Bauherr: Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau

(WSA Kiel-Holtenau)

Schleuseninsel 2

24159 Kiel

B

Stahlwasserbau – Vorstatik Schwimmfender

Bauvorhaben: **Machbarkeitsstudie**
Alte Schleuse Kiel-Holtenau
Kiel

Auftrag: **H13188**

Inhalt: **Statische Berechnung**
Vorstatik
Schwimmfender

Tragwerksplanung: IRS Stahlwasserbau Consulting AG
Max-von-Laue-Str. 12
97080 Würzburg

Bearbeiter:

Lisa-Marie Paulmann

Dipl.-Ing. Timm Sattler
Telefon: 0931 / 35 93 34 - 17
Telefax: 0931 / 35 93 34 – 50

Mail: sattler@irs-stahlwasserbau.de

Revisionsverzeichnis Nr. 0

Zur Statischen Berechnung

Rev. Nr.	Versand-Datum:	Block (Kapitel):	Seiten neu / ergänzt / geändert / Bemerkungen	Aufsteller:
0		1-4	1 - 53	Paulmann / Sattler

1. Inhalt

1. Allgemeines....4
1.1. Vorbemerkung und Allgemeines....4
1.2. Übersicht....6
1.3. Anforderungen....10
1.4. Normen und Vorschriften....11
1.5. Verwendete Rechenprogramme....12
1.6. Material, Festigkeitswerte und Z-Güten....12
2. Querschnitte und System....13
2.1. Allgemeines....13
2.2. Lagerung Modell - Schwimmfender....14
2.3. Statisches System....16
2.4. Aufbau Modell - Schwimmfender....18
2.5. Lagerung Modell - Seitenführung....19
2.6. Aufbau Modell - Seitenführung....25
3. Belastung....26
3.1. Lastfälle und Lastfallkombinationen - Schwimmfender....26
3.2. Lastfälle und Lastfallkombinationen - Seitenführung....36
4. Berechnungsergebnisse....38
4.1. Nachweis der Schwimmtiefe / Freiboard....38
4.2. Nachweis der Schwimmstabilität / Querführung....40
4.2.1. Nachweis der Querführung (Stangenführungen)....40
4.2.2. Spannung der einzelnen Fenderstäbe....41
4.2.3. Verformung der einzelnen Fenderstäbe....43
4.3. Nachweis der Schwimmfender - Stahlkonstruktion....45
4.4. Nachweis der Seitenführung....47
4.5. Nachweis der Drucklager (UHMW-PE Auflager)....53

1. Allgemeines

1.1. Vorbemerkung und Allgemeines

Die Seitenwände der Alten Schleuse Kiel-Holtenau sind mit begehbaren Schwimmfendern auszustatten.

Als Hauptanforderungen für die Machbarkeitsuntersuchungen wurde die Aufnahme der Belastungen von Schiffen der Verkehrsgruppe VG4, die Begehbarkeit und Nutzung (Festmachen der Sportboote) der Schwimmfender durch die Sportschifffahrt, sowie eine robuste, schwimmstabile und dauerhafte Ausführung der Schwimmfender gestellt.

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchungen wurde eine Schwimmfenderkonstruktion entwickelt, bei welcher einzelne Fenderelemente aus Baustahl mit einer Länge von ca. 10,00m und einer Breite von ca. 1,20m zu einem zusammenhängenden Fenderelement gekoppelt werden. Die Fenderelemente bestehen aus einer ausgesteiften, rechteckigen, geschlossenen Kastenkonstruktion, welche aus Gründen der Leckstabilität mehrzellig ausgeführt wird.

Zur Erleichterung der Zugänglichkeit der Gitterlaufflächen durch die Sportschifffahrt wird ein Freibord zur Lauffläche von >= 0,4m realisiert. Um ein sicheres Begehen der Schwimmfender zu ermöglichen, ist eine Aufständerung (Wasserablauf) der Gitterlaufflächen vorgesehen. Zudem wird die Konstruktion mit Geländern und entsprechenden Rettungsmitteln ausgestattet.
Für die Gewährleistung der Schwimm- und Lagestabilität (Sogkräfte durch Schiffe) werden die Schwimmfender durch eine am Massivbau demontierbar angebrachte Querführung (Stangenführung) gehalten. Die Abtragung von Schiffsreibung erfolgt durch eine entsprechende Seitenführung (Schubknaggen) am Massivbau. Belastungen aus dem Schiffsdruck werden über an der Rückwand der Schwimmfenderkonstruktion vertikal angeordnete Drucklager (Kunststoffkufen) an den Massivbau abgetragen.

Die Fenderstangen sind im oberen Bereich gegen Aufschwimmen gesichert. Sie können jederzeit demontiert werden. Die ovale Öffnung am Steg, die für die Führung der Fenderstangen vorgesehen ist, hat einen gewissen Spielraum, um eine Belastung der Fenderstangen aus dem Schiffsdruck zu vermeiden.

