Bauherr:

Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau
(WSA Kiel-Holtenau)

Schleuseninsel 2
24159 Kiel

B

Stahlwasserbau – Vorstatik
Adapterkonstruktion
Revisionsverschluss

Bauvorhaben:

Machbarkeitsstudie
Alte Schleuse Kiel-Holtenau
Kiel

Auftrag:

H13188

Inhalt:

Statische Berechnung
Vorstatik
Adapterkonstruktion Revisionsverschluss

Tragwerksplanung:

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

Bearbeiter:
B. Eng. Tobias Merklein
Telefon: 0931 / 35 93 34 - 12
Telefax: 0931 / 35 93 34 - 50
Mail: tobias.merklein@irs-stahlwasserbau.de

Revisionsverzeichnis Nr. 0

Zur Statischen Berechnung

Rev. Nr.	Versand-Datum:	Block (Kapitel):	Seiten neu / ergänzt / geändert / Bemerkungen	Aufsteller:
0	30.10.2015		1 - 36	Merklein

Inhalt

1. Allgemeines 1
1.1. Vorbemerkungen 1
1.2. Übersicht und Nomenklatur 2
1.3. Verschlussparameter 3
1.4. Normen und Vorschriften 4
1.5. Verwendete Rechenprogramme 5
1.6. Material, Festigkeitswerte und Z-Güten 5
1.6.1. Statisch 5
2. Querschnitte und System 6
2.1. Allgemeines 6
2.2. Lagerung Modell 1 (RV-Verschluss) 6
2.3. Querschnitte und Abmessungen Modell 1 8
2.4. Lagerung Modell 2 (Adapterkonstruktion) 9
2.5. Querschnitte und Abmessungen Modell 2 10
3. Belastung 14
3.1. Lastfälle 14
3.1.1. LF1 Eigengewicht 14
3.1.2. LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau) 17
3.1.3. LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau aus RV-Verschluss) 19
3.1.4. LF6 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe) 20
3.1.5. LF8 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe aus RV-Verschluss) 22
3.1.6. LF10 Eis auf Normalstau 23
3.2. Lastfallkombinationen 25
3.3. Ergebniskombinationen 27
4. Berechnungsergebnisse 28
4.1. Auflagerreaktionen / Kontaktspannungen 28
4.2. Allgemeine Spannungsnachweise 29
4.2.1. max. Blechdicke t < 16 mm 29
4.2.2. max. Blechdicke 16 mm < t < 40 mm 30
4.2.3. max. Blechdicke 40 mm < t < 63 mm 31
4.2.1. max. Blechdicke 80 mm < t < 100 mm 32
4.3. Verformungsnachweise 33
4.3.1. Gesamtverformung u 33
4.3.2. Verformung in x- Richtung u_x 34
4.3.3. Verformung in y- Richtung u_y 34
4.3.4. Verformung in z- Richtung u_z 35

5. Detailnachweise 36
5.1. Nachweis der Betonpressung 36

1. Allgemeines

In diesem Dokument wird eine Machbarkeitsstudie für die weiterführende Planung des Revisionsverschlusses der kleinen Schleusen des Nord-Ostsee-Kanals (Seite Kiel-Holtenau) geführt. Die bestehenden Revisionsverschlüsse wurden erst 2011 geplant und sollen deshalb erhalten bleiben. Die Revisionsverschlüsse werden in diesem Dokument nicht untersucht. Sie wurden jedoch ebenfalls als FE-Modell abgebildet um die Wirkung der geneigten Stauhaut auf die Lagergrößen bestimmen zu können.
Da sich die Geometrie der alten Schleuse nun planmäßig vergrößert, wird in diesem Dokument eine Adapterkonstruktion untersucht, welche die Geometrie der neuen Schleuse und die des „alten“ Revisionsverschlusses vereinen soll.

1.1. Vorbemerkungen

Die Adapterkonstruktion soll aufgrund des hohen Eigengewichtes in zwei Teilen in die Schleusenkammer gehoben werden. Die beiden Teile können in der Mitte des Hohlkastens getrennt werden und separat eingehoben / eingeschwommen werden. Die Adapterkonstruktion trägt die Lasten über Nischen, welche in der Sohle der Schleusenkammer sowie an den Kammerwänden angebracht werden über Flächenpressung ab. Nach dem einheben der Adapterkonstruktion kann der Revisionsverschluss eingeschwommen werden. Beim Lenzen der Schleusenkammer dichtet eine Flachdichtung zwischen Revisionsverschluss und Adapterkonstruktion und eine weitere Flachdichtung zwischen Adapterkonstruktion und Massivbau ab.

1.2. Übersicht und Nomenklatur

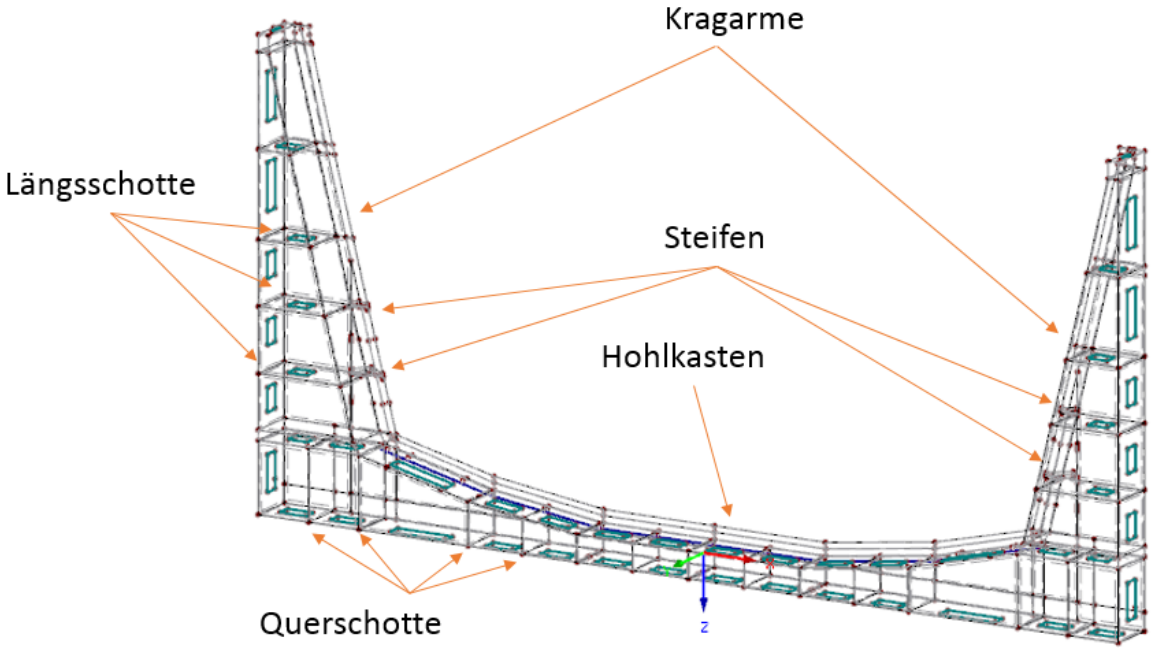


Abbildung 1 **Gesamtübersicht Modell 2 (Adapterkonstruktion)**

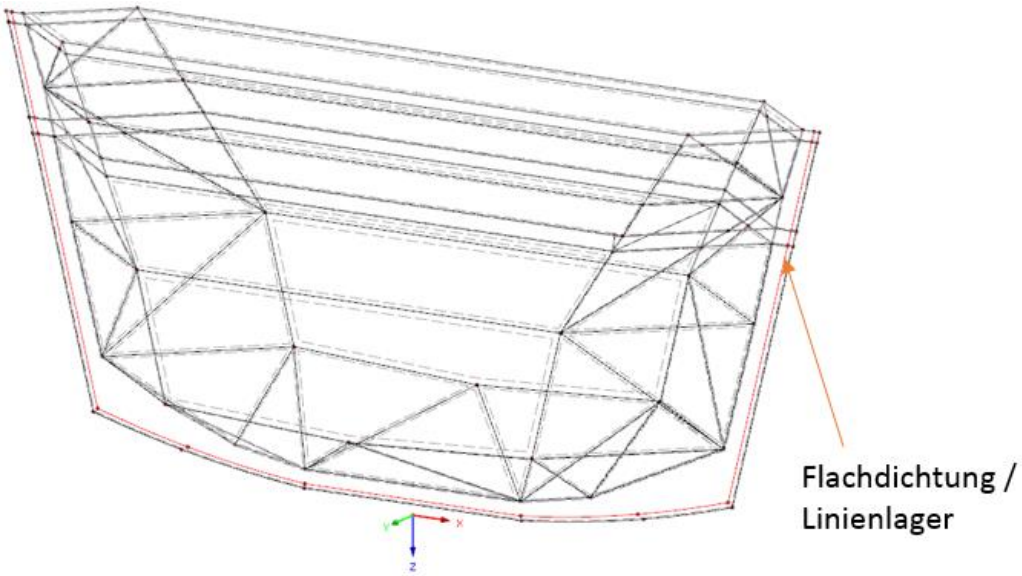


Abbildung 2 **Gesamtübersicht Modell 1(Revisionsverschluss)**

1.3. Verschlussparameter

Schleusenkammer	
lichte Durchflussweite	25,00 m
Sohlhöhenkote (Außenhaupt)	- 10,50 müNN
Sohlhöhenkote (Binnenhaupt)	- 10,50 müNN
Hydraulische Daten - NOK	
HKW	+ 0,5 müNN
MKW	± 0,00 müNN
NKW	- 1,00 müNN
Hydraulische Daten - Schleusenkammer	
HKW	+ 0,5 müNN
MKW	± 0,00 müNN
NKW	- 1,00 müNN
Hydraulische Daten – Kieler Förde	
HHW	+ 3,47 müNN
NNW	- 2,29 müNN
Daten Verschlusskörper	
Oberkante RV	+3,81 müNN
Freibord bei HHW (max. Stauhöhe)	0,34 m
Freibord bei HKW (Normalstau)	3,31 m

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] DUENQ Ing.-Software Dlubal GmbH

[P3] MathCAD 14

[P4] Excel 2013

1.6. Material, Festigkeitswerte und Z-Güten

1.6.1. Statisch

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

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

2. Querschnitte und System

2.1. Allgemeines

Die geplante Adapterkonstruktion sowie die Bestandsverschlüsse werden jeweils als räumliches FE-Flächentragwerk modelliert. Es werden 2 Modelle erstellt. Modell 1 bildet den Revisionsverschluss (RV-Verschluss) und Modell 2 die neu zu planende Adapterkonstruktion ab. So können die, auf Grund der Geometrie des RV-Verschlusses, linear steigenden Lagerkräfte des Tores exakt ermittelt werden. Da die RV-Verschlüsse nicht untersucht werden sollen, werden von Modell 1 nur die Lagerung und die Geometrie angegeben.

