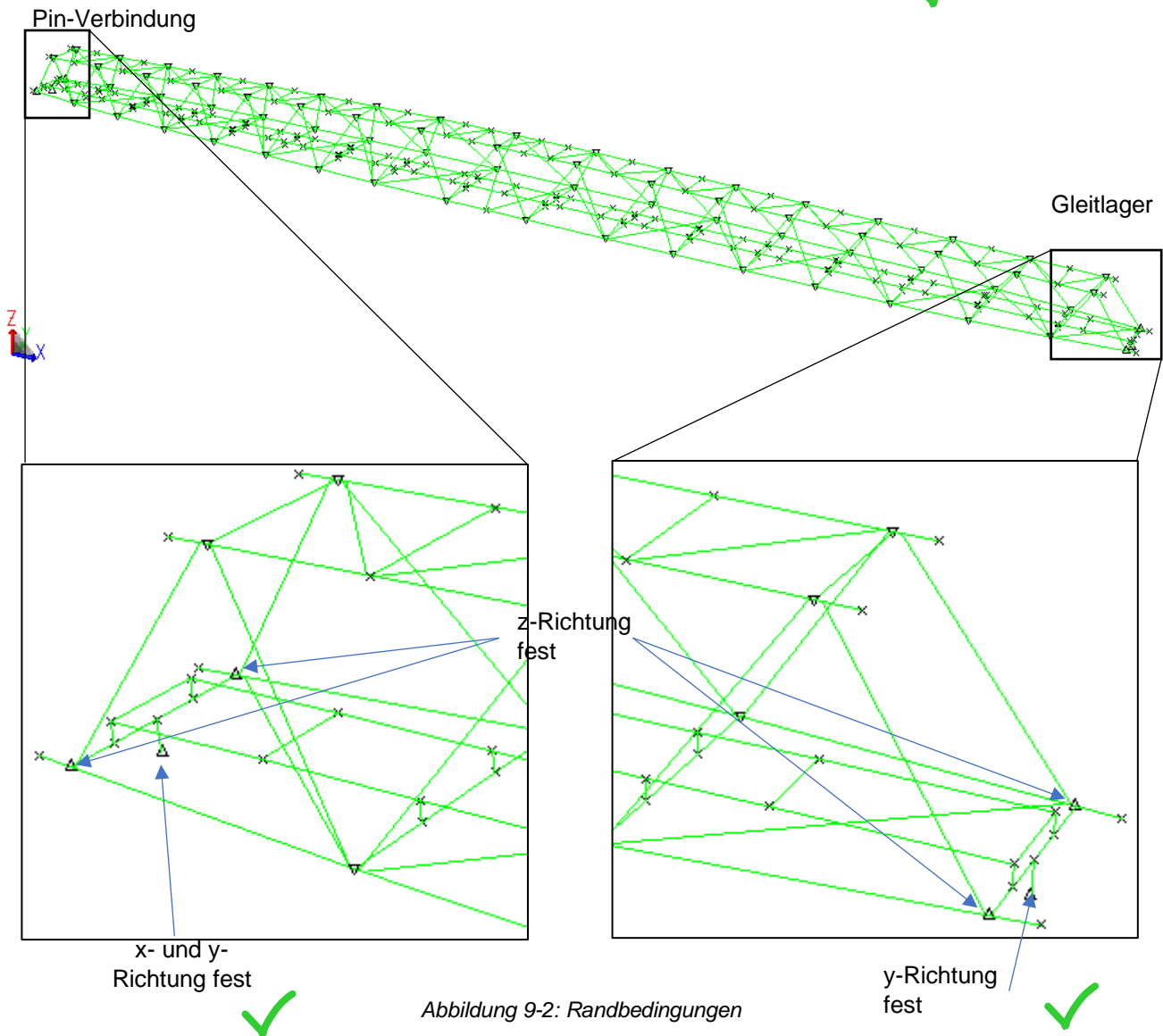


  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 51 von 171

### 9.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf einer Seite mit einer Pin-Verbindung an den Dalben befestigt, siehe linkes Bild in Abbildung 9-2. Auf der anderen Seite (Bild rechts, siehe Abbildung 9-2) ist ein Gleitlager, welches die Brücke in y-Richtung festhält. Dies erlaubt ein Gleiten der Brücke in x-Richtung sowie Rotationen um die y- und z-Achse. Für jede Seite, es gibt 2 vertikale Lager, die die Brücke in z-Richtung festhält.






Für einen besseren Überblick werden die Balken im Folgenden als Linien dargestellt. ✓



### 9.4 Lasten

#### 9.4.1 Allgemein

Die Strukturlasten werden im FE-Modell modelliert, wohingegen die variablen und Umweltlasten als verteilte Lasten auf die Balken-Elemente aufgebracht werden. ✓

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 52 von 171

#### 9.4.2 Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100

Die Strukturlasten inklusive Gitterroste und Handläufe sind wie unten zusammengefasst.

Tabelle 9-1: Strukturlasten für Brücke 3

Item	Gewichte ohne Gewichtsaufschlag [t]
Member elements	43,83
Gitterroste	2,94
Handläufe	2,50
<b>Total</b>	<b>49,27</b>

Die Gewichte der Gitterroste sind konservativ mit  $m_{\text{Gitterroste}} = 30 \text{ kg/m}^2$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückenende mit Gleitlager gerechnet.

$$G_{\text{Gitterroste}} = (m / 1000) * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}}$$

$$L_{\text{Gitterroste}} = 79,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 81,7 \text{ m}$$

$$B_{\text{Gitterroste}} = 1,2 \text{ m}$$

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 81,7 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 2,94 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit  $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückenende mit Gleitlager gerechnet und

$$G_{\text{Handläufe}} = m * 2 * L_{\text{Handläufe}} / g$$

$$L_{\text{Handläufe}} = 79,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 81,7 \text{ m}$$






$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 81,7 \text{ m} / g = 2,50 \text{ t}$$

Die Gewichte von Gitterroste und Handläufe werden auf den Laufsteg aufgebracht.

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 15% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 15% Gewichtsaufschlag wird in den Lastfallkombinationen berücksichtigt (siehe Abschnitt 9.5).

#### 9.4.3 Verkehrslasten – LF LL

Die Verkehrslasten werden als eine gleichmäßig verteilte Streckenlast von  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$  auf den Laufsteg aufgebracht (wie im Abschnitt 6.3.1).

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 53 von 171

Load Condition: LL

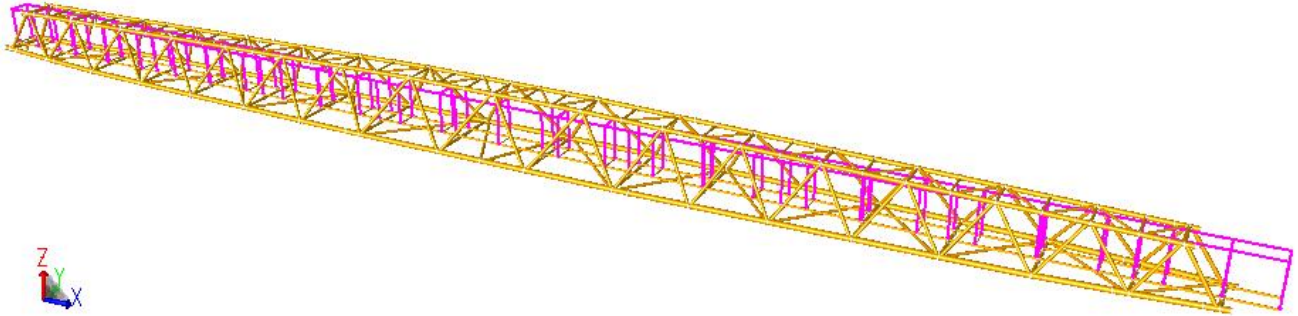


Abbildung 9-3: Verkehrslasten für Brücke 3

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 79,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 81,7 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= 2 \text{ kN/m}^2 * 81,7 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 196,1 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



#### 9.4.4 Windlasten – LF WINX (0 Grad Richtung)

Die Windlast von 0 Grad Richtung (+x-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke und auf den diagonalen Members aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINX

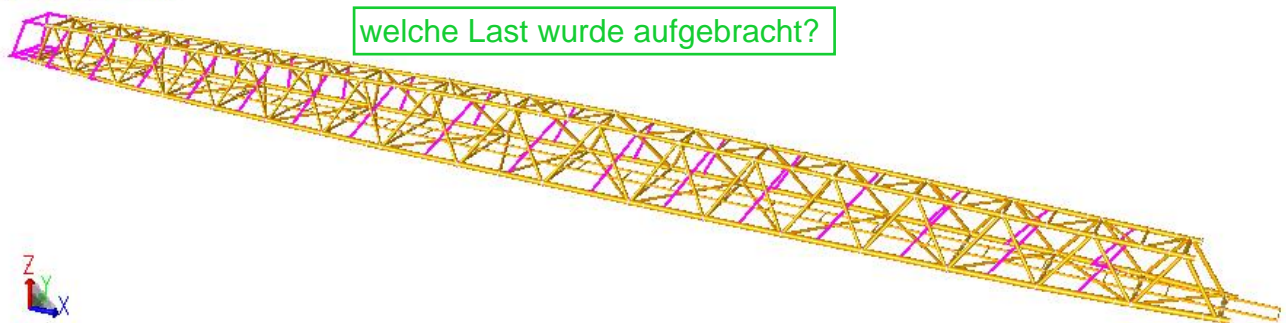







Abbildung 9-4: Windlasten 0 Grad Richtung für Brücke 3

Die gesamte Windlast wird mit der aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wind}} &= w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L \\
 H &= 3,98 \text{ m} \\
 L &= 15,20 \text{ m (konservativer Ansatz)} \\
 F_{\text{wind}} &= 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,98 \text{ m} * 15,20 \text{ m} = 80,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ansatz nicht nachvollziehbar!

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 54 von 171

#### 9.4.5 Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung)

Die Windlast von 90 Grad Richtung (+y-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINY

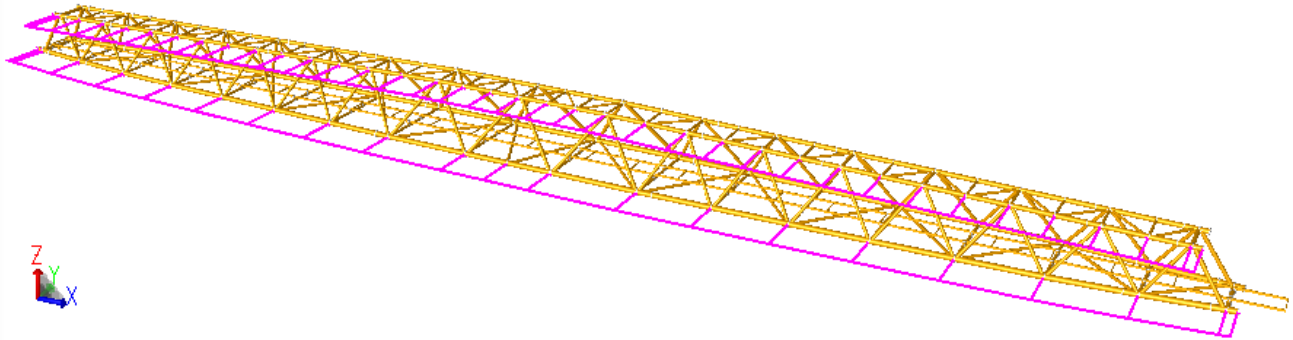


Abbildung 9-5: Windlasten 90 Grad Richtung für Brücke 3

Die gesamte Windlast wird mit dem aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$F_{\text{wind}} = w * A \text{ und Windfläche, } A = H_{\text{mittlere}} * L$$

$$H_{\text{mittlere}} = 3,42 \text{ m}$$

$$L = 79,2 \text{ m}$$

$$F_{\text{wind}} = 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,42 \text{ m} * 79,2 \text{ m} = 360,41 \text{ kN}$$



Die Windlast von 45 Grad Richtung ist mit Lastfallkombinationen (wie im Abschnitt 8.5) kombiniert.

#### 9.4.6 Schneelasten – LF SNOW

Die Schneelast ist auf den oberen Brückenteil sowie auf die Gitterroste aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: SNOW

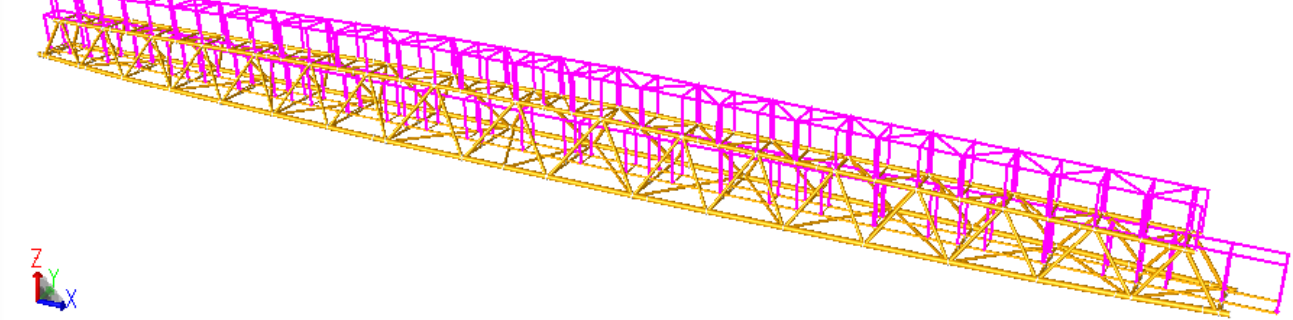


Abbildung 9-6: Schneelasten für Brücke 3

Die Schneelasten wird fuer die obere Brückenteil und die Gitterroste (wie im Abschnitt 6.3.3) gerechnet.

- Für die obere Brückenteil






$$F_{\text{OB}} = s * A_{\text{OB}} \quad \text{und Fläche des oberen Brückenteils, } A_{\text{OB}} = B_{\text{OB}} * L_{\text{OB}}$$

$$B_{\text{OB}} = 1,95 \text{ m}$$

$$L_{\text{OB}} = 76,2 \text{ m}$$

$$F_{\text{OB}} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,95 \text{ m} * 76,2 \text{ m} = 77,27 \text{ kN}$$



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 55 von 171

- Für die Gitterroste

$$F_{GR} = s \cdot A_{GR} \quad \text{und Fläche der Gitterroste, } A_{GR} = B_{GR} \cdot L_{GR}$$

$$B_{GR} = 1,2 \text{ m}$$

$$L_{GR} = 79,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 81,7 \text{ m}$$

$$F_{GR} = 0,52 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 79,2 \text{ m} = 49,42 \text{ kN}$$

#### 9.4.7 Eislasten – LF ICE

Die Eislast wird auf alle Balkenelemente als verteilte Last  $P$  ( $e = 0,005 \text{ kN/m}$  für  $D < 0,3 \text{ m}$  und  $e = 0,01 \text{ kN/m}$  für  $D > 0,3 \text{ m}$ ) aufgebracht unter Berücksichtigung der Rohrdurchmesser  $D$  (wie im Abschnitt 6.3.4). Die gesamte Eislasten von 9,78 kN werden für die Berechnung berücksichtigt.

Load Condition: ICE

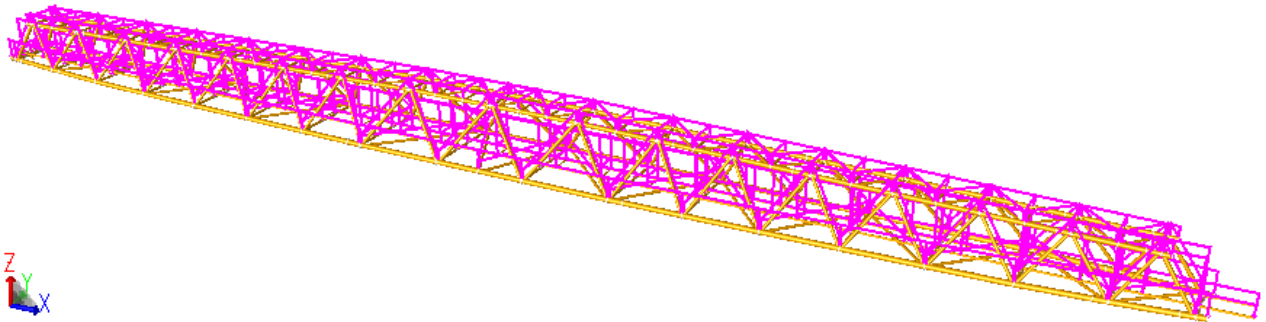


Abbildung 9-7: Eislasten für Brücke 3

#### 9.4.8 Holmlast – LF HOLM

Im Abschnitt 6.3.5, wird eine horizontale Design – Holmlast (inkl. Lastfaktor) von  $H_d = 0,525 \text{ kN/m}$  oben an allen Handläufen angesetzt.

Load Condition: HOLM

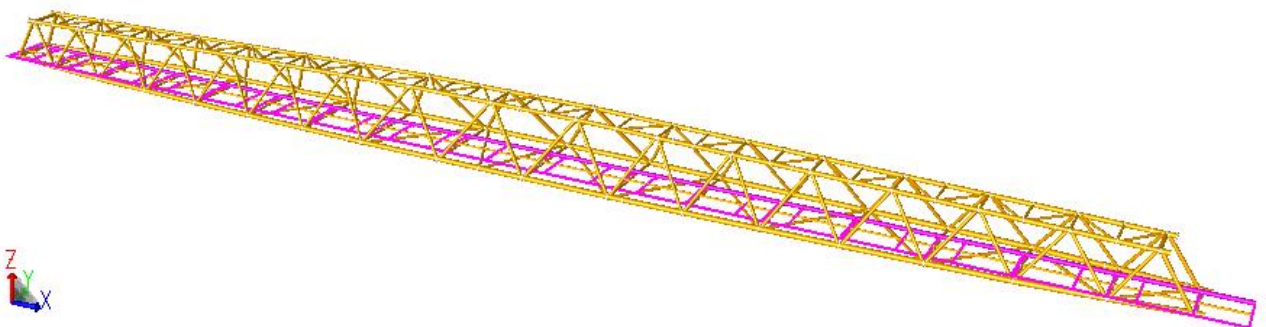







Abbildung 9-8: Holmlasten für Brücke 3

Es wird nur eine horizontale +y-Richtung gecheckt. Darüber werden die Momente inunfolge horizontale Holmlast berücksichtigt, da die Handläufe nicht modelliert sind. Ein Hebelarm von  $h = 1,1 \text{ m}$  betrachtet.

$$M_{HL,-x} = H_d \cdot h = 0,525 \text{ kN/m} \cdot 1,1 \text{ m} = 0,5775 \text{ kNm/m} \text{ (-x Rotations auf der Laufstege)}$$



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 56 von 171

#### 9.4.9 Reibungslasten

Die Reibungslasten am vertikalen Lager werden gemäß Abschnitt 6.3.6 gerechnet. Die Normalkraft wird konservativ von dem maximalen erzeugten Vertikalkraft genommen.

Die maximale erzeugte Vertikalkraft ist 500 kN wie im Abschnitt 9.6.3. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 500 \text{ kN} = 150 \text{ kN}$$

Die Reibungslasten werden auf 3 verschiedene Arten überprüft:

- Reibungslast am Lager 2 x Zug (LF ZUG)
- Reibungslast am Lager 2 x Druck (LF DRUCK)
- Reibungslast am Lager 1 x Druck und 1 x Zug (LF ABWE)

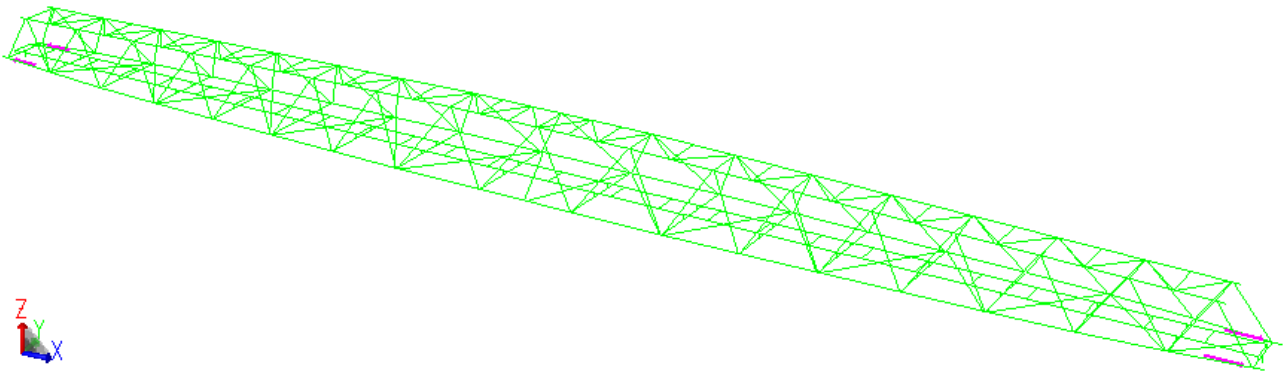


Abbildung 9-9: Reibungslasten (Zug) für Brücke 3

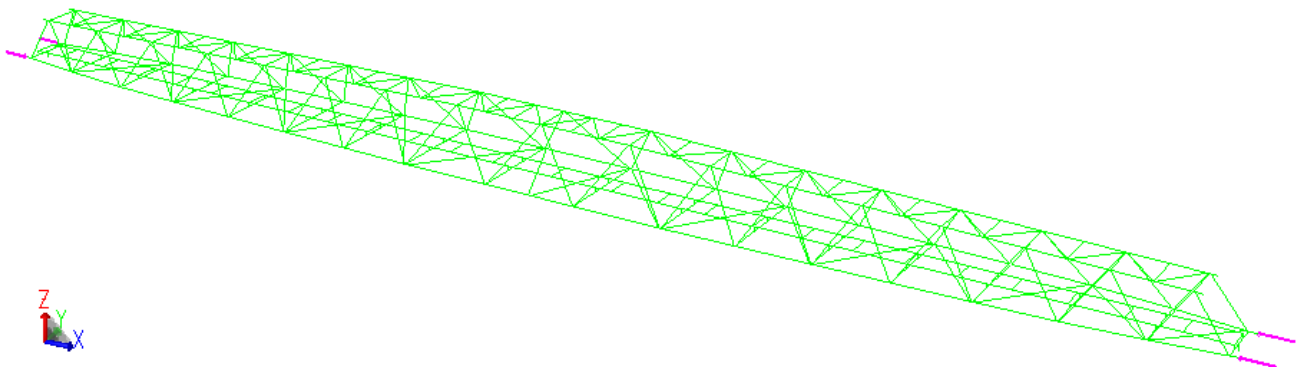







Abbildung 9-10: Reibungslasten (Druck) für Brücke 3



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 57 von 171

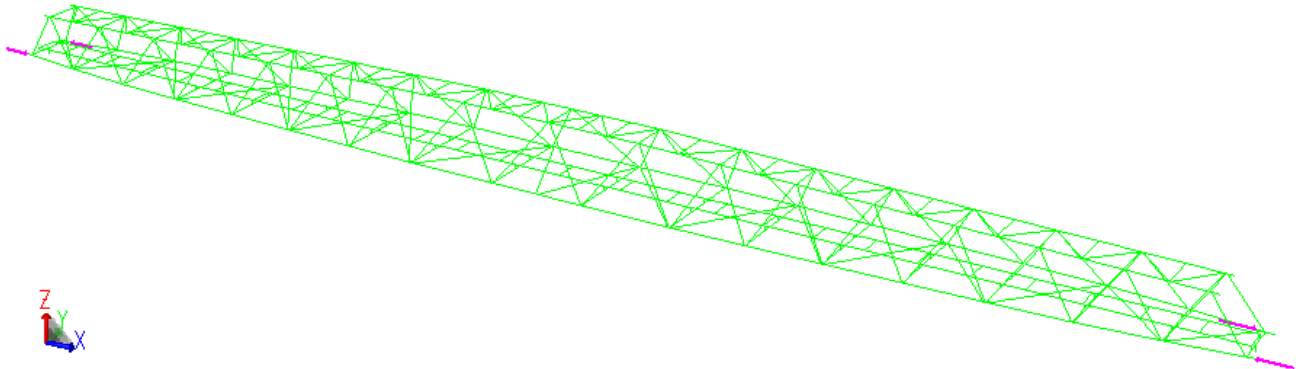


Abbildung 9-11: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 3

### 9.5 Lastfallkombinationen

Die Lastfallkombinationen (LCOMs) sind im Abschnitt 8.5 zusammengefasst. ✓

### 9.6 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapitel sind alle Ergebnisse für Brücke 3 gezeigt.

#### 9.6.1 Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

##### 9.6.1.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,86 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

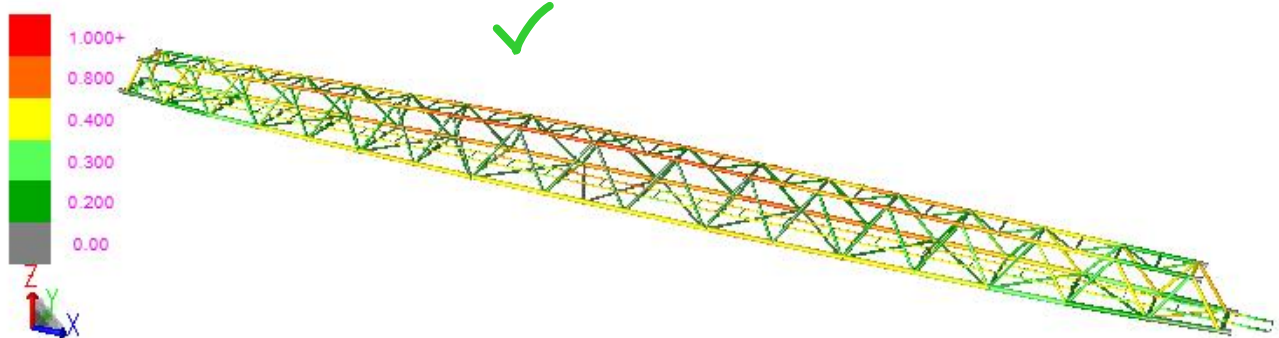





Abbildung 9-12: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 3

##### 9.6.1.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,78 während In-place Zustand.



	Struktur	
		
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 58 von 171

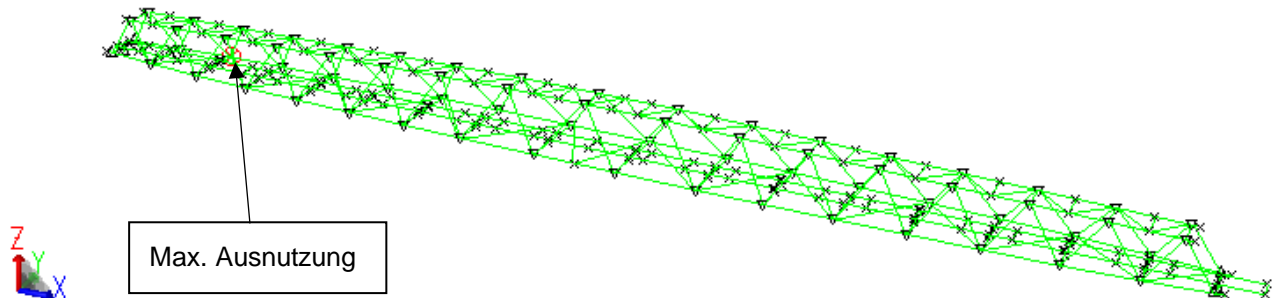


Abbildung 9-13: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 3

### 9.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 607 auf und resultiert zu -278 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als  $L/200 = 396$  mm (siehe Abschnitt 7.3.6). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

Defl. Shape LC 607

Max View Defl. at 1074

DX: 2.023

DY: 6.651

DZ: -27.813

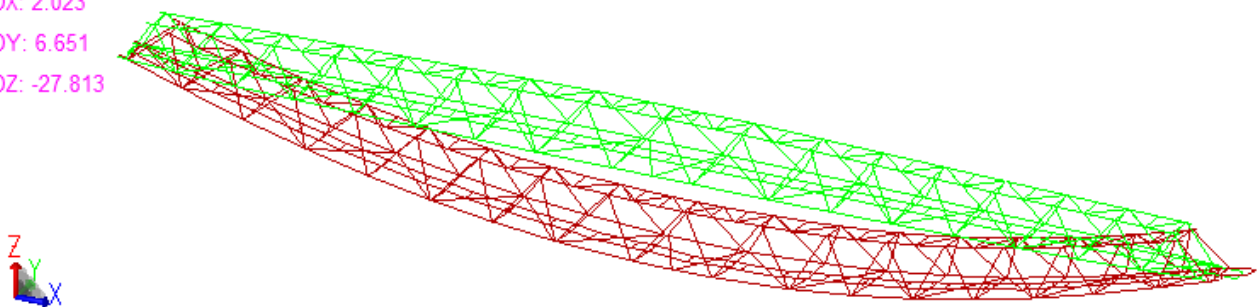


Abbildung 9-14: Verformungsergebnisse – Brücke 3



### 9.6.3 Design-Reaktionslasten an den Brückenlager

Die ausgelesenen Reaktionslager, welche zur Dimensionierung der Brückenlager benötigt werden, sind in der folgenden Tabelle gegeben. Dabei handelt es sich um das absolute Maximum über alle betrachteten Brücken und Lastkombinationen.

Tabelle 9-2: Brückenlager Lasten – Brücke 3

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb), $V_{\max,1}$	500
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb) am anderen Lager auf gleiches Brückenende, $V_{\max,2}$	290
Horizontal (quer)	320
Horizontal (längs)	<del>133</del> <b>220</b>



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 59 von 171

#### 9.6.4 Eigenfrequenzen der Brücke

Die Eigenfrequenzen der Brücke 3 sind in der folgenden Tabelle gegeben. Beide Gewichte ohne und mit Gewichtsaufschlag sind überprüft.

Tabelle 9-3: Eigenfrequenzen – Brücke 3

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 15% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Vertikal	1,48 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,55!</span>	1,38 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,45</span>
Mode 2: Horizontal	1,64 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,69</span>	1,53 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">1,58</span>

\*)

Die Eigenfrequenzen der Brücke 3 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.3.7).

#### 9.6.5 Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)

Die schlanke Brückenelemente werden gegen das Auftreten wirbelinduzierter Vibrationen, die durch windinduzierte Wirbelablösungen entstehen können, geprüft. Strukturen, die windinduzierten Vibrationen ausgesetzt sind, haben ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden.





Tabelle 9-4: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigenfrequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeitsfaktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwindigkeit, $v_m$ [m/s]	kritische Windgeschwindigkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	$1,25 \cdot v_m$ [m/s]
Horizontale Primärstruktur Boden	0,3239	12,0	31,54 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">~40</span>	1,294	38,82	56,8	48,53
Diagonalen	0,2191	13,9	43,59	1,317	39,51	53,1	49,39

Diese werden in der aktuellen Designphase nicht als kritisch angesehen.

Die Eigenfrequenzen der Horizontale Primärstruktur Boden und der Diagonalen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.

\*) In Vergleichsberechnungen wurden geringfügig höhere Eigenfrequenzen ermittelt. Nach Einhub der Überbauten wird empfohlen, die ermittelten Eigenfrequenzen zu überprüfen und ggf. Dämpfungsmaßnahmen vorzusehen.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 60 von 171

Mode 6 Freq. 31.543 Hz Period 0.032 secs

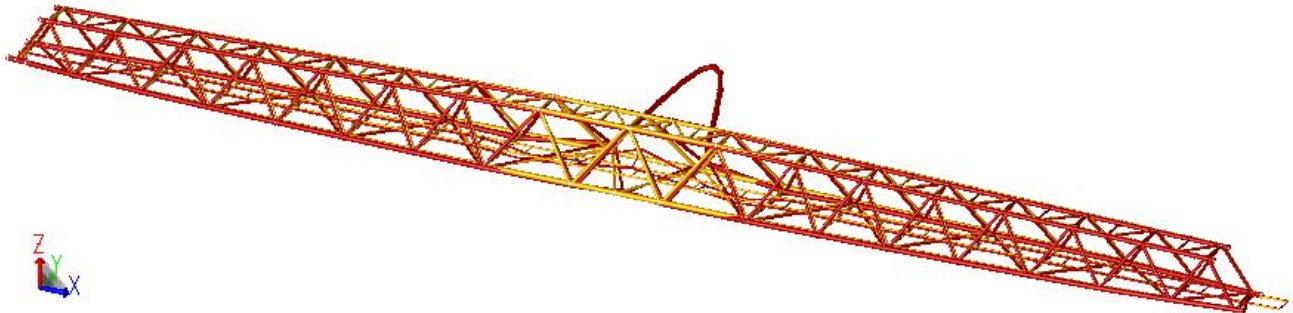


Abbildung 9-15: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden



Mode 6 Freq. 43.592 Hz Period 0.023 secs

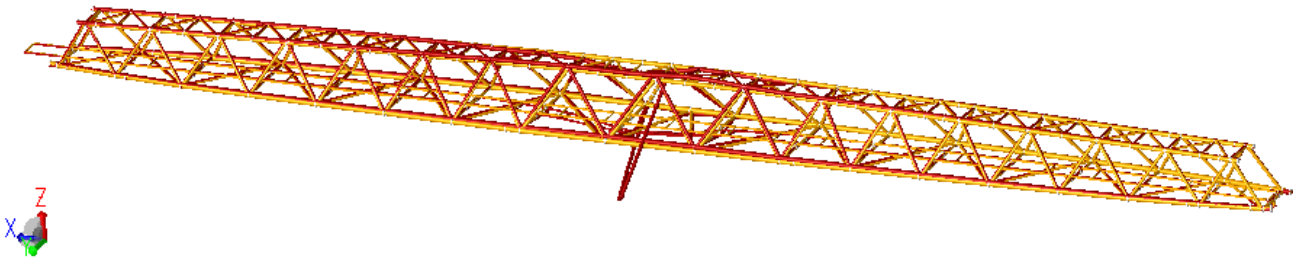







Abbildung 9-16: Kritische Eigenfrequenz Diagonale



#### 9.6.6 Hebeanalyse

Im folgenden Abschnitt wird die Hebeanalyse für die Brücken durchgeführt. Eine detaillierte Auslegung der Hebepunkte ist im Kapitel 14 beschrieben. Das grobe Aussehen der Hebeanordnung sowie das Vorgehen zur Berechnung sind im Folgenden beschrieben.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 61 von 171

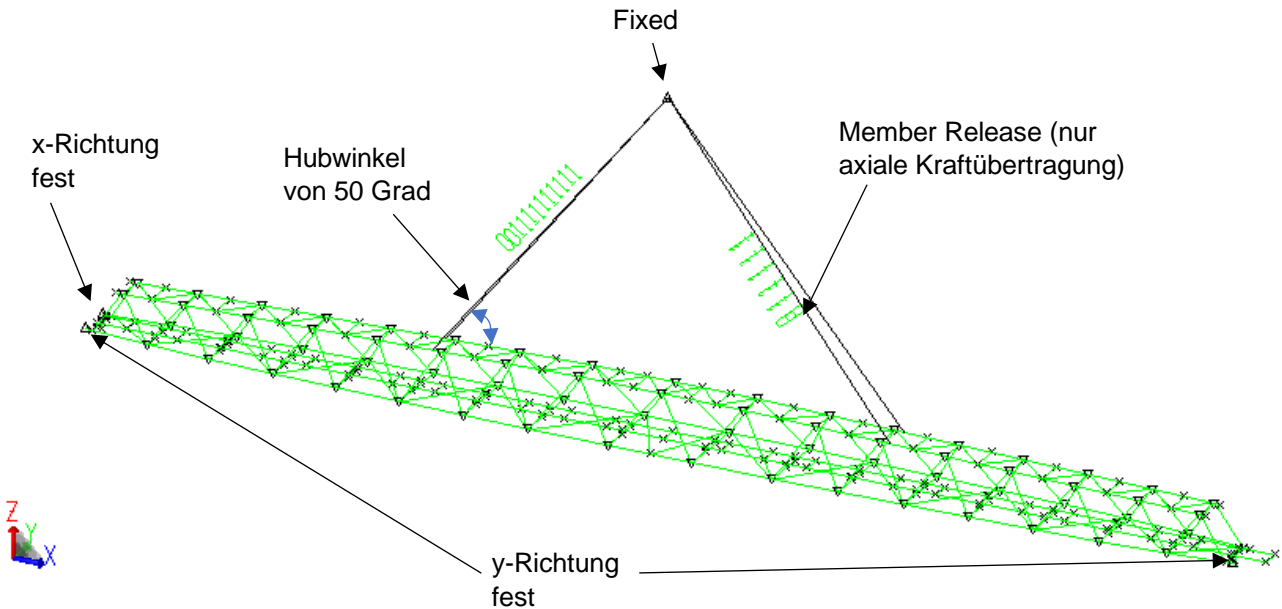


Abbildung 9-17: Hebeanordnung und Randbedingung

Für die numerische Stabilität muss das FE-Modell zusätzlich in x- und y-Richtung gehalten werden (siehe obere Abbildung). Diese Annahme ist akzeptabel, als die Reaktionslasten sehr klein sind.

Der Hubwinkel von 50 Grad ist konservativ fuer die Analyse berücksichtigt.

Der gesamte Lastfaktor,  $f_{\text{Total}}$  ist für die Hebeanalyse gerechnet (wie im Abschnitt 7.3.9).





$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / \text{SHL})^{0,5})$$

$$\text{SHL} = 49,27 \text{ t (von Abschnitt 9.4.2)}$$

$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / 49,27 \text{ t})^{0,5}) = 3,76$$

#### 9.6.6.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,65 für Hebeanalyse.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 62 von 171

Mem Result: Combined UC

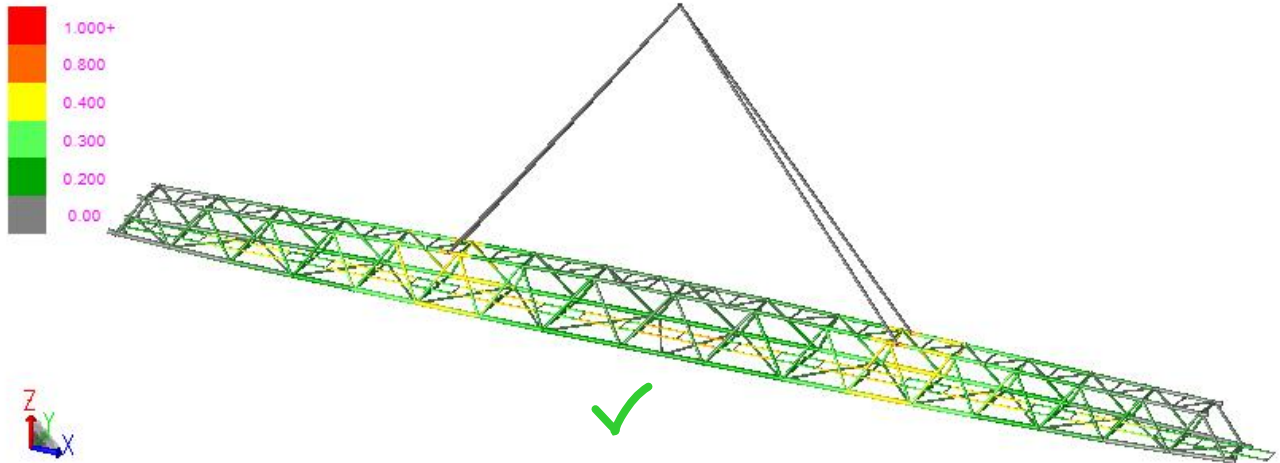


Abbildung 9-18: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 3

#### 9.6.6.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,63.

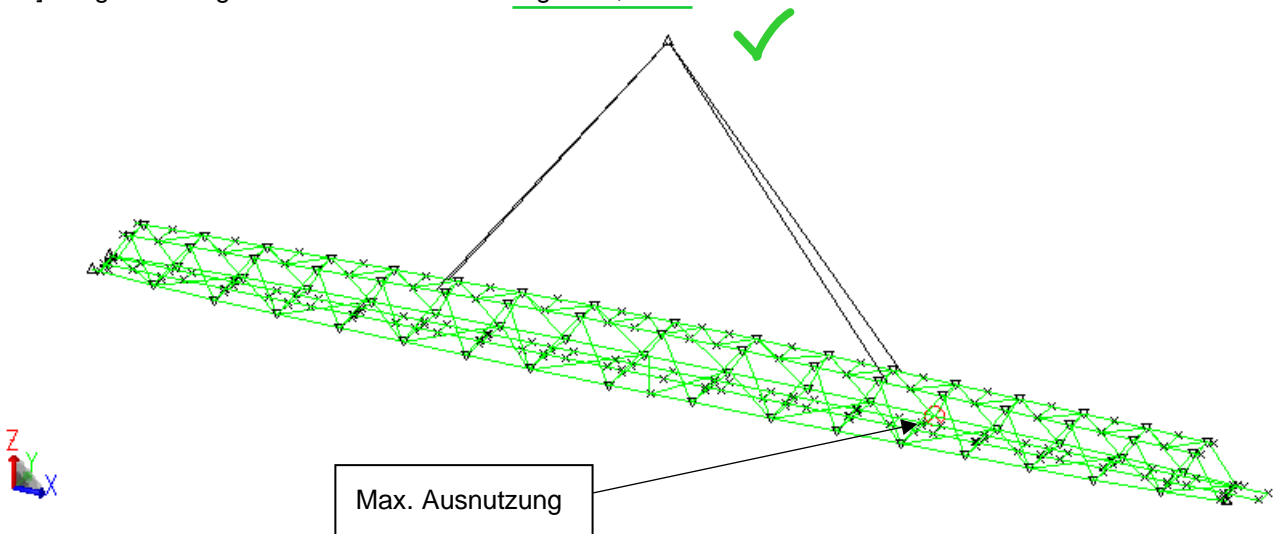







Abbildung 9-19: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 3

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 63 von 171

## 10 Nachweis der Brücke 4 – 32,2 m

### 10.1 Allgemein

Die Brücke 4 mit 32,2 m Länge wird mittels SACS 14,1 -FE-Analyse nachgewiesen.

### 10.2 Modellbeschreibung

Das folgende Bild zeigt das FE-Modell der Brücke 4, welches für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS), die VIV-Analyse und die Hebeanalyse verwendet wird.

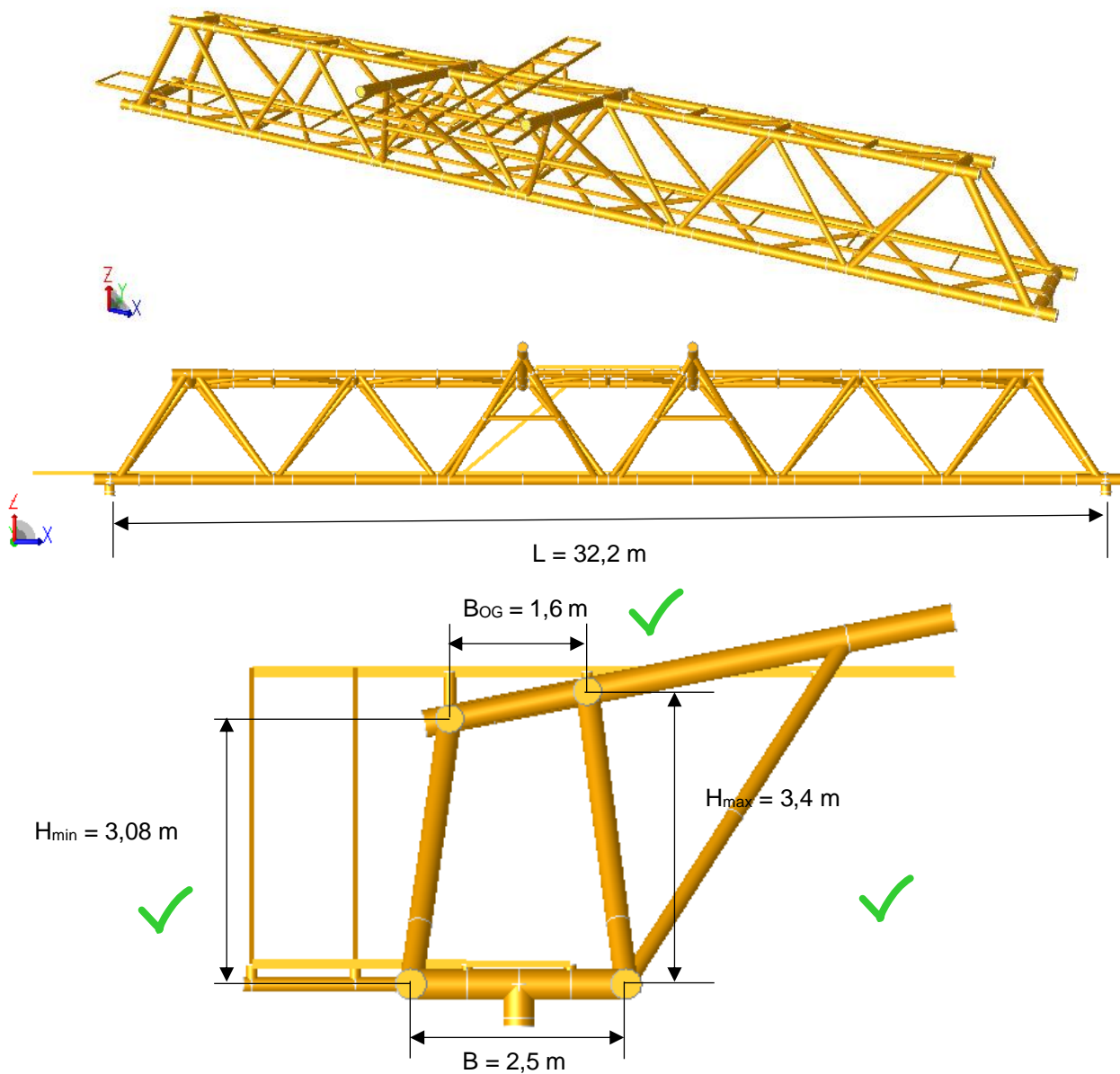







Abbildung 10-1: FE-Modell – Brücke 4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 64 von 171

### 10.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf der einen Seite mit einer Pin-Verbindung an den Dalben befestigt, siehe rechtes Bild in Abbildung 10-2. Auf der anderen Seite (Bild links, siehe Abbildung 10-2) ist ein Gleitlager, welches die Brücke in y-Richtung festhält. Dies erlaubt ein Gleiten der Brücke in x-Richtung sowie Rotationen um die y- und z-Achse. Für jede Seite, es gibt 3 vertikale Lager, die die Brücke in z-Richtung (2 Lager im Druck und 1 Lager im Zug) festhält.

Für einen besseren Überblick werden die Balken im Folgenden als Linien dargestellt.