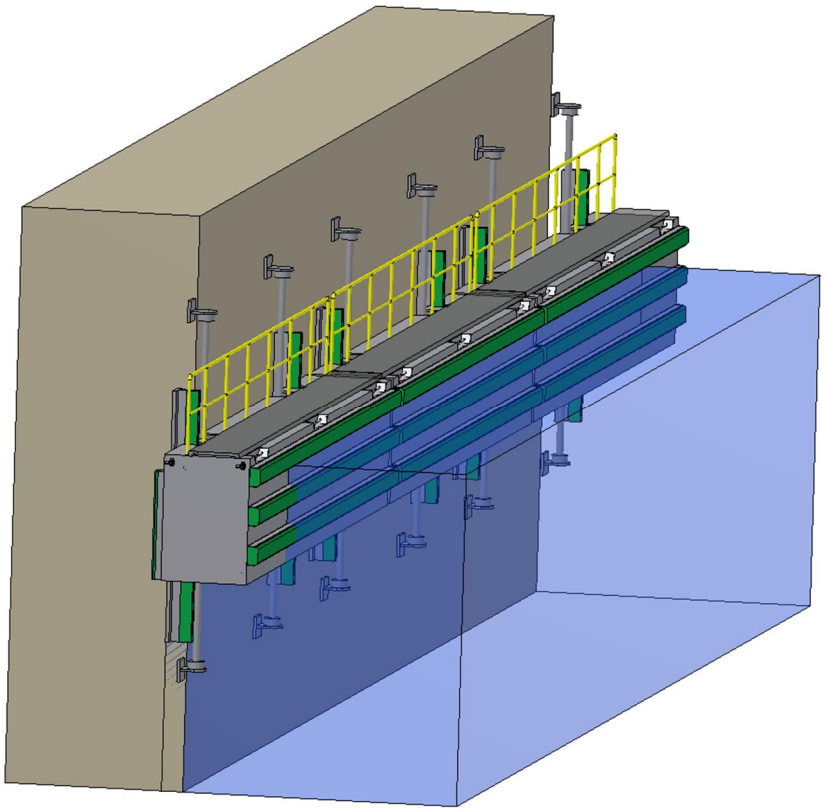


Abbildung 1: Schwimmfender

1.2. Übersicht

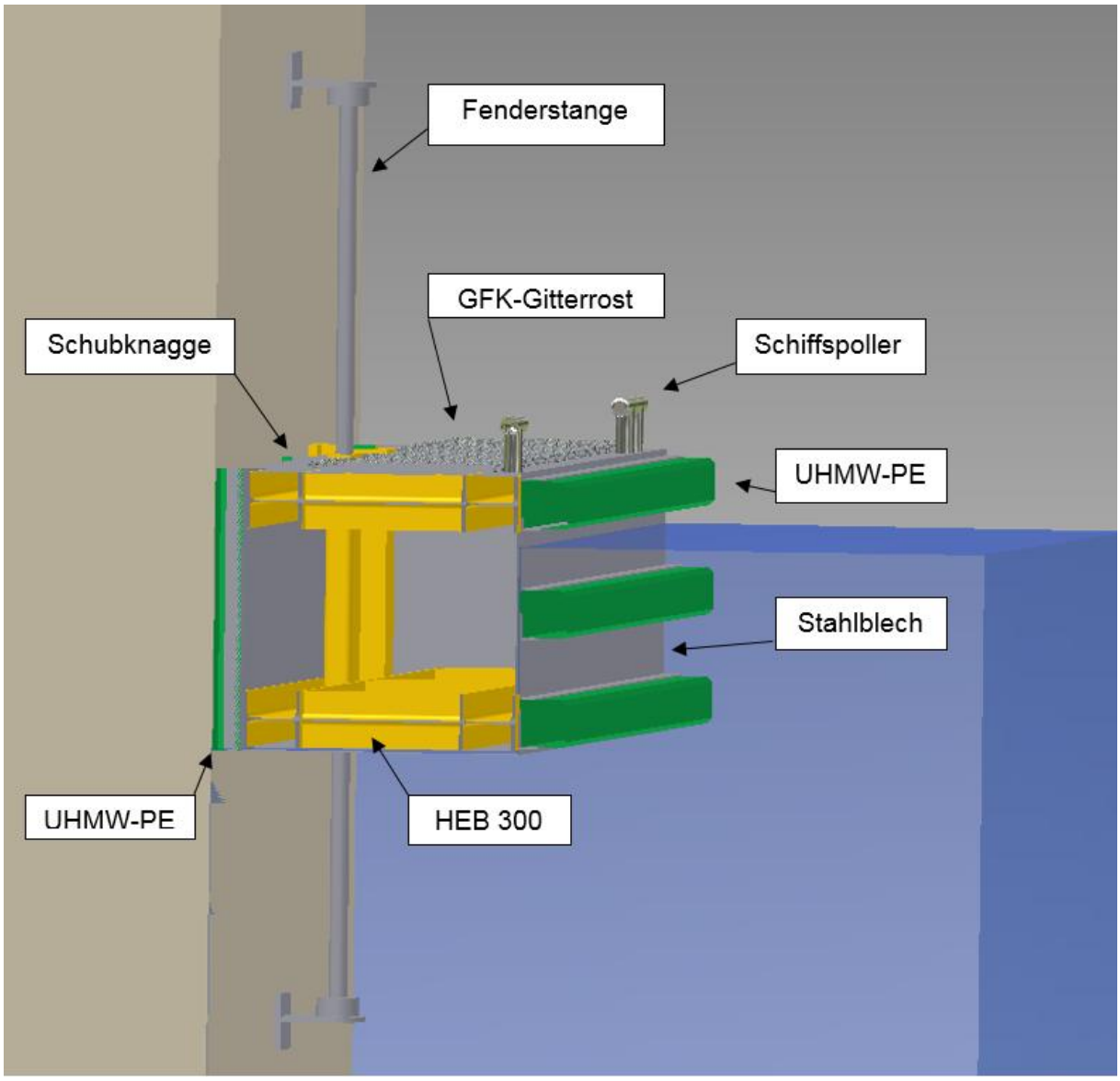


Abbildung 2: Gesamtübersicht Fendersteg

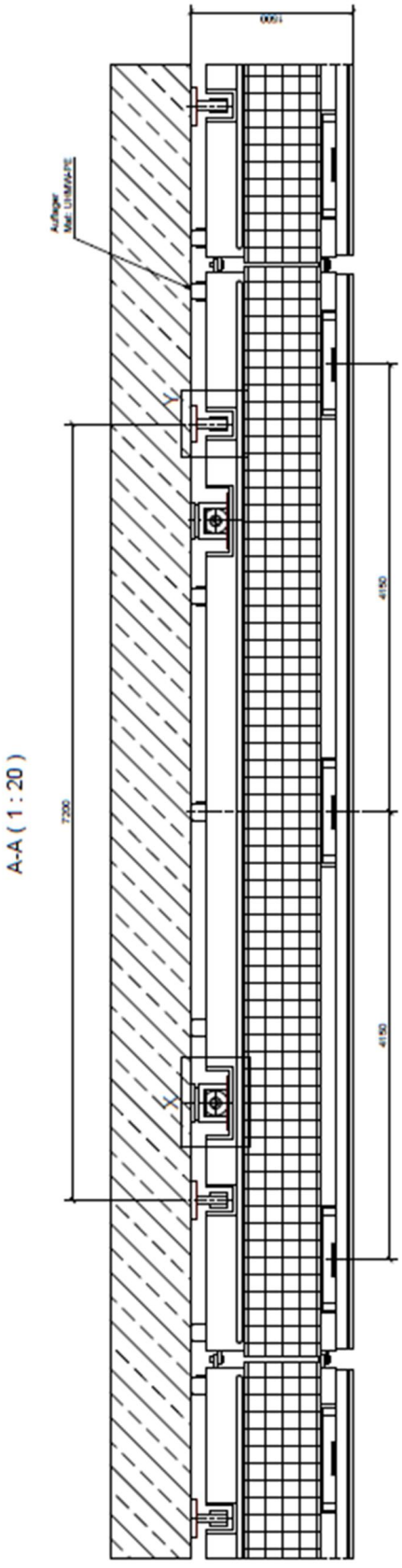


Abbildung 3: Draufsicht Fendersteg

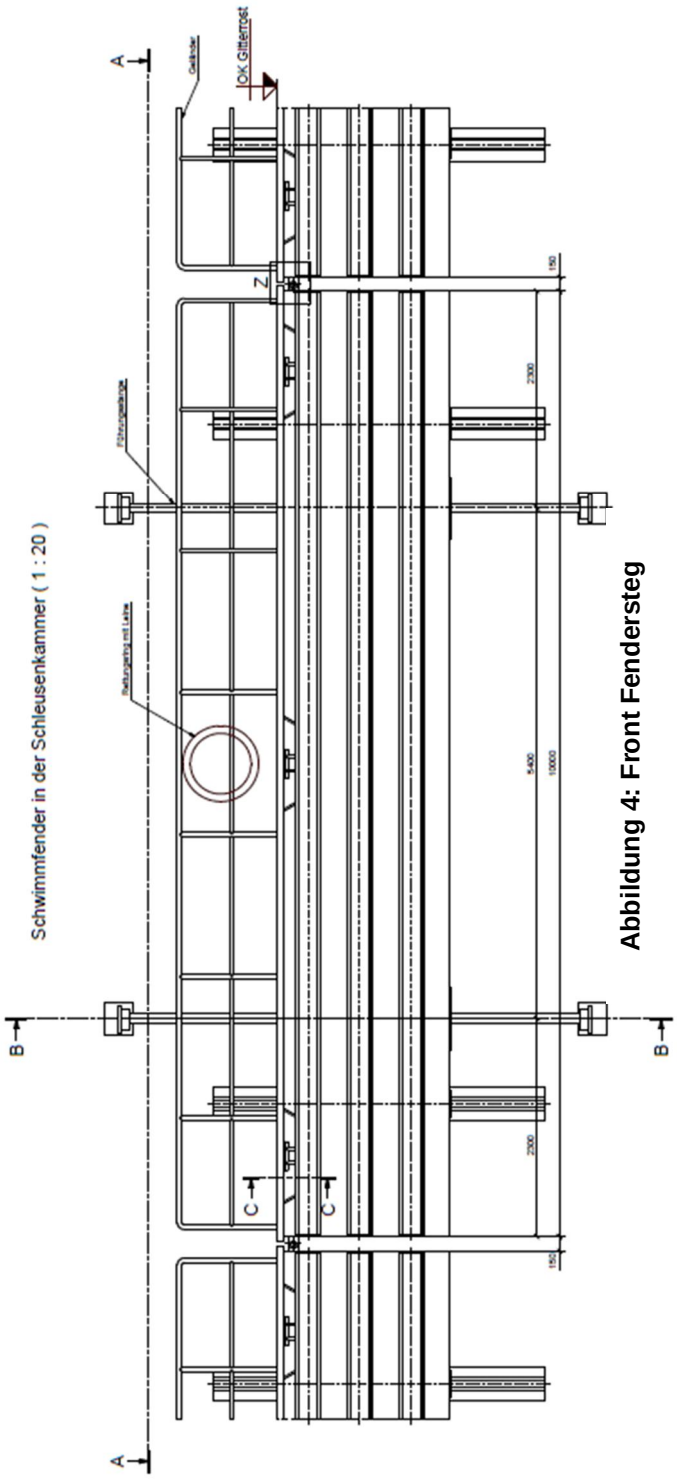


Abbildung 4: Front Fendersteg

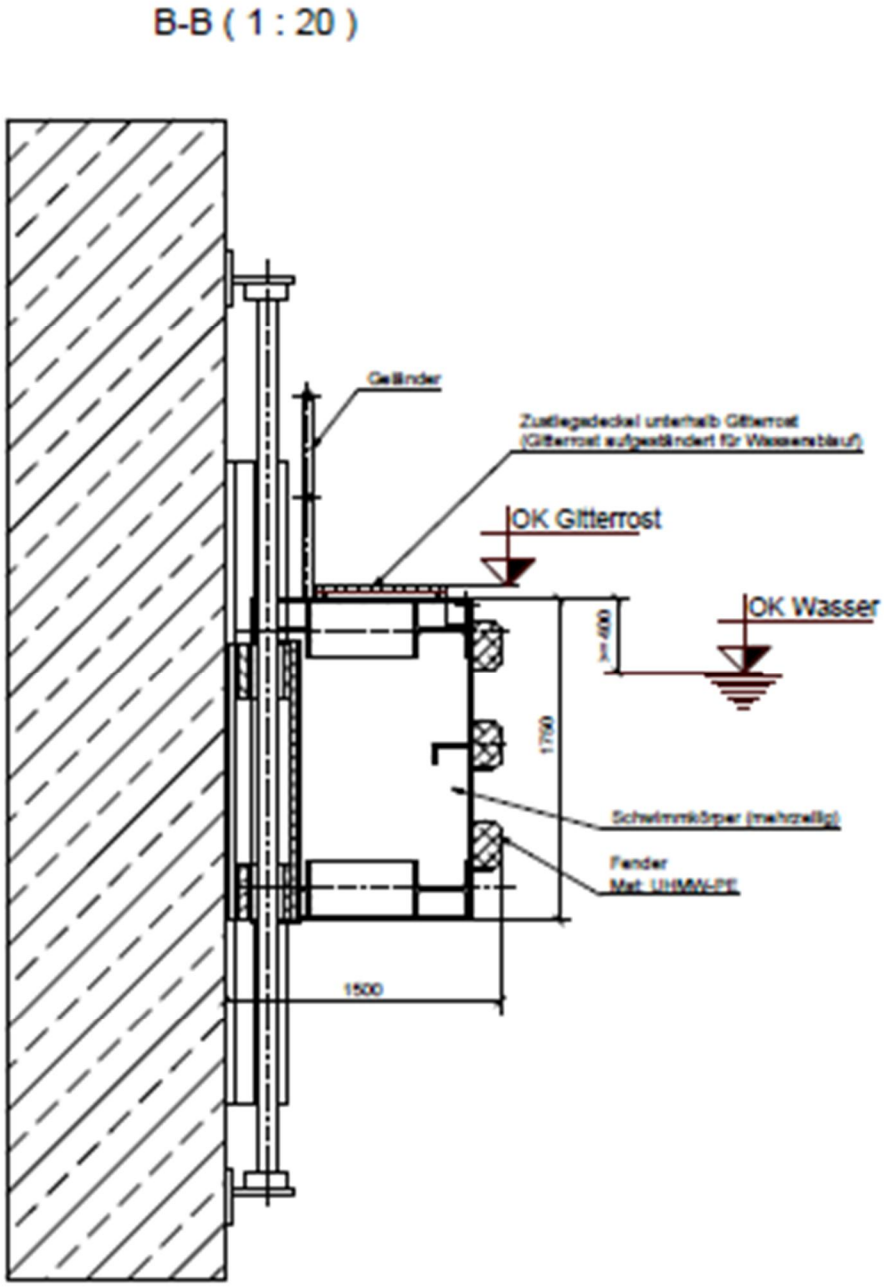


Abbildung 5: Schnitt Fendersteg

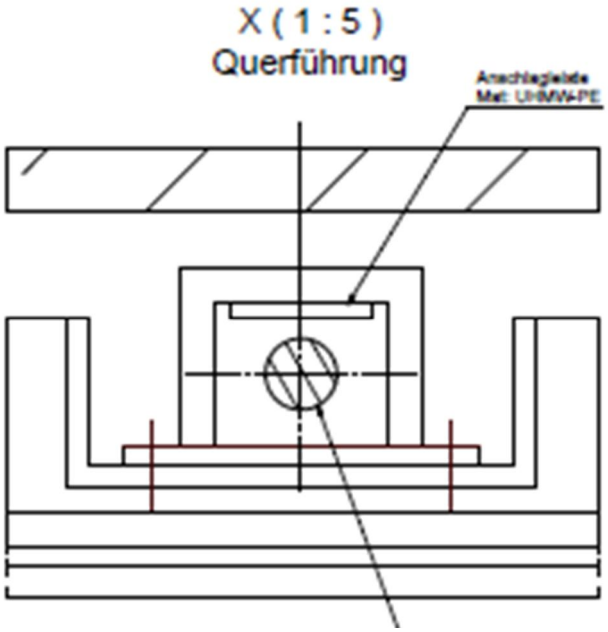


Abbildung 6: Detail Querführung

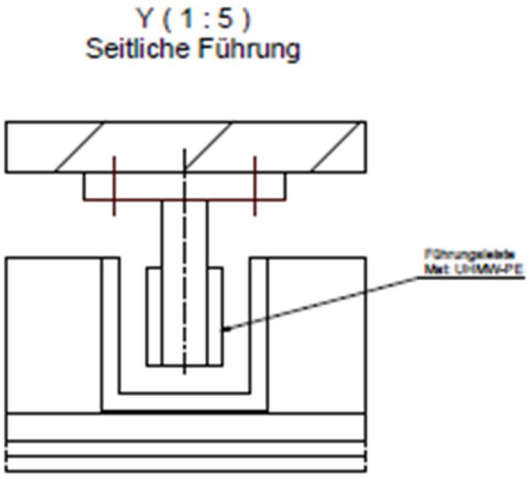


Abbildung 7: Detail Seitenführung

1.3. Anforderungen

Die Anforderungen an den Schwimmfender beinhalten:

- einheitliche Beläge, vorzugsweise GFK-Gitter, mit einer Rostbreite von ca. 60cm für ein sicheres Begehen

- Begrenzung der Krängung des Fenders bei ungünstiger Lastverteilung
  → hierfür sind Fenderstangen vorgesehen

- Mindesthöhe des Freibords ≥ 40cm erforderlich
  → Aufständerung der Gitterroste

- Schäden an den Schiffen und Bauwerk, sowie Beschädigung von höher liegenden Aufbauten an den Fendern durch Hinterhaken der Großschiffahrtsleinen beim Festmachvorgang müssen vermieden werden.

- Möglichkeiten zum temporären Festhalten bzw. zum Festmachen der Sportboote sind zu schaffen
  →hierfür sind entsprechende Klampen vorgesehen

1.4. Normen und Vorschriften

[1] DIN EN 1990:2010-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010

[2] DIN EN 1990/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung

[3] DIN EN 1990/NA/A1:2011-07, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1

[4] DIN EN 1991-1-1:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009

[5] DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau

[6] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009

[7] DIN EN 1993-1-5:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009

[8] DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile

[9] DIN EN 1993-1-7:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung; Deutsche Fassung EN 1993-1-7:2007 + AC:2009

[10] DIN EN 1993-1-7/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung

[11] DIN EN 1993-1-9:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009

[12] DIN EN 1090-1:2010-07, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile

[13] DIN EN 10025-2:2005-04, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle

1.5. Verwendete Rechenprogramme

[P1] RFEM 5.04 der Ing.-Software Dlubal GmbH

[P2] MathCAD 14

[P3] Excel 2013

1.6. Material, Festigkeitswerte und Z-Güten

Für die Stahlkonstruktion werden folgende Materialien und Beanspruchbarkeiten nach DIN EN 10025-2 [N14], DIN EN 10025-3 [N15] bzw. E DIN 19704 [N1] angesetzt.

Tabelle 1: Festigkeitswerte S355 (Stahlkonstruktion Schwimmfender und Seitenführung)

Blechdicke	Streckgrenze	Stahlbauteil mit $\gamma_M = 1,1$	Maschinenteile mit $\gamma_M = 1,5$
[mm]	[N/mm²]		
≤ 3	355	323	237
≤ 16	355	323	237
≤ 40	345	314	230
≤ 63	335	305	223
≤ 80	325	295	217
≤ 100	315	286	210
≤ 150	295	268	197
≤ 200	285	259	190
≤ 250	275	250	183

Abbildung 8: Material- und Festigkeitskennwerte

Tabelle 2: Festigkeitswerte S235 (Querführung - Fenderstange)

Blechdicke	Streckgrenze	Stahlbauteil mit $\gamma_M = 1,1$	Maschinenteile mit $\gamma_M = 1,5$
[mm]	[N/mm²]		
≤ 3	235	214	157
≤ 16	235	214	157
≤ 40	225	205	150
≤ 63	215	195	143
≤ 80	215	195	143
≤ 100	215	195	143
≤ 150	195	177	130
≤ 200	185	168	123
≤ 250	175	159	117

Abbildung 9: Material- und Festigkeitskennwerte

2. Querschnitte und System

2.1. Allgemeines

Der geplante Steg, sowie die zugehörigen Führungen werden jeweils als räumliches FE-Flächentragwerk modelliert. Die Stahlkonstruktion des Schwimmfenders, die Querführung (Fenderstange) und die Seitenführung werden jeweils getrennt betrachtet.

2.2. Lagerung Modell - Schwimmfender

Die Freiheitsgrade der Lager des Schwimmfenders können aus folgender Tabelle entnommen werden.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Lagerart:
1	o	x	x	o	o	o	-	Linienlager
2	x	o	x	o	o	o	-	Linienlager

Legende:

o = frei

x = fest

Das **Linienlager Nr. 1** (in Abbildung 10 - rot markiert) dient der Festhaltung in Y- und in Z-Richtung. Hierbei handelt es sich um die Schubknagge, die Schiffsreibung abtragen soll.

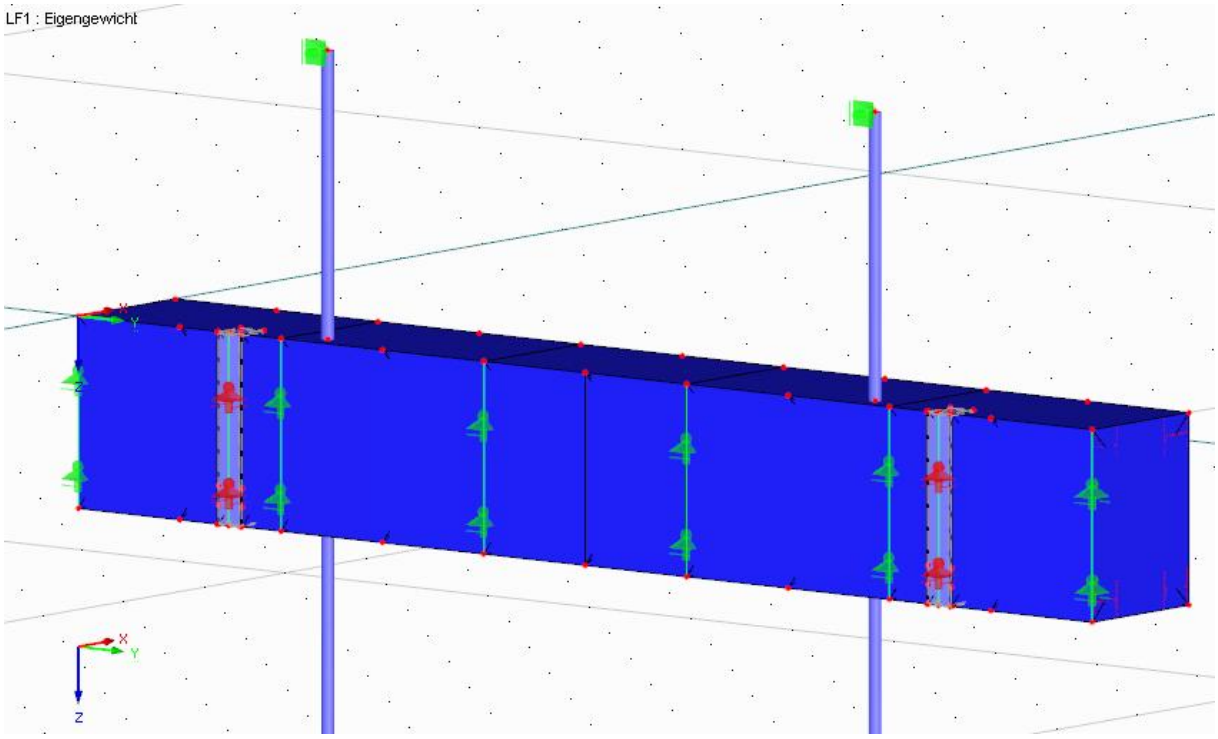


Abbildung 10: Linienlager Nr.1

Das **Linienlager Nr. 2** (in Abbildung 11 - rot markiert) dient der Festhaltung in X- und in Z-Richtung. Hierbei handelt es ich um die UHMW-PE Profile, die den Schiffsdruck abtragen sollen.

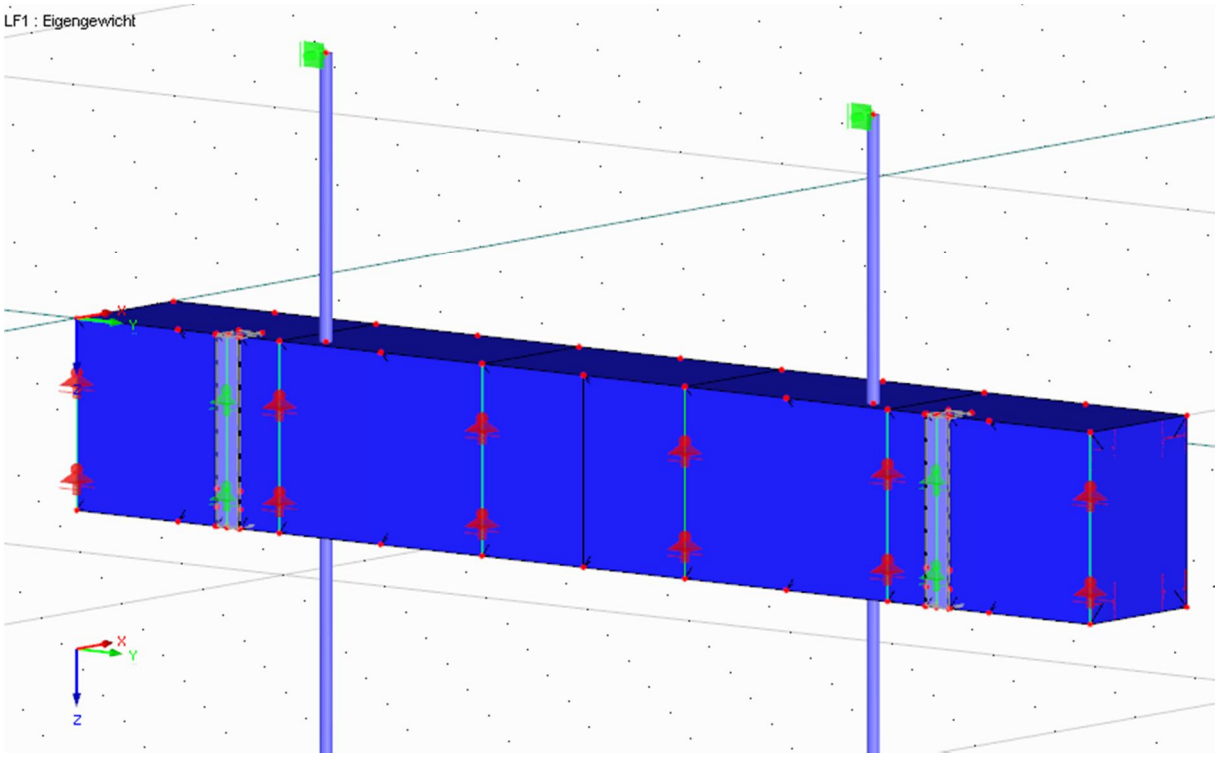


Abbildung 11: Linienlager Nr.2

Die Freiheitsgrade der Lager der Querführung (Fenderstangen) können aus folgender Tabelle entnommen werden.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Lagerart:
1	x	x	o	o	o	x	-	Knotenlager
2	x	x	x	x	x	x	-	Knotenlager

Legende:

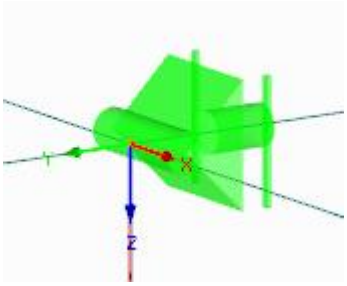
O = frei

X = fest

Siehe auch 4.2 Nachweis der Schwimmstabilität.

Hier wird im Detail auf die Auflagerung der Fenderstäbe eingegangen.

