






	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 1 von 95

Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken

VERTRAULICH






Dieses Dokument ist vertraulich zu behandeln. Es darf ohne schriftliche Genehmigung weder ganz noch teilweise vervielfältigt, weitergegeben, inhaltlich verwertet oder mitgeteilt werden. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder der Eintragung eines Gebrauchs- oder Geschmacksmusters.

3. Ausgabe	02	06.06.2023	A. F. Zakaria	S. Damarla 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
Status	Rev.	Datum	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von	Bemerkung






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 2 von 95

Inhaltsverzeichnis






1	Einleitung	7
1.1	Allgemein.....	7
1.2	Arbeitsumfang	8
1.3	Revisionsbeschreibung	8
1.4	Abkürzungen	8
1.5	Referenzdokumente	9
2	Zusammenfassung der Ergebnisse	11
2.1	Allgemeines.....	11
2.2	Globale Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) für den eingebauten Zustand.....	11
2.3	Globale Spannungsauslastungen für das Einheben Hebeanalyse.....	12
2.4	Globale Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	12
2.5	Ergebnisse für das Risiko gegen Wirbelinduzierte Schwingungen (VIV)	13
2.6	Check der zulässigen Eigenfrequenzbereiche der Brücke	14
2.7	Brückenlager Lasten	15
2.8	Lokale Ergebnisse der Brückenlager	15
2.9	Fazit.....	15
3	Normen und Richtlinien.....	16
4	Allgemeines	17
4.1	Einheiten.....	17
4.2	Software	17
4.4	Allgemeine Material Eigenschaften	18
5	Beschreibung der Brücken	19
5.1	Terminal Layout.....	19
5.2	Brücken und Brückenlängen	20
5.3	Hauptabmessungen	20
5.4	Beschreibung der Brückenlagerung	24
6	Lasten und Lastfallkombinationen	25
6.1	Allgemeine Lasten und Lastkategorien	25
6.2	Eigengewicht (G).....	25
6.3	Veränderliche Lasten (Q)	25
6.3.1	Verkehrslast (infolge Personen auf der Brücke)	25

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 3 von 95






6.3.2	Windlasten.....	25
6.3.3	Schneelasten.....	26
6.3.4	Eislasten.....	26
6.3.5	Holmlast.....	26
6.3.6	Reibungslasten.....	26
6.3.7	Riser Hang-Off Lasten.....	26
7	Design-Kriterien und Nachweis-Methoden.....	28
7.1	Lebensdauer.....	28
7.2	Design Methode.....	28
7.2.1	Tragfähigkeitsnachweise.....	28
7.2.2	LRFD Methode.....	28
7.2.3	Allgemeines.....	28
7.2.4	Allgemeine Design-Last / Entwurfslast.....	28
7.2.5	Allgemeine Design-Widerstände.....	28
7.2.6	Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	29
7.2.7	Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).....	29
7.2.8	SLS Kriterium.....	30
7.2.9	Eigenfrequenzen.....	30
7.2.10	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	30
7.2.11	Hebeanalyse.....	31
7.2.12	Widerstandsfaktoren.....	32
8	Nachweis der Brücke 1 – 35,8 m.....	33
8.1	Allgemein.....	33
8.2	Modellbeschreibung.....	33
8.3	Randbedingungen.....	34
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 WIND.....	37
8.4.5	Schneelasten – LF SNOW.....	38
8.4.6	Eislasten – LF ICE.....	38

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 4 von 95



8.4.7	Holmlast – LF HOLM.....	39
8.4.8	Reibungslasten.....	39
8.5	Lastfallkombinationen.....	41
8.6	Ergebnisse.....	42
8.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	42
8.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	42
8.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager	43
8.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	43
8.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	44
8.6.6	Hebeanalyse.....	45
9	Nachweis der Brücke 3 – 79,2 m.....	47
9.1	Allgemein.....	47
9.2	Modellbeschreibung	47
9.3	Randbedingungen	48
9.4	Lasten.....	49
9.4.1	Allgemein.....	49
9.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	49
9.4.3	Verkehrslasten – LF LL	49
9.4.4	Windlasten – LF WIND.....	50
9.4.5	Schneelasten – LF SNOW	51
9.4.6	Eislasten – LF ICE.....	51
9.4.7	Holmlast – LF HOLM.....	52
9.4.8	Reibungslasten.....	52
9.5	Lastfallkombinationen.....	54
9.6	Ergebnisse.....	55
9.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	55
9.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	55
9.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager	56
9.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke.....	56
9.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV).....	57
9.6.6	Hebeanalyse.....	58
10	Nachweis der Brücke 4 – 32,2 m.....	60

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 5 von 95

10.1	Allgemein.....	60
10.2	Modellbeschreibung	60
10.3	Randbedingungen	61
10.4	Lasten.....	62
10.4.1	Allgemein	62
10.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	62
10.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	62
10.4.4	Windlasten – LF WIND	63
10.4.5	Schneelasten – LF SNOW.....	64
10.4.6	Eislasten – LF ICE	64
10.4.7	Holmlast – LF HOLM	65
10.4.8	Reibungslasten	65
10.4.9	Riser Hang-Off Lasten - LF RHOF	67
10.5	Lastfallkombinationen.....	68
10.6	Ergebnisse.....	69
10.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	69
10.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).....	69
10.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager	70
10.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke	70
10.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)	71
10.6.6	Hebeanalyse.....	72
11	Nachweis der Brücke 7 – 68,1 m.....	75
11.1	Allgemein.....	75
11.2	Modellbeschreibung	75
11.3	Randbedingungen	76
11.4	Lasten.....	77
11.4.1	Allgemein	77
11.4.2	Eigengewicht der tragenden Struktur – LF 100.....	77
11.4.3	Verkehrslasten – LF LL.....	77
11.4.4	Windlasten – LF WIND	78
11.4.5	Schneelasten – LF SNOW.....	79
11.4.6	Eislasten – LF ICE	79
11.4.7	Holmlast – LF HOLM	80

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 6 von 95

11.4.8	Reibungslasten	80
11.5	Lastfallkombinationen.....	81
11.6	Ergebnisse.....	83
11.6.1	Ergebnisse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	83
11.6.2	Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	83
11.6.3	Design-Reaktionslasten an den Brückenlager	84
11.6.4	Eigenfrequenzen der Brücke	84
11.6.5	Check gegen Wirbelinduzierte Vibrationen (VIV)	85
11.6.6	Hebeanalyse	86
12	Brückenlager	88
12.1	Allgemeine Beschreibung.....	88
12.2	Strukturelle Berechnung.....	88
12.2.1	Randbedingungen	88
12.2.2	Lasten	89
12.2.3	FE-Netz.....	90
12.2.4	Ergebnisse.....	93

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 7 von 95

1 Einleitung






1.1 Allgemein

Der KUNDE (ENGIE / TES) plant einen neuen Green Hub vor dem TES Grundstück am Westufer der Jade im Wilhelmshavener Hafengebiet. Die schrittweise Entwicklung des Green Hubs beinhaltet im ersten Schritt eine „Floating Storage and Regasification Unit“ (FSRU) für den LNG-Import. Das Terminal ist als „SHORT TERM“ Projekt spezifiziert. Es wird an das deutsche Gasnetz angeschlossen und soll bereits im Herbst 2023 LNG importieren können.

Der KUNDE hat IMDC beauftragt technische Unterstützung für die Meeresarbeiten zu leisten sowie Modellstudien bereitzustellen, 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 8 von 95

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 Rohrknotten
- 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 02:






Aufgrund der umfangreichen Überarbeitung in dieser Revision wird auf eine detaillierte Revisionsbeschreibung sowie Markierungen aller Änderungen verzichtet.

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






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 9 von 95

Abkürzung	Beschreibung
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






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-2001.04; "Wilhelmshaven FSRU: Erläuterungsbericht"; Rev. 04; 2023-05-16
- [3.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2100_00; "Strukturzeichnung Brücke 1"; 2023-05-17
- [4.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2101_00; "Strukturzeichnung Brücke 2"; 2023-05-25

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 10 von 95

- [5.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2102_00; "Strukturzeichnung Brücke 3"; 2023-05-17
- [6.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2103_00; "Strukturzeichnung Brücke 4"; 2023-05-26
- [7.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2104_00; "Strukturzeichnung Brücke 5"; 2023-05-26
- [8.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2105_00; "Strukturzeichnung Brücke 6"; 2023-05-26
- [9.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2106_01; "Strukturzeichnung Brücke 7"; 2023-05-25
- [10.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2107_00; "Strukturzeichnung Brücke 8"; 2023-05-25
- [11.] Overdick (OV); TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DWG.2108_00; "Strukturzeichnung Brücke 9"; 2023-05-26

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 11 von 95

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 0,78. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,73 während In-place Zustand.

Brücke B3

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,83. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,77 während In-place Zustand.






Brücke B4

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,86. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,73 während In-place Zustand.

Brücke B7

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,85. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,73 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 12 von 95

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 0,24. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,51 während In-place Zustand.

Brücke B3

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,56. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,55 während In-place Zustand.

Brücke B4

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,81. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,13 während In-place Zustand.

Brücke B7

Die maximale Member-Ausnutzung ist bei 0,52. Außerdem die maximale Knoten-Ausnutzung ist bei 0,64 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 $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 35,8 \text{ m} / 200 = 179 \text{ mm}$.

Brücke B3

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt $\delta = 273$ mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 79,2 \text{ m} / 200 = 396 \text{ mm}$.






Brücke B4

Die maximale Verformung der Brücke tritt für LCOM 601 (SLS) auf und beträgt $\delta = 82$ mm. Dies ist somit deutlich kleiner als die erlaubten Verformung von $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 32,2 \text{ m} / 200 = 161 \text{ mm}$.

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 $\delta_{\text{zulässig}} = L/200 = 68,1 \text{ m} / 200 = 340,5 \text{ mm}$.

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 13 von 95

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 $v_{crit} = 76,3$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 48,53$ 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 $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 49,39$ m/s.

Brücke B3

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 60,3$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 48,53$ m/s.

Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 52,6$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 49,39$ m/s.

Brücke B4

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 74,3$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 48,45$ m/s.






Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 58,6$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 49,39$ m/s.

Brücke B7

Die kritische Windgeschwindigkeit für die horizontalen Primärstrukturen auf dem Brückenboden wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 94,6$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 48,53$ m/s.

Die Kritische Windgeschwindigkeit für die Diagonalen an den Brückenseiten wird geschätzt und beträgt $v_{crit} = 75,1$ m/s. Dies ist also deutlich größer als $1,25 \cdot 10$ -Minuten-Mittel Windgeschwindigkeit = $1,25 \cdot v_m = 49,39$ 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 14 von 95

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 10 % 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 10% Gewichtsaufschlag [Hz]	Grenz-Frequenz [Hz]	Check
B1	4,560	4,78	>3,0	Ok
B3	1,470	1,40	<1,5	Ok
B4	6,940	6,62	>3,0	Ok
B7	1,498	1,43	<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 10% Gewichtsaufschlag [Hz]	Grenz- Frequenz [Hz]	Check
B1	3,78	3,60	>1,5	Ok
B3	1,64	1,57	>1,5	Ok
B4	4,27	4,07	>1,5	Ok
B7	1,92	1,83	>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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 15 von 95

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	155	500	1.508	370
Vertikal (Auftrieb) pro Lager	-	-	-1.067	-
Horizontal (y-Richtung) pro Pin	120	300	332	230
Horizontal (x-Richtung) pro Pin	47	150	147	111






2.8 Lokale Ergebnisse der Brückenlager

Die Brückenlager werden für die Designlasten ausgelegt. Die sich daraus ergebenden Spannungsverläufe sind moderat mit einer maximalen Auslastung von 97 %.

Für detaillierte Ergebnisse siehe Kapitel 12.2.4.

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 16 von 95

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 17 von 95

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 ³
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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 18 von 95

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]	355
Dichte [kg/m ³]	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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 19 von 95

5 Beschreibung der Brücken

5.1 Terminal Layout

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

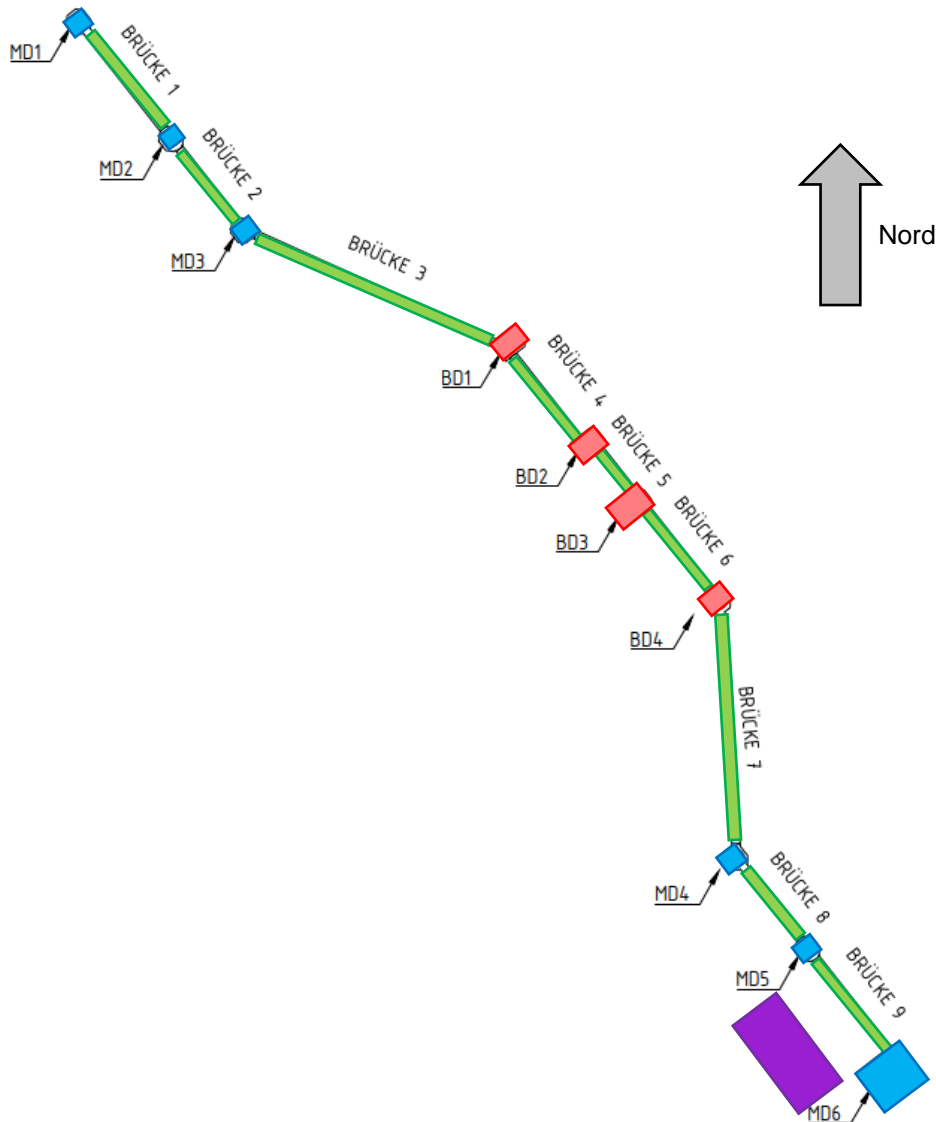




Abbildung 5-1: Definition der Dalben und Brücken

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 20 von 95

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: 30,0 m

Die Brücken 2 und 8, sowie die Brücken 6 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 Brücke 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	30,0
max. Höhe (Achse zu Achse)	H _{max} =	2,60	2,60	3,50	3,40	2,60	2,60	2,50	2,60	2,60
min. Höhe (Achse zu Achse)	H _{min} =	2,60	2,60	2,75	3,08	2,60	2,60	2,50	2,60	2,60
max. Breite (Achse zu Achse)	B _{max} =	2,50	2,50	5,10	2,50	2,50	2,50	4,80	2,50	2,50
min. Breite (Achse zu Achse)	B _{min} =	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Laufweg Lichtmaße	B _L x H _L =	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 _{max} =	14,55	14,55	15,68	16,26	14,55	14,55	14,48	14,55	14,55
Brückenlager über LAT	Z _{min} =	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60	11,60

Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Brücken:

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST- DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 21 von 95

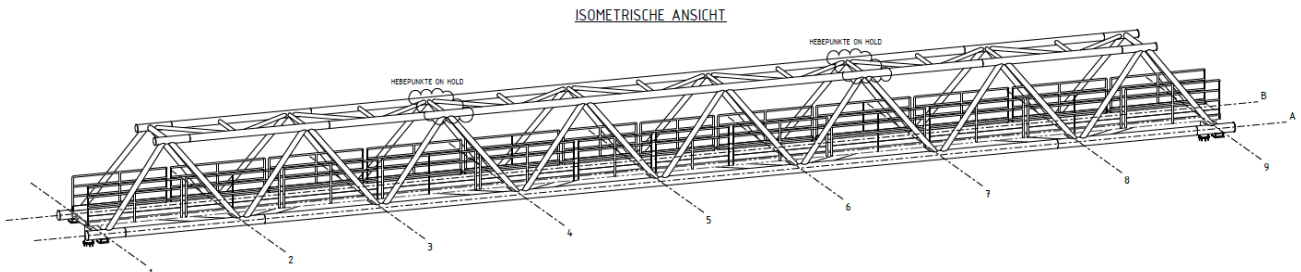


Abbildung 5-2: Brücke 1

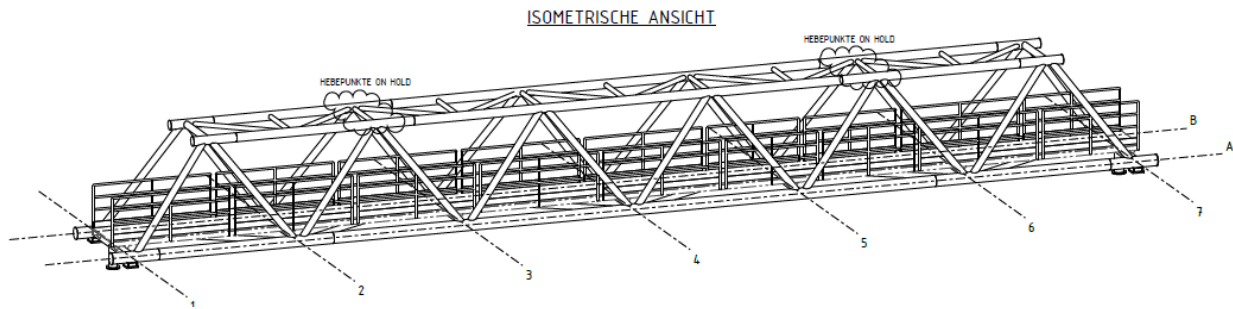


Abbildung 5-3: Brücke 2

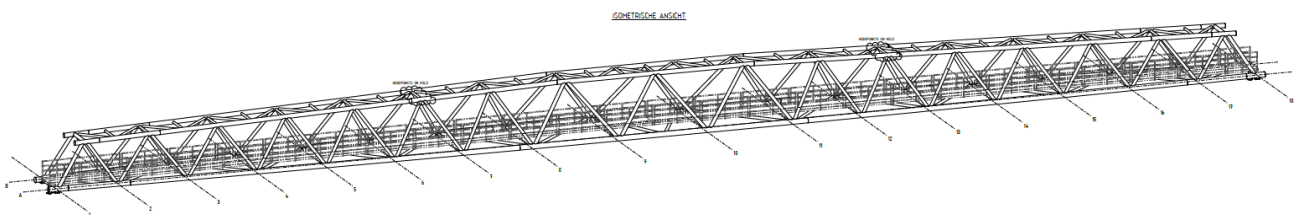






Abbildung 5-4: Brücke 3

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 22 von 95

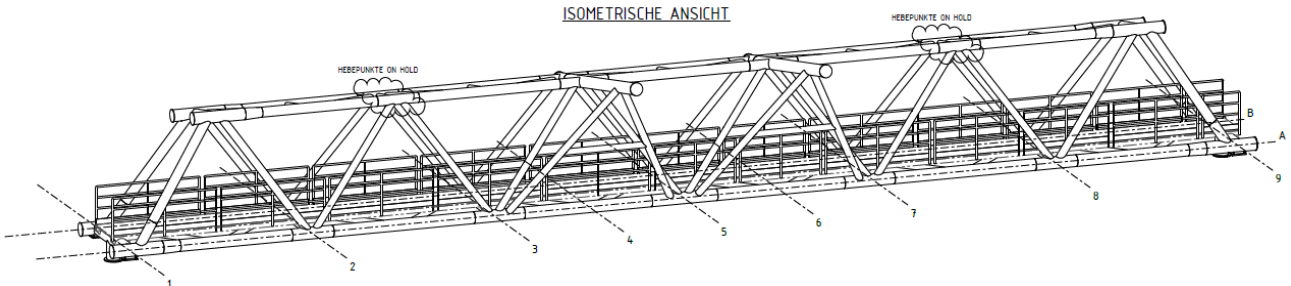


Abbildung 5-5: Brücke 4

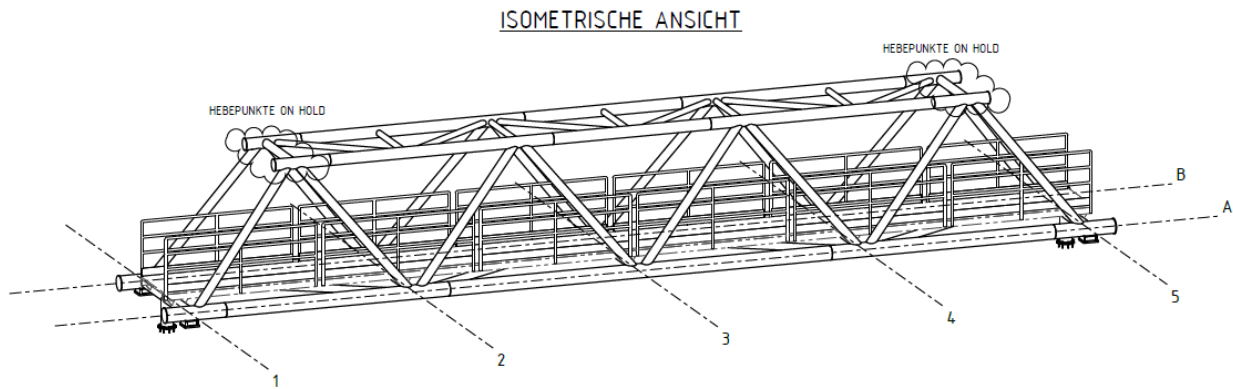


Abbildung 5-6: Brücke 5

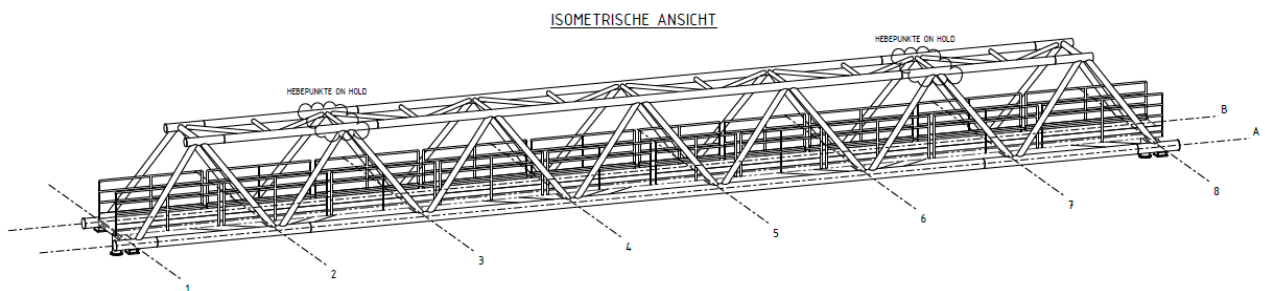






Abbildung 5-7: Brücke 6

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 23 von 95

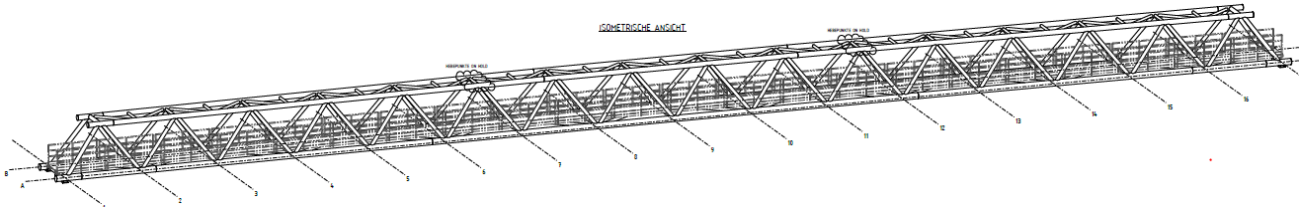


Abbildung 5-8: Brücke 7

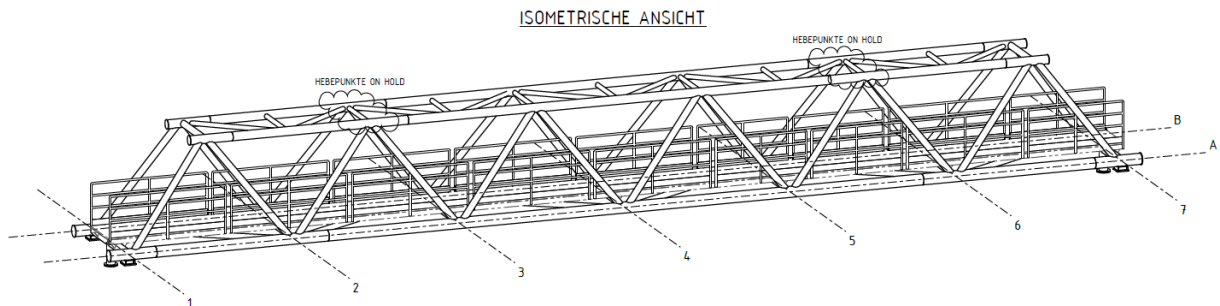


Abbildung 5-9: Brücke 8

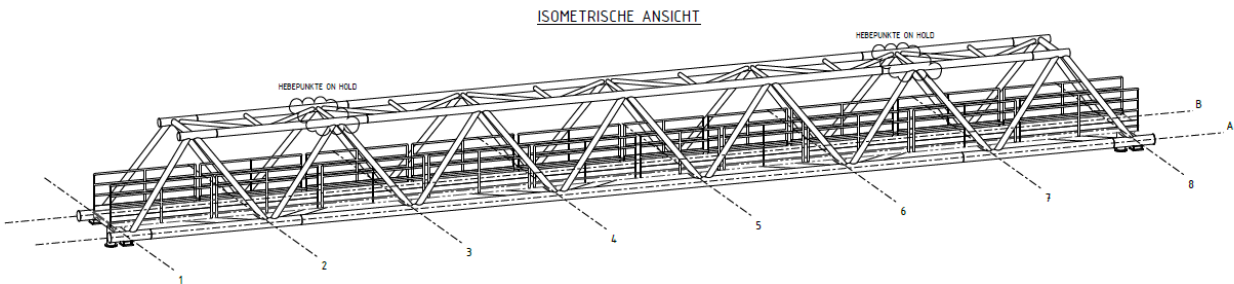




Abbildung 5-10: Brücke 9

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 24 von 95

5.4 Beschreibung der Brückenlagerung

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

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

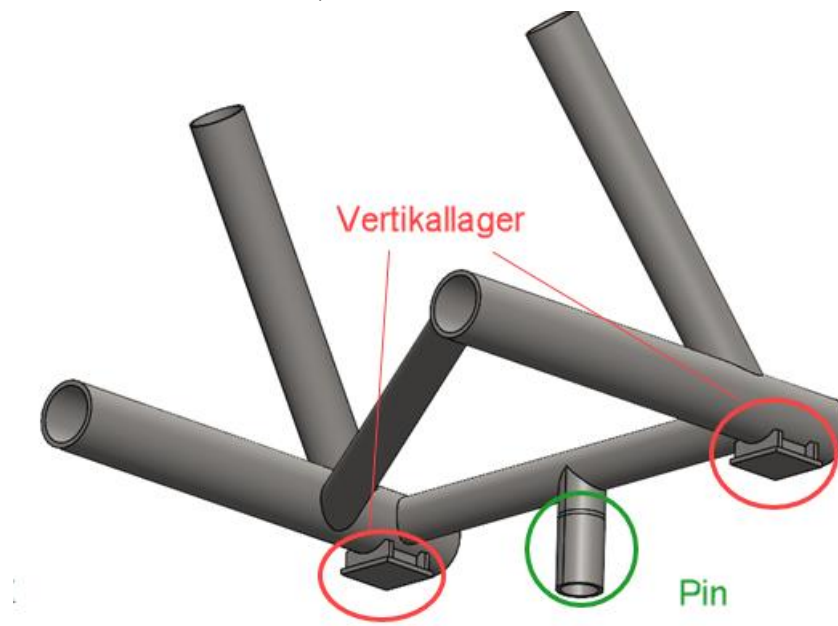







Abbildung 5-11: Brückenlager

Die Lager aller Brücken wird 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 25 von 95

6 Lasten und Lastfallkombinationen

6.1 Allgemeine Lasten und Lastkategorien

Lasten und Lasteffekte auf die Brücken entstehen infolge von:

- Eigengewicht (G)
- Verkehrslasten (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

Aerodynamische Beiwerte für einzelne Stahlquerschnitte

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 26 von 95

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 $< 30^\circ$.
$C_e =$	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 $H_d = 0,525 \text{ kN/m}$ oben an allen Handläufen angesetzt.