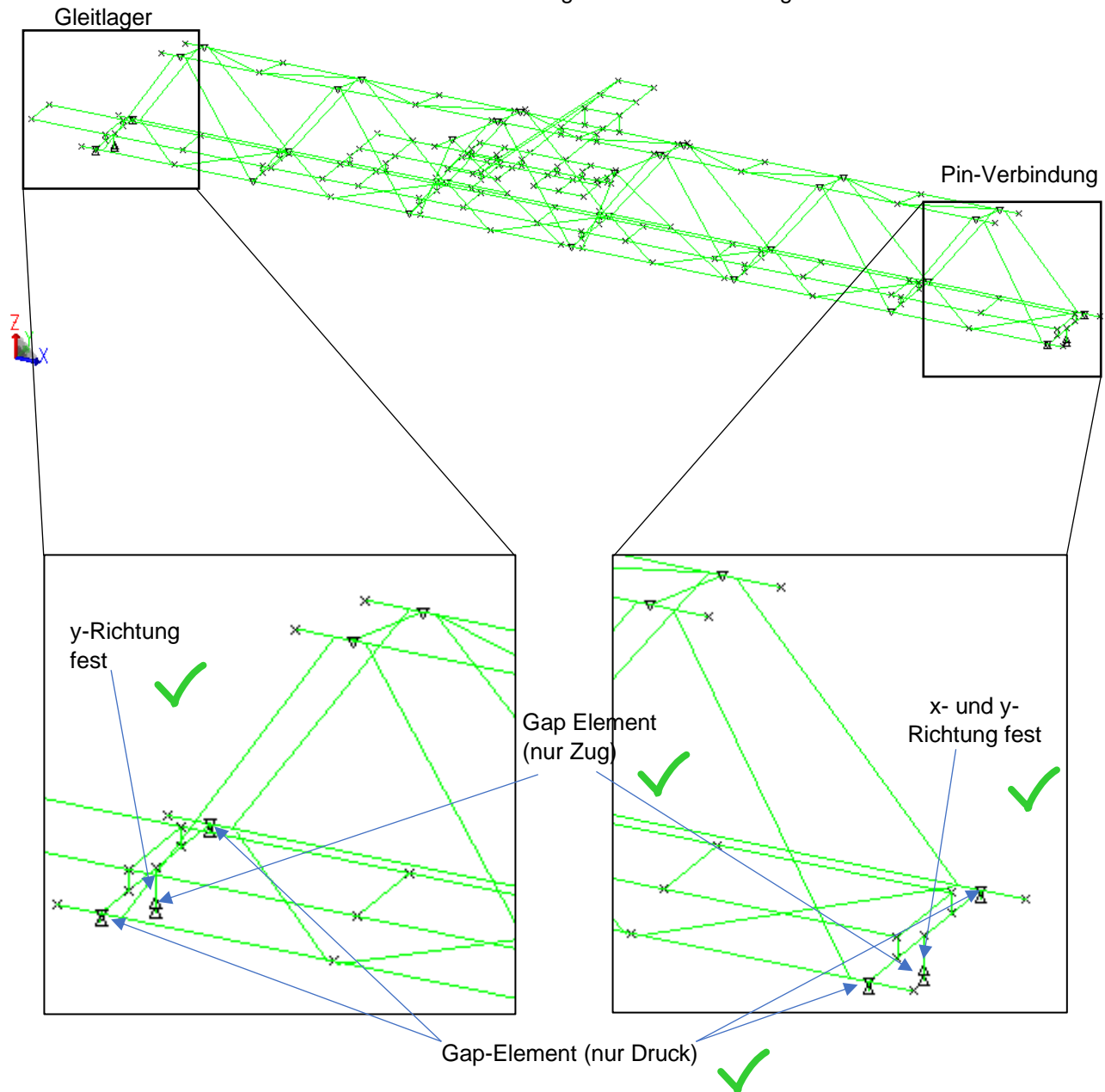




Abbildung 10-2: Randbedingungen



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 65 von 171

## 10.4 Lasten

### 10.4.1 Allgemein

Die Strukturlasten werden im FE-Modell modelliert, wohingegen die variablen und Umweltlasten als verteilte Lasten auf die Balken-Elemente aufgebracht werden.

### 10.4.2 Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100

Die Strukturlasten inklusive Gitterroste und Handläufe sind wie unten zusammengefasst.

Tabelle 10-1: Strukturlasten für Brücke 4

Item	Gewichte ohne Gewichtsaufschlag [ t ]
Member elements	26,63
Gitterroste (unterer Teil)	1,25
Handläufe (unterer Teil)	1,06
Gitterroste (fuer Access Platform)	0,67
Handläufe (fuer Access Platform)	0,73
Treppen (fuer Access Platform)	0,14
<b>Total</b>	<b>30,48</b>

Die Gewichte der Gitterroste sind konservativ mit  $m_{\text{Gitterroste}} = 30 \text{ kg/m}^2$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückendenende mit Gleitlager gerechnet.

$$G_{\text{Gitterroste}} = (m / 1000) * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}}$$

$$L_{\text{Gitterroste}} = 32,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 34,7 \text{ m}$$

$$B_{\text{Gitterroste}} = 1,2 \text{ m}$$

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 34,7 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 1,25 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit  $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückendenende mit Gleitlager gerechnet.

$$G_{\text{Handläufe}} = m * 2 * L_{\text{Handläufe}} / g$$

$$L_{\text{Handläufe}} = 32,2 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 34,7 \text{ m}$$



$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 34,7 \text{ m} / g = 1,06 \text{ t}$$

Die Gewichte der Gitterroste für das Access Platform sind konservativ mit  $m_{\text{Gitterroste}} = 30 \text{ kg/m}^2$  gerechnet.

$$G_{\text{Gitterroste}} = (m / 1000) * A_{\text{AccessPlatf}}$$

$$A_{\text{AccessPlatf}} = 22,43 \text{ m}^2 \text{ (konservativer Ansatz)}$$

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 22,43 \text{ m}^2 = 0,67 \text{ t}$$

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 66 von 171

Die Gewichte der Handläufe für das Access Platform sind konservativ mit  $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$  gerechnet.

$$G_{\text{Handläufe}} = m * 2 * L_{\text{Handläufe}} / g$$

$$L_{\text{Handläufe}} = 47,57 \text{ m (konservativer Ansatz)}$$

$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 47,57 \text{ m} / g$$

$$= 0,73 \text{ t}$$

Die Gewichte der Gitterroste und Handläufe werden auf den Laufsteg aufgebracht.

Die Gewichte der Treppen für das Access Platform sind konservativ mit  $m_{\text{Stufe}} = 8 \text{ kg/Stufe}$  gerechnet.

$$G_{\text{Treppen}} = m / 1000 * n_{\text{Stufen}}$$

$$n_{\text{Stufen}} = 18 \text{ (konservativer Ansatz)}$$

$$G_{\text{Handläufe}} = 8 \text{ kg/Stufe} / 1000 * 18$$

$$= 0,14 \text{ t}$$

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 15% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 15% Gewichtsaufschlag wird in den Lastfallkombinationen berücksichtigt (siehe Abschnitt 8.5).

#### 10.4.3 Verkehrslasten – LF LL

Die Verkehrslasten werden als eine gleichmäßig verteilte Streckenlast von  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$  auf den Laufsteg aufgebracht (wie im Abschnitt 6.3.1).

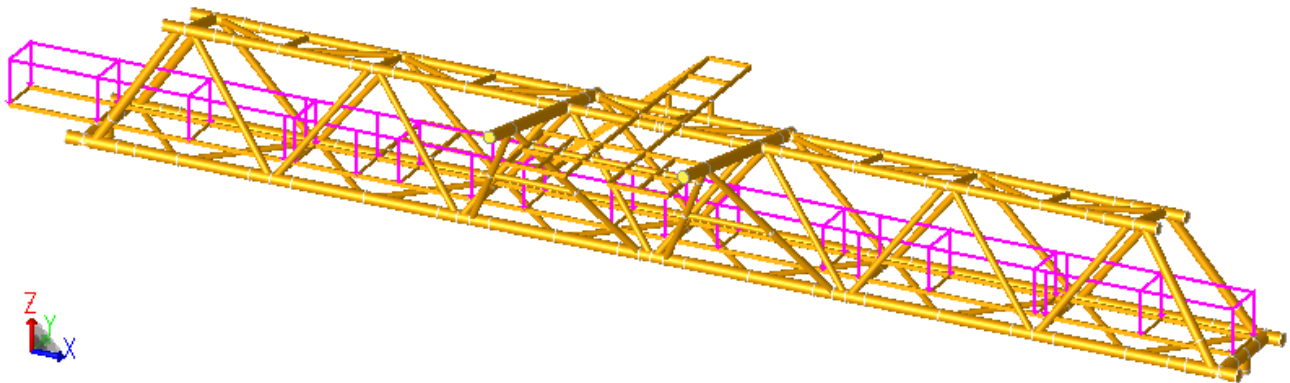


Abbildung 10-3: Verkehrslasten für Brücke 4

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

$$G_{\text{Gitterroste}} = q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}}$$

$$L_{\text{Gitterroste}} = 32,2 \text{ m} + 2,5 = 34,7 \text{ m}$$






$$B_{\text{Gitterroste}} = 1,2 \text{ m}$$

$$G_{\text{Gitterroste}} = 2 \text{ kN/m}^2 * 34,7 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 83,28 \text{ kN}$$

#### 10.4.4 Windlasten – LF WINX (o Grad Richtung)

Die Windlast von 0 Grad Richtung (+x-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke und auf den Members von Riser Hangs-Off Strukturen aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

welche Last wurde aufgebracht?

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 67 von 171

Load Condition: WINX

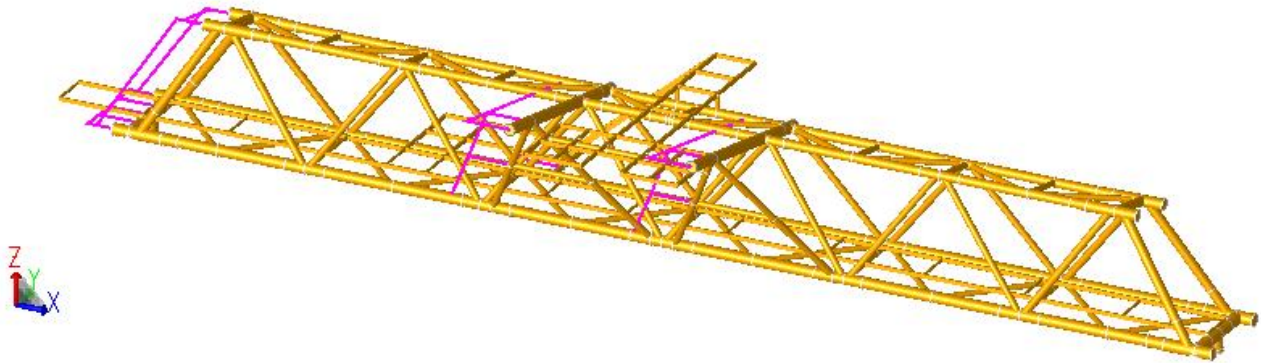


Abbildung 10-4: Windlasten 0 Grad Richtung für Brücke 4

Die gesamte Windlast wird mit der aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$F_{\text{wind}} = w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L$$

$$H = 3,83 \text{ m}$$

$$L = 8,15 \text{ m (konservativer Ansatz)}$$

Ansatz nicht nachvollziehbar!

$$F_{\text{wind}} = 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,83 \text{ m} * 8,15 \text{ m} = 41,45 \text{ kN}$$

#### 10.4.5 Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung)

Die Windlast ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINY

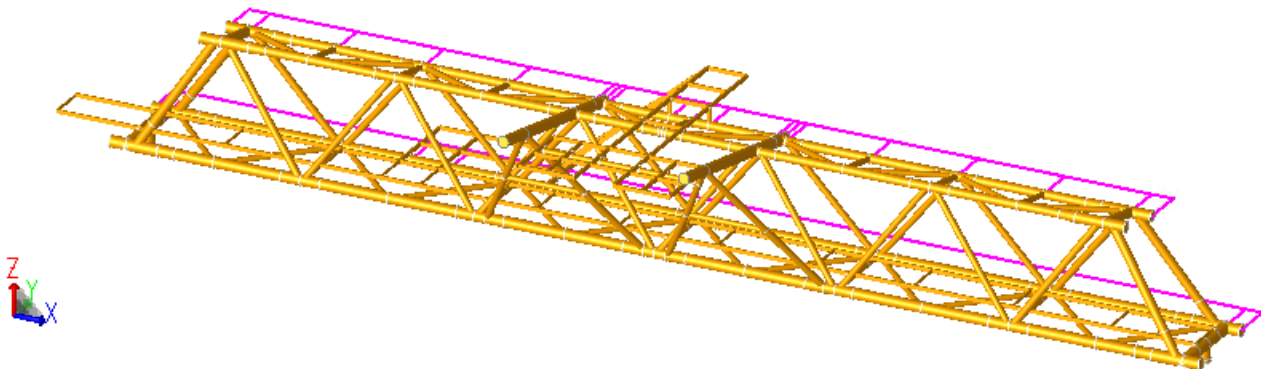


Abbildung 10-5: Windlasten 90 Grad Richtung für Brücke 4

Die gesamte Windlast wird mit dem aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$F_{\text{wind}} = w * A \text{ und Windfläche, } A = H_{\text{mitt}} * L$$





$$H_{\text{mitt}} = 3,70 \text{ m}$$

$$L = 32,2 \text{ m}$$

$$F_{\text{wind}} = 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,7 \text{ m} * 32,2 \text{ m} = 158,3 \text{ kN}$$



Die Windlast von 45 Grad Richtung ist mit Lastfallkombinationen (wie im Abschnitt 8.5) kombiniert.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 68 von 171

#### 10.4.6 Schneelasten – LF SNOW

Die Schneelast ist auf den oberen Brückenteil sowie auf die Gitterroste aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: SNOW

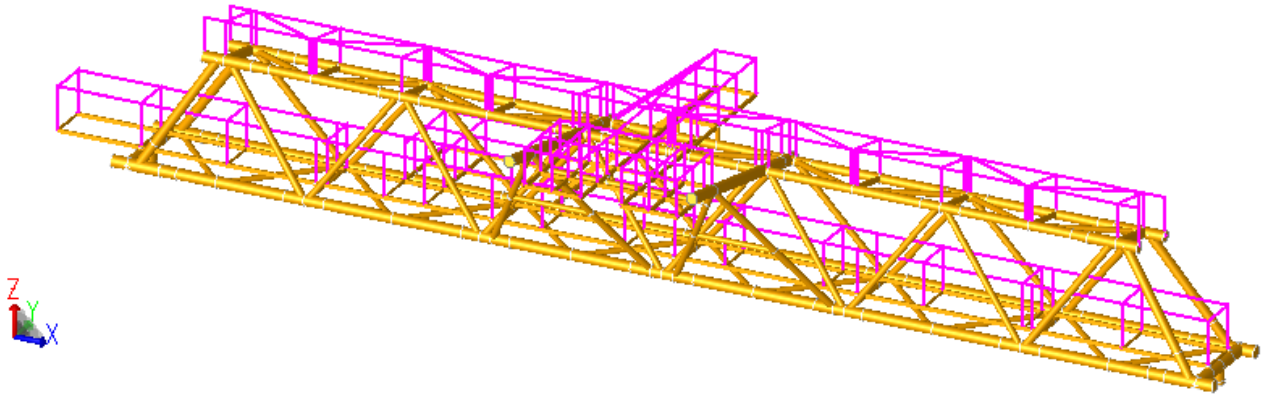


Abbildung 10-6: Schneelasten für Brücke 4

Die Schneelasten wird fuer die obere Brückenteil und die Gitterroste (wie im Abschnitt 6.3.3) gerechnet.

- Für die obere Brückenteil

$$F_{OB} = s \cdot A_{OB} \quad \text{und Fläche des oberen Brückenteils, } A_{OB} = B_{OB} \cdot L_{OB}$$

$$B_{OB} = 1,6 \text{ m}$$

$$L_{OB} = 32,2 \text{ m}$$

$$F_{schnee1} = 0,52 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,6 \text{ m} \cdot 32,2 \text{ m} = 23,05 \text{ kN}$$



- Für die Gitterroste

$$F_{GR} = s \cdot A_{GR} \quad \text{und Fläche der Gitterroste, } A_{GR} = B_{GR} \cdot L_{GR}$$

$$B_{GR} = 1,2 \text{ m}$$

$$L_{GR} = 32,2 \text{ m}$$

$$F_{schnee2} = 0,52 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 32,2 \text{ m} = 20,09 \text{ kN}$$



- Für das Access Plaform

$$F_{GR} = s \cdot A_{AP}$$

$$A_{AP} = 27,29 \text{ m}^2$$





$$F_{schnee3} = 0,52 \text{ kN/m}^2 \cdot 27,29 \text{ m}^2 = 14,19 \text{ kN}$$



#### 10.4.7 Eislasten – LF ICE

Die Eislast wird auf alle Balkenelemente als verteilte Last P (e = 0,005 kN/m für D < 0,3 m und e = 0,01 kN/m für D > 0,3 m) aufgebracht unter Berücksichtigung der Rohrdurchmesser D (wie im Abschnitt 6.3.4). Die gesamte Eislasten von 5,29 kN werden in der Berechnung berücksichtigt.



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 69 von 171

Load Condition: ICE

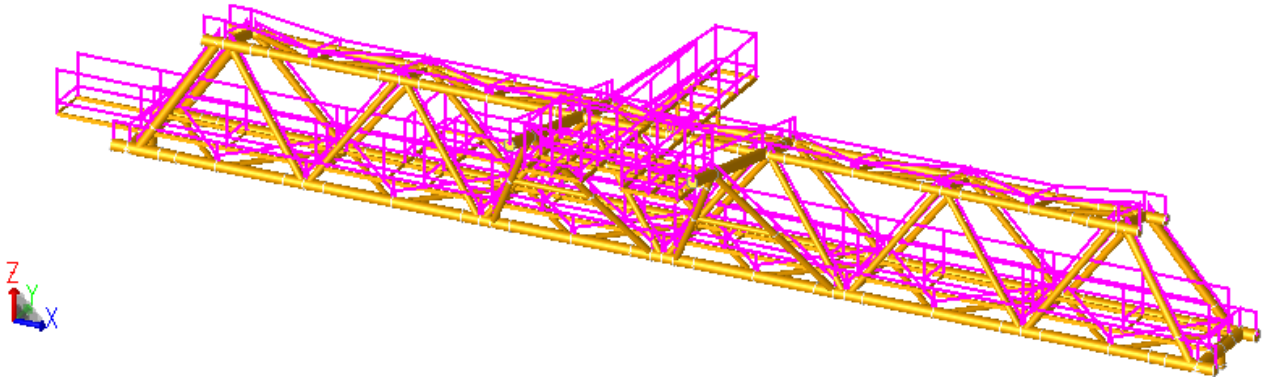


Abbildung 10-7: Eislasten für Brücke 4

#### 10.4.8 Holmlast – LF HOLM

Im Abschnitt 6.3.5, wird eine horizontale Design – Holmlast (inkl. Lastfaktor) von  $H_d = 0,525 \text{ kN/m}$  oben an allen Handläufen angesetzt.

Load Condition: HOLM

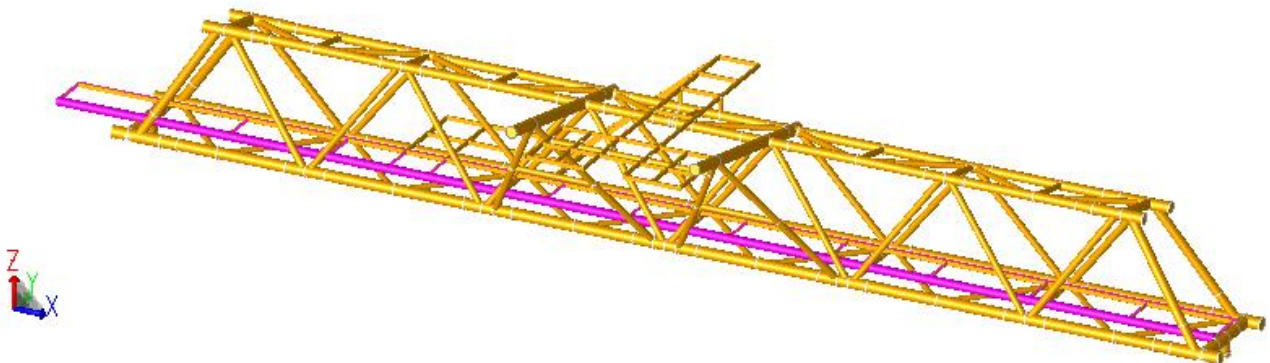


Abbildung 10-8: Holmlasten für Brücke 4

Es wird nur eine horizontale -y-Richtung gecheckt. Darüber werden die Momente infolge Holmlast berücksichtigt, da die Handläufe nicht modelliert sind. Ein Hebelarm  $on H = 1,1 \text{ m}$  ist konservativ geschätzt.

$$M_{HL,+x} = H_d * h = 0,525 \text{ kN/m} * 1,1 \text{ m} = 0,5775 \text{ kNm/m (+x Rotationsauf der Laufstege)} \quad \checkmark$$






#### 10.4.9 Reibungslasten

Die Reibungslasten am vertikalen Lager werden gemäß Abschnitt 6.3.6 gerechnet. Die Normalkraft wird konservativ von dem maximalen erzeugten Vertikalkraft genommen.

Die maximale erzeugte Vertikalkraft ist  $1.523 \text{ kN}$  wie im Abschnitt 8.6.3.. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 1,523 \text{ kN} = 457 \text{ kN} \quad \checkmark$$



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 70 von 171

Die Reibungslasten werden auf 2 verschiedene Arten überprüft:

- Reibungslast am Lager - Zug (LF ZUG)
- Reibungslast am Lager - Druck (LF DRUCK)

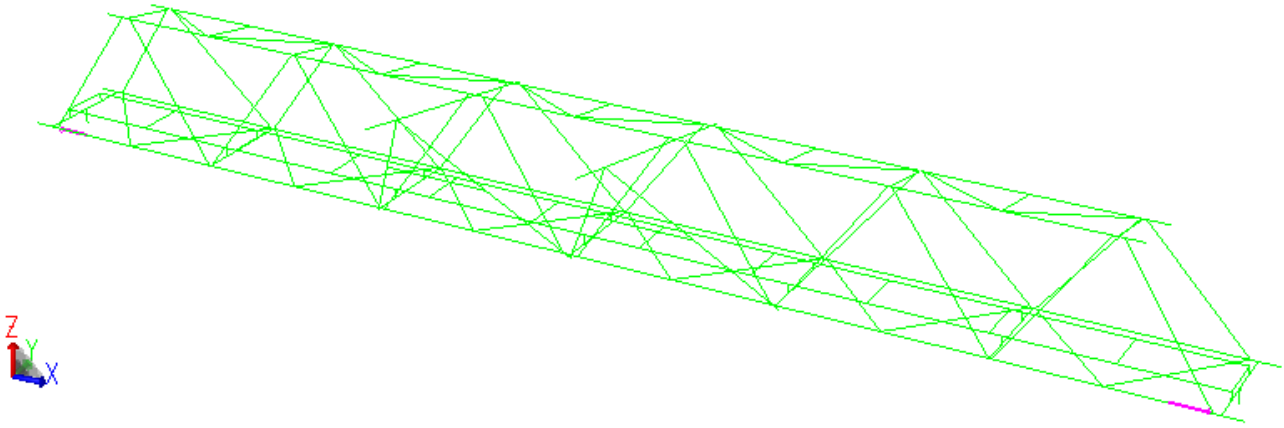


Abbildung 10-9: Reibungslasten (Zug) für Brücke 4

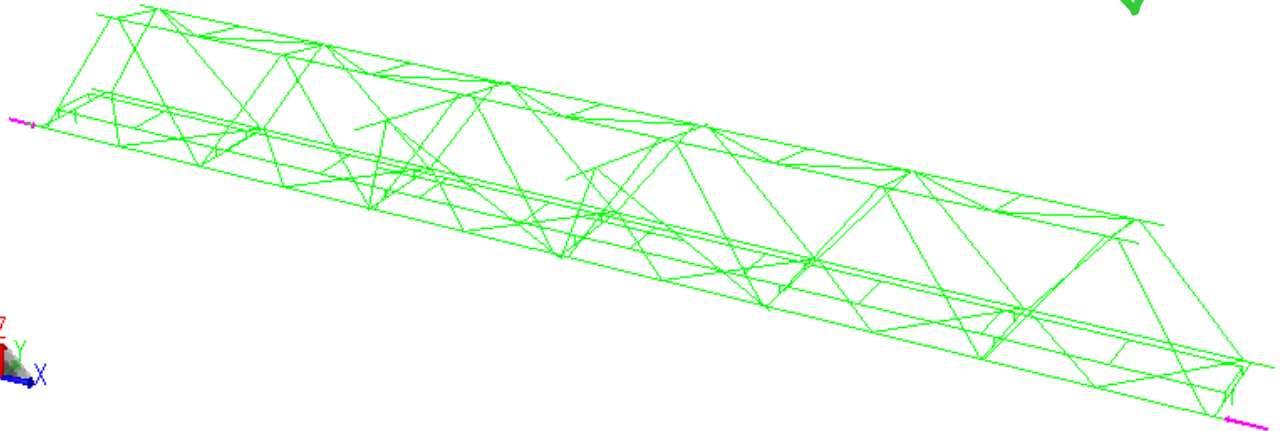







Abbildung 10-10: Reibungslasten (Druck) für Brücke 4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 71 von 171

#### 10.4.10 Riser Hang-Off Lasten - LF RHOF

Die Brücke B4 soll zusätzlich zu dem Laufweg noch 2 Riser Hang-off Lager bieten. Die Lokation dieser 2 Hang-off Lager ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Load Condition: RHOF

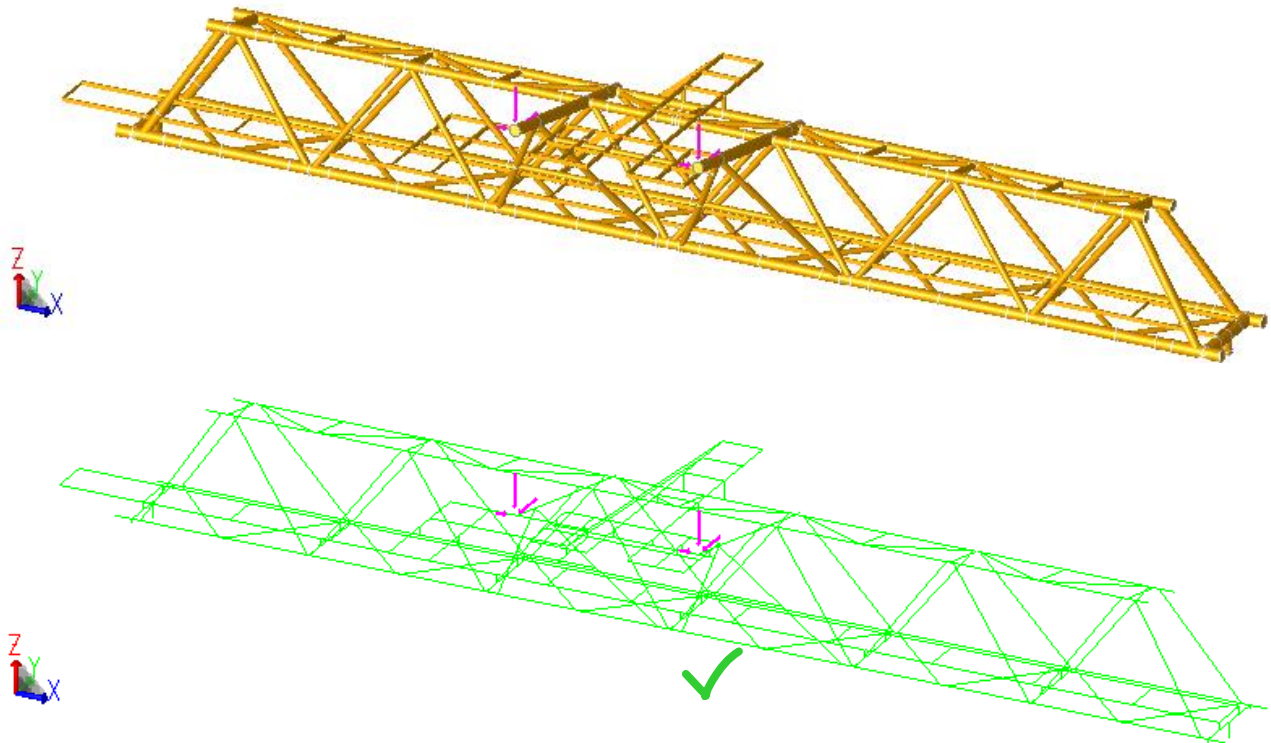


Abbildung 10-11: Position der Riser Hang-Offs

Die Hang-off Lasten erzeugen an der Brücke B4 konservativ maximum die folgenden Lasten:

- 11 t vertikal nach unten (-z-Richtung)
- 11 t horizontal quer (-y-Richtung)
- 5 t horizontal längs (-x-Richtung)





#### 10.4.11 Verkehrslasten für das Access Platform – LF LL2

Die Verkehrslasten werden als eine Last von  $150 \text{ kg} * 2 = 300 \text{ kg}$  or  $3,0 \text{ kN}$  auf der schwachen Stelle von dem Access Platform aufgebracht.





	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 72 von 171

Load Condition: LL2

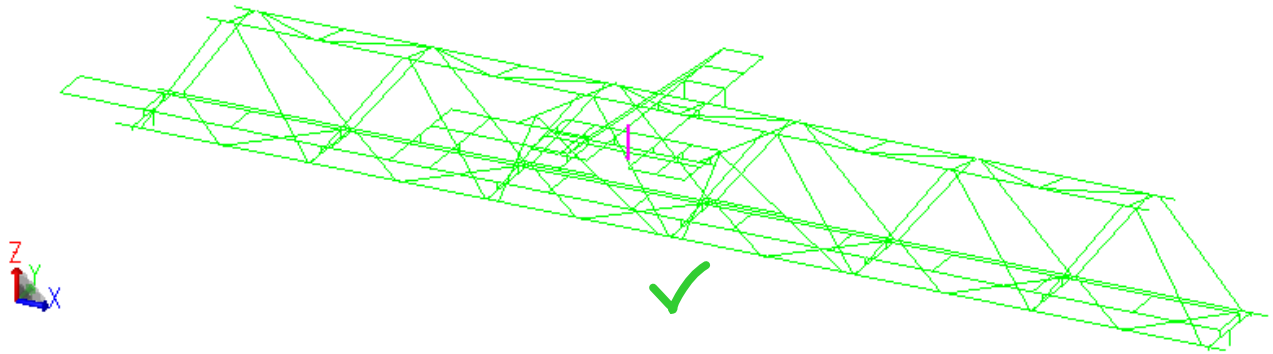






Abbildung 10-12: Verkehrslasten für den Access Plattform von Brücke 4

### 10.5 Lastfallkombinationen

Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.3.4 und 7.3.5.





Tabelle 10-2: Lastfallkombinationen

LCOM	Lastfaktoren											
	LF 100	LF LL	LF LL2	LF RHOF	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 1 (Verkehr)</u>												
101	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
103	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99	-	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
104	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
105	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
106	1,553*	1,50	1,50	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
107	1,553*	1,50	1,50	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
108	1,553*	1,50	1,50	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
109	1,553*	1,50	1,50	1,50	-	0,99	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
<u>ULS 2 (Wind)</u>												
201	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65	-	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65	-	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
203	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65	-	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
204	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
205	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
206	1,553*	1,05	1,05	1,50	1,65*0,707	1,65*0,707	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
207	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
208	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-

		Struktur		
 				
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN		Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03	
TES Code: TES-WHV-VGN-			Seite 73 von 171	






LCOM	Lastfaktoren											
	LF 100	LF LL	LF LL2	LF RHOF	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
209	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	1,65	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
<u>ULS 3 (Schnee &amp; Eis)</u>												
301	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99	-	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99	-	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
303	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99	-	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
304	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
305	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
306	1,553*	1,05	1,05	1,50	0,99*0,707	0,99*0,707	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
307	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
308	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
309	1,553*	1,05	1,05	1,50	-	0,99	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>												
401	1,15*	1,00	-	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,15*	1,00	-	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
403	1,15*	1,00	-	1,00	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
404	1,15*	1,00	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
405	1,15*	1,00	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
406	1,15*	1,00	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
407	1,15*	1,00	-	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
408	1,15*	1,00	-	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
409	1,15*	1,00	-	1,00	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 2 (Wind)</u>												
501	1,15*	0,70	-	1,00	1,10	-	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,15*	0,70	-	1,00	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
503	1,15*	0,70	-	1,00	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
504	1,15*	0,70	-	1,00	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
505	1,15*	0,70	-	1,00	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
506	1,15*	0,70	-	1,00	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
507	1,15*	0,70	-	1,00	-	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
508	1,15*	0,70	-	1,00	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
509	1,15*	0,70	-	1,00	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 3 (Schnee &amp; Eis)</u>												
601	1,15*	0,70	-	1,00	0,66	-	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,15*	0,70	-	1,00	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-



		Struktur		
 				
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN		Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03	
TES Code: TES-WHV-VGN-			Seite 74 von 171	

LCOM	Lastfaktoren											
	LF 100	LF LL	LF LL2	LF RHOF	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
603	1,15*	0,70	-	1,00	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
604	1,15*	0,70	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
605	1,15*	0,70	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
606	1,15*	0,70	-	1,00	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
607	1,15*	0,70	-	1,00	-	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
608	1,15*	0,70	-	1,00	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
609	1,15*	0,70	-	1,00	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 4 (Verkehr + Verkehrslasten für das Access Platform)</u>												
701	1,15*	1,00	1,00	-	0,66	-	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
702	1,15*	1,00	1,00	-	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
703	1,15*	1,00	1,00	-	0,66	-	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
701	1,15*	1,00	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
702	1,15*	1,00	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
703	1,15*	1,00	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
701	1,15*	1,00	1,00	-	-	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
702	1,15*	1,00	1,00	-	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
703	1,15*	1,00	1,00	-	-	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 5 (Wind + Verkehrslasten für das Access Platform)</u>												
801	1,15*	0,70	1,00	-	1,10	-	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
802	1,15*	0,70	1,00	-	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
803	1,15*	0,70	1,00	-	1,10	-	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
804	1,15*	0,70	1,00	-	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
805	1,15*	0,70	1,00	-	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
806	1,15*	0,70	1,00	-	1,10*0,707	1,10*0,707	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
807	1,15*	0,70	1,00	-	-	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
808	1,15*	0,70	1,00	-	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
809	1,15*	0,70	1,00	-	-	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 6 (Schnee &amp; Eis + Verkehrslasten für das Access Platform)</u>												
901	1,15*	0,70	1,00	-	0,66	-	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
902	1,15*	0,70	1,00	-	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
903	1,15*	0,70	1,00	-	0,66	-	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
904	1,15*	0,70	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
905	1,15*	0,70	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
906	1,15*	0,70	1,00	-	0,66*0,707	0,66*0,707	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 75 von 171

LCOM	Lastfaktoren											
	LF 100	LF LL	LF LL2	LF RHOF	LF WINX	LF WINY	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
907	1,15*	0,70	1,00	-	-	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
908	1,15*	0,70	1,00	-	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
909	1,15*	0,70	1,00	-	-	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00

\*inkl. 15% Gewichtsaufschlag wie im Abschnitt 8.4.2.

## 10.6 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapitel sind alle Ergebnisse für Brücke 4 gezeigt.

### 10.6.1 Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

#### 10.6.1.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,92 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

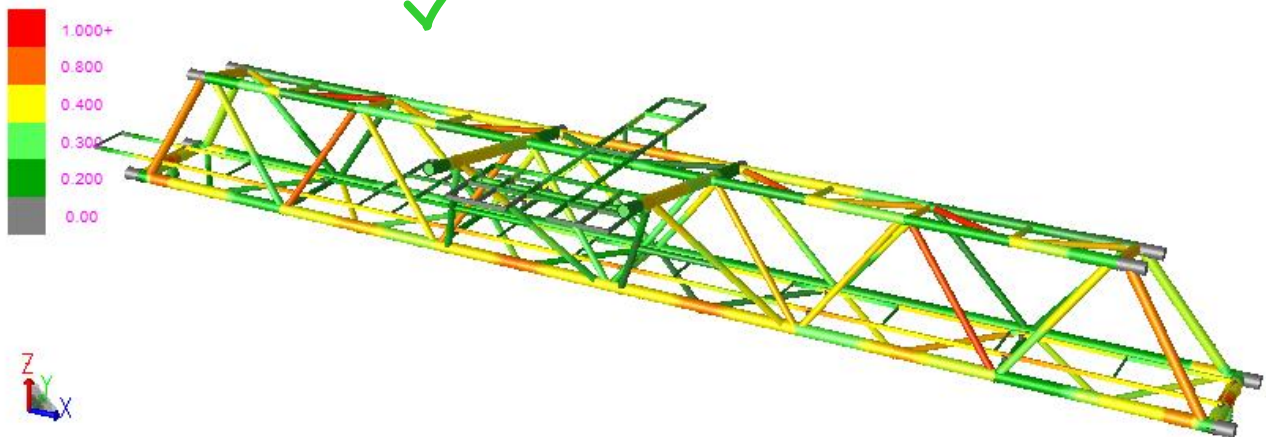






Abbildung 10-13: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 4

#### 10.6.1.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,89 während In-place Zustand.

0,89

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 76 von 171

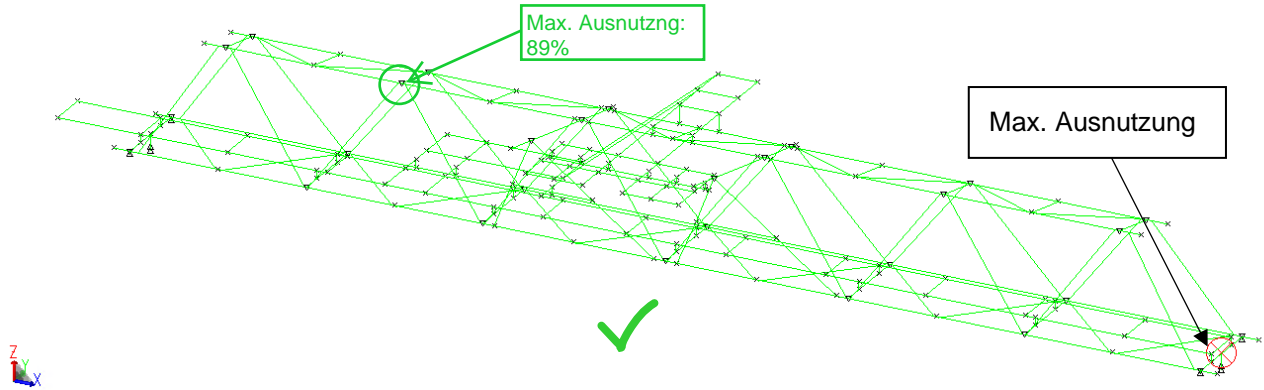


Abbildung 10-14: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 4

#### 10.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 607 auf und resultiert zu -93 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als  $L/200 = 161$  mm (siehe Abschnitt 7.3.6). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

Defl. Shape LC 607

Max View Defl. at 0008

DX: -0.388

DY: -7.702

DZ: -9.030

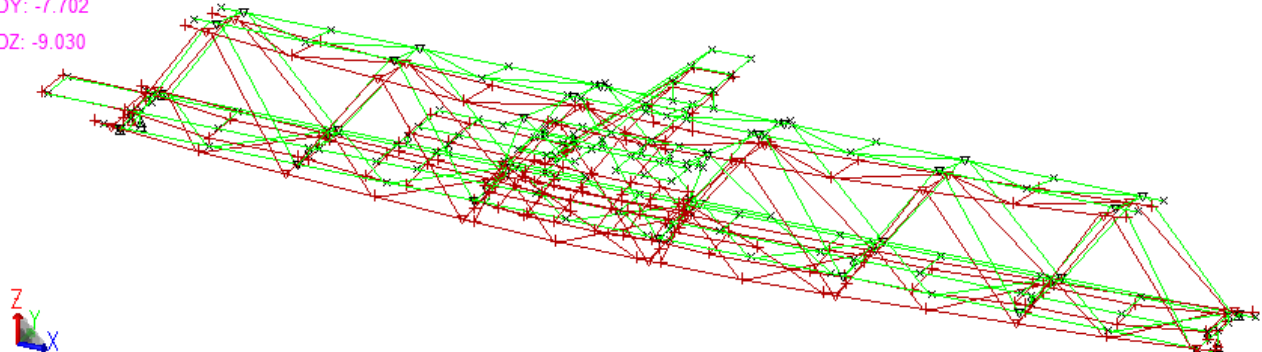





Abbildung 10-15: Verformungsergebnisse – Brücke 4

	Struktur	
		
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 77 von 171

Die maximale vertikale Verformung des Access Platforms tritt für das LCOM 907 auf und resultiert zu -9,4 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als  $L/100 = 1600\text{mm}/100 = 16\text{ mm}$ . Die maximale relative vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

Defl. Shape LC 907

Max View Defl. at N148

DX: -0.431

DY: -1.093

DZ: -3.286

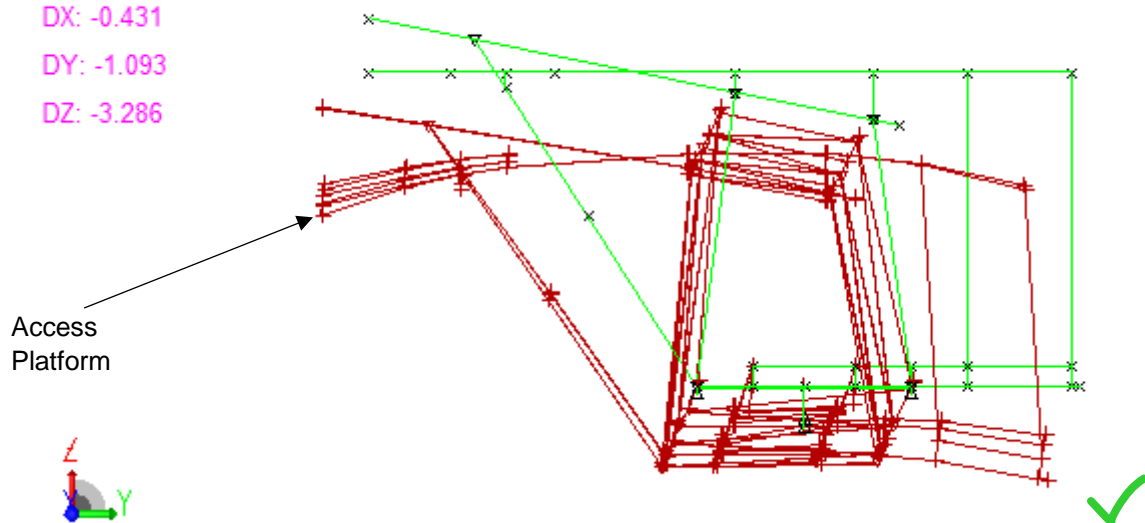


Abbildung 10-16: Verformungsergebnisse – Access Platform von Brücke 4

Die relative Verschiebung des Access Platforms ist wie unten gerechnet.






$$R = 3,29\text{ cm} - 2,35\text{ cm} = 0,94\text{ cm} = 9,4\text{ mm}$$

### 10.6.3 Design-Reaktionslasten an den Brückenlager

Die ausgelesenen Reaktionslager, welche zur Dimensionierung der Brückenlager benötigt werden, sind in der folgenden Tabelle gegeben. Dabei handelt es sich um das absolute Maximum über alle betrachteten Brücken und Lastkombinationen.

Tabelle 10-3: Brückenlager Lasten – Brücke 4

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb)	1.523
Vertikal (Auftrieb)	-1.046
Horizontal (y-Richtung)	323
Horizontal (x-Richtung)	<del>216</del> <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">360</span>

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 78 von 171

#### 10.6.4 Eigenfrequenzen der Brücke

Die Eigenfrequenzen der Brücke 4 sind in der folgenden Tabelle gegeben. Beide Gewichte ohne und mit Gewichtsaufschlag sind überprüft.

Tabelle 10-4: Eigenfrequenzen – Brücke 4

15%

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 10% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Horizontal	4,19 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,34</span>	3,90 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,14</span>
Mode 2: Vertikal	6,44 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,70</span>	6,00 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">4,39</span>



Die Eigenfrequenzen der Brücke 4 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.3.7).

#### 10.6.5 Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)

Die schlanken Brückenelemente werden gegen das Auftreten wirbelinduzierter Vibrationen, die durch windinduzierte Wirbelablösungen entstehen können, geprüft. Strukturen, die windinduzierten Vibrationen ausgesetzt sind, haben ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden.

Tabelle 10-5: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigenfrequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeitsfaktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwindigkeit, $v_m$ [m/s]	kritische Windgeschwindigkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	$1,25 \cdot v_m$ [m/s]
Horizontale Primärstruktur Boden	0,323	11,8	42,58 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">~39</span>	1,292	38,76	76,4 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">~70</span>	48,45
Diagonalen	0,1937	13,9	54,69	1,317	39,51	58,8	49,39








Diese werden in der aktuellen Designphase nicht als kritisch angesehen.

Die Eigenfrequenzen der Horizontale Primärstruktur Boden und der Diagonalen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.





  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 79 von 171

Mode 6 Freq. 42.577 Hz Period 0.023 secs

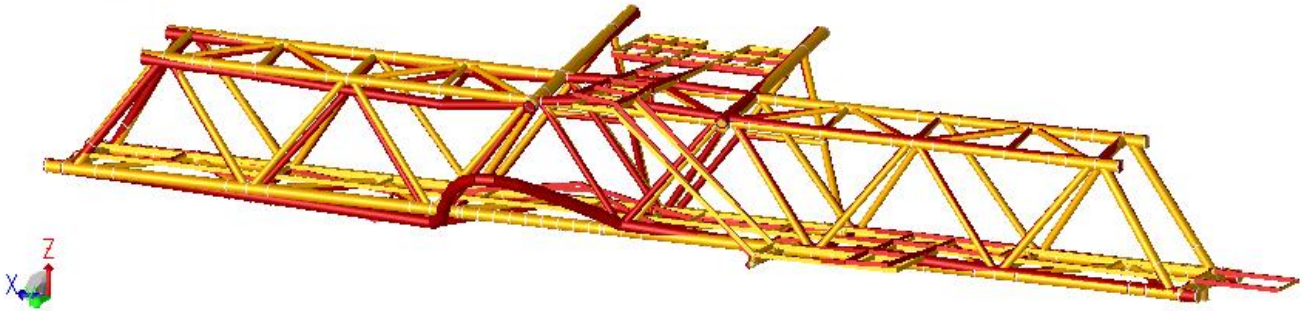


Abbildung 10-17: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden



Mode 5 Freq. 54.685 Hz Period 0.018 secs

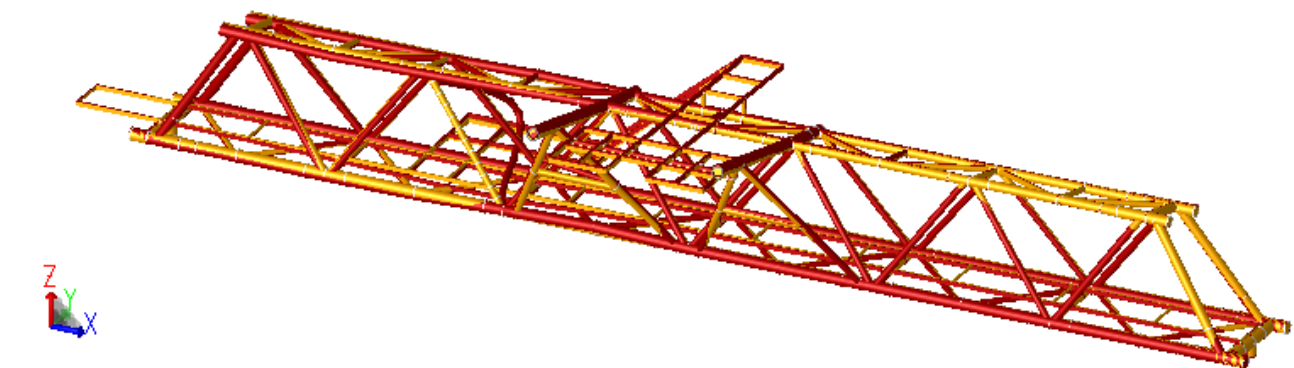







Abbildung 10-18: Kritische Eigenfrequenz Diagonale



#### 10.6.6 Hebeanalyse

Im folgenden Abschnitt wird die Hebeanalyse für die Brücken durchgeführt. Es ist geplant, dass die Brücke mit Hilfe von vier Trunnions angehoben wird. Eine detaillierte Auslegung der Hebepunkte ist im Kapitel 14 beschrieben. Das grobe Aussehen der Hebeanordnung sowie das Vorgehen zur Berechnung sind im Folgenden beschrieben.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 80 von 171

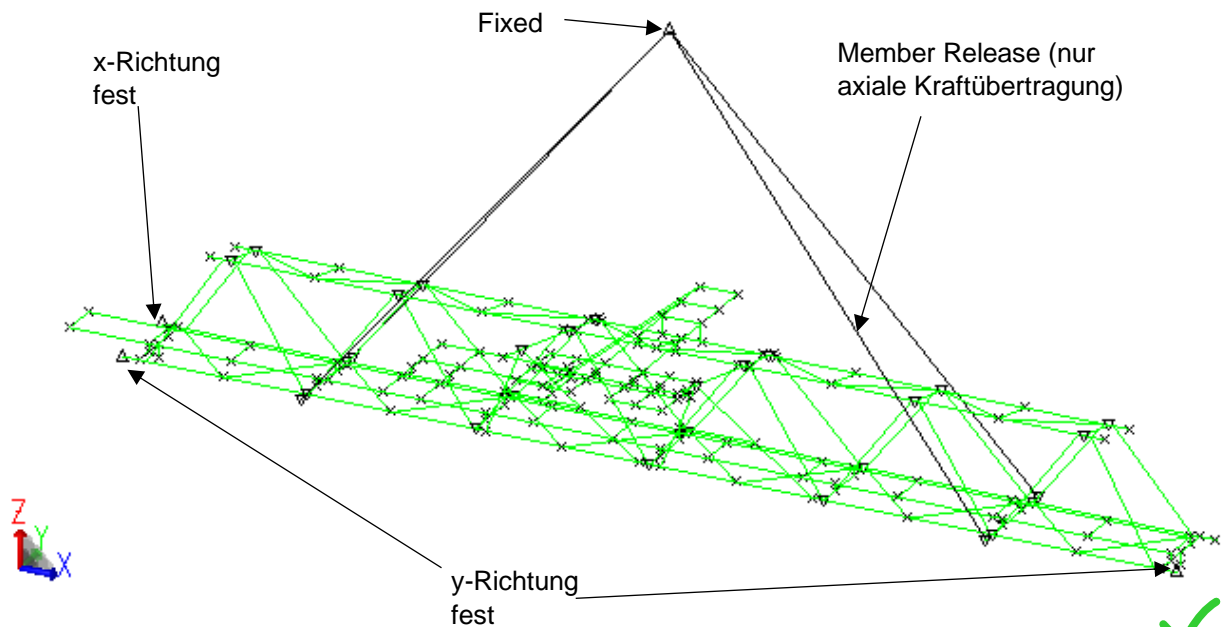


Abbildung 10-19: Hebeanordnung und Randbedingung

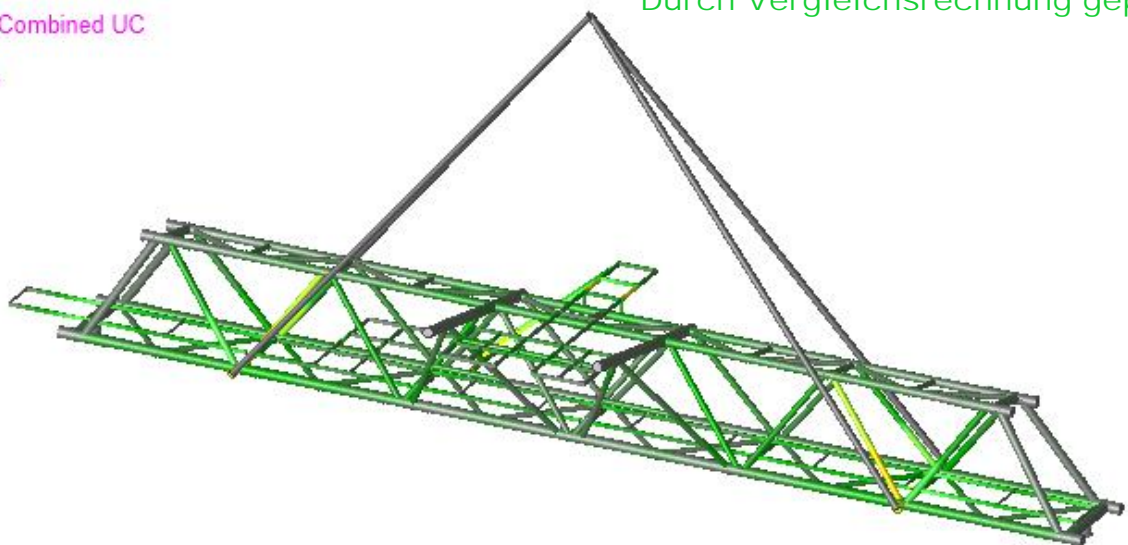
Für die numerische Stabilität muss das FE-Modell zusätzlich in x- und y-Richtung gehalten werden (siehe obere Abbildung). Diese Annahme ist akzeptabel, als die Reaktionslasten sehr klein sind.