2.3. Lagerung Fenderstäbe



Definition Oben = Im Koordinatenursprung

Auflager oben = Nach oben (in Z-Richtung) verschieblich, alle anderen Richtungen fest

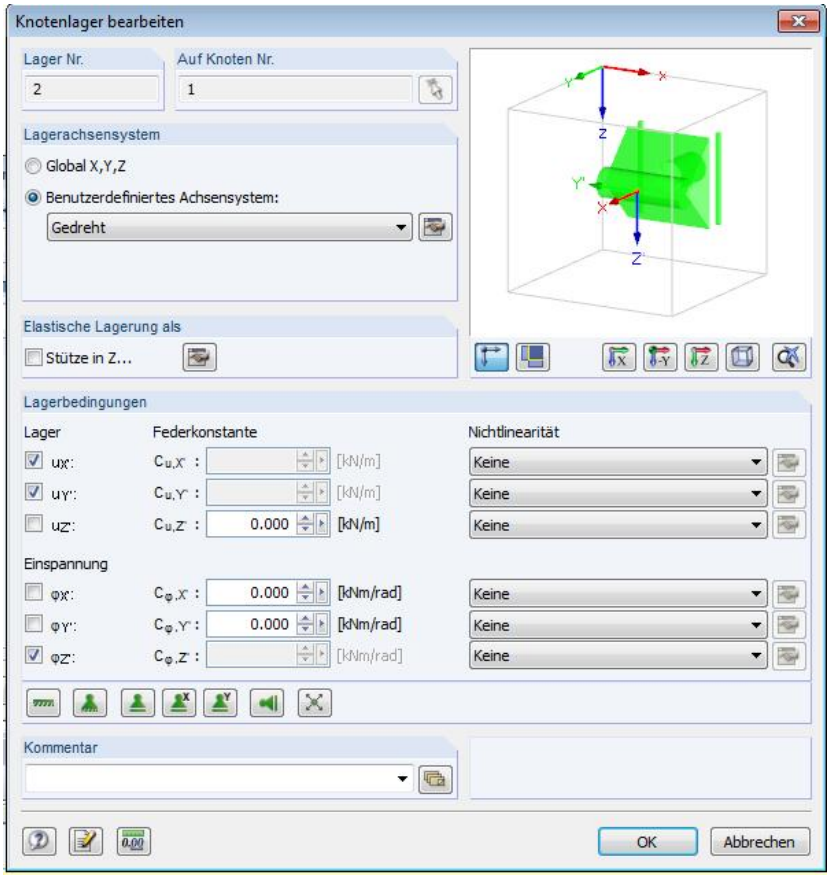
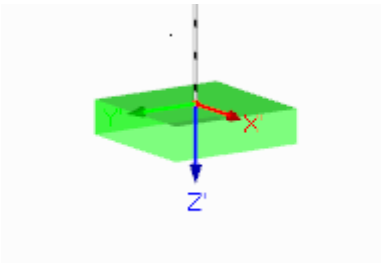


Abbildung 12: Knotenlager Nr.1

Definition Unten = Vom Ursprung + 6,00m in Z-Richtung



Auflager unten = In alle Richtungen fest, durch die Halterung „eingespannt“

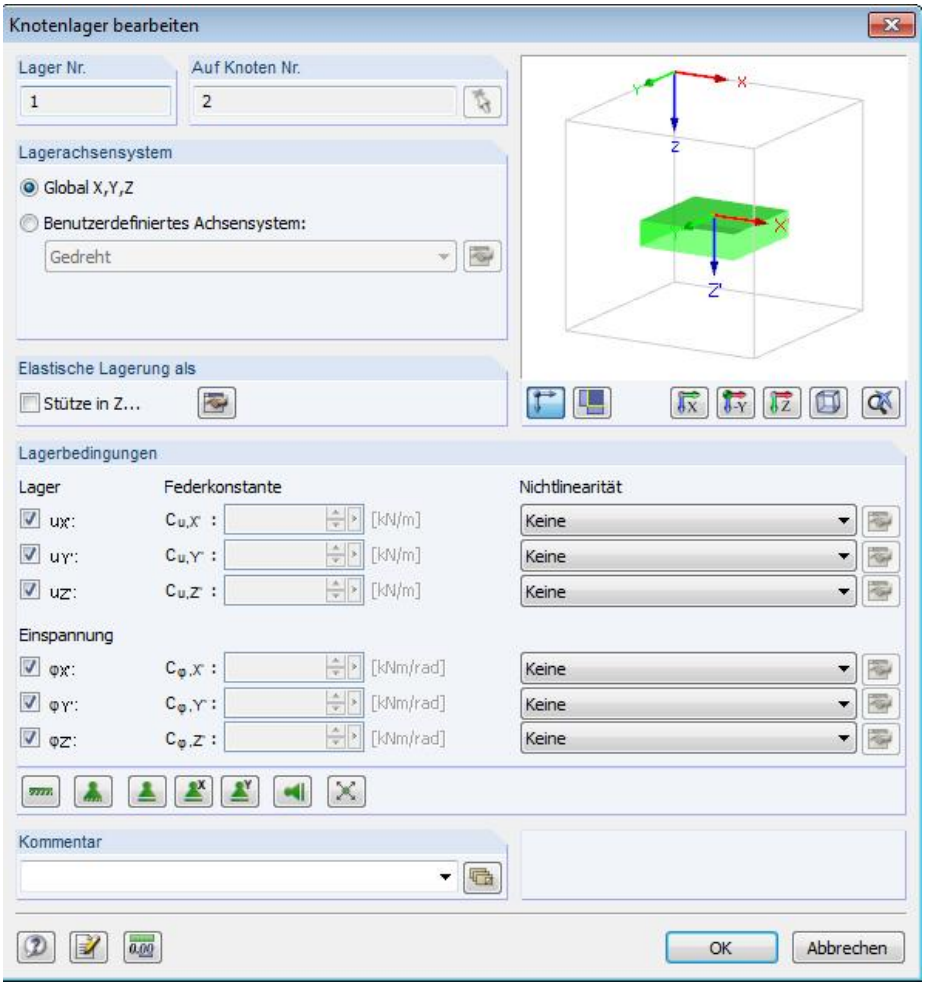


Abbildung 13: Knotenlager Nr. 2

2.4. Aufbau Modell - Schwimmfender

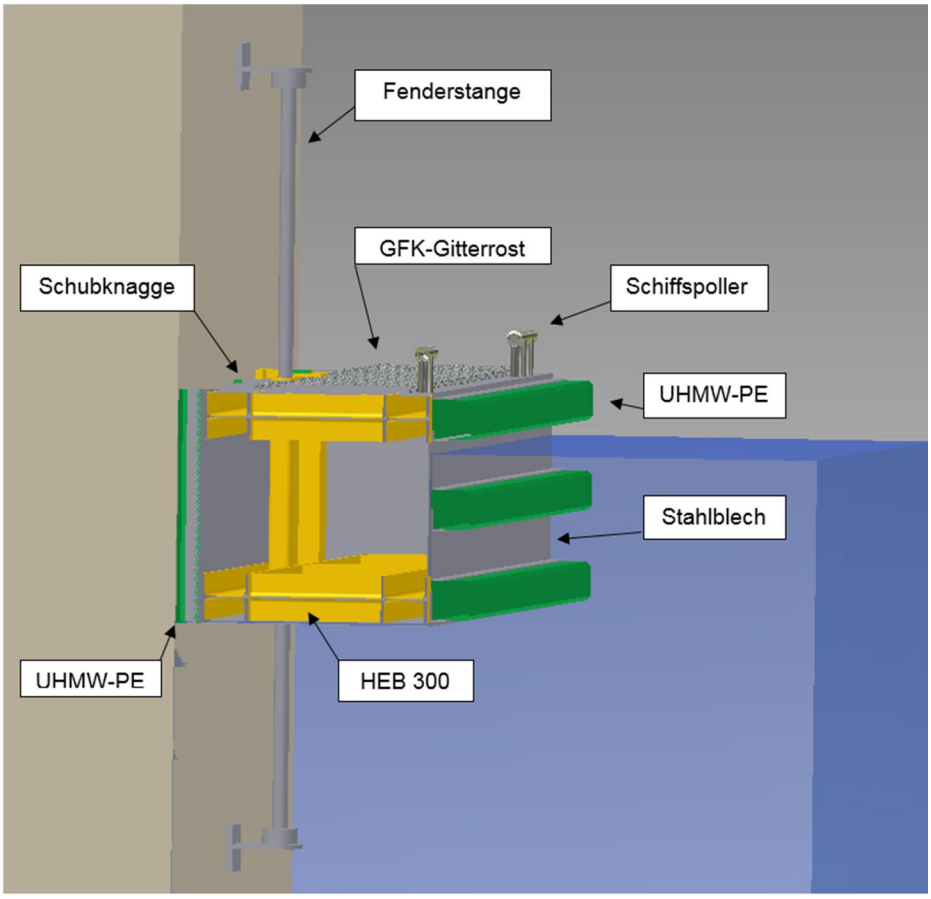


Abbildung 14: Aufbau des Modells

Maße des Schwimmfenders:	Breite:	1,20m
	Höhe:	1,75m
	Länge:	10,00m
Einzelne Dicken:	Stahl: S355	
	Blech Stahlkonstruktion	12mm
	Blech End- und Zwischenschotte	12mm
	I-Profil:	HEB 300
Fenderstange:	Stahl: S235	
	Ø: 100mm;	Länge: 6,00m

2.5. Lagerung Modell - Seitenführung

Die Freiheitsgrade der Lager der Schubknagge können aus folgender Tabelle entnommen werden. Hierbei handelt es sich um globale Lager.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Lagerart:
1	o	x	o	o	o	o	Lagerkraft positiv	Linienlager
2	o	x	o	o	o	o	Lagerkraft negativ	Linienlager
3	o	o	x	o	o	o	-	Linienlager

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z		Vxz	Vyz	Ausfall falls:	Lagerart:
1	o	o	x		x	x	Kontaktspannungen in z negativ	Flächenlager
2	o	o	x		x	x	-	Flächenlager

Legende:

o = frei

x = fest

Das **Linienlager Nr. 1** (in Abbildung 27 - rot markiert) dient der Festhaltung in Y—Richtung und fällt bei einer positiven Lagerkraft aus. Hierbei handelt es sich um die rechte Schubknagge des Einbauteils. Sie soll die ankommende Last in negativer Richtung abtragen.

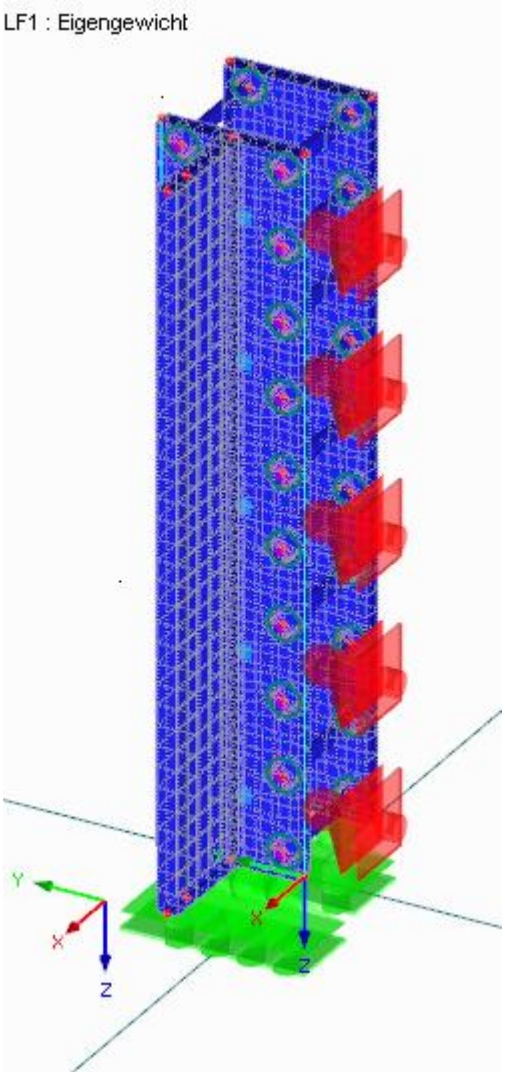


Abbildung 15: Linienlager Nr. 1

Das **Linienlager Nr. 2** (in Abbildung 28 - rot markiert) dient der Festhaltung in Y—Richtung und fällt bei einer negativen Lagerkraft aus. Hierbei handelt es sich um die linke Schubknagge des Einbauteils. Sie soll die ankommende Last in positiver Richtung abtragen.

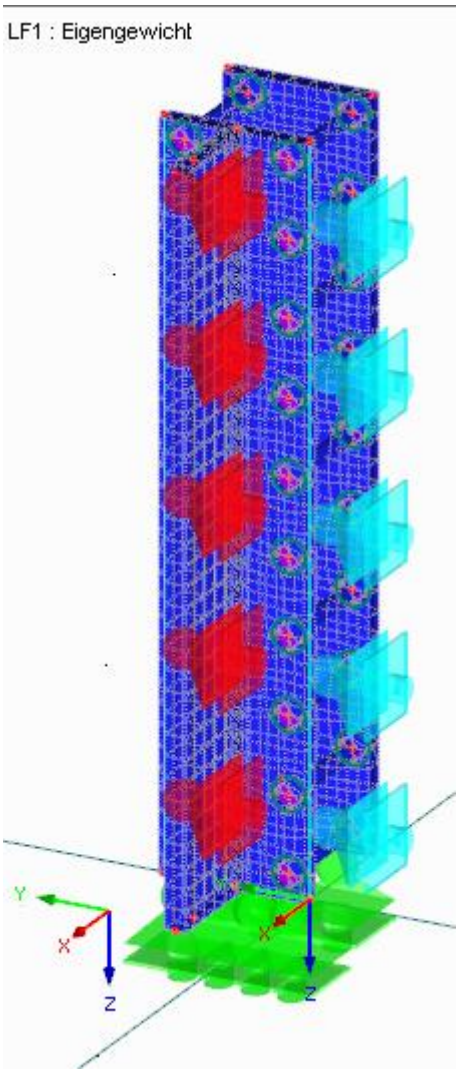


Abbildung 16: Linienlager Nr. 2

Das **Linienlager Nr. 3** (in Abbildung 29 - rot markiert) dient der Festhaltung in Z—Richtung. Hierbei handelt es sich um ein numerisches Lager.

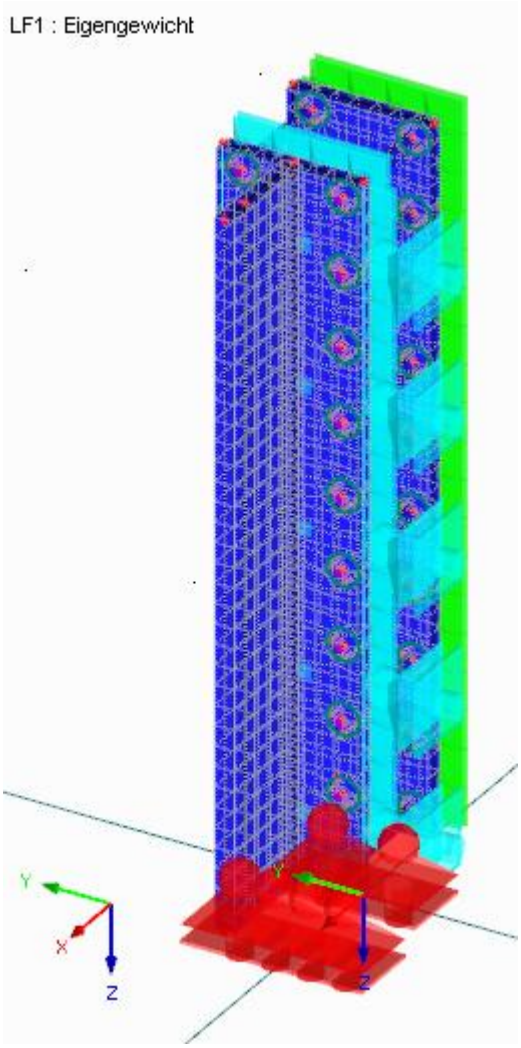


Abbildung 17: Linienlager Nr. 3

Das **Flächenlager Nr. 1** (in Abbildung 30 - rot markiert) dient der Festhaltung in Z-Richtung, des Schubs in V_{xz}- und V_{yz}-Richtung und fällt bei Kontaktspannungen in negativer Richtung aus. Hierbei handelt es sich um die Verankerung im Massivbau mit einem Stahlblech. Sie soll die ankommende Last in positiver Richtung abtragen.

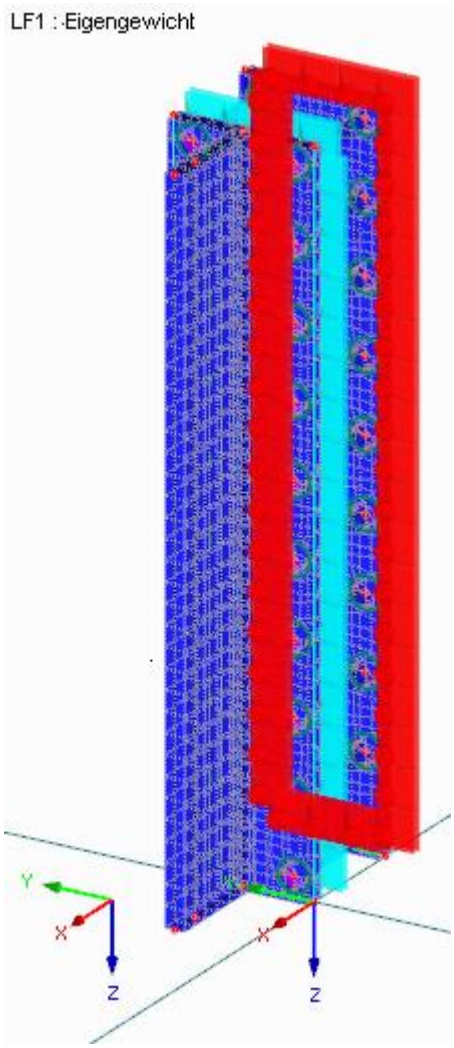


Abbildung 18: Flächenlager Nr. 1

Das **Flächenlager Nr. 2** (in Abbildung 31 - rot markiert) dient der Festhaltung in Z-Richtung, des Schubs in V_{xz}- und V_{yz}-Richtung. Hierbei handelt es sich um die Verankerung im Massivbau mit einem Stahlblech. Sie soll die ankommende Last in positiver und negativer Richtung abtragen.