6.3.6 Reibungslasten

Die Reibungslasten werden mit $F_R = \mu \cdot F_N$ bestimmt, wo μ 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.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 27 von 95

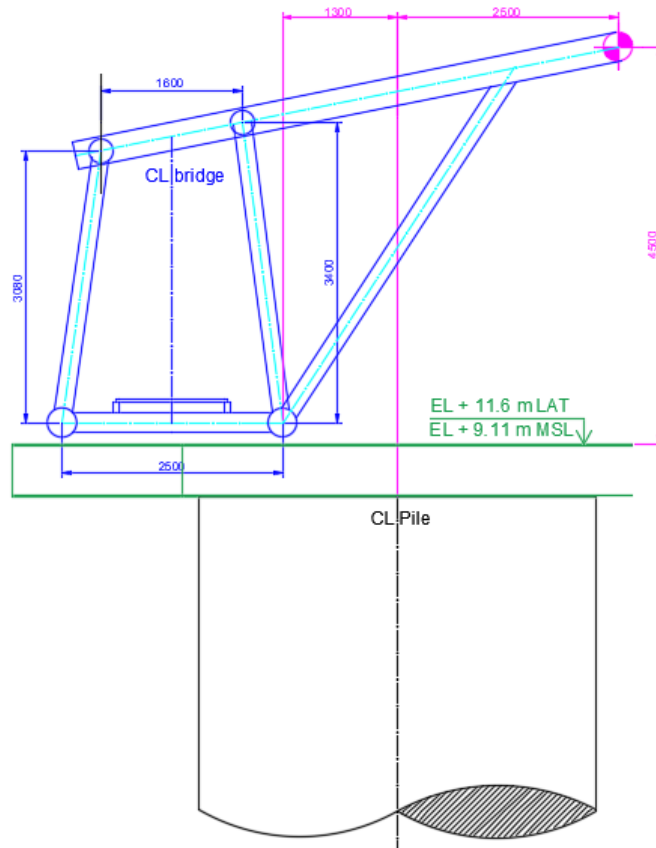


Figure 6-1 Position der Riser Hang-Offs, Seitenansicht

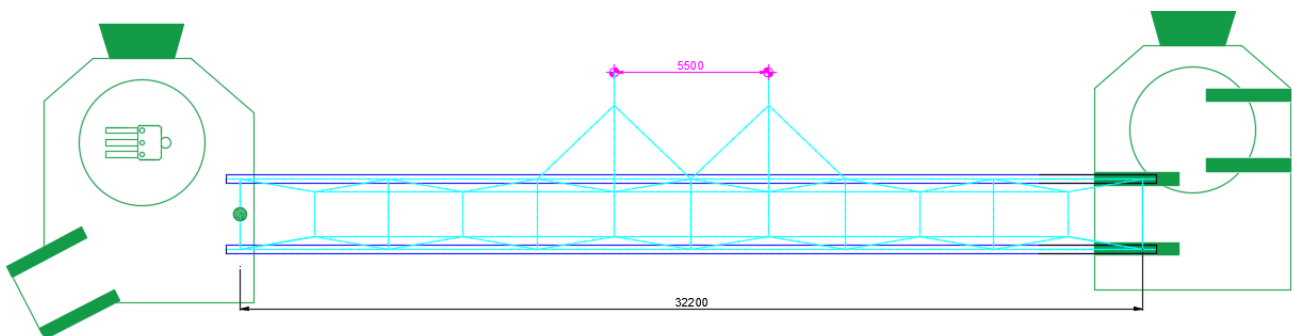







Figure 6-2 Position der Riser Hang-Offs, Draufsicht

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

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 28 von 95

7 Design-Kriterien und Nachweis-Methoden

7.1 Lebensdauer

Die geplante Lebensdauer beträgt hier 5 Jahre. Konservativ wird, wenn in den Nachweis eingehend, trotzdem eine Lebensdauer von 15 Jahren betrachtet.

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).

7.2.2 LRFD Methode

7.2.3 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:

$$S_d \leq R_d$$

7.2.4 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.

7.2.5 Allgemeine Design-Widerstände

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






$$R_d = \Phi R_k$$

mit: R_k = Charakteristischer Widerstand

Φ = Widerstandsfaktor.

Der Widerstandsfaktor Φ verhält sich wie folgt zum Materialfaktor γ_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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 29 von 95

7.2.6 Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

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

- Eigengewicht + veränderl. Lasten:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * Q_1 + \gamma_Q * (\sum Q_i * \psi_{o,i})$$

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

Des Weiteren ist laut TRAS (Ref. [VIII.]) neben dem Teilsicherheitsfaktor ($\psi_{o,i}$) 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:

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

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

$$1,485 * G + 1,50 * V + 0,99 * W + 0,825 * (S+E) + 1,0 * H$$
- Eigengewicht+ Verkehr+ **Wind** +Schnee + Eis:

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

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

$$1,485 * G + 1,05 * V + 1,65 * W + 0,825 * (S+E) + 0,7 * H$$
- Eigengewicht+ Verkehr+ Wind +**Schnee + Eis**:

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

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

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

7.2.7 Lastfallkombinationen und Faktoren im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Für SLS gelten die folgenden Lastfaktoren:






- Eigengewicht + veränderl. Lasten:

$$\gamma_G * G + \gamma_Q * Q_1 + \gamma_Q * (\sum Q_i * \psi_{o,i})$$

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

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

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

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 30 von 95

- 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**:

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

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

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

7.2.8 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

7.2.9 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 ($\triangleq > 3,0 \text{ Hz}$) oder über 0,666 sec ($\triangleq < 1,5 \text{ Hz}$) 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 ($\triangleq > 1,50 \text{ Hz}$) oder über 1,333 sec ($\triangleq < 0,75 \text{ Hz}$) sein.

7.2.10 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 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.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 31 von 95

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

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.

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

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

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).

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






7.2.11 Hebeanalyse

Die Hebeanalyse wird für die Brücken durchgeführt. Es ist geplant, dass die Brücke mit Hilfe von vier Trunnions/Padeyes angehoben wird.

Die Lastfaktoren werden nach Ref. [IX.] bestimmt und auf die Designlast angewandt. Zusätzlich wird eine Gewichtsaufschlag von 10 % beaufschlagt.

Table 7-1: Lastfaktoren

Faktor		Wert [-]
Dynamischer Verstärkungs-Faktor (Dynamic Amplification Factor)	f_{DAF}	$1+0,25 \cdot (100/SHL)^{0,5} = 1,71$ mit SHL = 12,3 t (konservativ)
Gewichtsungenauigkeits-Faktor	f_m	1,10
Schwerpunkt (COG) Ungenauigkeits-Faktor	f_{COG}	1,10
Schräglast-Faktor	f_{SKL}	1,25
Konsequenz-Faktor	f_{cons}	1,30
Gesamter Lastfaktor	f_{Total}	3,36

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 32 von 95

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.

7.2.12 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:

$$\gamma_{m1} = 1,00$$

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 33 von 95

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.

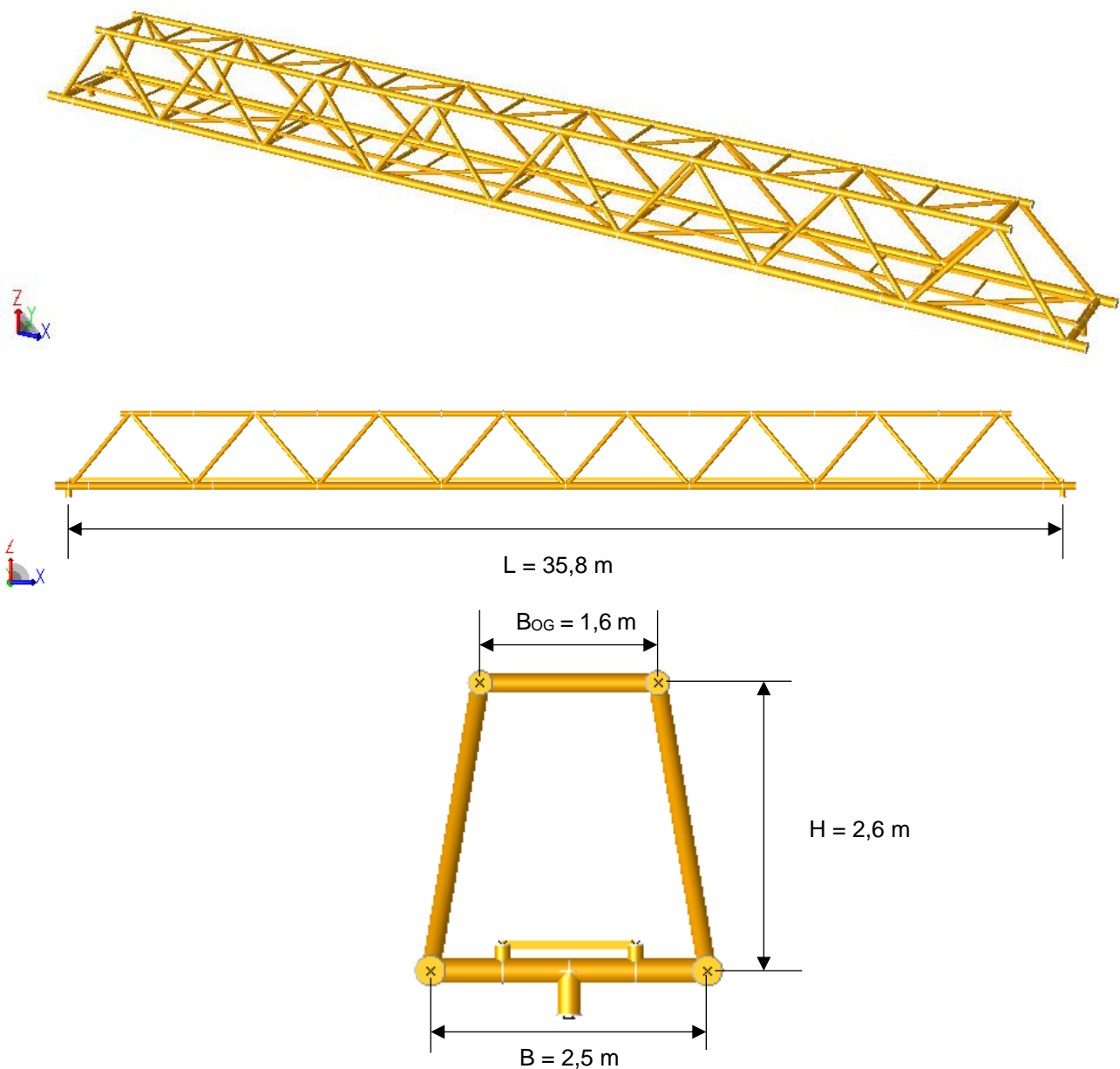




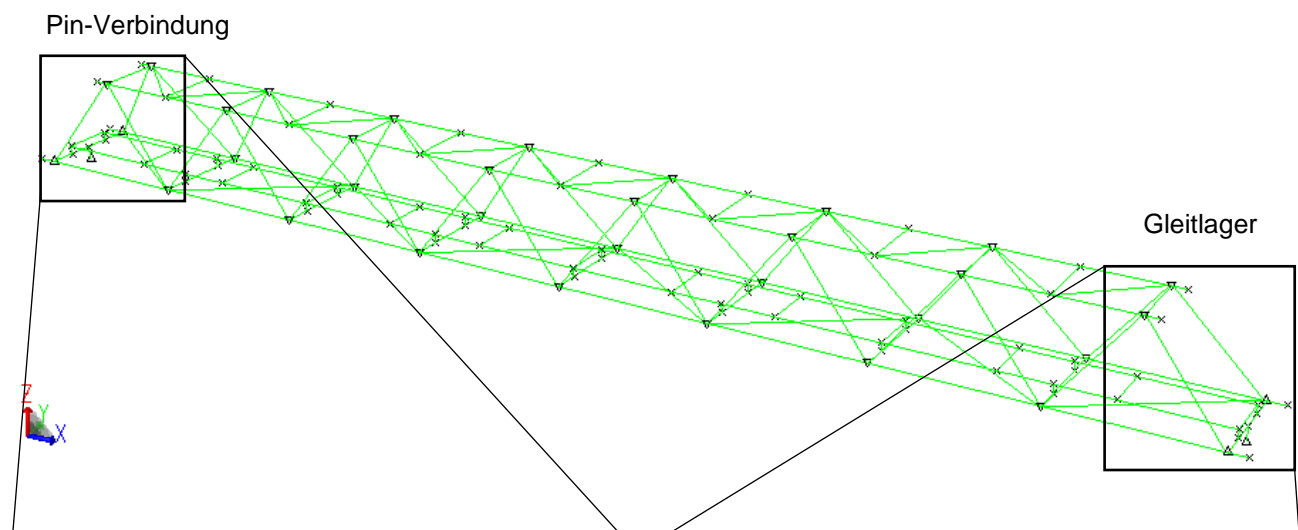
Abbildung 8-1: FE-Modell – Brücke 1



	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 34 von 95

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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 35 von 95

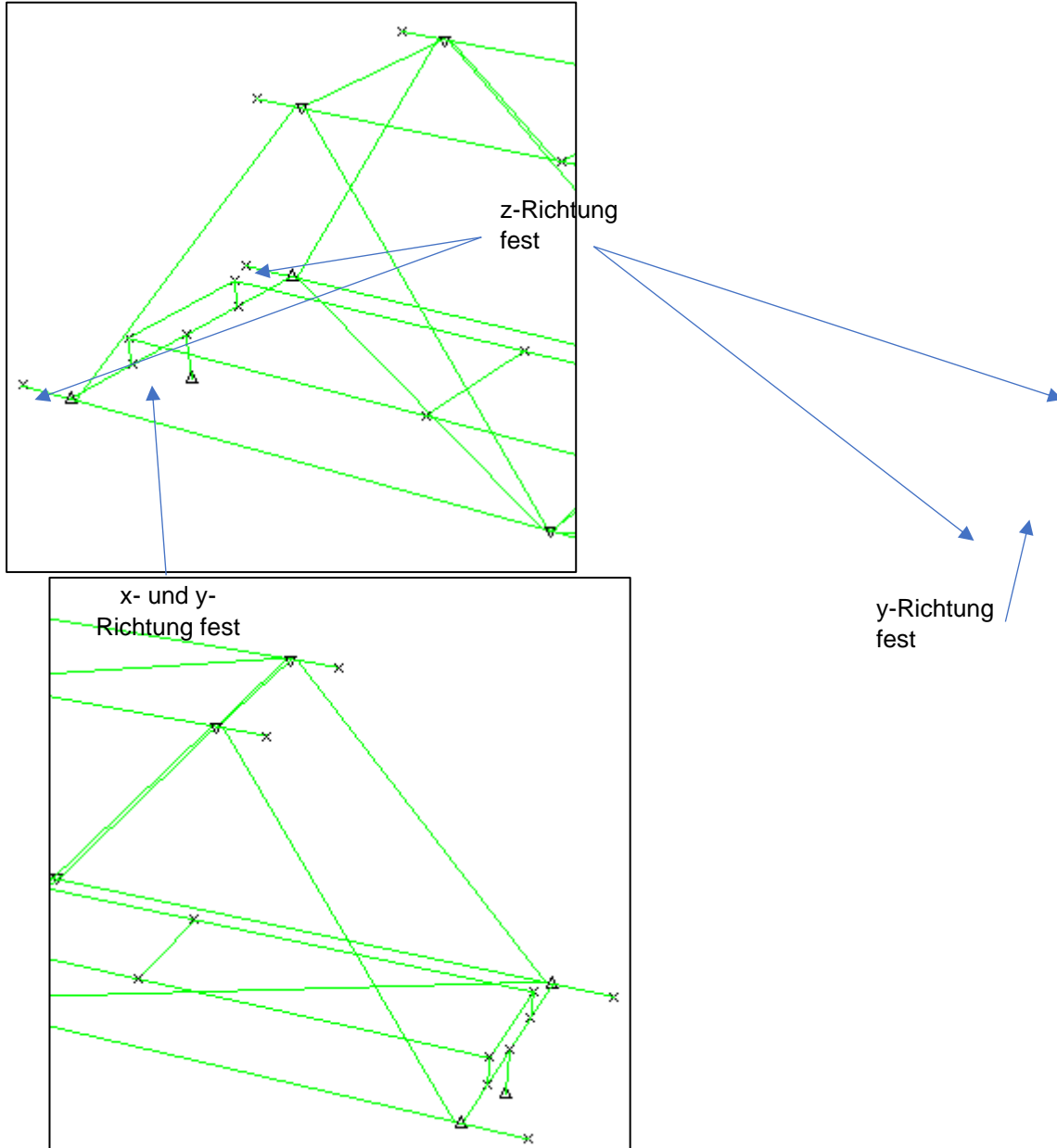







Abbildung 8-2: Randbedingungen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 36 von 95

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	9,89
Gitterroste	1,29
Handläufe	1,09
Total	12,27

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

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

$$L_{\text{Gitterroste}} = 35,8 \text{ m}$$

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 35,8 \text{ m} * 1,2 \text{ m}$$

$$= 1,29 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$ gerechnet und

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

$$L_{\text{Handläufe}} = 35,8 \text{ m}$$

$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 35,8 \text{ m} / g$$






$$= 1,09 \text{ t}$$

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

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 10% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 10% 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 37 von 95

Load Condition: LL

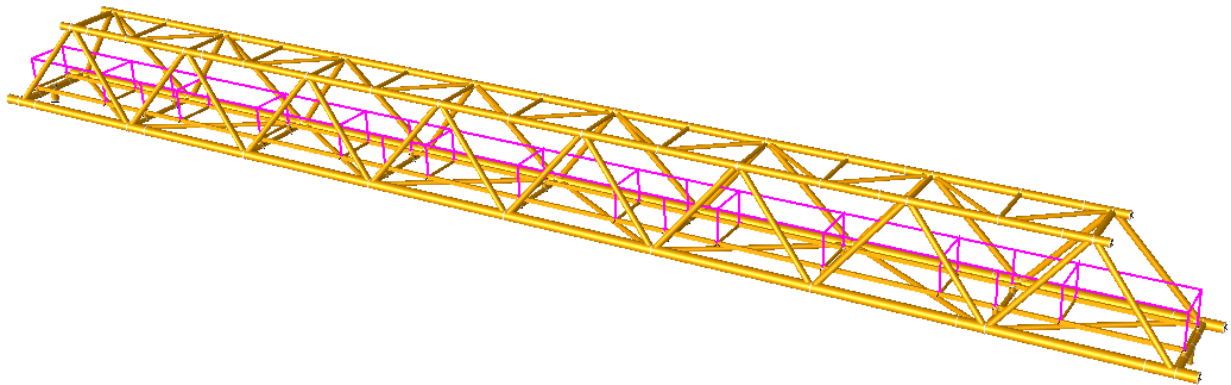


Abbildung 8-3: Verkehrslasten für Brücke 1

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 35,8 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= 2 \text{ kN/m}^2 * 35,8 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 85,92 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

8.4.4 Windlasten – LF WIND

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

Load Condition: WIND

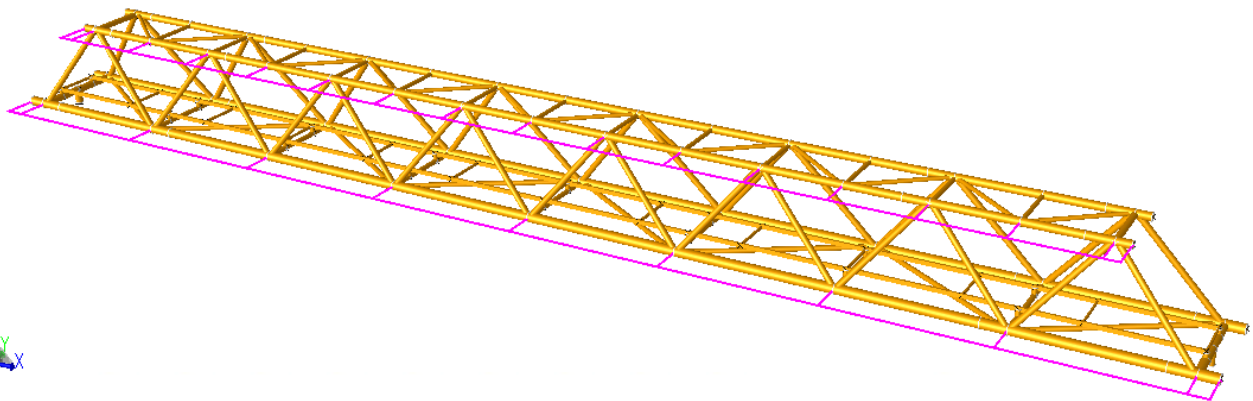







Abbildung 8-4: Windlasten für Brücke 1

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

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wind}} &= w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L \\
 H &= 2,846 \text{ m} \\
 L &= 35,8 \text{ m} \\
 F_{\text{wind}} &= 1,329 \text{ kN/m}^2 * 2,846 \text{ m} * 35,8 \text{ m} = 135,43 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Es wird nur eine Windrichtung (+y -Achse) gecheckt, die im Vergleich zum Wind in x-Richtung maßgebend ist.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 38 von 95

8.4.5 Schneelasten – LF SNOW

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

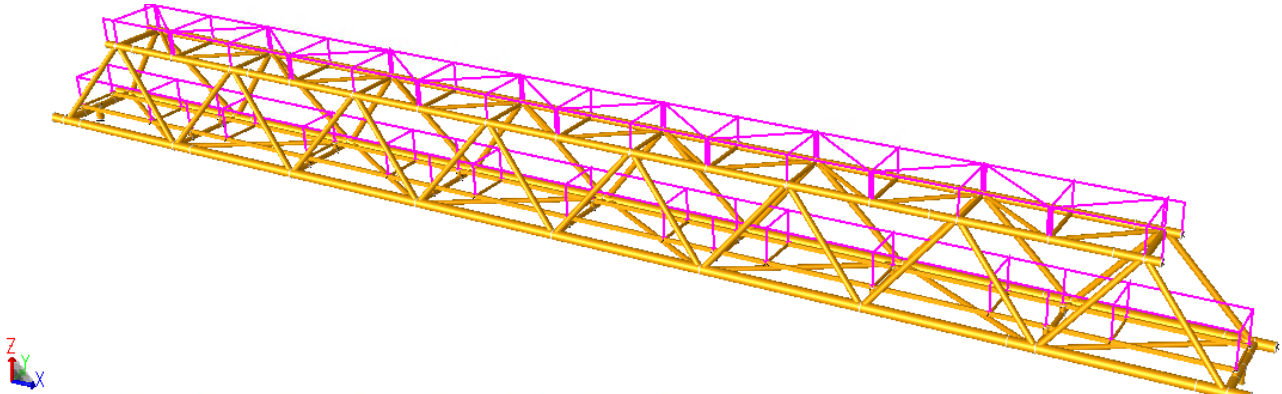


Abbildung 8-5: Schneelasten für Brücke 1

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

- Für die obere Brückenteil

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

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

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

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

- Für die Gitterroste

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





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

$$L_{GR} = 35,8 \text{ m}$$

$$F_{wind} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,2 \text{ m} * 35,8 \text{ m} = 22,34 \text{ kN}$$

8.4.6 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 $4,02 \text{ kN}$ 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 39 von 95

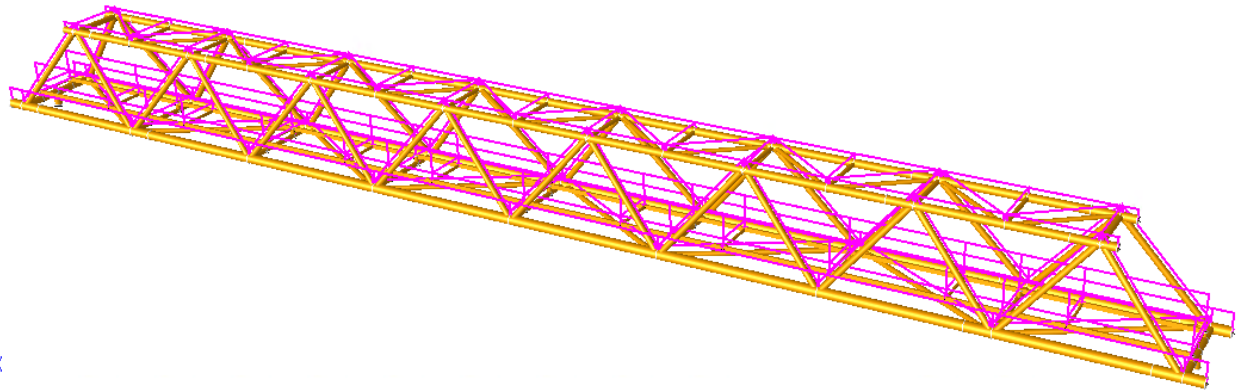


Abbildung 8-6: Eislasten für Brücke 1

8.4.7 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

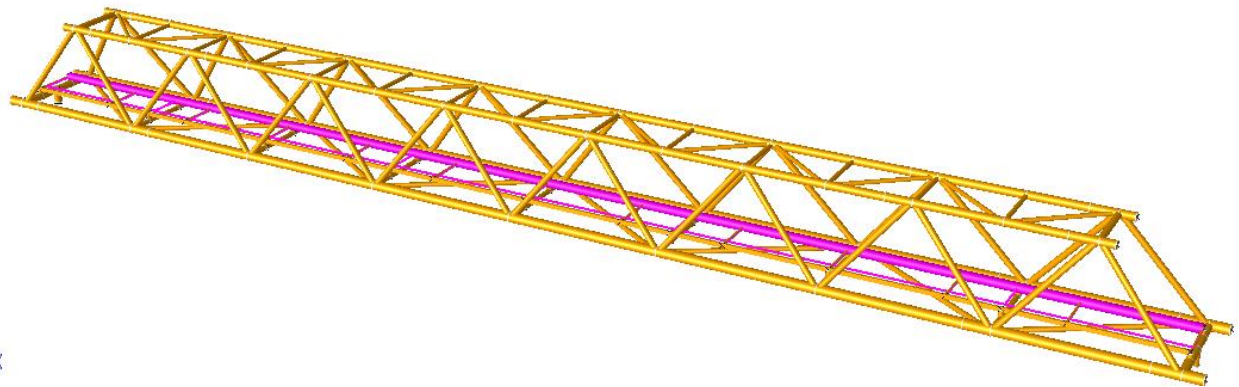


Abbildung 8-7: Holmlasten für Brücke 1

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 $h = 1,1 \text{ m}$ wird angesetzt.