Der gesamte Lastfaktor von 4,06 wurde fuer die Hebeanalyse verwendet (wie im Abschnitt 7.3.9).

#### 10.6.6.1 Member Ergebnisse






Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,64 für Hebeanalyse.

Mem Result: Combined UC



Durch Vergleichsrechnung geprüft

Abbildung 10-20: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 81 von 171

### 10.6.6.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,56.

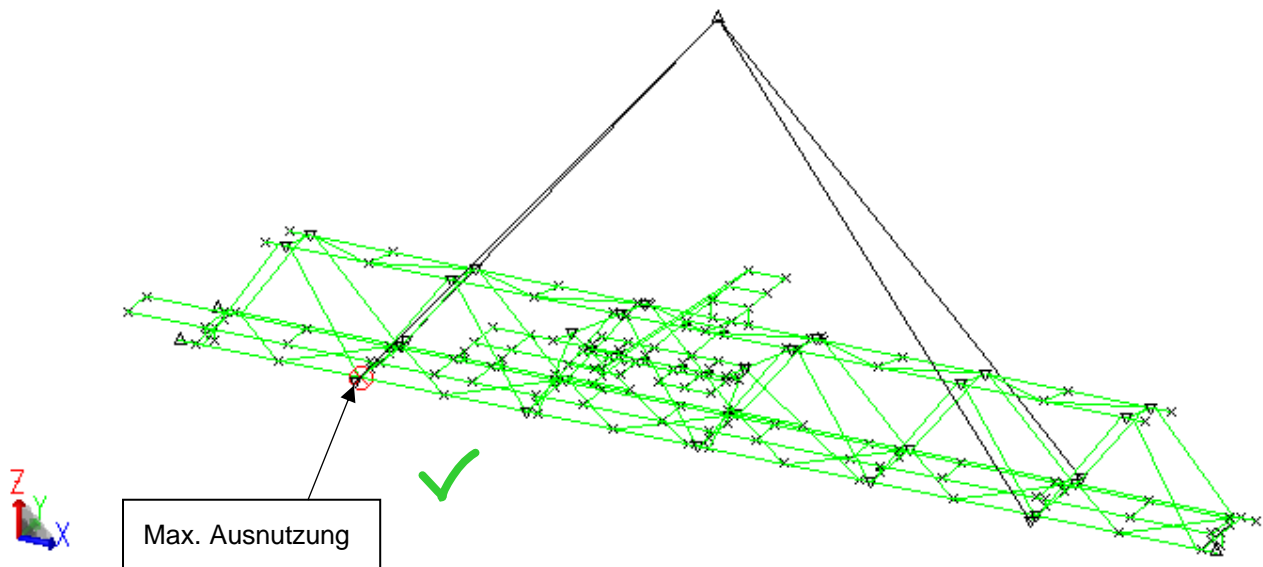


Abbildung 10-21: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 4

### 10.7 Nachweis der Augplatte für Riser Hang-Offs

Eine Augplatte ist an jeder Riser Hang-Off Lager angeschweißt, die in der folgenden Abbildung rot markiert. Aufgrund der beschriebenen Hang-off Lasten in Kapitel 10.4.10 wurde das Schäkel Crossby G2150 mit SWL 17 t ausgewählt.

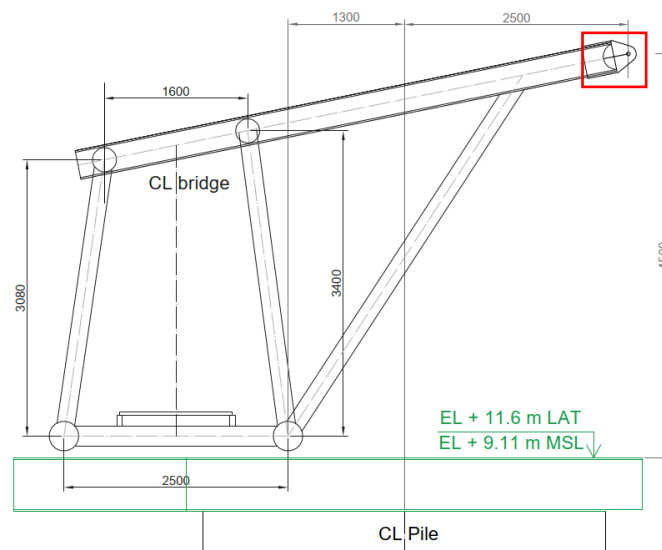






Abbildung 10-22: Augplatte für Riser Hang-offs

Die Augplatten haben die folgende Geometrie.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 82 von 171

- Durchmesser,  $D = 180 \text{ mm}$
- Lochdurchmesser,  $d = 44 \text{ mm}$
- Plattenstärke,  $t = 25 \text{ mm}$
- Lochhöhe,  $h = 165 \text{ mm}$
- Länge,  $l = 360 \text{ mm}$

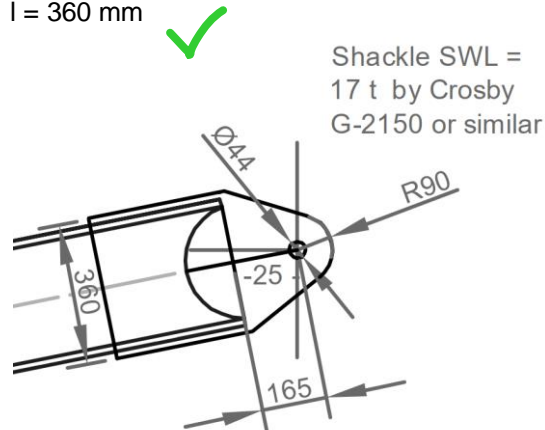







Abbildung 10-23: Geometrie von Augplatte

Die Augplatte ist nach GL in Anhang D verifiziert. Die resultierende Riser-Last von 11 t Vertikal und 11 t Horizontal ist konservativ betrachtet. Zusätzlich ist eine Seitenlast von 10% von der resultierende Riser-Lasten berücksichtigt. Der Nachweis ist konservativ mit der Lastrichtung in axialer Richtung des Lagers und senkrecht zu axial durchgeführt. In Anhang ist nur die schlimmere Richtung u.Z. senkrecht zu axial Richtung dokumentiert. Die maximale Ausnutzung ist 67,8%.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 83 von 171

## 11 Nachweis der Brücke 7 – 68,1 m

### 11.1 Allgemein

Die Brücke 7 mit 68,1 m Länge wird mittels SACS 14,1 -FE-Analyse nachgewiesen.

### 11.2 Modellbeschreibung

Das folgende Bild zeigt das FE-Modell der Brücke 7, welches für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS), den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS), die VIV-Analyse und die Hebeanalyse verwendet wird.

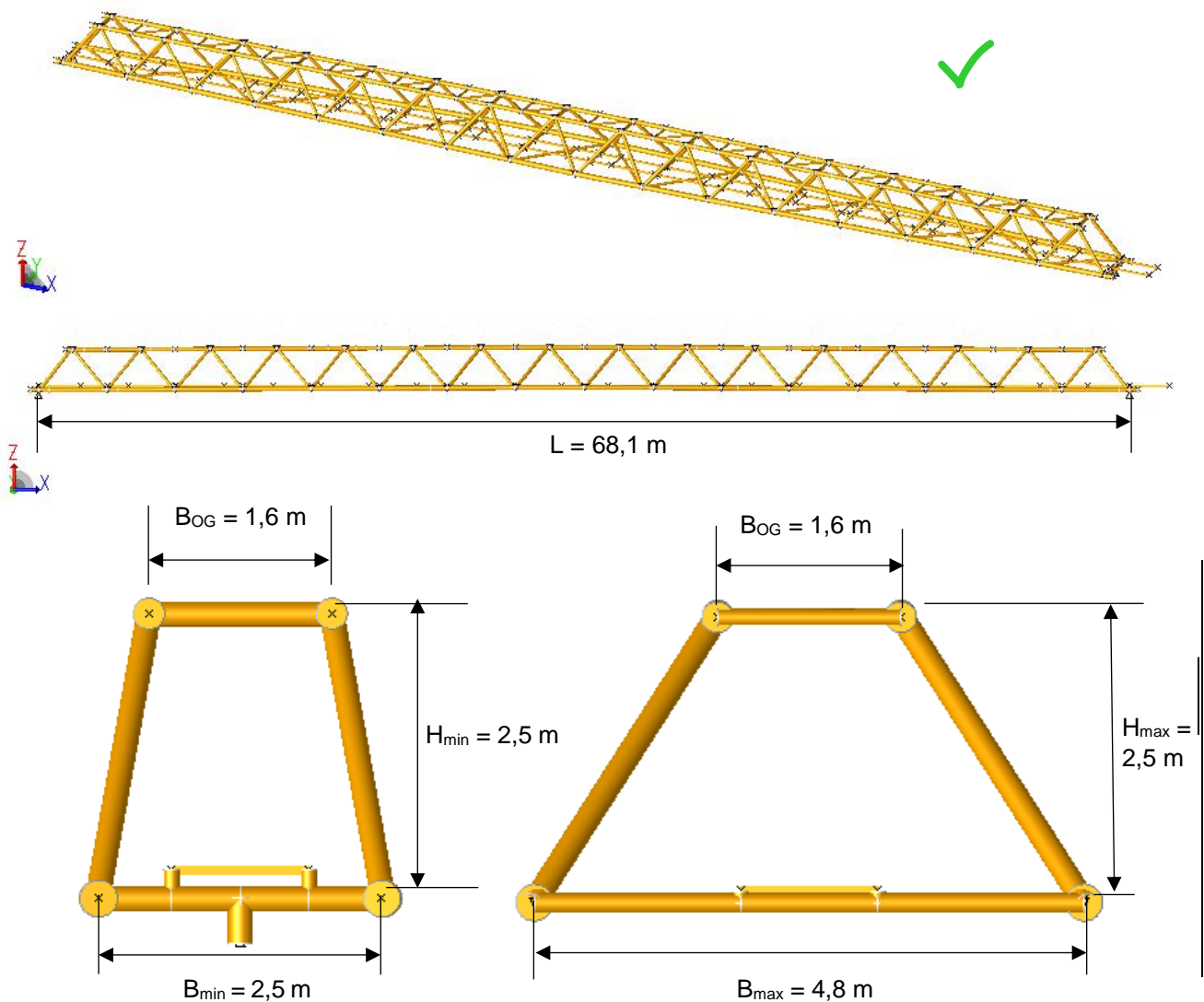







Abbildung 11-1: FE-Modell – Brücke 7

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 84 von 171

### 11.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf der einen Seite mit einer Pin-Verbindung an den Dalben befestigt, siehe linkes Bild in Abbildung 11-2. Auf der anderen Seite (Bild rechts, siehe Abbildung 11-2) ist ein Gleitlager, welches die Brücke in y-Richtung festhält. Dies erlaubt ein Gleiten der Brücke in x-Richtung sowie Rotationen um die y- und z-Achse. Für jede Seite, es gibt 2 vertikale Lager, die die Brücke in z-Richtung festhält.

Für einen besseren Überblick werden die Balken im Folgenden als Linien dargestellt.

Pin-Verbindung

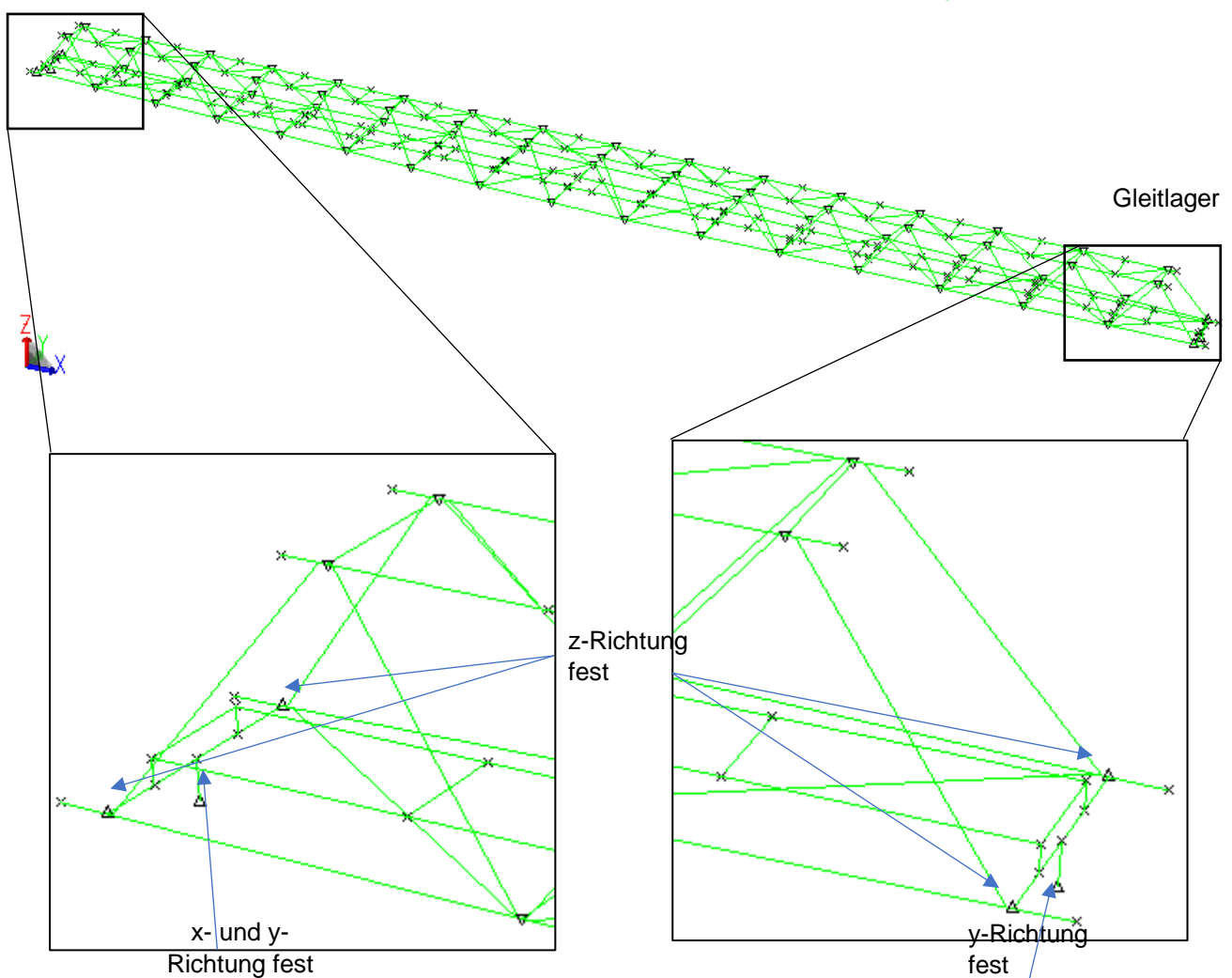







Abbildung 11-2: Randbedingungen



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 85 von 171

#### 11.4 Lasten

##### 11.4.1 Allgemein

Die Strukturlasten werden im FE-Modell modelliert, wohingegen die variablen und Umweltlasten als verteilte Lasten auf die Balken-Elemente aufgebracht werden.

##### 11.4.2 Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100

Die Strukturlasten inklusive Gitterroste und Handläufe sind wie unten zusammengefasst.

Tabelle 11-1: Strukturlasten für Brücke 7

Item	Gewichte ohne Gewichtsaufschlag [t]
Member elements	36,48
Gitterroste	2,54
Handläufe	2,16
<b>Total</b>	<b>41,18</b>



Die Gewichte der Gitterroste sind konservativ mit  $m_{\text{Gitterroste}} = 30 \text{ kg/m}^2$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückenende mit Gleitlager gerechnet.

$$G_{\text{Gitterroste}} = (m / 1000) * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}}$$

$$L_{\text{Gitterroste}} = 68,1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 70,6 \text{ m}$$

$$B_{\text{Gitterroste}} = 1,2 \text{ m}$$

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 70,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 2,54 \text{ t}$$



Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit  $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$  und 2,5 m zusätzliche Laufsteg fuer die Brückenende mit Gleitlager gerechnet und

$$G_{\text{Handläufe}} = m * 2 * L_{\text{Handläufe}} / g$$

$$L_{\text{Handläufe}} = 68,1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 70,6 \text{ m}$$

$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 70,6 \text{ m} / g = 2,16 \text{ t}$$



Die Gewichte der Gitterroste und Handläufe werden auf den Laufsteg aufgebracht.






Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 15% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 15% Gewichtsaufschlag wird in den Lastfallkombinationen berücksichtigt (siehe Abschnitt 11.5).

##### 11.4.3 Verkehrslasten – LF LL

Die Verkehrslasten werden als eine gleichmäßig verteilte Streckenlast von  $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$  auf den Laufsteg aufgebracht (wie im Abschnitt 6.3.1).





  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 86 von 171

Load Condition: LL

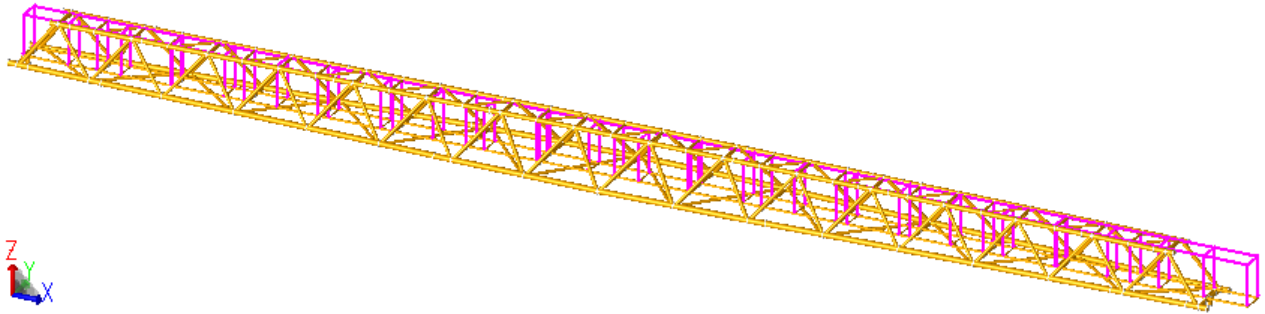


Abbildung 11-3: Verkehrslasten für Brücke 7

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 68,1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 70,6 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= 2 \text{ kN/m}^2 * 70,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 169,44 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

#### 11.4.4 Windlasten – LF WINX (o Grad Richtung)

Die Windlast von 0 Grad Richtung (+x-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke und auf den diagonalen Members aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINX

welche Last wurde aufgebracht?

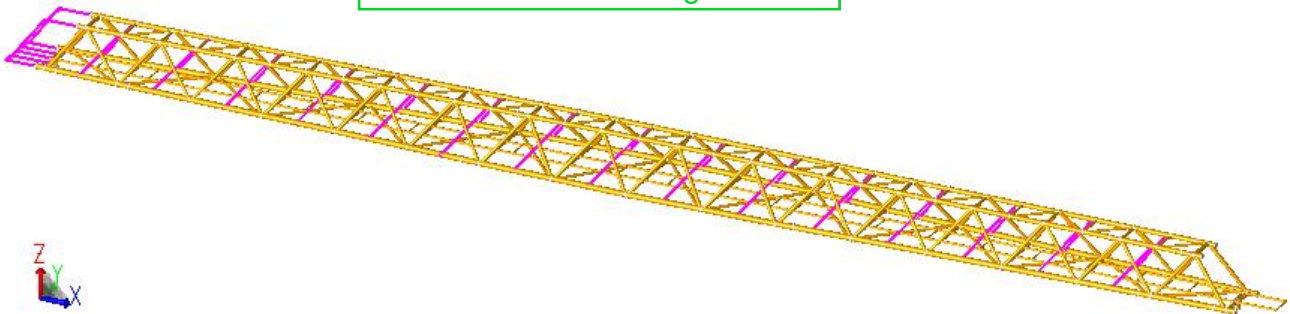






Abbildung 11-4: Windlasten 0 Grad Richtung für Brücke 7

Die gesamte Windlast wird mit der aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wind}} &= w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L \\
 H &= 3,45 \text{ m} \\
 L &= 15,51 \text{ m (konservativer Ansatz)} \\
 F_{\text{wind}} &= 1,329 \text{ kN/m}^2 * 3,45 \text{ m} * 15,51 \text{ m} = 71,14 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ansatz nicht nachvollziehbar!

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 87 von 171

#### 11.4.5 Windlasten – LF WINY (90 Grad Richtung)

Die Windlast von 90 Grad Richtung (+y-Achse) ist als verteilte Last P auf einer Seite der Brücke aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: WINY

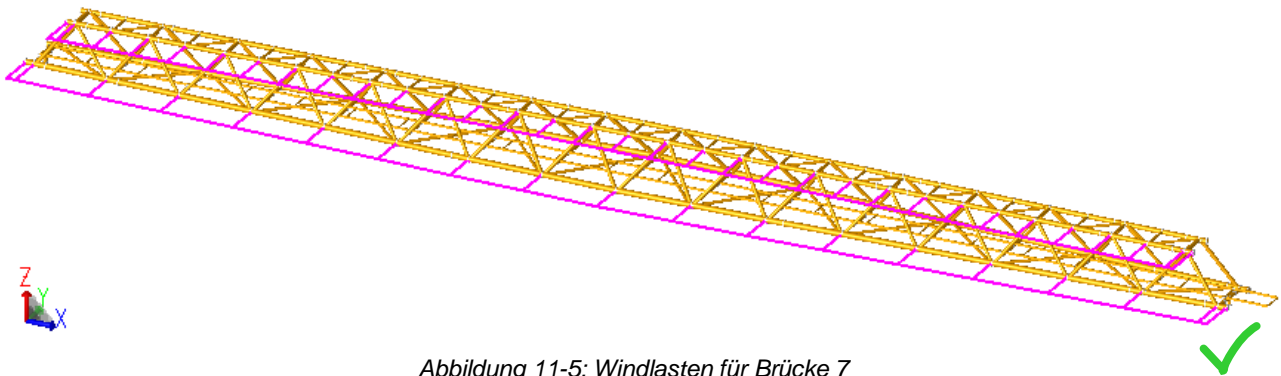


Abbildung 11-5: Windlasten für Brücke 7

Die gesamte Windlast wird mit dem aerodynamische Beiwerte für Fachwerkstrukturen (wie im Abschnitt 6.3.2) gerechnet.

$$F_{\text{wind}} = w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L$$

$$H = 2,90 \text{ m}$$

$$L = 68,1 \text{ m}$$

$$F_{\text{wind}} = 1,329 * 2,90 \text{ m} * 68,1 \text{ m} = 262,37 \text{ kN}$$

Die Windlast von 45 Grad Richtung ist mit Lastfallkombinationen (wie im Abschnitt 8.5) kombiniert.

#### 11.4.6 Schneelasten – LF SNOW

Die Schneelast ist auf den oberen Brückenteil sowie auf die Gitterroste aufgebracht, siehe folgende Abbildung.

Load Condition: SNOW

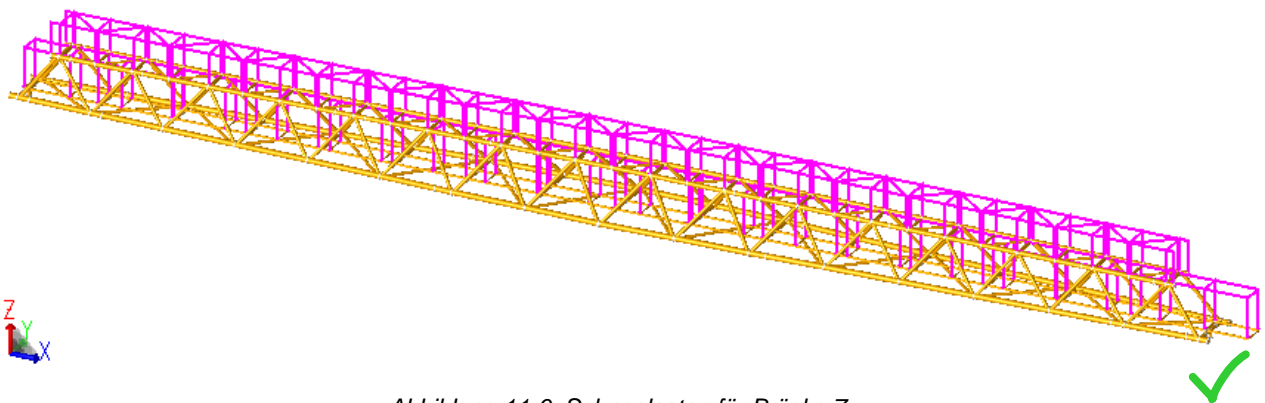


Abbildung 11-6: Schneelasten für Brücke 7






Die Schneelasten wird fuer die obere Brückenteil und die Gitterroste (wie im Abschnitt 6.3.3) gerechnet.

- Für die obere Brückenteil

$$F_{\text{OB}} = s * A_{\text{OB}} \quad \text{und Fläche des oberen Brückenteils, } A_{\text{OB}} = B_{\text{OB}} * L_{\text{OB}}$$

$$B_{\text{OB}} = 1,6 \text{ m}$$

$$L_{\text{OB}} = 64,78 \text{ m}$$

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 88 von 171

$$F_{OB} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m} * 64,78 \text{ m} = 53,90 \text{ kN}$$

- Für die Gitterroste

$$F_{GR} = s * A_{GR} \quad \text{und Fläche der Gitterroste, } A_{GR} = B_{GR} * L_{GR}$$

$$B_{GR} = 1,2 \text{ m}$$

$$L_{GR} = 68,1 \text{ m} + 2,5 \text{ m} = 70,6 \text{ m}$$

$$F_{GR} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,2 \text{ m} * 70,6 \text{ m} = 44,05 \text{ kN}$$

#### 11.4.7 Eislasten – LF ICE

Die Eislast wird auf alle Balkenelemente als verteilte Last  $P$  ( $e = 0,005 \text{ kN/m}$  für  $D < 0,3 \text{ m}$  und  $e = 0,01 \text{ kN/m}$  für  $D > 0,3 \text{ m}$ ) aufgebracht unter Berücksichtigung der Rohrdurchmesser  $D$  (wie im Abschnitt 6.3.4). Die gesamte Eislasten von  $7,96 \text{ kN}$  werden für die Berechnung berücksichtigt.

Load Condition: ICE

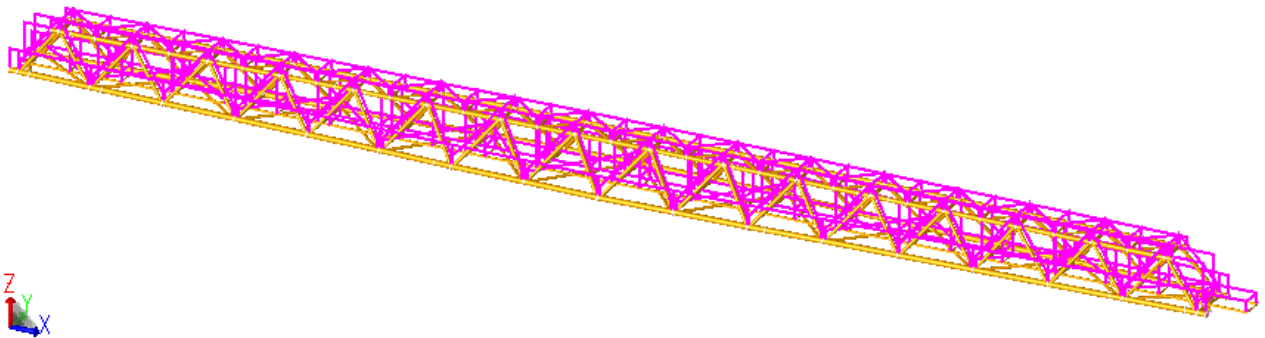


Abbildung 11-7: Eislasten für Brücke 7

#### 11.4.8 Holmlast – LF HOLM

Im Abschnitt 6.3.5, wird eine horizontale Design – Holmlast (inkl. Lastfaktor) von  $H_d = 0,525 \text{ kN/m}$  oben an allen Handläufen angesetzt.

Load Condition: HOLM

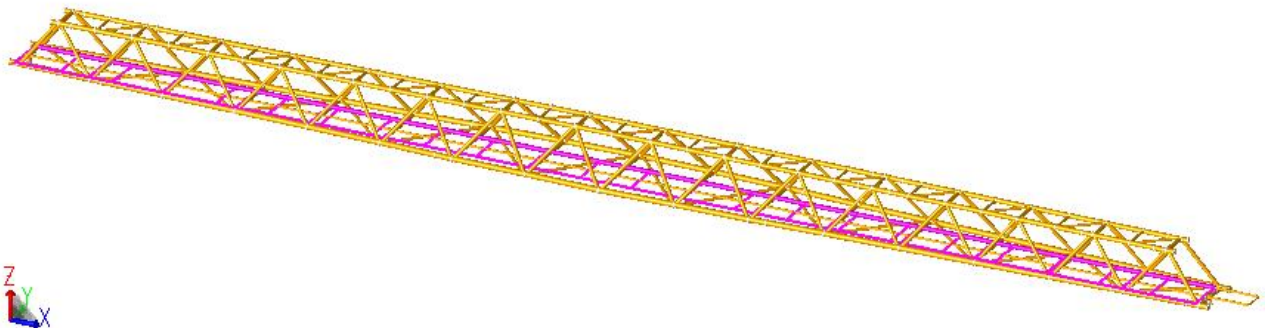






Abbildung 11-8: Holmlasten für Brücke 7

Es wird nur eine horizontale  $+y$ -Richtung gecheckt. Darüber werden die Momente infolge der horizontalen Holmlast berücksichtigt, da die Handläufe nicht modelliert sind. Ein Hebelarm von  $h = 1,1 \text{ m}$  wird betrachtet.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 89 von 171

$$M_{HL,-x} = H_d * h = 0,525 \text{ kN/m} * 1,1 \text{ m} = 0,5775 \text{ kNm/m (-x Rotation auf den Laufstege)}$$

#### 11.4.9 Reibungslasten

Die Reibungslasten am vertikalen Lager werden gemäß Abschnitt 6.3.6 gerechnet. Die Normalkraft wird konservativ von dem maximalen erzeugten Vertikalkraft genommen.

Die maximale erzeugte Vertikalkraft ist 371 kN wie im Abschnitt 11.6.3. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 371 \text{ kN} = 111,3 \text{ kN}$$

Die Reibungslasten werden auf 3 verschiedene Arten überprüft:

- Reibungslast am Lager 2 x Zug (LF ZUG)
- Reibungslast am Lager 2 x Druck (LF DRUCK)
- Reibungslast am Lager 1 x Druck und 1 x Zug (LF ABWE)

Load Condition: ZUG

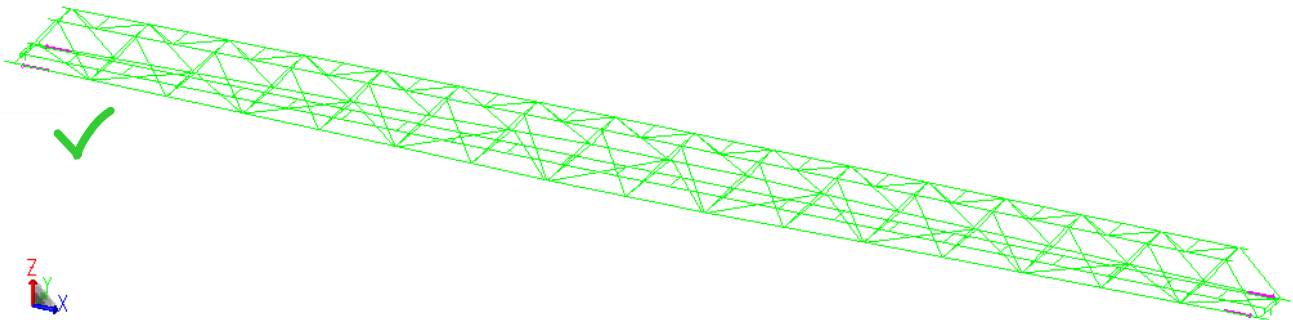


Abbildung 11-9: Reibungslasten (Zug) für Brücke 7

Load Condition: DRUC

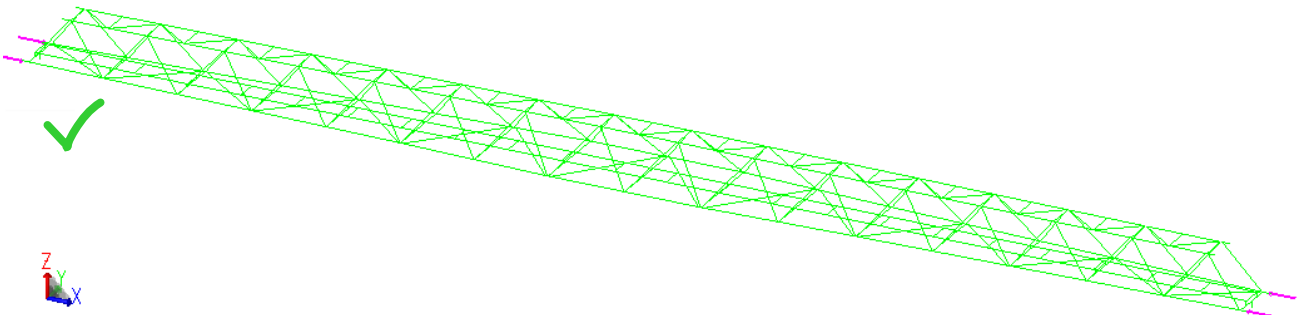







Abbildung 11-10: Reibungslasten (Druck) für Brücke 7

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 90 von 171

Load Condition: ABWE

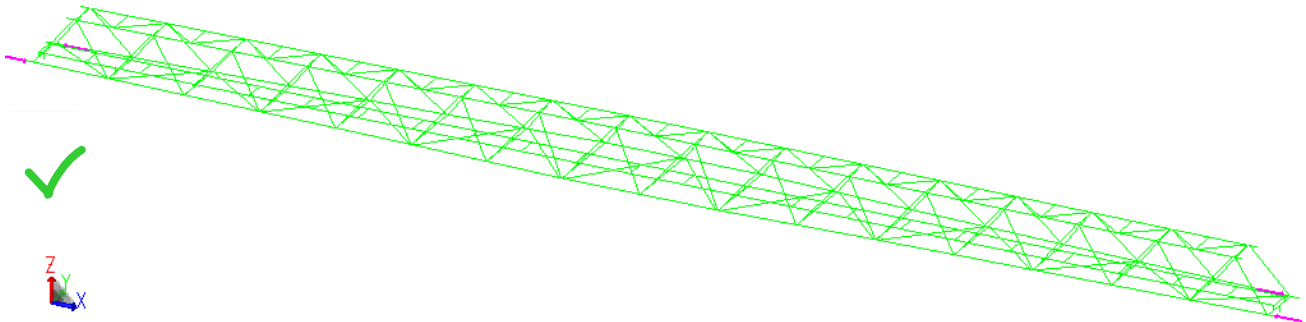


Abbildung 11-11: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 7

### 11.5 Lastfallkombinationen

Die Lastfallkombinationen (LCOMs) sind im Abschnitt 8.5 zusammengefasst..

### 11.6 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapitel sind alle Ergebnisse für Brücke 7 gezeigt.

#### 11.6.1 Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

##### 11.6.1.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,86 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

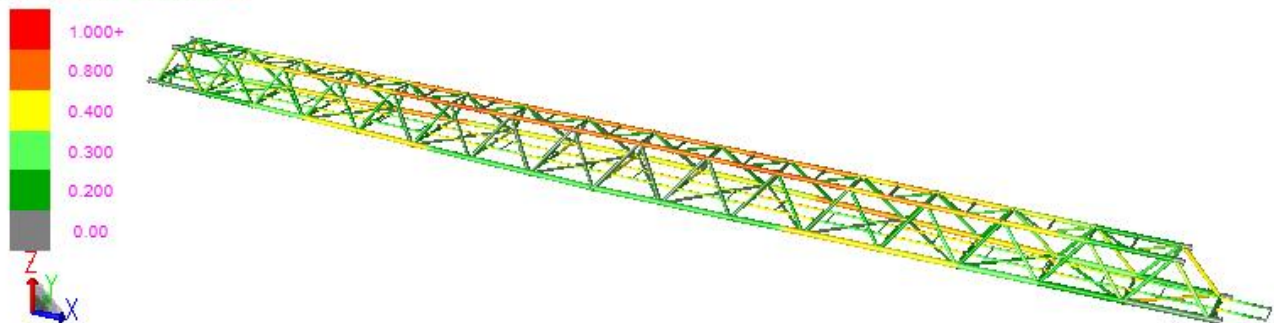







Abbildung 11-12: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 7

##### 11.6.1.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,82 während In-place Zustand.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 91 von 171

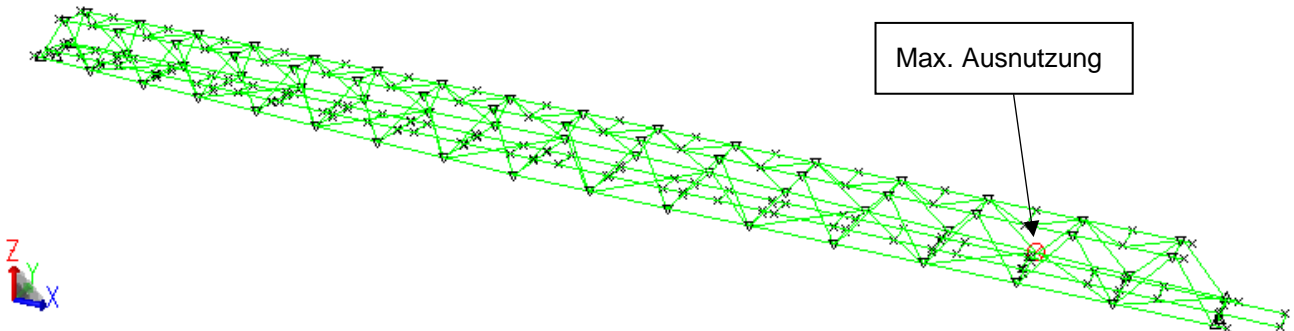


Abbildung 11-13: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 7



### 11.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 601 auf und resultiert zu -240 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als  $L/200 = 340,5$  mm (siehe Abschnitt 7.3.6). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

Defl. Shape LC 601

Max View Defl. at 1096

DX: 1.805

DY: 0.566

DZ: -24.073

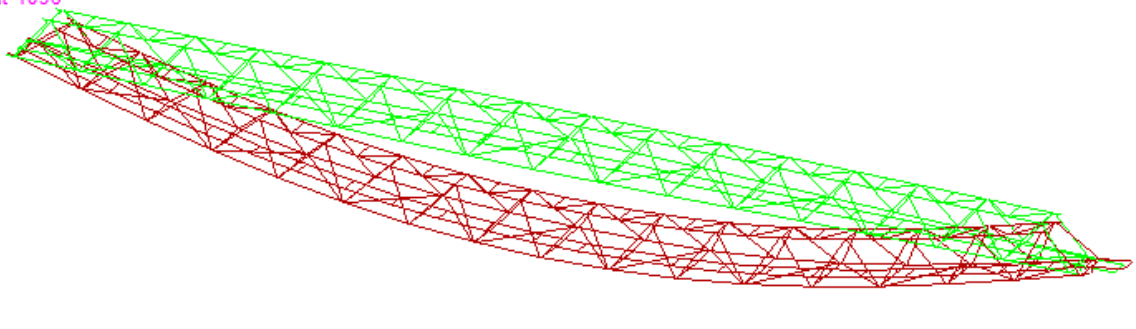


Abbildung 11-14: Verformungsergebnisse – Brücke 7



### 11.6.3 Design-Reaktionslasten an den Brückenlager



Die ausgelesenen Reaktionslager, welche zur Dimensionierung der Brückenlager benötigt werden, sind in der folgenden Tabelle gegeben. Dabei handelt es sich um das absolute Maximum über alle betrachteten Brücken und Lastkombinationen.

Tabelle 11-2: Brückenlager Lasten – Brücke 7

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb), $V_{\max,1}$	371
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb) am anderen Lager auf gleiches Brückenende, $V_{\max,2}$	230
Horizontal (quer)	230
Horizontal (längs)	117

159



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 92 von 171

#### 11.6.4 Eigenfrequenzen der Brücke

Die Eigenfrequenzen der Brücke 7 sind in der folgenden Tabelle gegeben. Beide Gewichte ohne und mit Gewichtsaufschlag sind überprüft.

Tabelle 11-3: Eigenfrequenzen – Brücke 7

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 15% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Vertikal	1,499 ✓	1,40 ✓
Mode 2: Horizontal	1,902 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">2.16</span>	1,77 <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">2.01</span>



Die Eigenfrequenzen der Brücke 7 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.3.7).

#### 11.6.5 Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)

Die schlanken Brückenelemente werden gegen das Auftreten wirbelinduzierter Vibrationen, die durch windinduzierte Wirbelablösungen entstehen können, geprüft. Strukturen, die windinduzierten Vibrationen ausgesetzt sind, haben ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden.






Tabelle 11-4: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigenfrequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeitsfaktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwindigkeit, $v_m$ [m/s]	kritische Windgeschwindigkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	$1,25 \cdot v_m$ [m/s]
Horizontale Primärstruktur Boden	0,3239	12,0	51,84 ✓	1,294	38,82	93,3	48,53
Diagonalen	0,2191	13,9	62,21	1,317	39,51	75,7	49,39

Diese werden in der aktuellen Designphase nicht als kritisch angesehen.

Die Eigenfrequenzen der Horizontale Primärstruktur Boden und der Diagonalen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 93 von 171

Mode 6 Freq. 51.844 Hz Period 0.019 secs

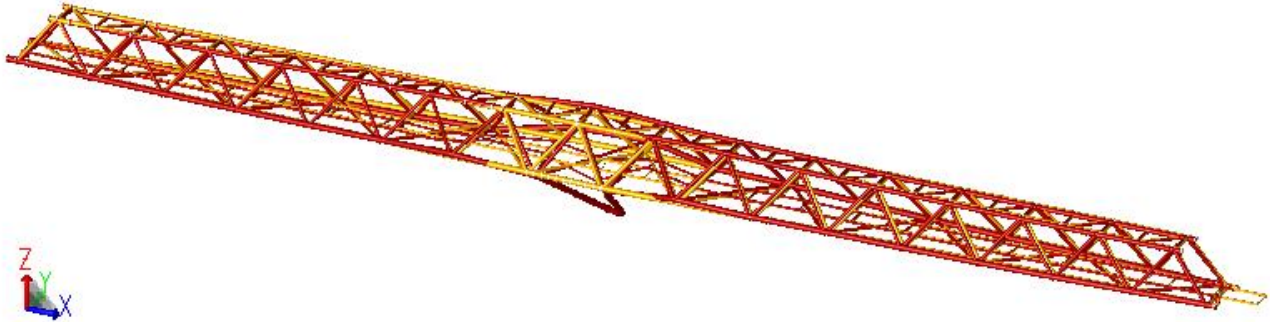


Abbildung 11-15: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

Mode 6 Freq. 62.211 Hz Period 0.016 secs

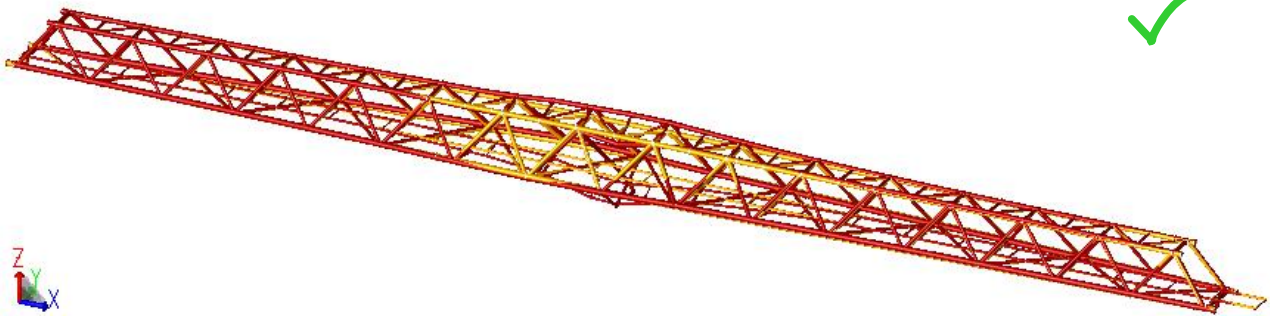







Abbildung 11-16: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

#### 11.6.6 Hebeanalyse

Im folgenden Abschnitt wird die Hebeanalyse für die Brücken durchgeführt. Eine detaillierte Auslegung der Hebepunkte ist im Kapitel 14 beschrieben. Das grobe Aussehen der Hebeanordnung sowie das Vorgehen zur Berechnung sind im Folgenden beschrieben.