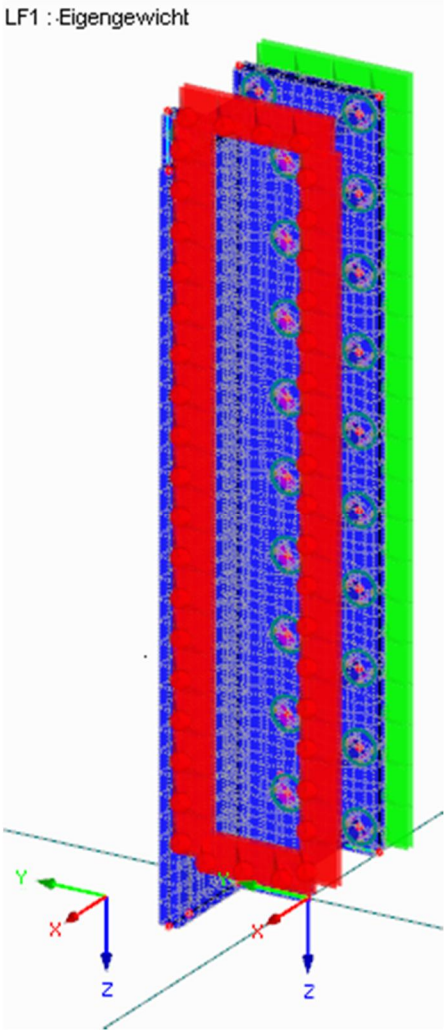


Abbildung 19: Flächenlager Nr. 2

2.6. Aufbau Modell - Seitenführung

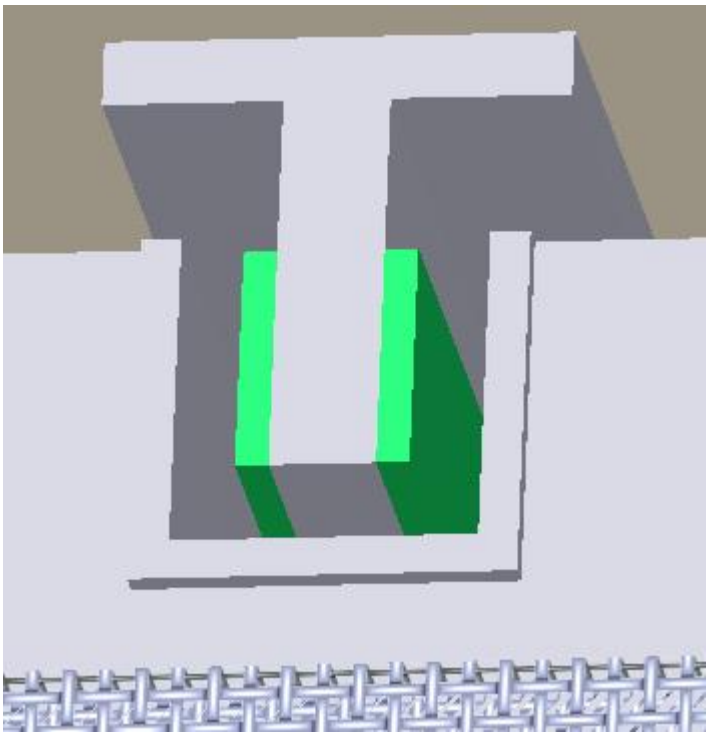


Abbildung 20: Schubknagge

Maße der Schubknagge:	Breite:	0,25m
	Höhe:	1,75 m
	Länge:	0,29m
Einzelne Dicken:	Stahl:	S 355
	Dicke t =	50 mm

3. Belastung

3.1. Lastfälle und Lastfallkombinationen - Schwimmfender

Die Lastfälle wurden alle mit dem Programm RFEM 5.04, nach DIN 19 704-1: 2014, berechnet.

Lastfall 1 – Eigengewicht

Anhaftendes Wasser, anhaftendes Eis, Bewuchs, sowie Verschmutzung sind mit einem Zuschlag von 10% des Eigengewichtes zu berücksichtigen.
Das spezifische Gewicht von Stahl ist 78,5 kN/m^3.

Das Eigengewicht beträgt 14,05 t.

Lastfall 2 – Zwei Personen an der Kante des Fenders

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Last.

Last pro Person: 1,00 kN

Last insgesamt: 1,00 kN * 2,00 = 2,00 kN

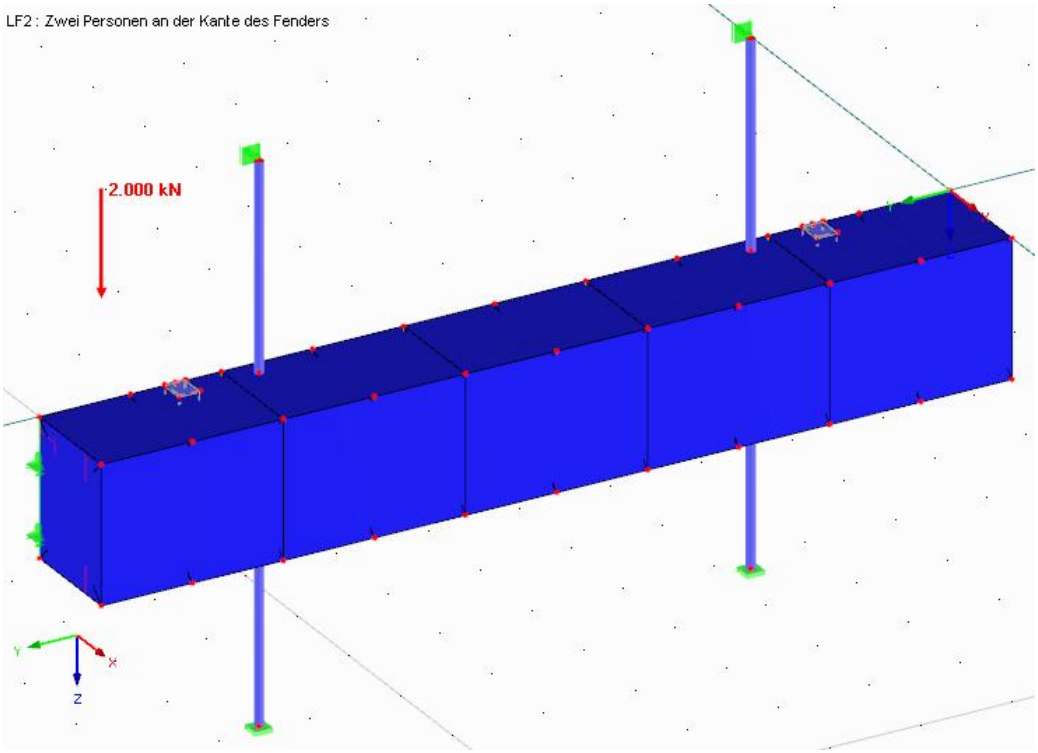


Abbildung 21: LF2 – Zwei Personen an der Kante des Fenders

Lastfall 3 – Zwei Personen stehen in der Mitte des Fenders getrennt

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

Last pro Person: 1,00 kN

Last insgesamt: 1,00 kN * 2,00 = 2,00 kN

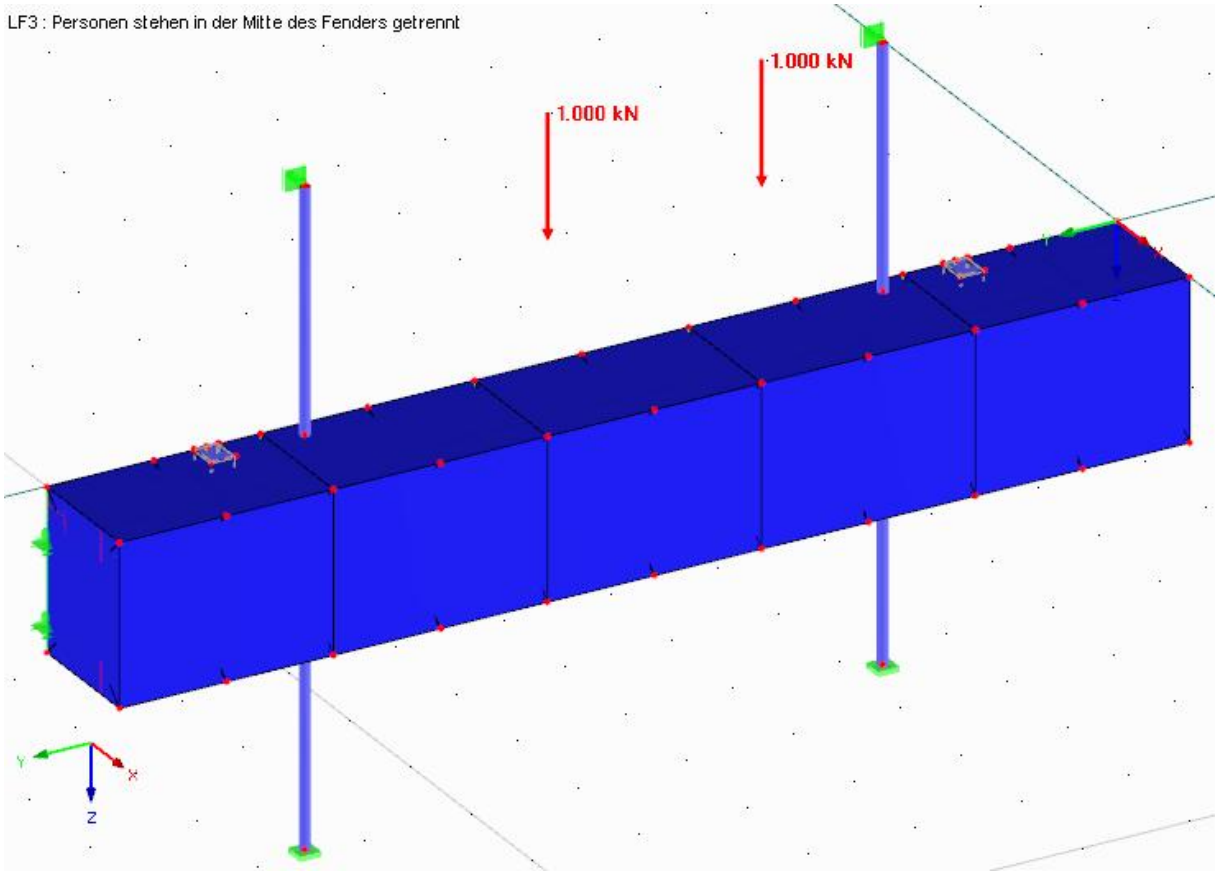


Abbildung 22: LF3 – Zwei Personen stehen in der Mitte des Fenders getrennt

Lastfall 4 – Schiffsdruck

Bei diesem Lastfall wurde angenommen, dass ein Schiff mit 10% seiner Masse lotrecht auf den Fendersteg wirkt. Hierbei wird angenommen, dass ein Schiff niemals mit seiner ganzen Massen auf den Fender wirken kann, da es nicht genügend Fläche hat um sich quer zur Fahrtrichtung zu stellen. Deshalb wurden hier 10% der Gesamtmasse von 13.000,00t (VG4) angenommen, die lotrecht auf den Fender über eine Länge von 10m wirken.

Ermittlung der Last ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeit			
F max	13.000,00	[t]	
	130.000,00	[kN]	
F 10%	1.300,00	[t]	
	13.000,00	[kN]	lotrecht
F Streckenlast	1.300,00	[kN/m]	
F Strecke, halbe	650,00	[kN/m]	

Abbildung 23: Ermittlung der Lasten lotrecht

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

Lasten: 650,00 kN/m
Länge: 10,00m
Ebenen: 2,00

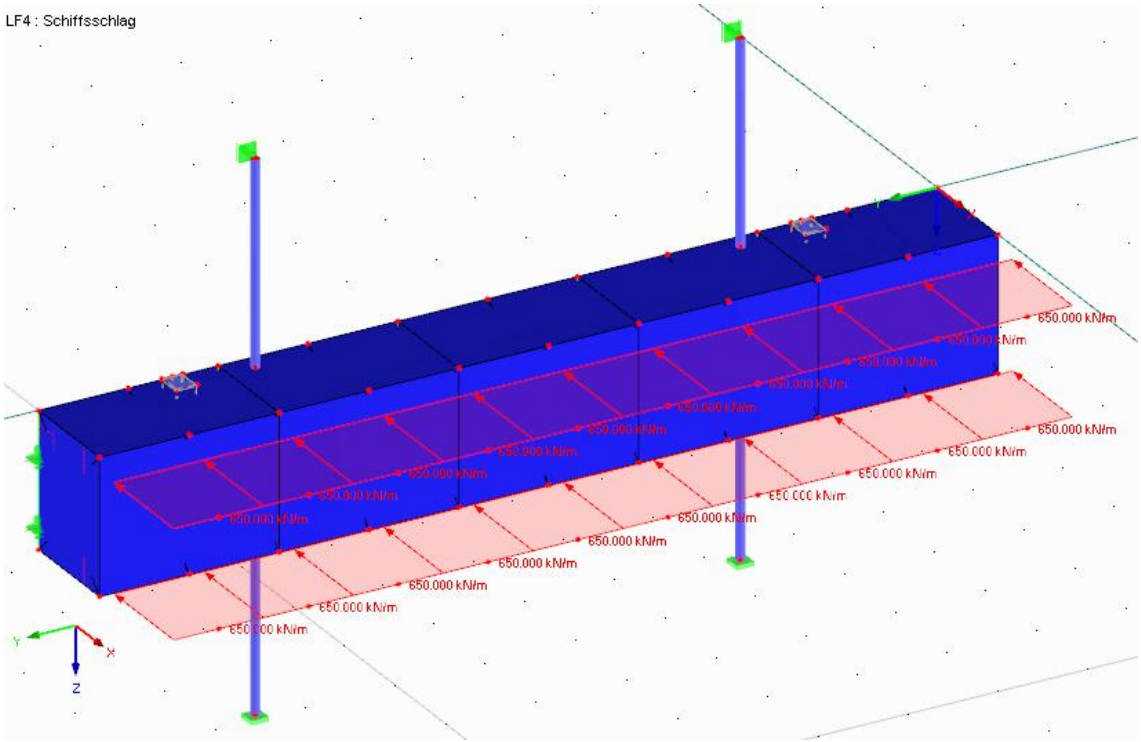


Abbildung 24: LF4 – Schiffsdruck

Lastfall 5 – Schiffsreibung

Bei diesem Lastfall wurde angenommen, dass ein Schiff mit 10% seiner Masse und einem Reibbeiwert von μ=0,35 in Fahrtrichtung auf den Fendersteg wirkt.

$$F_{Streckenlast,waagerecht}\,[kN/m] = \frac{F_{Streckenlast,lotrecht}\,[kN/m] * \mu_{Reibbeiwert}\,[-]}{L_{Länge\ des\ Fenders}\,[m]}$$

Um die Last gleichmäßig zu verteilen, wird sie auf die Ebenen aufgeteilt.

$$F_{Streckenlast,waagerecht-halbe}[kN/m] = \frac{F_{Streckenlast,waagerecht}\,[kN/m]}{Anzahl\ der\ Ebenen\,[-]}$$

Ermittlung der Last ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeit			
F Streckenlast	45,50	[kN/m]	waagerecht
F Strecke, halbe	22,75	[kN/m]	

Abbildung 16: Ermittlung der Lasten waagerecht

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

Lasten: 22,75 kN/m
Länge: 10,00m
Ebenen: 2,00

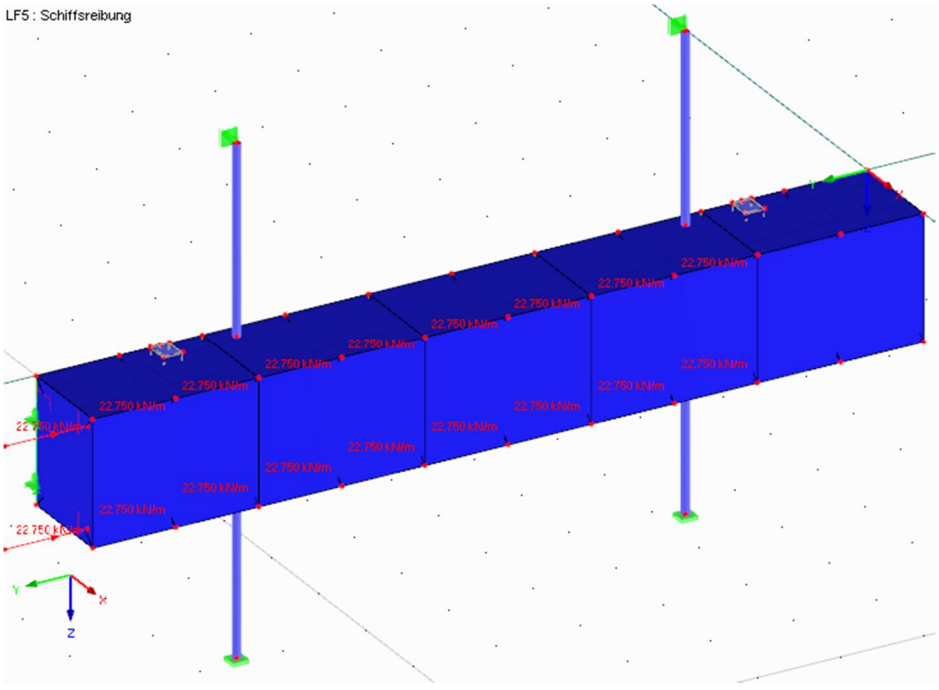


Abbildung 25: LF5 – Schiffsreibung

Lastfall 6 – Belastung der Stahlkonstruktion aus dem Wasserdruck

Als vereinfachte Annahme wird die Stahlkonstruktion des Schwimmfenders über die komplette Bauhöhe von 1,75m mit dem Wasserdruck beaufschlagt. Hierfür wurde ein separates FE-Modell erstellt.