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

8.4.8 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 155 kN wie im Abschnitt 8.6.3.. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 155 \text{ kN} = 46,5 \text{ kN}$$

Die Reibungslasten werden auf 3 verschiedene Arten überprüft:

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

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 40 von 95

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

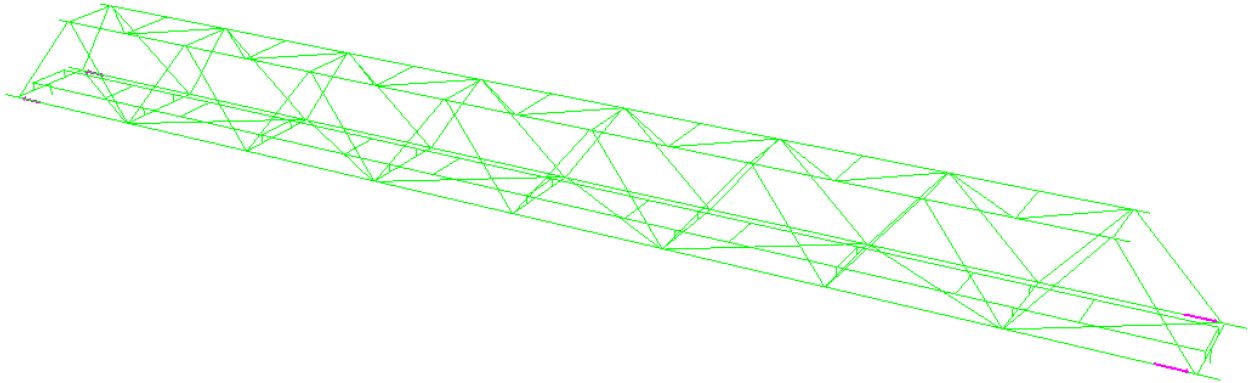


Abbildung 8-8: Reibungslasten (Zug) für Brücke 1

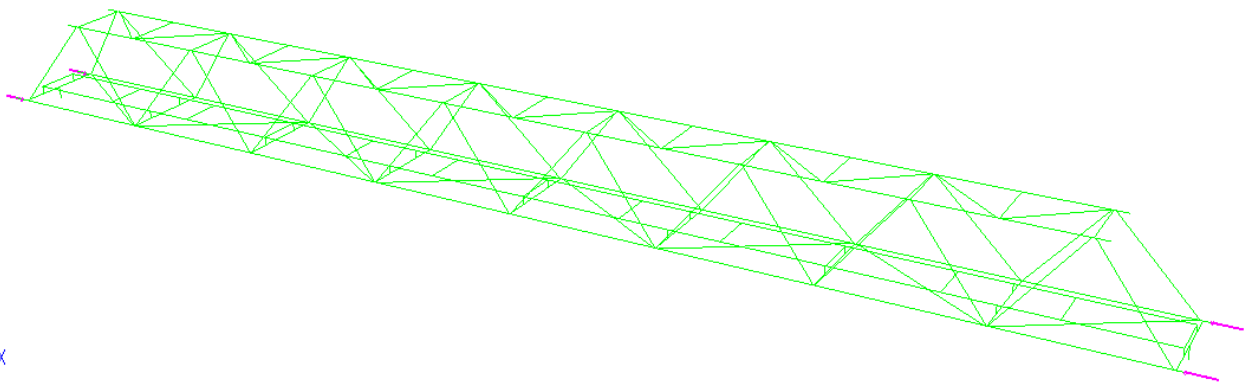


Abbildung 8-9: Reibungslasten (Druck) für Brücke 1

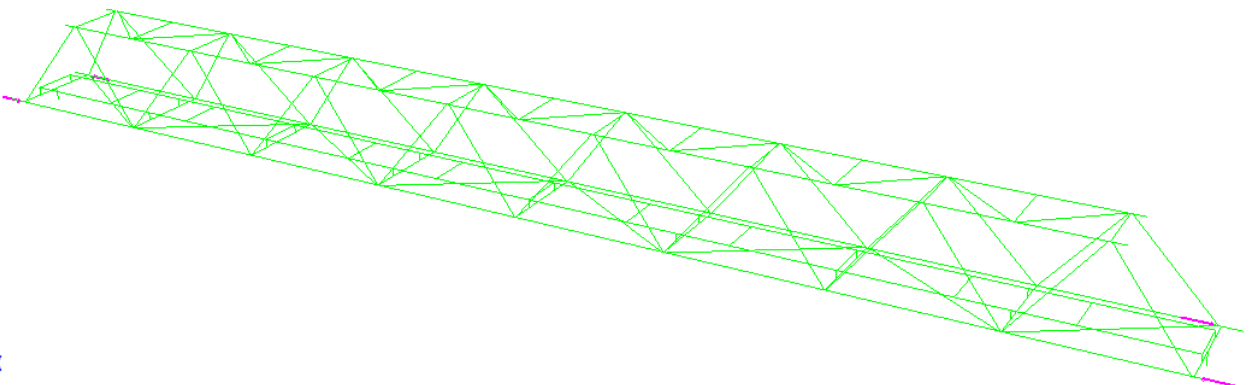







Abbildung 8-10: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 1



  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 41 von 95

8.5 Lastfallkombinationen

Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.2.6 und 7.2.7.

Tabelle 8-2: Lastfallkombinationen

LCOM	Lastfaktoren								
	LF 100	LF LL	LF WIND	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 1 (Verkehr)</u>									
101	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
103	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
<u>ULS 2 (Wind)</u>									
201	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
203	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
<u>ULS 3 (Schnee & Eis)</u>									
301	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
303	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>									
401	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
403	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 2 (Wind)</u>									
501	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
503	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 3 (Schnee & Eis)</u>									
601	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
603	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
*inkl. 10% Gewichtsaufschlag wie im Abschnit 8.4.2.									

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 42 von 95

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 0,78 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

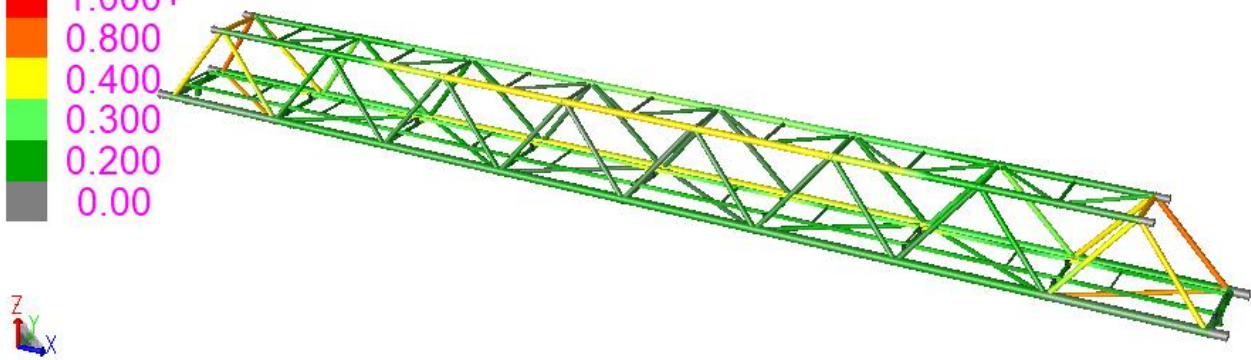


Abbildung 8-11: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 1

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 0,78 während In-place Zustand.

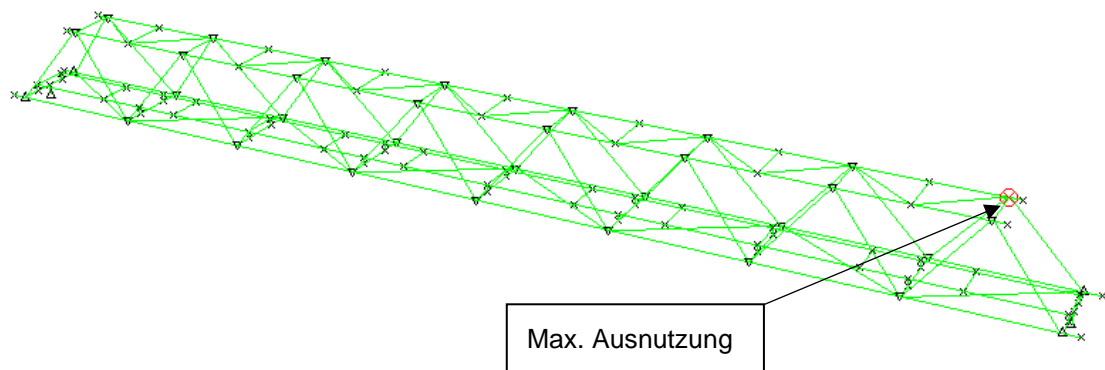







Abbildung 8-12: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 1

8.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 601 auf und resultiert zu -34 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als $L/200 = 179$ mm (siehe Abschnitt 7.2.8). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 43 von 95

Max View Defl. at 0074

DX: 0.419
DY: 1.983
DZ: -3.428

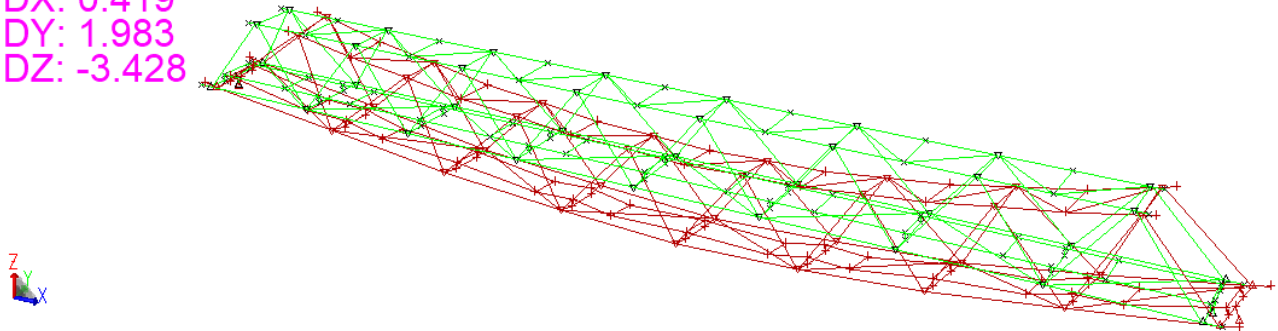


Abbildung 8-13: Verformungsergebnisse – Brücke 1

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.

Tabelle 8-3: Brückenlager Lasten – Brücke 1

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb)	155,0
Horizontal (quer)	120,0
Horizontal (längs)	45






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 10% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Horizontal	3,78	3,60
Mode 2: Vertikal	4,78	4,56

Die Eigenfrequenzen der Brücke 1 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.2.9).

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 44 von 95

8.6.5 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 8-5: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigen- frequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeits- faktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwin- digkeit, V_m [m/s]	kritische Windgeschwin- digkeit, $V_{crit,i}$ [m/s]	1,25 * V_m [m/s]
Horizontale Primär- struktur Boden	0,2730	12,0	50,34	1,294	38,82	76,3	48,53
Diagonalen	0,1683	13,9	67,31	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.

Mode 6 Freq. 50.340 Hz Period 0.020 secs

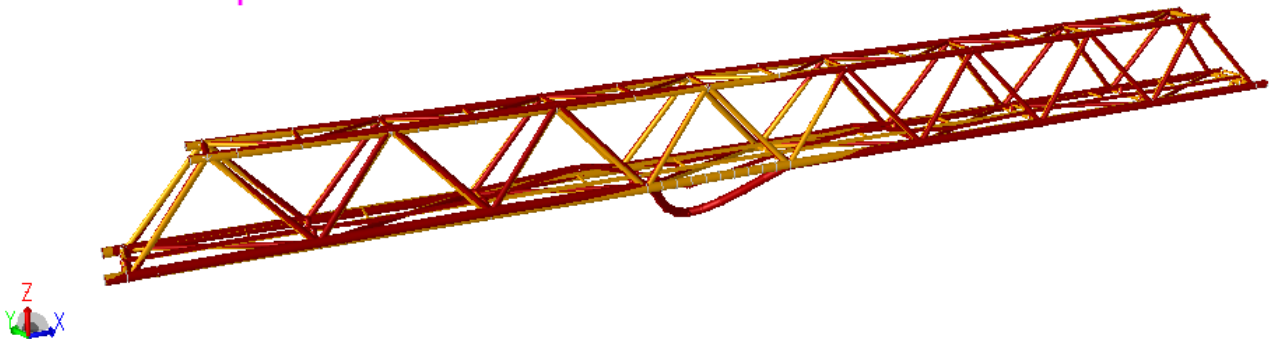


Abbildung 8-14: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

Mode 6 Freq. 67.313 Hz Period 0.015 secs

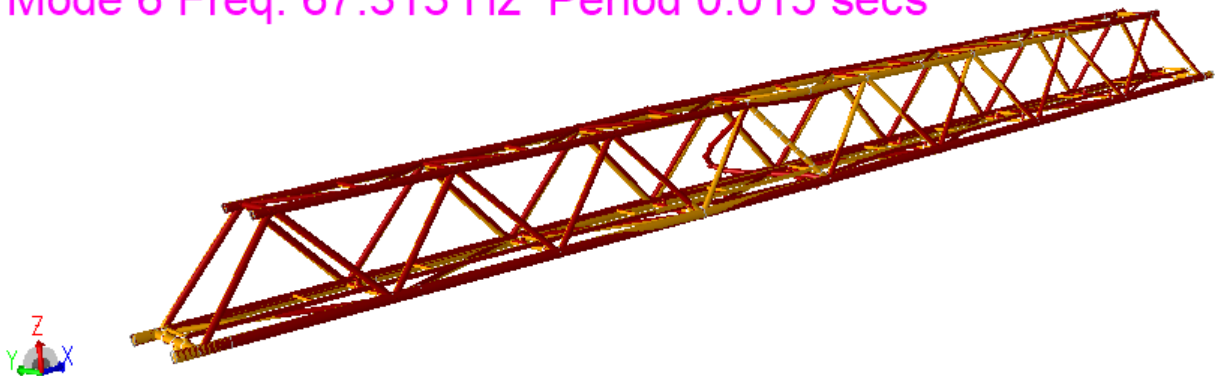




Abbildung 8-15: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 45 von 95

8.6.6 Hebeanalyse

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

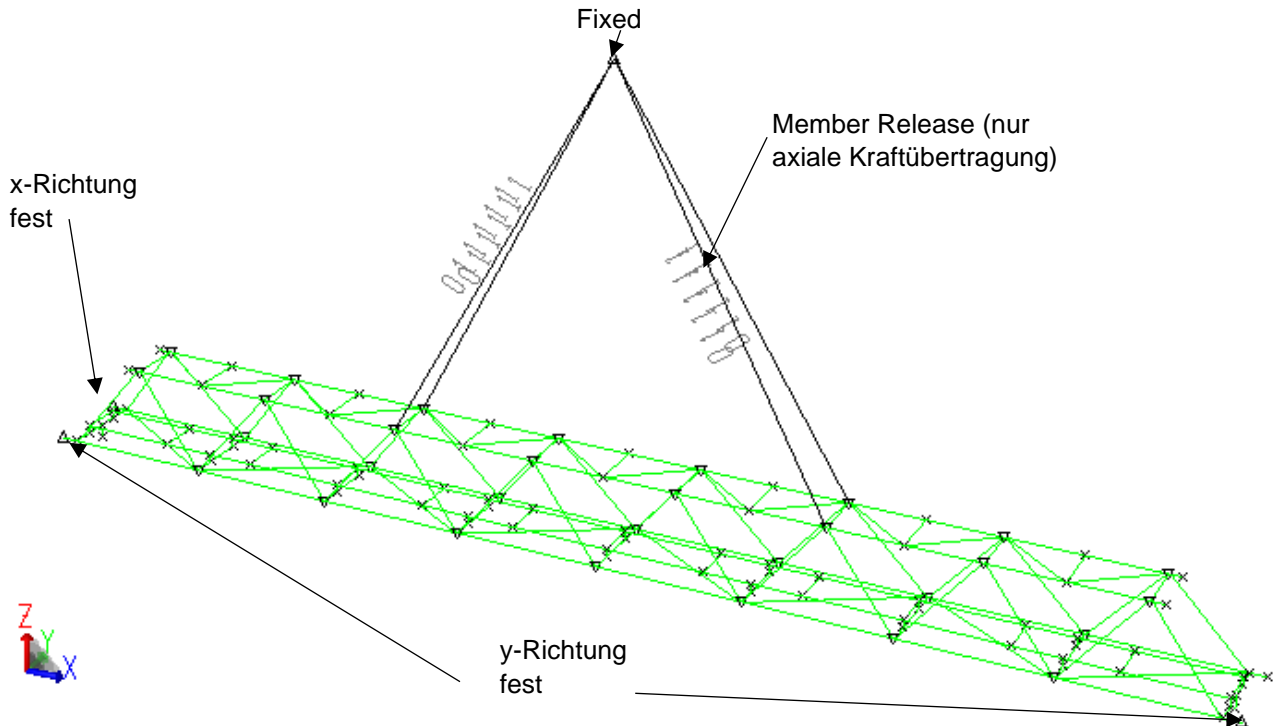






Abbildung 8-16: Hebeanordnung und Randbedingung

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 gesamter Lastfaktor von 3,36 wurde für die Hebeanalyse verwendet (wie im Abschnitt 7.2.11).

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 0,24 für Hebeanalyse.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 46 von 95

Mem Result: Combined UC

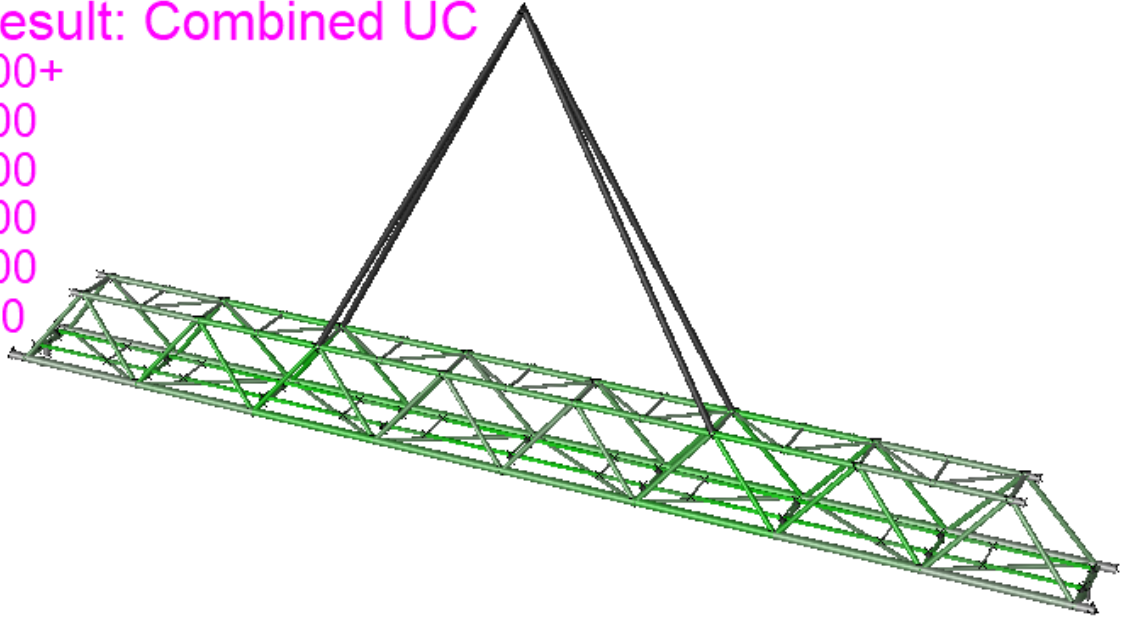
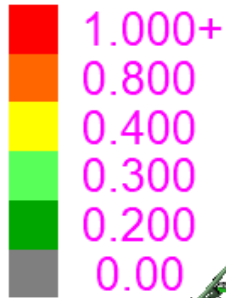


Abbildung 8-17: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 1

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 0,51.

For All Active LCs

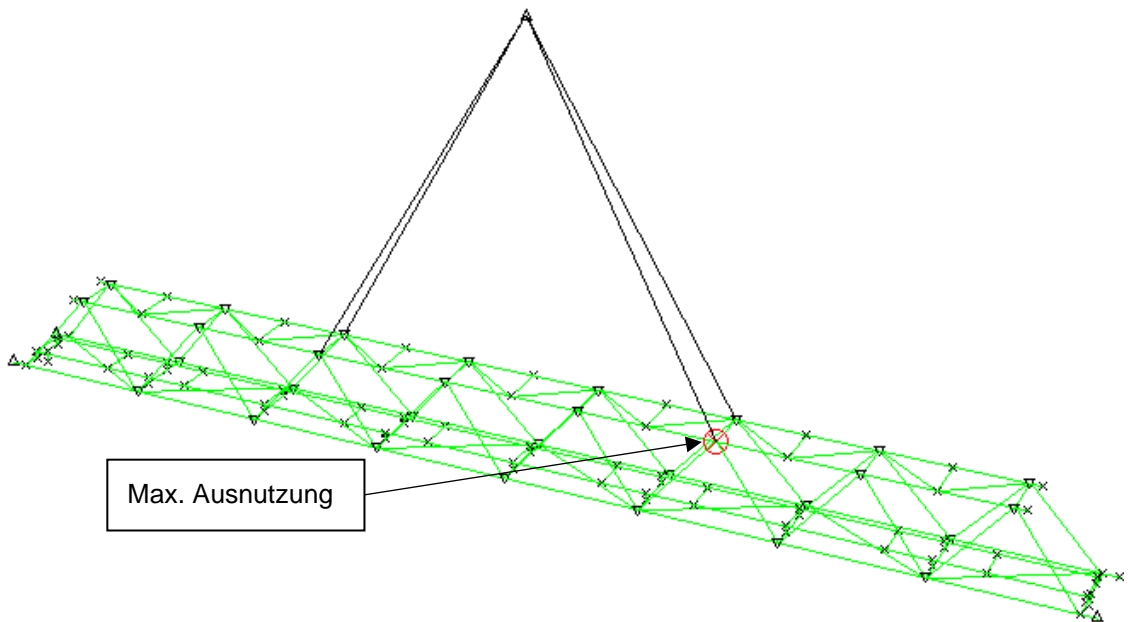






Abbildung 8-18: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 1

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 47 von 95

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.

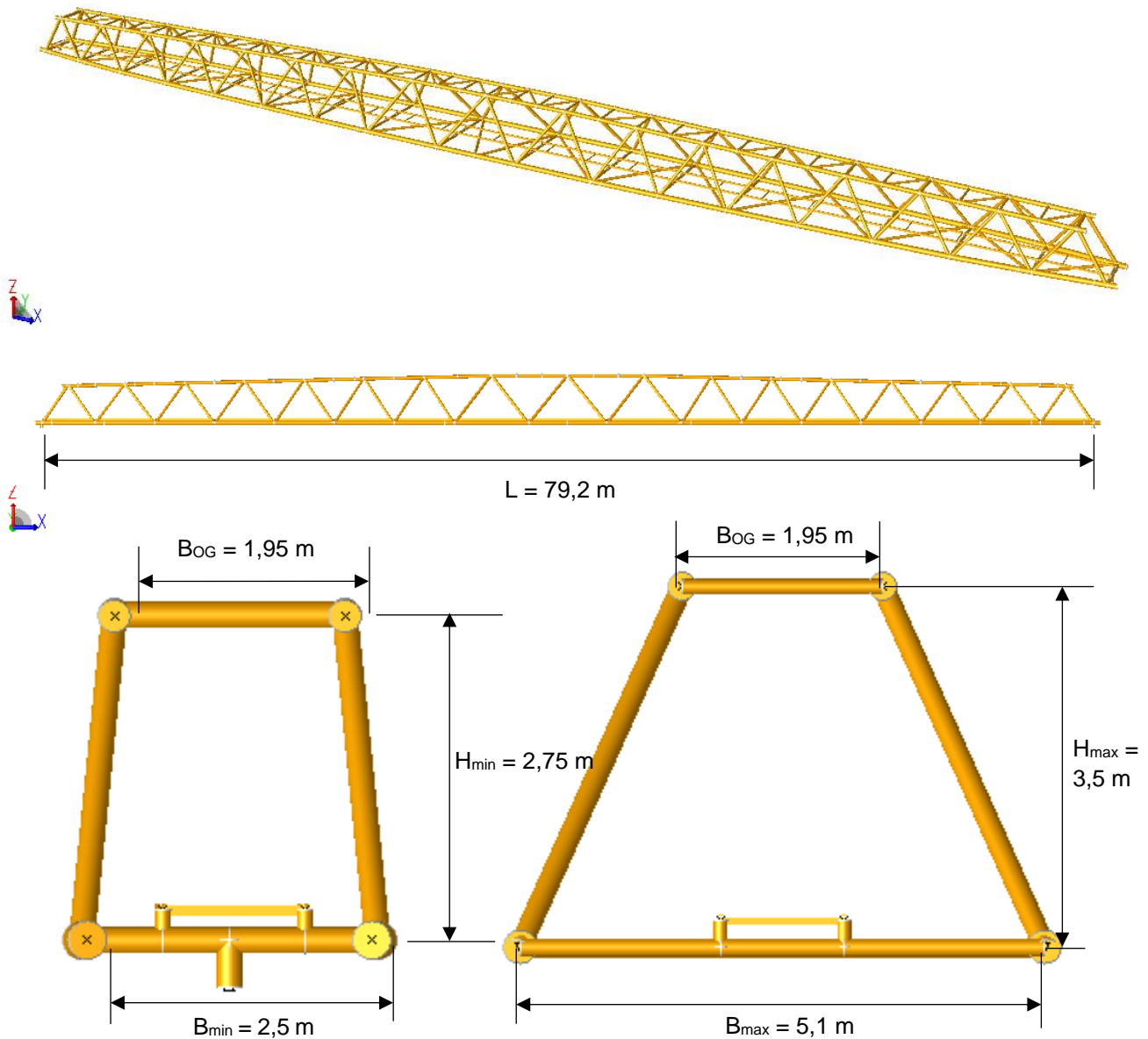







Abbildung 9-1: FE-Modell – Brücke 3

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 48 von 95

9.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf der einen 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.

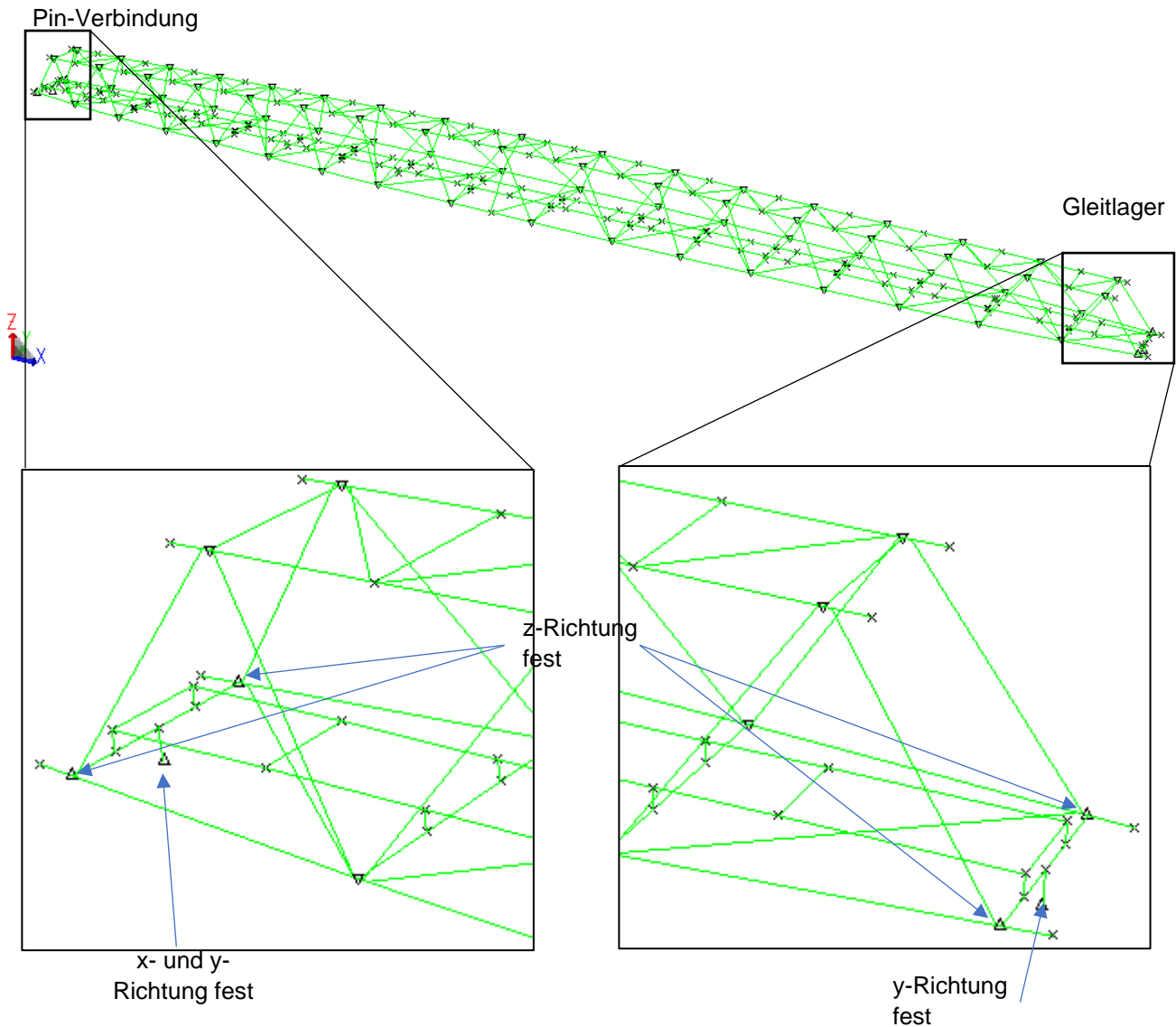







Abbildung 9-2: Randbedingungen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 49 von 95

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.