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 94 von 171

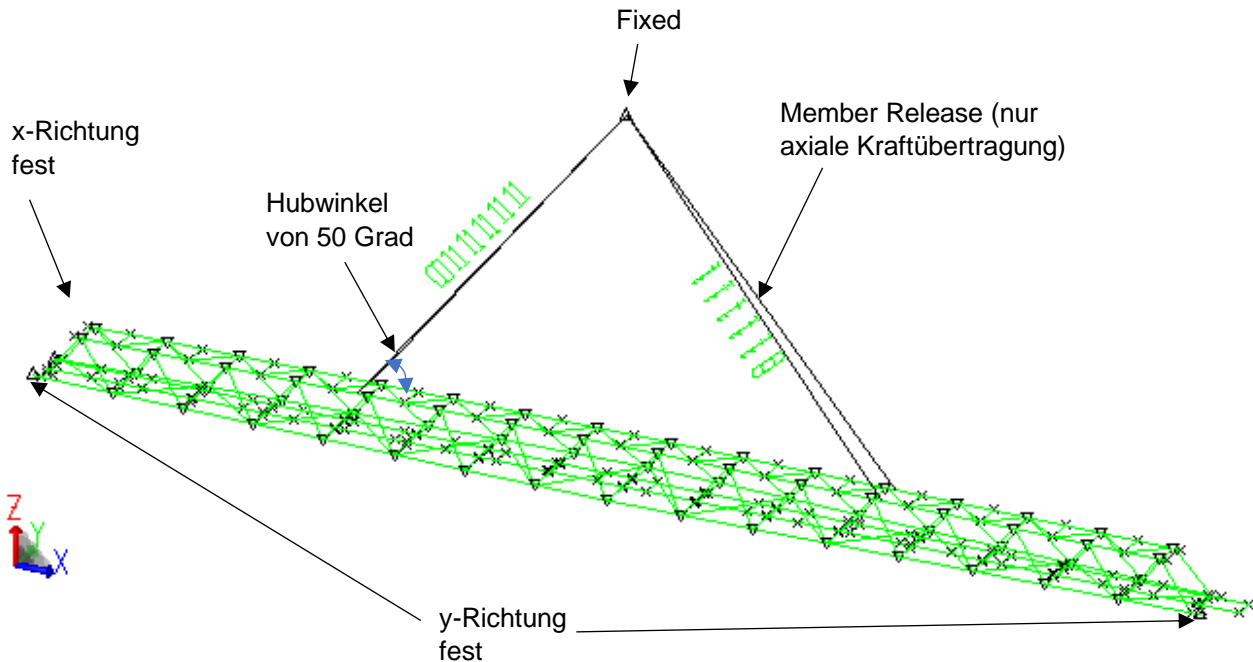


Abbildung 11-17: Hebeanordnung und Randbedingung

Für die numerische Stabilität muss das FE-Modell zusätzlich in x- und y-Richtung gehalten werden (siehe obere Abbildung). Diese Annahme ist akzeptabel, als die Reaktionslasten sehr klein sind.

Der Hubwinkel von 50 Grad ist konservativ fuer die Analyse berücksichtigt.

Der gesamte Lastfaktor,  $f_{\text{Total}}$  ist für die Hebeanalyse gerechnet (wie im Abschnitt 7.3.9).





$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / \text{SHL})^{0,5})$$

$$\text{SHL} = 41,18 \text{ t (von Abschnitt 11.4.2)}$$

$$f_{\text{Total}} = 2,78 * (1 + 0,25 * (100 / 41,18 \text{ t})^{0,5}) = 3,86$$

#### 11.6.6.1 Member Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) der Brücke gemäß EC 3 [V.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,49 für Hebeanalyse.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 95 von 171

Mem Result: Combined UC

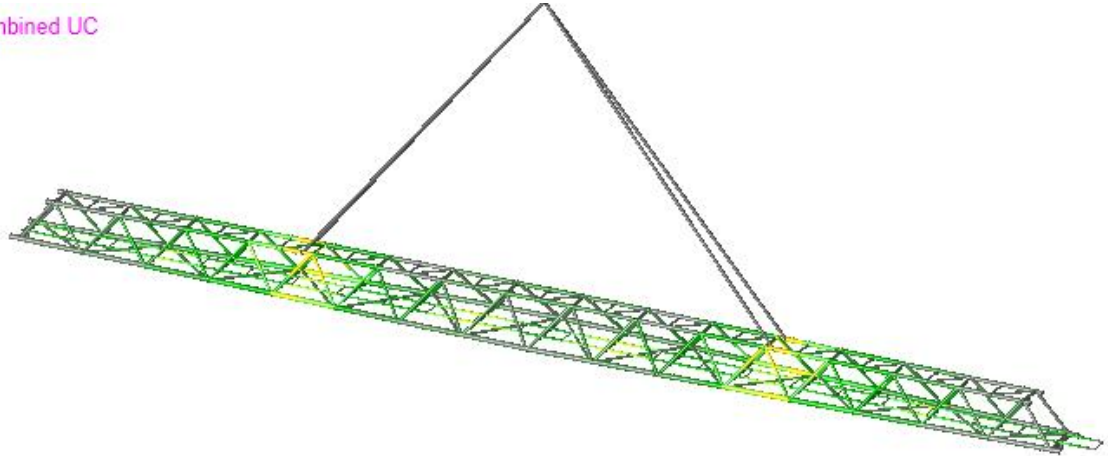
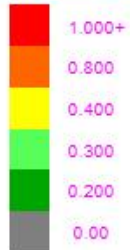


Abbildung 11-18: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 7

#### 11.6.6.2 Knotennachweise

Das folgende Bild zeigt die Auslastung (Kombinierter Nachweis) des Knoten von Brücke gemäß NORSOK [XIII.]. Insgesamt liegt die maximale Ausnutzung bei 0,65.

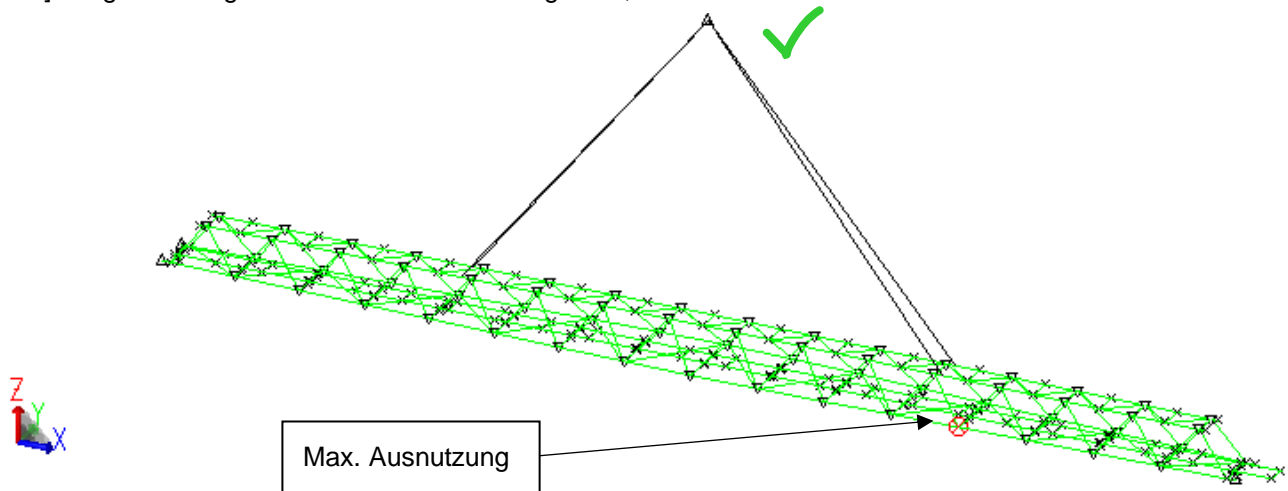







Abbildung 11-19: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 7

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 96 von 171

## 12 Lokale Nachweise der Brückenlager

### 12.1 Allgemeine Beschreibung

Das brückenseitige Lager ist für das Fest- und das Loslager an dem jeweiligen Brückenende außer Brücke B4 identisch. Es wird außerdem nicht zwischen den Brückentypen außer Brücke B4 unterschieden, sondern es wird für die maximale Designlasten in Kapitel 11.6.3 ausgelegt. Für Brücke B4 wird die maximale Designlasten in Kapitel 10.6.3 berücksichtigt.






Das Brückenlager besteht aus einer Gleitfläche am seitlichen Brückenlängsträger sowie einem Pin in der Mitte des horizontalen Trägers. Die Gleitfläche überträgt die vertikale Last und wird zusätzlich mit einer Reibungskraft belastet. Der Pin überträgt nur horizontale Kräfte. Für das verschiebliche Gleitlager wird für eine bessere Kraftübertragung an dem Pin ein Schlitten befestigt, das in Kapitel 13.3 ausgelegt sind.

### 12.2 Strukturelle Berechnung

Zur strukturellen Berechnung des brückenseitigen Lagers wird ein FE-Modell mit dem Programm Solidworks [a.] angefertigt.



Abbildung 12-1: Detailmodell der Brückenlager für alle Brücken außer Brücke B4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 97 von 171

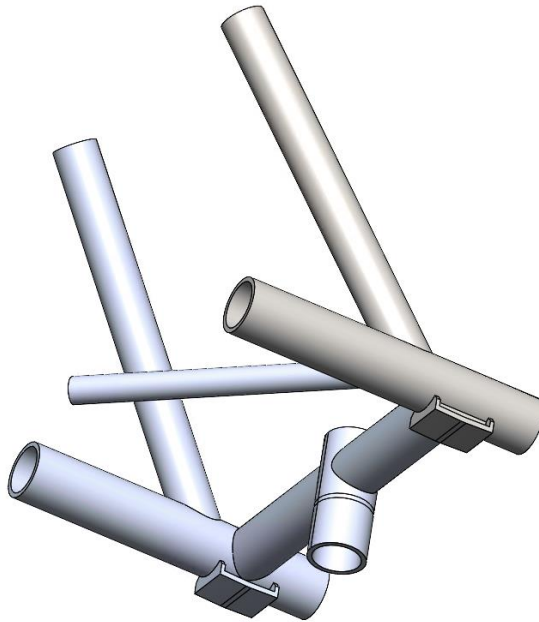


Abbildung 12-2: Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4

#### 12.2.1 Randbedingungen

Das FE-Modell wird an den geschnittenen Querschnitten fixiert, wie in der folgenden Abbildung für alle Brücken außer Brücke B4 exemplarisch gezeigt.

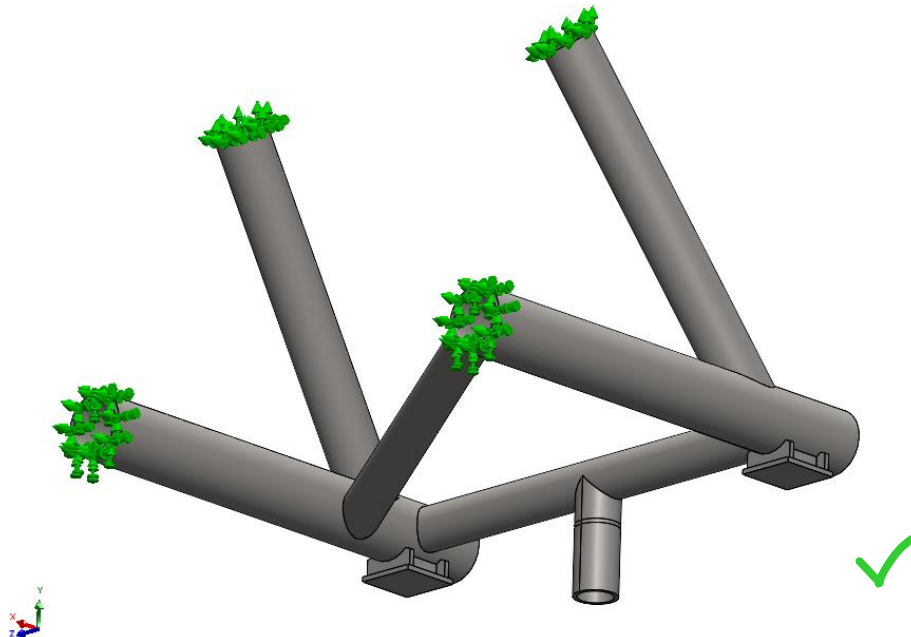






Abbildung 12-3: Randbedingungen - Detailmodell der Brückenlager für alle Brücken außer Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 98 von 171

### 12.2.2 Lasten

Die Designlasten aus Kapitel 9.6.3 (für alle Brücken außer Brücke B4) und aus Kapitel 10.6.3 (für Brücke B4) werden auf die vertikalen Auflager sowie den Pin aufgebracht.

Die vertikale Last (grün) sowie die Reibkraft (lila) wird auf den Gleitplatten aufgebracht. Die horizontale Last am Pin (orange) wurde mit einer parabolischen Kraftverteilung über den halben Durchmesser der Pin-Verbindung und konservativ am unteren Ende der Kontaktfläche aufgebracht.

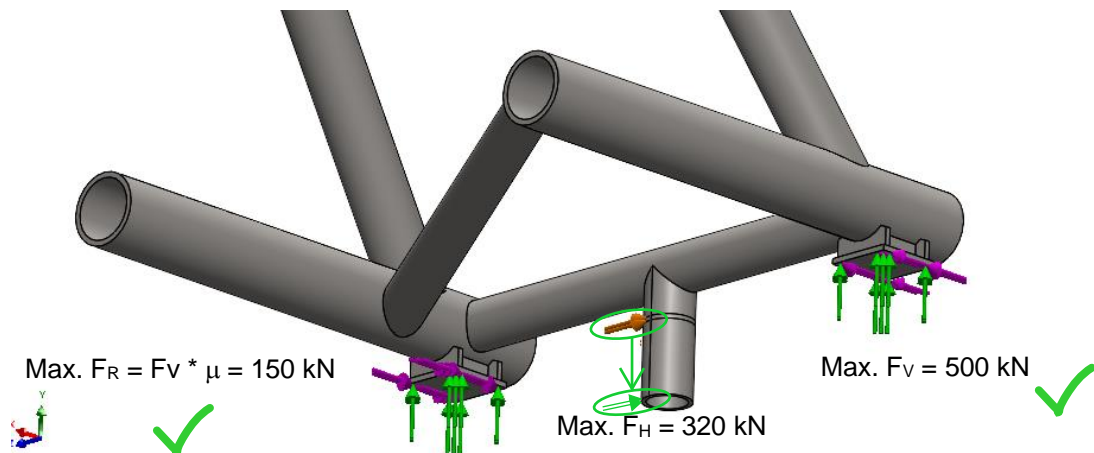


Abbildung 12-4: Lastaufbringung – Detailmodell der Brückenlager für alle Brücken außer Brücke B4

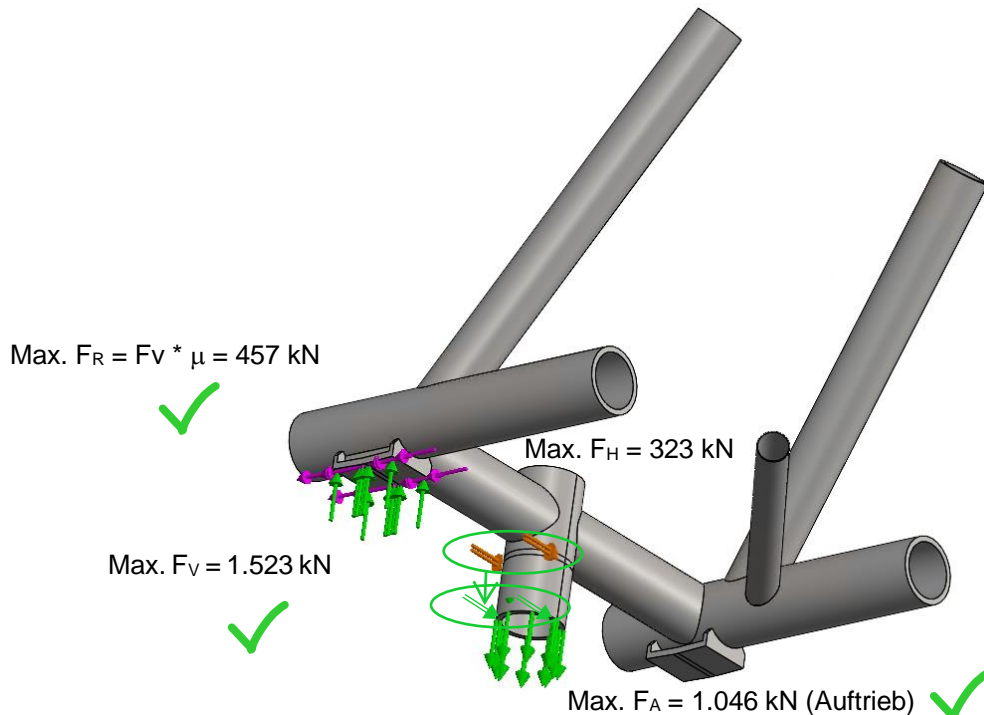







Abbildung 12-5: Lastaufbringung – Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 99 von 171

### 12.2.3 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse wird das Modell mit tetraedrischen Volumenkörperelementen vernetzt. Für das Detailmodell wird ein hochqualitatives Netz angewandt. Das Netz ist exemplarisch für die typische Lager für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.



Abbildung 12-6: FE-Netz - Detailmodell der Brückenlager

Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. Das Seitenverhältnis ist exemplarisch für die typische Lager für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

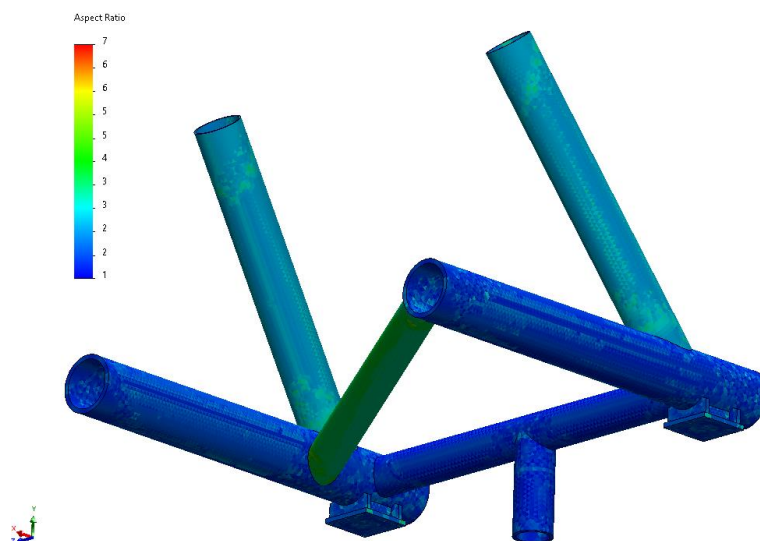







Abbildung 12-7: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente - Detailmodell der Brückenlager

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 100 von 171

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:






- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.

Tabelle 12-1: Netzdetails

Netztyp	Typische Lager für alle Brücken außer Brücke B4	Brücke B4
Verwendeter Netzgenerator	Kurvengestütztes Misch-Netz	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	25 mm	25 mm
Min. Elementgröße	8,33325 mm	25 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	273.544	363.034
Anzahl Elemente	142.589	208.677
Max. Seitenverhältnis	6,9596	11,802
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $< 3$	90,7	95,1
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $> 10$	0	0



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 101 von 171

#### 12.2.4 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für das brückenseitige Lager gezeigt.

##### 12.2.4.1 Spannungsergebnisse – alle außer B4

Die folgenden Spannungsplos zeigen den Verlauf der von Mises-Spannungen.

Die auftretenden Spannungen sind moderat. Die maximal auftretende von Mises-Spannung für die typische Lager für alle Brücken außer Brücke B4 von 234,7 MPa befindet sich unterhalb der maximal erlaubten Spannungsgrenze von 345 MPa. Die maximale Spannungsauslastung beträgt somit 68%.

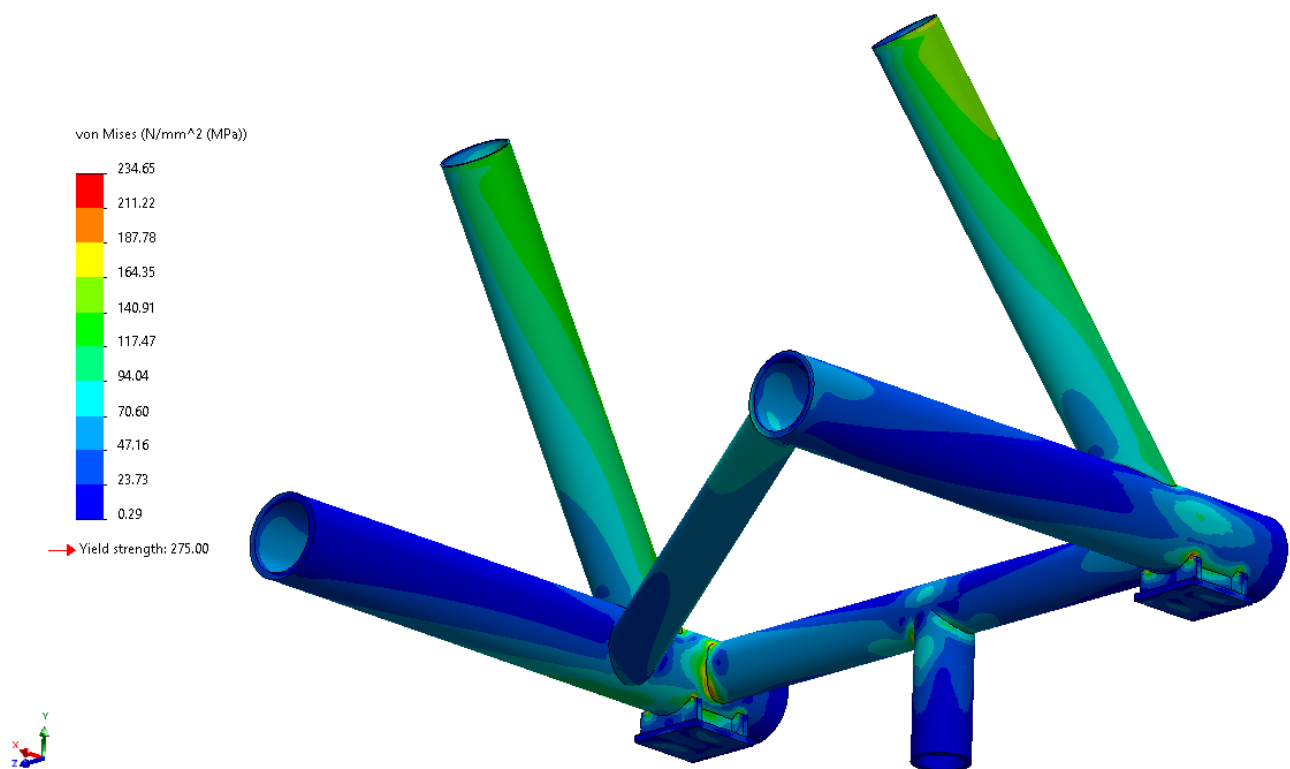






Abbildung 12-8: Spannungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 102 von 171

In der folgenden Abbildung sind die Spannungsergebnisse für das Brückenlager ohne Horizontallast am Pin gezeigt, da die auftretenden Spannungen vergleichsweise höher sind. Die Spannungsauslastung beträgt 77%.

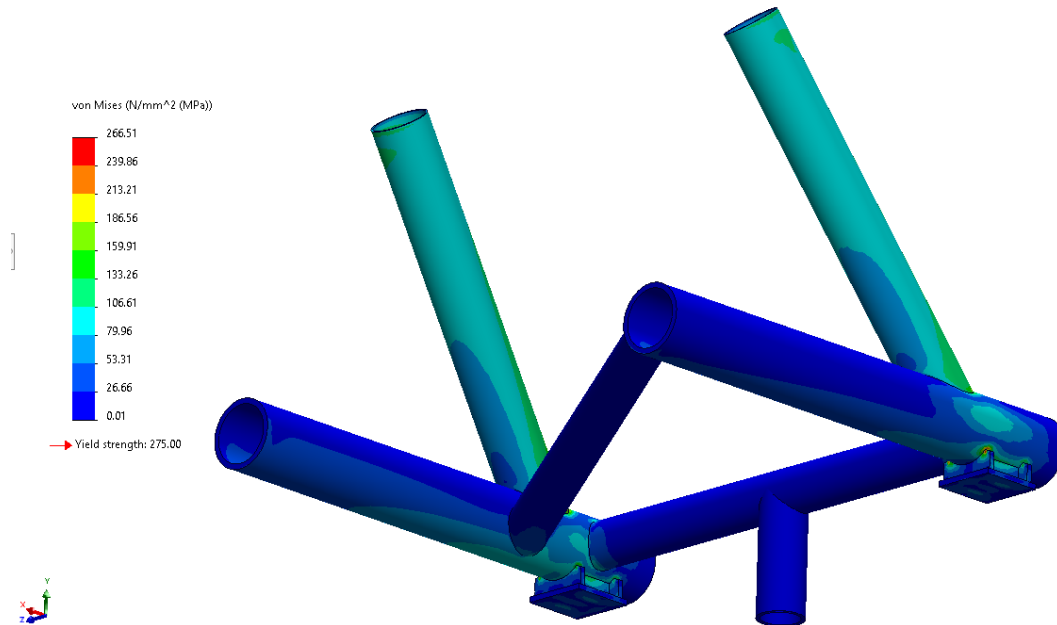






Abbildung 12-9: Spannungsergebnisse nur mit Vertikalkraft - Detailmodell der Lager für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 103 von 171

#### 12.2.4.2 Spannungsergebnisse – B4

Die folgende Abbildung zeigt die resultierenden von Mises Spannungen für die Lager für Brücke B4. Der Spannungsplot ist auf die zulässige Vergleichsspannung von 345 MPa limitiert. Alle Spannungen, die diesen Wert überschreiten werden in weiß dargestellt. Die Überspannungen treten Anschluss zwischen Pin und horizontaler Strebe auf. Es ist zu beachten, dass der Knotennachweis bereits in der Globalanalyse abgedeckt ist. Die Überspannungen hier treten nur oberflächlich auf und nicht durch die Elementdicke. Aufgrund der konservativen Last- und Lagerungs-Annahmen sind diese lokalen oberflächlichen Überspannungen unkritisch.

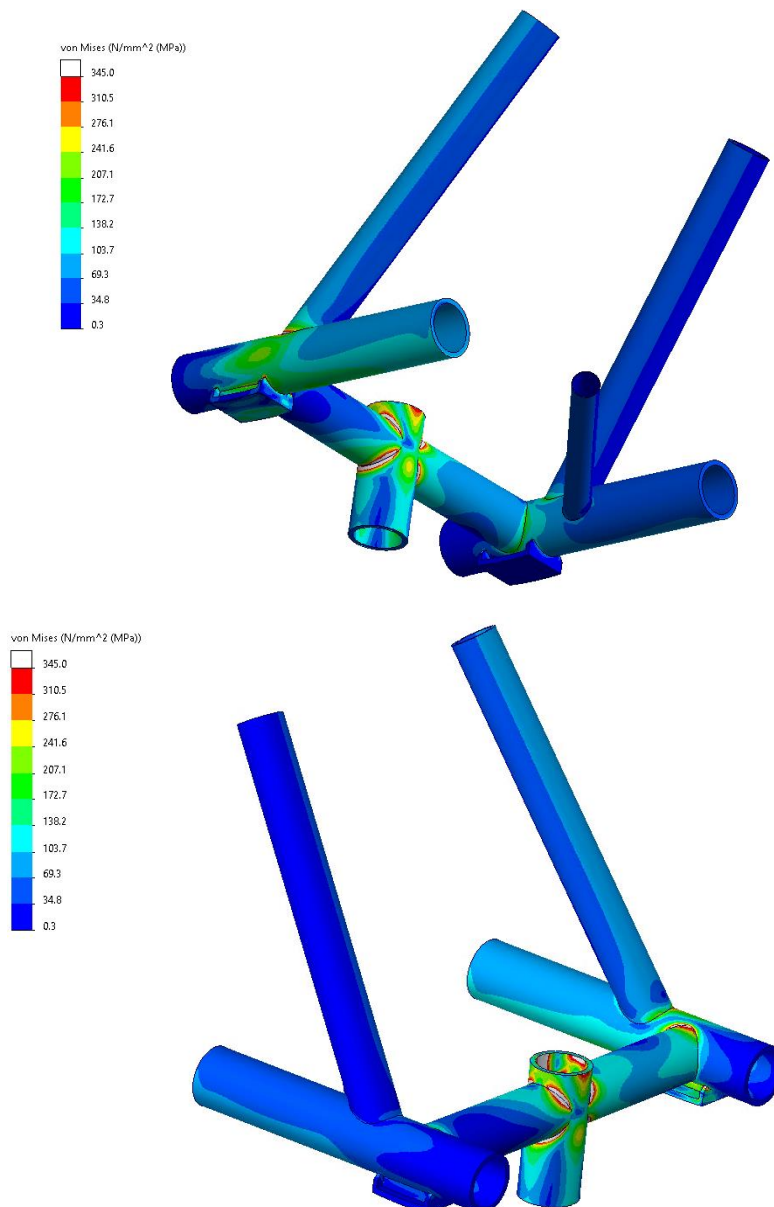






Abbildung 12-10: Spannungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 104 von 171

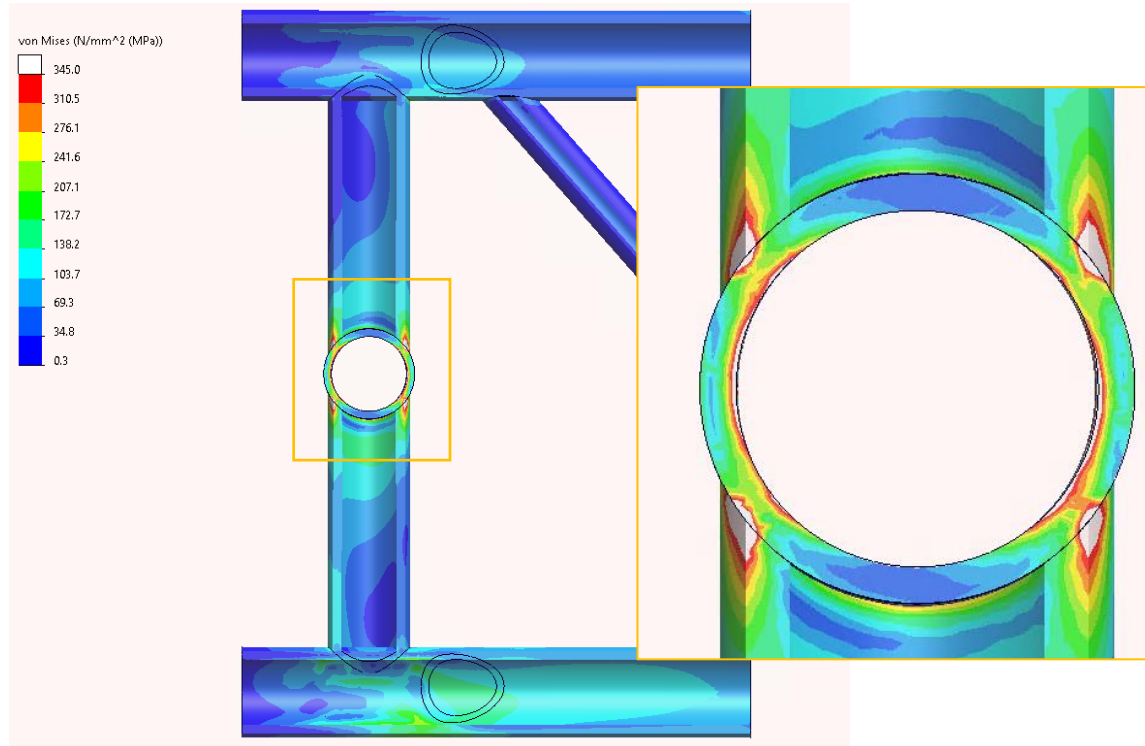


Abbildung 12-11: Spannungsergebnisse im Schnitt - Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4 ✓

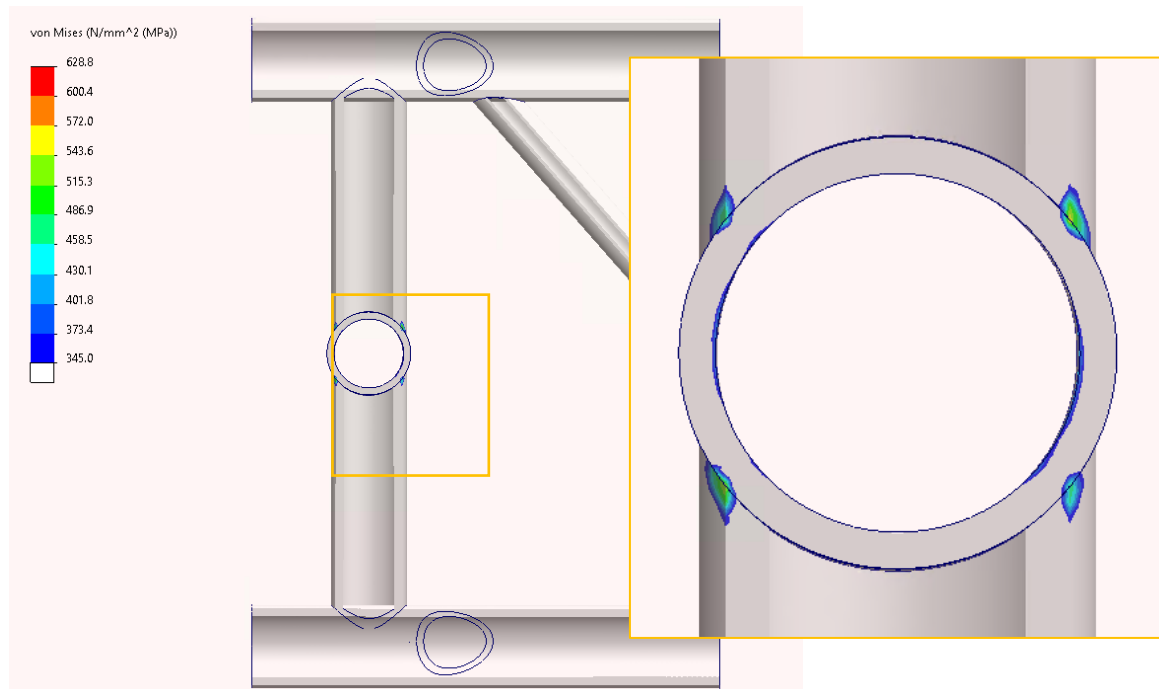






Abbildung 12-12: Überspannungen im Schnitt - Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4 ✓



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 105 von 171

### 12.2.4.3 Verformungen

Die Verformungen an beiden untersuchten Brückenlagern sind in der folgenden Abbildungen gezeigt.

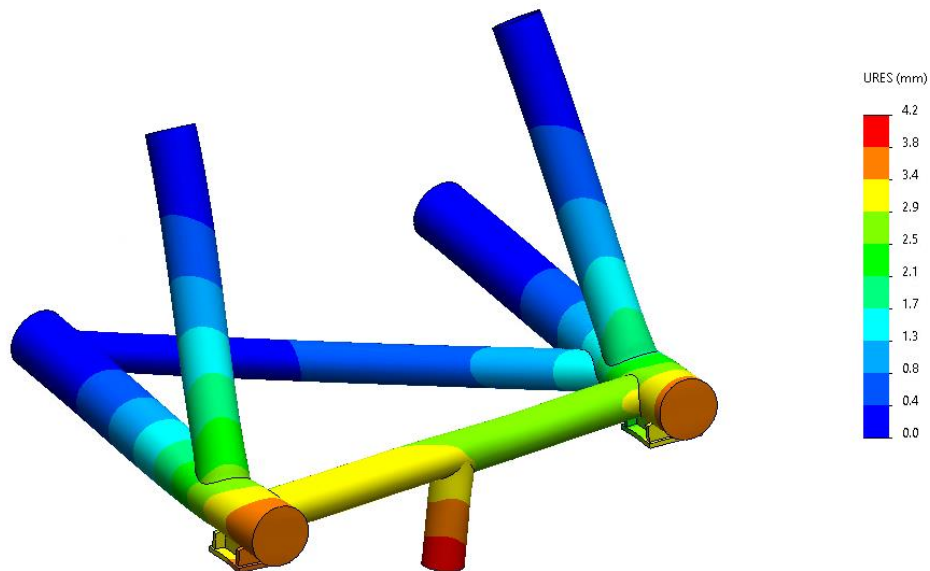


Abbildung 12-13: Verformungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager für alle Brücken außer Brücke B4

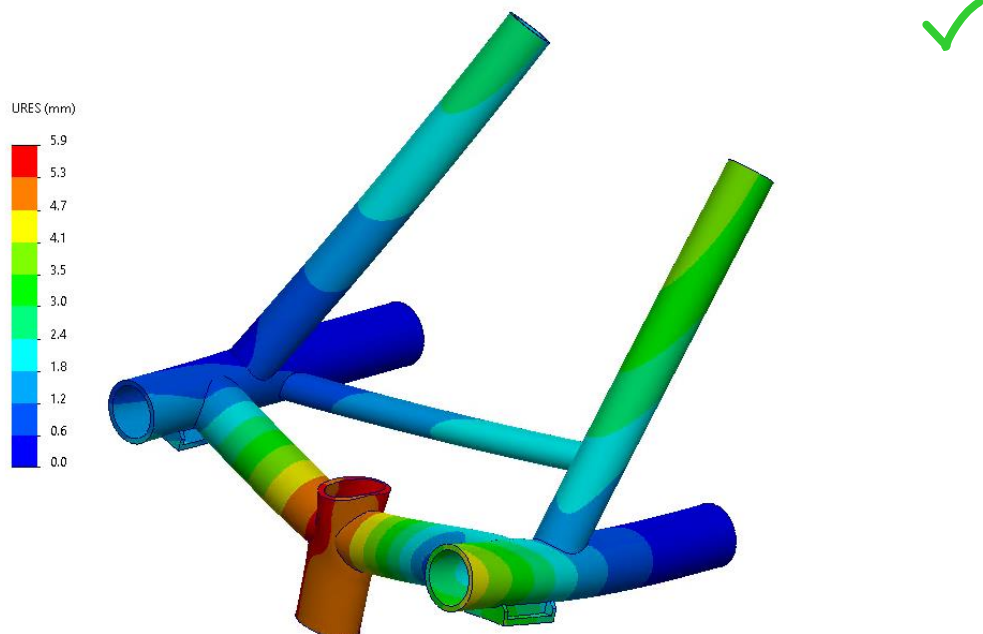






Abbildung 12-14: Verformungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager für Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 106 von 171

## 13 Brückenlager Details

### 13.1 Allgemeine Beschreibung

Zusätzlich zu der im vorigen Kapitel gezeigten Analyse der Anbindung der Brückenlager (Stützen und Verschiebeschuh an die Brückenstruktur), welche für Fest- und Loslager der Brücke identisch sind, werden in diesem Kapitel noch folgende weitere Detail-Nachweise beschrieben und ausgewertet. Unten ist die Übersicht der untersuchten Details.

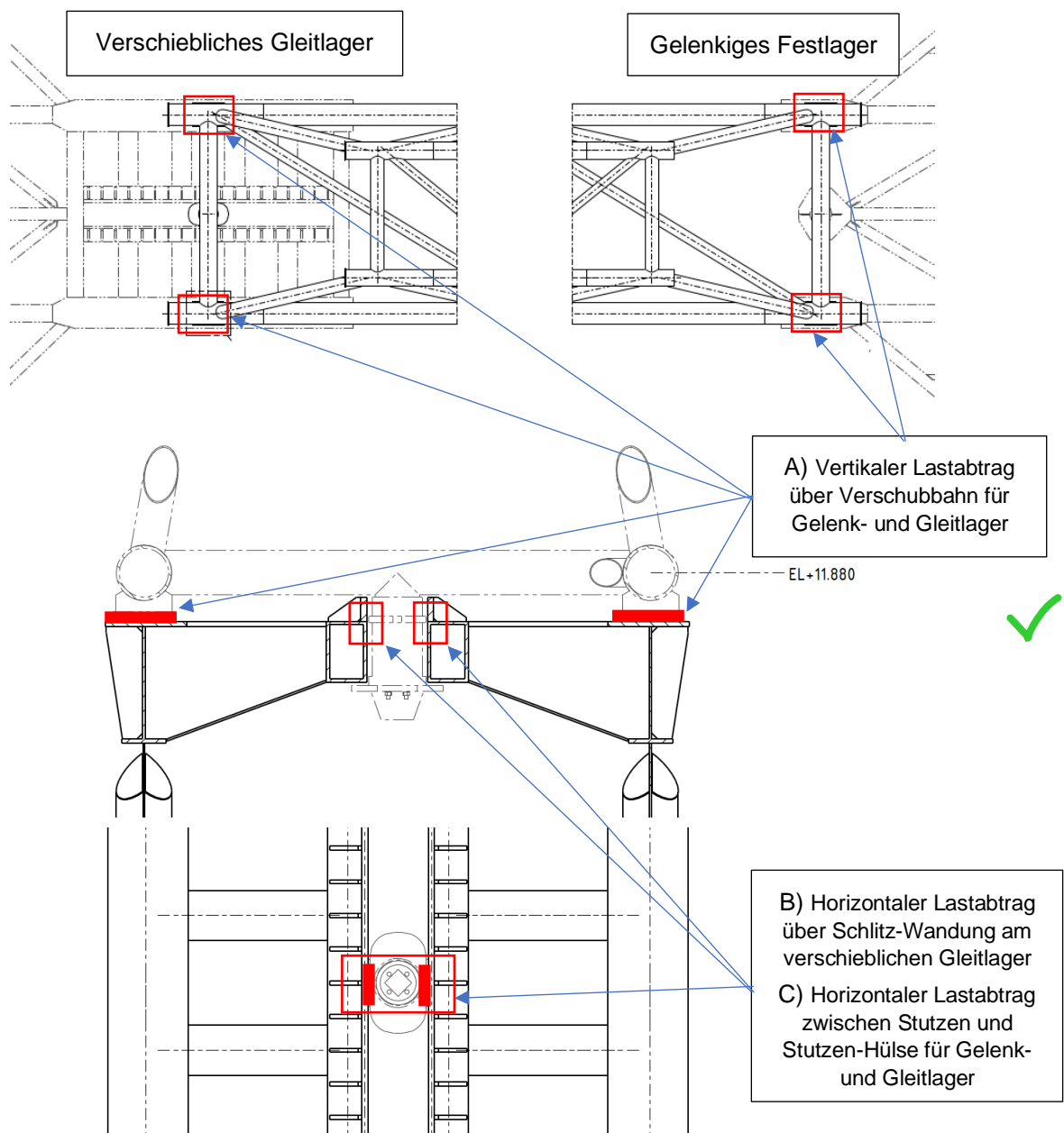







Abbildung 13-1: Übersicht der untersuchten Details

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 107 von 171

#### Detail-Nachweis für:

- Verschub-Schuh (vertikaler Kontaktdruck und lokale Spannungsverteilung im Verschub-Schuh), Kapitel 13.2,
- Schlitten-Platte (horizontaler Kontaktdruck und lokale Spannungsverteilung in der Schlitten-Platte), Kapitel 13.3,
- Abhebesicherung am Stützen (Schraubennachweis und Biege-Kapazität aus vertikaler Belastung), Kapitel 13.4.

Es wird hier ebenfalls nicht zwischen den Brückentypen außer Brücke B4 unterschieden, sondern es werden die maximalen Designlasten in Kapitel 12.2.2 für die Detail-Nachweise herangezogen. Der generelle Lastabtrag der Brücken-Lager ist schon in den vorigen Kapiteln ausreichend beschrieben. Die Details für Brücke B4 werden separat aufgrund der signifikant höheren Lasten nachgewiesen.

## 13.2 Verschub-Schuh

### 13.2.1 Beschreibung, Lagerung, Lasten

Für den lokalen Nachweis des Verschub-Schuhs ist konservativ das unten gezeigte Modell an jeweils einem Längs- und einem Quer-Rohr-Schnittufer verschieblich und rotatorisch fest gelagert. Die maximale vertikalen Auflager-Kraft von 500 kN und die zugehörige Reibkraft in Brücken-Längsrichtung (siehe Kapitel 9.6.3 und 12.2.2 ) wird auf die über den Kontaktdruck-Nachweis (siehe Anhang A) ermittelte Breite von 20 mm (siehe Kapitel 13.2.2) gleichmäßig nach oben gerichtet aufgebracht.

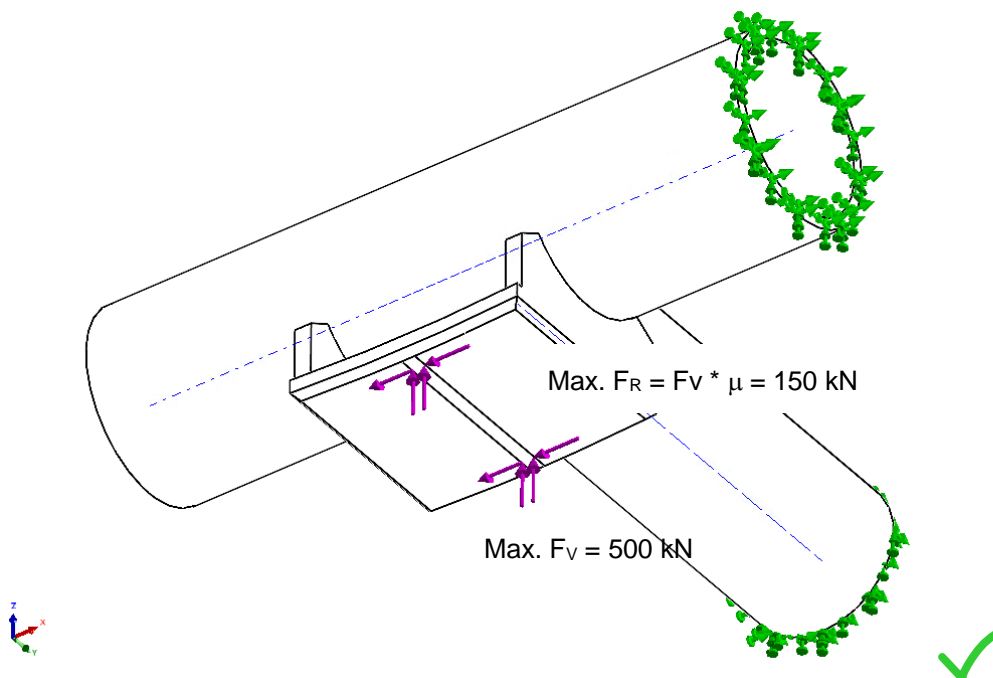







Abbildung 13-2: Verschub-Schuh, Typisch für alle Brücken außer Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 108 von 171

Die maximale vertikalen Auflager-Kraft für Brücke B4 von 1.523 kN und die zugehörige Reibkraft in Brücken-Längsrichtung (siehe Kapitel 10.6.3 und 12.2.2) wird auf die über den Kontaktdruck-Nachweis (siehe Anhang A) ermittelte Breite von 33 mm (siehe Kapitel 13.2.2) gleichmäßig nach oben gerichtet aufgebracht.