Lasten: 17,5 kN/m^2
Länge: 10,00m
Höhe: 1,75m

Die Freiheitsgrade der Lager des Fenders kann aus folgender Tabelle entnommen werden.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Lagerart:
1	o	o	x	o	o	o	-	Knotenlager
2	o	x	x	o	o	o	-	Linienlager
3	x	o	x	o	o	o	-	Linienlager

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

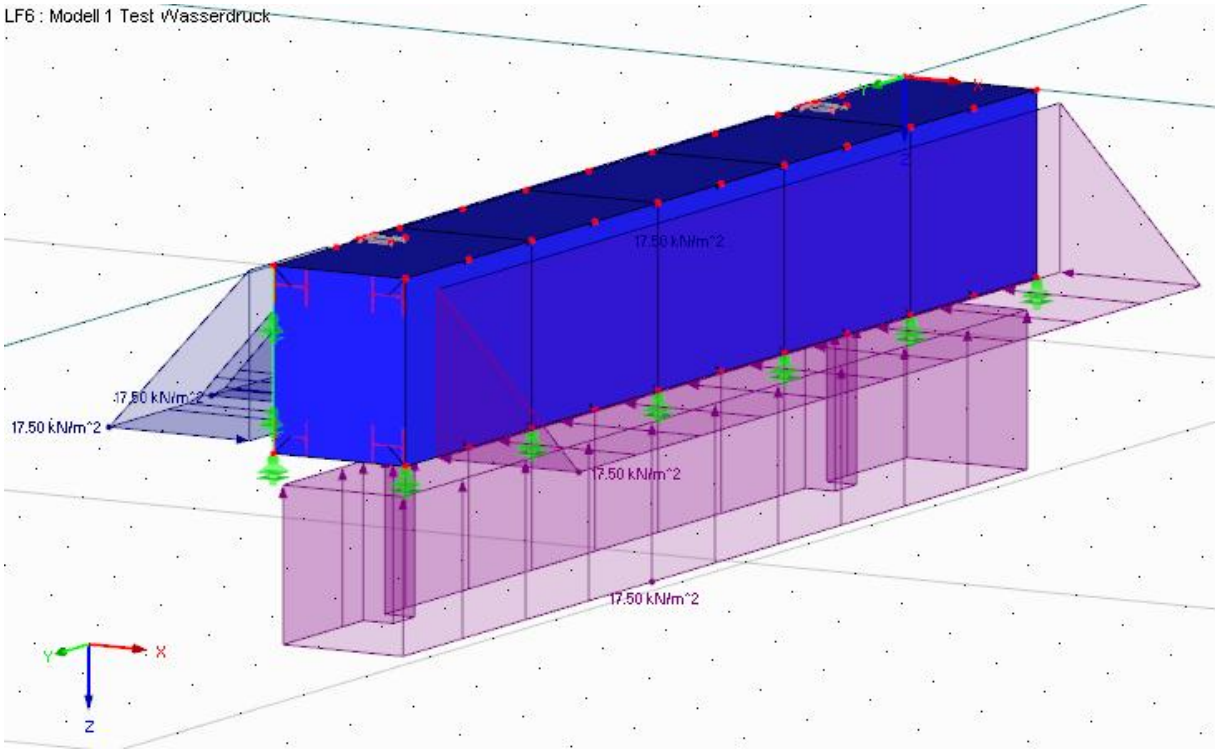


Abbildung 26: LF6 – Wasserdruck

Lastfall 7 – Belastung Seitenführung durch einen Differenzstau

Durch den Einsatz der Schiffsruder (Bugstrahlruder) können auf den Schwimmfender Belastungen quer zur Schleusenkammer wirken. Die auftretenden Zugkräfte sind durch die Querführung aufzunehmen, welche ein abdriften des Schwimmpollers von der Schleusenwand verhindern. Als vereinfachter Ansatz wird diese Belastung durch einen Überstau von 0,15m auf der kammerseitigen Stauwand des Schwimmfenders angetragen.

Links		Rechts	
Lasten:	16,0 kN/m^2	Lasten:	14,5 kN/m^2
Länge:	10,00m	Länge:	10,00m
Höhe:	1,60m	Höhe:	1,45m

Die Freiheitsgrade der Lager des Fenders kann aus folgender Tabelle entnommen werden.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Lagerart:
1	o	o	x	o	o	o	-	Knotenlager
2	o	x	x	o	o	o	-	Linienlager
3	x	x	o	o	o	x	-	Knotenlager
4	x	x	x	x	x	x	-	Knotenlager