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 7

Item	Gewichte ohne Gewichtsaufschlag [t]
Member elements	43,30
Gitterroste	2,85
Handläufe	2,42
Total	48,57

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

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

$$L_{\text{Gitterroste}} = 79,2 \text{ m}$$

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 79,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} \\ = 2,85 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$ gerechnet und

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

$$L_{\text{Handläufe}} = 79,2 \text{ m}$$






$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 79,2 \text{ m} / g \\ = 2,42 \text{ t}$$

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

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 10% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 10% 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 50 von 95

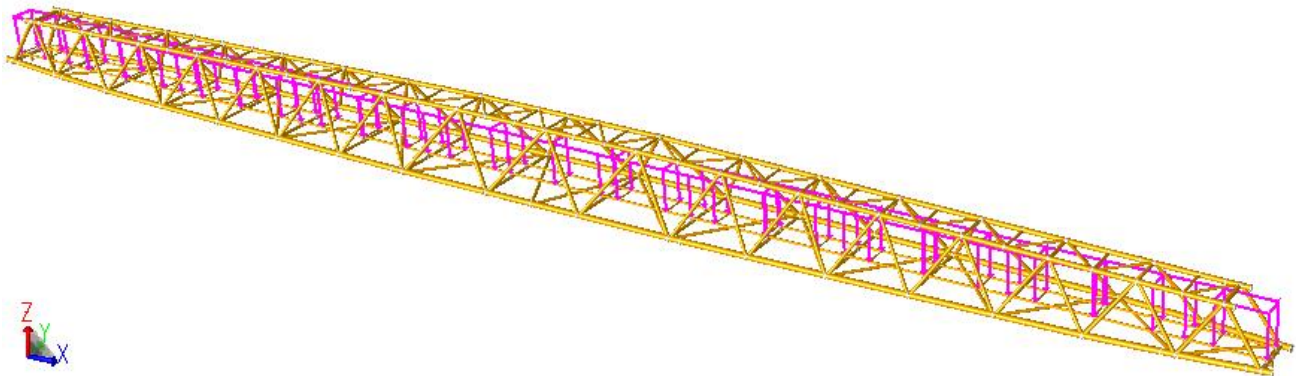


Abbildung 9-3: Verkehrslasten für Brücke 3

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

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

$$L_{\text{Gitterroste}} = 79,2 \text{ m}$$

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = 2 \text{ kN/m}^2 * 79,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 190,1 \text{ kN}$$

9.4.4 Windlasten – LF WIND

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

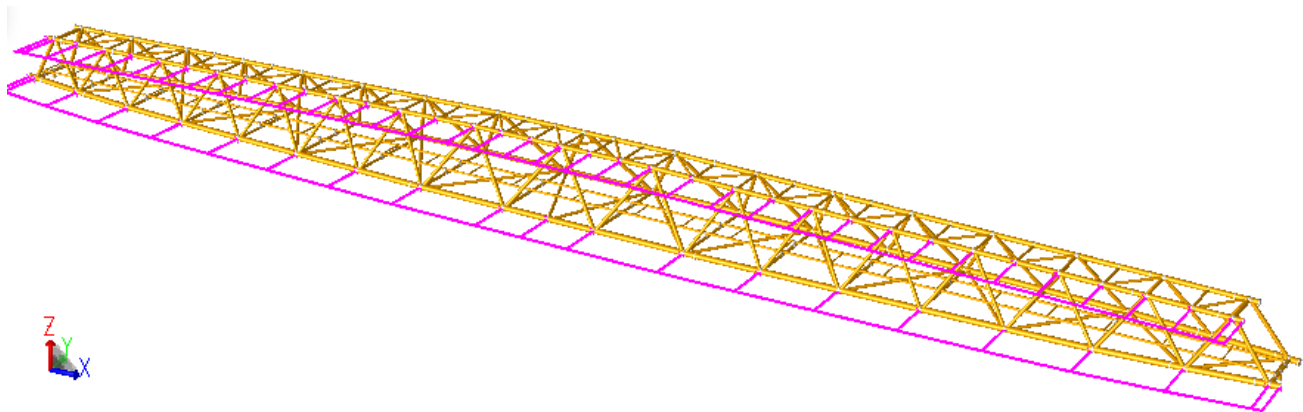


Abbildung 9-4: Windlasten für Brücke 3

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






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

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

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

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

Es wird nur eine Windrichtung (+y -Achse) gecheckt, die im Vergleich zum Wind in x-Richtung maßgebend ist.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 51 von 95

9.4.5 Schneelasten – LF SNOW

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

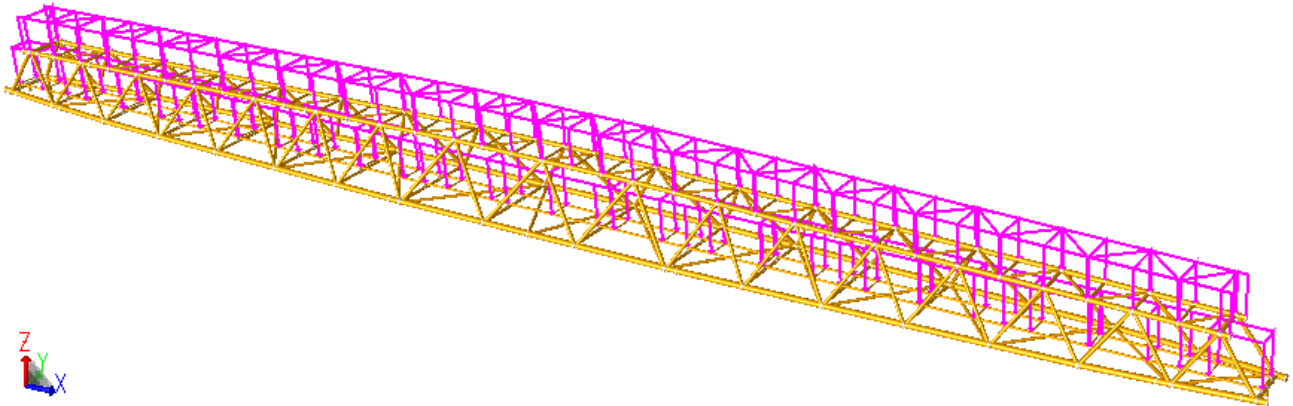


Abbildung 9-5: Schneelasten für Brücke 3

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

- Für die obere Brückenteil

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

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

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

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

- Für die Gitterroste

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






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

$$L_{GR} = 79,2 \text{ m}$$

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

9.4.6 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 9,78 kN werden für die Berechnung berücksichtigt.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 52 von 95

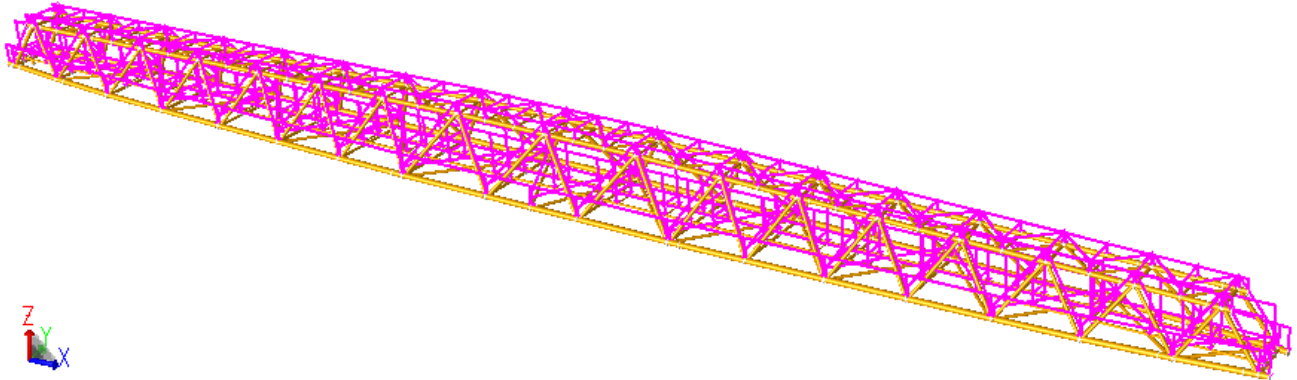


Abbildung 9-6: Eislasten für Brücke 3

9.4.7 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.

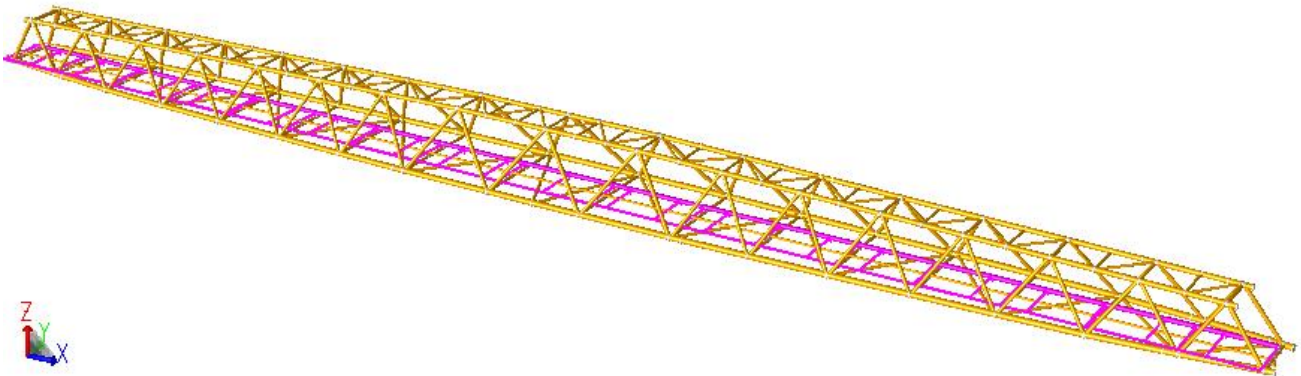


Abbildung 9-7: Holmlasten für Brücke 3

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

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

9.4.8 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.

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

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)

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 53 von 95

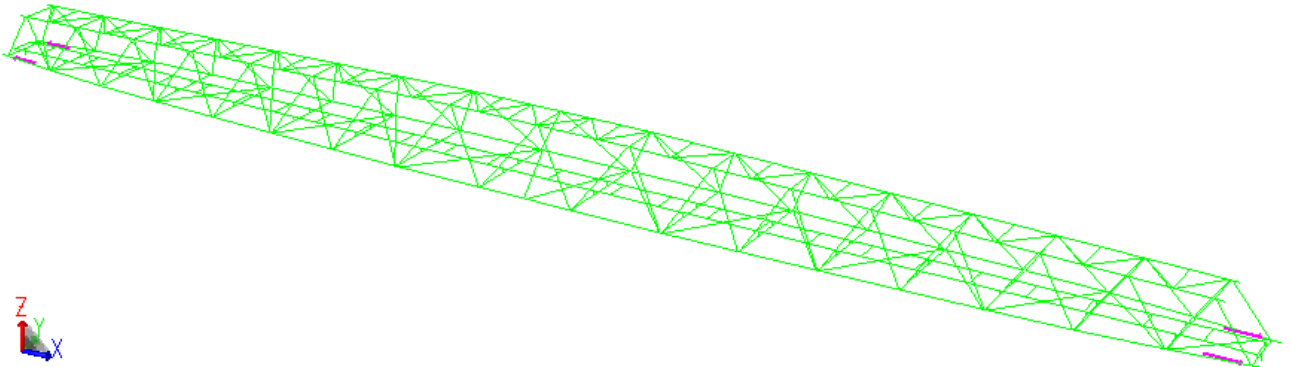


Abbildung 9-8: Reibungslasten (Zug) für Brücke 3

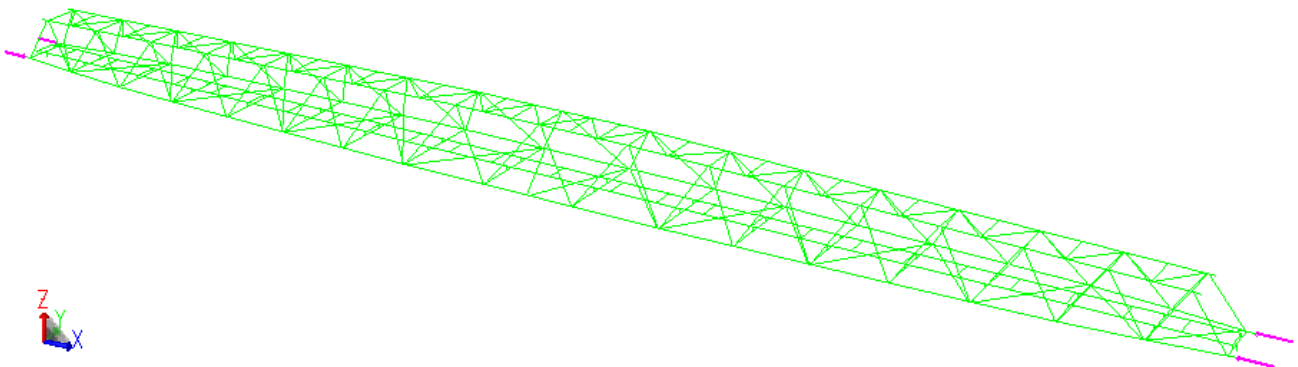


Abbildung 9-9: Reibungslasten (Druck) für Brücke 3

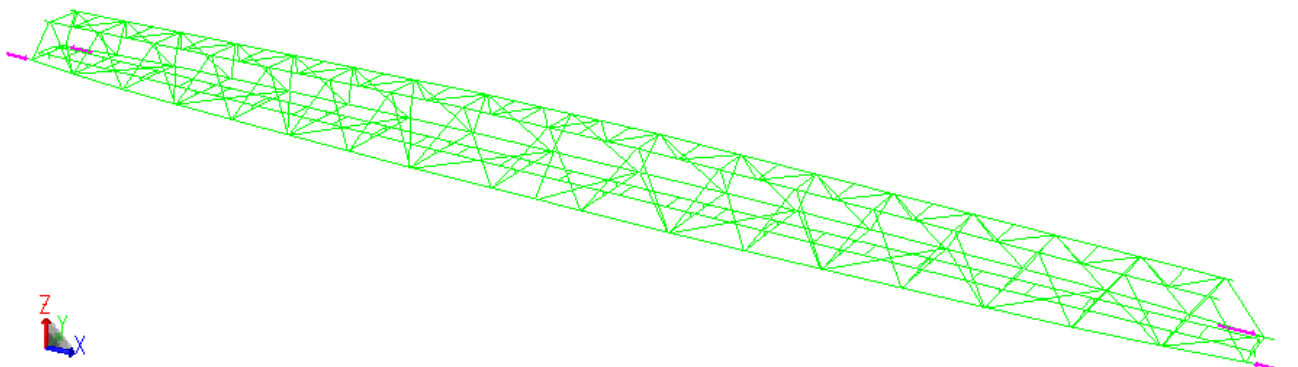







Abbildung 9-10: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 3






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 54 von 95

9.5 Lastfallkombinationen

Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.2.6 und 7.2.7.

Tabelle 9-2: Lastfallkombinationen

LCOM	Lastfaktoren								
	LF 100	LF LL	LF WIND	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 1 (Verkehr)</u>									
101	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
103	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
<u>ULS 2 (Wind)</u>									
201	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
203	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	-	1,00
<u>ULS 3 (Schnee & Eis)</u>									
301	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
303	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>									
401	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
403	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 2 (Wind)</u>									
501	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
503	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 3 (Schnee & Eis)</u>									
601	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
603	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
*inkl. 10% Gewichtsaufschlag wie im Abschnit 11.4.2									

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 55 von 95

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 0,83 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

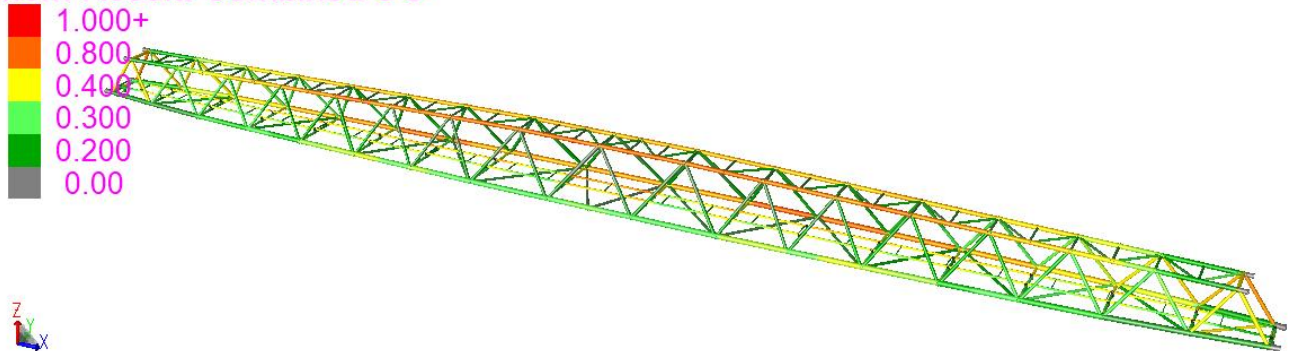


Abbildung 9-11: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 3

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 0,77 während In-place Zustand.

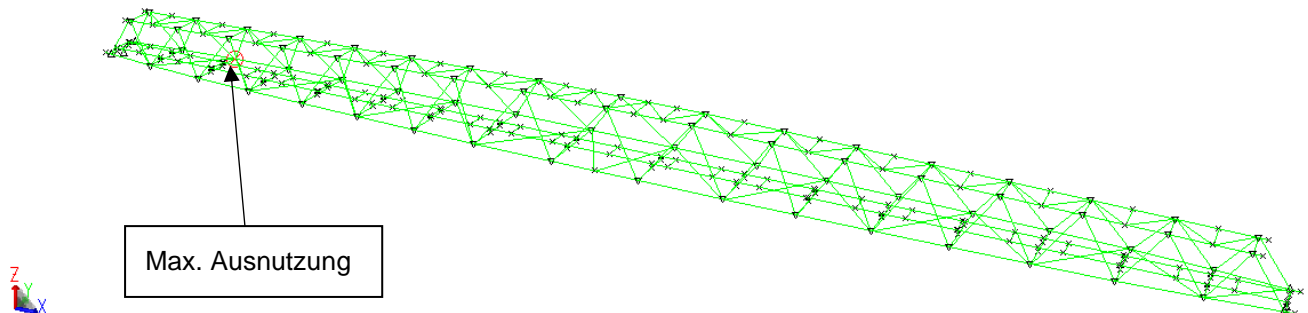







Abbildung 9-12: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 3

9.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 601 auf und resultiert zu -273 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als $L/200 = 396$ mm (siehe Abschnitt 7.2.8). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 56 von 95

Defl. Shape LC 601
Max View Defl. at 1074
DX: 1.944
DY: 6.625
DZ: -27.337

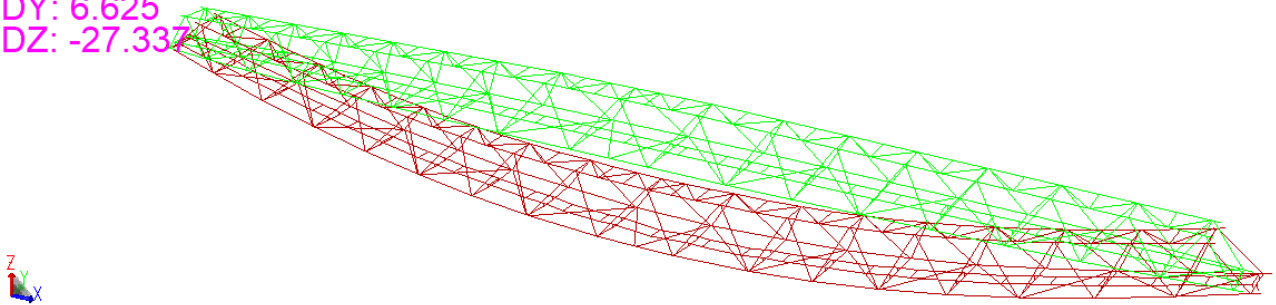


Abbildung 9-13: Verformungsergebnisse – Brücke 3

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 9-3: Brückenlager Lasten – Brücke 3

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb)	500
Horizontal (quer)	320






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 9-4: Eigenfrequenzen – Brücke 3

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 10% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Vertikal	1,47	1,40
Mode 2: Horizontal	1,64	1,57

Die Eigenfrequenzen der Brücke 3 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.2.9).

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 57 von 95

9.6.5 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 9-5: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigen- frequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeits- faktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwin- digkeit, V_m [m/s]	kritische Windgeschwin- digkeit, $V_{crit,i}$ [m/s]	$1,25 * V_m$ [m/s]
Horizontale Primär- struktur Boden	0,3239	12,0	33,50	1,294	38,82	60,3	48,53
Diagonalen	0,2191	13,9	43,20	1,317	39,51	52,6	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.

Mode 6 Freq. 33.501 Hz Period 0.030 secs

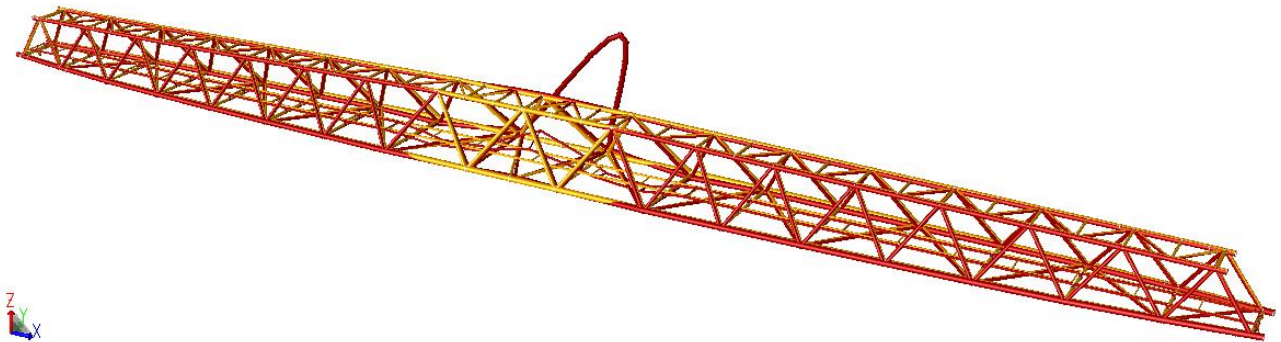


Abbildung 9-14: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

Mode 6 Freq. 43.194 Hz Period 0.023 secs

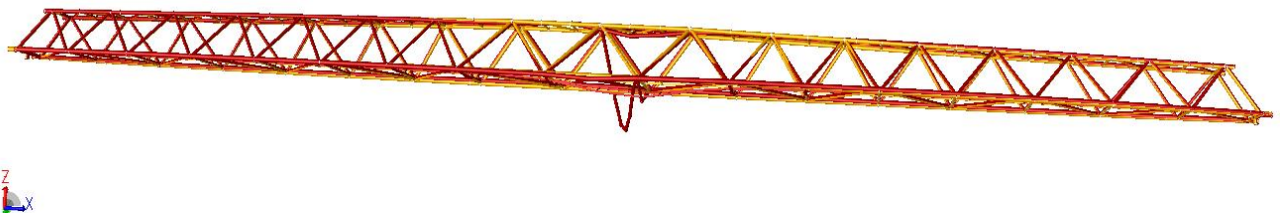







Abbildung 9-15: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 58 von 95

9.6.6 Hebeanalyse

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

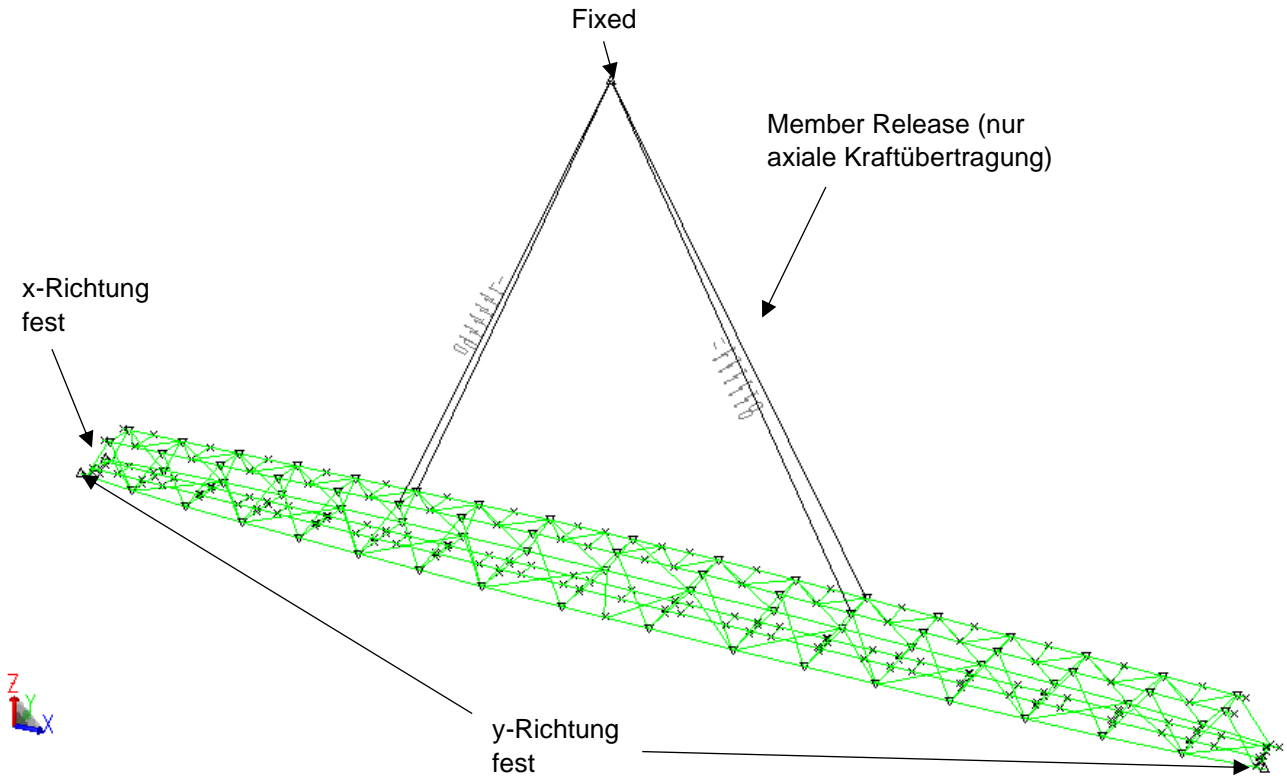






Abbildung 9-16: Hebeanordnung und Randbedingung

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 gesamter Lastfaktor von 3,36 wurde fuer die Hebeanalyse verwendet (wie im Abschnitt 7.2.11).