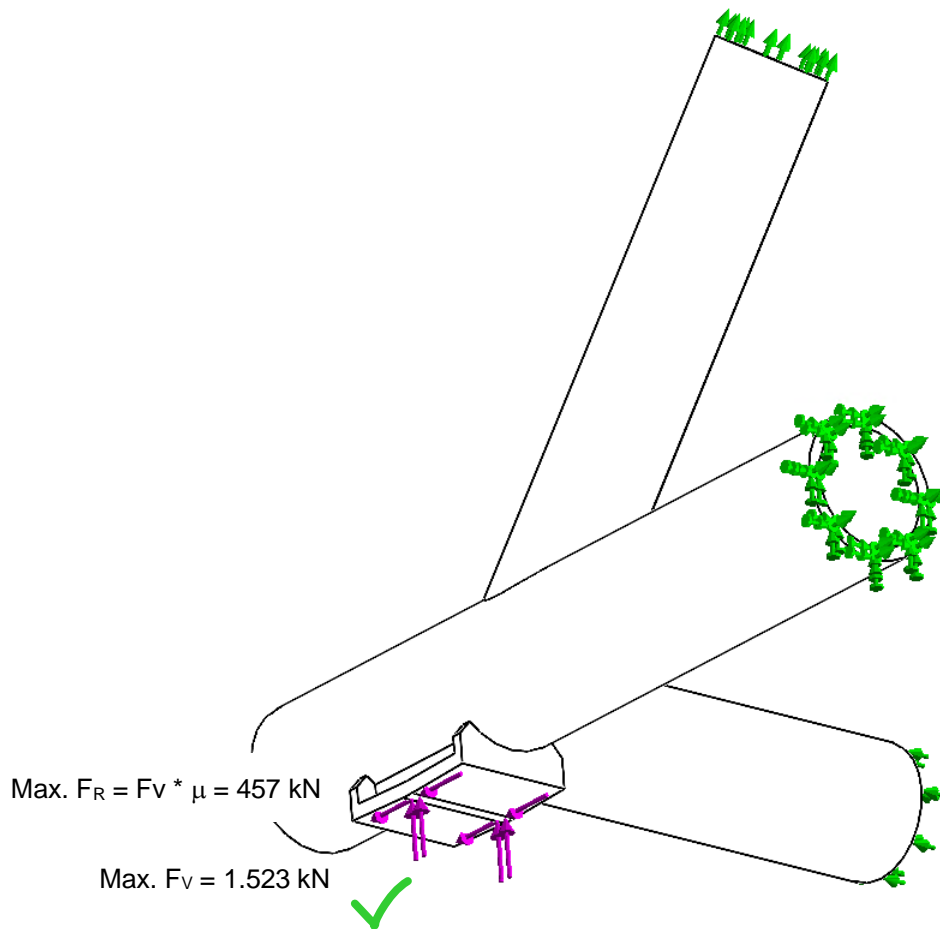







Abbildung 13-3: Verschub-Schuh, Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 109 von 171

### 13.2.2 Ermittlung / Nachweis Kontaktdruck-Fläche

Für die Ermittlung der anzusetzenden Kontaktdruckfläche ist in diesem Kapitel bzw. dem referenzierten Anhang A der Nachweis der „Herzschen Pressung“ geführt. Daraus wird auch die zu erwartende Kontaktflächen-Breite unter Ansatz der folgenden Randbedingungen ermittelt.

- Max. Vertikalkraft
  - o (siehe Kapitel 9.6.3 und 12.2.2)  $F_v = 500 \text{ kN}$  für alle Brücken außer Brücke B4
  - o (siehe Kapitel 10.6.3 und 12.2.2)  $F_v = 1.523 \text{ kN}$  für Brücke B4
- 2 starre Kontaktflächen
  - o 1 ebene Fläche ✓
  - o 1 leicht gebogenen Fläche (Radius 2.500 mm)

Daraus resultiert (siehe Anhang A):

Für alle Brücken außer Brücke B4

- Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 229 \text{ N/mm}^2$   $\rightarrow p_H/p_{zul} = 0.53 < 1.0$
- Breite der Kontaktfläche  $b = 2 \cdot a = 2 \cdot 9.9 \text{ mm}$   $\rightarrow b = 20 \text{ mm}$  ✓

Für Brücke B4

- Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 400 \text{ N/mm}^2$   $\rightarrow p_H/p_{zul} = 0.92 < 1.0$
- Breite der Kontaktfläche  $b = 2 \cdot a = 2 \cdot 16.5 \text{ mm}$   $\rightarrow b = 33 \text{ mm}$  ✓

### 13.2.3 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse wird das Modell mit tetraedrischen Volumenkörperelementen vernetzt. Für das Detailmodell wird ein hochqualitatives Netz angewandt. Das Netz ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

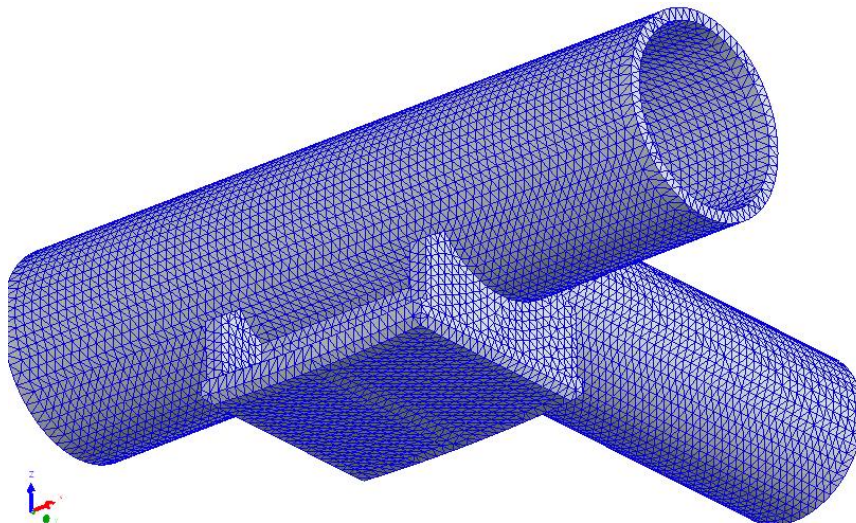







Abbildung 13-4: FE-Netz - Verschub-Schuh ✓

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 110 von 171

Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. Das Seitenverhältnis ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

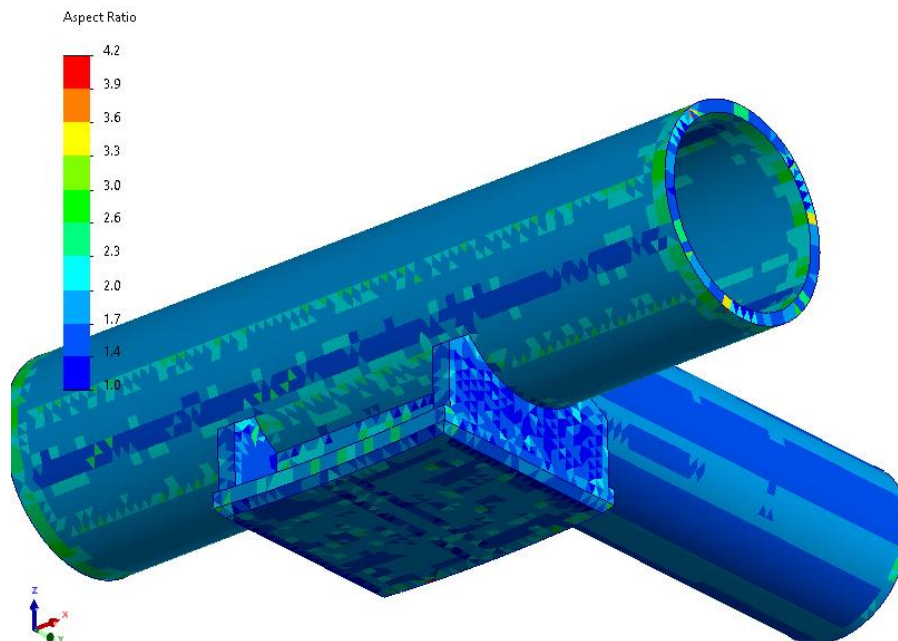


Abbildung 13-5: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente – Verschub-Schuh

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:

- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.















  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 111 von 171

Tabelle 13-1: Netzdetails

Netztyp	Typische Details für alle Brücken außer Brücke B4	Details für Brücke B4
Verwendeter Netzgenerator	Standard Netz	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	25 mm	25 mm
Min. Elementgröße	13,5018 mm	25 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	137.009	142.372
Anzahl Elemente	79.308	83.346
Max. Seitenverhältnis	4,2391	3.8154
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis < 3	99,9	100
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis > 10	0	0



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 112 von 171

### 13.2.4 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für das brückenseitige Lager gezeigt.

#### 13.2.4.1 Spannungsergebnisse – alle außer B4

Die folgenden Spannungsplots zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen bei der typischen Details für alle Brücken außer Brücke B4.

Die auftretenden Spannungen sind moderat und im allgemein unterhalb der erlaubten Spannungsgrenze von 345 MPa. Die leichte Überspannungen treten nur an die Oberfläche und sind vernachlässigbar.

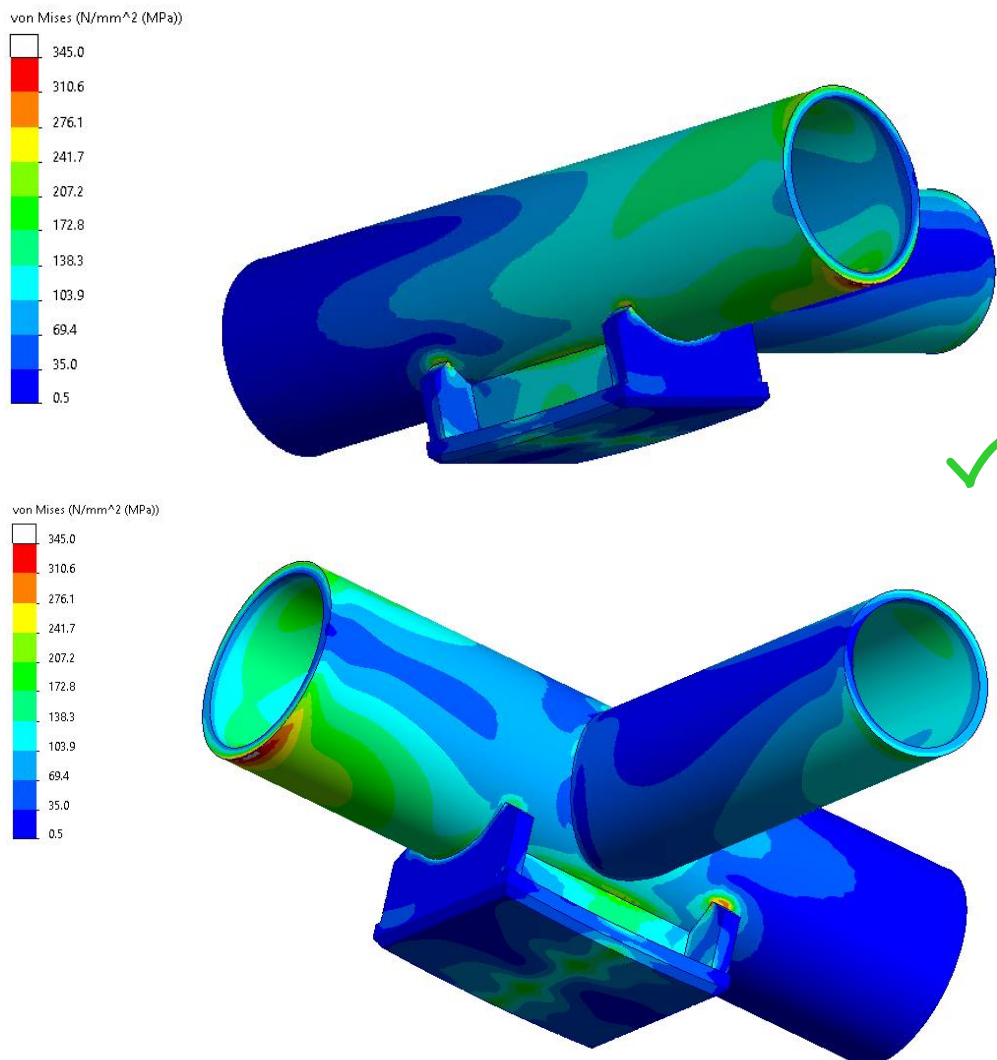







Abbildung 13-6: Spannungsergebnisse – Verschub-Schuh für alle Bücken außer Brücke B4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 113 von 171

#### 13.2.4.2 Spannungsergebnisse – B4

Die auftretenden Spannungen für Brücke B4 sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits. Die Überspannungen in der Zugzone des Bauteils sind sehr lokal und treten nur oberflächlich auf und nicht durch die Dicke des Bauteils. Es wird hier zu leichtem lokalem Fließen kommen. Die lokale Überspannung ist hier nicht kritisch und somit akzeptabel.

Die auftretenden Überspannungen am unteren Rand der Grundplatte sind zwar oberhalb der erlaubten Spannungsgrenze, befinden sich aber in der Druckzone des Bauteils. Diese Überspannungen sind deshalb ebenfalls nicht kritisch und sind vernachlässigbar.

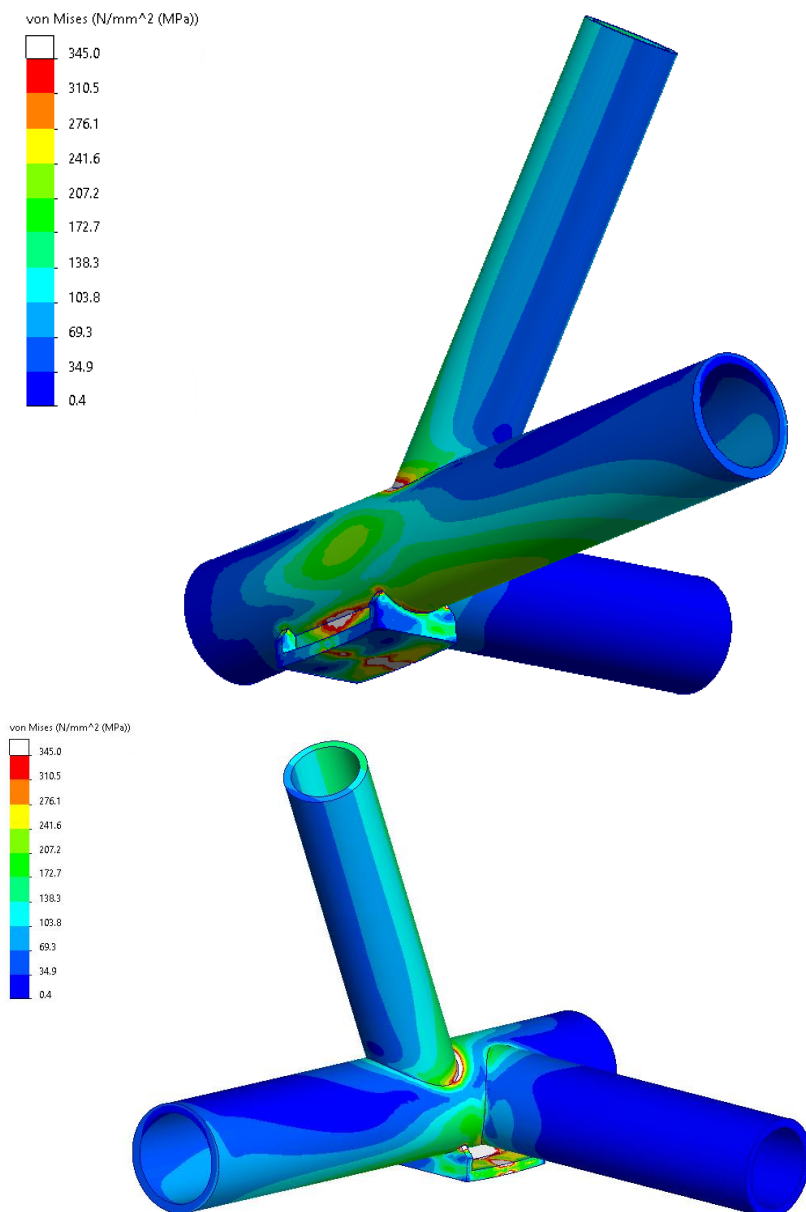






Abbildung 13-7: Spannungsergebnisse – Verschub-Schuh für Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 114 von 171

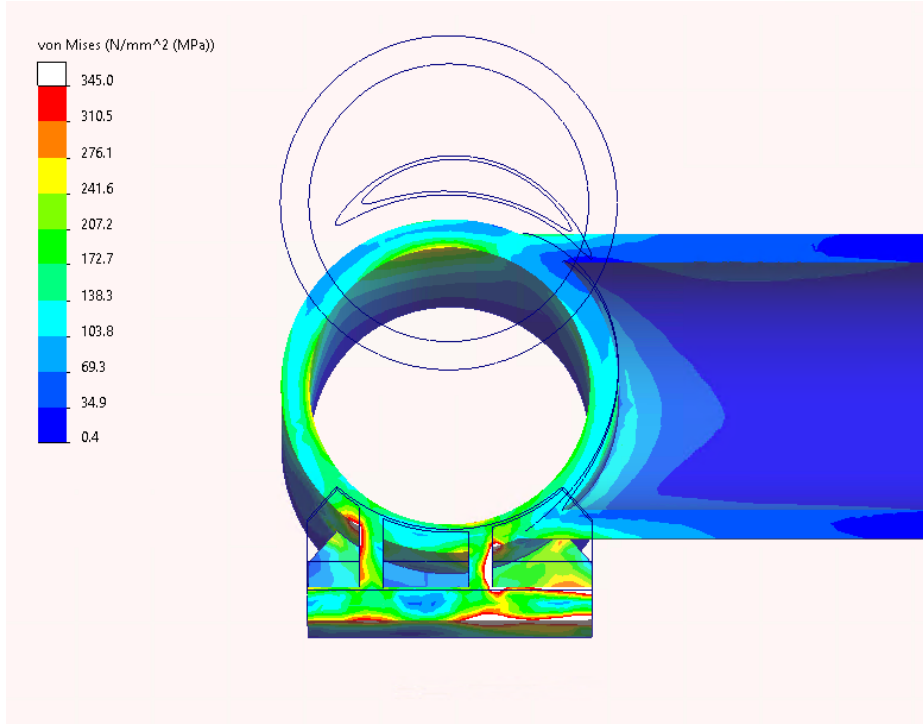


Abbildung 13-8: Spannungsergebnisse im Schnitt – Verschub-Schuh für Brücke B4

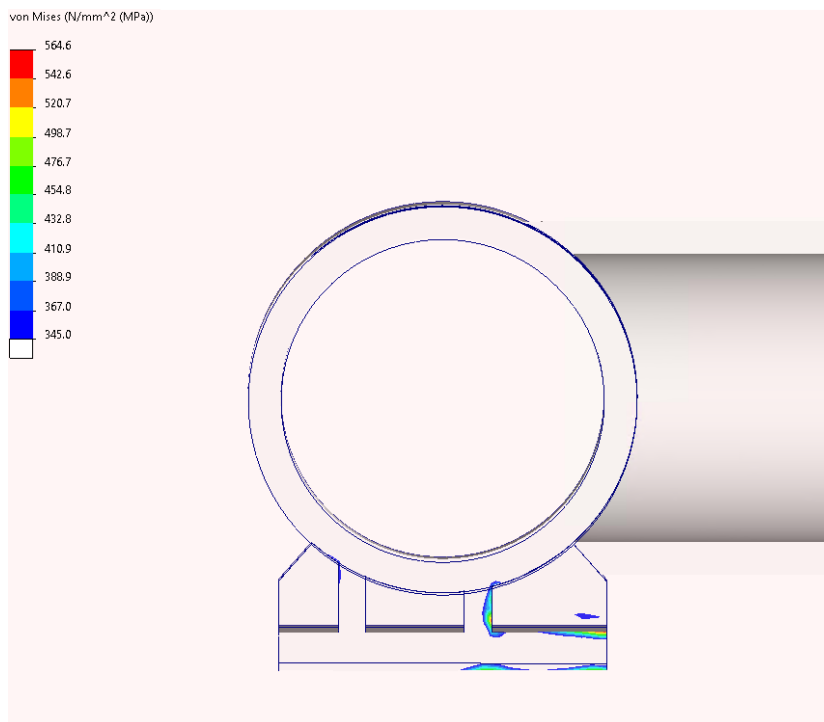






Abbildung 13-9: Überspannungen im Schnitt – Verschub-Schuh für Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 115 von 171

### 13.2.4.3 Verformungen

Die Verformungen für beide untersuchten Verschub-Schuh Details sind in den folgenden Abbildungen gezeigt.

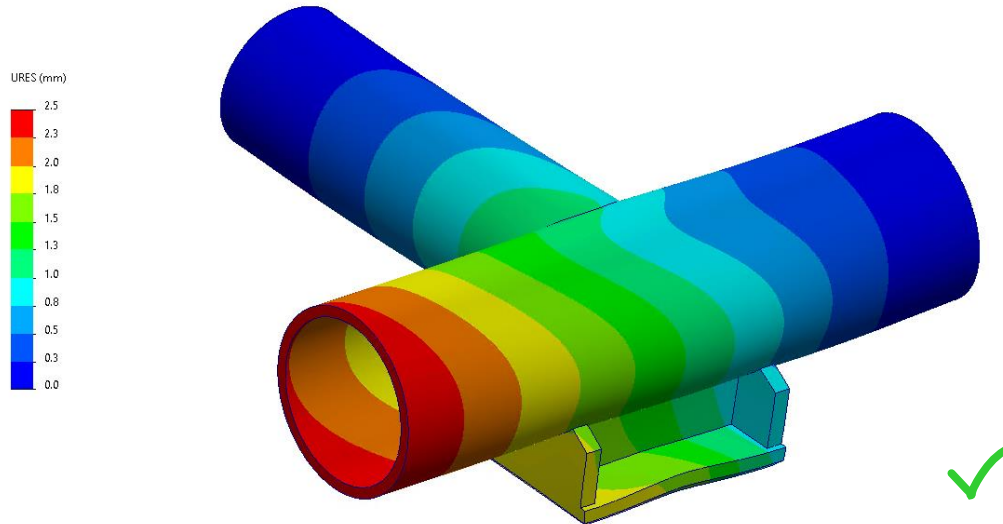


Abbildung 13-10: Verformungsergebnisse – Verschub-Schuh für alle Brücken außer Brücke B4

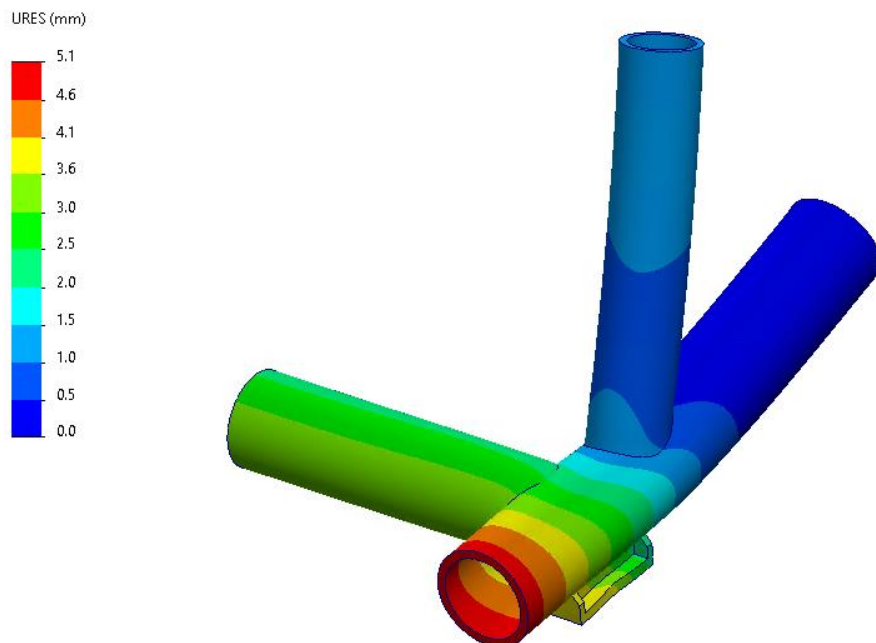




Abbildung 13-11: Verformungsergebnisse – Verschub-Schuh für Brücke B4

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 116 von 171

### 13.3 Schlitten-Platte

#### 13.3.1 Beschreibung, Lagerung, Lasten

Für den lokalen Nachweis der Schlitten-Platte ist konservativ das unten gezeigte Model an der unteren Innenkanten vertikal, am oberen Innenrand in Plattenlängsrichtung und nur entlang der Kontaktseite über eine Länge von 104 mm (siehe Kontaktdruckermittlung in Anhang B) in Querrichtung unverschieblich gehalten. Die maximale horizontale Auflager-Kraft von 320 kN (siehe Kapitel 9.6.3 und 12.2.2) wird auf die über den Kontaktdruck-Nachweis (siehe Anhang B) ermittelte Breite von 48 mm (siehe Kapitel 13.3.2) gleichmäßig nach außen gerichtet aufgebracht.

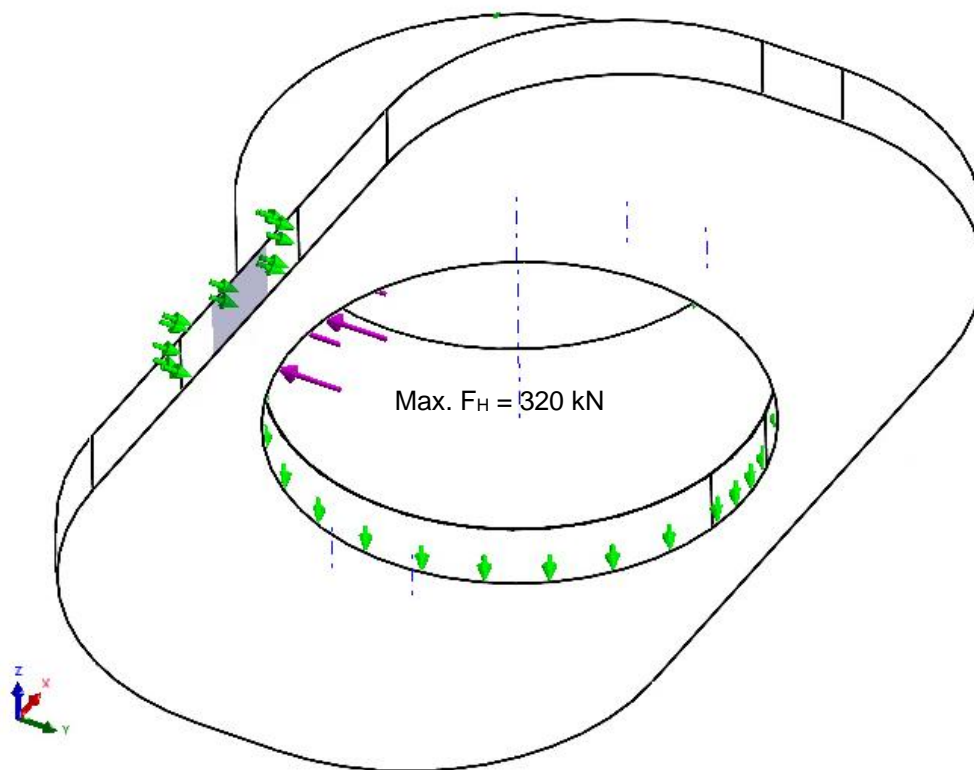







Abbildung 13-12: Schlitten-Platte für alle Brücken außer Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten





  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 117 von 171

Für den lokalen Nachweis der Schlitten-Platte für Brücke B4 ist konservativ das unten gezeigte Model an der unteren Innenkanten vertikal, am oberen Innenrand in Plattenlängsrichtung und nur entlang der Kontaktseite über eine Länge von 115 mm (siehe Kontaktdruckermittlung in Anhang B) in Querrichtung unverschieblich gehalten. Die maximale horizontale Auflager-Kraft von 332 kN (siehe Kapitel 10.6.3 und 12.2.2) wird auf die über den Kontaktdruck-Nachweis (siehe Anhang B) ermittelte Breite von 40 mm (siehe Kapitel 13.3.2) gleichmäßig nach außen gerichtet aufgebracht.

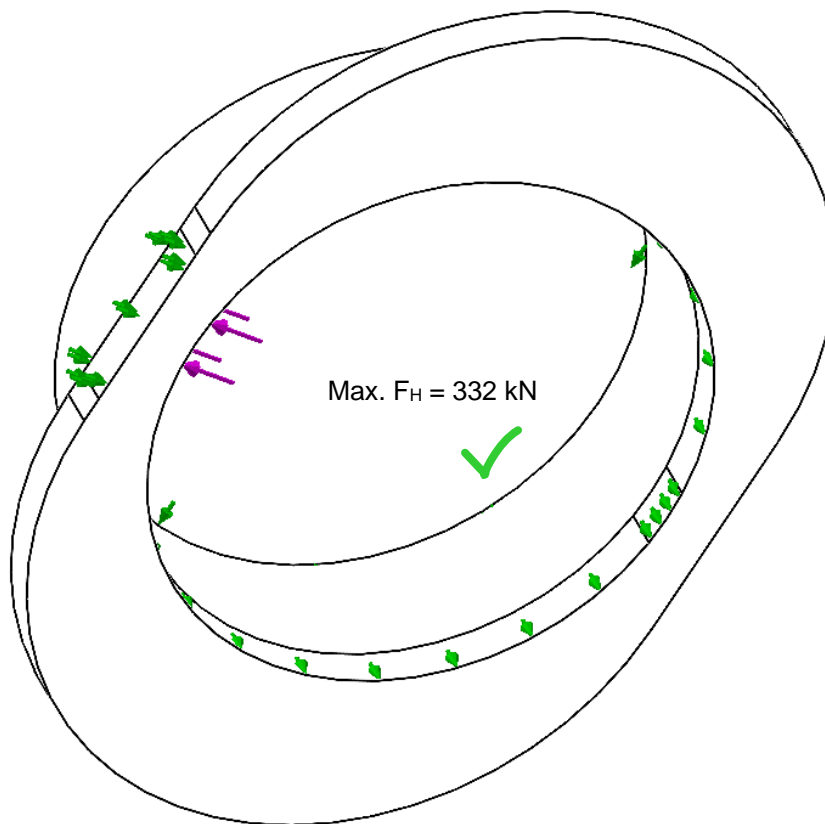







Abbildung 13-13: Schlitten-Platte für Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 118 von 171

### 13.3.2 Ermittlung / Nachweis Kontaktdruck-Fläche






Für die Ermittlung der anzusetzenden Kontaktdruckfläche ist in diesem Kapitel bzw. dem referenzierten Anhang B der Nachweis der „Herzschen Pressung“ zwischen Stützen und Schlitten-Platte sowie eines gleichmäßigen ebenen Kontaktdrucks zwischen Schlitten-Platte und Schlitz-Wandung geführt.

Daraus wird auch die zu erwartende Kontaktflächen-Breite unter Ansatz der folgenden Randbedingungen ermittelt.

- Max. Horizontalkraft
  - o (siehe Kapitel 9.6.3 und 12.2.2)  $F_H = 320 \text{ kN}$  (für alle Brücken außer Brücke B4) ✓
  - o (siehe Kapitel 10.6.3 und 12.2.2)  $F_H = 332 \text{ kN}$  (für Brücke B4) ✓
- jeweils 2 starre Kontaktflächen:
  - o Stützen in Schlitten-Platte → 1 konvexe Kontaktfläche in 1 konkave Kontaktfläche,
  - o Schlitten-Platte auf Schlitz-Wandung → 1 ebene Kontaktfläche auf 1 eben Kontaktfläche.

Daraus resultiert (siehe Anhang B) für:

- Stützen in Schlitten-Platte für alle Brücken außer Brücke B4:
  - Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 283 \text{ N/mm}^2$  →  $p_H/p_{zul} = 0.65 < 1.0$ ,
  - Breite der Kontaktfläche  $b = 2 \cdot a = 2 \cdot 24 \text{ mm}$  →  $b = 48 \text{ mm}$  ✓
- Stützen in Schlitten-Platte für Brücke B4:
  - Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 341 \text{ N/mm}^2$  →  $p_H/p_{zul} = 0.78 < 1.0$ ,
  - Breite der Kontaktfläche  $b = 2 \cdot a = 2 \cdot 20 \text{ mm}$  →  $b = 40 \text{ mm}$
- Schlitten-Platte auf Schlitz-Wandung für alle Brücken außer Brücke B4:
  - Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 103 \text{ N/mm}^2$  →  $p_H/p_{zul} = 0.24 < 1.0$ ,
  - Breite der Kontaktfläche  $b = 104 \text{ mm}$  ✓
- Schlitten-Platte auf Schlitz-Wandung für Brücke B4:
  - Max. Kontaktdruck (Hertz)  $p_H = 96 \text{ N/mm}^2$  →  $p_H/p_{zul} = 0.22 < 1.0$ ,
  - Breite der Kontaktfläche  $b = 115 \text{ mm}$  ✓

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 119 von 171

### 13.3.3 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse wird das Modell mit tetraedrischen Volumenkörperelementen vernetzt. Für das Detailmodell wird ein hochqualitatives Netz angewandt. Das Netz ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

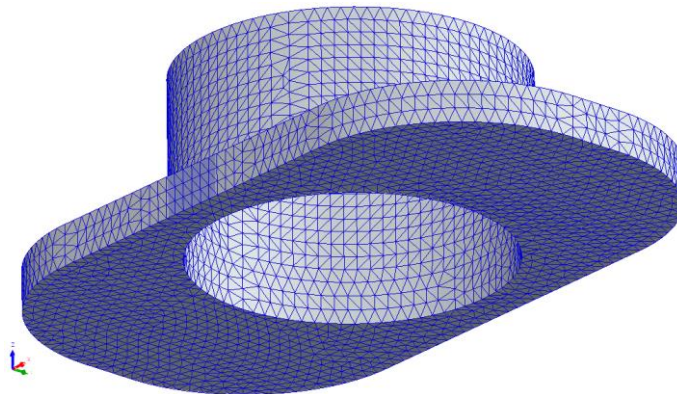


Abbildung 13-14: FE-Netz – Schlitten-Platte

Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. Das Seitenverhältnis ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

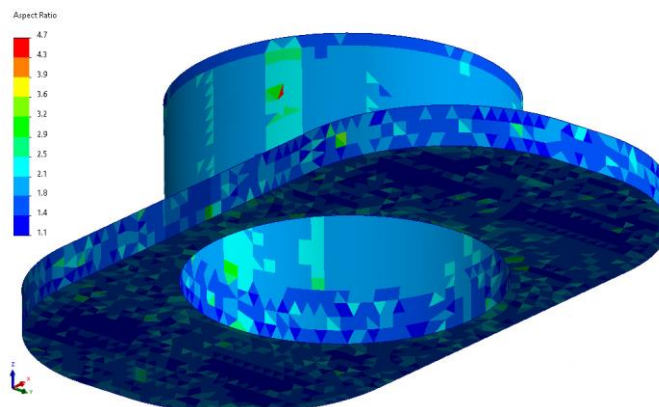


Abbildung 13-15: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente – Schlitten-Platte

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:

- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.













  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 120 von 171

Tabelle 13-2: Netzdetails

Netztyp	Typische Details für alle Brücken außer Brücke B4	Details für Brücke B4
Verwendeter Netzgenerator	Standard Netz	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	8,99941 mm	10 mm
Min. Elementgröße	0,449971 mm	10 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	57.067	81.687
Anzahl Elemente	35.650	51.065
Max. Seitenverhältnis	4,6633	3.3584
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis < 3	99,9	100
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis > 10	0	0



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 121 von 171

### 13.3.4 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen für die brückenseitige Schlitten-Platte gezeigt.

#### 13.3.4.1 Spannungsergebnisse – alle außer B4

Die folgenden Spannungsplots zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen bei der typischen Details für alle Brücken außer Brücke B4.

Die auftretenden Spannungen sind moderat. Die maximal auftretende „von Mises“-Spannung von 239 MPa befindet sich unterhalb der maximal erlaubten Spannungsgrenze von 345 MPa. Die maximale Spannungsauslastung beträgt somit 69%.

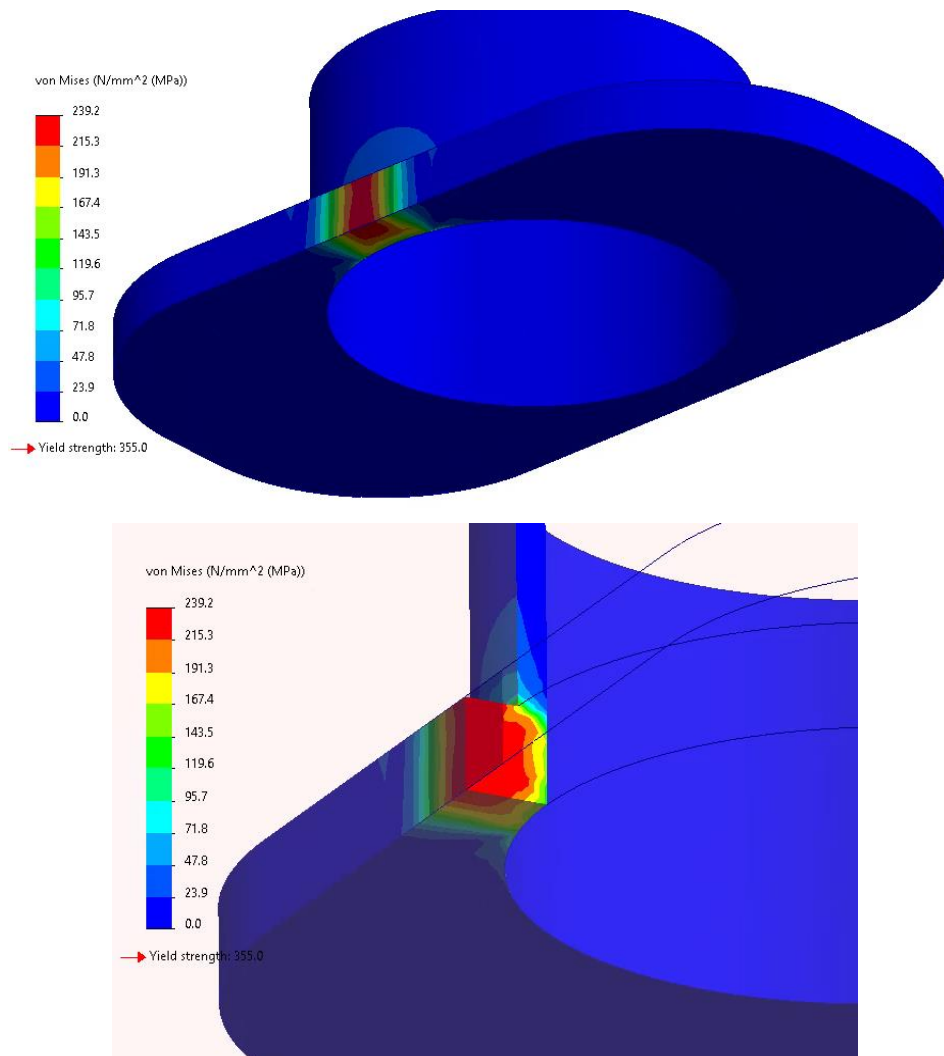







Abbildung 13-16: Spannungsergebnisse – Schlitten-Platte für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 122 von 171

### 13.3.4.2 Spannungsergebnisse – B4

Die folgenden Spannungsplos zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen bei der Details für Brücke B4. Die auftretenden Spannungen sind moderat. Die maximal auftretende „von Mises“-Spannung von 285 MPa befindet sich unterhalb der maximal erlaubten Spannungsgrenze von 345 MPa. Die maximale Spannungsauslastung beträgt somit 83%.

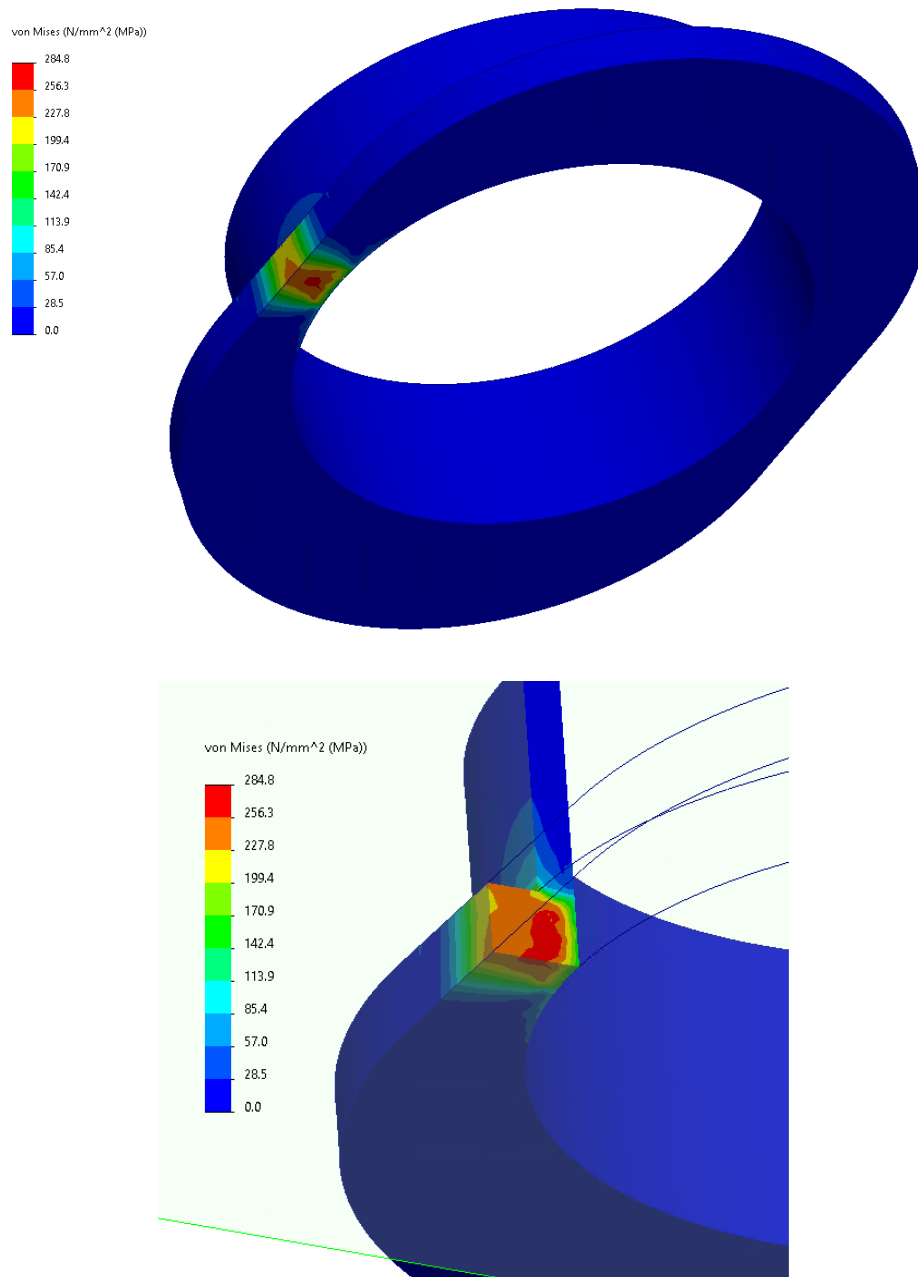






Abbildung 13-17: Spannungsergebnisse – Schlitten-Platte für Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 123 von 171

### 13.4 Abhebesicherung am Stutzen

#### 13.4.1 Allgemeines

Für den lokalen Nachweis der Abhebesicherung am Stutzen werden konservativ die folgenden zwei Bauteile separat voneinander betrachtet und nicht im Verbund / Interaktion miteinander.

- Platte am Stutzen (A)
- und die
- geschraubte Sicherungsplatte (B-L, B-F)

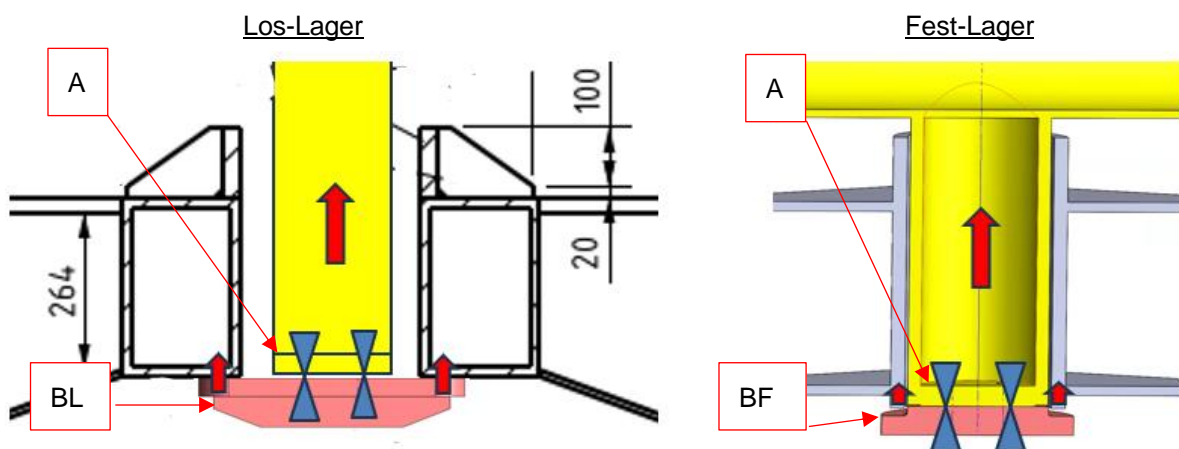




Abbildung 13-18: Schematische Darstellung der Abhebesicherung (rot) am Stutzen (gelb)

Beide Bauteile (Stutzen und Sicherungsplatte) sind aus S355 zu fertigen und mit jeweils 4 Schrauben M20-8.8 für alle Brücken außer Brücke B4 und 8 Schrauben M22-8.8 für Brücke B4 ohne planmäßige Vorspannung verbunden. Die Schrauben sind mittels Sicherungsscheiben oder adequate Mittel gegen Lösen zu sichern.



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 124 von 171

### 13.4.2 Platte am Stutzen

#### 13.4.2.1 Beschreibung, Lagerung, Lasten

Für den Detail-Nachweis der Platte am Stutzen ist konservativ das unten gezeigte Modell an jeweils dem oberen Schraubenloch-Rand in allen 3 Richtungen unverschieblich gehalten. Die geschätzte maximal auftretende vertikale Abhebe-Kraft von 338 kN (siehe Annex C) für alle Brücken außer Brücke B4 wird auf die obere Querschnittsfläche der Stutzenwandung gleichmäßig nach oben gerichtet aufgebracht. Die maximale Abhebekraft für Brücke B4 wie in Kapitel 10.6.3 beschrieben beträgt 1.050 kN.