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

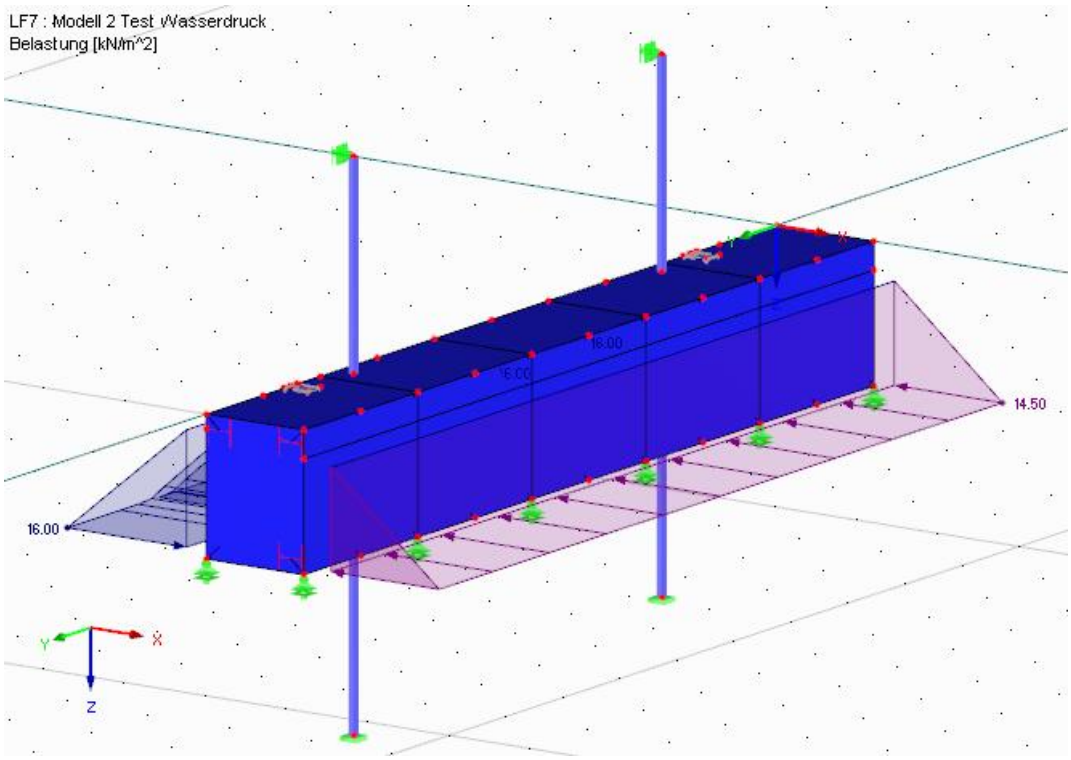


Abbildung 27: LF7 – Wasserdruck

Lastfallkombination 1 – Zwei Menschen an der Kante des Fenders

Eigengewicht	γ_f = 1,35
Zwei Personen an der Kante des Fenders	γ_f = 1,50

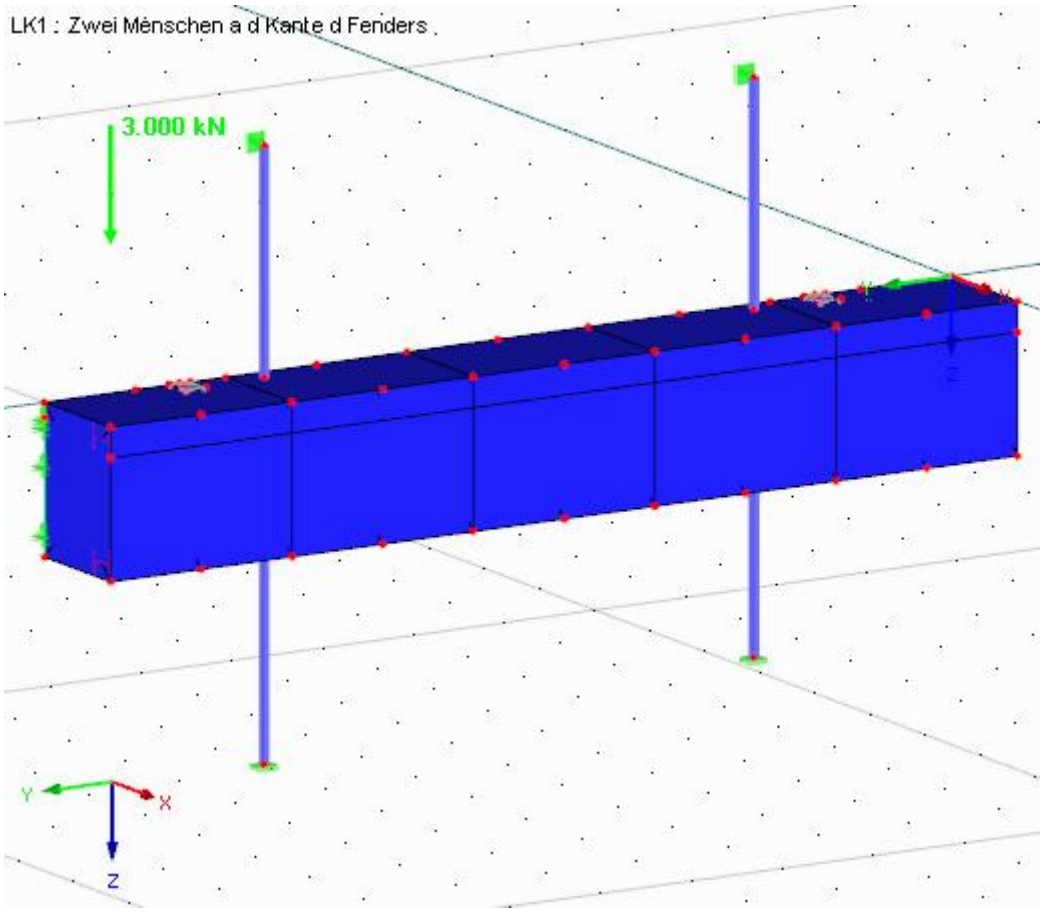


Abbildung 28: LK1 – Zwei Menschen an der Kante des Fenders

Lastfallkombination 2 – Schiff legt an – 10% der Masse

Eigengewicht	γ_f = 1,35
Schiffsdruck	γ_f = 1,50
Schiffsreibung	γ_f = 1,50

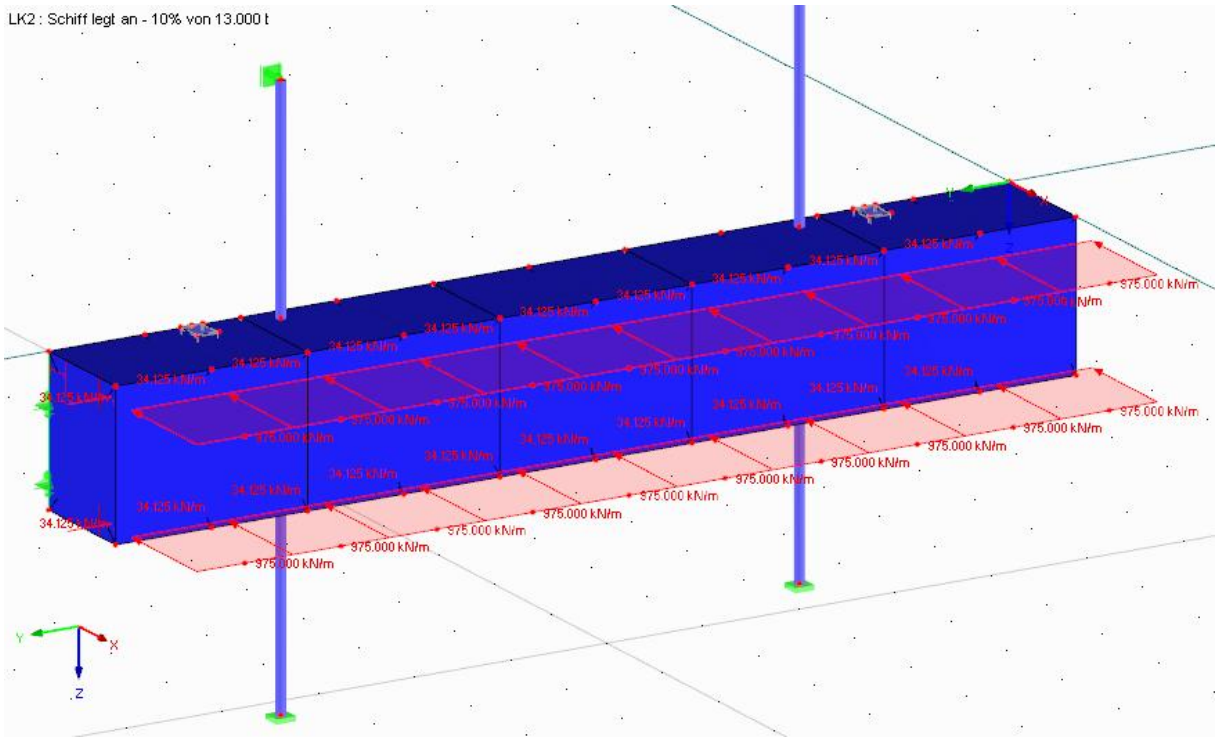


Abbildung 29: LK2 – Schiff legt an – Schiffsreibung und Schiffsdruck

Lastfallkombination 3 – Belastung der Stahlkonstruktion aus dem Wasserdruck

Eigengewicht	γ_f = 1,35
Wasserdruck	γ_f = 1,50

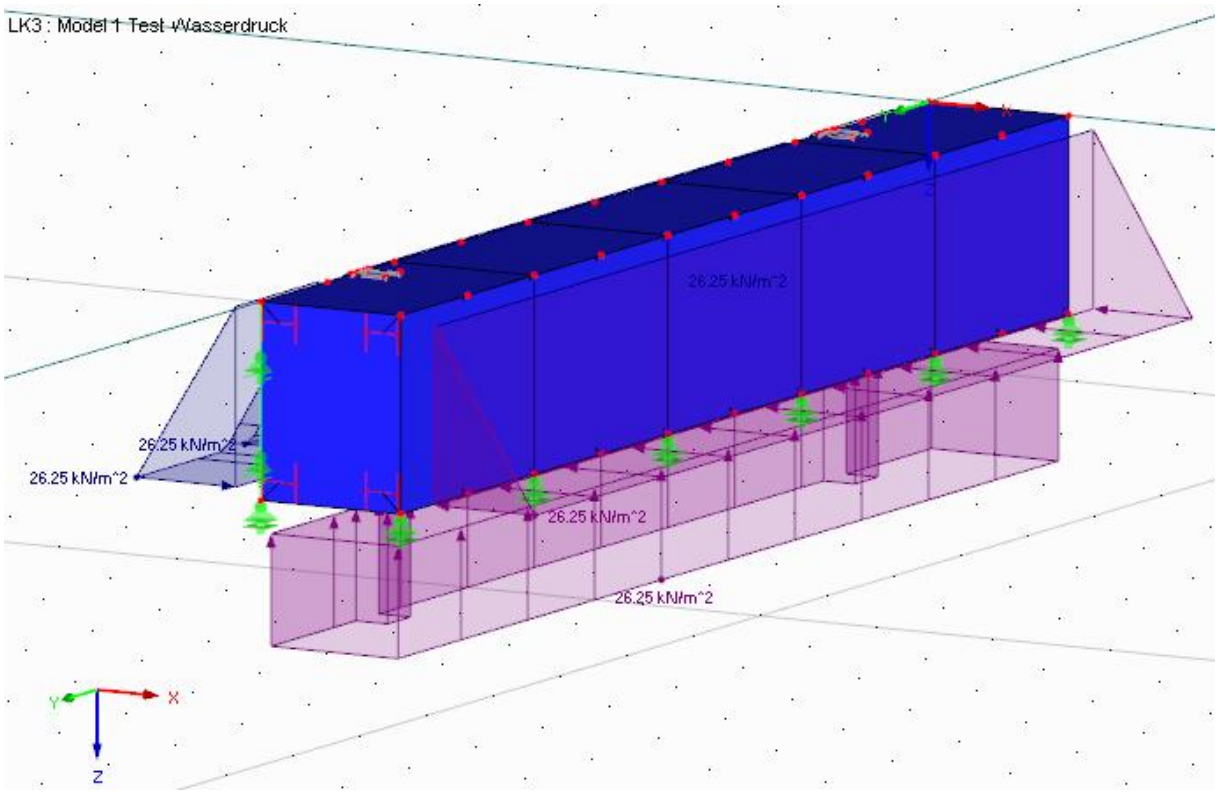


Abbildung 30: LK3 – Wasserdruck

Lastfallkombination 4 – Belastung Seitenführung durch einen Differenzstau

Eigengewicht	$\gamma_f = 1{,}35$
Wasserdruck	$\gamma_f = 1{,}50$

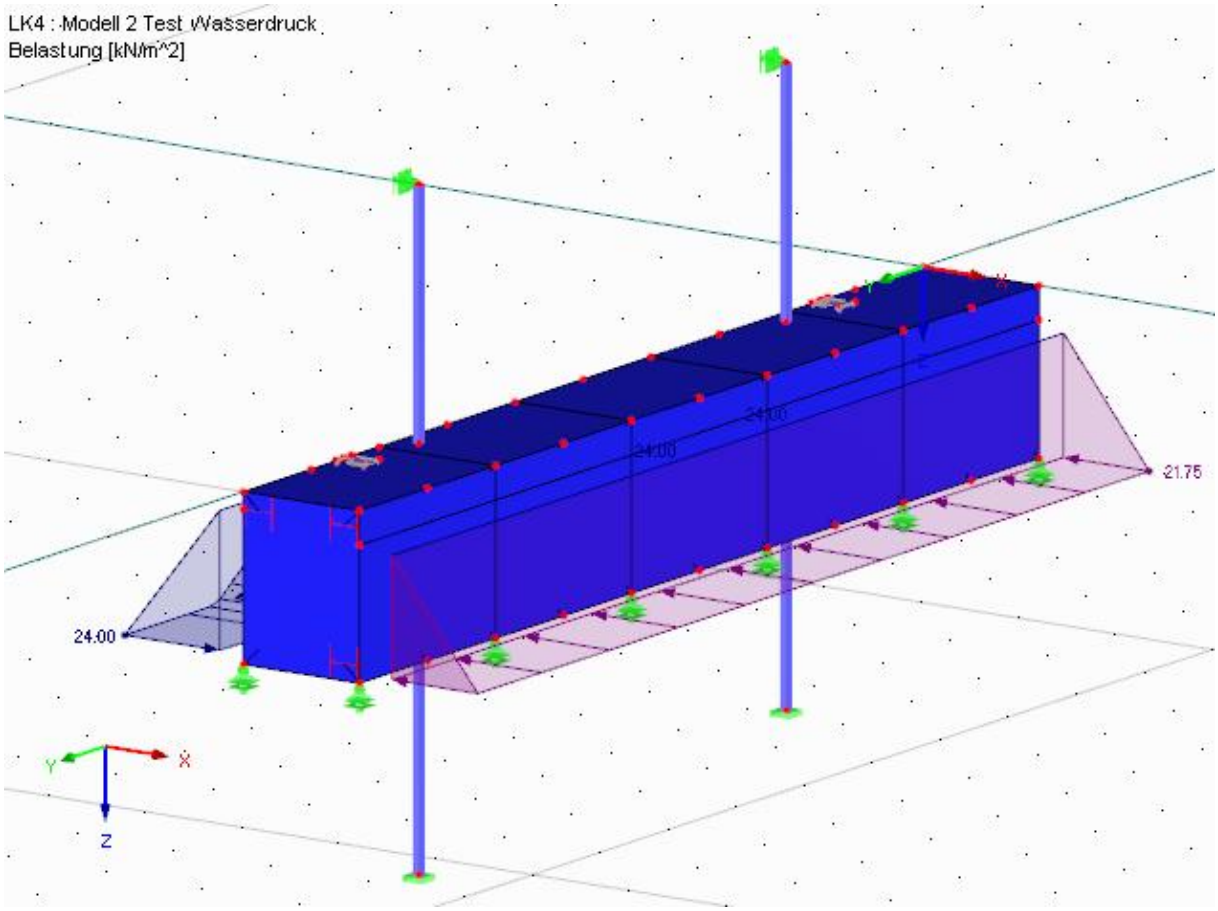


Abbildung 31: LK4 – Wasserdruck

3.2. Lastfälle und Lastfallkombinationen - Seitenführung

Das folgende Bild zeigt den Angriffspunkt der angetragenen Lasten.

Die Lasten für die Bemessung der Schubknagge wurden aus dem FE-Modell des Schwimmfenders (Lastfallkombination 2) entnommen. Hierbei handelt es sich um die maximale, gemittelte Auflagerkraft in der Schubknagge.

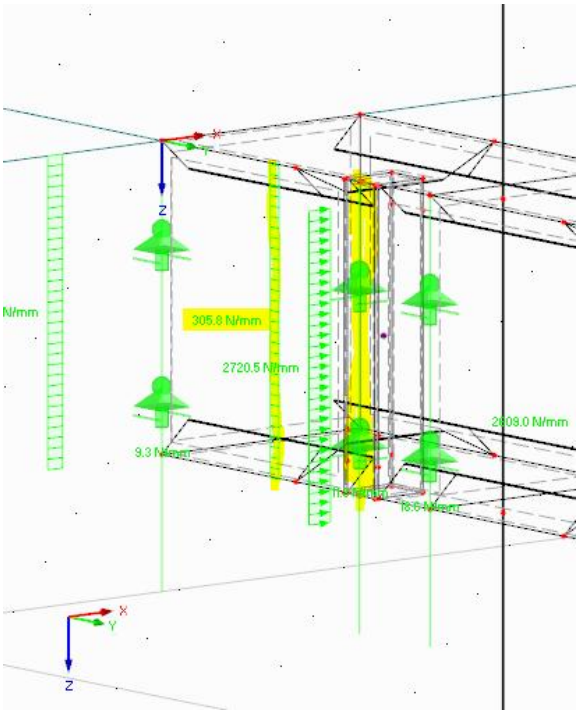


Abbildung 32: Last aus dem Fender

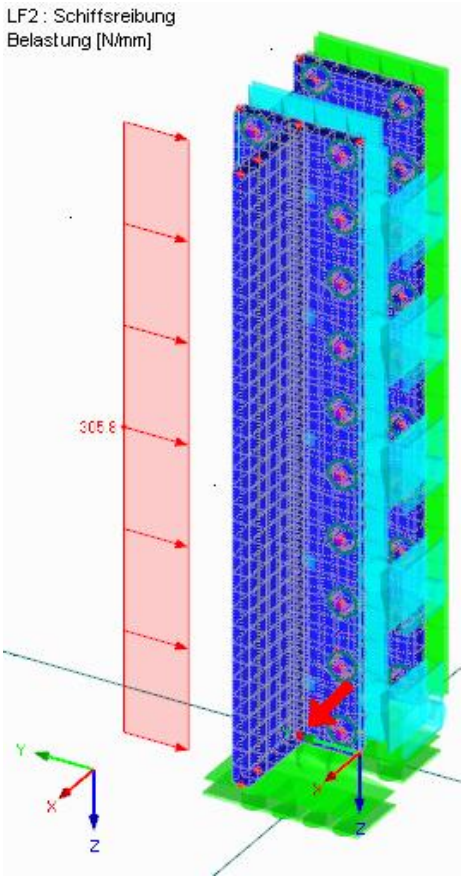


Abbildung 33: Schiffsreibung

Lastfallkombination 1 – Schiff legt an

Eigengewicht	$\gamma_f = 1{,}35$
Schiffsreibung	$\gamma_f = 1{,}50$

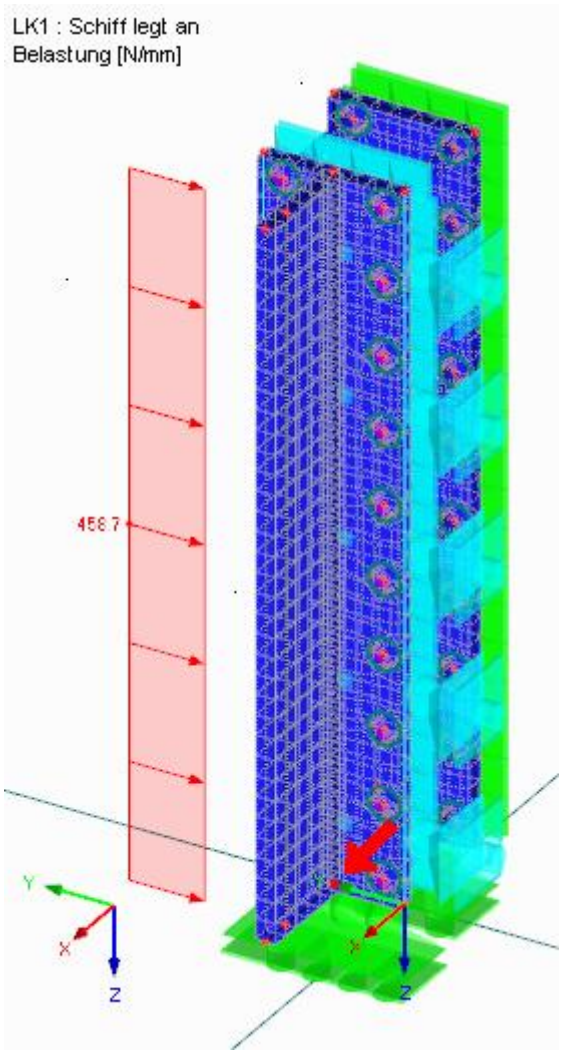


Abbildung 34: Schiff legt an

4. Berechnungsergebnisse

Folgend werden die Lagerreaktionen und Spannungen für die Lastkombination LK 1 bis LK 4 ausgewertet.

4.1. Nachweis der Schwimmtiefe / Freiboard

Maße des Schwimmfenders:	Breite:	1,20m
	Höhe:	1,75m
	Länge:	10,00m
Gewicht des Fenders:	Eigengewicht:	14,05t
	Ausrüstung:	1,70t
	Zuschlag nach DIN 19 704-1 (10%):	1,40t
	Gesamtgewicht:	17,15t

Berechnung der Schwimmtiefe:

$$V_{Verdrängtes\ Wasservolumen} = \frac{G_{Gesamtgewicht}}{p_{Dichte\ Wasser} * g_{Erdanziehung}}$$

$$V = \frac{17{,}15\ t}{1.000{,}00\ \frac{t}{m^3} * 9{,}81\ \frac{m}{s}} = 17{,}48\ m^3$$

$$t_{Eintauchtiefe} = \frac{V_{verdrängtes\ Wasservolumen}}{B_{Breite\ des\ Fenders} * L_{Länge\ des\ Fenders}}$$

$$t = \frac{17{,}48\ m^3}{1{,}20\ m * 10{,}00\ m} = 1{,}4568\ m \cong 145{,}68\ cm$$

$$F_{Vorhandenes\ Freibord} = H_{Höhe\ des\ Fenders} - t_{Eintauchtiefe}$$

$$F = 1{,}75\ m - 1{,}4568\ m = 0{,}2932\ m \cong 29{,}32\ cm$$

$$F_{Vorhandenes\ Freibord} < F_{Benötigtes\ Freibord}$$

$$29{,}32\ cm < 40{,}00\ cm$$

Die fehlende Höhe von ca. 10,7 cm zum benötigten Freibord wird mit Hilfe einer Aufständerung des GFK-Gitterrostest geschaffen. Somit wird die erforderliche Höhe von 40,00cm erreicht.

Im Rahmen der weiteren Planung sind entsprechend detaillierte Betrachtungen durchzuführen.

4.2. Nachweis der Schwimmstabilität / Querführung

4.2.1. Nachweis der Querführung (Stangenführungen)

Die Schwimmstabilität wird in diesem Fall nicht über die metazentrische Höhe gewährleistet. Die am Massivbau angebrachten Querführungen (Fenderstangen) gewährleisten, dass der Schwimmfender sich nur bis zu einem gewissen Grad neigen kann.

Es werden die Lastfallkombinationen LK1 und LK4 betrachtet.

Maße der Querführung:	Länge =	6000 mm
	Ø =	100 mm
	Stahl =	S235
6000mm gewählt, da	HHW = NHN +2,36m	
	NNW = NHN +2,97m	

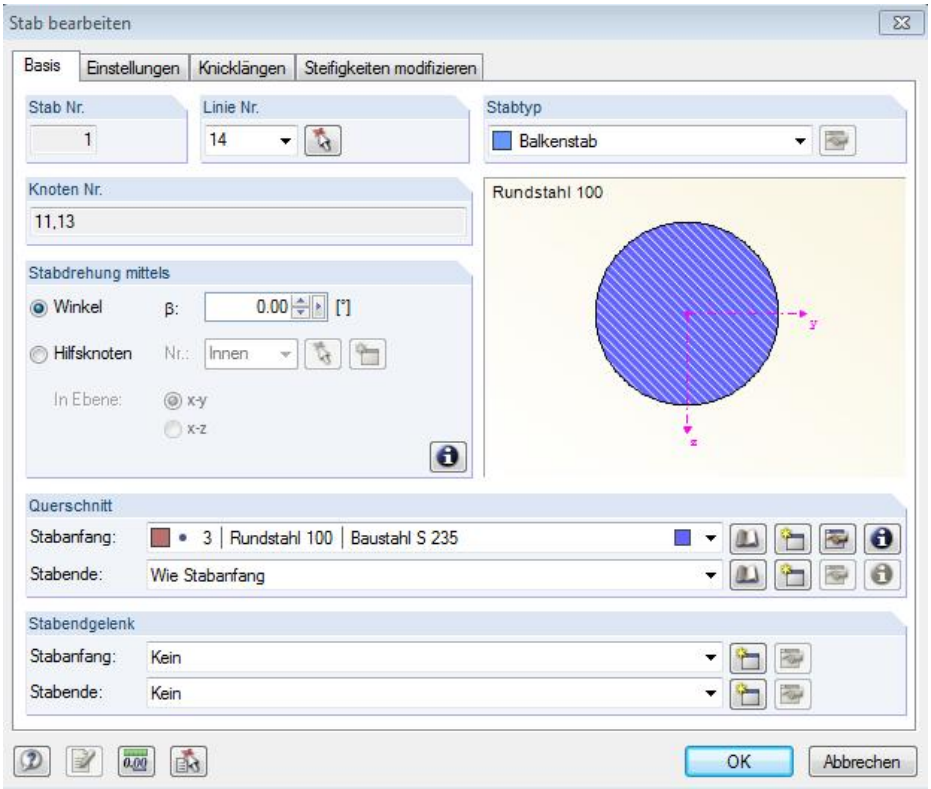


Abbildung 35: Maße und Stahlsorte der Fenderstange

4.2.2. Spannung der einzelnen Fenderstäbe

Betrachtung der Lastfallkombination LK 1:

RF-Stahl Stäbe F1 – Allgemeine Spannungsanalyse von Stäben

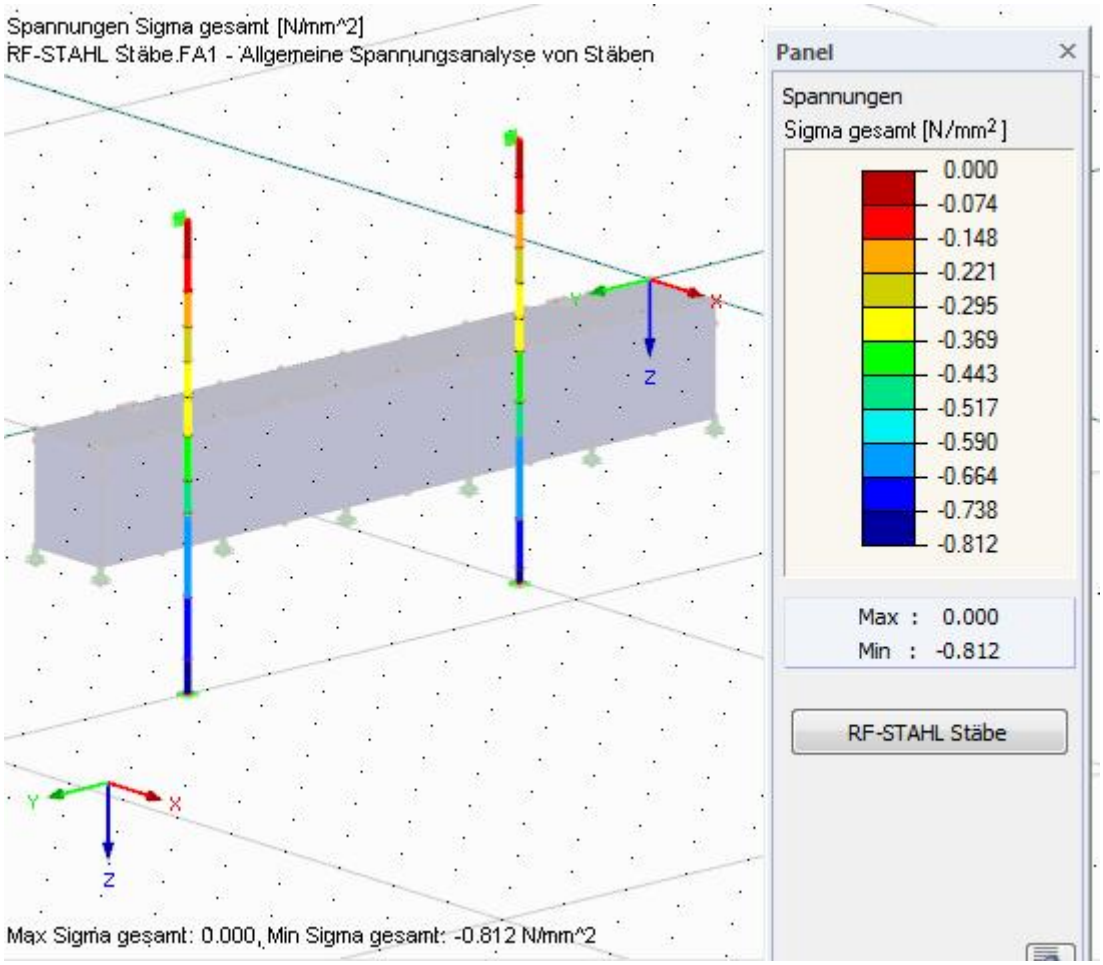


Abbildung 36: Spannungen an der Fenderstange

Maximale Blechdicke = 100,00 mm → $\sigma_{max,Rd}$ = 195,00 N/mm²

$$Nachweis: \frac{\sigma Ed}{\sigma Rd} = \frac{0{,}812 \ \frac{N}{mm^2}}{195{,}00 \ \frac{N}{mm^2}} = 0{,}004 < 1{,}00$$