2.2. Lagerung Modell 1 (RV-Verschluss)

Die Freiheitsgrade der Lager von Modell 1 können 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	- u_y positiv	Linienlager
2	x	o	o	o	o	o	-	Knotenlager (nummerisch)

Legende:

o = frei

x = fest

Das **Linienlager Nr. 1** (in Abbildung 3 rot markiert) dient der Festhaltung in y- und in z-Richtung. Es liegt direkt auf der Flachdichtung. Um einen gleichmäßigen Verlauf ohne Ausreißer zu erhalten wurde das Lager als Feder ausgebildet, welche die Verformbarkeit der Flachdichtung und der Adapterkonstruktion abbilden soll. Die Federkonstante wurde mit 10 000 kN/m² angesetzt.

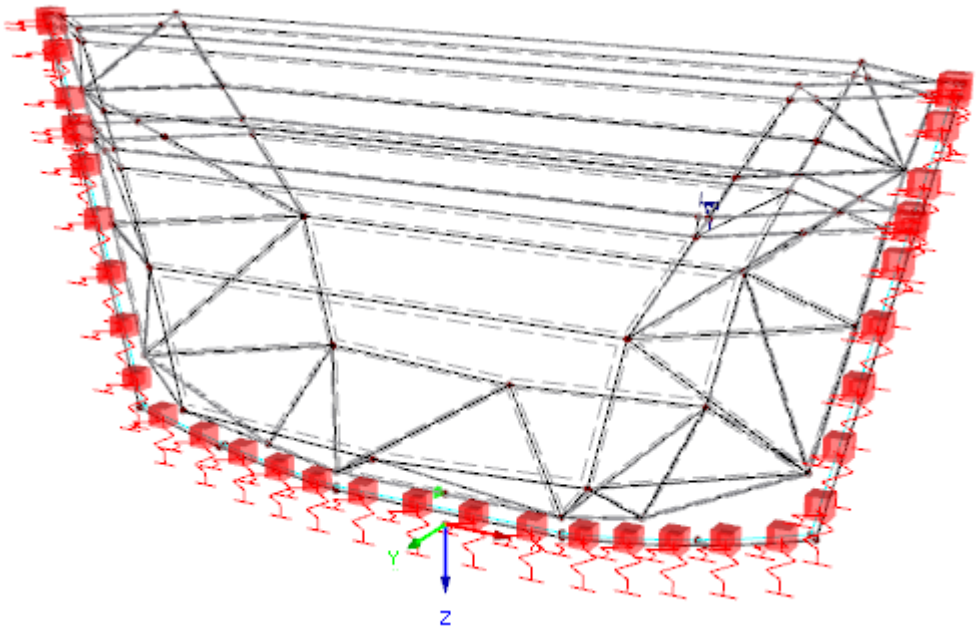


Abbildung 3 Linienlager Nr. 1 Modell 1 (RV-Verschluss)

Das **Linienlager Nr. 2** (in Abbildung 4 rot markiert) ist ein nummerisches Lager.

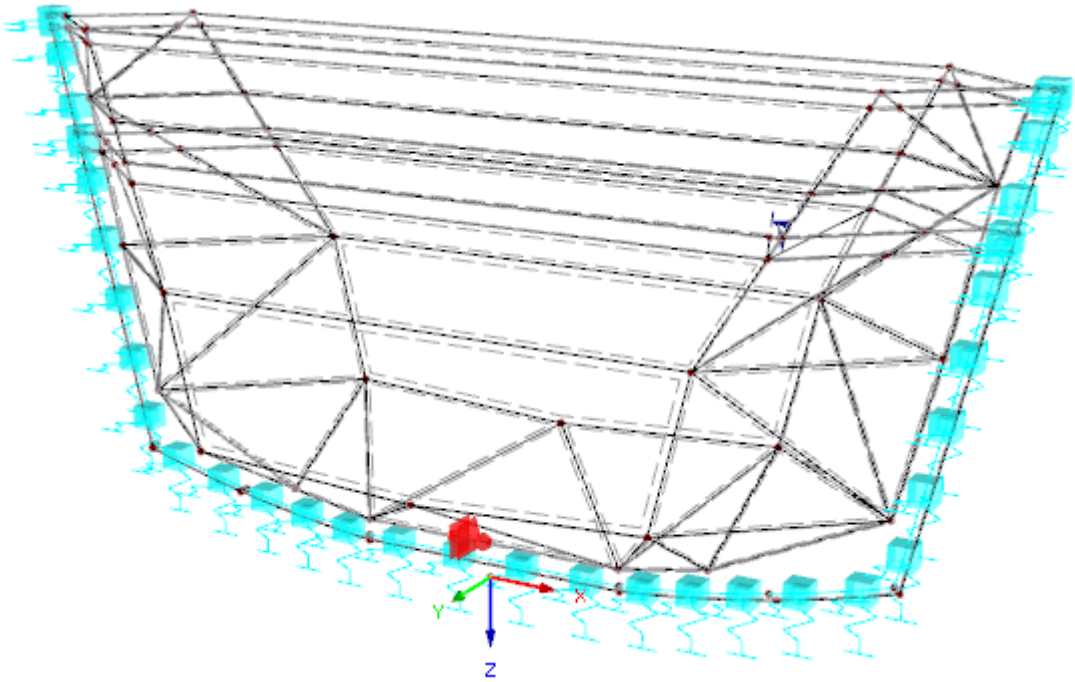


Abbildung 4 Knotenlager Nr. 2 Modell 1 (RV-Verschluss)

2.3. Querschnitte und Abmessungen Modell 1

Das Modell 1 dient ausschließlich der Ermittlung der Lagerkräfte. Deshalb wurde lediglich die äußere Kontur mittels Flächen abgebildet. Alle anderen Bestandteile wie Querschotte, Ballasttanks usw. wurden vernachlässigt. Die Abmessungen von Modell 1 können Abbildung 5 entnommen werden.

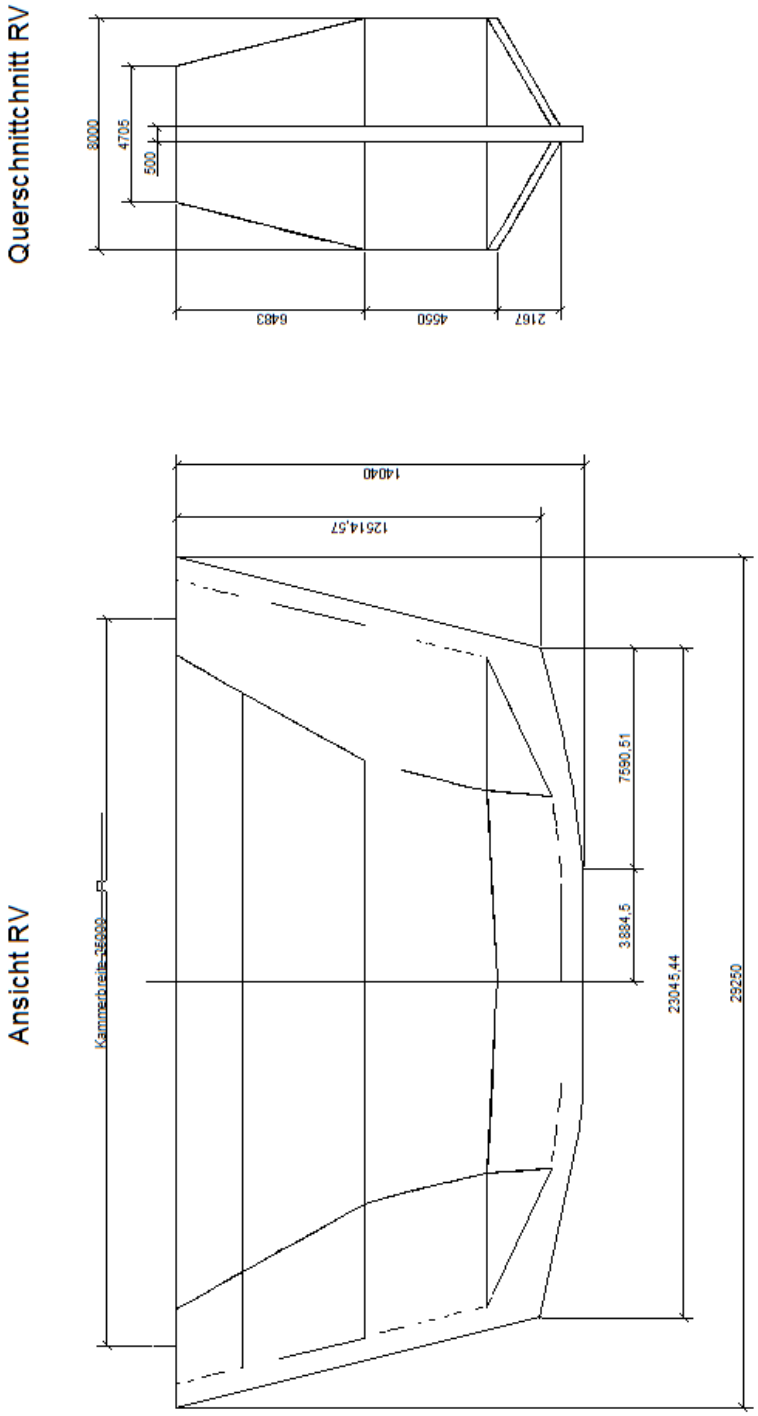


Abbildung 5 Abmessungen des RV-Verschlusses

2.4. Lagerung Modell 2 (Adapterkonstruktion)

Die Freiheitsgrade der Lager von Modell 2 können folgender Tabelle entnommen werden.

Lager Nr.	u_x	u_y	u_z	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z	Ausfall falls:	Kommentar
1	o	o	x	o	o	o	- u_z positiv	Es wurde aus nummerischen Gründen Reibung in x-y-Richtung mit dem Reibbeiwert μ_0 angesetzt.

Legende:

o = frei

x = fest

Für das Modell 2 muss nur das **Flächenlager Nr. 1** (in Abbildung 6 rot markiert) modelliert werden, da sich Flächenlager in RFEM immer auf das lokale Achsensystem der jeweiligen Fläche beziehen. So kann mit einem Lagertyp das komplette Modell gelagert werden.

Die Flächenlager wurden für Belastung in + y – Richtung entlang der Flachdichtung zwischen Massivbau und Adapterkonstruktion sowie für Belastung in + z – Richtung an der Sohle des Hohlkastens modelliert. Die Flächenlager seitlich an den Kragarmen sind aufgrund der Symmetrischen Belastung ausschließlich in y-Richtung nummerische Lager. (siehe Abbildung 6).