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 0,56 für Hebeanalyse.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 59 von 95

For All Active LCs
Mem Result: Combined UC

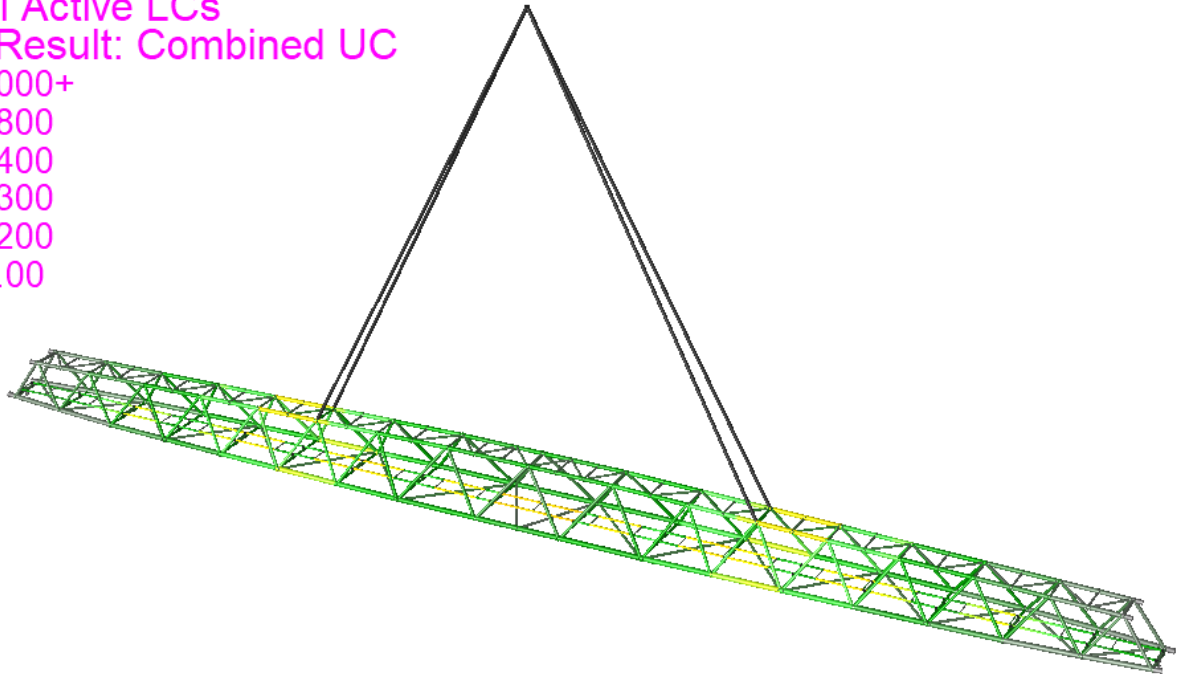


Abbildung 9-17: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 3

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 0,55.

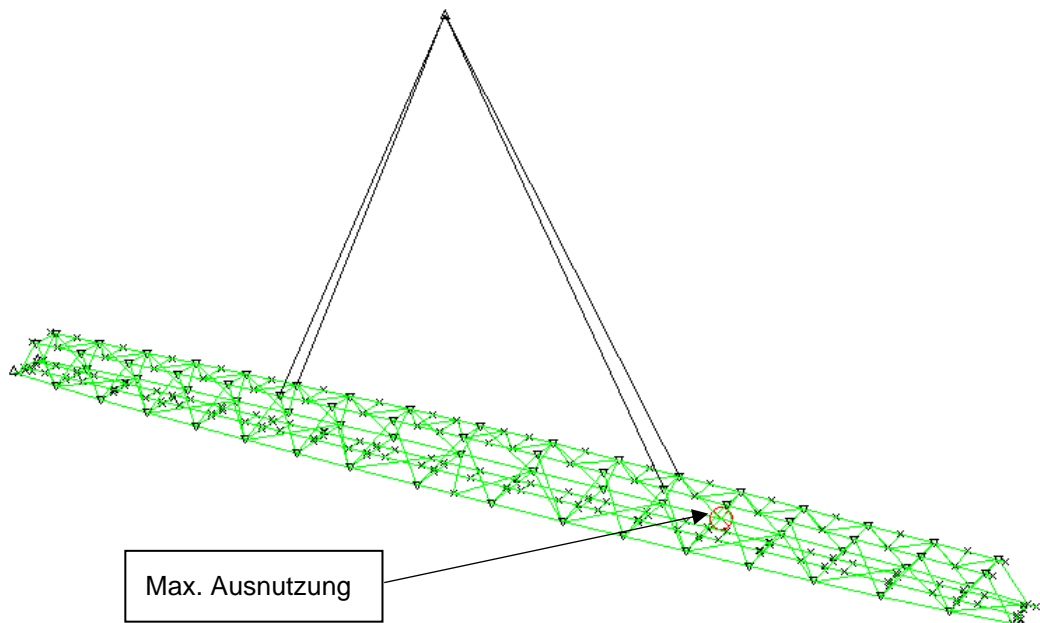






Abbildung 9-18: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 3

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 60 von 95

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.

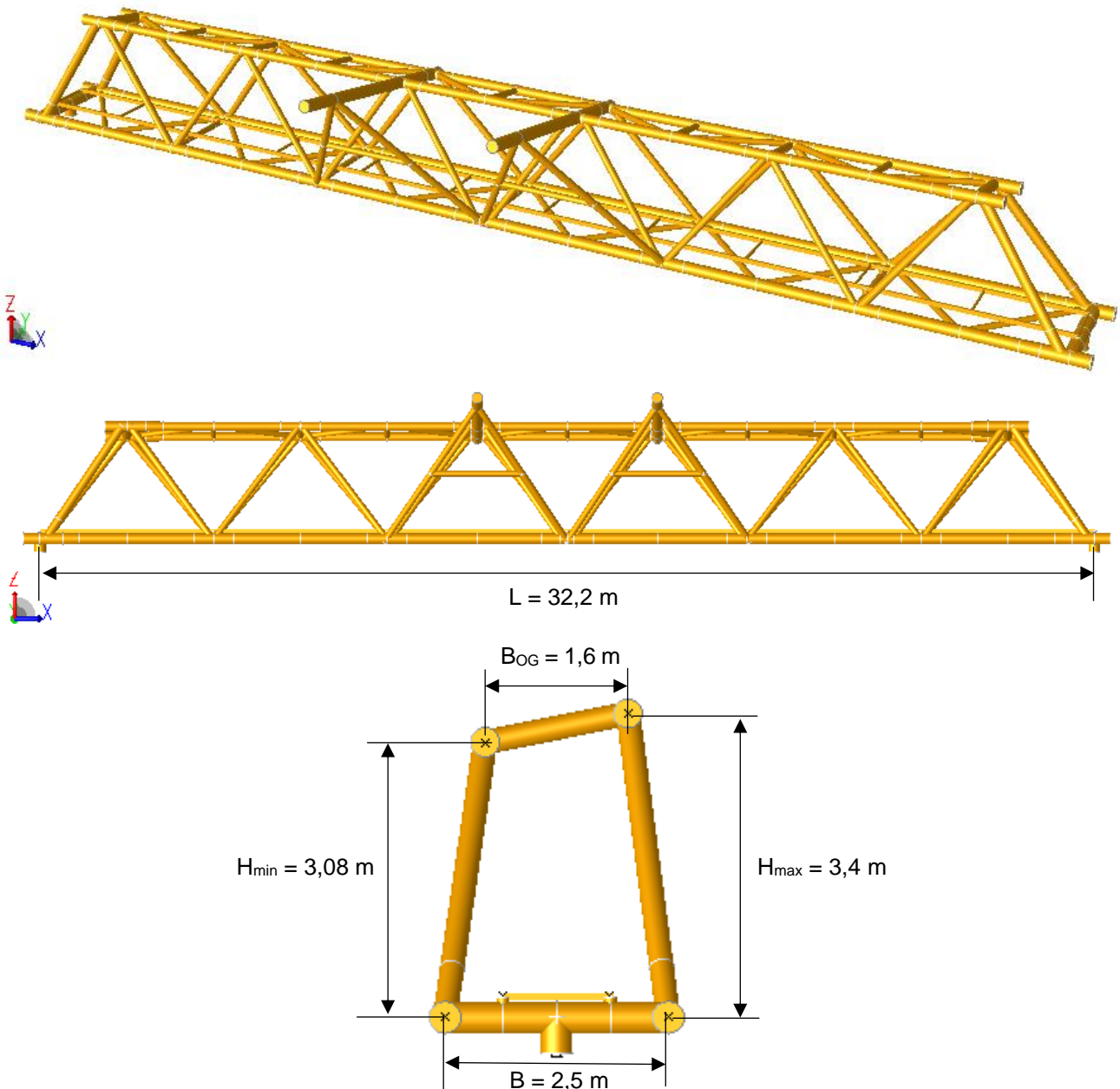







Abbildung 10-1: FE-Modell – Brücke 4

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 61 von 95

10.3 Randbedingungen

Die Brücke ist auf der einen Seite mit einer Pin-Verbindung an den Dalben befestigt, siehe linkes Bild in Abbildung 10-2. Auf der anderen Seite (Bild rechts, 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 2 vertikale Lager, die die Brücke in z-Richtung festhält.

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

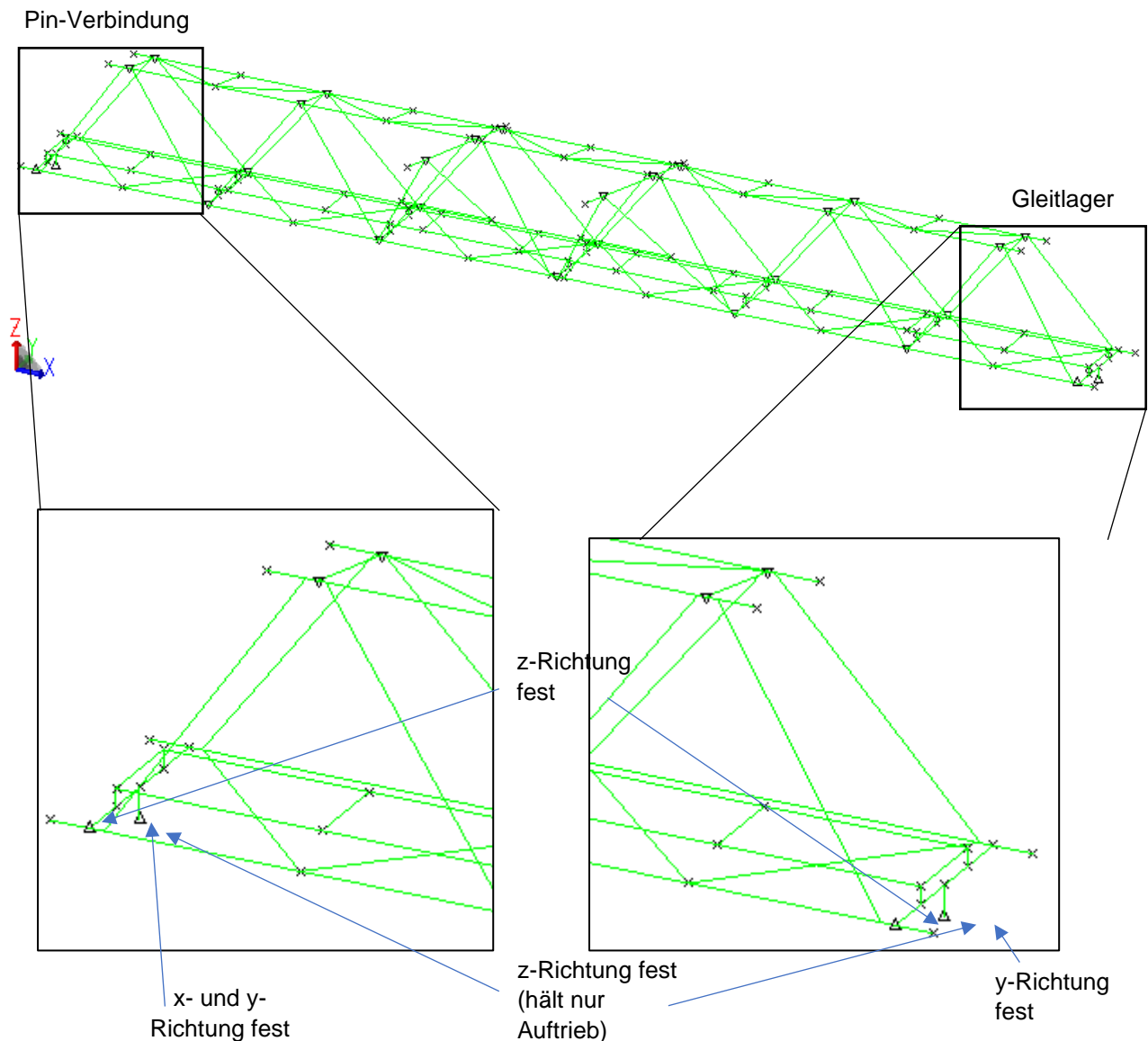







Abbildung 10-2: Randbedingungen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 62 von 95

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	25,00
Gitterroste	1,16
Handläufe	0,98
Total	27,14

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

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

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

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 32,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m}$$

$$= 1,16 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$ gerechnet und

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

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

$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 32,2 \text{ m} / g$$





$$= 0,98 \text{ t}$$

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

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 10% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 10% 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).

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 63 von 95

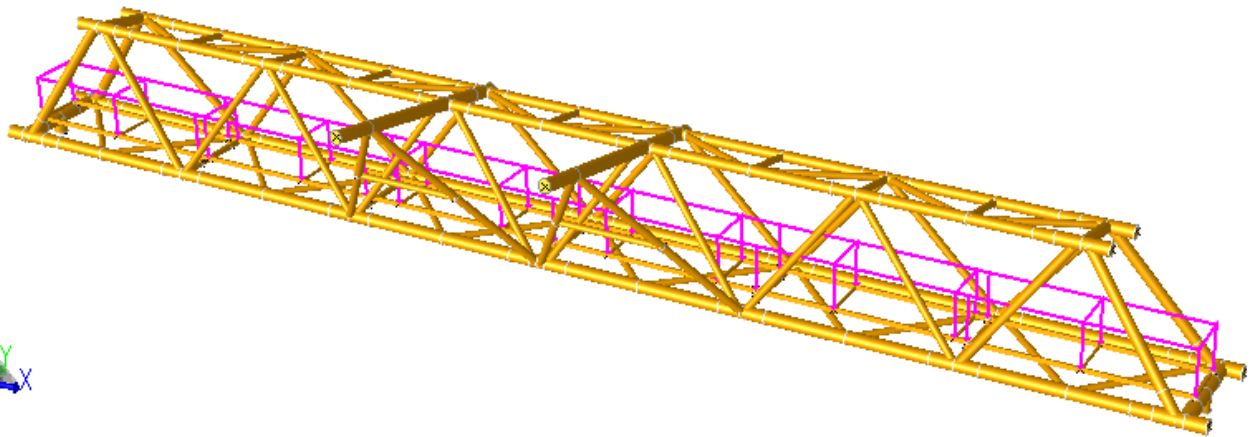


Abbildung 10-3: Verkehrslasten für Brücke 4

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

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

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

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = 2 \text{ kN/m}^2 * 32,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 77,28 \text{ kN}$$

10.4.4 Windlasten – LF WIND

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

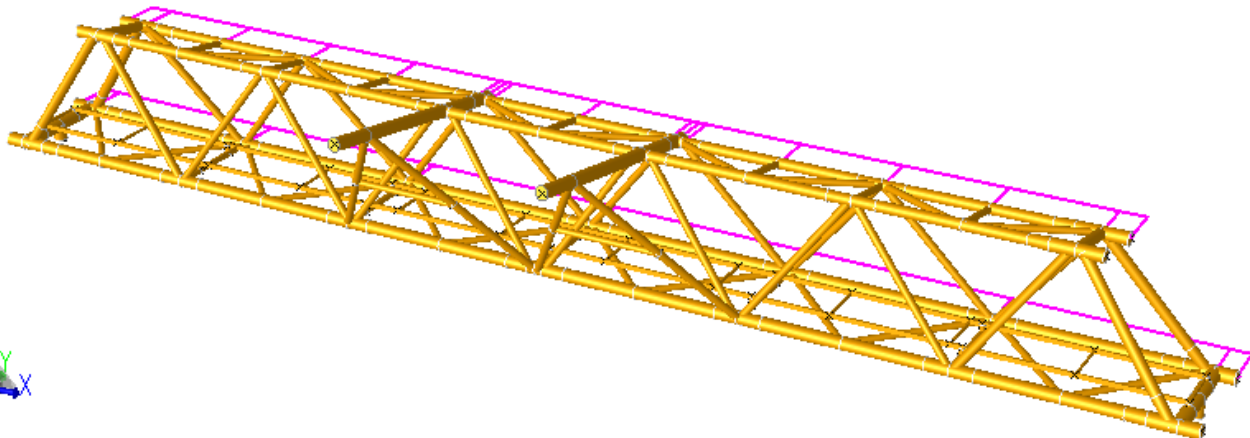


Abbildung 10-4: Windlasten für Brücke 4

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





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

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

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

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

Es wird nur eine Windrichtung (-y -Achse) gecheckt, die im Vergleich zum Wind in x-Richtung maßgebend ist.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 64 von 95

10.4.5 Schneelasten – LF SNOW

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

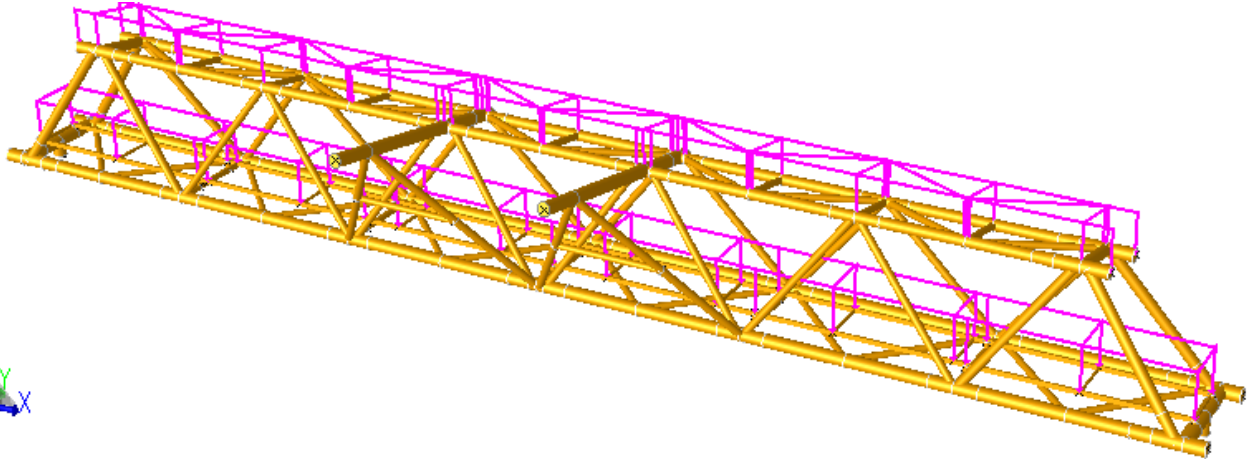


Abbildung 10-5: Schneelasten für Brücke 4

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

- Für die obere Brückenteil

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

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

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

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

- Für die Gitterroste

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





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

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

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

10.4.6 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 3,91 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 65 von 95

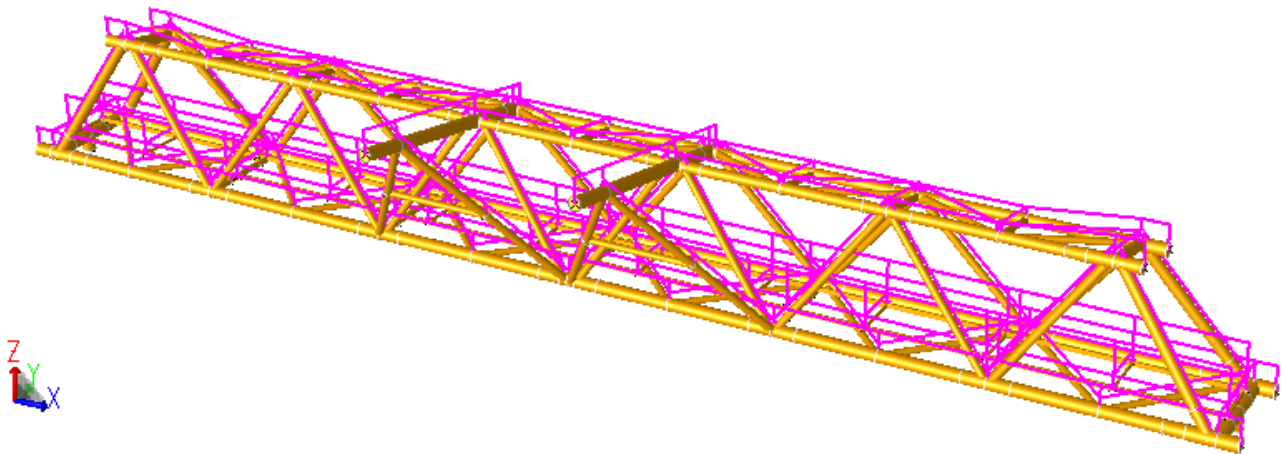


Abbildung 10-6: Eislasten für Brücke 4

10.4.7 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.

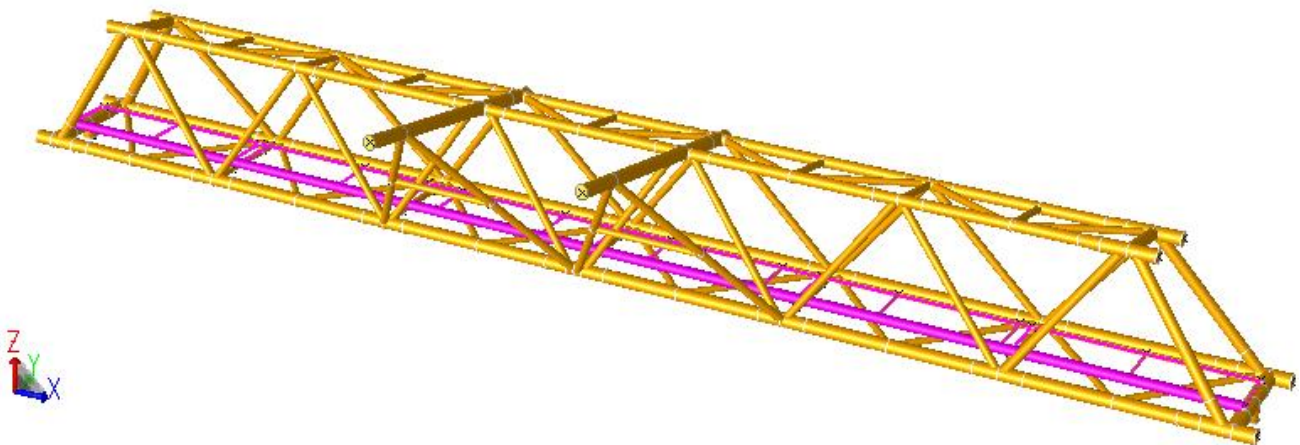


Abbildung 10-7: Holmlasten für Brücke 4

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





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

10.4.8 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 155 kN wie im Abschnitt 8.6.3.. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 1,510 \text{ kN} = 453 \text{ kN}$$

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 66 von 95

Die Reibungslasten werden auf 2 verschiedene Arten überprüft:

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

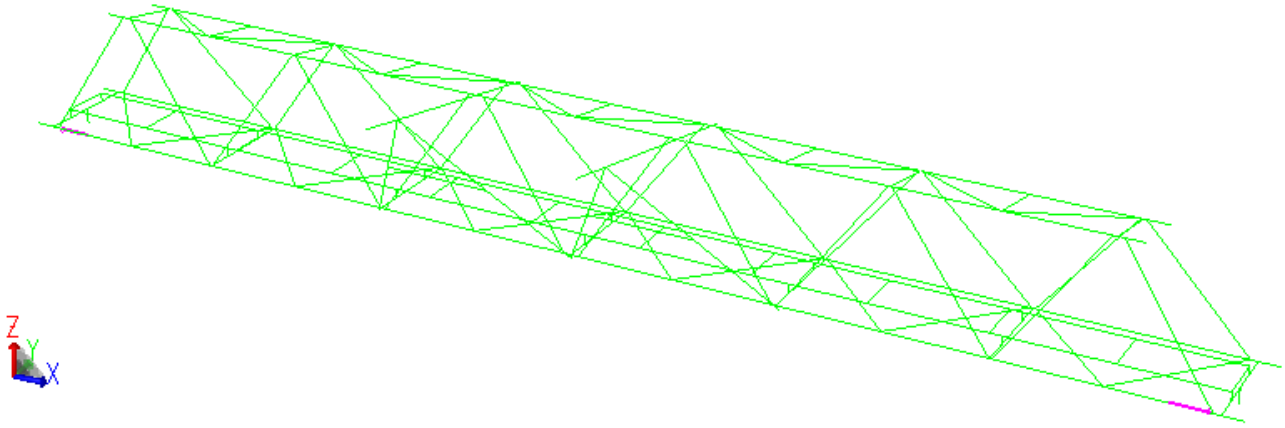


Abbildung 10-8: Reibungslasten (Zug) für Brücke 4

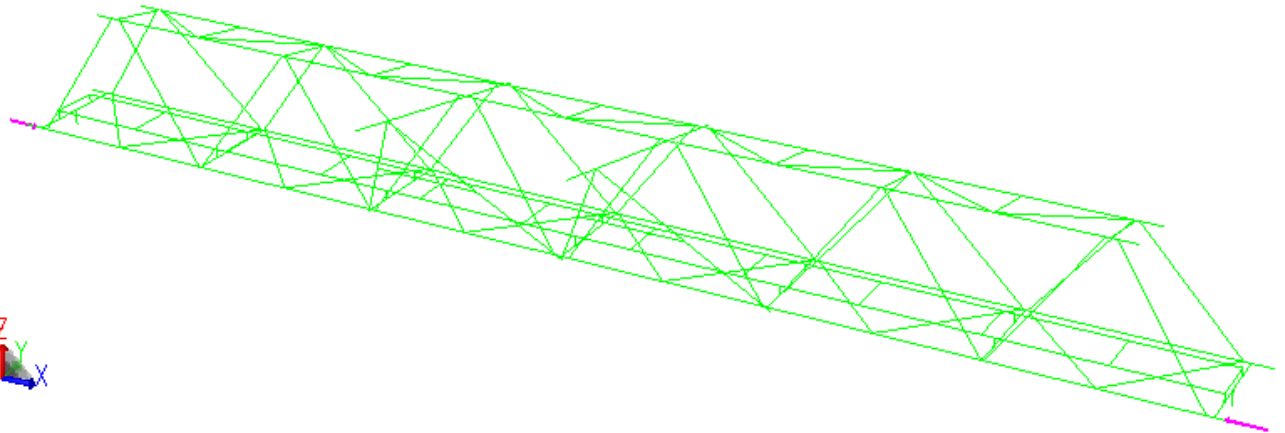






Abbildung 10-9: Reibungslasten (Druck) für Brücke 4

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 67 von 95

10.4.9 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.