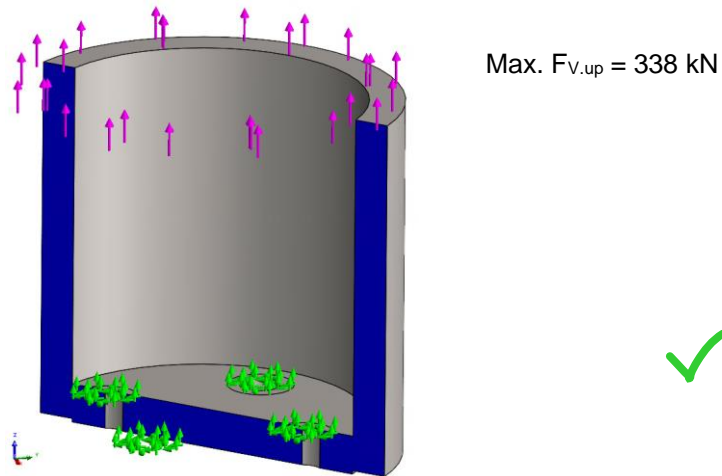


Abbildung 13-19: Platte am Stutzen für alle Brücken außer Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

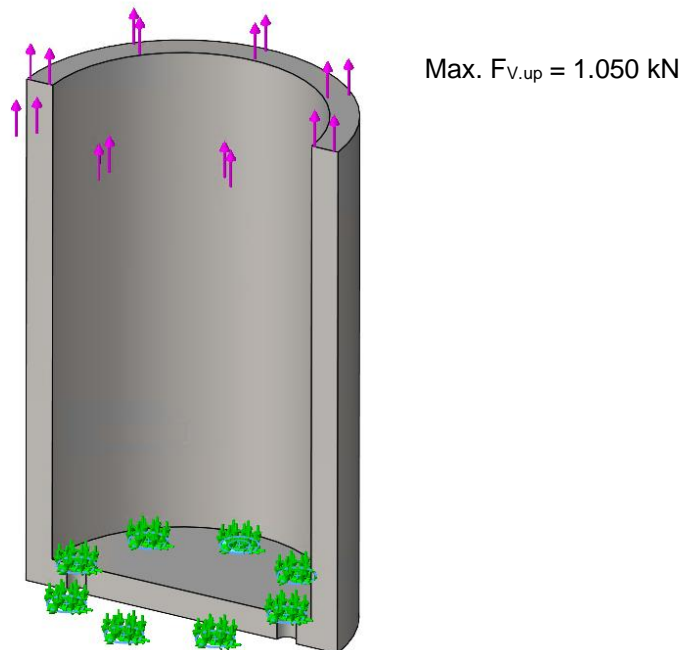







Abbildung 13-20: Platte am Stutzen für Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 125 von 171

### 13.4.2.2 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse wird das Modell mit tetraedrischen Volumenkörperelementen vernetzt. Für das Detailmodell wird ein hochqualitatives Netz angewandt. Das Netz ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

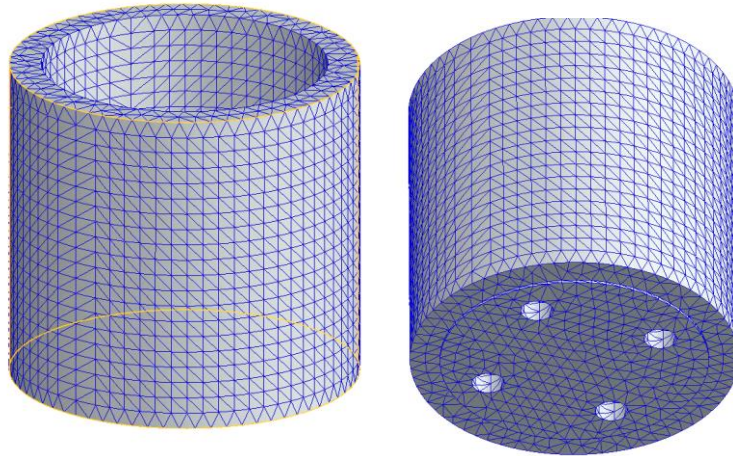


Abbildung 13-21: FE-Netz – Platte am Stutzen

Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. Das Seitenverhältnis ist exemplarisch für die typische Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

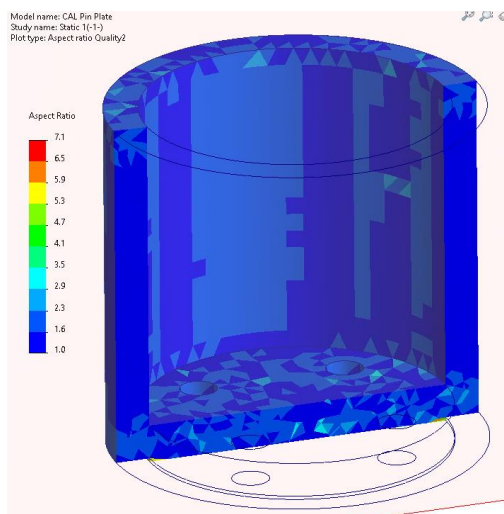







Abbildung 13-22: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente – Platte am Stutzen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 126 von 171

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:






- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.

Tabelle 13-3: Netzdetails

Netztyp	Typische Details für alle Brücken außer Brücke B4	Details für Brücke B4
Verwendeter Netzgenerator	Standard Netz	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	10,2367 mm	10 mm
Min. Elementgröße	0,511833 mm	10 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	33.091	244.507
Anzahl Elemente	20.012	160.563
Max. Seitenverhältnis	7,1275	4,7327
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $< 3$	98,9	99,8
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $> 10$	0	0



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 127 von 171

### 13.4.2.3 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für die brückenseitige Stützen-Platte gezeigt.

#### 13.4.2.3.1 Spannungsergebnisse – alle außer B4

Die folgenden Spannungsplots zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen für die typischen Details aller Brücken außer Brücke B4.

Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits. Die leichte Überspannungen treten am oberen Schraubenlochrand als Druckspannung auf und sind deshalb vernachlässigbar.

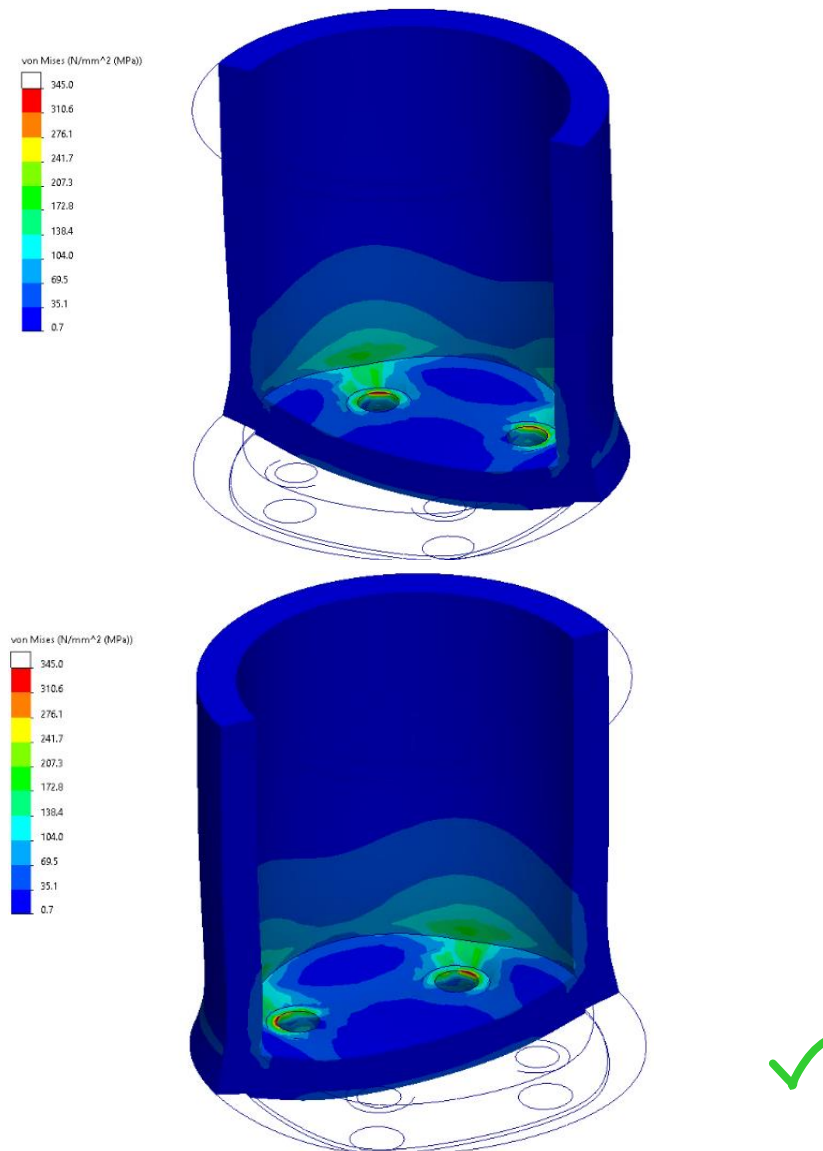






Abbildung 13-23: Spannungsergebnisse – Platte am Stützen für alle Brücken außer Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 128 von 171

#### 13.4.2.3.2 Spannungsergebnisse – B4

Die folgenden Spannungsplos zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen bei der Details für Brücke B4. Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits. Die Überspannungen treten am oberen Schraubenlochrand als Druckspannung auf und ist deshalb vernachlässigbar.

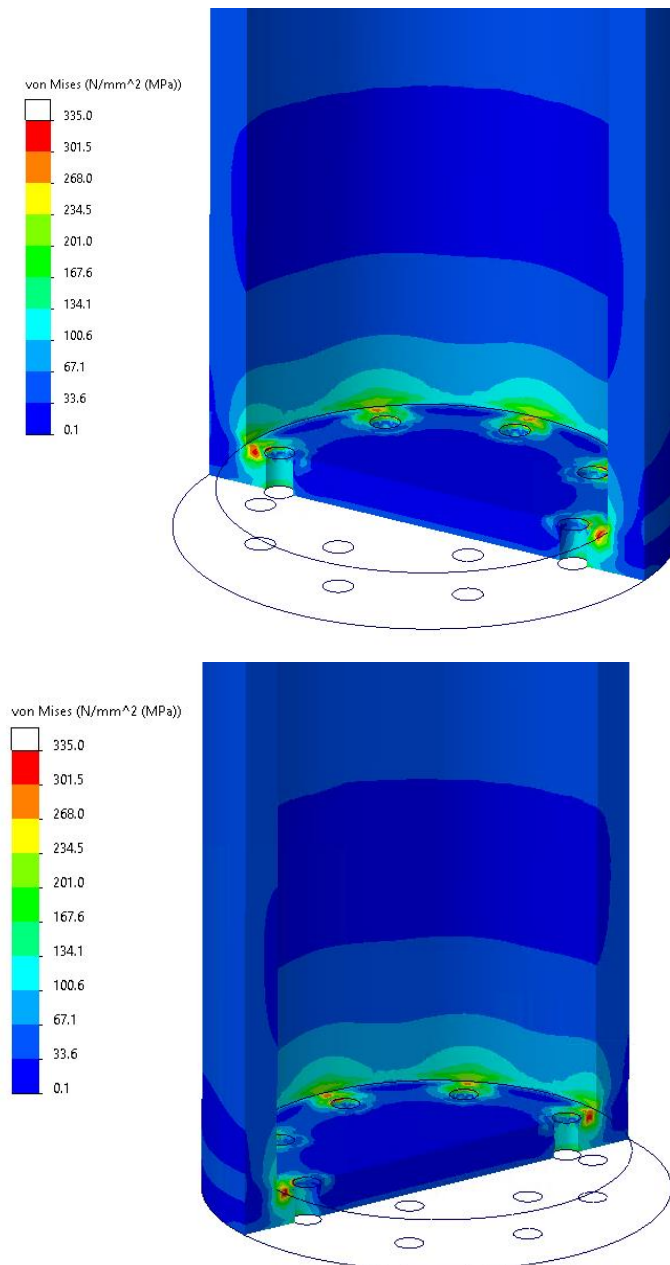






Abbildung 13-24: Spannungsergebnisse – Platte am Stutzen für Brücke B4





  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 129 von 171

### 13.4.2.3.3 Verformungen

Die Verformungen der beiden untersuchten Stutzen-Platten Details sind in den folgenden Abbildungen gezeigt.

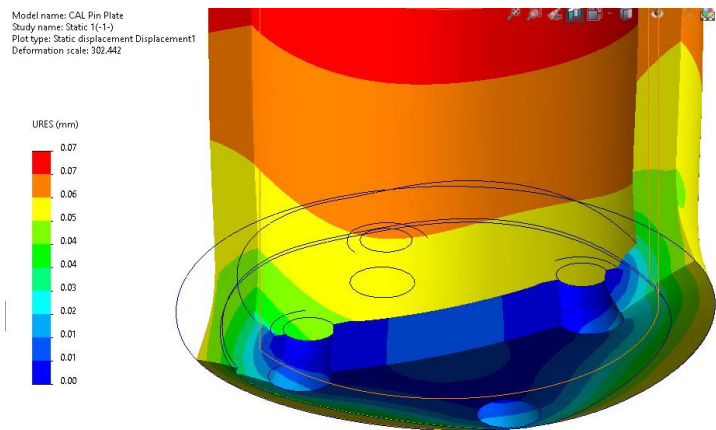


Abbildung 13-25: Verformungsergebnisse – Platte am Stutzen für alle Brücken außer Brücke B4

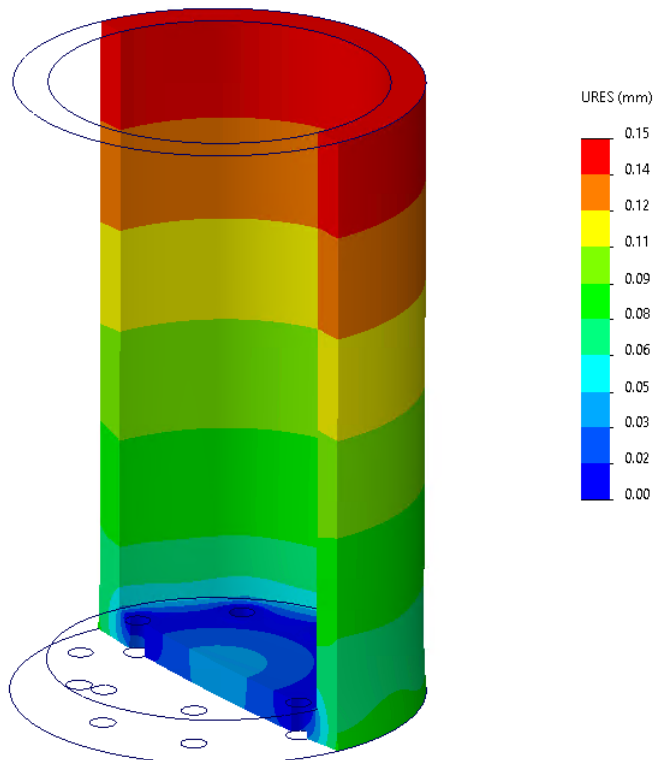






Abbildung 13-26: Verformungsergebnisse – Platte am Stutzen für Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 130 von 171

### 13.4.3 Geschraubte Sicherungsplatte

#### 13.4.3.1 Beschreibung, Lagerung, Lasten

Für die Detail-Nachweise der geschraubten Sicherungsplatten (Los-Lager „B-L“, Fest-Lager „B-F“) sind konservativ die unten gezeigten Modelle an jeweils dem unteren Schraubenloch-Rand in allen 3 Richtungen unverschieblich gehalten (grüne Symbole). Die geschätzte maximal auftretende vertikale Abhebe-Kraft von 338 kN (siehe Annex C) für alle Brücken außer Brücke B4 wird auf die obere Kontaktfläche (siehe Abbildung) gleichmäßig nach unten gerichtet aufgebracht (pinke Symbole). Die maximale Abhebekraft für Brücke B4 wie in Kapitel 10.6.3 beschrieben beträgt 1.050 kN.

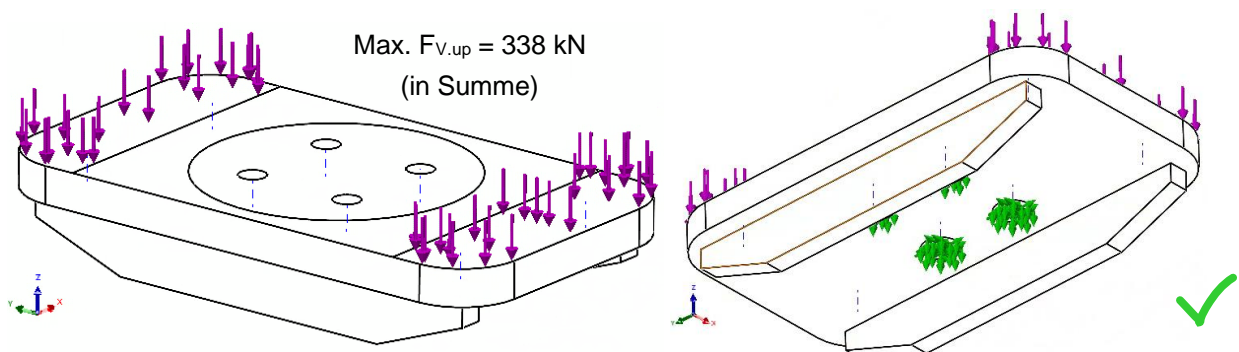


Abbildung 13-27: Geschraubte Sicherungsplatte B-L für alle Brücken außer Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

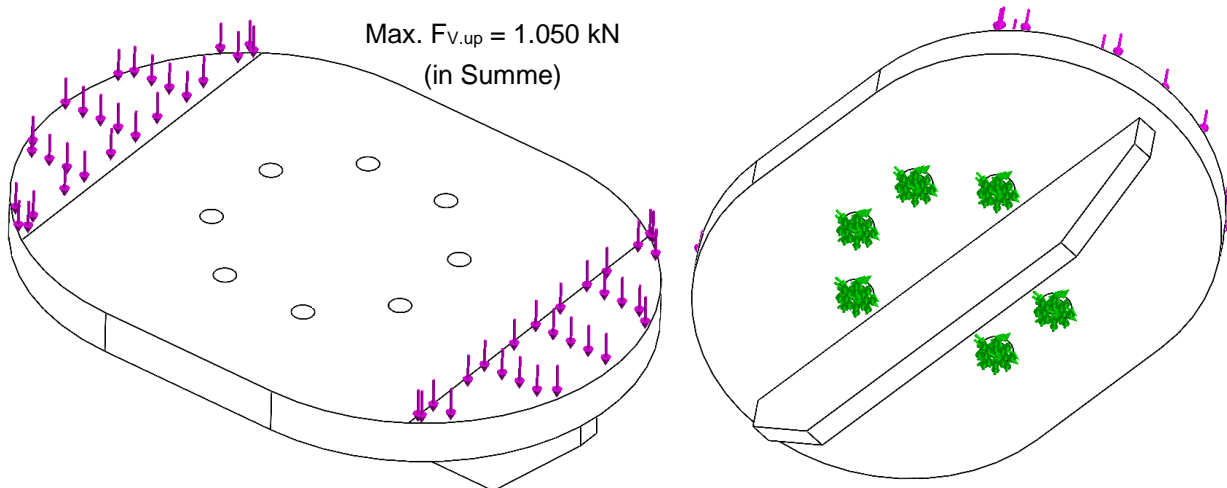






Abbildung 13-28: Geschraubte Sicherungsplatte B-L für Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 131 von 171

Max.  $F_{V,up} = 338$  kN  
(in Summe)

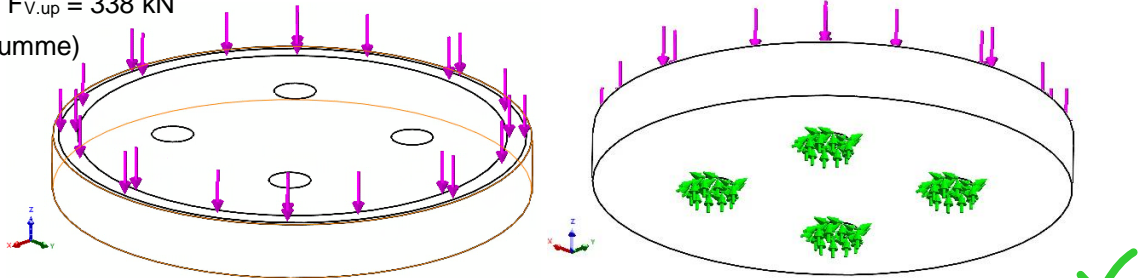


Abbildung 13-29: Gesraubte Sicherungsplatte B-F für alle Brücken außer Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten

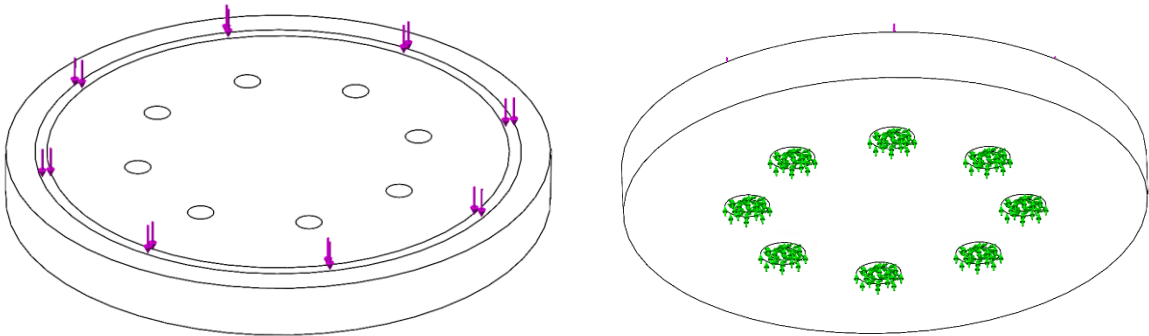







Abbildung 13-30: Gesraubte Sicherungsplatte B-F für Brücke B4 – Übersicht, Lagerung, Lasten



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 132 von 171

### 13.4.3.2 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse werden beide Modelle mit tetraedrischen Volumenkörperelementen vernetzt. Für die Detailmodelle wird ein hochqualitatives Netz angewandt. Das Netz ist exemplarisch für die typischen Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

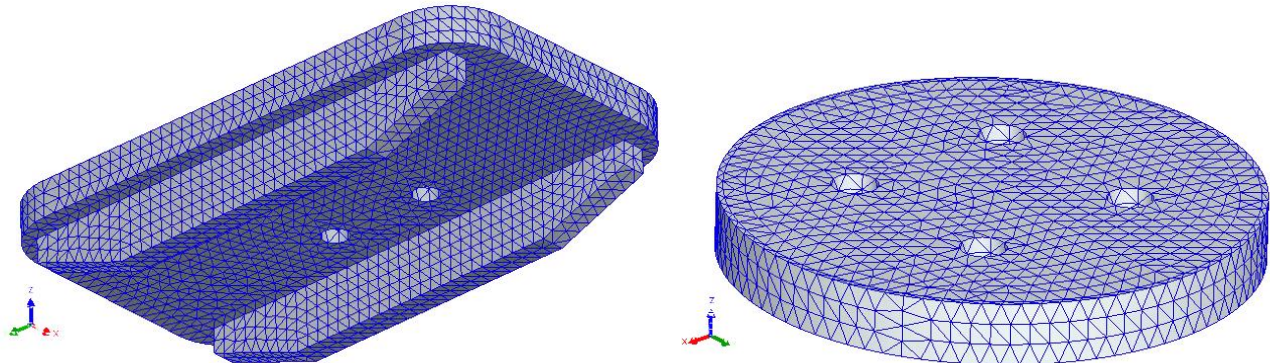


Abbildung 13-31: FE-Netz – geschraubte Sicherungsplatte B-L und B-F



Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. Das Seitenverhältnis ist exemplarisch für die typischen Details für alle Brücken außer Brücke B4 dargestellt.

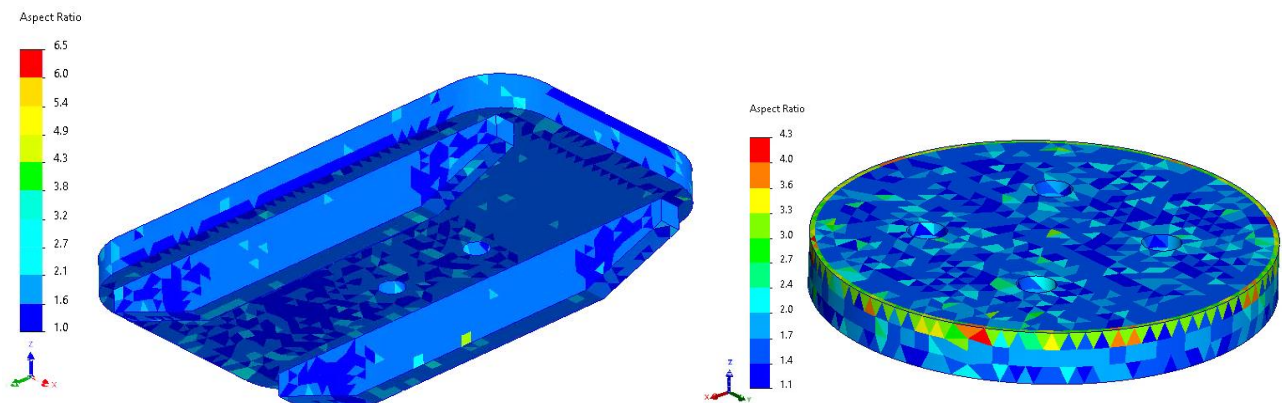


Abbildung 13-32: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente – Platte am Stutzen

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:

- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.








  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 133 von 171






Tabelle 13-4: Netzdetails für Details für alle Brücken außer Brücke B4

Netztyp	Sicherungsplatte B-L	Sicherungsplatte B-F
Verwendeter Netzgenerator	Standard Netz	Standard Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	10,0151	9,22491
Min. Elementgröße	0,500757	0,461246
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	42.083	20.995
Anzahl Elemente	26.460	13.351
Max. Seitenverhältnis	6,5297	4,2862
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis < 3	99,8	98,5
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis > 10	0	0

Tabelle 13-5: Netzdetails für Details für Brücke B4

Netztyp	Sicherungsplatte B-L	Sicherungsplatte B-F
Verwendeter Netzgenerator	Kurvengestütztes Misch-Netz	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16	16
Max. Elementgröße	10	10
Min. Elementgröße	1,65185	3.3333
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	195.641	92.571
Anzahl Elemente	130.421	62.019
Max. Seitenverhältnis	3,8858	4,5321
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis < 3	99,8	99,8
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis > 10	0	0



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 134 von 171

### 13.4.3.3 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für die Sicherungsplatte B-L und B-F gezeigt. Spannungsergebnisse

Die folgenden Spannungsplos zeigen den Verlauf der „von Mises“-Spannungen.

Sicherungsplatte B-L für alle Brücken außer Brücke B4:

Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits. Die leichte Überspannungen am Schraubenlochrand sind sehr klein und vernachlässigbar.

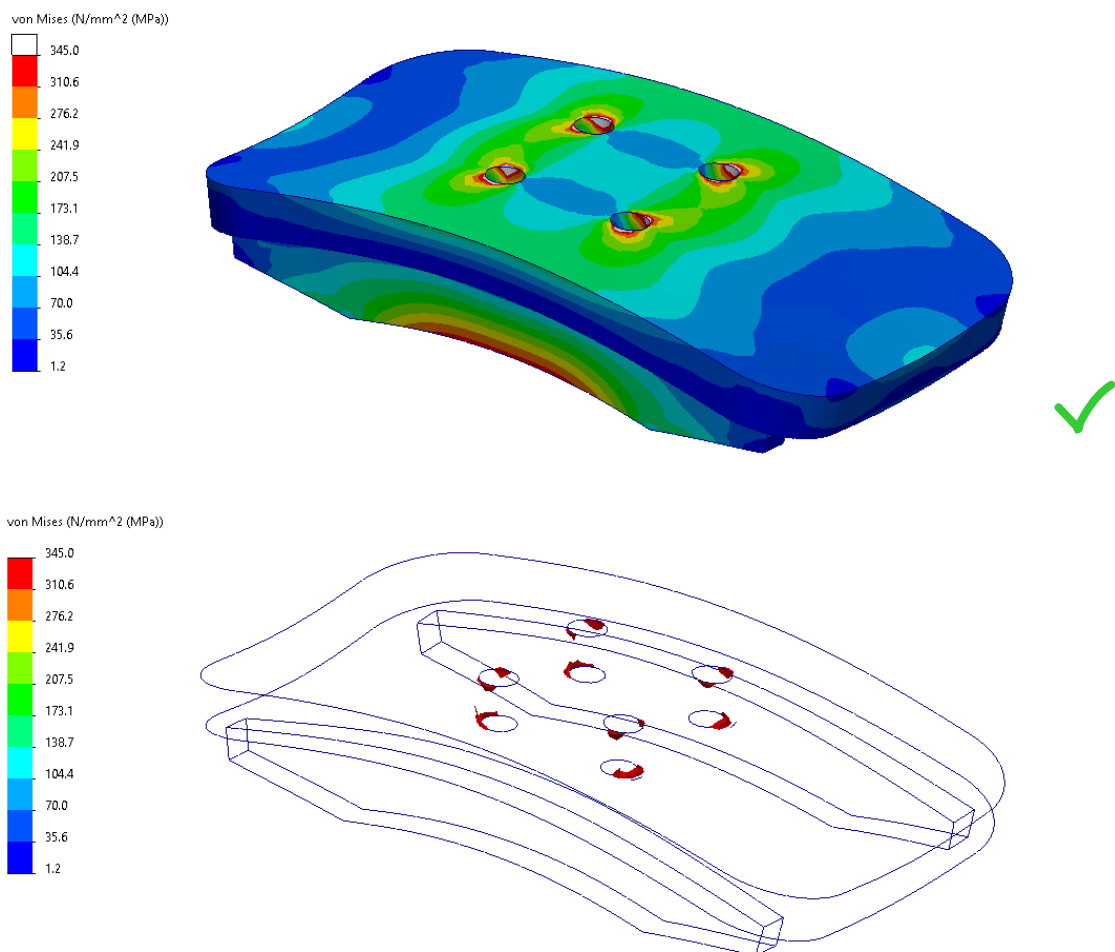






Abbildung 13-33: Spannungsergebnisse – Sicherungsplatte B-L für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 135 von 171

#### Sicherungsplatte B-L für Brücke B4:

Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits.

Die auftretenden Überspannungen sind klein und treten nur oberflächlich bzw. sehr lokal auf. Deshalb sind die Überspannungen nicht kritisch und vernachlässigbar.

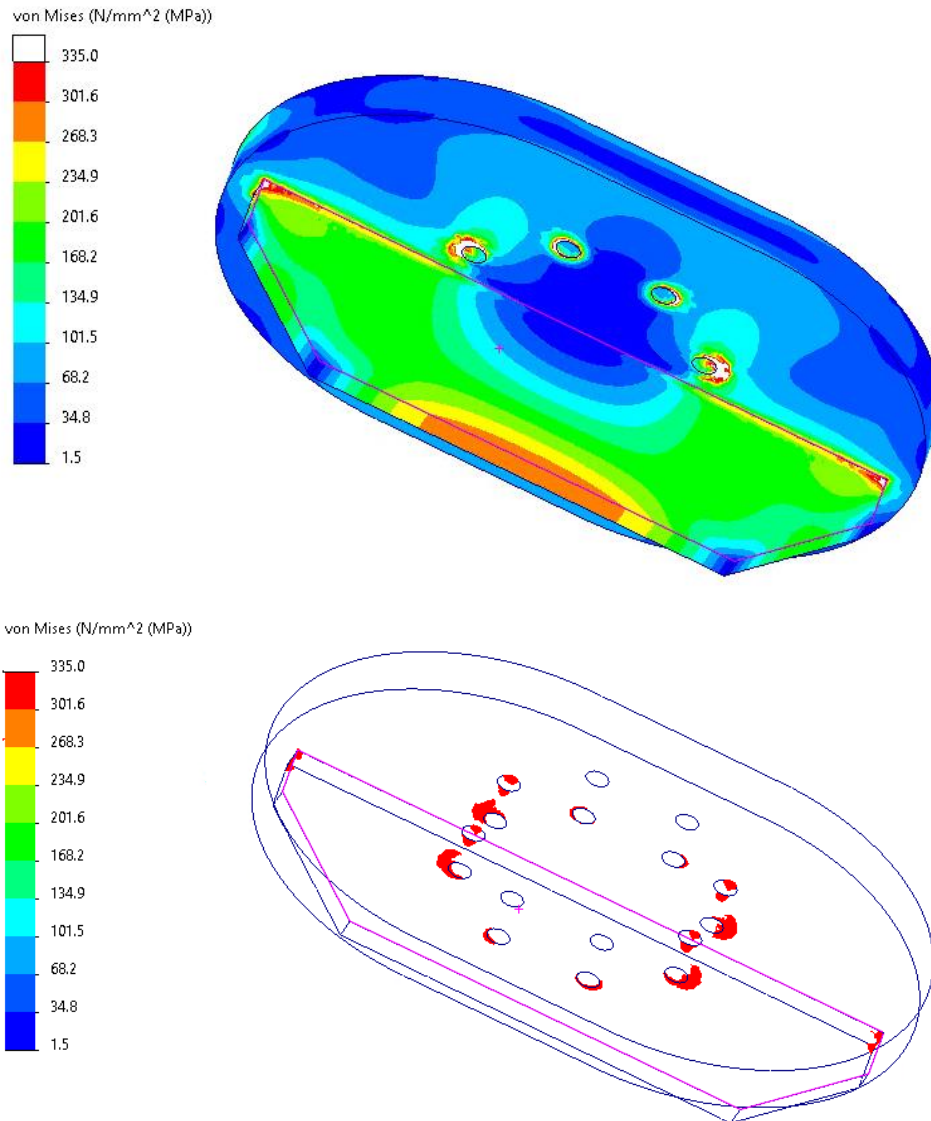






Abbildung 13-34: Spannungsergebnisse – Sicherungsplatte B-L für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 136 von 171

#### Sicherungsplatte B-F für alle Brücken außer Brücke B4:

Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits.

Die auftretenden Überspannungen am unteren Rand der Schraubenlöcher befinden sich aber in der Druckzone des Bauteils. Diese Überspannungen sind durch die aufgebrauchte konservative Lagerung verursacht und sind deshalb ebenfalls nicht kritisch und sind vernachlässigbar.

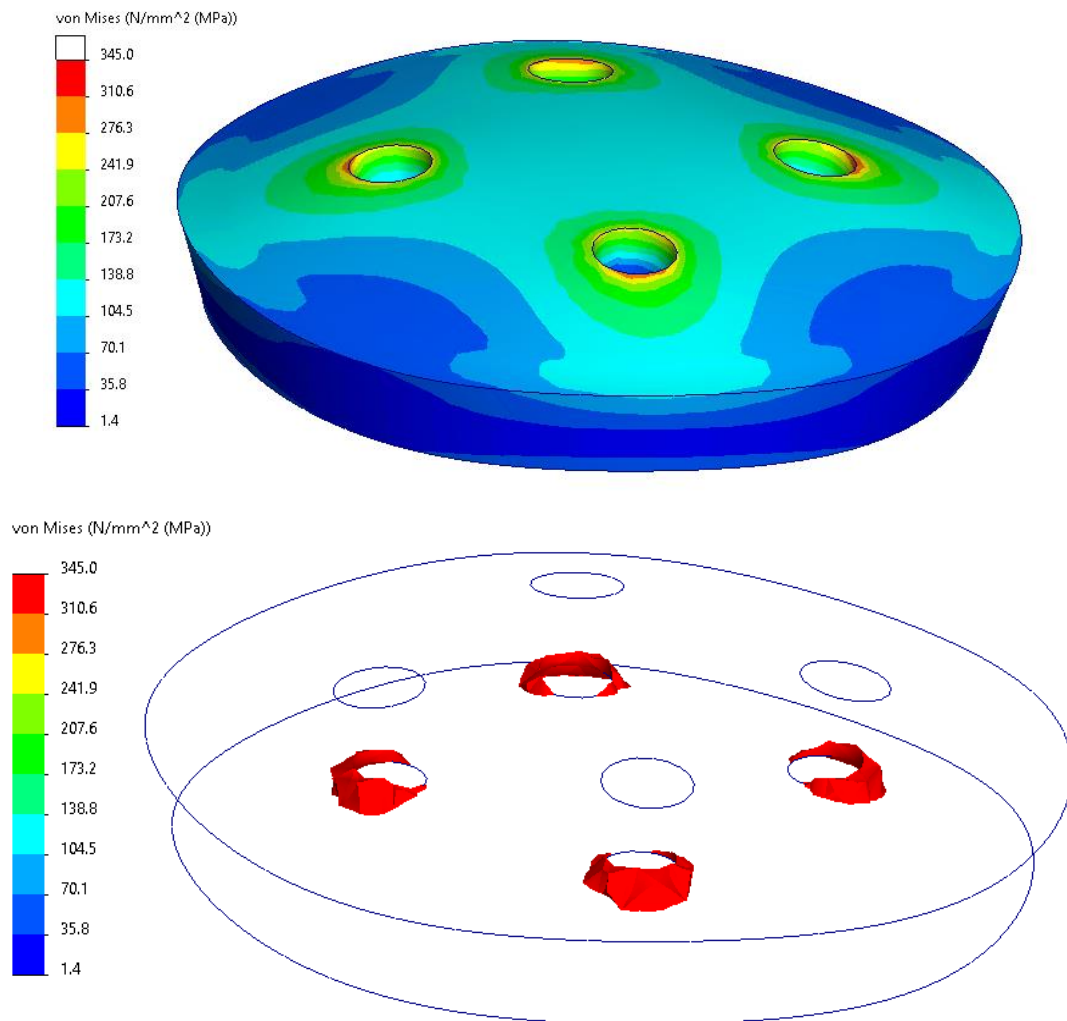






Abbildung 13-35: Spannungsergebnisse – Sicherungsplatte B-F für alle Brücken außer Brücke B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 137 von 171

#### Sicherungsplatte B-F für Brücke B4:

Die auftretenden Spannungen sind moderat und größtenteils unterhalb des zulässigen Limits.

Die auftretenden Überspannungen am unteren Rand der Schraubenlöcher befinden sich in der Druckzone des Bauteils. Diese Überspannungen sind durch die aufgebrachte konservative Lagerung verursacht und sind deshalb ebenfalls nicht kritisch und sind vernachlässigbar.

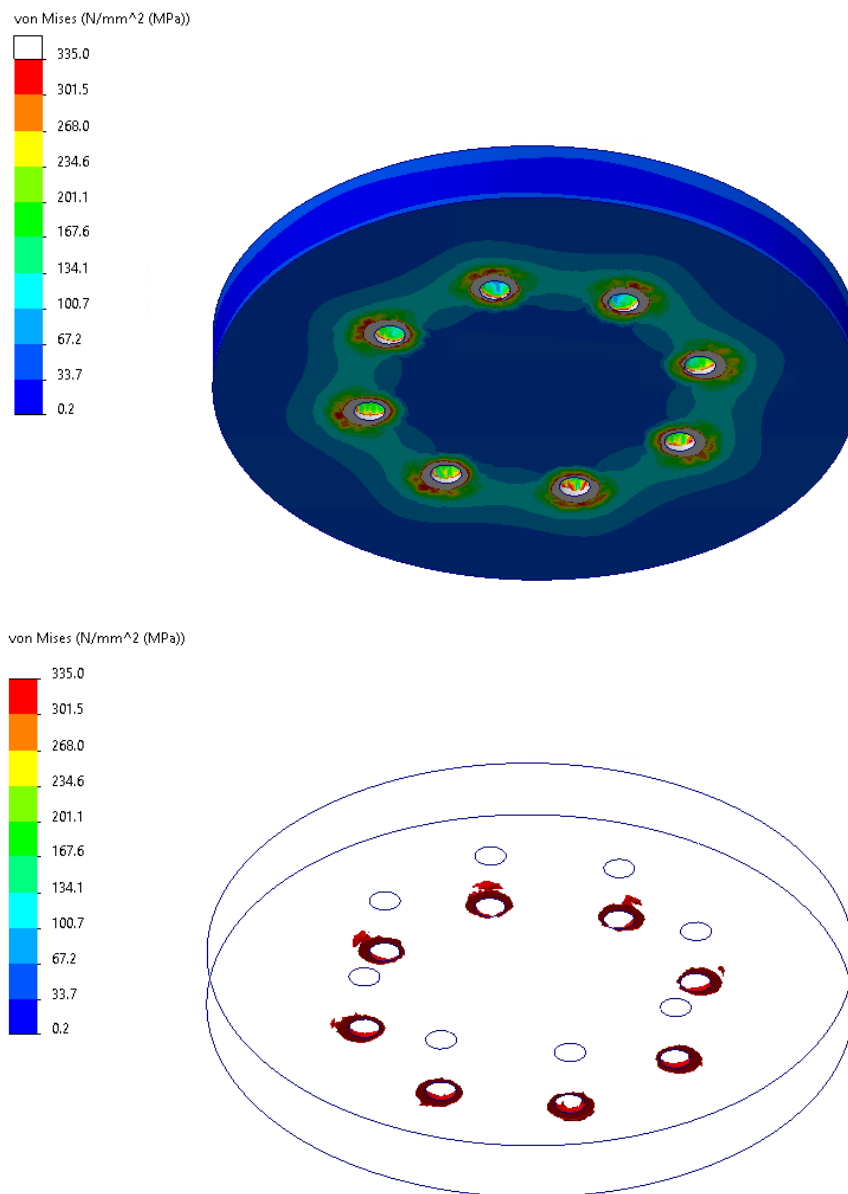







Abbildung 13-36: Spannungsergebnisse – Sicherungsplatte B-F für Brücke B4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 138 von 171

### 13.4.3.3.1 Verformungen

Die Verformungen der Sicherungsplatten B-L und B-F sind in der folgenden Abbildungen gezeigt.

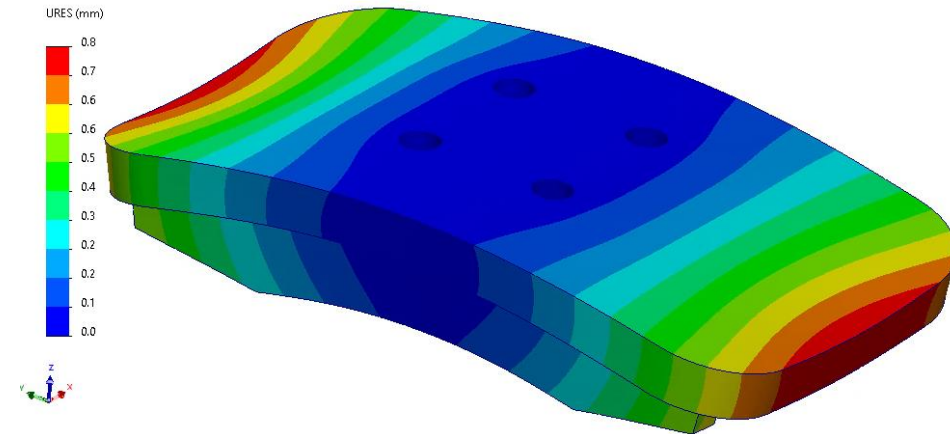


Abbildung 13-37: Verformungsergebnisse – Sicherungsplatten B-L für alle Brücken außer Brücke B4

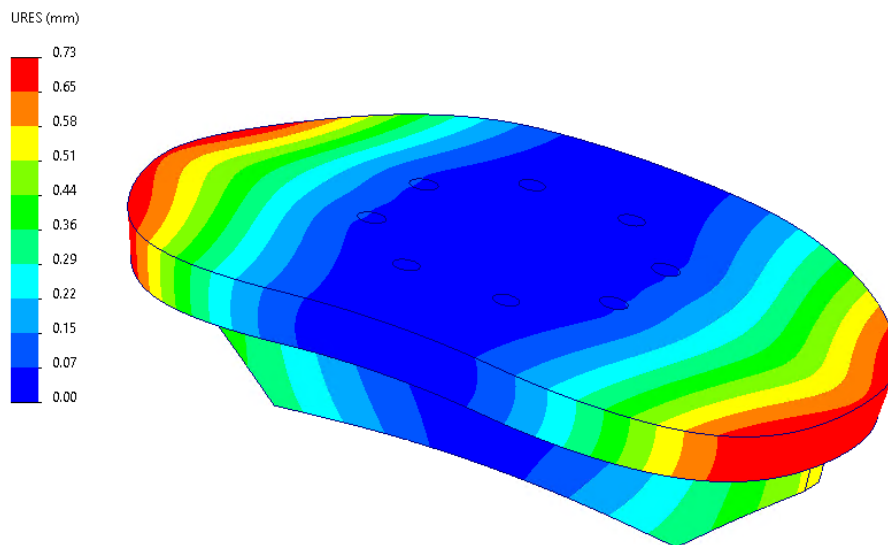







Abbildung 13-38: Verformungsergebnisse – Sicherungsplatten B-L für Brücke B4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 139 von 171

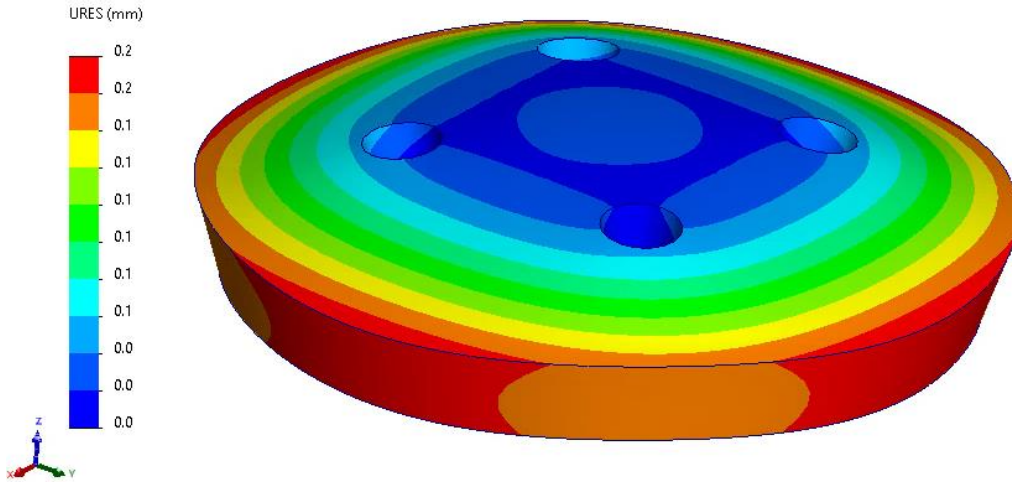


Abbildung 13-39: Verformungsergebnisse – Sicherungsplatten B-F für alle Brücken außer Brücke B4

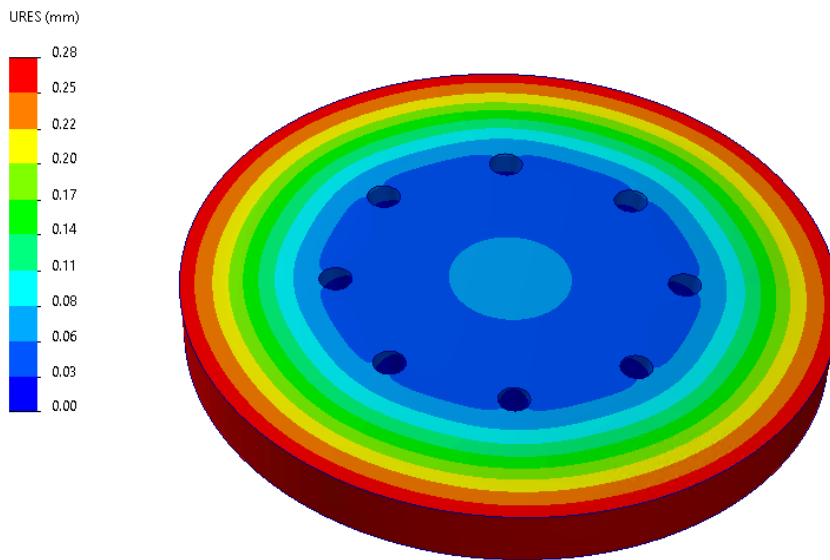







Abbildung 13-40: Verformungsergebnisse – Sicherungsplatten B-F für Brücke B4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 140 von 171

## 14 Nachweis der Hebepunkten

### 14.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Hebepunkten beschrieben und verifiziert. Alle Brücken außer B4 werden mit vier Schlingen gehoben, die um die Gurte von einem Haken gelegt sind. Die Hebepunkten sind in generell für alle Brücke außer B4 an der oberen Gurte ausgelegt. Die Hakenhöhen sind so gewählt, dass der minimale Schlingwinkel 60° ist. Die Hebepunkten bei Brücke B4 liegen an der unteren Gurte, um Schiefstellung beim Heben zu vermeiden, weil die oberen Gurte zwischen den Reihen nicht in einem Niveau sind. Um Zusammenstöße zwischen Schlingen und Brückenstruktur zu vermeiden, werden die Schlinge bei Brücke B4 um die seitlich herausragende Zapfen gelegt sind.

In der Abbildung unten ist diese Anordnung exemplarisch für Brücke B1 (ähnlich bei der anderen Brücken außer B4) und B4 dargestellt. Die Schlinge und die Brücke sind jeweils in schwarz und gelb gezeigt.