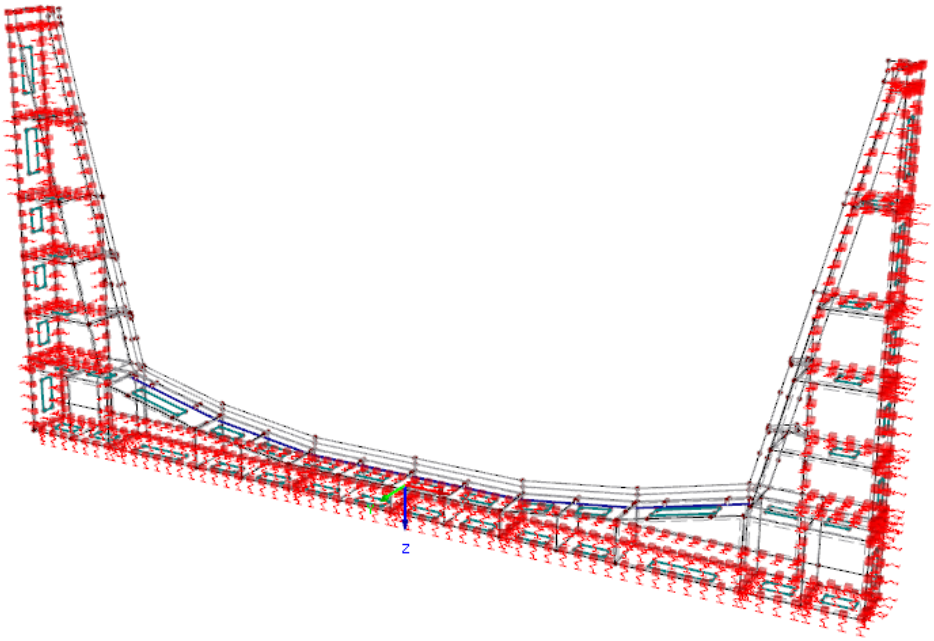


Abbildung 6 Flächenlager Nr. 1 Modell 2 (Adapterkonstruktion)

2.5. Querschnitte und Abmessungen Modell 2

In den folgenden Abbildungen können die Blechdicken der Adapterkonstruktion abgelesen werden.

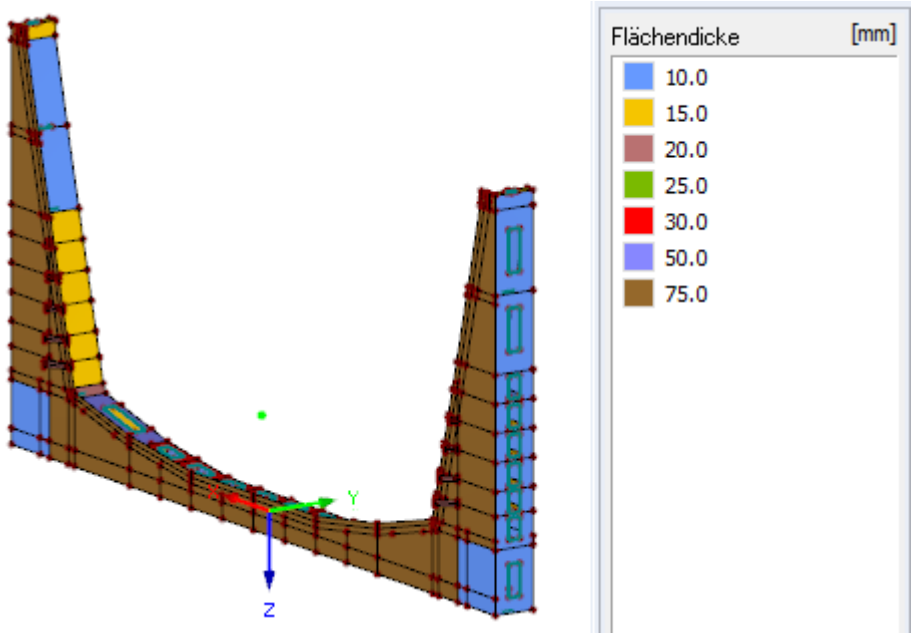


Abbildung 7 Blechdicken der Kragarme und des Hohlkastens (Seite Schleusenkammer)

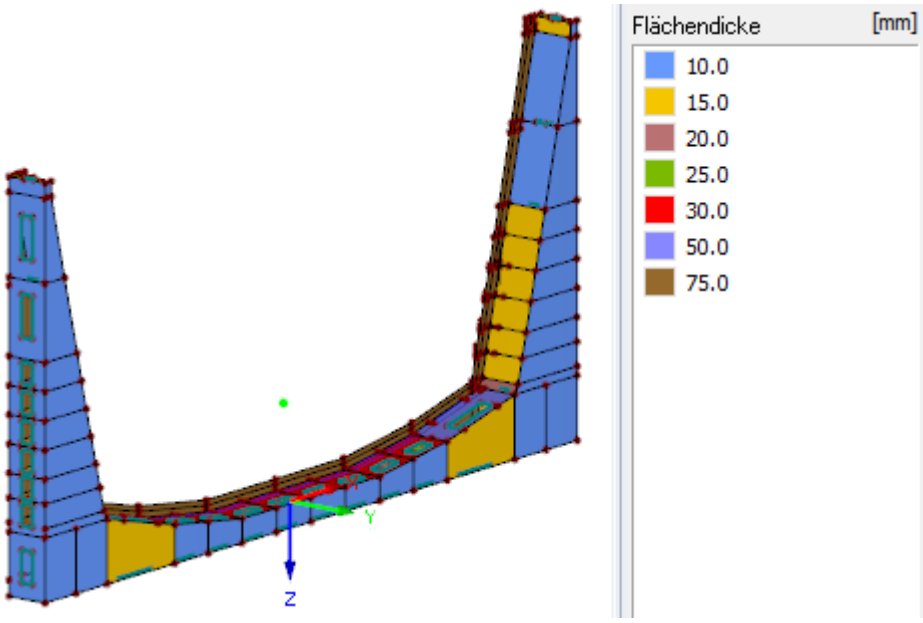


Abbildung 8 Blechdicken der Kragarme und des Hohlkastens (Seite Ostsee)

Um die sehr großen Lasten in +z-Richtung aus dem Eigengewicht und den Ballasttanks des RV-Verschlusses auffangen zu können, wurde direkt unter dessen Angriffspunkt eine Trapezsteife eingesetzt (Siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

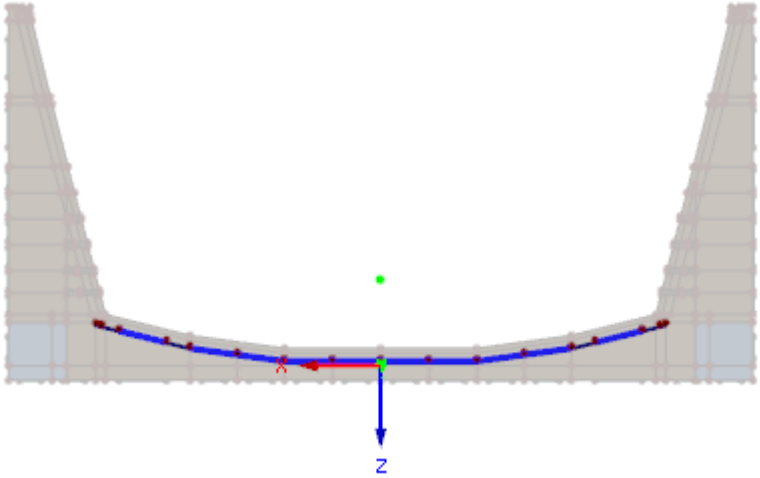


Abbildung 9 Lokalisierung der Trapezsteife

Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Querschnittsfläche	A	66.61	cm^2
Schubfläche	A_u	13.56	cm^2
Schubfläche	A_v	44.37	cm^2
Lage des Schwerpunktes	y_S	0.0	mm
Lage des Schwerpunktes	z_S	115.7	mm
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_y	4943.84	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_z	6058.13	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_{yz}	0.00	cm^4
Hauptachsenwinkel	α	0.00	deg$2
Hauptachsenträgheitsmoment	I_u	4943.84	cm^4
Hauptachsenträgheitsmoment	I_v	6058.13	cm^4
Polares Trägheitsmoment	I_p	11002.00	cm^4
Polares Trägheitsmoment	$I_{p,M}$	35376.10	cm^4
Trägheitsradius	i_y	86.2	mm
Trägheitsradius	i_z	95.4	mm
Trägheitsradius	i_{yz}	0.0	mm
Hauptachsenträgheitsradius	i_u	86.2	mm
Hauptachsenträgheitsradius	i_v	95.4	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	128.5	mm
Polarer Trägheitsradius	$i_{p,M}$	230.5	mm
Wölbträgheitsradius	$i_{\omega,M}$	9.2	mm
Querschnittsgewicht	G	52.3	kg/m

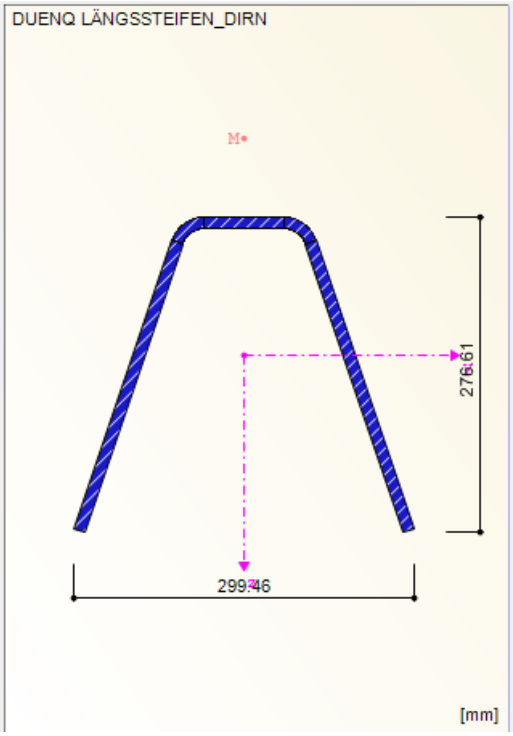


Abbildung 10 Querschnittswerte Trapezsteife (t = 10mm)