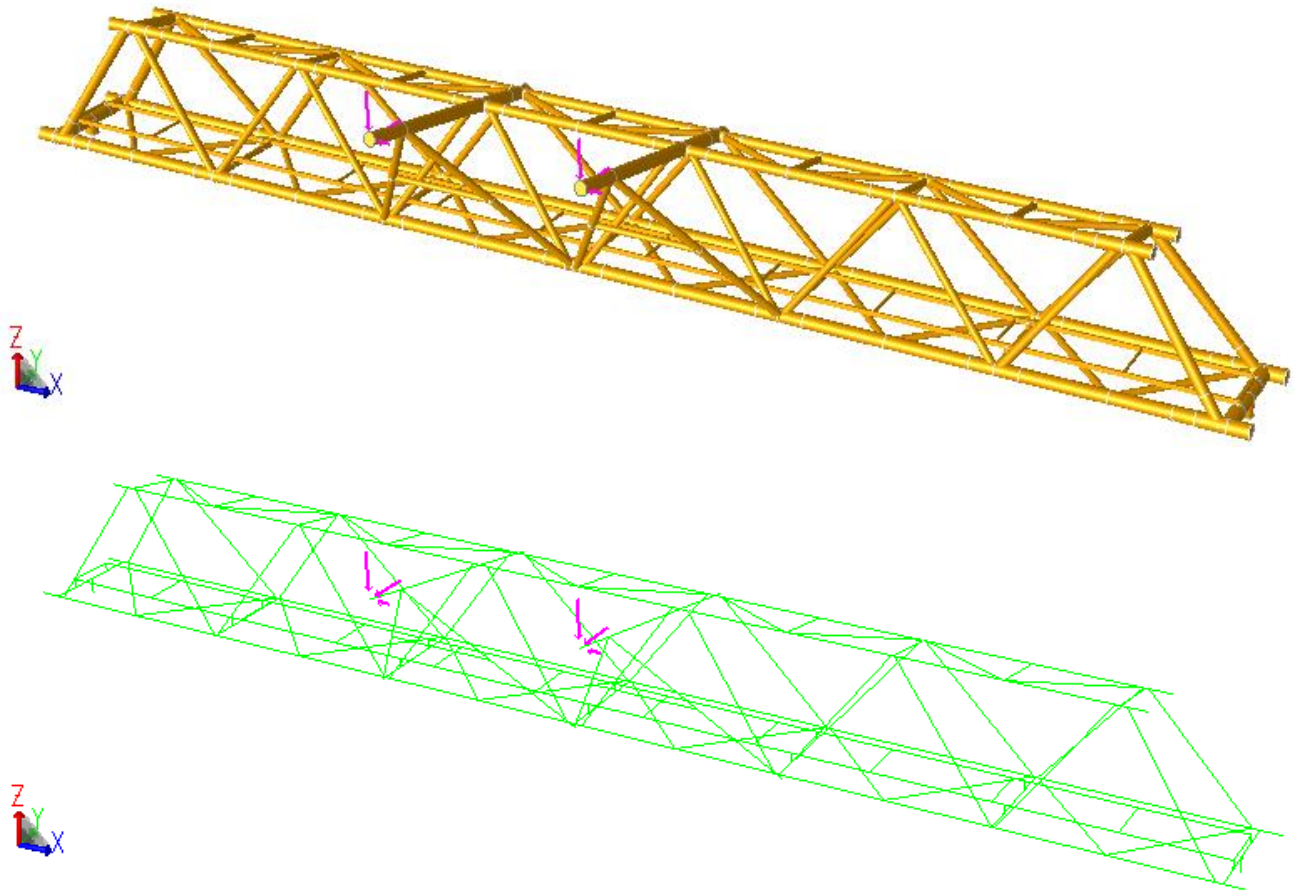







Abbildung 10-10: Position der Riser Hang-Offs

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)






  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 68 von 95

10.5 Lastfallkombinationen

Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.2.6 und 7.2.7.

Tabelle 10-2: Lastfallkombinationen

LCOM	Lastfaktoren								
	LF 100	LF LL	LF WIND	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 1 (Verkehr)</u>									
101	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
<u>ULS 2 (Wind)</u>									
201	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
<u>ULS 3 (Schnee & Eis)</u>									
301	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>									
401	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
<u>SLS 2 (Wind)</u>									
501	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
<u>SLS 3 (Schnee & Eis)</u>									
601	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
*inkl. 10% Gewichtsaufschlag wie im Abschnitt 11.4.2									

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 69 von 95

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 0,86 während In-place Zustand.

Mem Result: Combined UC

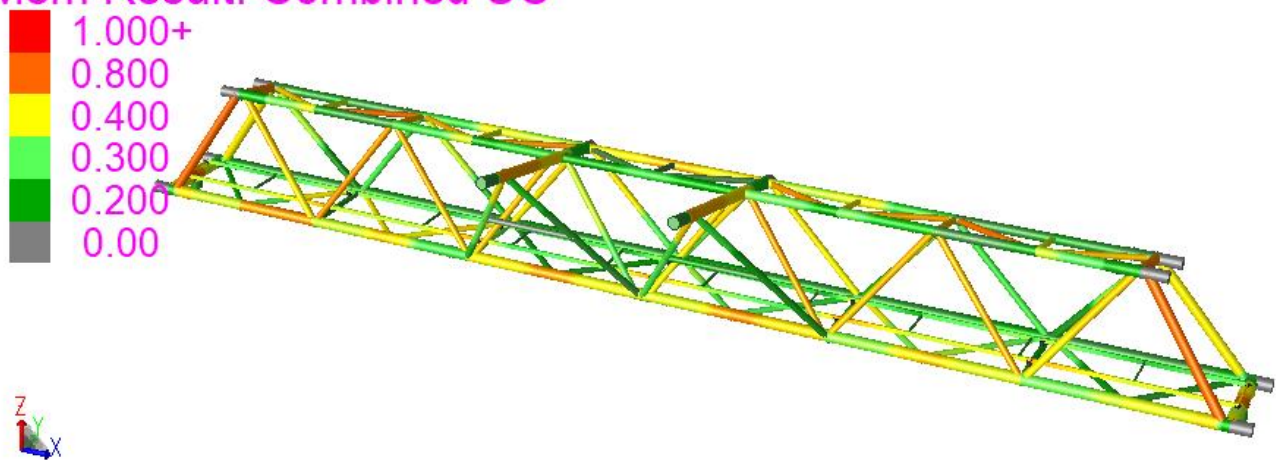


Abbildung 10-11: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 4

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 0,73 während In-place Zustand.

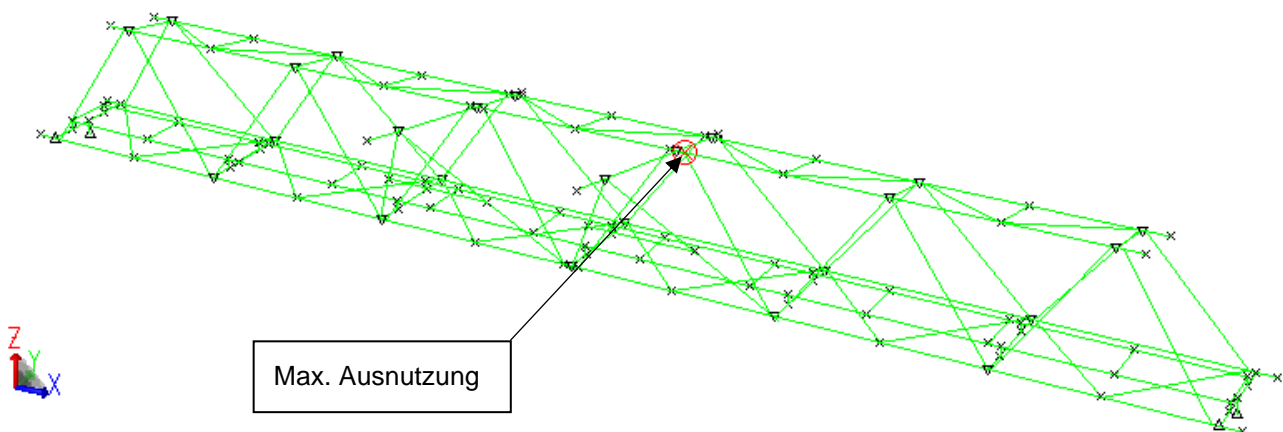







Abbildung 10-12: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 4

10.6.2 Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die maximale vertikale Verformung tritt für das LCOM 601 auf und resultiert zu -82 mm. Die maximale erlaubte Verformung ist definiert als $L/200 = 161$ mm (siehe Abschnitt 7.2.8). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 70 von 95

Defl. Shape LC 501
Max View Defl. at 0005
DX: -0.095
DY: -8.185
DZ: -8.232

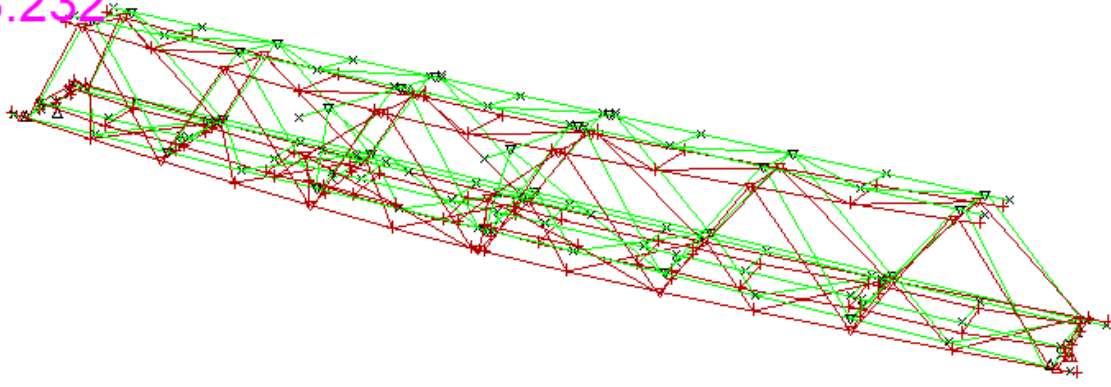


Abbildung 10-13: Verformungsergebnisse – Brücke 4

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)	1.508
Vertikal (Auftrieb)	-1.067
Horizontal (y-Richtung)	322
Horizontal (x-Richtung)	147

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

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 10% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Horizontal	4,27	4,07
Mode 2: Vertikal	6,94	6,62

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 71 von 95

Die Eigenfrequenzen der Brücke 4 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.2.9).

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]	Eigen- frequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeits- faktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwin- digkeit, v_m [m/s]	kritische Windgeschwin- digkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	1,25 * v_m [m/s]
Horizontale Primär- struktur Boden	0,323	11,8	41,40	1,292	38,76	74,3	48,45
Diagonalen	0,1937	13,9	54,49	1,317	39,51	58,6	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.

Mode 6 Freq. 41.399 Hz Period 0.024 secs

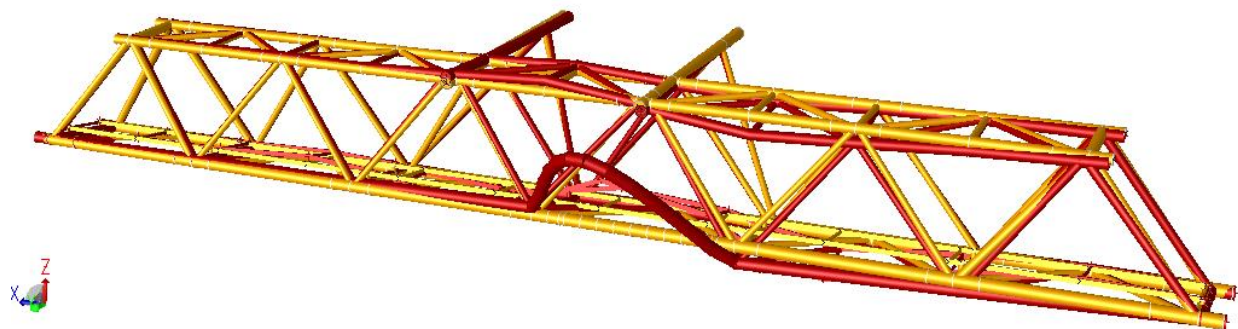






Abbildung 10-14: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 72 von 95

Mode 5 Freq. 54.491 Hz Period 0.018 secs

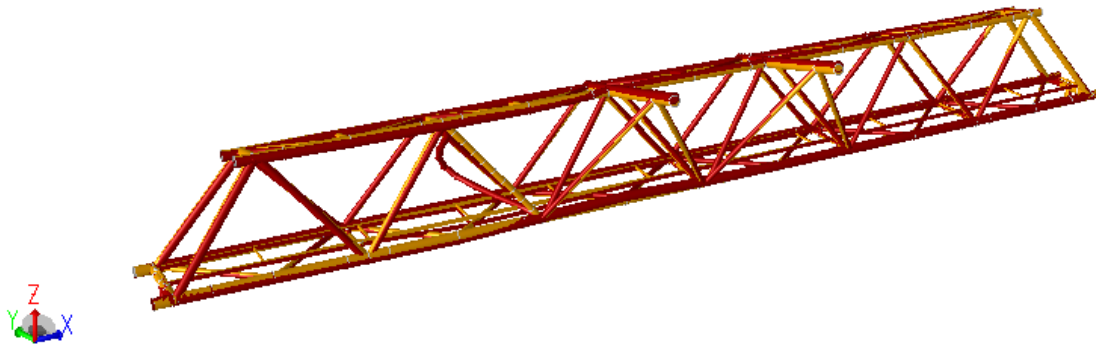


Abbildung 10-15: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

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 oder Padeyes angehoben wird. Eine detaillierte Auslegung der Hebepunkte gibt es zur Veröffentlichung dieses Dokuments nicht. Das grobe Aussehen der Hebeanordnung sowie das Vorgehen zur Berechnung sind im Folgenden beschrieben.

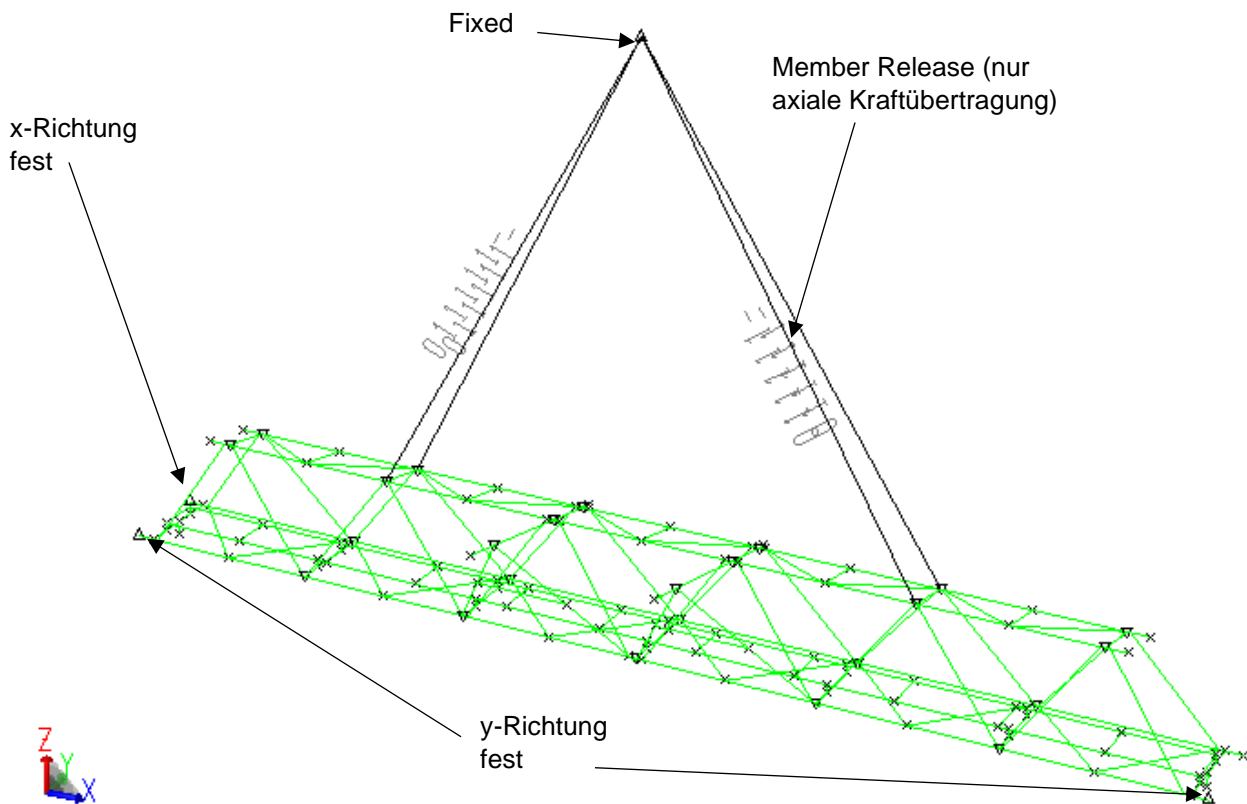







Abbildung 10-16: Hebeanordnung und Randbedingung

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 73 von 95

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 gesamter Lastfaktor von 3,36 wurde fuer die Hebeanalyse verwendet (wie im Abschnitt 7.2.11).

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 0,81 für Hebeanalyse.

For All Active LCs
Mem Result: Combined UC

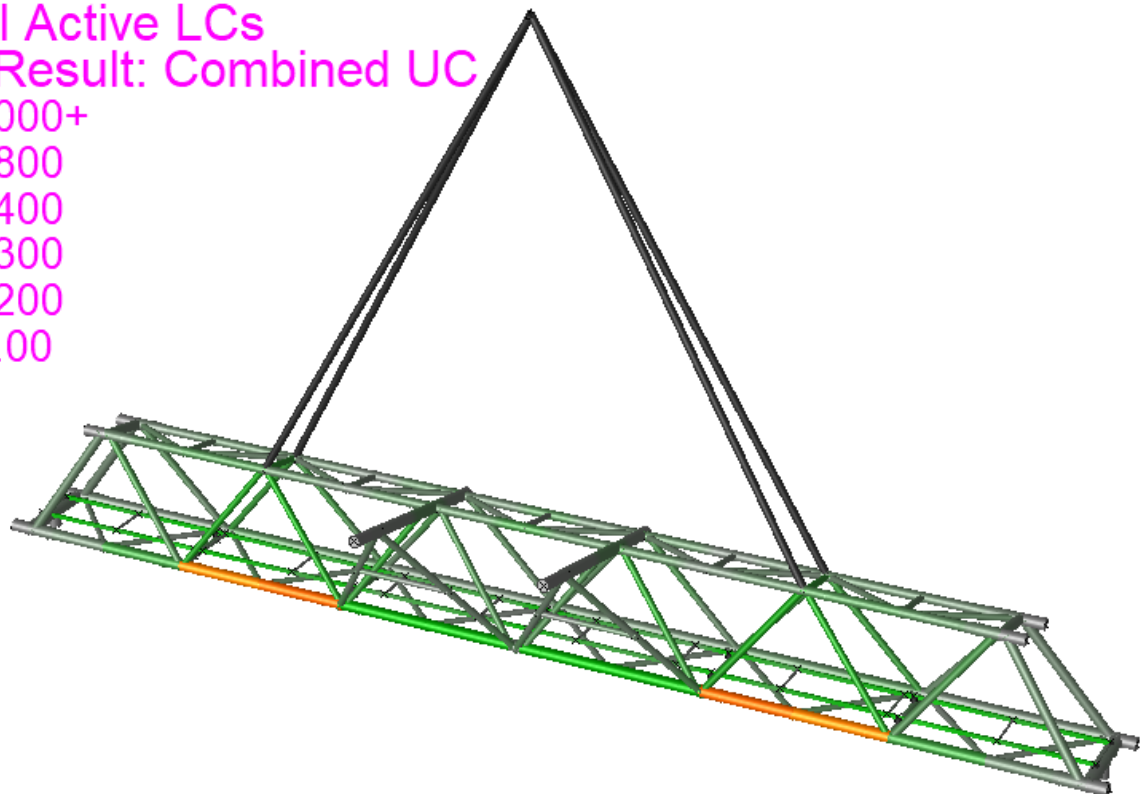
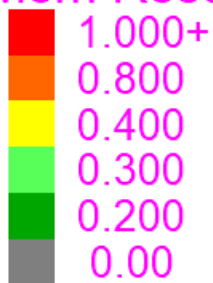




Abbildung 10-17: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke \$

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 0,13.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 74 von 95

For All Active LCs

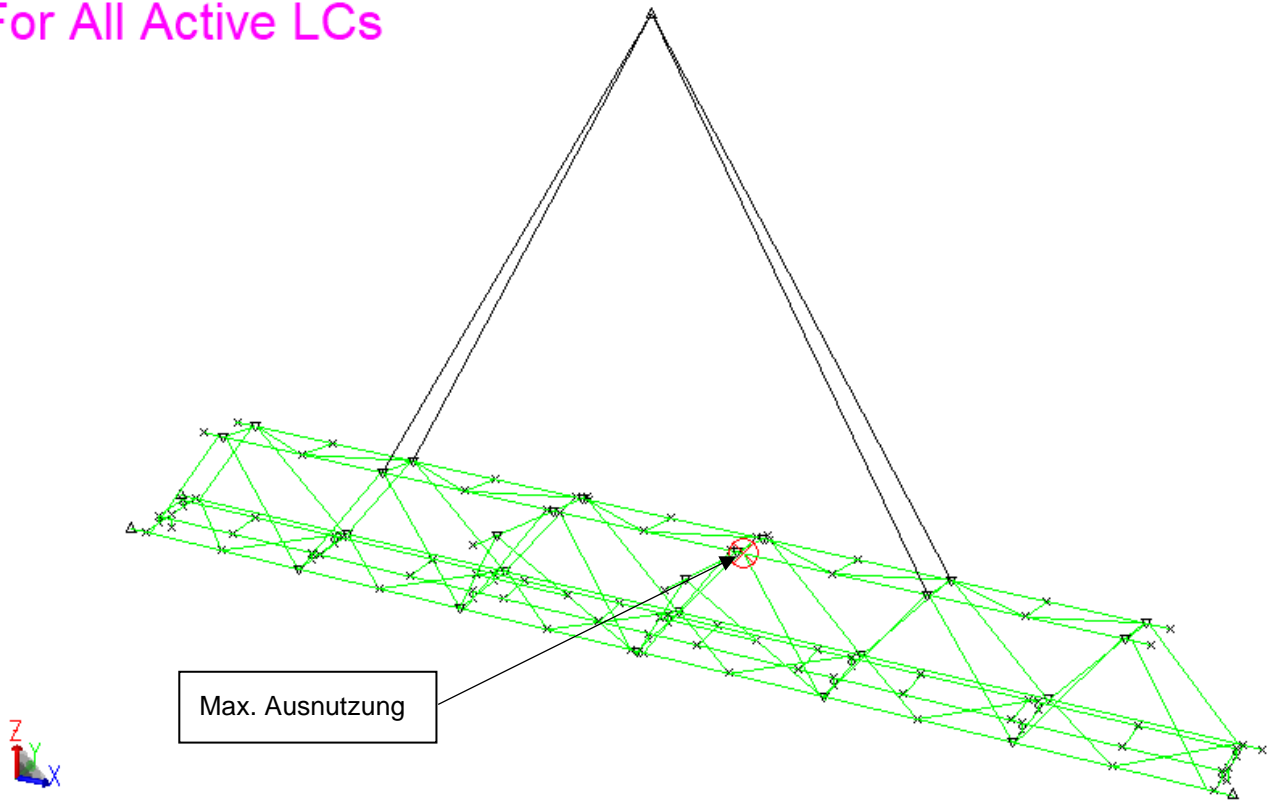






Abbildung 10-18: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke \$

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 75 von 95

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.

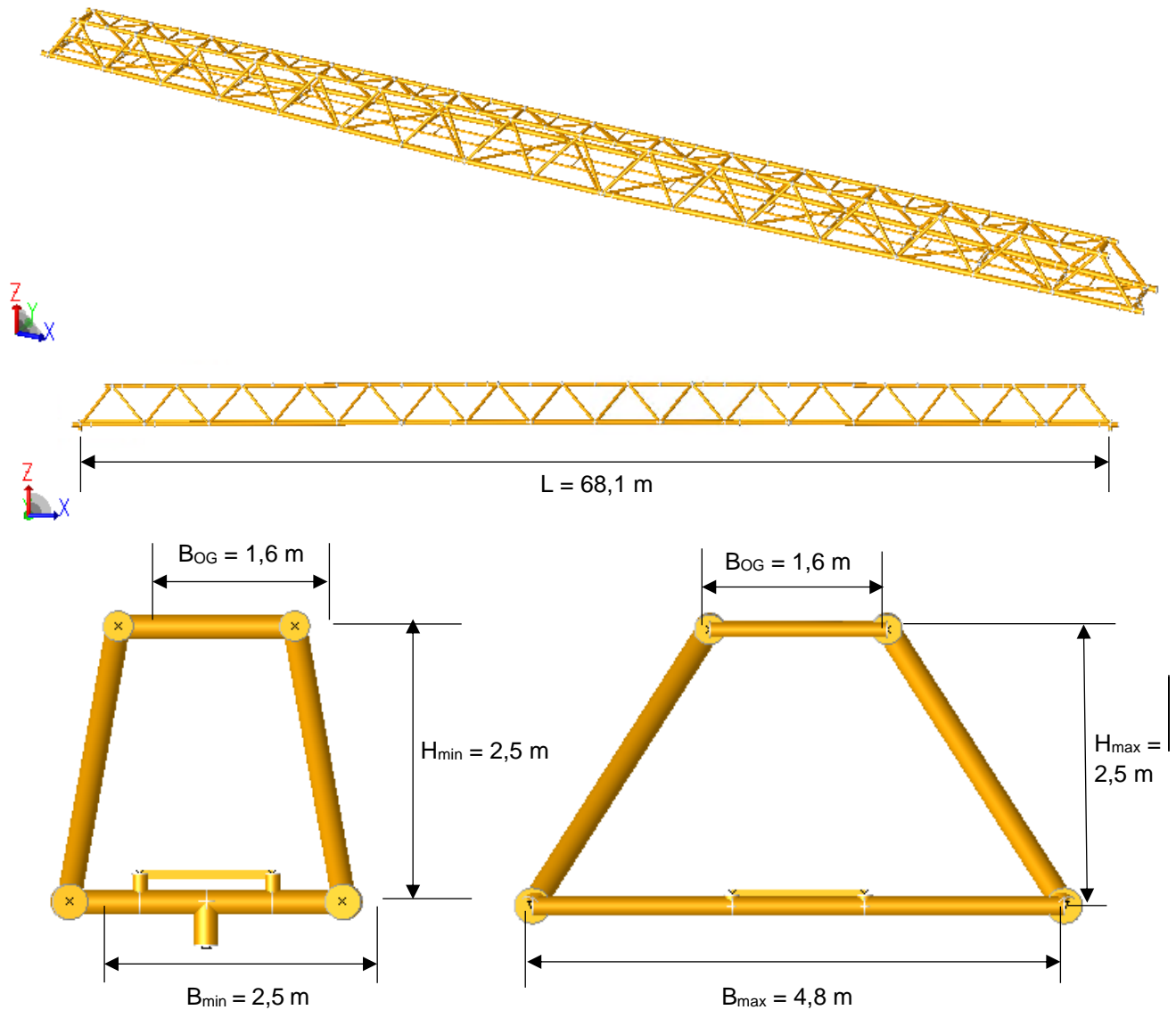




Abbildung 11-1: FE-Modell – Brücke 7

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 76 von 95

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

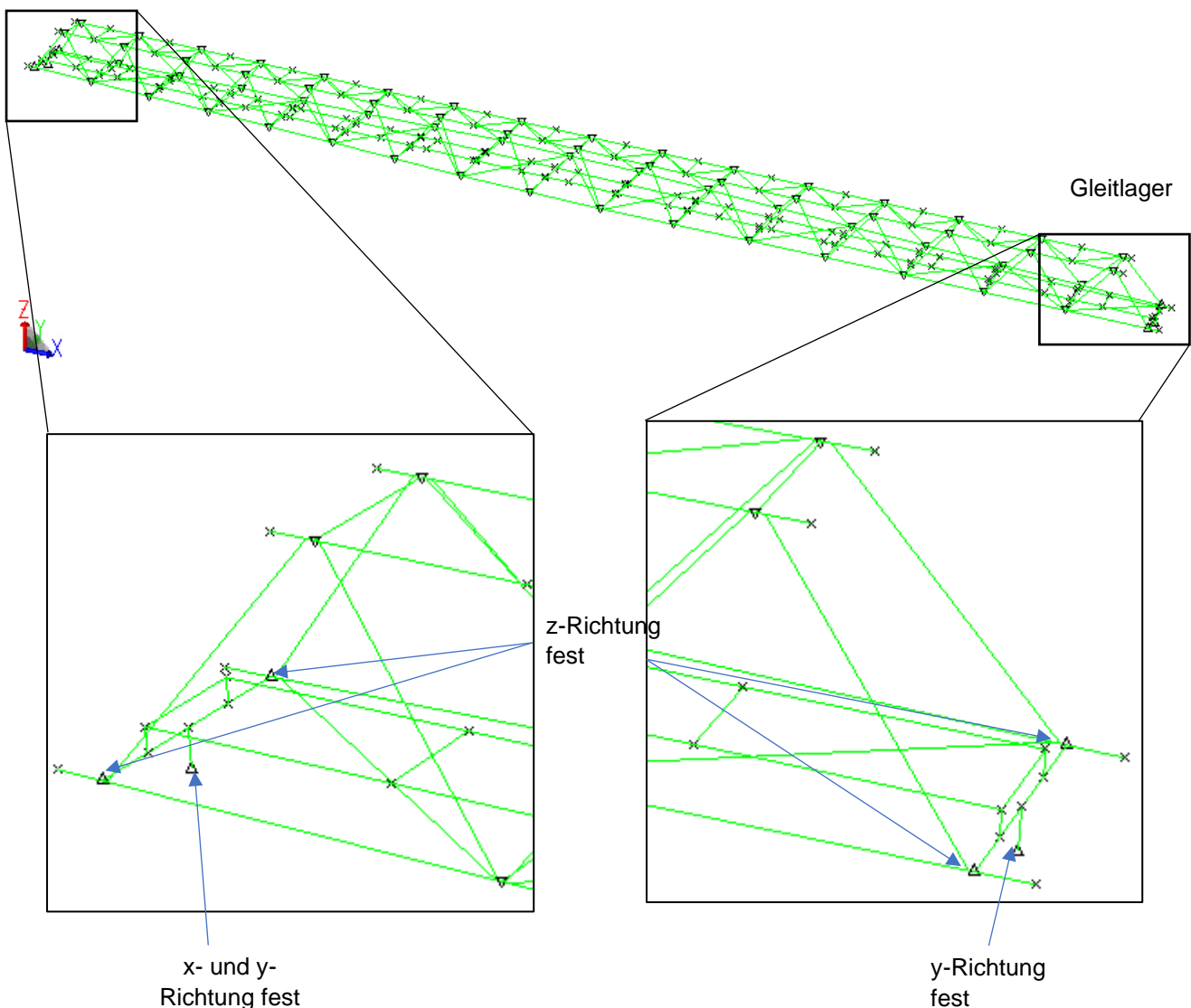







Abbildung 11-2: Randbedingungen

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 77 von 95

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	35,64
Gitterroste	2,45
Handläufe	2,08
Total	40,17