Betrachtung der Lastfallkombination LK4:

Zusätzlich wird die Belastung der Querführung durch den Einsatz der Schiffsruder nachgewiesen:

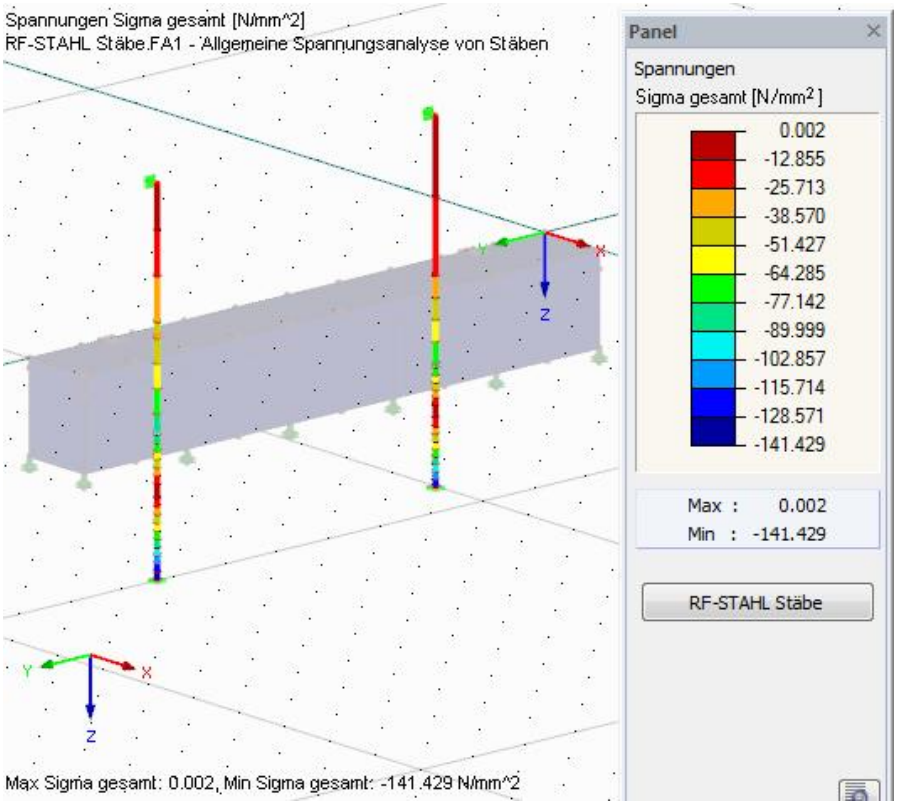


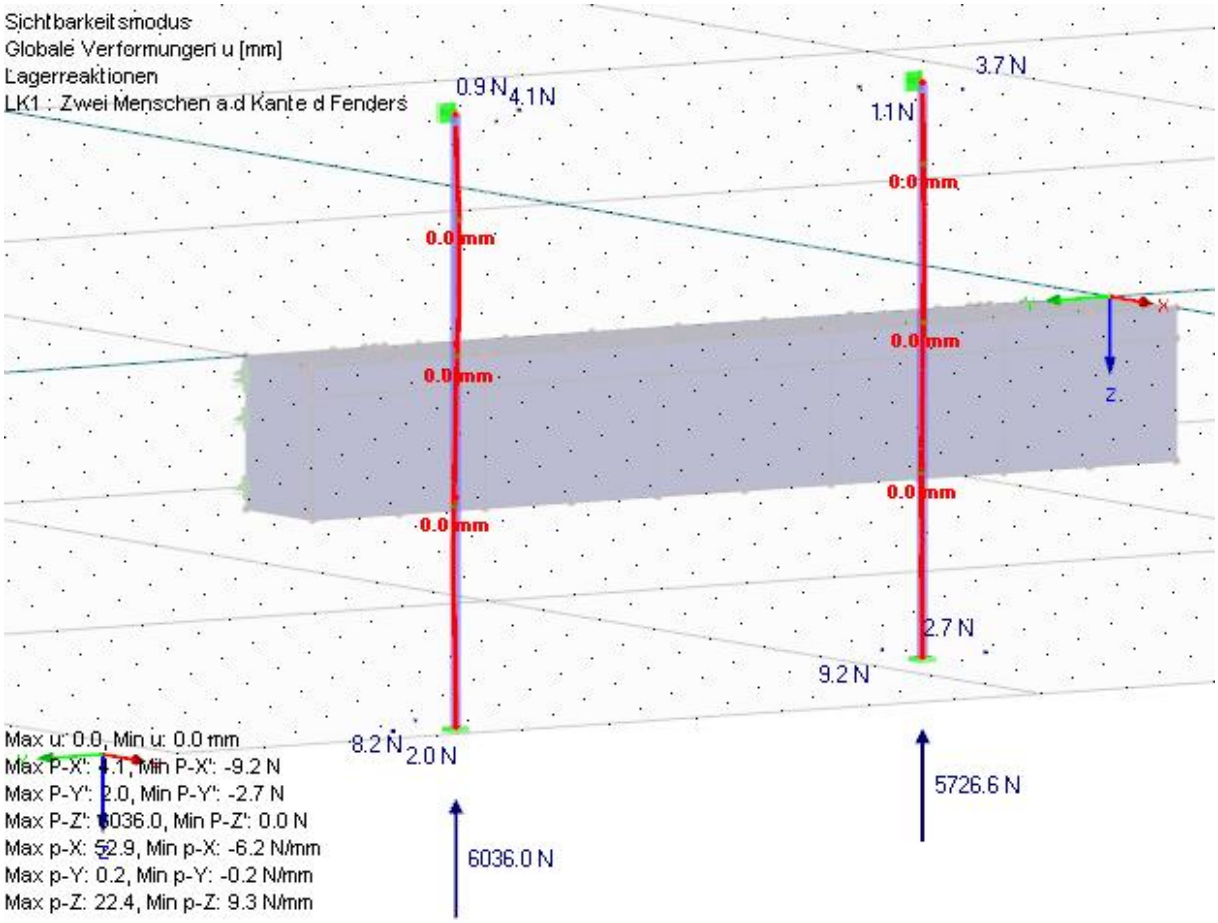
Abbildung 37: Spannung an der Fenderstange

Maximale Blechdicke = 100,00 mm →$\sigma_{max,Rd}$ = 195,00 N/mm^2

$$Nachweis: \frac{\sigma Ed}{\sigma Rd} = \frac{141{,}43 \ \frac{N}{mm^2}}{195{,}00 \ \frac{N}{mm^2}} = 0{,}73 < 1{,}00$$

4.2.3. Verformung der einzelnen Fenderstäbe

Betrachtung der Lastfallkombination LK 1:



Die auftretende Verformung ist vernachlässigbar gering.

Abbildung 39: Verformungen an der Fenderstange

Betrachtung der Lastfallkombination LK4:

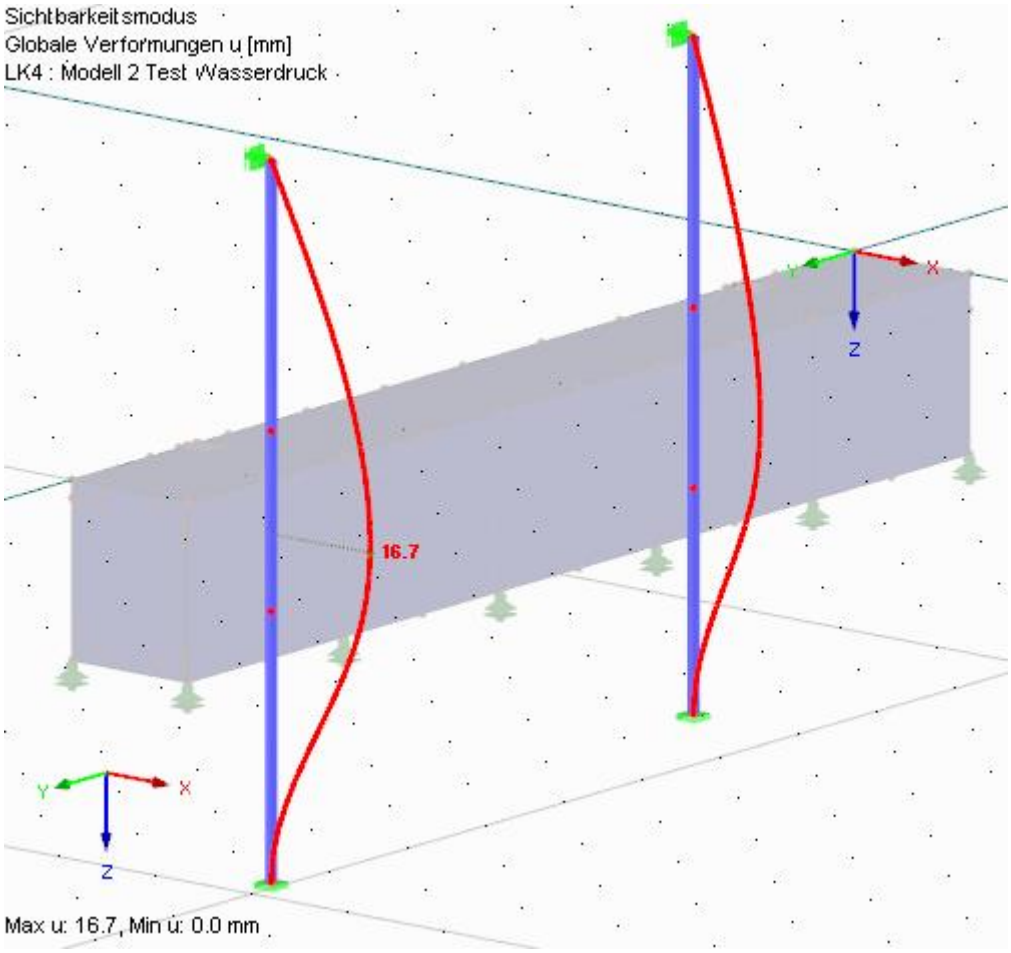


Abbildung 40: Verformungen an der Fenderstange

Die max. auftretende Verformung beträgt 16,70 mm.

4.3. Nachweis der Schwimmfender - Stahlkonstruktion

Betrachtung der Lastfallkombination LK2:

Globaler Spannungsnachweis der Schwimmfenderkonstruktion

Das Modell weißt die FE-typischen Spannungsspitzen auf.

Maximale Blechdicke t ≤ 16mm.

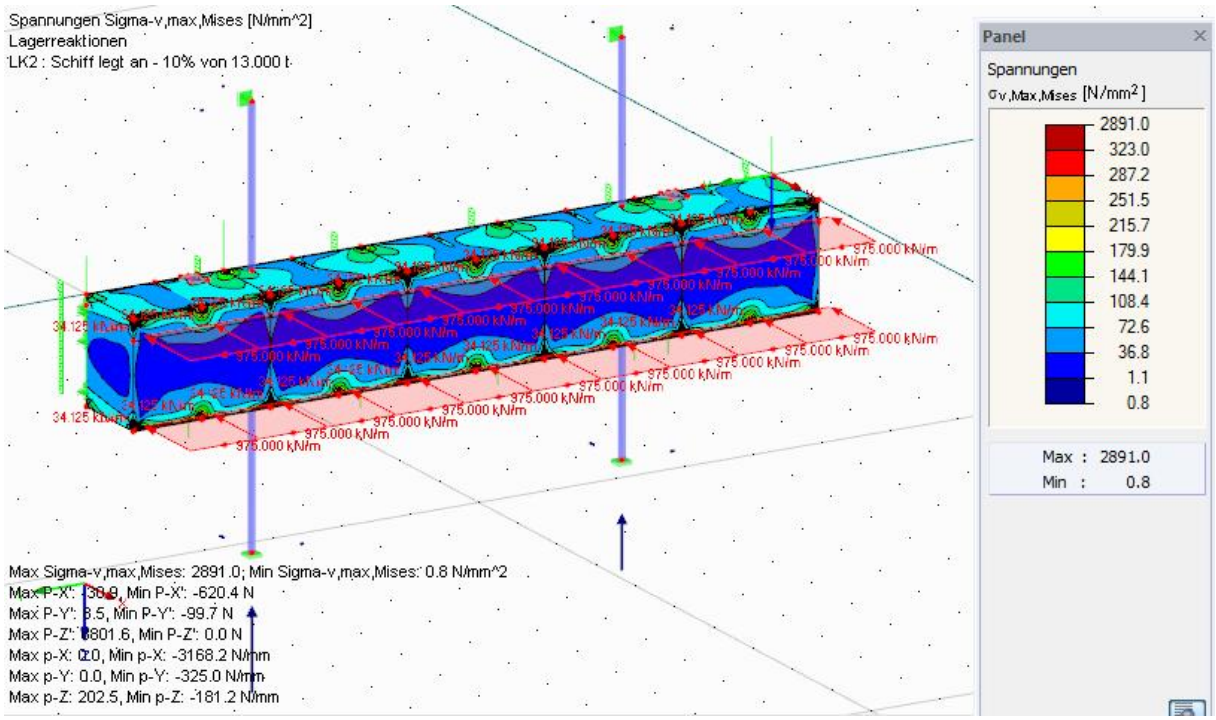


Abbildung 41: Spannungen am Fender

Maximale Blechdicke = 12,00 mm → $\sigma_{max,Rd}$ = 323,00 N/mm²

$$Nachweis: \frac{\sigma Ed}{\sigma Rd} = \frac{252{,}00\ \frac{N}{mm^2}}{323{,}00\ \frac{N}{mm^2}} = 0{,}78 \leq 1{,}0$$ (Unter Vernachlässigung FE-typischer Spannungsspitzen)

Betrachtung der Lastfallkombination LK3:

Zusätzlich wird der Nachweis der der Belastung der Stahlkonstruktion aus dem Wasserdruck geführt.

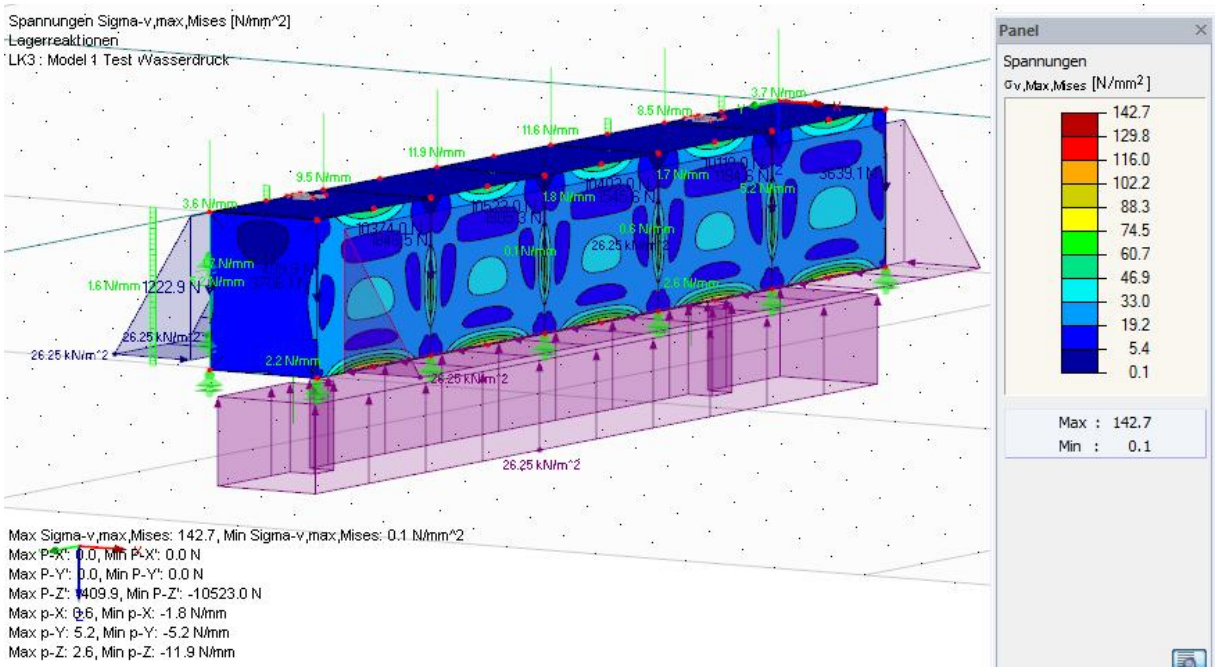


Abbildung 42: Spannungen am Fender

Maximale Blechdicke = 12,00 mm →$\sigma_{max,Rd}$ = 323,00 N/mm^2

$$Nachweis: \frac{\sigma Ed}{\sigma Rd} = \frac{142{,}70\ \frac{N}{mm^2}}{323{,}00\ \frac{N}{mm^2}} = 0{,}44 \leq 1{,}0$$

4.4. Nachweis der Seitenführung

Betrachtung der Lastfallkombination LK1:

Die Seitenführung wird als Maschinenkonstruktion mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_M = 1,5 betrachtet.