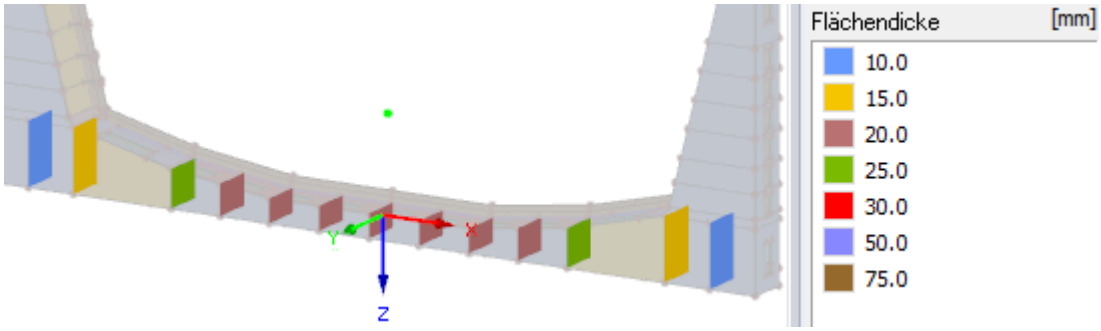


Abbildung 11 Blechdicke der Querschotte im Hohlkasten

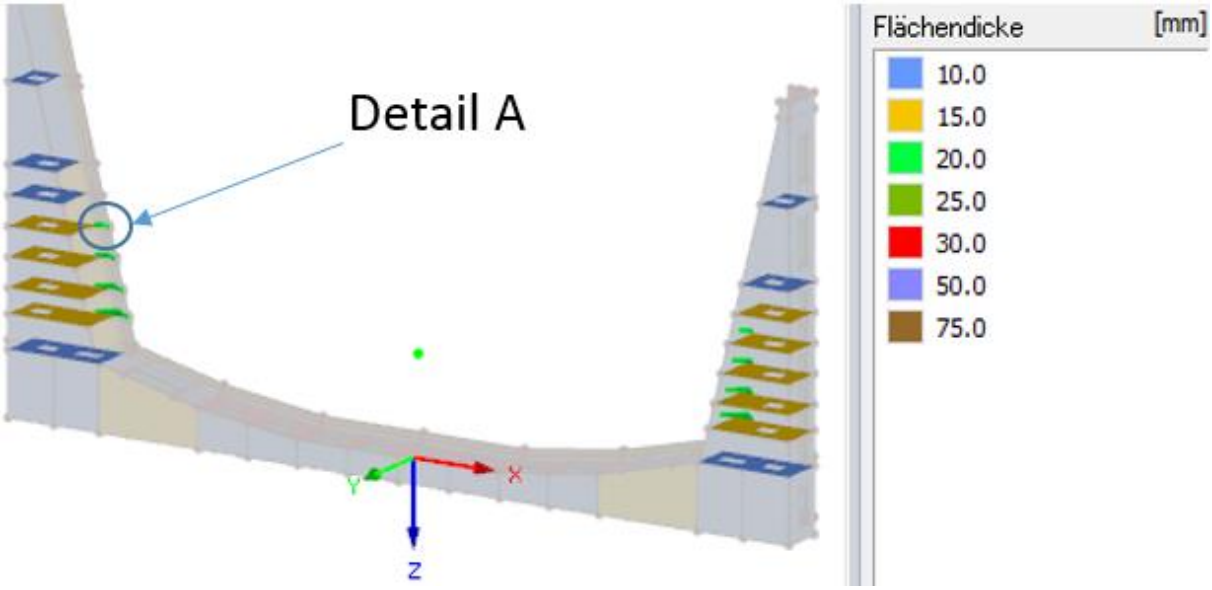


Abbildung 12 Blechdicke der Längsschotte in den Kragarmen

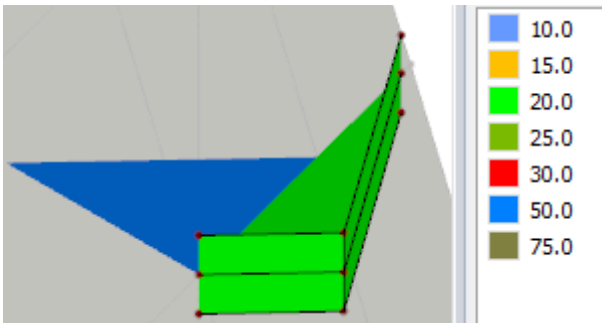


Abbildung 13 Detail A: Blechdickem der Steifen

Die Abmessungen der gesamten Tragstruktur der Adapterkonstruktion können folgender Abbildung entnommen werden.

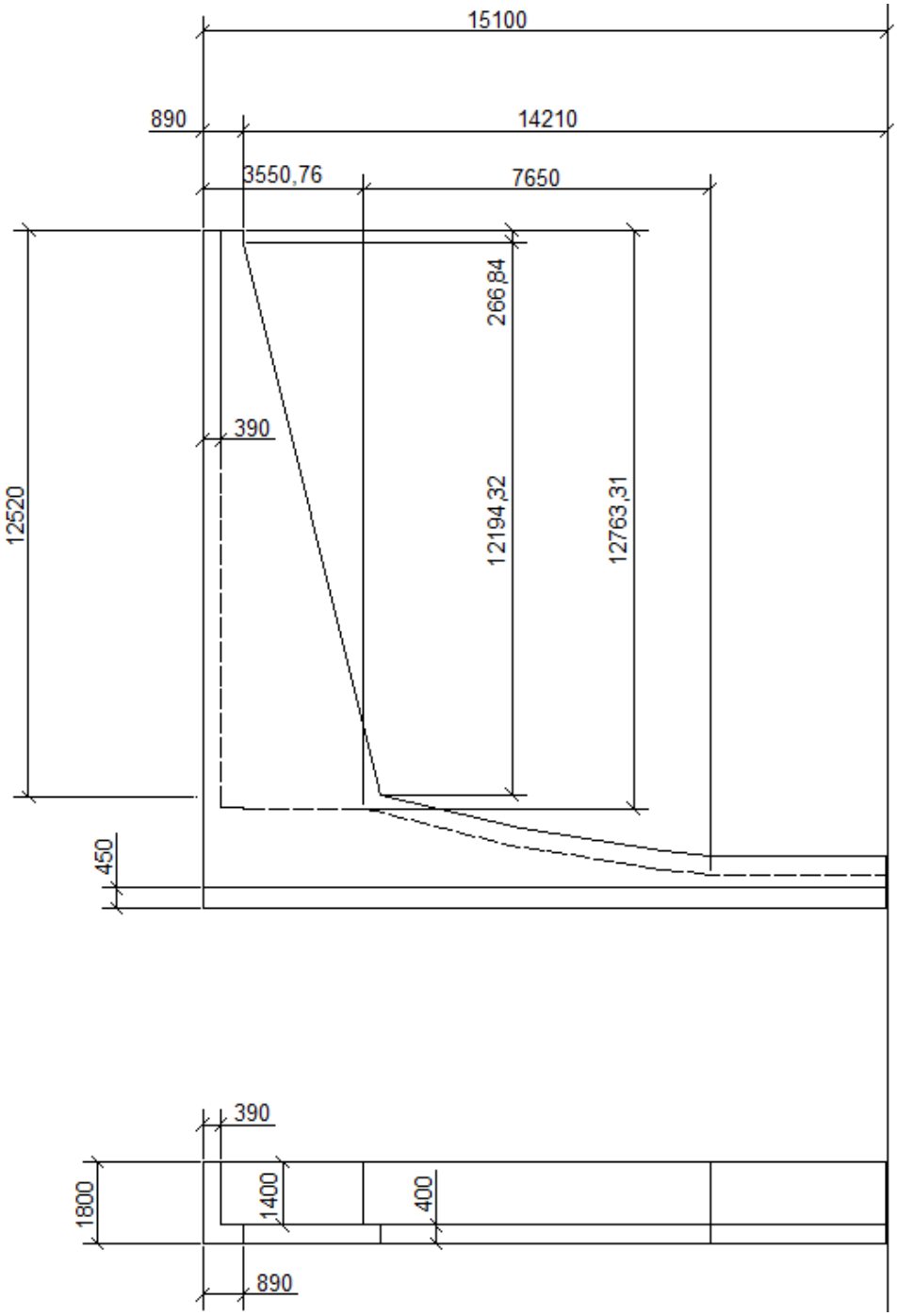


Abbildung 14 Abmessungen der Adapterkonstruktion

3. Belastung

3.1. Lastfälle

Anmerkung: In den Modellen 1 und 2 wurden, um die Dokumentation zu erleichtern, die gleichen Belastungen mit unterschiedlichen Lastfällen abgebildet. Die folgende Auflistung orientiert sich an den Lastfällen von Modell 2 (Adapterkonstruktion).

3.1.1. LF1 Eigengewicht

Da für das **Modell 1** (RV-Verschluss) nur die Stauhaut abgebildet wird, (Aussteifungen etc. werden vernachlässigt) muss das Eigengewicht aus der Bestandsstatik von Herrn Benjamin Rueckert (Fa. WTM Engineers) „Revisionsverschlüsse Kleine Schleusen NOK“ vom Februar 2010 entnommen werden.

Eigengewicht Stahl
Gem. Vorermittlung inkl. Ausrüstung gesamt: ~ 2.500 kN
Ansatz auf das (halbe) Modell: 1.250 kN

Ständiger Ballast
Gem. Vorermittlung gesamt:
Masseln: ~ 1.425 kN
Beton : ~ 1.025 kN
Σ = 2.500 kN
Ansatz auf das (halbe) Modell: 1.250 kN

Wassserballast (zum Absenken in den Einbauzustand)
Ermittlung des erforderlichen Ballastwassers:
Sicherheit gegen Aufschwimmen: 1,1
Volumen des geschlossenen Körpers inkl. Außenhaut: ~ 1.300 m^3
Auftrieb: 1.300 * ~ 10 = 13.000 kN
Erforderlicher Wasserballast:
[13.000 – (2.500 + 2.500)] * 1,1 = 8.800 kN
Ansatz auf das (halbe) Modell: 4.400 kN

Abbildung 15 Auszug aus „Revisionsverschlüsse Kleine Schleusen NOK“ vom Februar 2010

In Summe ergeben sich **13 800 kN** als Gesamtgewicht.
Die Flächen des RV-Verschlusses werden mit einer Blechstärke von 180mm modelliert um genügend Steifigkeit zu erzeugen.
Das sich daraus ergebende Gesamtgewicht kann aus Abbildung 16 entnommen werden.