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

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

$$L_{\text{Gitterroste}} = 68,1 \text{ m}$$

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

$$G_{\text{Gitterroste}} = (30 \text{ kg/m}^2 / 1000) * 68,1 \text{ m} * 1,2 \text{ m}$$

$$= 2,45 \text{ t}$$

Die Gewichte der Handläufe sind konservativ mit $m_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m}$ gerechnet und

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

$$L_{\text{Handläufe}} = 68,1 \text{ m}$$

$$G_{\text{Handläufe}} = 0,15 \text{ kN/m} * 2 * 68,1 \text{ m} / g$$






$$= 2,08 \text{ t}$$

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

Auf das strukturelle Gewicht wird ein Gewichtsaufschlag von 10% aufgeschlagen, um die Kabelführung und -auflager, Anstrich, Brückenlager und die Hebevorrichtungen zu berücksichtigen. Aber diese 10% 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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 78 von 95

Load Condition: LL

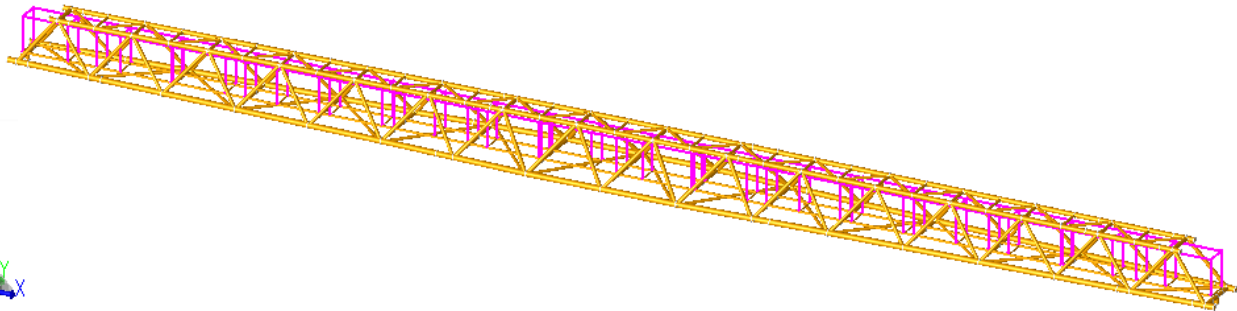


Abbildung 11-3: Verkehrslasten für Brücke 7

Die gesamte Verkehrslasten sind wie unten gerechnet:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{Gitterroste}} &= q * L_{\text{Gitterroste}} * B_{\text{Gitterroste}} \\
 L_{\text{Gitterroste}} &= 68,1 \text{ m} \\
 B_{\text{Gitterroste}} &= 1,2 \text{ m} \\
 G_{\text{Gitterroste}} &= 2 \text{ kN/m}^2 * 68,1 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = 163,44 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

11.4.4 Windlasten – LF WIND

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

Load Condition: WIND

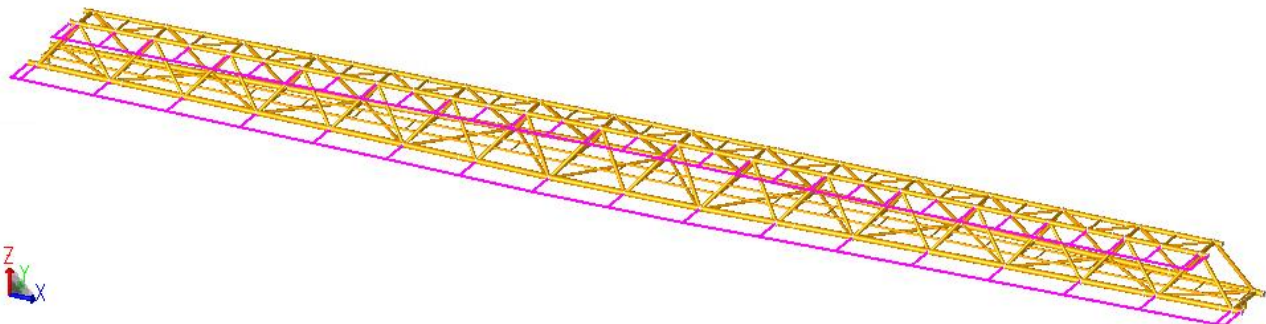







Abbildung 11-4: Windlasten für Brücke 7

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

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wind}} &= w * A \text{ und Windfläche, } A = H * L \\
 H &= 2,90 \text{ m} \\
 L &= 68,1 \text{ m} \\
 F_{\text{wind}} &= 1,329 * 2,90 \text{ m} * 68,1 \text{ m} = 262,37 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Es wird nur eine Windrichtung (+y -Achse) gecheckt, die im Vergleich zum Wind in x-Richtung maßgebend ist.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 79 von 95

11.4.5 Schneelasten – LF SNOW

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

Load Condition: SNOW

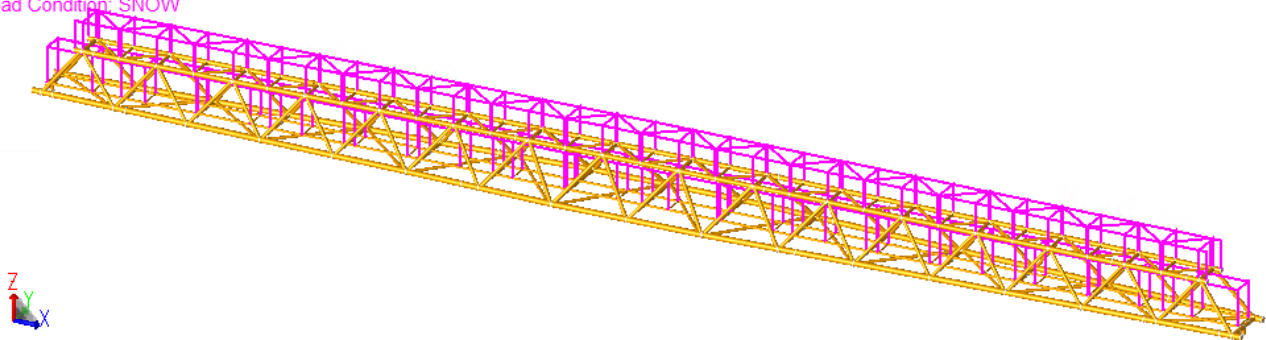


Abbildung 11-5: Schneelasten für Brücke 7

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

- Für die obere Brückenteil
 - $F_{OB} = s * A_{OB}$ und Fläche des oberen Brückenteils, $A_{OB} = B_{OB} * L_{OB}$
 - $B_{OB} = 1,6 \text{ m}$
 - $L_{OB} = 64,78 \text{ m}$
 - $F_{wind} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m} * 64,78 \text{ m} = 53,90 \text{ kN}$
- Für die Gitterroste
 - $F_{GR} = s * A_{GR}$ und Fläche der Gitterroste, $A_{GR} = B_{GR} * L_{GR}$
 - $B_{GR} = 1,2 \text{ m}$
 - $L_{GR} = 68,1 \text{ m}$
 - $F_{wind} = 0,52 \text{ kN/m}^2 * 1,2 \text{ m} * 68,1 \text{ m} = 42,49 \text{ kN}$

11.4.6 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 7,95 kN werden für die Berechnung berücksichtigt.

Load Condition: ICE

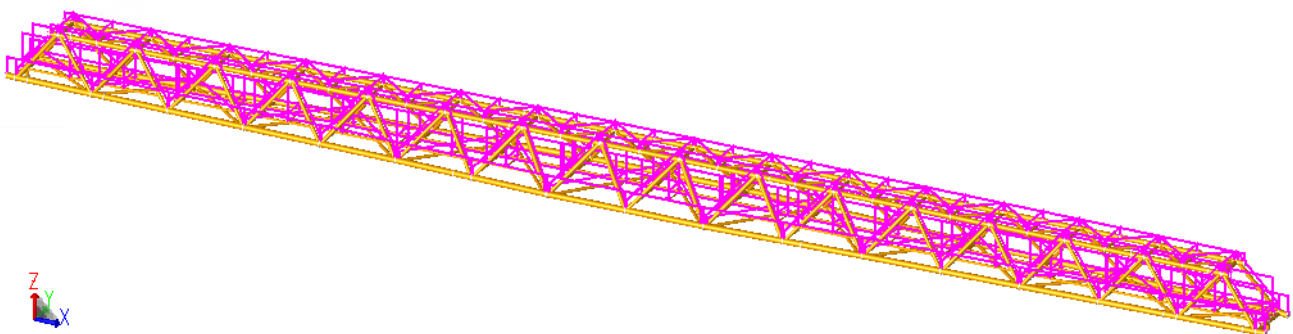







Abbildung 11-6: Eislasten für Brücke 7

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 80 von 95

11.4.7 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

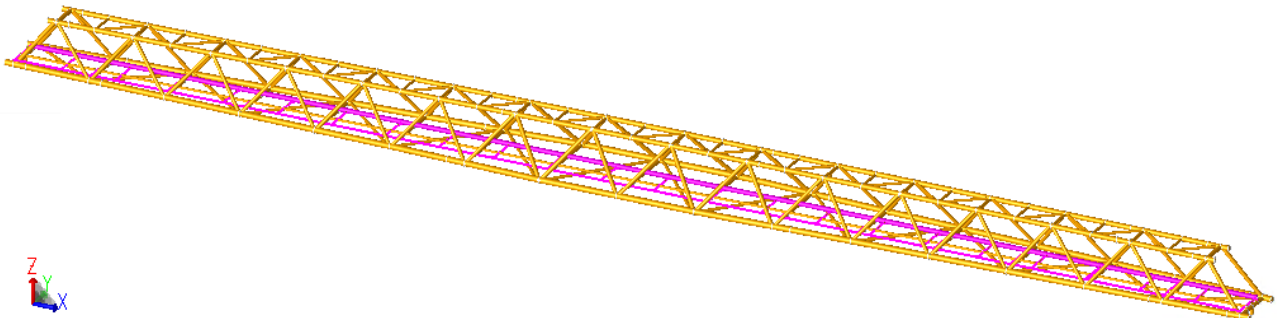


Abbildung 11-7: Holmlasten für Brücke 7

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

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

11.4.8 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 370 kN wie im Abschnitt 11.6.3. Die Reibungslasten sind wie unten gerechnet.

$$F_R = \mu * F_N = 0,3 * 370 \text{ kN} = 111 \text{ kN}$$

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

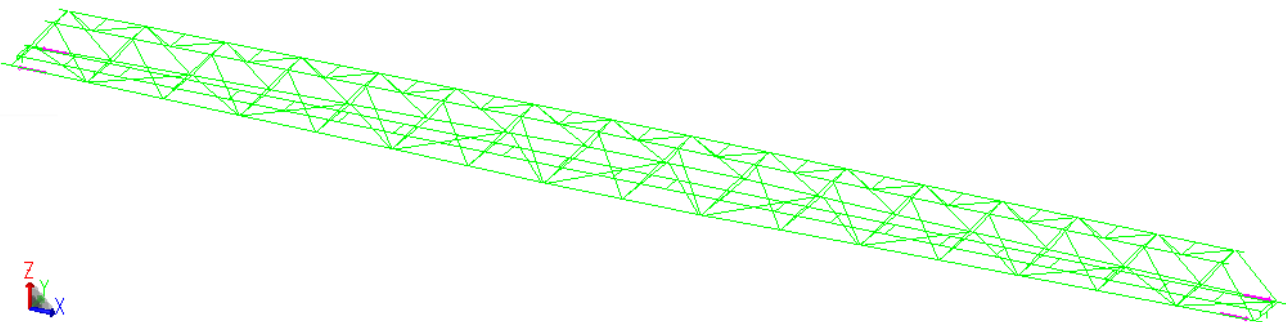




Abbildung 11-8: Reibungslasten (Zug) für Brücke 7

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 81 von 95

Load Condition: DRUC

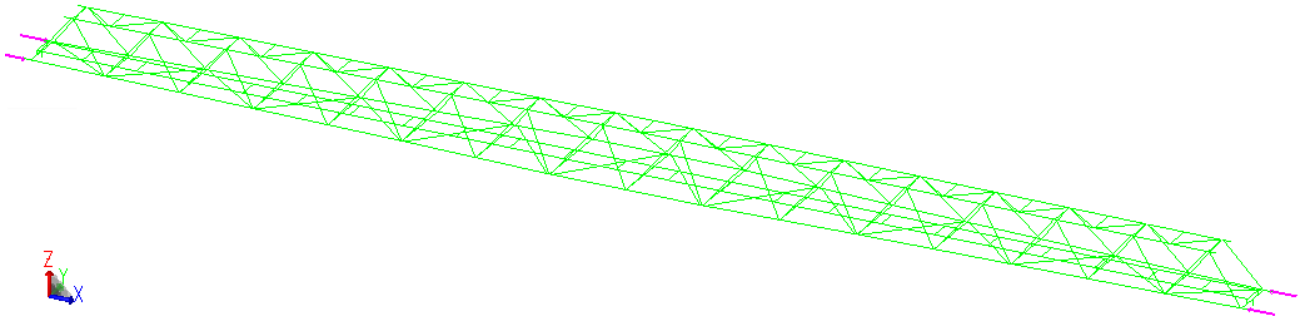


Abbildung 11-9: Reibungslasten (Druck) für Brücke 7

Load Condition: ABWE

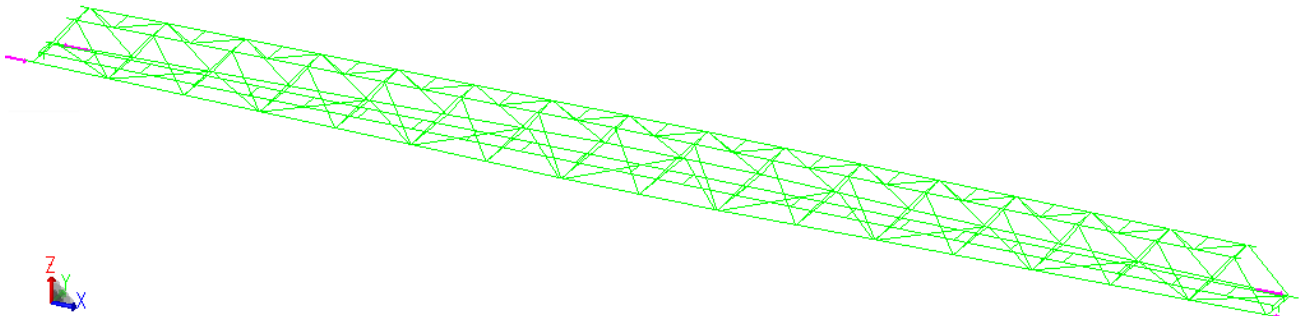







Abbildung 11-10: Reibungslasten (Abwechsel) für Brücke 7

11.5 Lastfallkombinationen






Im Folgenden sind die Lastfallkombinationen (LCOMs) zusammengefasst. Die Faktoren basieren auf Abschnitt 7.2.6 und 7.2.7.

Tabelle 11-2: Lastfallkombinationen

LCOM	Lastfaktoren								
	LF 100	LF LL	LF WIND	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<i>ULS 1 (Verkehr)</i>									
101	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	1,00	-	-
102	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	1,00	-
103	1,485*	1,50	0,99	0,825	0,825	1,00	-	-	1,00
<i>ULS 2 (Wind)</i>									
201	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	1,00	-	-
202	1,485*	1,05	1,65	0,825	0,825	0,70	-	1,00	-
203	1,485*	1,05	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_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 82 von 95

LCOM	Lastfaktoren								
	LF 100	LF LL	LF WIND	LF SNOW	LF ICE	LF HOLM	LF ZUG	LF DRUCK	LF ABWE
<u>ULS 3 (Schnee & Eis)</u>									
301	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	1,00	-	-
302	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	1,00	-
303	1,485*	1,05	0,99	1,65	1,65	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 1 (Verkehr)</u>									
401	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	1,00	-	-
402	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	1,00	-
403	1,10*	1,00	0,66	0,55	0,55	1,00	-	-	1,00
<u>SLS 2 (Wind)</u>									
501	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	1,00	-	-
502	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	1,00	-
503	1,10*	0,70	1,10	0,55	0,55	0,70	-	-	1,00
<u>SLS 3 (Schnee & Eis)</u>									
601	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	1,00	-	-
602	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	1,00	-
603	1,10*	0,70	0,66	1,10	1,10	0,70	-	-	1,00
*inkl. 10% Gewichtsaufschlag wie im Abschnitt 11.4.2									

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 83 von 95

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 0,85 während In-place Zustand.

For All Active LCs

Mem Result: Combined UC

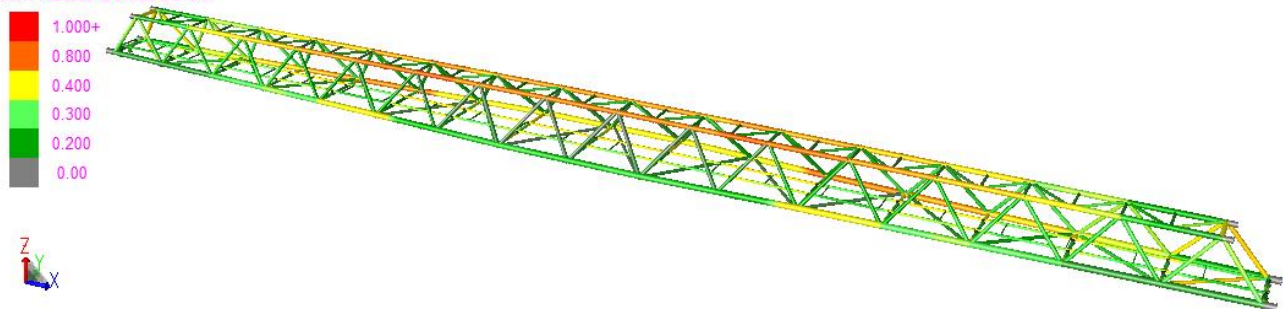


Abbildung 11-11: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 7

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 0,73 während In-place Zustand.

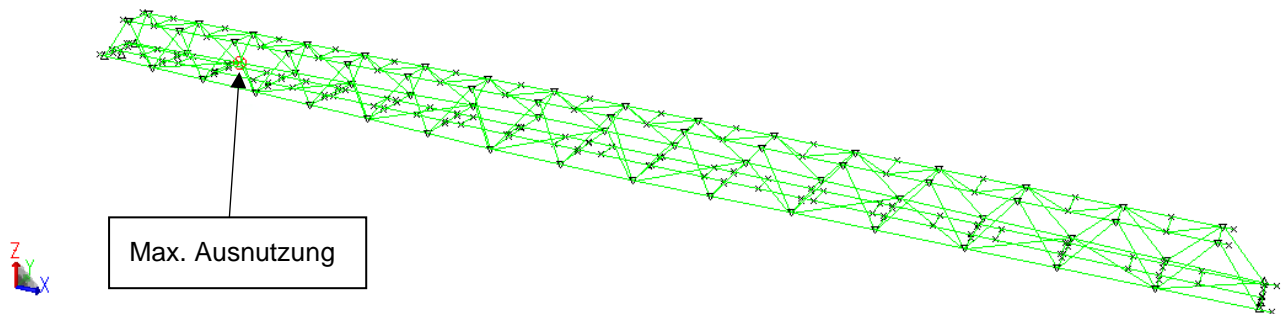







Abbildung 11-12: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 7

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 7.2.8). Die maximale vertikale Verformung ist geringer als die erlaubte Verformung und somit akzeptabel.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 84 von 95

Defl. Shape LC 601

Max View Defl. at 0.004

DX: 1.729

DY: 3.907

DZ: -24.017

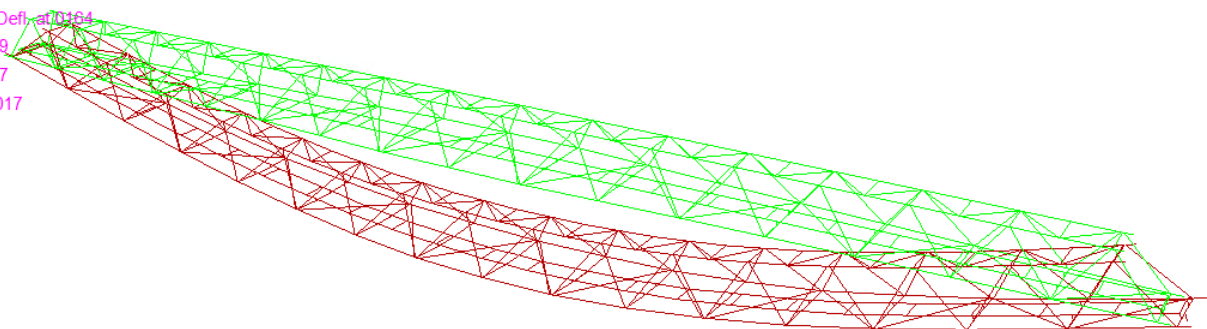


Abbildung 11-13: Verformungsergebnisse – Brücke 7

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 11-3: Brückenlager Lasten – Brücke 7

Richtung	Last [kN]
Vertikal (nur Druck, kein Auftrieb)	370
Horizontal (Quer)	230






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 11-4: Eigenfrequenzen – Brücke 7

Mode / Richtung	Eigenfrequenz ohne Gewichtsaufschlag [Hz]	Eigenfrequenz mit 10% Gewichtsaufschlag [Hz]
Mode 1: Vertikal	1,498	1,43
Mode 2: Horizontal	1,915	1,83

Die Eigenfrequenzen der Brücke 7 sind außerhalb die kritische Eigenfrequenzbereiche für beide Richtungen (siehe Abschnitt 7.2.9).

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 85 von 95

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 11-5: Wirbelinduzierte Vibration

Element	Durchmesser/ Breite, D/b [m]	Höhe über LAT, z [m]	Eigen- frequenz, $n_{i,y}$ [Hz]	Rauigkeits- faktor, $c_r(z)$ [-]	10-Minuten Windgeschwin- digkeit, v_m [m/s]	kritische Windgeschwin- digkeit, $v_{crit,i}$ [m/s]	1,25 * v_m [m/s]
Horizontale Primär- struktur Boden	0,3239	12,0	52,59	1,294	38,82	94,6	48,53
Diagonalen	0,2191	13,9	61,66	1,317	39,51	75,1	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.

Mode 6 Freq. 52.589 Hz Period 0.019 secs

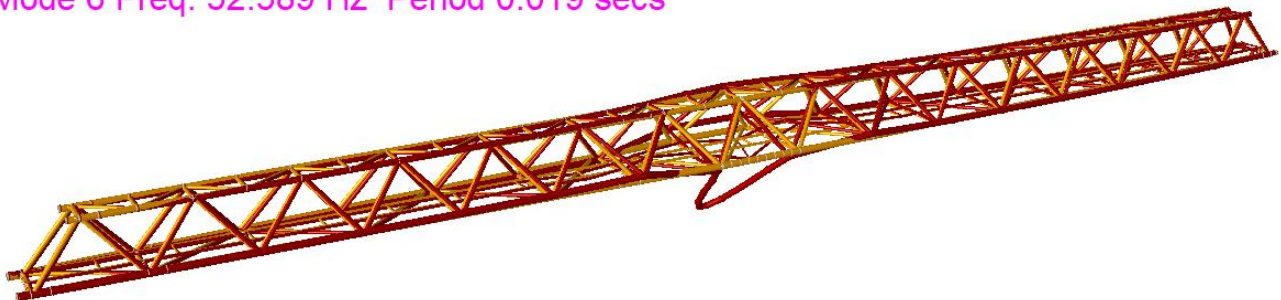


Abbildung 11-14: Kritische Eigenfrequenz für die Horizontale Primärstruktur Boden

Mode 6 Freq. 61.660 Hz Period 0.016 secs

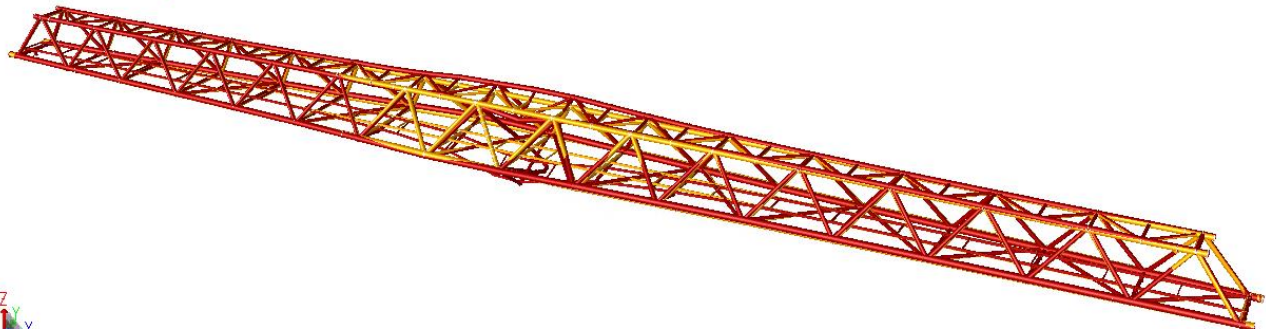




Abbildung 11-15: Kritische Eigenfrequenz Diagonale

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 86 von 95

11.6.6 Hebeanalyse

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

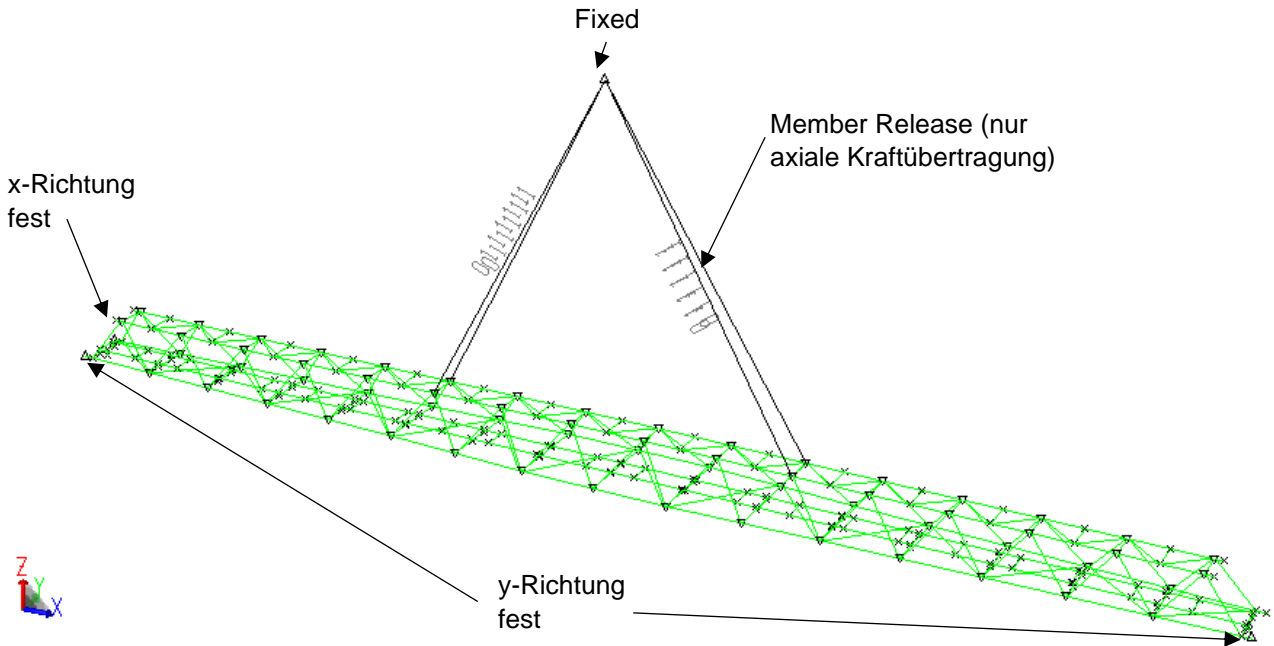






Abbildung 11-16: Hebeanordnung und Randbedingung

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 gesamter Lastfaktor von 3,36 wurde für die Hebeanalyse verwendet (wie im Abschnitt 7.2.11).