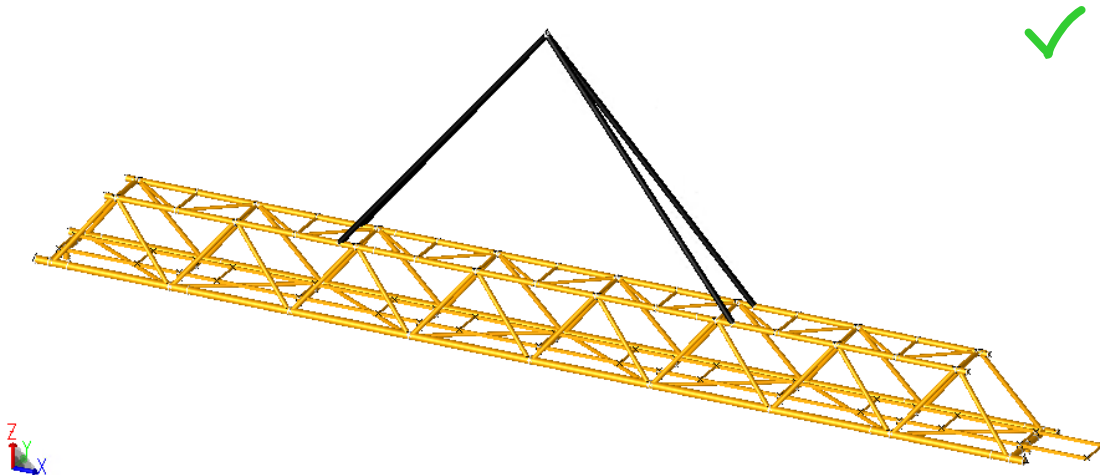


Abbildung 14-1: Anordnung zum Anheben von Brücke B1

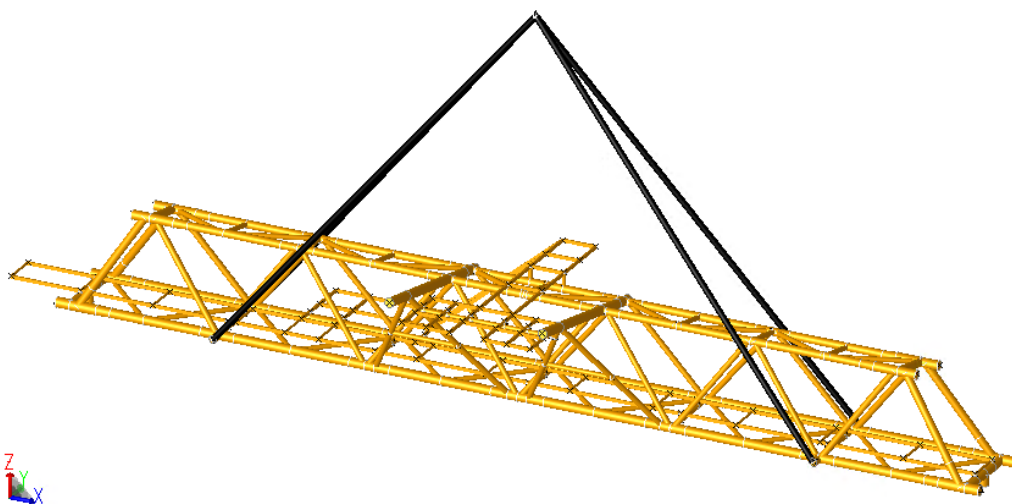







Abbildung 14-2: Anordnung zum Anheben von Brücke B4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 141 von 171

Die Hebepunkte für alle Brücke außer B4 werden so ausgelegt, dass sie einen Abstand von Knoten und einen Stopper haben, um sicher zu sein, dass die Kräfte nur an den Gurten, nicht an den Streben geleitet werden.

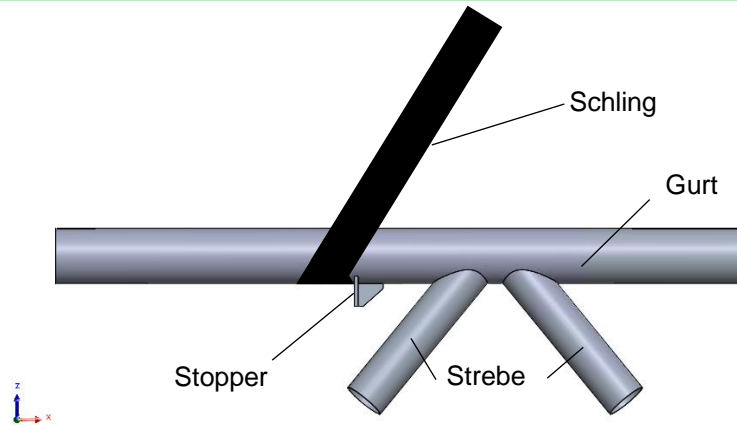


Abbildung 14-3: Allgemeine Details von Hebepunkte (außer B4)

Die Hebepunkten werden in den folgenden Gruppen aufgeteilt.

- Gruppe 1 mit Hubgewicht (ohne Faktoren),  $m < 13,8 \text{ t}$  für Brücke B1, B2, B5, B6, B8 & B9
- Gruppe 2 mit Hubgewicht (ohne Faktoren),  $13,8 \text{ t} < m \leq 50,0 \text{ t}$  für Brücke B3 & B7



Die Hebepunkte für Brücke B4 sind unten dargestellt. Die Schlinge werden um die Zapfen gelegt.

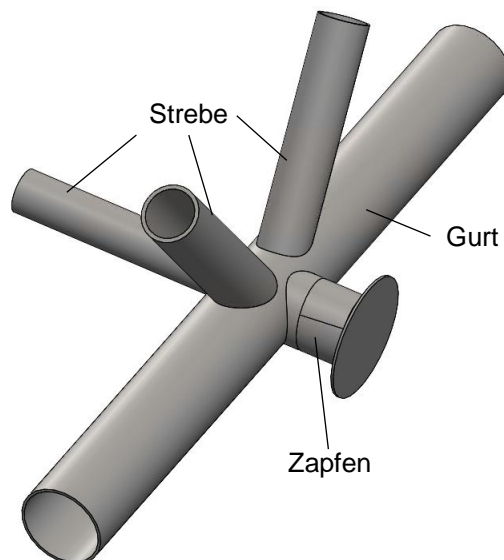






Abbildung 14-4: Allgemeine Details von Hebepunkte B4



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 142 von 171

#### 14.2 Beschreibung der Hebepunkten

Zur strukturellen Berechnung dieser Hebepunkten wird drei FE-Modelle mit dem Programm Solidwork [b.] angefertigt.

- Hebepunkte für Gruppe 1
- Hebepunkte für Gruppe 2
- Hebepunkte für Brücke B4

Für den Nachweis der Hebepunkten werden drei Lokalmmodelle erstellt. Diese Modelle bestehen aus Gurtsektion, Strebesektion, und Stopper/ Zapfen. Die folgende Abbildungen zeigen generelle Darstellungen von der Lokalmmodelle.

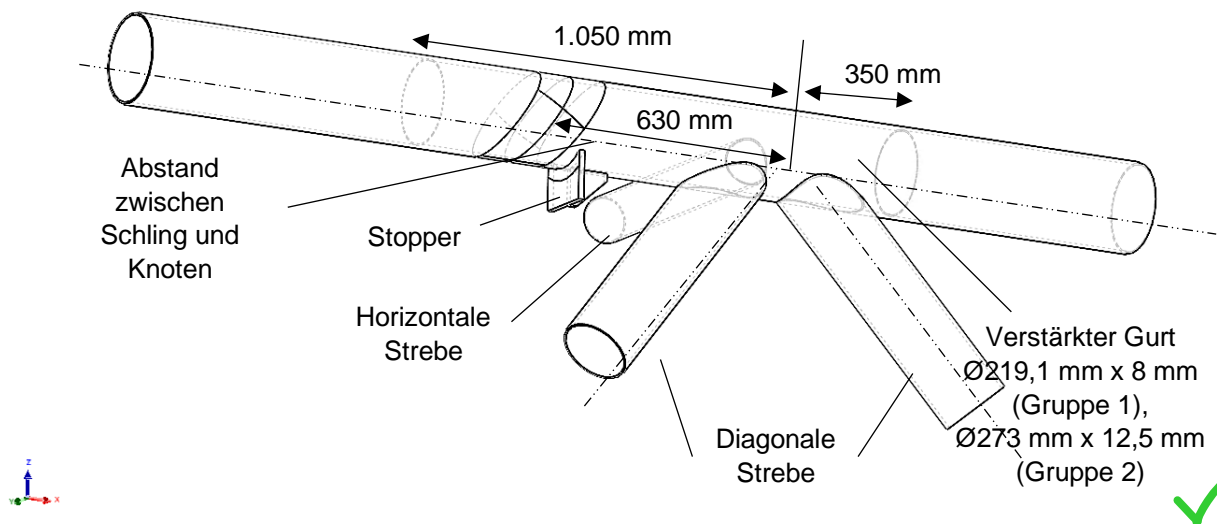


Abbildung 14-5: FE-Modell, Hebepunkte Gruppe 1 & 2

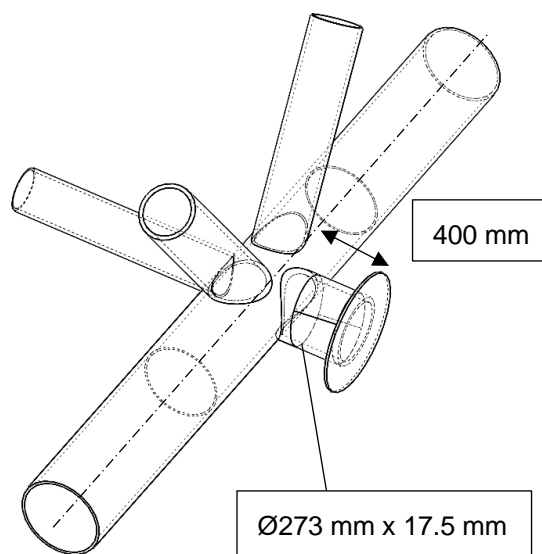







Abbildung 14-6: FE-Modell, Hebepunkte für Brücke B4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 143 von 171

### 14.3 Randbedingungen

Für den Nachweis der Hebepunkte ist das Modell an Gurtschnittenden in aller Richtungen und an Strebenschnittende in normaler Richtung gehalten.

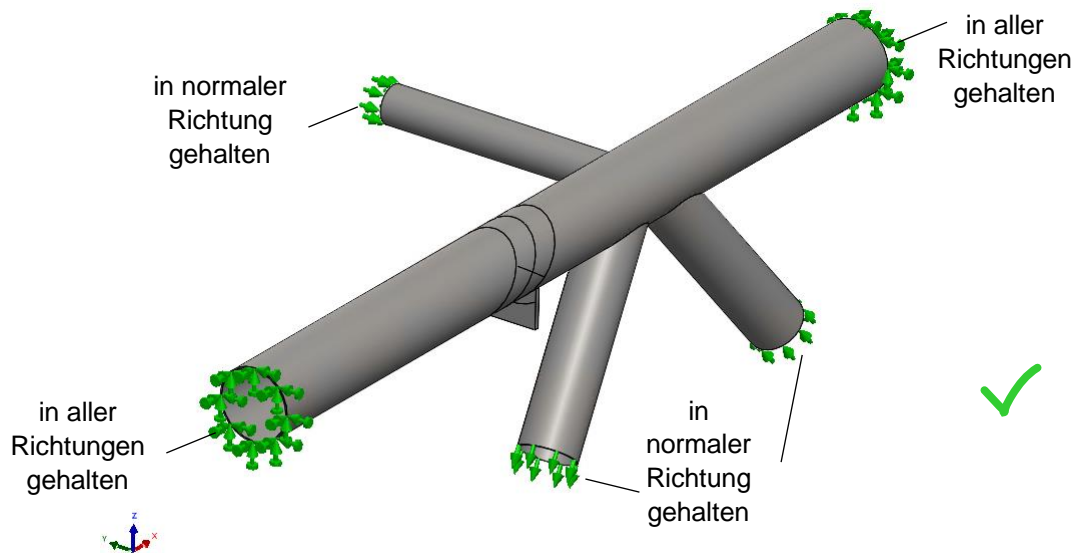


Abbildung 14-7: Randbedingungen (außer Brücke B4)

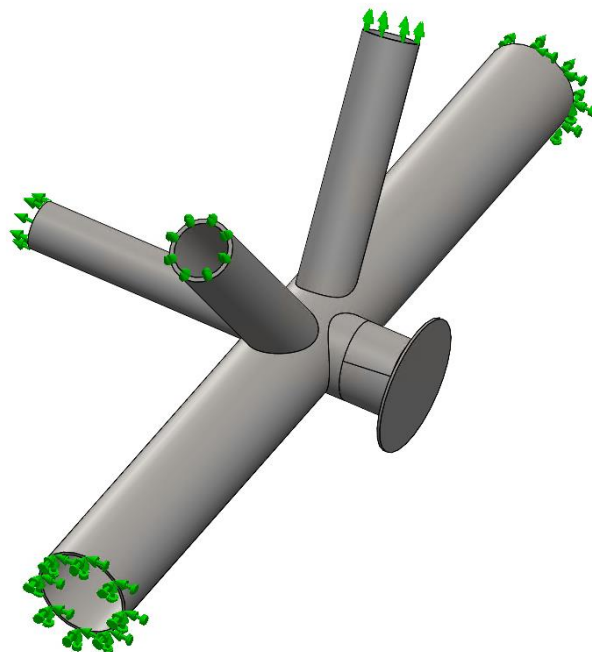







Abbildung 14-8: Randbedingungen für Brücke B4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 144 von 171

#### 14.4 Lasten

Im Folgenden werden die Schlinglasten bestimmt.

Tabelle 14-1: Bestimmung von der Schlinglasten

Eigenschaft	Gruppe 1	Gruppe 2	B4	Anmerkungen
Maximalgewicht, m [t]	13,8	50,0	30,5	Ohne Faktoren
Resultierende Vertikallast, $S_v$ [t]	3,5	12,5	7,6	m/4 Hebepunkte
Resultierende Schlinglast, $F_s$ [t]	4,0	14,4	8,8	$S_v / \sin 60^\circ$ (mit Schlingwinkel von $60^\circ$ )
Gewichtsungenauigkeitsfaktor, $f_c$	1,2	1,2	<u>1,2</u>	
Statistischer Lasthaken, SHL	16,6	60,0	36,6	$m * f_c$
Dynamischer Verstärkungsfaktor, DAF	1,61	1,32	<u>1,41</u>	$1+0,25*\sqrt{(100/SHL)}$
Schräglastfaktor, SKL	1,25	1,25	<u>1,25</u>	
Schwerpunktungenauigkeitsfaktor, $f_{COG}$	1,1	1,1	1,1	
Konsequenzfaktor, $f_{CONS}$	1,3	1,3	1,3	
Betriebslastgrenze, WLL [t]	13,8	41,0	26,7	$F_s * f_c * DAF * SKL * f_{COG} * f_{CONS}$
ULS Faktor, $f_{ULS}$	1,35	1,35	1,35	
Resultierende ULS Schlinglasten, $F_{s,ULS}$ [kN]	<u>183,0</u>	<u>542,0</u>	<u>353,5</u>	$F_s * f_c * DAF * SKL * f_{COG} * f_{CONS} * f_{ULS} * 9,81 \text{ kN/t}$

Die Schlinglasten werden als Flächenpressung entlang die Hälfte von dem Umfang von Gurt aufgebracht. Die Pressung ist als radialer Druck auf Gurt wie in der Abbildung unten betrachtet.

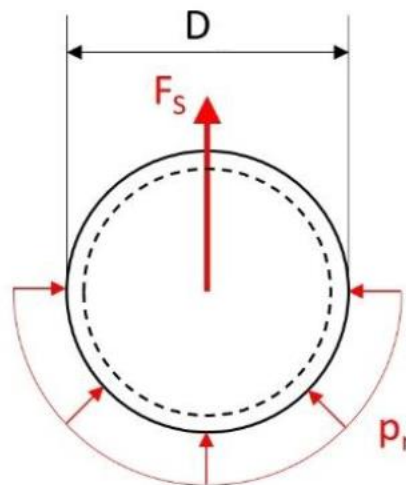







Abbildung 14-9: Radialer Druck

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 145 von 171

Der radiale Druck, P ist wie folgt berechnet.

$$p_r = F_s / D$$

mit

- P = Radialer Druck
- F<sub>s</sub> = Schlinglast
- D = Gurtdurchmesser

Die Breite für Schling ist 150 mm genommen und ist vernünftig für 13,8 t WLL Schling (Gruppe 1) gesehen. Diese Breite von 175 mm ist für 41,0 t WLL Schling (Gruppe 2) und für Hebepunkte der Brücke B4 genommen.






Für die Kraft auf dem Stopper ist konservativ die gesamte horizontale Schlinglast aufgebracht. Hier ist eine Breite von 30 mm angenommen.

Bei der Hebepunkte B4 (mit Zapfen) ist 5% von der Schlinglasten auf der Ankerplatte aufgebracht.

Tabelle 14-2: Die Kräfte in der FE-Modelle

Eigenschaft	Gruppe 1	Gruppe 2	B4	Anmerkungen
Gurtdurchmesser, D [mm]	<u>219,1</u>	<u>273</u>	273	
Radialer Druck, p <sub>r</sub> [N/mm]	835,2	1.985,3	1.294,8	p <sub>r</sub> = F <sub>s</sub> / D
Schlingsdurchmesser, D <sub>s</sub> [mm]	<u>150</u>	<u>175</u>	175	
Radialer Druck, P [MPa]	5,6	11,3	7,4	P = p <sub>r</sub> / D <sub>s</sub>
Horizontale Last, F <sub>h</sub> [kN]	<u>91,5</u>	<u>271,0</u>	<u>17,7</u>	



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 146 von 171

In der Abbildung unten ist die Kraftaufbringung in FE-Modell dargestellt.

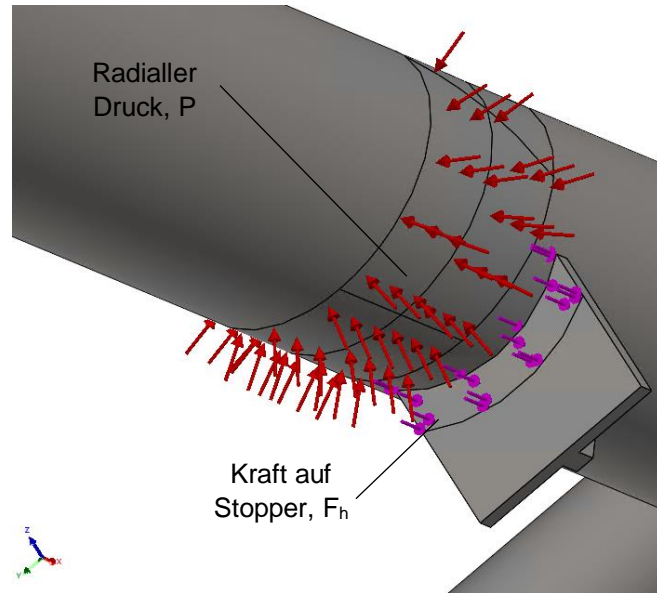


Abbildung 14-10: Kraftaufbringung (außer Brücke B4)

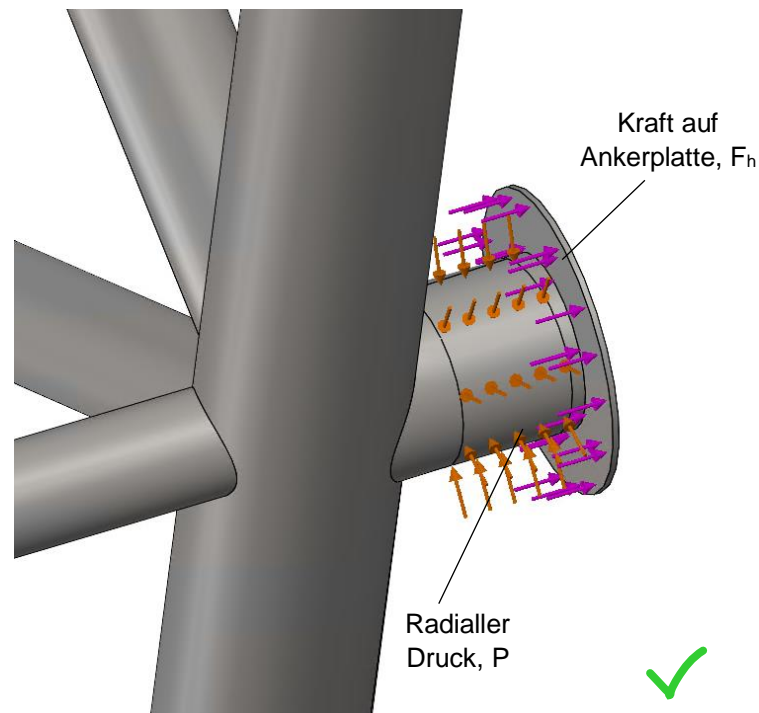




Abbildung 14-11: Kraftaufbringung Brücke B4



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 147 von 171

#### 14.5 FE-Netz

Zur Vorbereitung der FE-Analyse wird das Modell mit tetraedrischen Volumenelementen vernetzt. Für das Detailmodell wird ein hochqualitatives Netz angewandt. In der Abbildung unten ist das Netz für Gruppe 1 exemplarisch gezeigt.

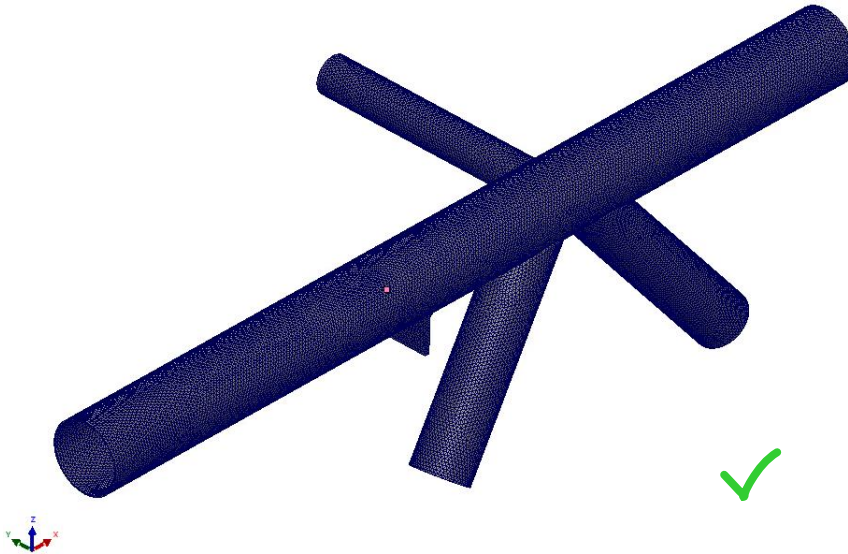


Abbildung 14-12: FE-Netz

Des Weiteren wird das Seitenverhältnis der einzelnen FE-Elemente betrachtet. Das Seitenverhältnis eines Elements ist definiert als das Verhältnis zwischen der längsten und kürzesten Seite eines Elements. Dementsprechend hat ein perfektes tetraedrisches Element ein Seitenverhältnis von 1,0. Im Idealfall haben alle Elemente ein Seitenverhältnis von 1,0, um die beste numerische Lösung zu erhalten. Dies ist auf Grund der Struktur nicht möglich. Im Bereich der Lager ist das Seitenverhältnis aller Elemente  $< 5$  und wird daher als gut angesehen. In der Abbildung unten ist das Netz für Gruppe 1 exemplarisch gezeigt.

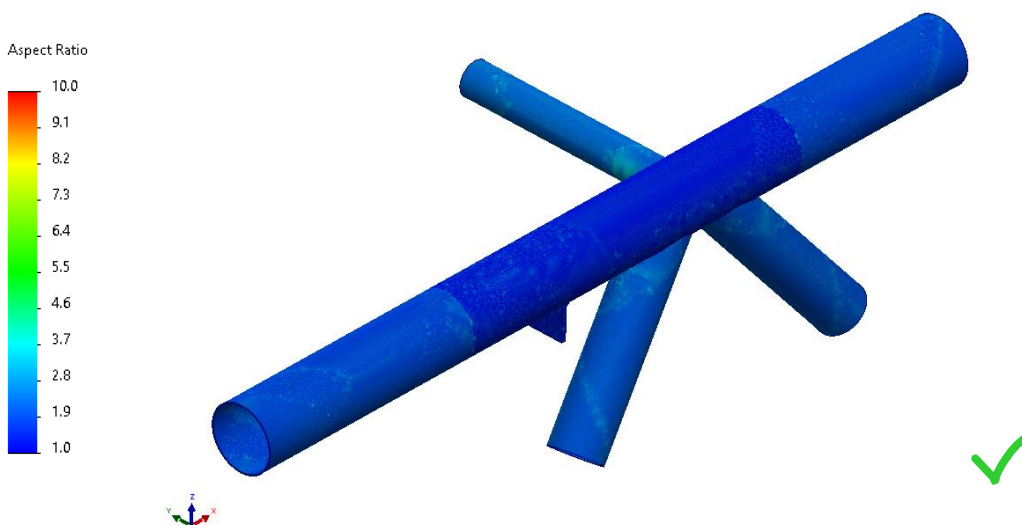







Abbildung 14-13: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 148 von 171

Allgemein wird eine gute Netzqualität durch folgendes definiert:



- Ein geringes maximales Seitenverhältnis  $< 10$
- Ein hoher Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $< 3$
- Ein geringer Prozentsatz mit einem Seitenverhältnis  $> 10$

Die Netzinformationen für das FE-Netz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Es zeigt sich, dass das Netz von guter Qualität ist.

Tabelle 14-3: Netzdetails

Beschreibung	Gruppe 1	Gruppe 2	B4
Netztyp	Volumen-Netz		
Verwendeter Netzgenerator	Kurvengestütztes Misch-Netz		
Jakobi-Punkte	16	16	16
Max. Elementgröße	10 mm	10 mm	10 mm
Min. Elementgröße	3.3 mm	10 mm	10 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	385.166	569.417	911.405
Anzahl Elemente	192.872	309.845	518.066
Max. Seitenverhältnis	7,2	5,3	5,8
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $< 3$	99,7	100	100
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis $> 10$	0	0	0



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 149 von 171

## 14.6 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für die Hebepunkte gezeigt.

### 14.6.1 Spannungsergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt die resultierenden von Mises Spannungen. Der Spannungsplot ist auf die zulässige Vergleichsspannung von 345 MPa limitiert. Alle Spannungen, die diesen Wert überschreiten werden in weiß dargestellt. Im Bereich des Stoppers wird die zulässige Spannung überschritten. Ein zweiter Plot zeigt nur diese Überspannungen. Die Überspannungen sind sehr klein und weniger als die Elementdicke. Deswegen sind diese Überspannungen aufgrund der konservativen Annahmen nicht kritisch.

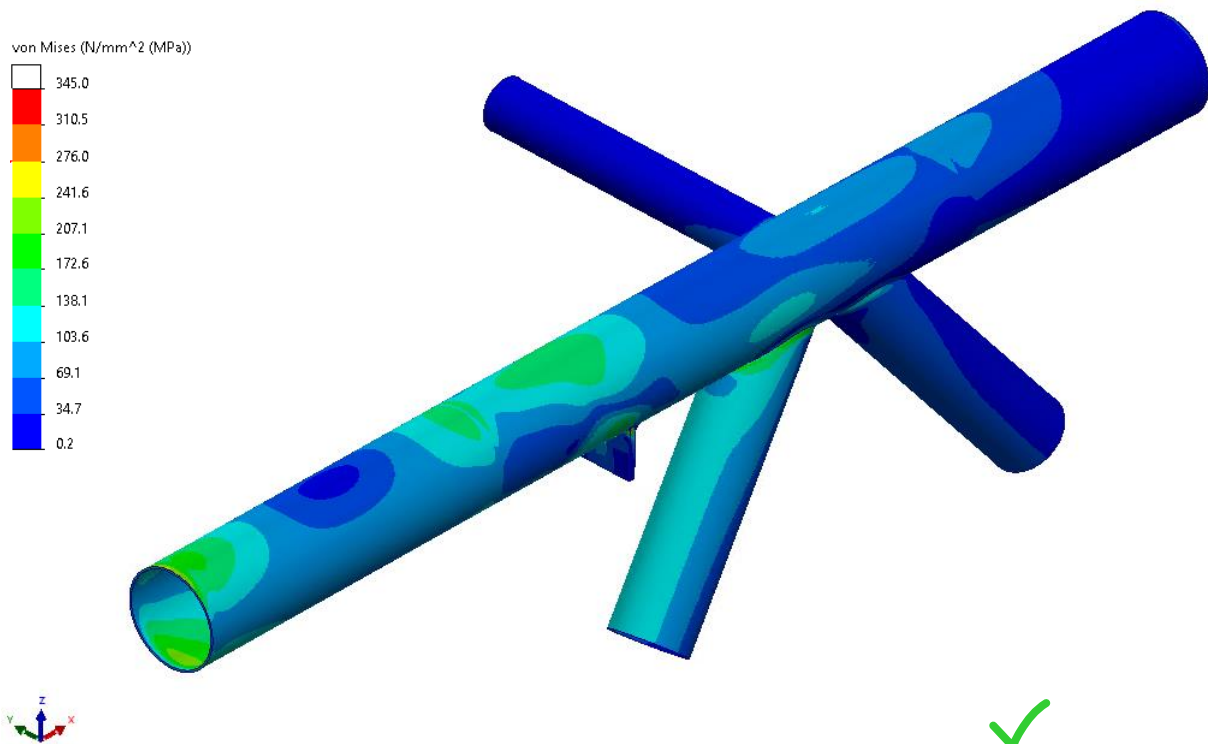






Abbildung 14-14: Spannungsergebnisse, Gruppe 1

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 150 von 171

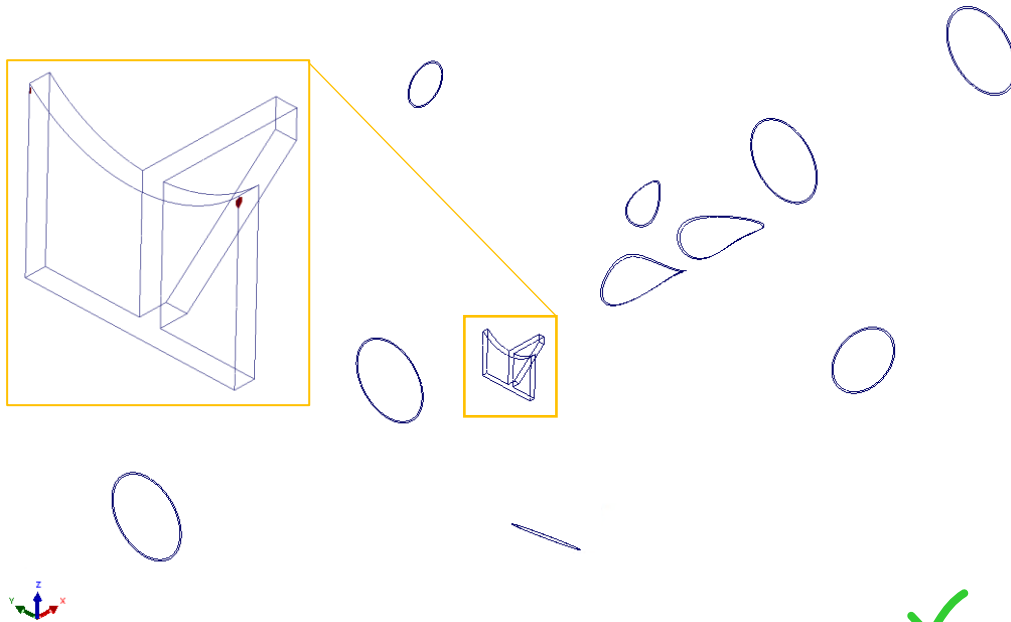


Abbildung 14-15: Überspannungen, Gruppe 1

von Mises (N/mm<sup>2</sup> (MPa))

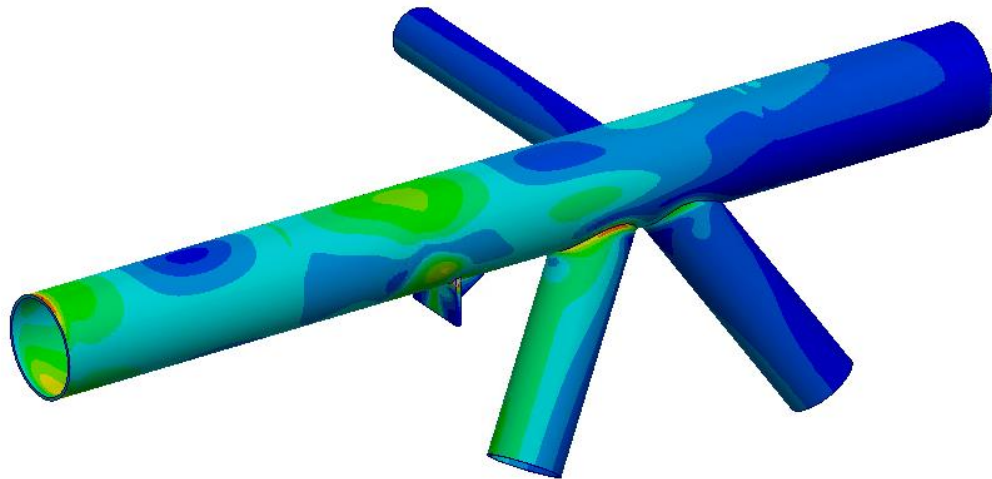
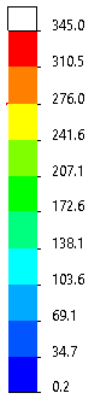




Abbildung 14-16: Spannungsergebnisse, Gruppe 2

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 151 von 171

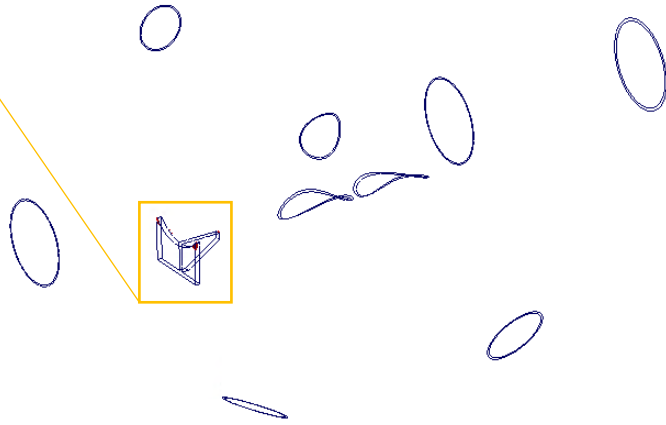
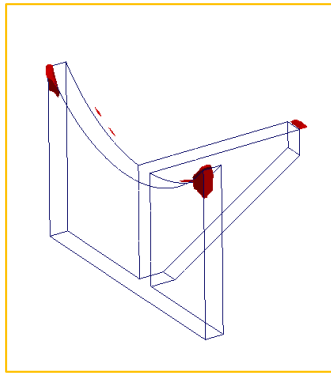


Abbildung 14-17: Überspannungen, Gruppe 2

von Mises (N/mm<sup>2</sup> (MPa))

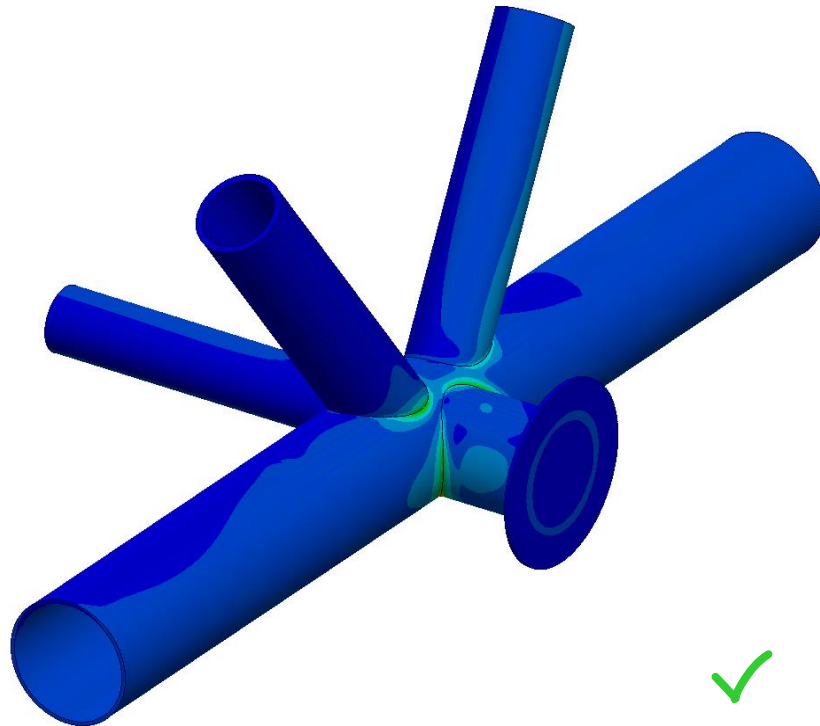
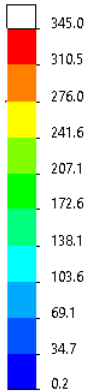






Abbildung 14-18: Spannungsergebnisse, Brücke B4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 152 von 171

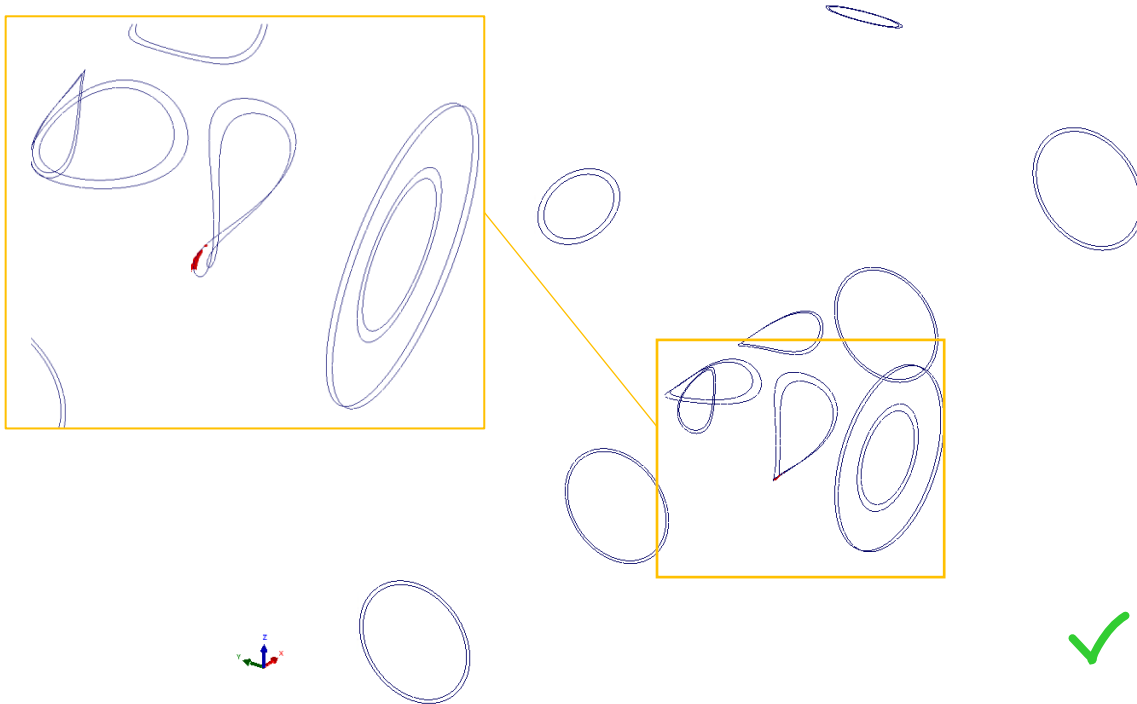







Abbildung 14-19: Überspannungen, ~~Gruppe 2~~

Brücke 4



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 153 von 171

#### 14.6.2 Verformungsergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt die resultierende Verformungen. Um die Verformung sichtbar zu machen, wurde diese mit dem Faktor 50 skaliert.

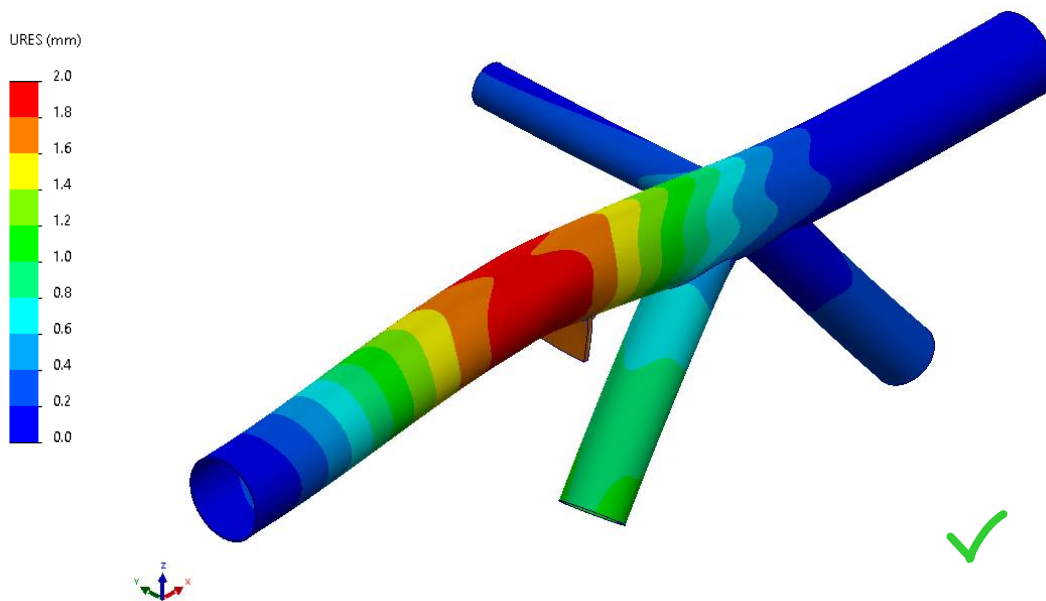


Abbildung 14-20: Verformungen, Gruppe 1

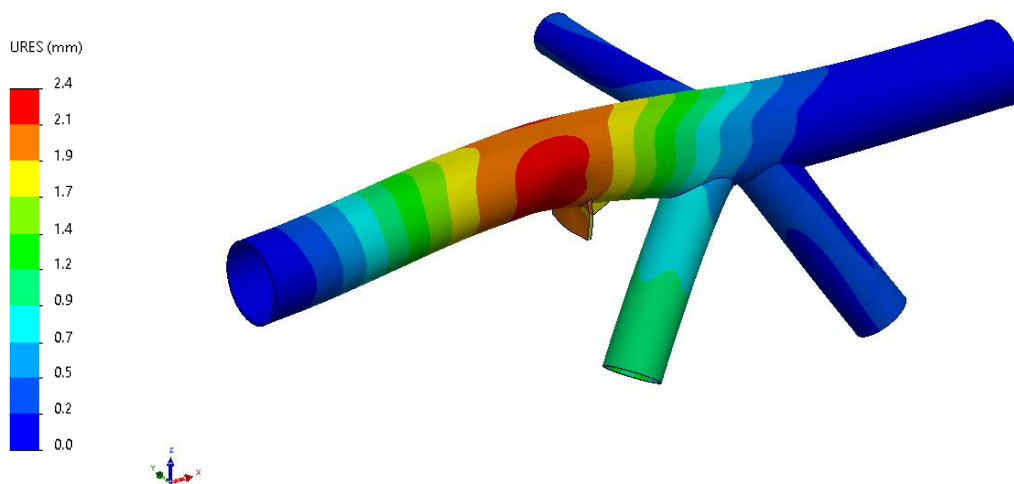







Abbildung 14-21: Verformungen, Gruppe 2

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 154 von 171

URES (mm)

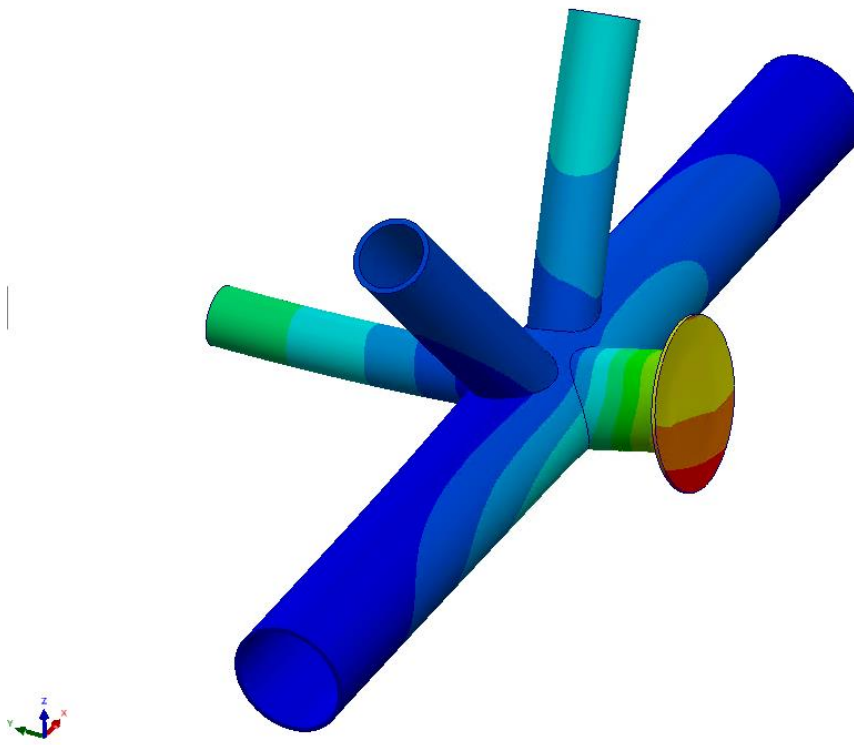
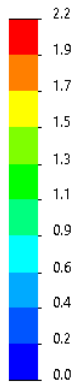




Abbildung 14-22: Verformungen, Brücke B4



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 155 von 171

## Anhang A. Vershub-Schuh - Kontaktdruck / -fläche

### Für alle Brücken außer Brücke B4

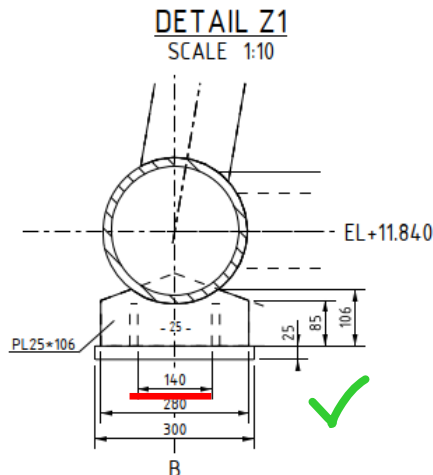
#### Nachweis des Vertikalen Vershub-Schuhs für das Festlager und das Loslager



##### A1) Eingabe Parameter

Kontakt Körper 1	Vershub-Schuh Brücke		
Material	S355		
E-Modul	E1 =	210000 N/mm <sup>2</sup>	
Poisson Zahl	v1 =	0.3 -	
Krümmungsradius	ρ1 =	2500 mm	(Platte gebogen mit R = 2.5 m)
Kontakt Körper 2	Vershub-Fläche Plattform		
Material	S355		
E-Modul	E2 =	210000 N/mm <sup>2</sup>	
Poisson Zahl	v2 =	0.3 -	
Krümmungsradius	ρ2 =	1000000 mm	(ebene Platte)
Minimale Schmierfilm Dicke	h <sub>min</sub> =	0 mm	(konservative Annahme: kein Schmierfilm)
Mittlere Oberflächen Rauheit	Ra =	1.6 mm	(angenommen für Fläche gesäubert und geschliffen)
Länge der Kontaktfläche	l =	140 mm	(geschätzt; 0.5 * Vershub-Schuh Breite = 0.5 * 280mm)
Reibzahl	μ =	0.3	(Stahl auf Stahl)
Max. Vertikale Lagerkraft	F <sub>v</sub> =	500000 N	(max. Vertikalkraft)
			(von Lagerreaktion der Brücken Fest- / Loslager, incl. EC3 Faktoren)