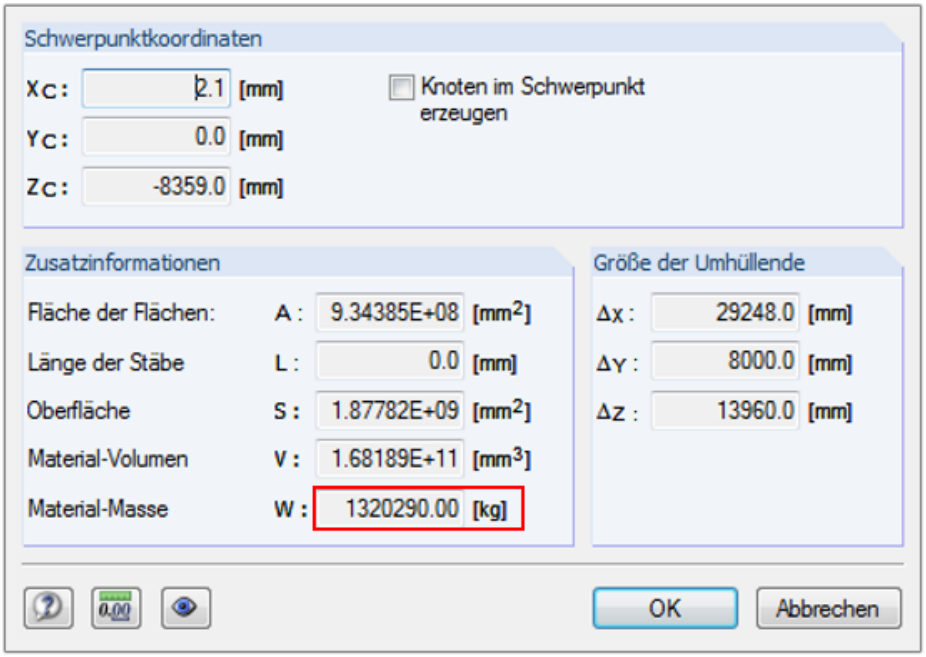


Abbildung 16 Programminformation bzgl. der Masse des Modell 1

Um die aus der Bestandsstatik entnommenen 13 800 kN erreichen zu können wurde der Lastfall Eigengewicht im Modell 1 (RV-Verschluss) mit folgenden Faktor multipliziert.

$$x = \frac{13800\ kN}{13202{,}90\ kN} \approx 1{,}05$$

Das Eigengewicht der Adapterkonstruktion (**Modell 2**) wird vom Programm RFEM 5.04 eigens ermittelt und mit einem Aufschlag von 10% für anhaftende Verschmutzung, Beschichtung, Bewuchs und Eis nach DIN 19704 (2014) – 1; Kap. 5.1. und zusätzlich mit 5% für nicht berücksichtigte Verbindungselemente etc. versehen. Das spezifische Gewicht der Stahlbauteile beträgt 78 kN/m³. Die Wichte unter Auftrieb wird auf der sicheren Seite nicht angesetzt.

Zudem werden für das Modell 2 die Lagerreaktionen (aus dem Lastfall Eigengewicht) des Modell 1 als Linienlasten angesetzt. Um die senkrecht auf die Adapterkonstruktion wirkenden Lagerreaktionen ermitteln zu können, wurde das in Abbildung 17 rot markierte Linienlager vorübergehend modelliert.

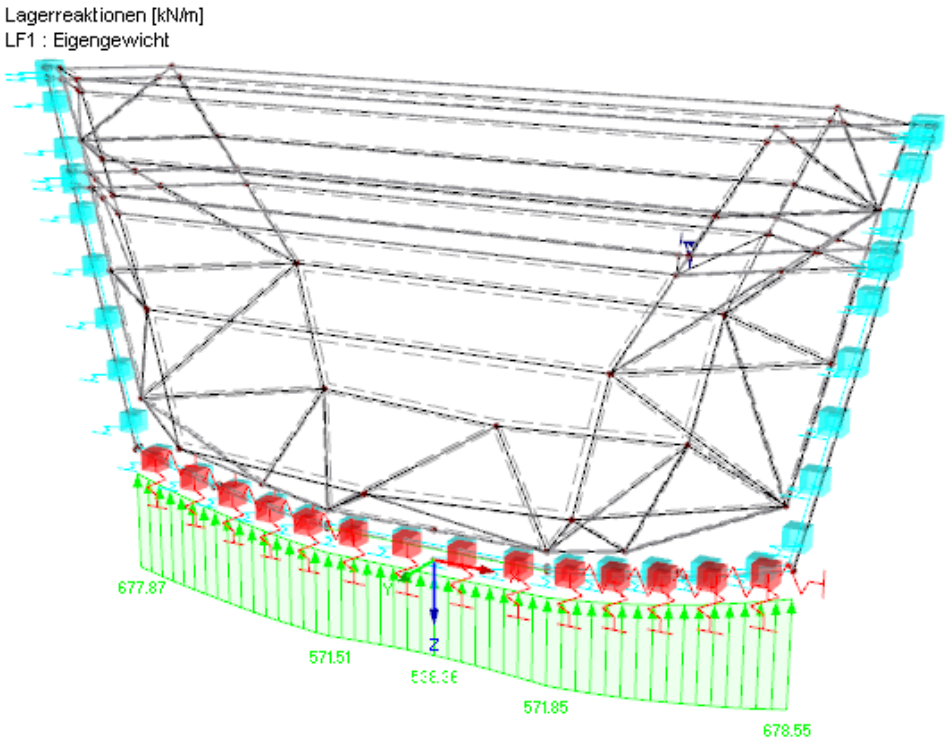


Abbildung 17 Lagerreaktionen Modell 1 LF1 Eigengewicht

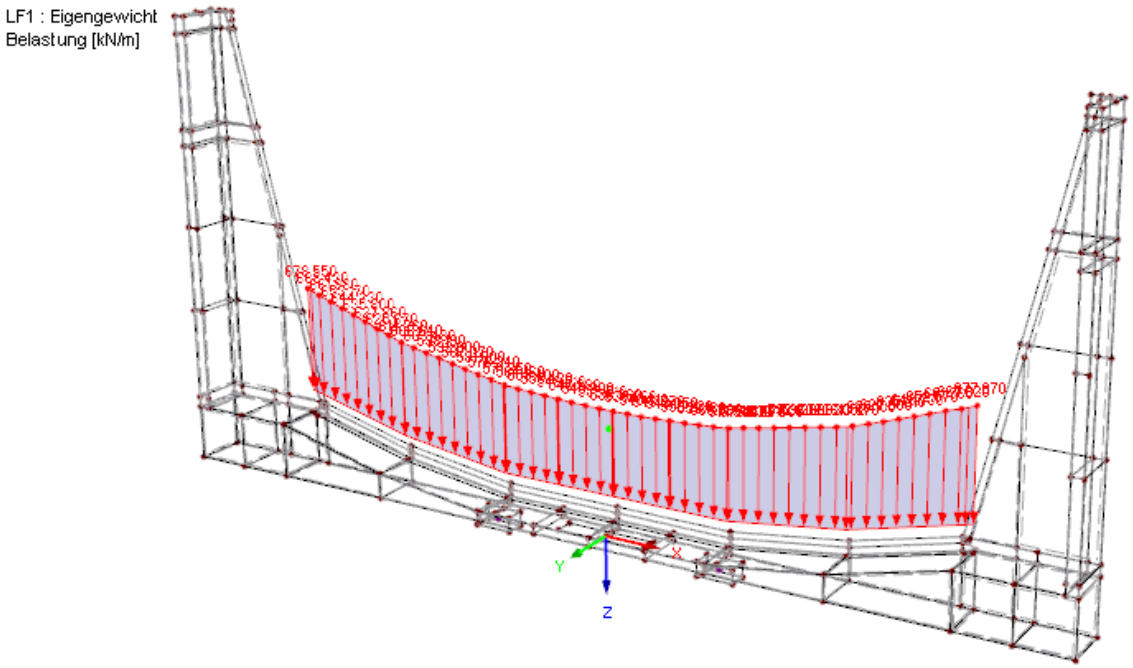


Abbildung 18 Lastantrag LF1 Eigengewicht

3.1.2. LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau)

Die Last wirkt mit einer Wichte von γ_W = 10,40 kN/m³ (Seewasser) senkrecht auf die Stauwand. In Abhängigkeit von der Tiefe z [m] ergibt sich ein Wasserdruck von:

γ_W [kN/m³] * z [m] = q_W [kN/m²]

<u>Geometriedaten der Hauptbereiche der Nord- und Südkammer</u>

<u>Außenhaupt</u>

OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

<u>Binnenhaupt</u>

OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

<u>Wasserstand NOK</u>

HKW	NN + 0,50 m
MKW	NN ± 0,00 m
NKW	NN - 1,00 m

Auf der sicheren Seite liegend wird die maximale Amplitude des Wasserstands von +0,5 m gewählt.

z = 10,50 m + 0,50 m = 11,00 m

Der Wasserdruck an der Sohle ergibt sich zu:

10,40 * 11,00 m = 110,0 kN/m² ≈ 115,0 kN/m²

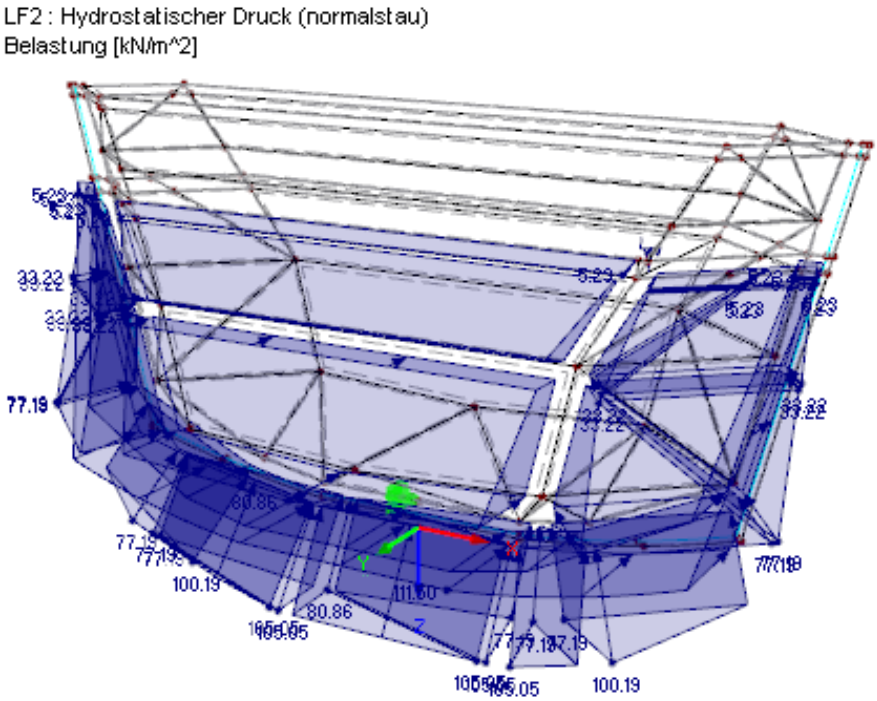


Abbildung 19 Lastansatz LF2 hydrostatischer Druck (Normalstau) Modell 1

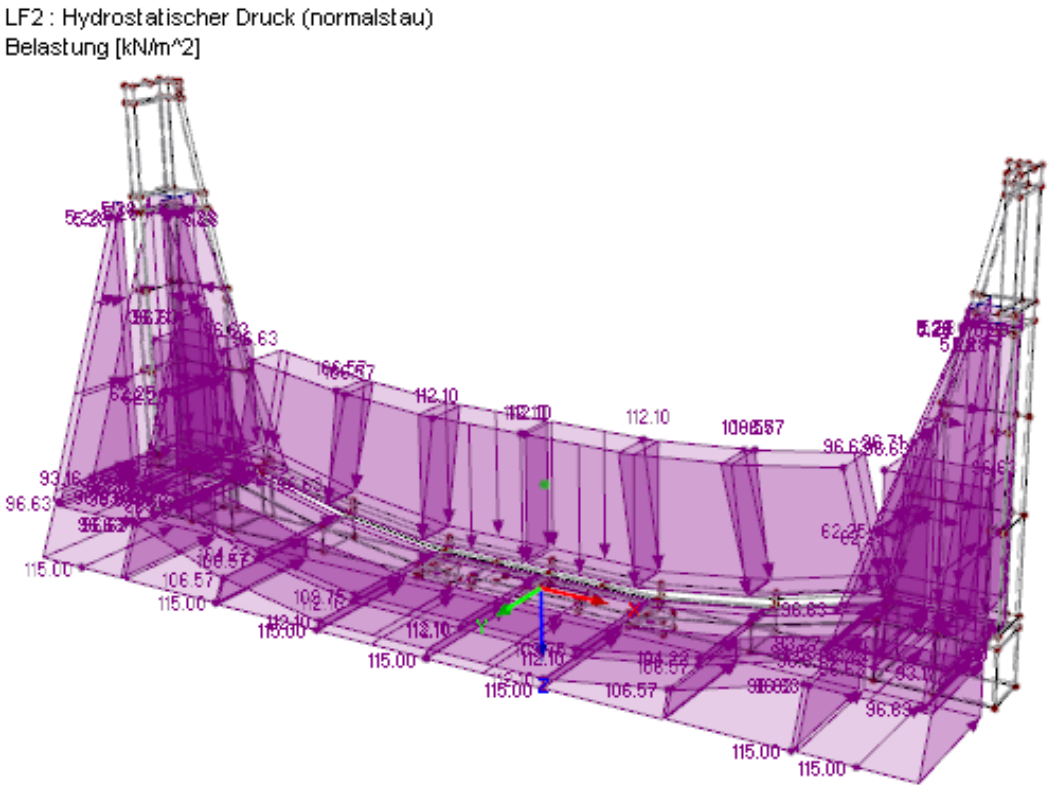


Abbildung 20 Lastansatz LF2 hydrostatischer Druck (Normalstau) Modell 2

3.1.3. LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau aus RV-Verschluss)

Um die Lasten des RV-Verschlusses in die Adapterkonstruktion einleiten zu können wurden die maximalen Linienlagerkräfte im Bereich der Flachdichtung des RV-Verschlusses als Linienlasten auf die Adapterkonstruktion angesetzt.

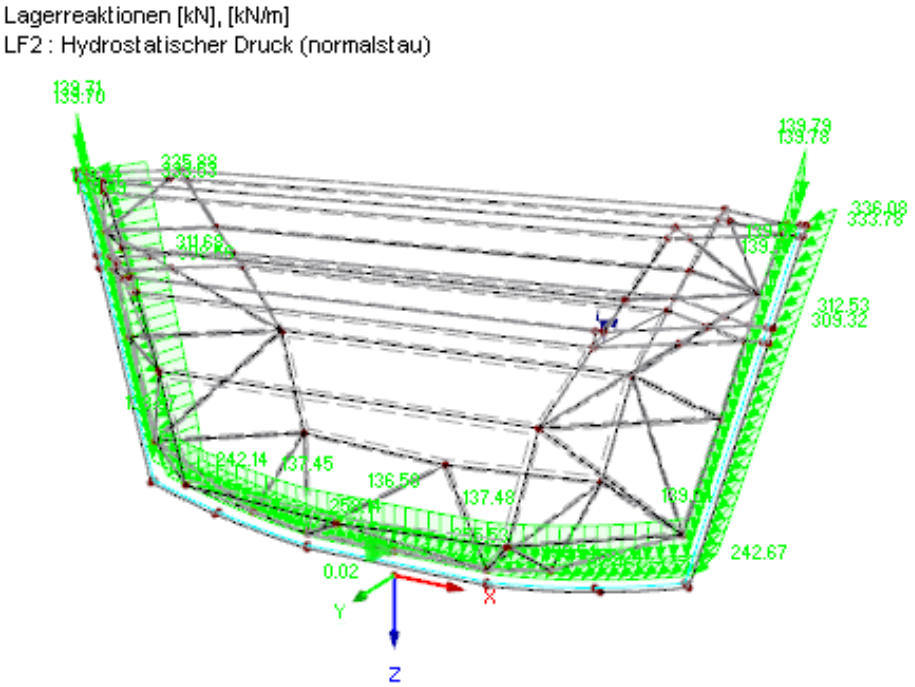


Abbildung 21 Lagerreaktionen LF2 hydrostatischer Druck Modell 1

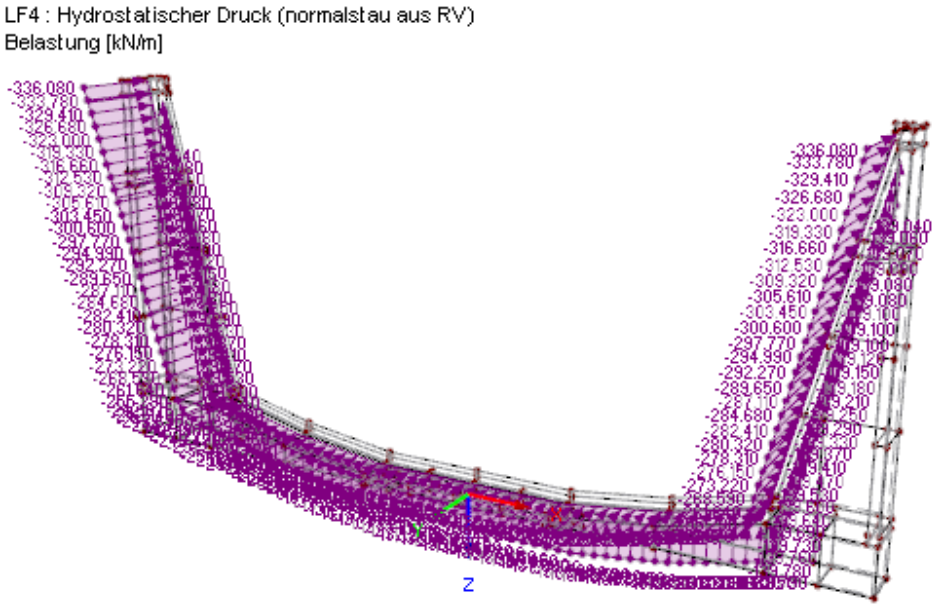


Abbildung 22 Lastansatz LF4 hydrostatischer Druck Modell 2

3.1.4. LF6 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe)

Die Last wirkt mit einer Wichte von γ_W = 10,40 kN/m³ (Seewasser) senkrecht auf die Stauwand. In Abhängigkeit von der Tiefe z [m] ergibt sich ein Wasserdruck von:

γ_W [kN/m³] * z [m] = q_W [kN/m²]

<u>Geometriedaten der Hauptbereiche der Nord- und Südkammer</u>

<u>Außenhaupt</u>

OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

<u>Binnenhaupt</u>

OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

<u>Wasserstand Kieler Förde</u>

HHW	NN +3,47 m
NNW	NN -2,29 m

Auf der sicheren Seite liegend wird die maximale Amplitude des Wasserstands von +3,47 m gewählt.

z = 10,50 m + 3,47 m = 13,97 m

Der Wasserdruck ergibt sich zu:

10,40 * 13,97 m = 139,7 kN/m² ≈ 145,0 kN/m²

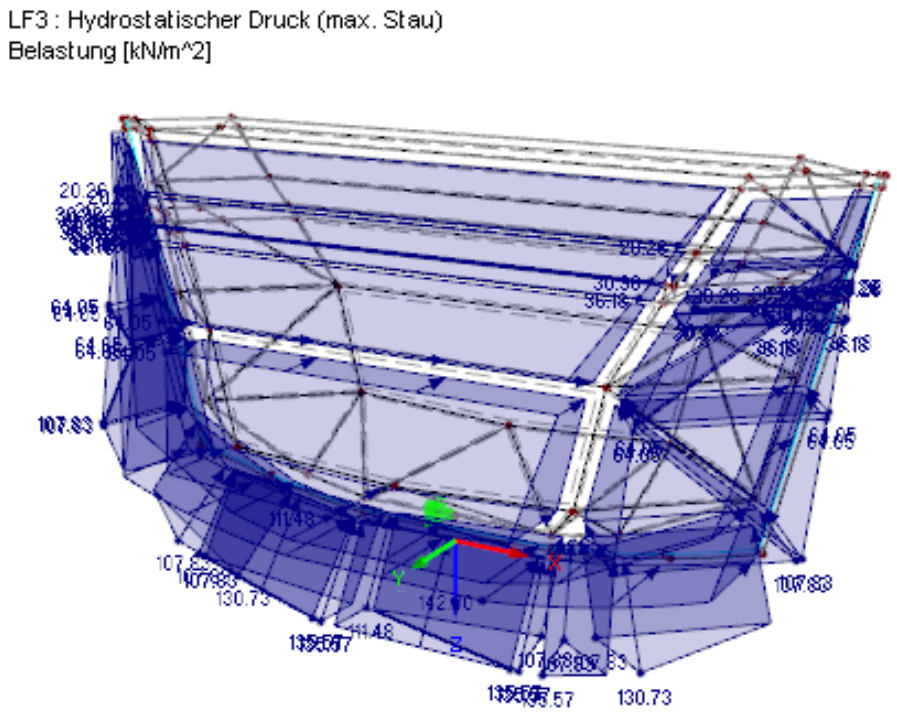


Abbildung 23 **Lastansatz LF3 hydrostatischer Druck (max. Stau) Modell 1**

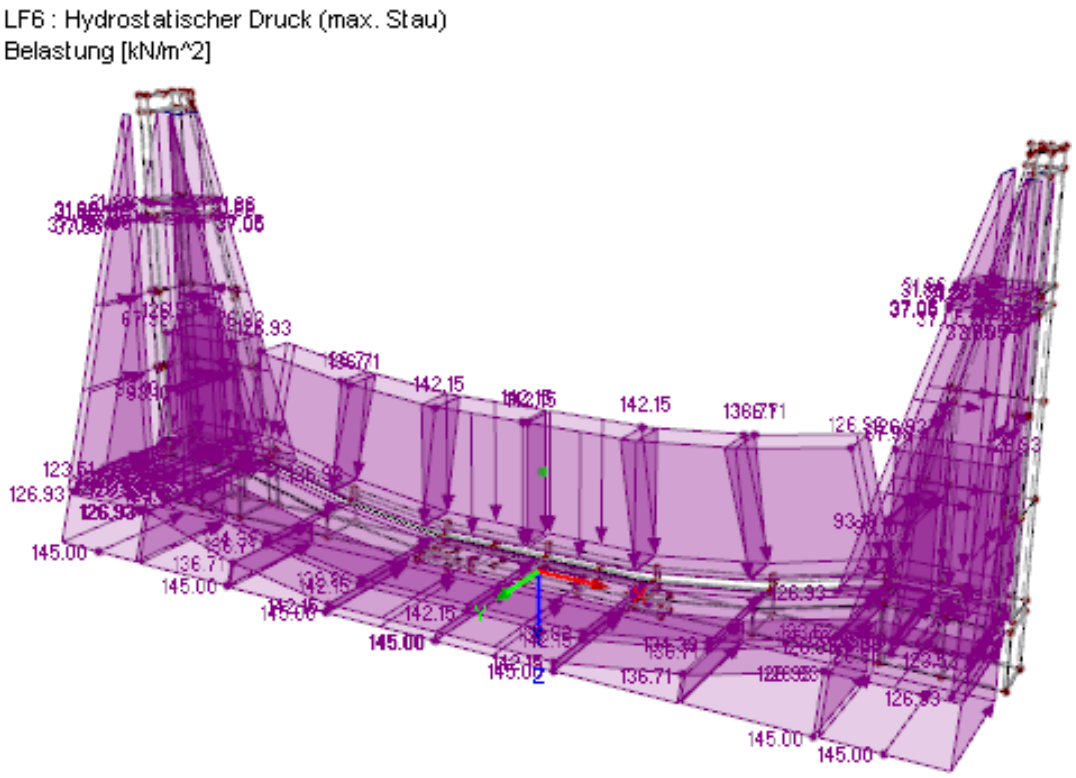


Abbildung 24 **Lastansatz LF6 hydrostatischer Druck (max. Stau) Modell 2**

3.1.5. LF8 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe aus RV-Verschluss)

Um die Lasten des RV-Verschlusses in die Adapterkonstruktion einleiten zu können wurden die Linienlagerkräfte im Bereich der Flachdichtung des RV-Verschlusses als Linienlasten auf die Adapterkonstruktion angesetzt.

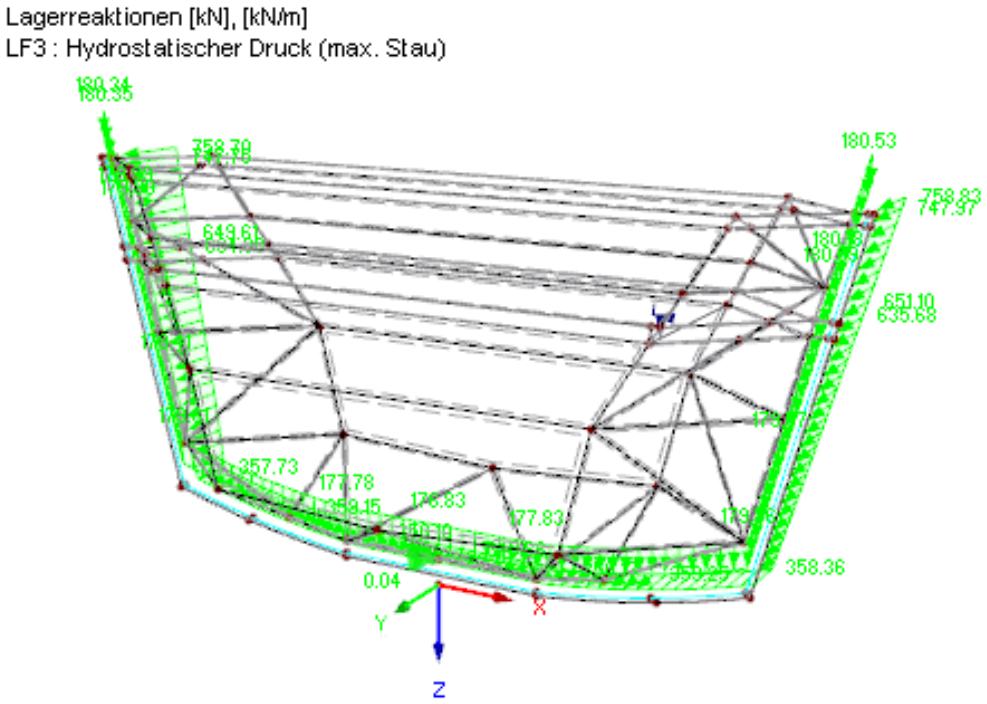


Abbildung 25 Lagerreaktionen LF3 hydrostatischer Druck Modell 1

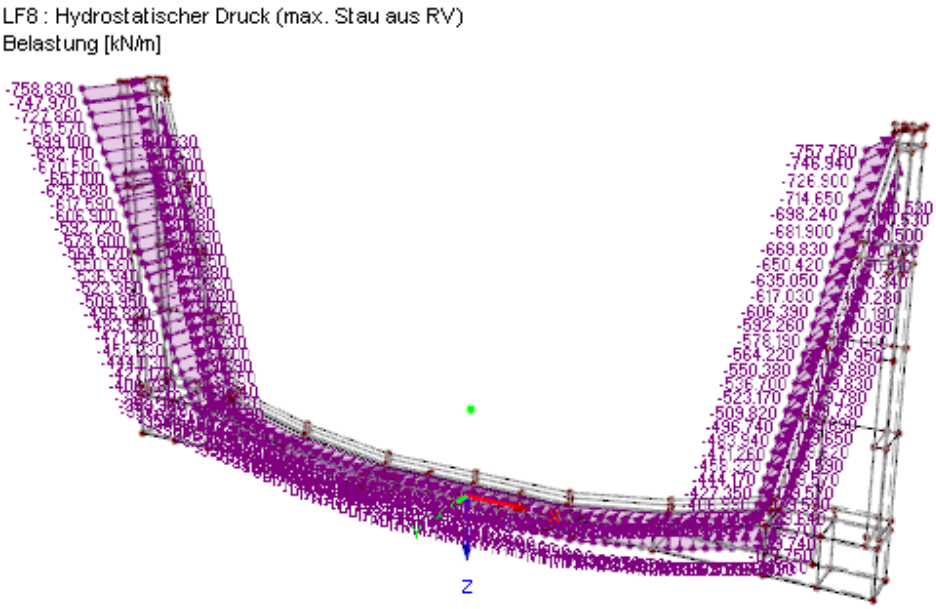
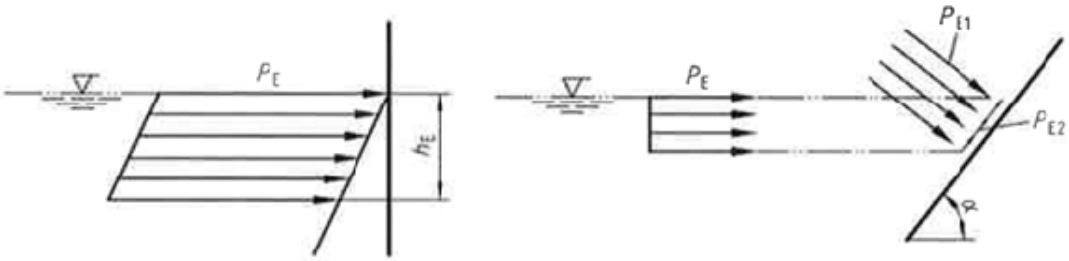


Abbildung 26 Lastansatz LF8 hydrostatischer Druck Modell 2

3.1.6. LF10 Eis auf Normalstau

Der Eisdruck wird nach DIN 19704-1 Abschnitt 5.2.5 mit 250 kN/m² über eine Höhe von 500 mm (Küstengebiet) angesetzt. Diese 250 kN/m² dürfen nach DIN 19704-1 Abschnitt 5.2.5 um 50% reduziert werden, da es sich um einen Revisionsverschluss handelt.



Legende
$\alpha > 0$
$p_{E1} = p_E \sin \alpha$
$p_{E2} = \mu\, p_E \cos \alpha$

Abbildung 27 Berechnung des Eisdruckes nach DIN 19704-1

$\alpha := 75.74°$

$\alpha_P := \alpha \cdot \frac{\pi}{180}$

$\mu_P := 0.1$

$P_E := 0.5 \cdot 250 \frac{kN}{m^2}$ $\qquad P_E = 125 \frac{kN}{m^2}$

$P_{E1} := P_E \cdot \sin(\alpha)$

$P_{E2} := \mu_P \cdot P_E \cdot \cos(\alpha)$

$P_{E1} = 121.148 \cdot \frac{kN}{m^2}$ $\qquad P_{E2} = 3.079 \cdot \frac{kN}{m^2}$

$P_{E1} \approx 125$ kN/m² $\qquad P_{E1} \approx 5{,}0$ kN/m²

Die Belastung aus Eisdruck wurde folgendermaßen angetragen:

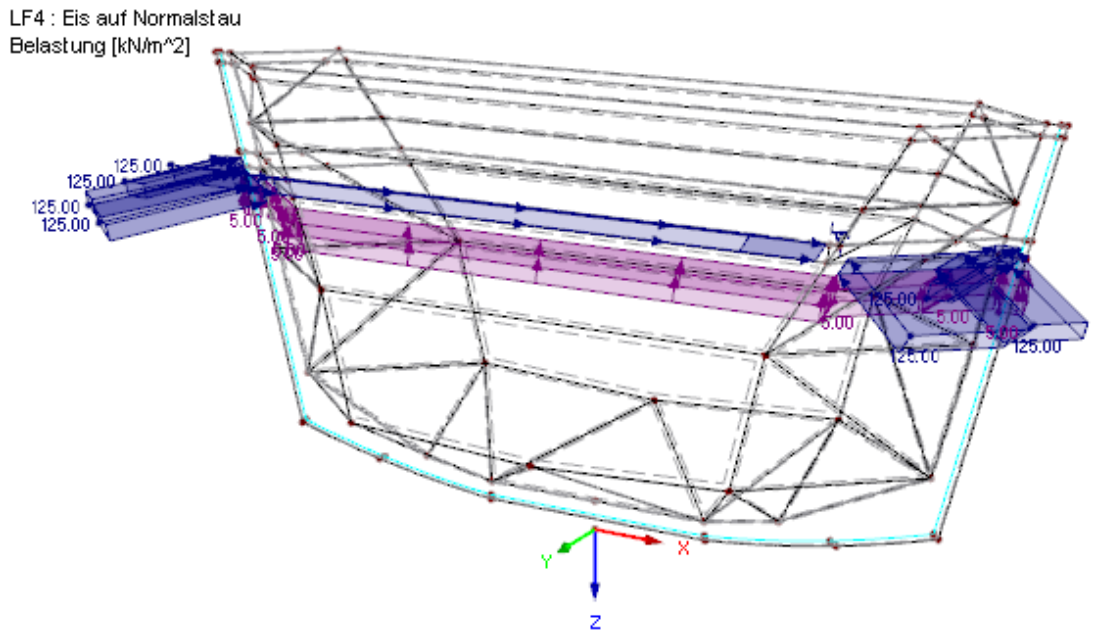


Abbildung 28 Lastansatz LF4 Eisdruck Modell 1

Um die Lasten des RV-Verschlusses aus Eisdruck in die Adapterkonstruktion einleiten zu können wurden die Linienlagerkräfte im Bereich der Flachdichtung des RV-Verschlusses als Linienlasten auf die Adapterkonstruktion angesetzt. Der zusätzlich entstehende Eisdruck auf die Adapterkonstruktion wurde direkt in den Lastfall eingearbeitet (siehe Abbildung 30).