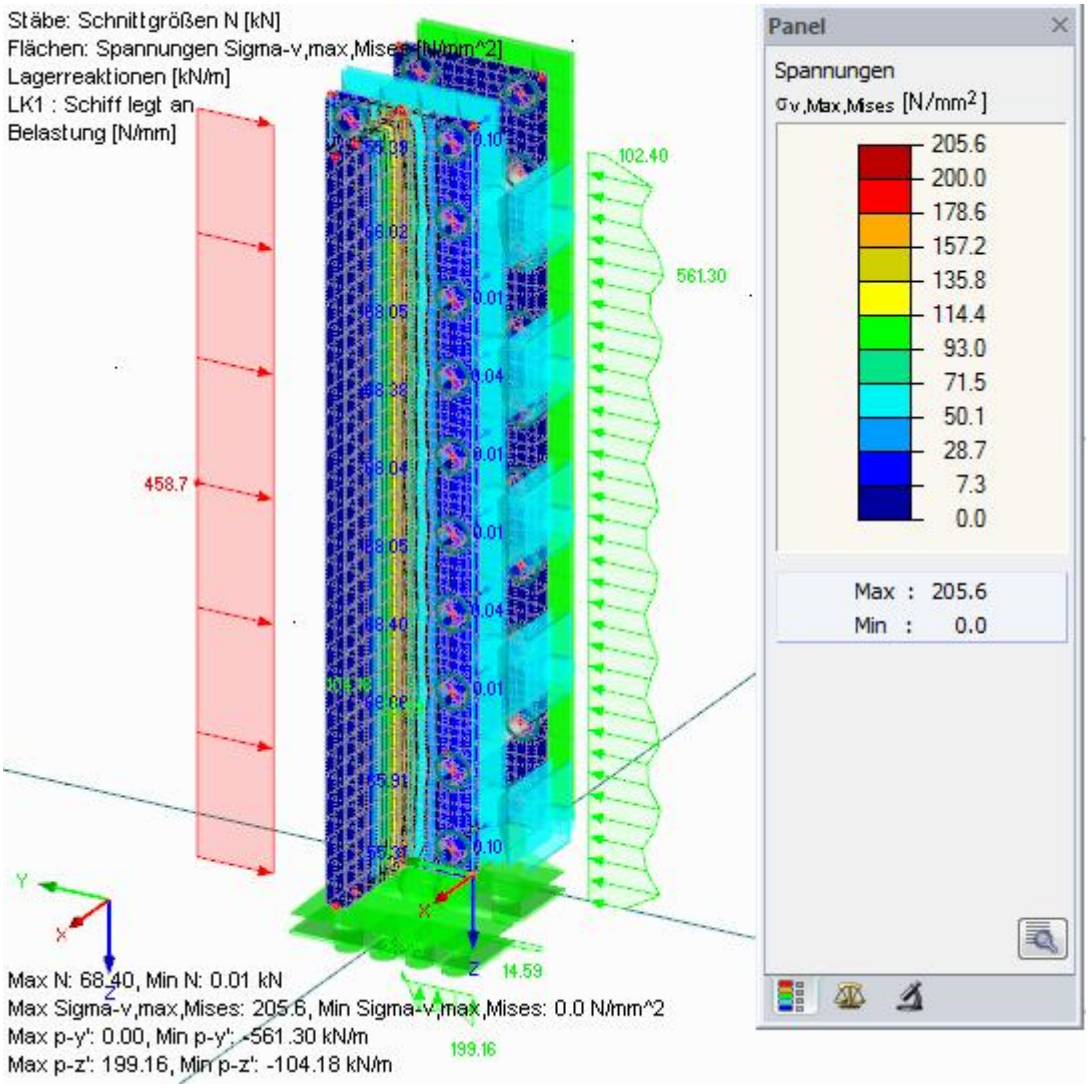


Abbildung 44: Spannung an der Schubknagge

Maximale Blechdicke = 50,00 mm →$\sigma_{max,Rd}$ = 223,00 N/mm^2

$$Nachweis: \frac{\sigma Ed}{\sigma Rd} = \frac{205{,}60 \frac{N}{mm^2}}{223{,}00 \frac{N}{mm^2}} = 0{,}92 < 1{,}00$$

Nachweis der Verschraubung

Die Schrauben der Seitenführung nehmen nur Normalkräfte auf. Der Abtrag der Querkräfte erfolgt über am Einbauteil seitlich angeordnete Schubknaggen.

Die maximale Stabnormalkraft beträgt 68,40 kN.

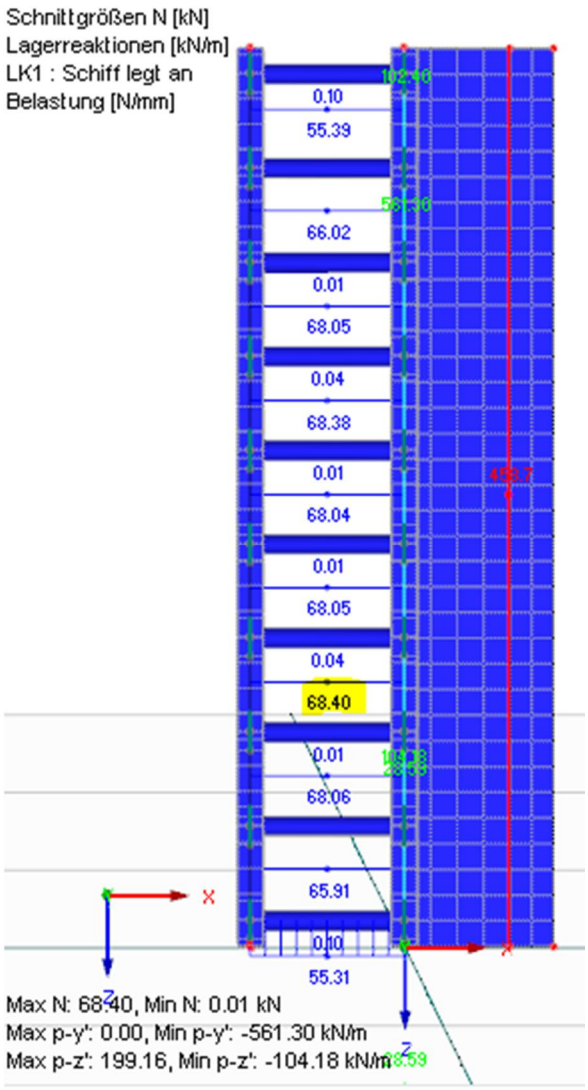


Abbildung 45: Normalkraft Stab

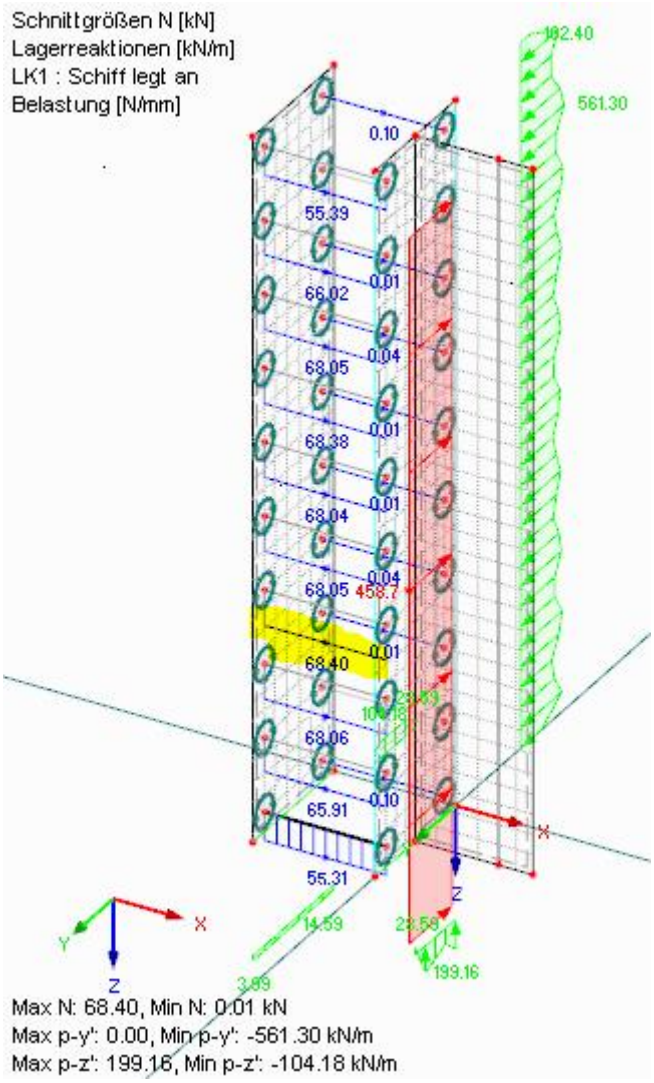


Abbildung 46: Normalkraft Stab

Nachweis Schraube - ZUGVERBINDUNG (DIN EN 1993-1-8 (3.4.2))

Kennwerte Schraube:

Schraubendurchmesser	bolt := "M36"
Gewinde in Scherfuge? j/n	ge := "j"
Rohe Schraube/Passschraube? R/P	Sch := "R"
Gewinde bis zum Kopf? j/n	ko := "j"
Schraubenmaterial	ma3 := "8.8"
Senkschraube (j/n)	senk := "n"

$\phi = 36.00 \cdot mm$

$A_s = 817.00 \cdot mm^2$ (Spannungsquerschnitt)

$A_{Sch} = 1.02 \times 10^3 \cdot mm^2$ (Schaftquerschnitt)

$n_{Schrauben} := 10$ (Anzahl der Schrauben)

Kopf

$SW_K := 60mm$ $e_K := 66.4mm$

$d_{m_K} := \frac{SW_K + e_K}{2} = 0.06\,m$

Mutter

$SW_M := 0mm$ $e_M := 0mm$

$d_{m_M} := \frac{SW_M + e_M}{2} = 0.00$

$d_m = 0.06\,m$

$f_{ub} = 800.00 \cdot \frac{N}{mm^2}$ $f_{yb} = 640.00 \cdot \frac{N}{mm^2}$

Teilsicherheitsbeiwert

$\gamma_{M2} := 1.50$ (nach E DIN 19704-1 Nachwe als Maschinenbauteil)

$t_{p.1} := 50mm$ (Blechdicke angeschl. Blech1

$t_{p.2} := 50mm$ (Blechdicke angeschl. Blech2

$t_p := \min(t_{p.1}, t_{p.2}) = 50.00 \cdot mm$

Unterlegscheibe

$t_{US} = 6.00 \cdot mm$ (Dicke Unterlegscheibe)

$\phi_{US} = 66.00 \cdot mm$ (Durchmesser US)

Lochdurchmesser

$\phi_L = 39.00 \cdot mm$

Kennwerte Blech (S355)
(für 40mm < t 80mm)

$f_y := 285 \frac{N}{mm^2}$ $f_u := 490 \frac{N}{mm^2}$

$E_s := 210000 \frac{N}{mm^2}$

Einwirkung:

$ges_F_{Ed_fat} := 0kN$

$ges_F_{Ed} := 684kN$

NACHWEIS ZUGVERBINUNG --> Kategorie D: nicht vorgespannt

Nachweis Zug

Beanspruchbarkeit

$$k_2 := \begin{cases} 0.63 & \text{if } senk = \text{"j"} \\ 0.90 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.90$$

$$F_{t_Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 392.16 \cdot kN$$

$$F_{Ed} := \frac{ges_F_{Ed}}{n_{Schrauben}} = 68.40 \cdot kN$$

Nachweis

$$\frac{F_{Ed}}{F_{t_Rd}} = 0.17$$

$NW_{Zug} = \text{"ok"}$

Nachweis Durchstanzen

Beanspruchbarkeit

$$B_{p_Rd} := 0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 1.95 \times 10^3 \cdot kN$$

$$\frac{F_{Ed}}{B_{p_Rd}} = 0.04$$

$NW_{Durchstanzen} = \text{"ok"}$

Mindesteinschraubtiefe der Schrauben (nach DOSE)

Kenndaten Schraube

$P_S := 4mm$ (Steigung)

$d_2 := 33.4mm$ (Flankendurchmesser)

vorhandene Einschraubtiefe

$vorh\ m := 50mm$ (vorhandene Gewindelänge)

$f_{y_Gewinde} := f_y = 285.00 \cdot \frac{N}{mm^2}$

Nachweis

$max_F_{Ed} := f_{yb} \cdot A_s = 522.88 \cdot kN$

$zul_\tau_{p_B} := \frac{f_{yb}}{\sqrt{3}} = 369.50 \cdot \frac{N}{mm^2}$

$zul_\tau_{p_M} := \frac{f_{y_Gewinde}}{\sqrt{3}} = 164.54 \cdot \frac{N}{mm^2}$

$\alpha_B := \frac{zul_\tau_{p_M}}{zul_\tau_{p_B} + zul_\tau_{p_M}} = 0.31$

$\alpha_M := \frac{zul_\tau_{p_B}}{zul_\tau_{p_B} + zul_\tau_{p_M}} = 0.69$

$d_R := d_2 + (0.5 - \alpha_B) \cdot \frac{P_S}{\tan(30Grad)} = 34.73 \cdot mm$

$A_R := max_F_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{zul_\tau_{p_B}} + \frac{1}{zul_\tau_{p_M}} \right) = 45.93 \cdot cm^2$

erforderliche Einschraubtiefe

$min_m := \frac{A_R}{\pi \cdot d_R} = 42.10 \cdot mm$

Nachweis $\frac{min_m}{vorh_m} = 0.84$

$NW_{Gewinde} = "ok"$

Mindesteinschraubtiefe von Schrauben mit Sackloch (nach EC3)

Schraubverbindungen mit Sackloch (nach NCI Zu 3.5)

$vorh_m = 50.00 \cdot mm$

$vorh_\xi := \frac{vorh_m}{\phi} = 1.39$

Festigkeit Bauteil mit Innengewinde $f_{ub} = 800.00 \cdot \frac{N}{mm^2}$

$f_{u_Gewinde} := f_u = 490.00 \cdot \frac{N}{mm^2}$

$$min_\xi := \frac{600}{f_{u_Gewinde} \cdot \frac{mm^2}{N}} \cdot \left(0.30 + \frac{0.40 \cdot f_{ub} \cdot \frac{mm^2}{N}}{500} \right)$$

$min_\xi = 1.15$

Nachweis: $\frac{min_\xi}{vorh_\xi} = 0.83$ $\frac{f_{u_Gewinde}}{f_{ub}} = 0.61$

$NW_{Gewinde_EC3} = \text{"ok"}$

4.5. Nachweis der Drucklager (UHMW-PE Auflager)

Betrachtung der Lastfallkombination LK2:

Maße des UHMW-PE: Breite: 0,25 m

Höhe: 1,75 m

Für die Berechnung ist der maximale Mittelwert der ankommenden Flächenlast F_A gewählt worden.

Dieser ist aus dem RFEM-Modell des Steges entnommen worden.

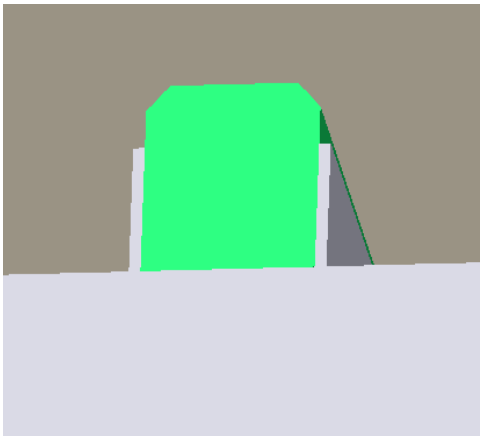


Abbildung 47: UHMW-PE

$$F_{Flächenlast} = \frac{F_{Linienlast\ in\ \frac{N}{mm^2}} * H_{Höhe\ des\ UHMW-PE}}{B_{Breite\ des\ UHMW-PE\ \ in\ mm} * H_{Höhe\ des\ UHMW-PE\ in\ mm}}$$

$$F_{Flächenlast} = 2.720{,}50\,\frac{N}{mm} * 1.750\ mm = 4.760.875{,}00\ N$$

$$P_{Vorhandene\ Flächenpressung} = \frac{F_{Flächenlast\ im\ UHMW-PE\ \ in\ kN}}{A_{Auflagerfläche\ des\ UHMW-PE\ \ in\ m^2}}$$

$$P_{Vorhandene\ Flächenpressung} = \frac{4.760.875{,}00\ N}{250\ mm * 1.750\ mm} = 10{,}882\,\frac{N}{mm^2}$$

Nach DIN EN ISO 10 350: Streckenspannung UHMW-PE: ≥ 19 N/mm²

$$P_{Zulässige\ Flächenpressung} = \frac{\sigma_{Streckenspannung}\ in\ \frac{N}{mm^2}}{\gamma_M}$$

$$P_{Zulässige\ Flächenpressung} = \frac{19\,\frac{N}{mm^2}}{1{,}5} = 12{,}6\,\frac{N}{mm^2}$$

$$P_{Vorhandene\ Flächenpressung} \leq P_{Zulässige\ Flächenpressung}$$

$$10{,}882\,\frac{N}{mm^2} \leq 12{,}6\,\frac{N}{mm^2}$$