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 0,52 für Hebeanalyse.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 87 von 95

For All Active LCs
Mem Result: Combined UC

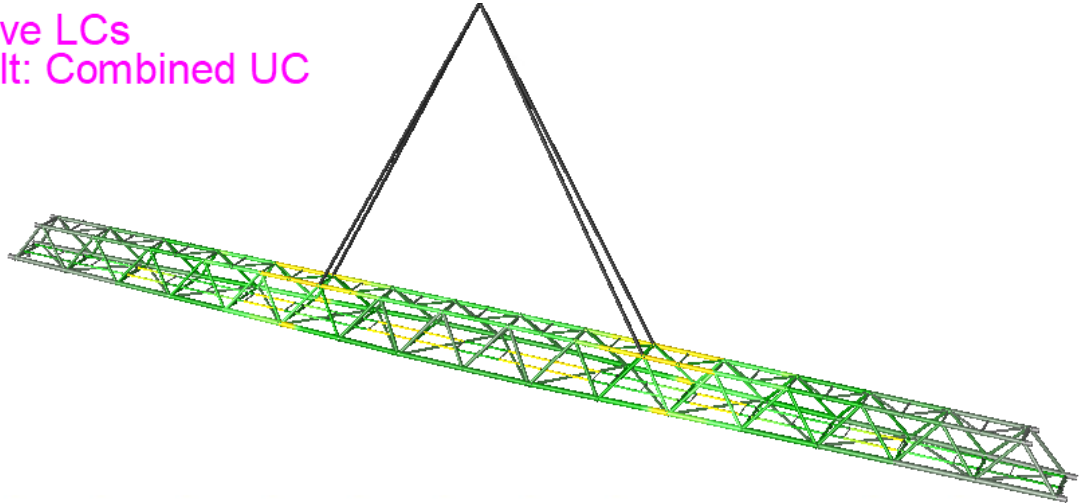


Abbildung 11-17: Übersicht über die Member-Auslastung - Brücke 7

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 0,64.

For All Active LCs

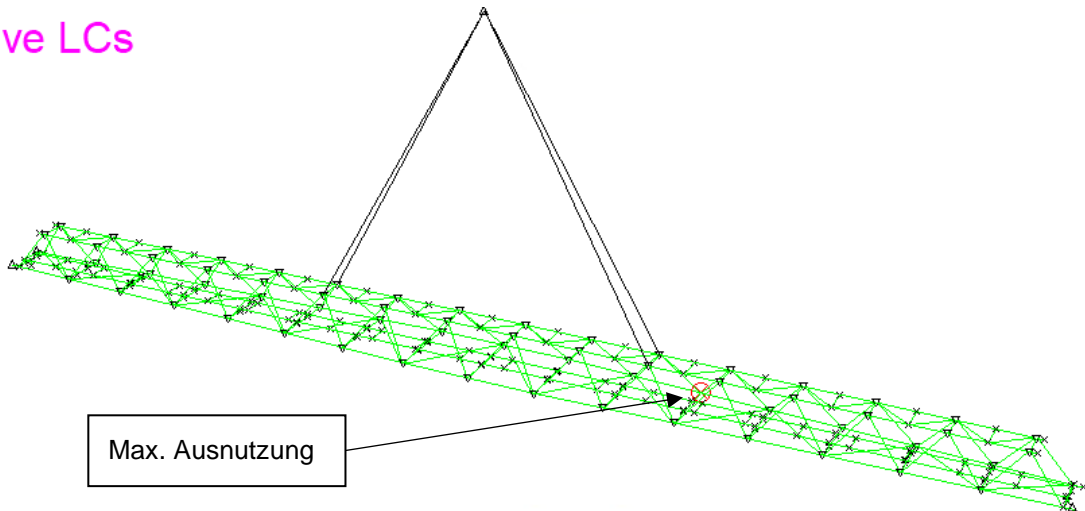




Abbildung 11-18: Übersicht über die Knoten-Auslastung - Brücke 7

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 88 von 95

12 Brückenlager

12.1 Allgemeine Beschreibung

Das brückenseitige Lager ist für das Fest- und das Loslager an dem jeweiligen Brückenende identisch. Es wird außerdem nicht zwischen den Brückentypen unterschieden, sondern es wird für die maximale Designlasten in Kapitel 11.6.3 ausgelegt. 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, welcher im weiteren Verlauf dieses Projekts ausgelegt wird.

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

12.2.1 Randbedingungen

Das FE-Modell wird an den geschnittenen Querschnitten fixiert, wie in der folgenden Abbildung gezeigt.

	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 89 von 95

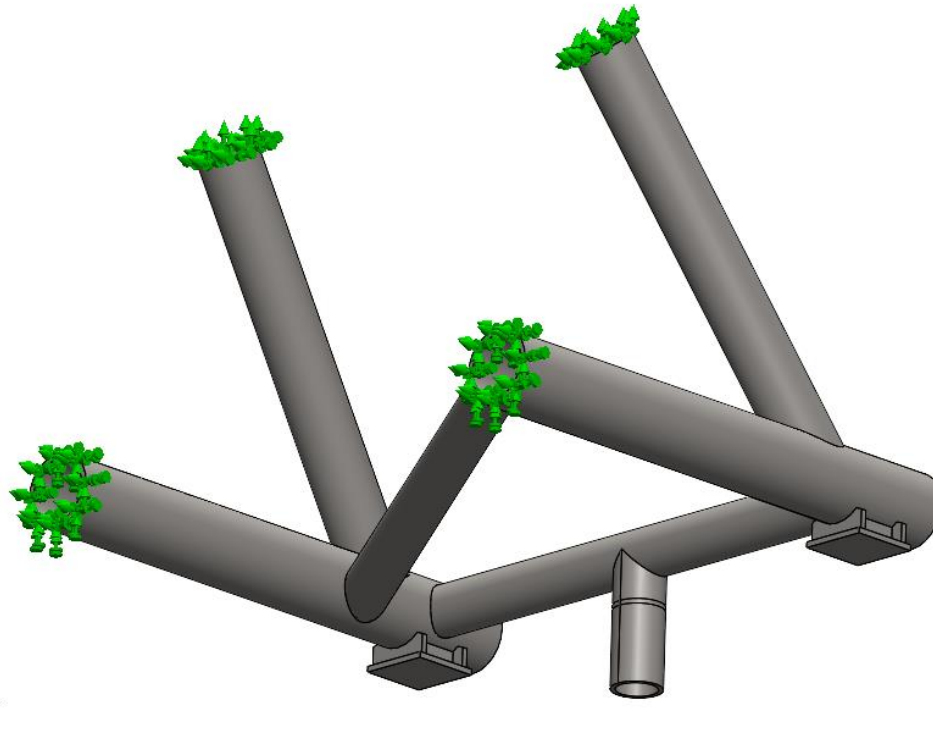






Abbildung 12-2: Randbedingungen - Detailmodell der Brückenlager

12.2.2 Lasten

Die Designlasten aus Kapitel 11.6.3 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.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 90 von 95

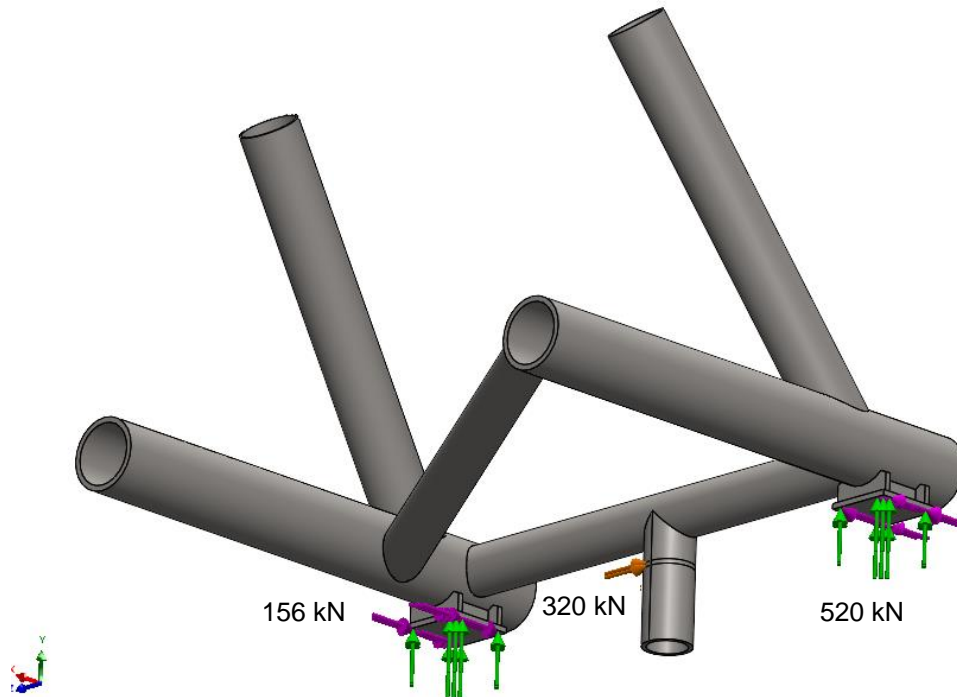






Abbildung 12-3: Lastaufbringung – Detailmodell der Brückenlager

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.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 91 von 95

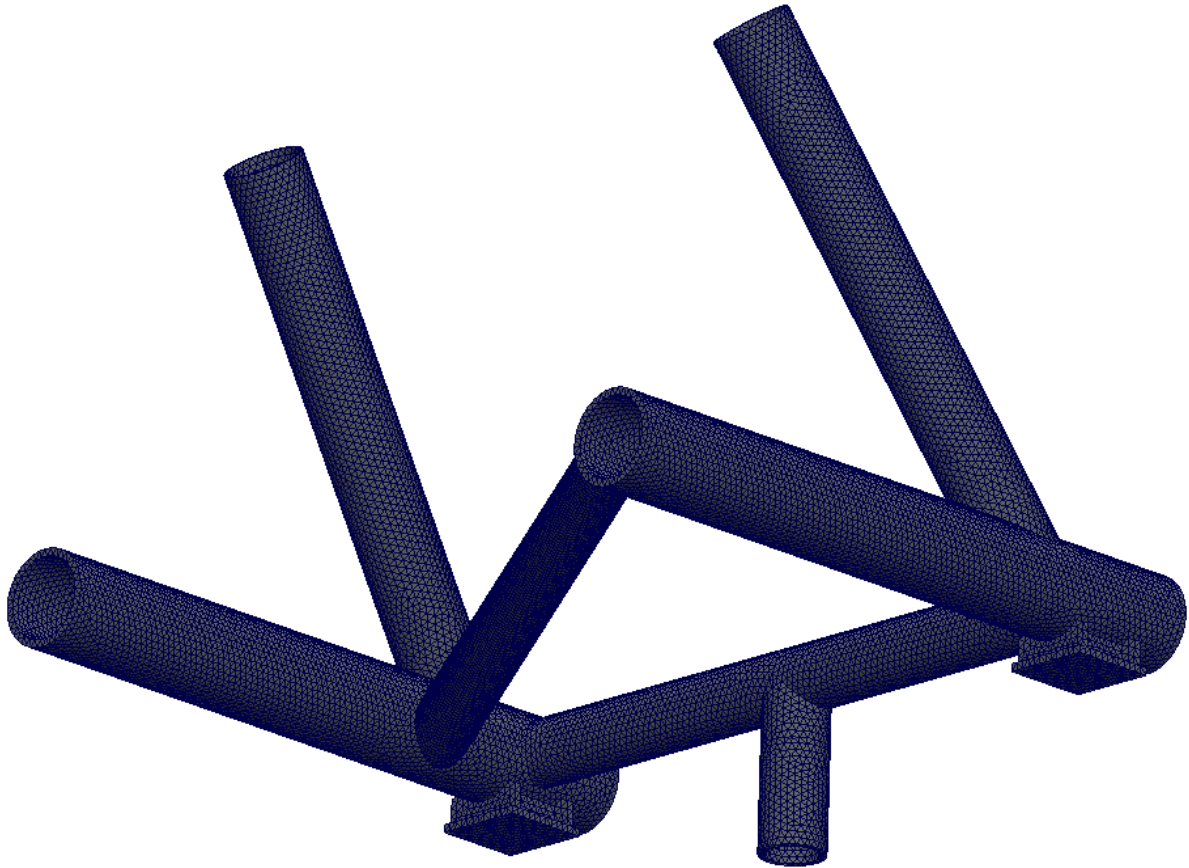







Abbildung 12-4: FE-Netz - Detailmodell der Brückenlager

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.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 92 von 95

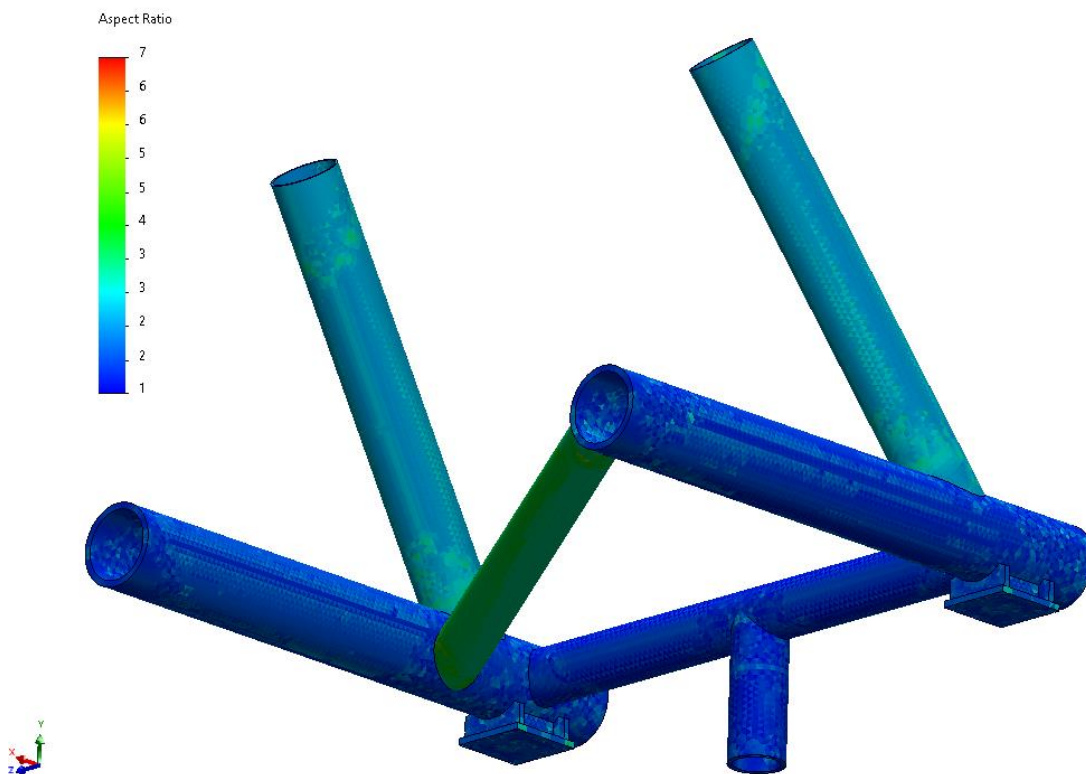


Abbildung 12-5: FE-Netz – Seitenverhältnis der Elemente - Detailmodell der Brückenlager






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	Volumen-Netz
Verwendeter Netzgenerator	Kurvengestütztes Misch-Netz
Jakobi-Punkte	16
Max. Elementgröße	25 mm
Min. Elementgröße	8,33325 mm
Netzqualität	Hoch (10 Knoten)
Anzahl Knoten	273544
Anzahl Elemente	142589

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 93 von 95

Max. Seitenverhältnis	6,9596
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis < 3	90,7
Anteil Elemente mit Seitenverhältnis > 10	0

12.2.4 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Spannungen und Verformungen für das brückenseitige Lager gezeigt. Die maximal zulässige Spannung ergibt sich aus den zulässigen Spannungen aus Kapitel 4.4 reduziert um den Materialfaktor 1,25 für Detailnachweise. Daraus ergibt sich für Plattenstärken < 40 mm eine maximal zulässige Spannung von 276,0 MPa.

12.2.4.1 Spannungsergebnisse

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

Die auftretenden Spannungen sind moderat. Die maximal auftretende von Mises-Spannung von 234,7 MPa befindet sich unterhalb der maximal erlaubten Spannungsgrenze von 276,0 MPa (siehe 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.

). Die maximale Spannungsauslastung beträgt somit 85 %.

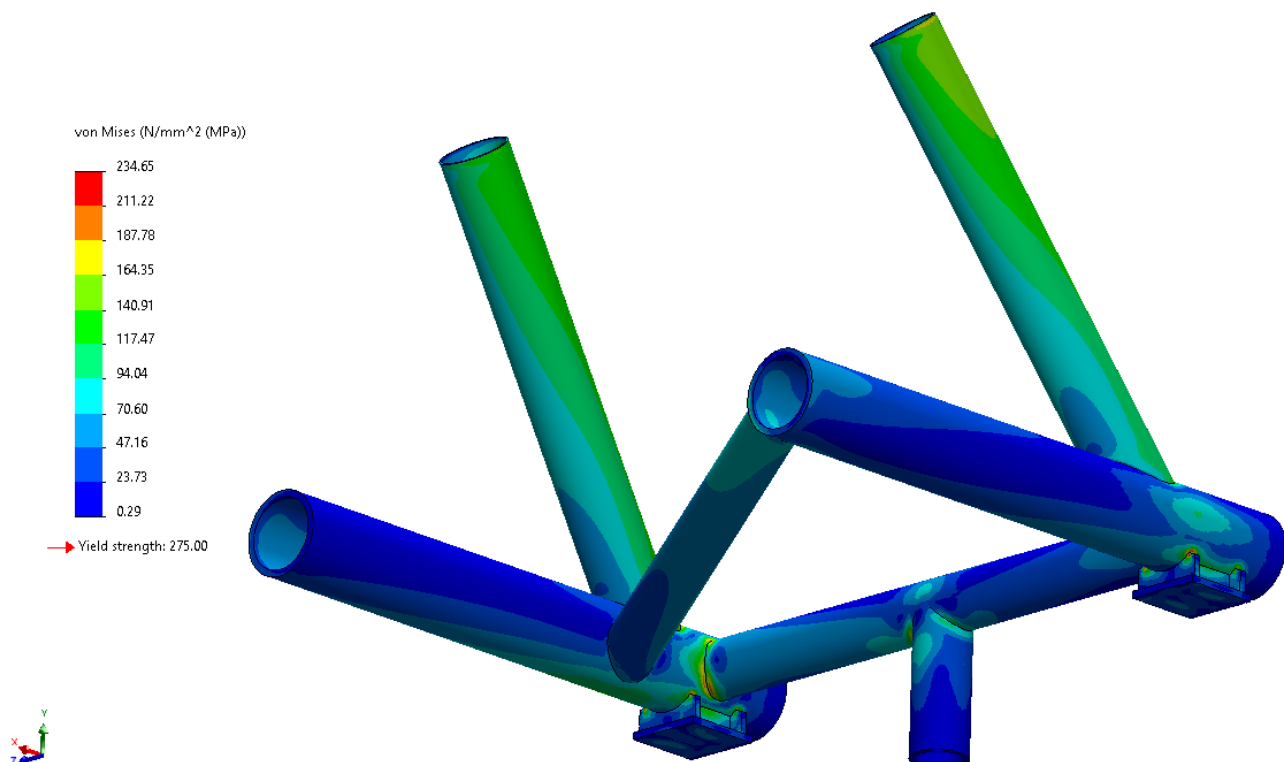







Abbildung 12-6: Spannungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager

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 97 %.

  	Struktur	 
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 94 von 95

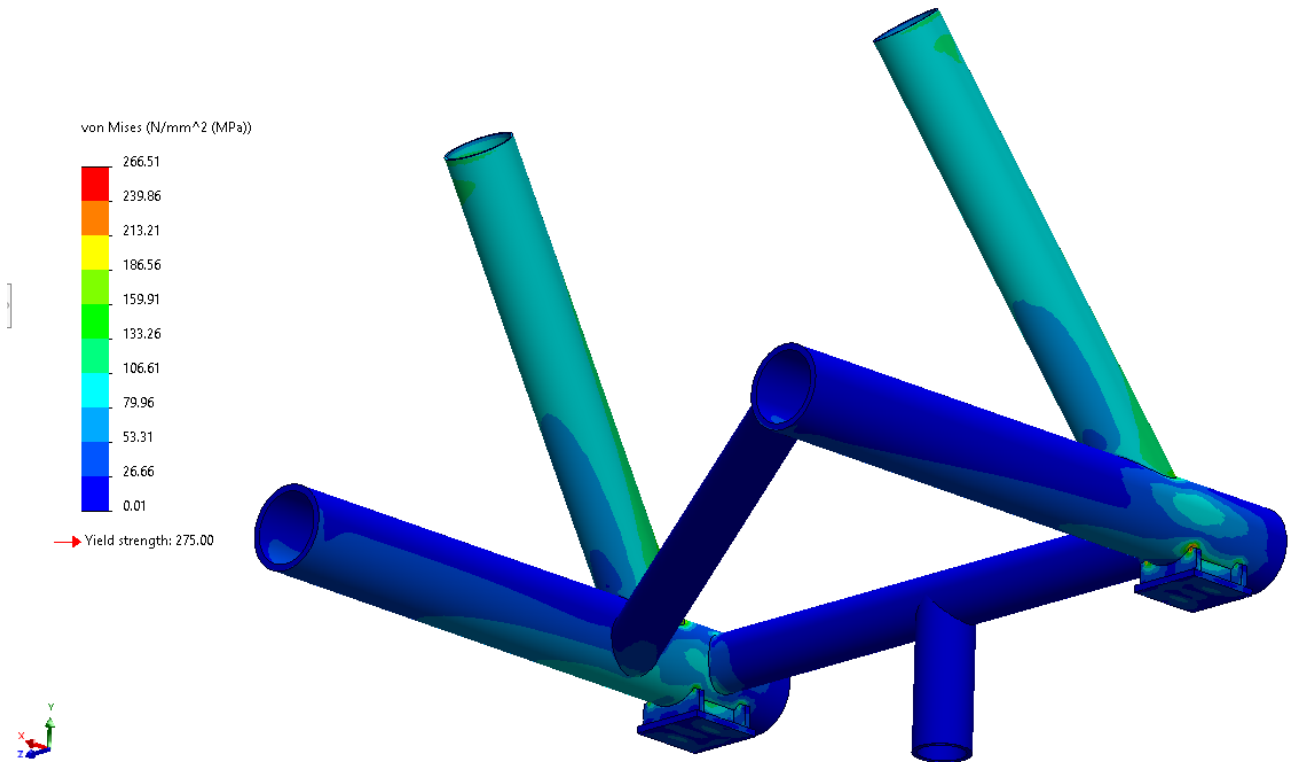






Abbildung 12-7: Spannungsergebnisse nur mit Vertikalkraft - Detailmodell der Brückenlager

12.2.4.2 Verformungen

Die Verformungen am Brückenlager sind in der folgenden Abbildung gezeigt.

  	Struktur	
TES Proj. Nr.: TES-WHV-VGN	Wilhelmshaven FSRU: Statische Berechnung der Brücken	Dok. Nr: TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2029_02
TES Code: TES-WHV-VGN-		Seite 95 von 95

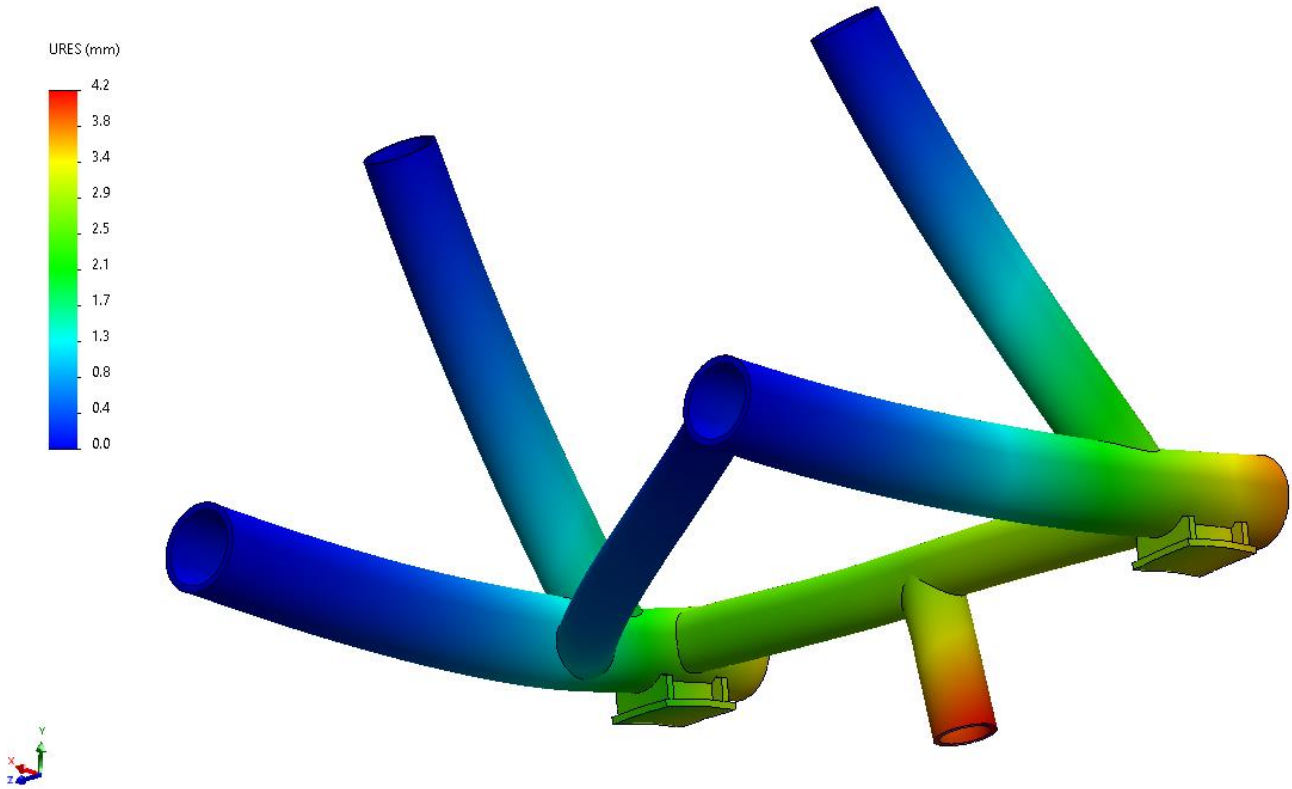


Abbildung 12-8: Verformungsergebnisse - Detailmodell der Brückenlager