##### A2) Nachweis des Kontaktdruck nach Hertz

reduzierter Krümmungsradius	ρ =	2494 mm	$\rho_1 \rho_2 / (\rho_1 + \rho_2)$
reduzierter E-Modul	E =	230769 N/mm <sup>2</sup>	$2 * E_1 * E_2 / [(1 - \nu_1^2) * E_2 + (1 - \nu_2^2) * E_1]$
spezifische Schmierfilm Dicke	λ =	0 -	h <sub>min</sub> / Ra
			λ < 2: Limit Friction
			2 ≤ λ ≤ 3: Mixed Friction
			λ > 3: Liquid Friction
Kontaktdruck nach Hertz	p <sub>H</sub> =	229 N/mm <sup>2</sup>	$\sqrt{(F_v * E) / (2 * \pi * \rho^3)}$
Halbe Breite der Kontaktfläche	a =	9.9 mm	$\sqrt{SQRT(8 * (1 - \mu^2) * F_v * \rho) / (\pi * E)}$
Nominale Zugfestigkeit	RmN =	490 N/mm <sup>2</sup>	
min. Streckgrenze	Rp0.2 =	355 N/mm <sup>2</sup>	
Brinell Härte	HB =	145 -	(acc. DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	p <sub>max, dyn.</sub> =	435 N/mm <sup>2</sup>	p <sub>max, dyn.</sub> = 3 * HB
Nachweis	p <sub>H</sub> / p <sub>max, dyn.</sub> =	0.53	< 1.0



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 156 von 171

## Für Brücke B4

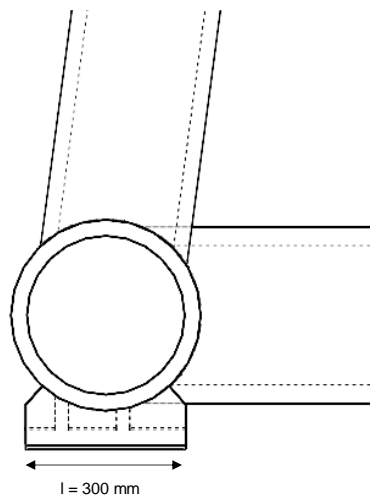
### Nachweis des Vertikalen Verschub-Schuhs für das Festlager und das Loslager



#### A) Eingabe Parameter

Kontakt Körper 1	Verschub-Schuh Brücke		
Material	S355		
E-Modul	E1 =	210,000 N/mm <sup>2</sup>	
Poisson Zahl	v1 =	0.3 -	
Krümmungsradius	ρ1 =	2,500 mm	(Platte gebogen mit R = 2.5 m)
Kontakt Körper 2	Verschub-Fläche Plattform		
Material	S355		
E-Modul	E2 =	210,000 N/mm <sup>2</sup>	
Poisson Zahl	v2 =	0.3 -	
Krümmungsradius	ρ2 =	1,000,000 mm	(ebene Platte)
Minimale Schmierfilm Dicke	h <sub>min</sub> =	0 mm	(konservative Annahme: kein Schmierfilm)
Mittlere Oberflächen Rauheit	Ra =	1.6 mm	(angenommen für Fläche gesäubert und geschliffen)
Länge der Kontaktfläche	l =	140 mm	(geschätzt; 0.5 * Verschub-Schuh Breite = 0.5*280mm)
Reibzahl	μ =	0.3	(Stahl auf Stahl)
Max. Vertikale Lagerkraft	F <sub>v</sub> =	1,523,000 N	(max. Vertikalkraft)
			(von Lagerreaktion der Brücken Fest- / Loslager, incl. EC3 Faktoren)

#### B) Nachweis des Kontaktdruck nach Hertz

reduzierter Krümmungsradius	ρ =	2,494 mm	$\rho_1 * \rho_2 / (\rho_1 + \rho_2)$
reduzierter E-Modul	E =	230,769 N/mm <sup>2</sup>	$2 * E_1 * E_2 / [(1 - \nu_1^2) * E_2 + (1 - \nu_2^2) * E_1]$
spezifische Schmierfilm Dicke	λ =	0 -	h <sub>min</sub> / Ra
			λ < 2: Limit Friction
			2 ≤ λ ≤ 3: Mixed Friction
			λ > 3: Liquid Friction
Kontaktdruck nach Hertz	p <sub>H</sub> =	400 N/mm <sup>2</sup>	$\sqrt{(F_v * E) / (2 * \pi * \rho * l)}$
Halbe Breite der Kontaktfläche	a =	16.5 mm	$\sqrt{(8 * (1 - \mu^2) * F_v * \rho) / (\pi * l * E)}$
Nominale Zugfestigkeit	R <sub>mN</sub> =	490 N/mm <sup>2</sup>	
min. Streckgrenze	R <sub>p0.2</sub> =	355 N/mm <sup>2</sup>	
Brinell Härte	HB =	145 -	(nach DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	p <sub>max,dyn</sub> =	435 N/mm <sup>2</sup>	p <sub>max,dyn</sub> = 3 * HB
Nachweis	p <sub>H</sub> / p <sub>max,dyn</sub> =	0.92	< 1.0



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 157 von 171

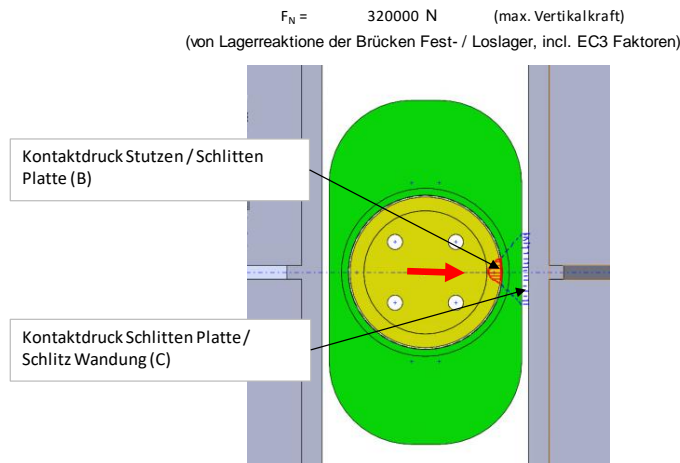
## Anhang B. Schlitten-Platte – Kontaktdruck / -fläche

Für alle Brücken außer Brücke B4

### Nachweis der Kontaktdrücke zwischen Stützen und Schlitten-Platte bzw. Schlitten-Platte und Plattform Schlitz





#### B1) Allgemeines

Maximale Horizontale Lagerkraft



#### B2) Nachweis des Kontaktdruck nach Hertz - Stützen / Schlitten



Kontakt Körper 1	Stützen - OD = 219.1 mm	
Material	S355	
E-Modul	E1 =	210000 N/mm <sup>2</sup>
Poisson Zahl	v1 =	0.3 -
Krümmungsradius	ρ1 =	109.5 mm (OD = 219 mm)
Kontakt Körper 2	Ebene Innen-Oberfläche des Plattform Schlitzes	
Material	S355	
E-Modul	E2 =	210000 N/mm <sup>2</sup>
Poisson Zahl	v2 =	0.3 -
Krümmungsradius	ρ2 =	-112 mm (ID = 224 mm, konkave)
Minimale Schmierfilm Dicke	h <sub>min</sub> =	0 mm (konservative Annahme: kein Schmierfilm)
Mittlere Oberflächen Rauheit	Ra =	1.6 mm (angenommen für Fläche gesäubert und geschliffen)
Länge der Kontaktfläche	l =	30 mm (geschätzt; nur über die Höhe der Schlitten Platte = 30 mm)
Reibzahl	μ =	0.3 (Stahl auf Stahl)
reduzierter Krümmungsradius	ρ =	4906 mm $\rho_1 \cdot \rho_2 / (\rho_1 + \rho_2)$
reduzierter E-Modul	E =	230769 N/mm <sup>2</sup> $2 \cdot E_1 \cdot E_2 / [(1 - v_1^2) \cdot E_2 + (1 - v_2^2) \cdot E_1]$
spezifische Schmierfilm Dicke	λ =	0 - $h_{min} / Ra$
		λ < 2: Limit Friction 2 ≤ λ ≤ 3: Mixed Friction λ > 3: Liquid Friction
Kontaktdruck nach Hertz	<b>p<sub>H</sub> =</b>	<b>283 N/mm<sup>2</sup></b> $\sqrt{[(F_N \cdot E) / (2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l)]}$
Halbe Breite der Kontaktfläche	a =	$\sqrt{[(8 \cdot (1 - \mu^2) \cdot F_N \cdot \rho) / (\pi \cdot l \cdot E \cdot l)]}$ 24.0 mm
Nominale Zugfestigkeit	RmN =	490 N/mm <sup>2</sup>
min. Streckgrenze	Rp0.2 =	355 N/mm <sup>2</sup>
Brinell Härte	HB =	145 - (acc. DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	p <sub>max,dy,n</sub> =	435 N/mm <sup>2</sup> $p_{max,dy,n} = 3 \cdot HB$
Nachweis	<b>p<sub>H</sub> / p<sub>max,dy,n</sub> =</b>	<b>0.65 &lt; 1.0</b>

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 158 von 171

**B3) Nachweis des Kontaktdruck - Schlitten / Schlitz Wandung**

Länge der Kontaktfläche	$l =$	30 mm	(geschätzt; nur über die Höhe der Schlitten Platte = 30 mm)
Abstand Innenwandung Schlitten-Rohr zu Außenkante	$c =$	28 mm	(3D Model)
Breite der Kontaktfläche	$b =$	104 mm	(geschätzt; $b = 2 \cdot a + 2 \cdot c$ )
Kontaktfläche	$A_c = l \cdot b =$	3122 mm <sup>2</sup>	
Kontaktdruck	$p_H = F_H / A_c =$	103 N/mm <sup>2</sup>	✓
Nominale Zugfestigkeit	$R_{mN} =$	490 N/mm <sup>2</sup>	
min. Streckgrenze	$R_{p0.2} =$	355 N/mm <sup>2</sup>	
Brinell Härte	$HB =$	145 -	(acc. DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	$p_{max,dyn} =$	435 N/mm <sup>2</sup>	$p_{max,dyn} = 3 \cdot HB$
Nachweis	$p_H / p_{max,dyn} =$	0.24 < 1.0	✓



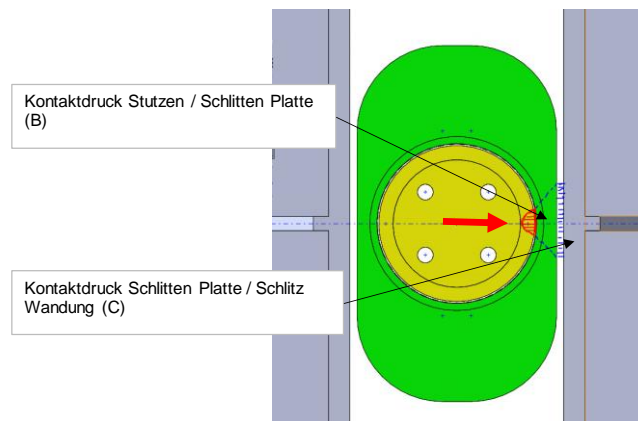
	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 159 von 171

## Für Brücke B4

### Nachweis der Kontaktdrücke zwischen Stützen und Schlitten-Platte bzw. Schlitten-Platte und Plattform Schlitz






Maximale Horizontale Lagerkraft

$F_N = 332.000 \text{ N}$   
(von Lagerreaktionen der Brücken Fest- / Loslager, incl. EC3 Faktoren)







#### B) Nachweis des Kontaktdruck nach Hertz - Stützen / Schlitten

Kontakt Körper 1	Stützen - OD = 355.6 mm	
Material	S355	
E-Modul	$E1 = 210.000 \text{ N/mm}^2$	
Poisson Zahl	$\nu1 = 0.3$	
Krümmungsradius	$\rho1 = 177.8 \text{ mm}$	(OD = 355.6 mm)
Kontakt Körper 2	Ebene Innen-Oberfläche des Plattform Schlitzes	
Material	S355	
E-Modul	$E2 = 210.000 \text{ N/mm}^2$	
Poisson Zahl	$\nu2 = 0.3$	
Krümmungsradius	$\rho2 = -187.4 \text{ mm}$	(ID = 374.4 mm, konkave)
Minimale Schmierfilm Dicke	$h_{min} = 0 \text{ mm}$	(konservative Annahme: kein Schmierfilm)
Mittlere Oberflächen Rauheit	$Ra = 1.6 \text{ mm}$	(angenommen für Fläche gesäubert und geschliffen)
Länge der Kontaktfläche	$l = 30 \text{ mm}$	(geschätzt; nur über die Höhe der Schlitten Platte = 30 mm)
Reibzahl	$\mu = 0.3$	(Stahl auf Stahl)
reduzierter Krümmungsradius	$\rho = 3.488 \text{ mm}$	$\rho1 * \rho2 / (\rho1 + \rho2)$
reduzierter E-Modul	$E = 230.769 \text{ N/mm}^2$	$2 * E1 * E2 / [(1 - \nu1^2) * E2 + (1 - \nu2^2) * E1]$
spezifische Schmierfilm Dicke	$\lambda = 0$	$h_{min} / Ra$
		$\lambda < 2$ : Limit Friction $2 \leq \lambda \leq 3$ : Mixed Friction $\lambda > 3$ : Liquid Friction
Kontaktdruck nach Hertz	$p_H = 341 \text{ N/mm}^2$	$\sqrt{[(F_N * E) / (2 * \pi * \rho * l)]}$
Halbe Breite der Kontaktfläche	$a = 19.7 \text{ mm}$	$\sqrt{[(8 * (1 - \mu^2) * F_N * \rho) / (\pi * E * l)]}$
Nominale Zugfestigkeit	$R_{mN} = 490 \text{ N/mm}^2$	
min. Streckgrenze	$R_{p0.2} = 355 \text{ N/mm}^2$	
Brinell Härte	HB = 145 -	(nach DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	$p_{max.dyn} = 435 \text{ N/mm}^2$	$p_{max.dyn} = 3 * HB$
Nachweis	$p_H / p_{max.dyn} = 0.78 < 1.0$	

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 160 von 171

### C) Nachweis des Kontaktdruck - Schlitten / Schlitz Wandung

Länge der Kontaktfläche	$l =$	30 mm	(geschätzt; nur über die Höhe der Schlitten Platte = 30 mm)
Abstand Innenwandung Schlitten-Rohr zu Außenkante	$c =$	37.8 mm	(3D Model)
Breite der Kontaktfläche	$b =$	115 mm	(geschätzt; $b = 2 \cdot a + 2 \cdot c$ )
Kontaktfläche	$Ac = l \cdot b =$	3,449 mm <sup>2</sup>	
Kontaktdruck	$p_H = F_H / Ac =$	<b>96 N/mm<sup>2</sup></b>	✓
Nominale Zugfestigkeit	$R_{mN} =$	490 N/mm <sup>2</sup>	
min. Streckgrenze	$R_{p0.2} =$	355 N/mm <sup>2</sup>	
Brinell Härte	HB =	145 -	(nach DIN EN ISO 18265)
zul. Kontaktdruck nach Hertz	$p_{max,dyn} =$	435 N/mm <sup>2</sup>	$p_{max,dyn} = 3 \cdot HB$
Nachweis	$p_H / p_{max,dyn} =$	<b>0.22 &lt; 1.0</b>	✓

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 161 von 171

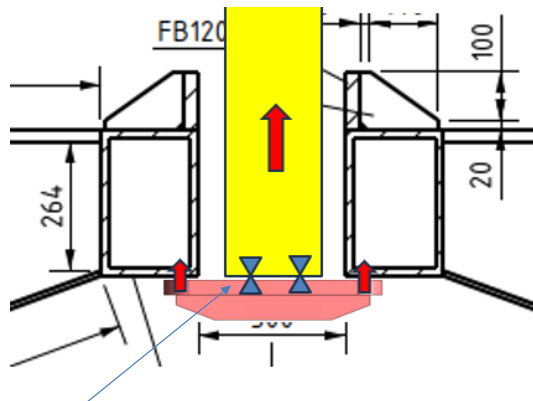
## Anhang C. Abhebesicherung am Stutzen – Schrauben-Nachweis / Biege-Kapazität

Für alle Brücken außer Brücke B4

### Nachweise der Abhebesicherung am Stutzen - Schrauben-Nachweis / Biege-Kapazität

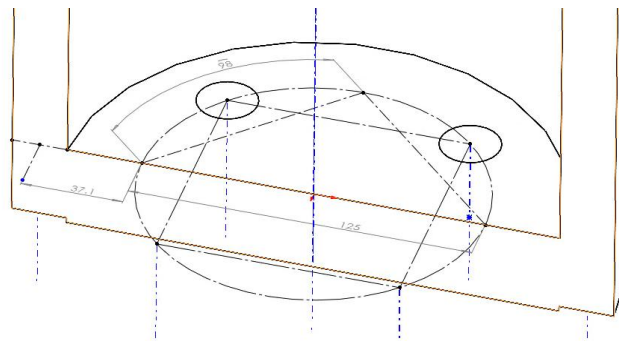
#### C1) Eingabe Parameter

Material	S355
Charakteristische Streckgrenze	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$
Stutzen Abmessungen	Außen-Durchmesser ODp = 219.1 mm
	Wandstärke t1 = 20 mm
Struktureller Schlitz - Abstand	c = 300 mm
Länge der Abhebesicherungs-Platte	l = 450 mm
max. mögliche Abhebekraft = $0.5 \cdot \text{max. Brückeneigengewicht} \cdot \text{Lastfaktor}$ (konservativ geschätzt, da hier nach Brückenberechnung ein Wert = 0 resultiert)	
	max. $F_{v.up} = 0.5 \cdot 50 \text{ t} \cdot 1.35 = - 337.5 \text{ kN}$








#### C2) Nachweis der Schraubenverbindung

Anzahl der Schrauben	nb = 4	pcs.	M20 - 8.8
Durchmesser der Schrauben	db = 20	mm	
Lochdurchmesser	d0 = 22	mm	
Durchmesser des Lochkreises	dc = 125	mm	



Schrauben	geschätzte mögliche Schraubenzugkraft infolge der maximalen Lager-Abhebekraft		
	max. $F_{b.t} = \text{max. } F_{v.up} / nb =$	84.4	kN
Grenzzugkraft je Schraube	$F_{t,Rd} =$	141	kN ("Schneider Bautabellen", Auflage 19)
Nachweis	max. $F_{b.t} / F_{t,Rd} =$	0.60	< 1.0





  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 162 von 171

**C3) Nachweis der Biege-Kapazität der Stutzen-Platte**

Stutzen Platte	Dicke der Platte	$t_2 = 30$	mm	
	Hebelarm (Lochkreis zu Mitte Stutzen-Wand)	$e = (ODp-t_1-dc) / 2 =$	37.1	mm
	Einflußbreite des Lochkreissegments	$b =$	98	mm
	Netto-Querschnittsfläche des Plattensegments	$A_n = (b-d_0) \cdot t_2 =$	2280	mm <sup>2</sup>
	Moment um Netto-Querschnittsfläche aus Fv.up	$M_y = F_b \cdot t \cdot e =$	3126094	Nmm
	Querschnitts	$W_y = (b-d_0) \cdot t_2^2 / 6 =$	11400	mm <sup>3</sup>
	<u>Spannungen im Segment-Querschnitt:</u>			
	Max. Schubspannung	$\max \tau_{xy} = 3/2 \cdot F_{bt} / A_n =$	55.5	N/mm <sup>2</sup>
	Mittlere Schubspannung	$\text{avg } \tau_{xy} = F_{v,up} / A =$	37.0	N/mm <sup>2</sup>
	Biegespannung	$\max \sigma_x = M_y / W_y =$	274.2	N/mm <sup>2</sup>
	Vergleichsspannung	$\max \sigma_v = \text{SQRT}(\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2) =$	281.6	N/mm <sup>2</sup>
	Streckgrenze (nach Materialstärke)	$f_{yk} =$	345	N/mm <sup>2</sup> ( S355, THK > 40 mm )
	Teilsicherheitsbeiwert für Detailnachweise	$\gamma_{m2} =$	1.25	(für Grenzzustand der Tragfähigkeit)
	Designwert der Streckgrenze	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{m2} =$	276.0	N/mm <sup>2</sup>
	Nachweis	$\sigma_v / \sigma_{v,Rd} =$	1.02	< 1.0

Da hier der Hand-Check nicht ausreicht ist im Bericht die zugehörige FE-Berechnung dargestellt.



  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 163 von 171

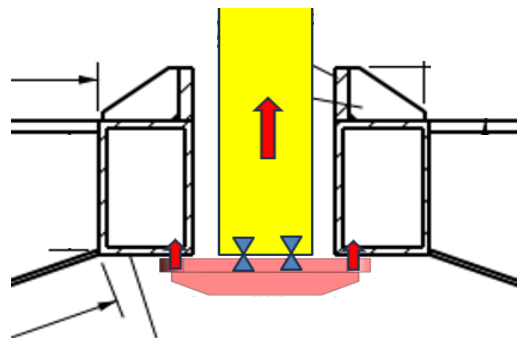
## Für Brücke B4

### Nachweise der Abhebesicherung am Stützen - Schrauben-Nachweis / Biege-Kapazität

#### C1) Eingabe Parameter

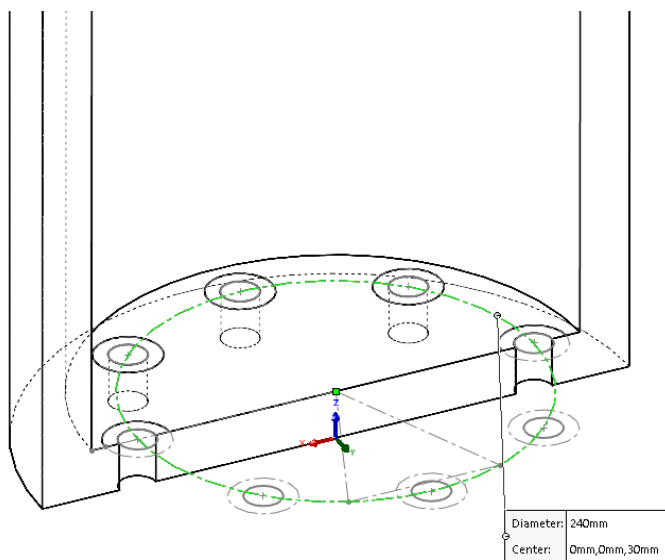
Material	S355
Charakteristische Streckgrenze	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$
Stützen Abmessungen	Außen-Durchmesser ODp = <u>355.6 mm</u>
	Wandstärke t1 = <u>30 mm</u>

Max. Abhebekraft max. Fv.up = 1,050 kN







#### C2) Nachweis der Schraubenverbindung

Anzahl der Schrauben	nb = 8	pcs.	M22 - 8.8
Durchmesser der Schrauben	db = 22	mm	
Lochdurchmesser	d0 = 24	mm	
Durchmesser des Lochkreises	dc = 240	mm	



Schrauben	geschätzte mögliche Schraubenzugkraft infolge der maximalen Lager-Abhebekraft	$\text{max. Fb.t} = \text{max. Fv.up} / \text{nb} = 131.3 \text{ kN}$
	Grenzzugkraft je Schraube	$F_{t,Rd} = 174.5 \text{ kN}$ ("Schneider Bautabellen", Auflage 19)
Nachweis		$\text{max. Fb.t} / F_{t,Rd} = 0.75 < 1.0$





  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 164 von 171

**C3) Nachweis der Biege-Kapazität der Stützen-Platte**

Stützen-Platte	Dicke der Platte	$t_2 = 45$	mm	
	Hebelarm (Lochkreis zu Mitte Stützen-Wand)	$e = (ODp-t_1-dc) / 2 = 42.8$	mm	
	Einflußbreite des Lochkreissegments	$b = 92$	mm	
	Netto-Querschnittsfläche des Plattensegments	$A_n = (b-d_0) \cdot t_2 = 3,053$	mm <sup>2</sup>	
	Moment um Netto-Querschnittsfläche aus Fv.up	$M_y = F_b \cdot t \cdot e = 5,617,500$	Nmm	
	Querschnitts	$W_y = (b-d_0) \cdot t_2^2 / 6 = 22,896$	mm <sup>3</sup>	
	<u>Spannungen im Segment-Querschnitt:</u>			
	Max. Schubspannung	$\max \tau_{xy} = 3/2 \cdot F_{bt}/A_n = 64.5$	N/mm <sup>2</sup>	
	Mittlere Schubspannung	$\text{avg } \tau_{xy} = F_{v,up}/A = 43.0$	N/mm <sup>2</sup>	
	Biegespannung	$\max \sigma_x = M_y / W_y = 245.3$	N/mm <sup>2</sup>	
	Vergleichsspannung	$\max \sigma_v = \text{SQRT}(\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2) = 256.4$	N/mm <sup>2</sup>	
	Streckgrenze (nach Materialstärke)	$f_{yk} = 335$	N/mm <sup>2</sup>	( S355, THK > 40 mm )
	Teilsicherheitsbeiwert für Detailnachweise	$\gamma_{m2} = 1.25$		(für Grenzzustand der Tragfähigkeit)
	Designwert der Streckgrenze	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{m2} = 268.0$	N/mm <sup>2</sup>	
	Nachweis	$\sigma_v / \sigma_{v,Rd} = 0.96$	< 1.0	





	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 165 von 171

## Anhang D. Nachweis der Augplatte

### Strength Check of Padeyes according to GL 2007: IV-Part 6

(according to GL 2007: Rules for Classification and Construction, IV – Industrial Services, Part 6: Offshore Technology, Chapter 4, Section, 10 E Marine Operation)

#### A) Factors

##### A.1) Load Factors

Consequence factor, according to GL IV-Part 6  $f_{CONS} = 1.35$  (section 3.1.1)

##### B) Material Strength and Allowable Stresses

Material Grade/ Yield Strength  $\sigma_y = 335 \text{ N/mm}^2$  (Including thickness reduction)

Global safety factor axial and bending stress  $\gamma_{axial+bend} = 1.45$  (section 3.1.2)

Global safety factor shear stress  $\gamma_{shear} = 2.16$  (section 3.1.2)

Global safety factor equivalent stress  $\gamma_{equ} = 1.25$  (section 3.1.2)

Axial and bending Stress

$$\sigma_{axial\_allow} = \sigma_y / \gamma_{axial+bend}$$

$$\sigma_{axial\_allow} = 231.0 \text{ N/mm}^2$$

Shear Stress

$$\tau_{allow} = \sigma_y / \gamma_{shear}$$

$$\tau_{allow} = 155.1 \text{ N/mm}^2$$

Equivalent Stress

$$\sigma_{eq\_allow} = \sigma_y / \gamma_{equ}$$

$$\sigma_{eq\_allow} = 268.0 \text{ N/mm}^2$$

##### C) Pad Eye Design Loads

Angle between sling / force and horizontal plane

$$\beta = 0 \text{ degree}$$

Sling Load

$$P_S = 155.6 \text{ kN}$$

Horizontal Padeye Load

$$F_x = P_S \cdot \cos(\beta)$$

$$F_x = 155.6 \text{ kN}$$

(including  $f_{CONT}$ ,  $f_{DAF}$ ,  $f_{COG}$  and  $f_{SKL}$ , according to GL)

Lateral Padeye Load (5% of Main Load)

$$F_y = 15.6 \text{ kN}$$

(10% of Main Force PS)

Vertical Padeye Load

$$F_z = P_S \cdot \sin(\beta)$$

$$F_z = 0.0 \text{ kN}$$



##### D) Dimensions

###### D.1) Padeye

Pin Hole Diameter

$$d = 44 \text{ mm}$$

Cheek Plate Diameter

$$D = 0 \text{ mm}$$

Main Plate Radius

$$R = 90 \text{ mm}$$

Pin hole height above base

$$h = 165 \text{ mm}$$

Main Plate Thickness

$$t = 25 \text{ mm}$$

Cheek Plate Thickness

$$t_1 = 0 \text{ mm}$$

Total pad-eye plate thickness

$$T = t + 2 \cdot t_1 = 25 \text{ mm}$$

Base length

$$l = 360 \text{ mm}$$

Weld thickness "a" of cheek plate

$$a = 0 \text{ mm}$$

( $a_{min} = \max\{1.5 \cdot ((t+t_1)/3) \cdot 0.5; 3\text{mm}\}$ )

Minimum weld thickness check

$a > a_{min}$  ? **not relevant**

$a_{min} = \text{---}$

Height of main plate section 1-1

$$b = R - d/2$$

$$b = 68 \text{ mm}$$

Height of cheek plate section 1-1

$$c = D/2 - d/2$$

$$c = 0 \text{ mm}$$

Distance neutral axis to Pin Hole (excentricity of pin hole)

$$e_2 = 0 \text{ mm}$$

###### D.2) Support Brackets

Number of Support Brackets

$$N = 0$$





Support Bracket length

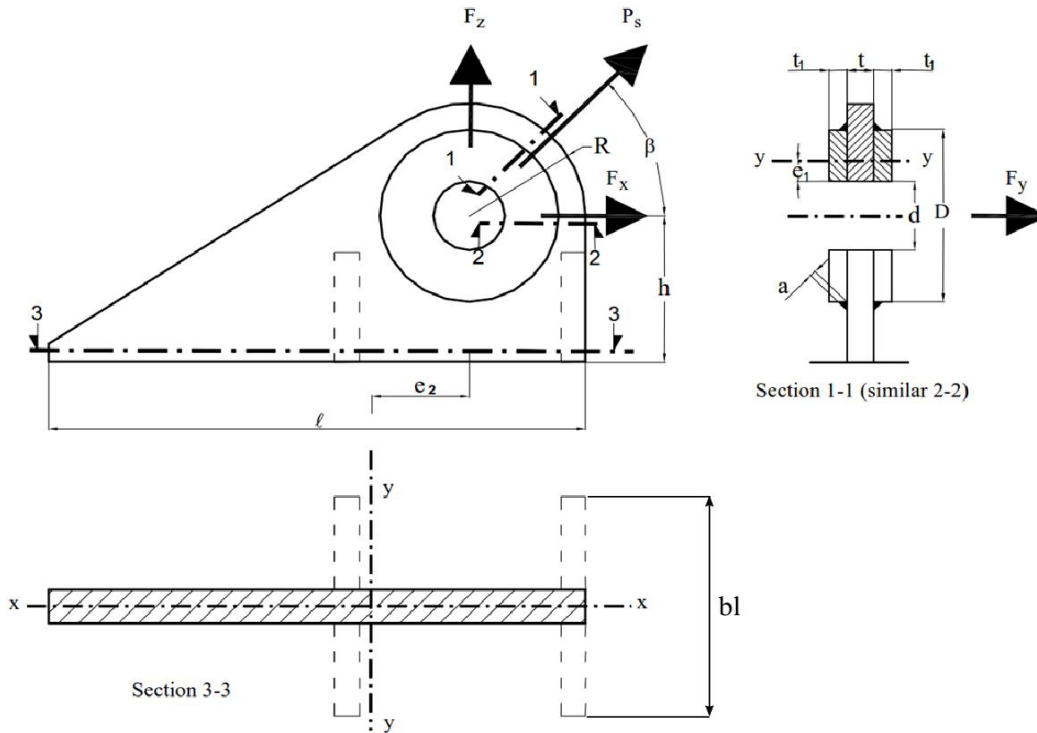
$$b_1 = 0 \text{ mm}$$

Support Bracket thickness

$$b_t = 0 \text{ mm}$$





  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr.: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 166 von 171



**E) Padeye Cross Sectional Values**

Area of Section 1-1	$A_1 = t \cdot b + 2 \cdot t_1 \cdot c$	$A_1 = 1700 \text{ mm}^2$
Shear Area Section 1-1	$A_{S1} = A_1$ for $D/(2 \cdot R) \geq 0.8$	
	$A_{S1} = 2 \cdot t_1 \cdot c + t \cdot c$ else	
	$A_{S1} = 1700 \text{ mm}^2$	
Area of Section 2-2	$A_2 = t \cdot b + 2 \cdot t_1 \cdot c$	$A_2 = 1700 \text{ mm}^2$
Shear Area Section 2-2	$A_{S2} = A_2$ for $D/(2 \cdot R) \geq 0.8$	
	$A_{S2} = 2 \cdot t_1 \cdot c + t \cdot c$ else	
	$A_{S2} = 1700 \text{ mm}^2$	
Area of Section 3-3	$A_3 = l \cdot t + N \cdot (b_1 \cdot b_1 - t \cdot b_1)$	$A_3 = 9000 \text{ mm}^2$
Shear Area Section 3-3 x-dir	$A_{S3(x)} = l \cdot t$	$A_{S3(x)} = 9000 \text{ mm}^2$
Shear Area Section 3-3 y-dir	$A_{S3(y)} = l \cdot t + N \cdot (b_1 \cdot b_1 - t \cdot b_1)$	$A_{S3(y)} = 9000 \text{ mm}^2$
Neutral axis of section 1-1 and 2-2 related to pin hole edge	$e_1 = (t \cdot b \cdot b/2 + 2 \cdot t_1 \cdot c \cdot c/2) / A_2$	$e_1 = 34.00 \text{ mm}$
Max distance to neutral axis	$Z_{\max} = \max(e_1; a - e_1)$	$Z_{\max} = 34.00 \text{ mm}$
Moment of Inertia Section 1-1	$I_{11} = (t \cdot b^3)/12 + (e_1 - b/2)^2 \cdot b \cdot t + 2 \cdot ((t_1 \cdot c^3)/12 + (e_1 - c/2)^2 \cdot c \cdot t_1)$	$I_{11} = 655066.67 \text{ mm}^4$
Section Modulus Section 1-1	$Z_{1y} = I_{11} / Z_{\max}$	$Z_{1y} = 19266.7 \text{ mm}^3$
Moment of Inertia Section 2-2	$I_{22} = (t \cdot b^3)/12 + (e_1 - b/2)^2 \cdot b \cdot t + 2 \cdot ((t_1 \cdot c^3)/12 + (e_1 - c/2)^2 \cdot c \cdot t_1)$	$I_{22} = 655066.7 \text{ mm}^4$
Section Modulus Section 2-2	$Z_{2y} = I_{22} / Z_{\max}$	$Z_{2y} = 19266.7 \text{ mm}^3$
Section Modulus $Z_{3y}$	$Z_{3y} = (l^2 \cdot t) / 6$	$Z_{3y} = 540000.0 \text{ mm}^3$
Section Modulus $Z_{3x}$ (with Brackets, if $N > 0$ )	$Z_{3x} = (l \cdot t^2) / 6 + N \cdot ((b_1^2 \cdot b_1) / 6 - (t^2 \cdot b_1) / 6)$	$Z_{3x} = 37500.0 \text{ mm}^3$



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 167 von 171

**E) Stress Checks**Please note: The written formulaes are valid for  $P_s$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  and  $F_z$  in [N]**E.1) Stress Check for Section 1-1**

(according section 4.4.1)

Shear Stress in Eye

$$\tau_{eye} = (f_{CONS} \cdot P_s) / (2 \cdot A_{S1})$$

$$\tau_{eye} = 61.77 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Shear Stress in Eye

$$U_{eye} = 100 \cdot \tau_{eye} / \tau_{allow}$$

$$U_{eye} = 39.8 \%$$

**E.2) Stress Check for Section 2-2**

(according section 4.4.2)

Equivalent Stress in Eye

$$\sigma_{eq\_eye} = f_{CONS} \cdot (F_z^2 \cdot ((1/(2 \cdot A_2)) + ((d+2 \cdot e_1)/(15 \cdot Z_{2y})))^2 + 3 \cdot (F_x/(2 \cdot A_{S2}))^2)^{0.5}$$

$$\sigma_{eq\_eye} = 106.99 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Equivalent Stress in Eye

$$U_{eq\_eye} = 100 \cdot \sigma_{eq\_eye} / \sigma_{eq\_allow}$$

$$U_{eq\_eye} = 39.9 \%$$

**E.3) Root Axial and Bending Stress Check for Section 3-3**

(according section 4.4.3)

Combined Axial and Bending at Padeye Root Stress

$$\sigma_{a/b} = f_{CONS} \cdot ((F_z/A_3) + |(F_z \cdot e_2 - F_x \cdot h)/Z_{3y}| + |F_y \cdot h/Z_{3x}|)$$

$$\sigma_{a/b} = 156.57 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Combined Axial and Bending at Padeye Root

$$U_a = 100 \cdot \sigma_{a/b} / \sigma_{axial\_allow}$$

$$U_a = 67.8 \%$$

**E.4) Root Shear Stress Check for Section 3-3**

(according section 4.4.3)

Shear Stress Root X

$$\tau_{x\_root} = f_{CONS} \cdot F_x / A_{S3(x)}$$

$$\tau_{x\_root} = 23.33 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Shear Stress Root X

$$U_{xROOT} = 100 \cdot \tau_{x\_root} / \tau_{allow}$$

$$U_{xROOT} = 15.0 \%$$



Shear Stress Root Y

$$\tau_{y\_root} = f_{CONS} \cdot F_y / A_{S3(y)}$$

$$\tau_{y\_root} = 2.33 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Shear Stress Root Y

$$U_{yROOT} = 100 \cdot \tau_{y\_root} / \tau_{allow}$$

$$U_{yROOT} = 1.5 \%$$



Equivalent Stress in Root

$$\sigma_{eq\_root} = (\sigma_{a/b}^2 + 3 \cdot (\tau_{(x)} + \tau_{(y)})^2)^{0.5}$$






$$\sigma_{eq\_root} = 162.76 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

Utilization of Equivalent Stress in Root

$$U_{eqROOT} = 100 \cdot \sigma_{eq\_root} / \sigma_{eq\_allow}$$

$$U_{eqROOT} = 60.7 \%$$



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 168 von 171

## Anhang E. Überprüfung und Vergleich der Knoten-Nachweise nach NORSOK und EC

### E.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Knoten-Nachweise sowohl nach NORSOK als auch nach EC dargestellt und verglichen.

### E.2 Kritische Knoten

#### E.2.1 Einzelheiten






Die kritischen Knoten für die exemplarisch untersuchten Brücken sind in den folgenden Tabellen mit allen relevanten Maßen aufgeführt. Diese Verbindungen werden gemäß der globalen In-Place-Analyse und gemäß den ersten in SACS durchgeführten Verbindungs-Nachweisen als am kritischsten eingestuft.

Brücke	Kritisches Knoten	Verbindungsart	Gurt-Profil		Max. Druckspannung
			OD	Dicke	
			[mm]	[mm]	[MPa]
B1	0072	K	218.9	7.9	-22.1
B3	0019	K	323.7	9.9	158,4 (Spannung)
B4	0053	T	272.8	12.4	-10.2
B7	0034	K	323.7	8.7	155,0 (Spannung)

Tabelle 1: Kritische Knoten, Verbindungstyp + Gurtabmessungen

Brücke	Strebe 1					
	OD	Dicke	Winkel	Axialkraft	OPB	IPB
	[mm]	[mm]	[°]	[kN]	[kNm]	[kNm]
B1	168.1	4.4	52.3	-154.7	15.9	4.6
B3	193.5	6.2	53.3	314.8	10.7	-4.6
B4	193.5	7.9	53.9	-435.0	-23.0	11.9
B7	193.5	6.2	51.7	266.8	-7.3	-4.6

Tabelle 2: Kritische Knoten, Strebe 1 Abmessungen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 169 von 171

Brücke	Strebe 2						Lücken
	OD	Dicke	Winkel	Längskraft	OPB	IPB	
	[mm]	[mm]	[°]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[mm]
B1	168.1	4.4	51.0	117.8	-9.6	-3.9	108.8
B3	193.5	6.2	56.1	-291.3	-5.8	5.0	59.8
B4							
B7	193.7	6.3	51.2	-260.6	3.2	4.6	110.5

Tabelle 3: Kritische Knoten, Strebe 2 Abmessungen + Lücken



### E.2.2 Lokation

Die Lage der einzelnen Knoten ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

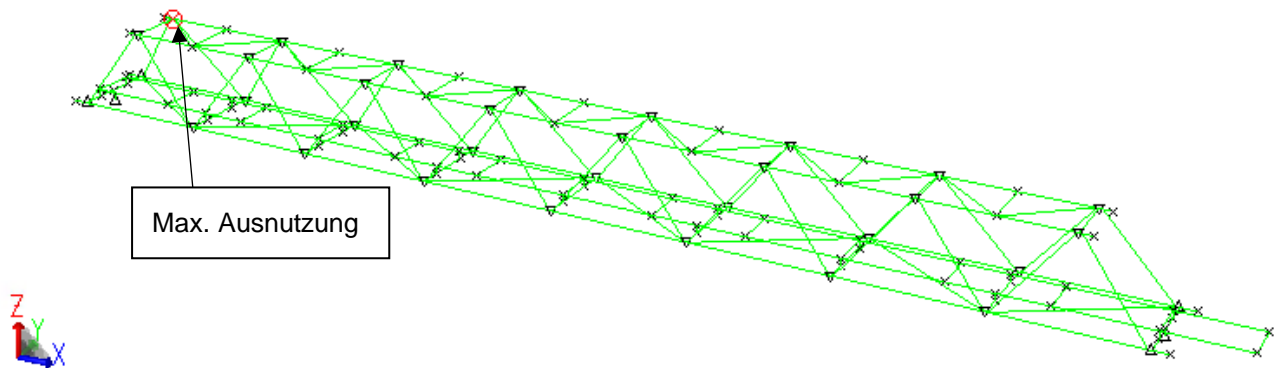


Abbildung 14-23: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 1

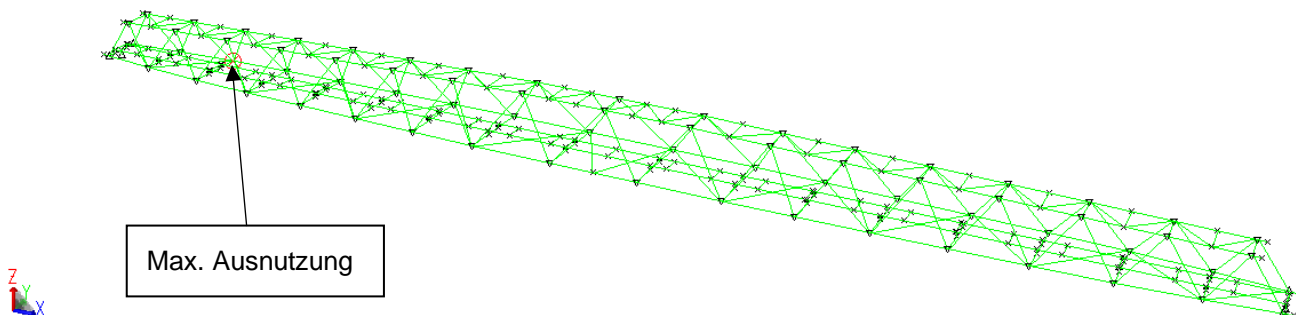







Abbildung 14-24: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 3

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 170 von 171

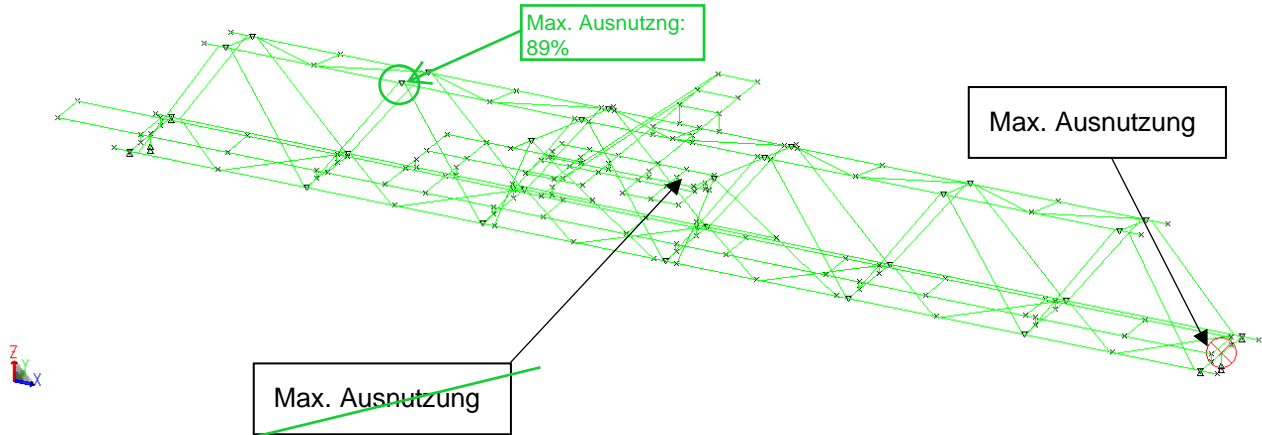


Abbildung 14-25: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 4 ✓

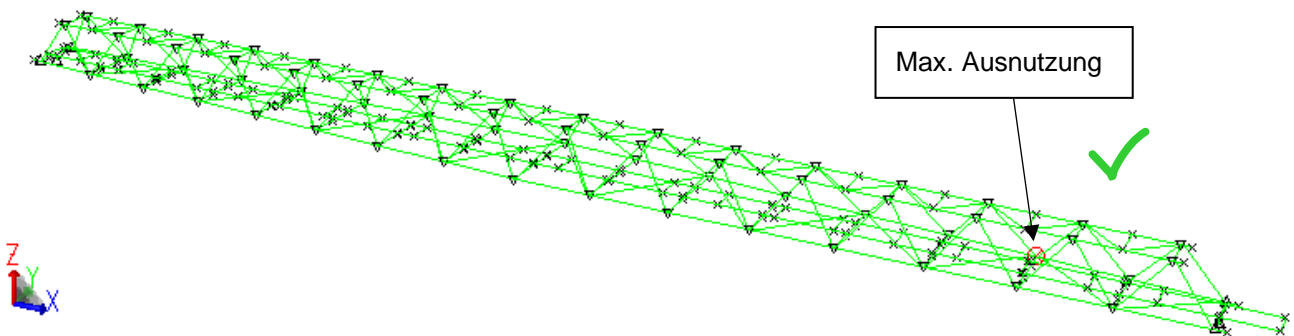


Abbildung 14-26: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 7 ✓

### E.3 Regeln und Vorschriften






Für die Zwecke der beiden gemeinsamen Knoten wird im folgenden Abschnitt kurz beschrieben, welche Regeln verwendet werden und auf denen die Kontrollen beruhen.

#### E.3.1 NORSOK

NORSOK wird in Verbindung mit SACS verwendet, um die Knoten zu überprüfen. Es wird auf globalen Analysen im Report verwiesen, wo die Prüfung näher erläutert wird.

#### E.3.2 EUROCODE-Kotennachweis nach DIN EN 1993-1-8:2010-12: "Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlkonstruktionen – Teil 1-8: Bemessung von Knoten"

Der Knotennachweis nach EC 3 gibt detaillierte Regeln zur Bestimmung des Bemessungswiderstandes verschiedener Knoten, wobei für diesen Nachweis die Hohlprofile überprüft werden.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_03
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 171 von 171

#### E.3.4 Knoten Nachweis

Um den Vergleich mit NORSOK am besten zu gewährleisten, ist der primäre Widerstandsnachweis der der kombinierten Biege- und Axialkräfte zu führen. Dieser entspricht der folgenden Anforderung, die in der nächsten Abbildung detailliert beschrieben und in Ref. [EC3] angegeben ist.

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[ \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} \right]^2 + \frac{|M_{op,i,Ed}|}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Zusätzlich zu der oben genannten Formel gibt es eine Reihe von zusätzlichen Kontrollen, die gemäß den EC-Vorschriften durchgeführt werden. Diese sind jedoch für den Vergleich mit NORSOK nicht relevant.

#### E.4 Ergebnisse und Vergleich der Knoten-Nachweise

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Knoten-Nachweise sowohl für NORSOK (SACS) als auch für EC dargestellt. Wie zu sehen ist, führt der NORSOK (SACS) Joint Check in den meisten Fällen zu einer höheren Auslastung. Für den Einzelfall, dass der EC Check höher ist, liegt die Auslastung immer noch unter 1 und wird daher als unkritisch angesehen.

Brücke	Knoten	NORSOK	EC
B1	0026	0.85	0.87
B3	0019	0.78	0.76
B4	<del>0054</del>	0.82	<del>0.73</del> 0,89
B7	0019	0.82	0.80

Tisch 2: Ergebnisse der Knoten-Nachweise und Vergleich

Alle  
Stahlbauverbindungen  
gemäß Aufsteller  
Vollstoß (Stumpfnah)

Nachweis Kabelbahnauflager zu erbringen.  
Siehe gesondertes Dokument