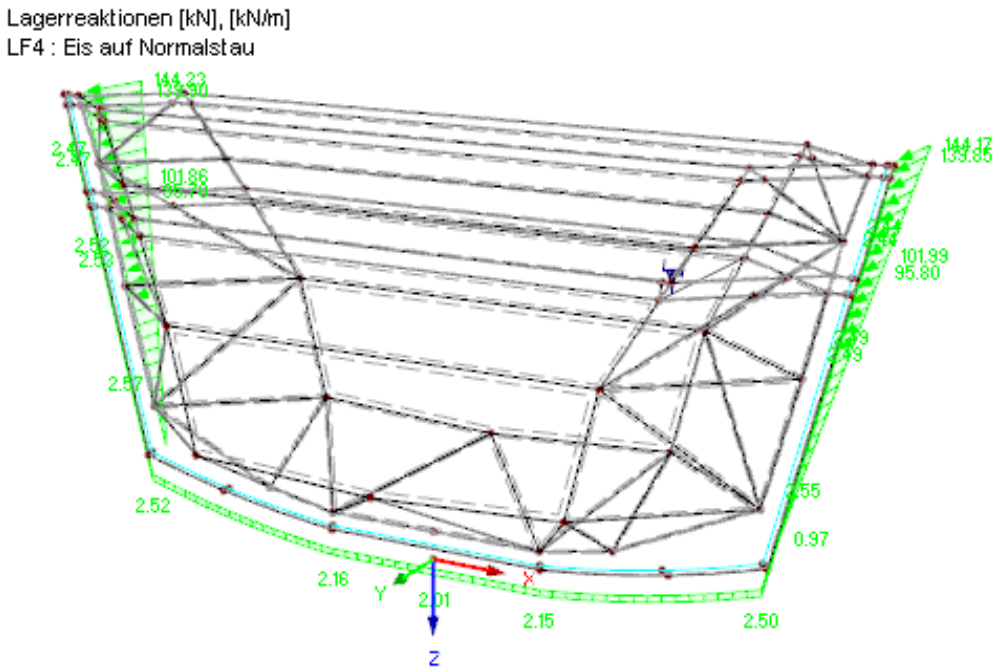


Abbildung 29 Lagerreaktionen LF4 Eisdruck Modell 1

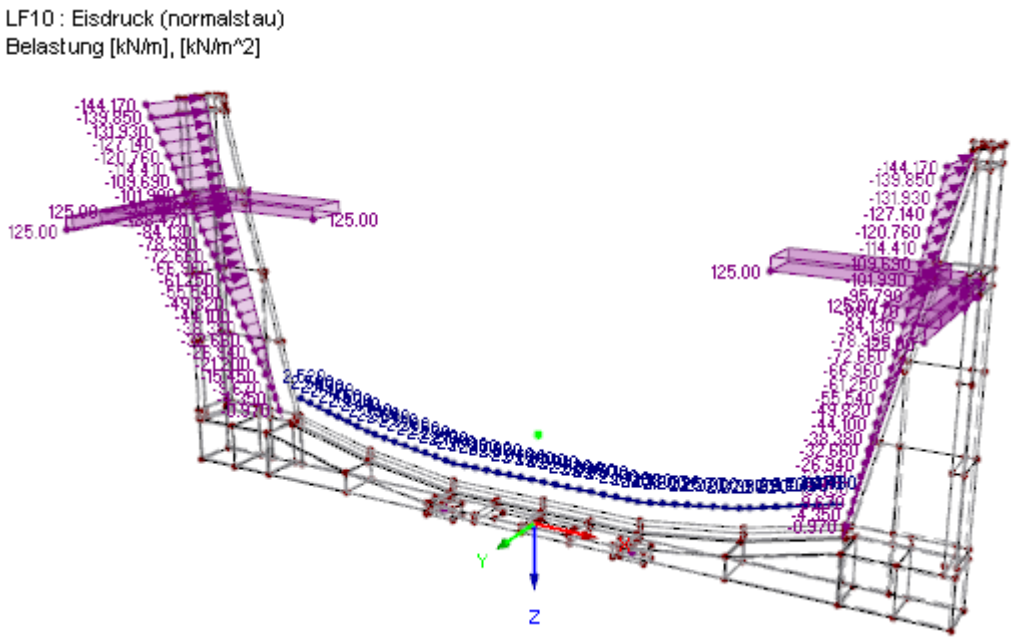


Abbildung 30 Lastansatz LF10 Eisdruck Modell 2

3.2. Lastfallkombinationen

Die folgend aufgeführten Lastfallkombinationen gelten ausschließlich für Modell Nr. 2. In Modell Nr. 1 wurden keine Lastfälle kombiniert.

Standsicherheit

Lastfallkombination LK1 (ständige Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}35$
LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}35$
LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}35$

Lastfallkombination LK2 (ständige Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}35$
LF2 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe)	$\gamma * \psi = 1{,}35$
LF4 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe)	$\gamma * \psi = 1{,}35$

Lastfallkombination LK3 (vorübergehende Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}35$
LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}25$
LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}25$
LF10 Eisdruck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}35$

Verformung

Lastfallkombination LK11 (ständige Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}00$

Lastfallkombination LK12 (ständige Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF2 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe)	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF4 Hydrostatischer Druck (max. Stauhöhe)	$\gamma * \psi = 1{,}00$

Lastfallkombination LK13 (vorübergehende Bemessungssituation)

LF1 Eigengewicht	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF2 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF4 Hydrostatischer Druck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}00$
LF10 Eisdruck (Normalstau)	$\gamma * \psi = 1{,}00$

3.3. Ergebniskombinationen

Die Ergebniskombination EK1 dient der Bemessung der Standsicherheit. Diese wird mit den Lastfallkombinationen mit Teilsicherheitsbeiwerten ≠ 1,00 gefüllt. Alle Lastfallkombinationen werden mit „oder“ eingesetzt, sodass die Ergebniskombinationen die Umhüllende der Spannungen und Lagerkräften bildet.

EK1 (Bemessung der Standsicherheit)

Lastfallkombination LK1	„oder“
Lastfallkombination LK2	„oder“
Lastfallkombination LK3	„oder“

EK2 (Bemessung der Verformung)

Lastfallkombination LK11	„oder“
Lastfallkombination LK12	„oder“
Lastfallkombination LK13	„oder“

4. Berechnungsergebnisse

Folgend werden alle Lagerreaktionen und Spannungen für die Ergebniskombination EK1 ausgewertet. Diese bildet die Umhüllende aller Lastfallkombinationen.

4.1. Auflagerreaktionen / Kontaktspannungen

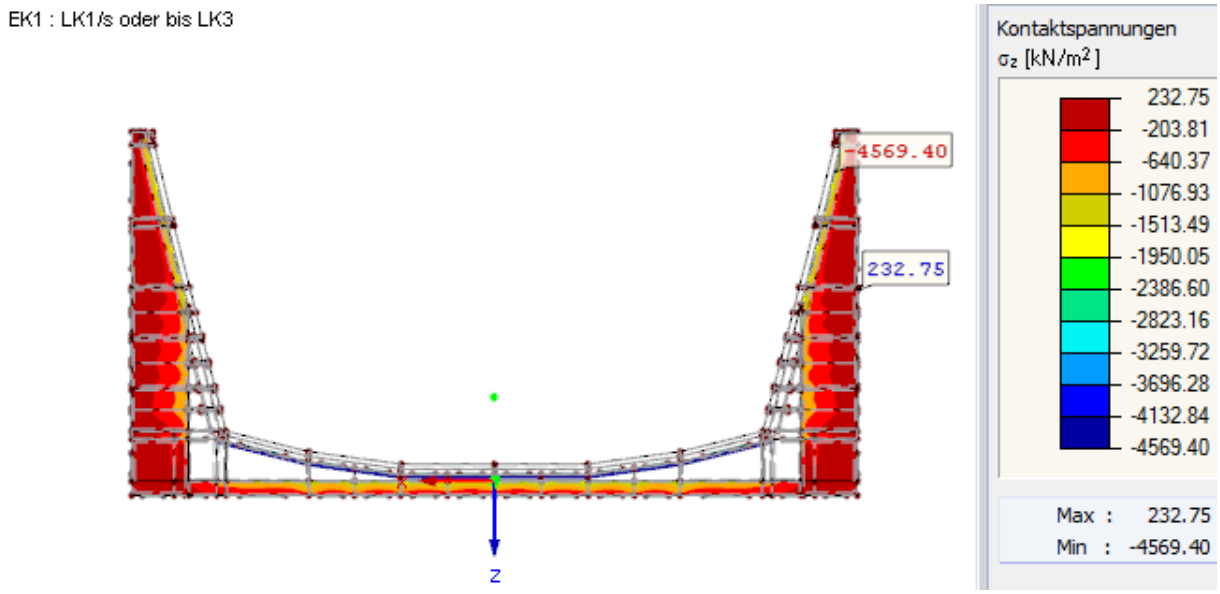


Abbildung 31 Spannungsplot EK1 Kontaktspannungen

Die maximale Kontaktspannung (Pressung) entsteht im Nahbereich der Flachdichtung und beträgt:

$$\sigma_z = 4569{,}40\ \text{kN/m}^2 \approx 4{,}6\ \text{N/mm}^2$$

4.2. Allgemeine Spannungsnachweise

4.2.1. max. Blechdicke t < 16 mm

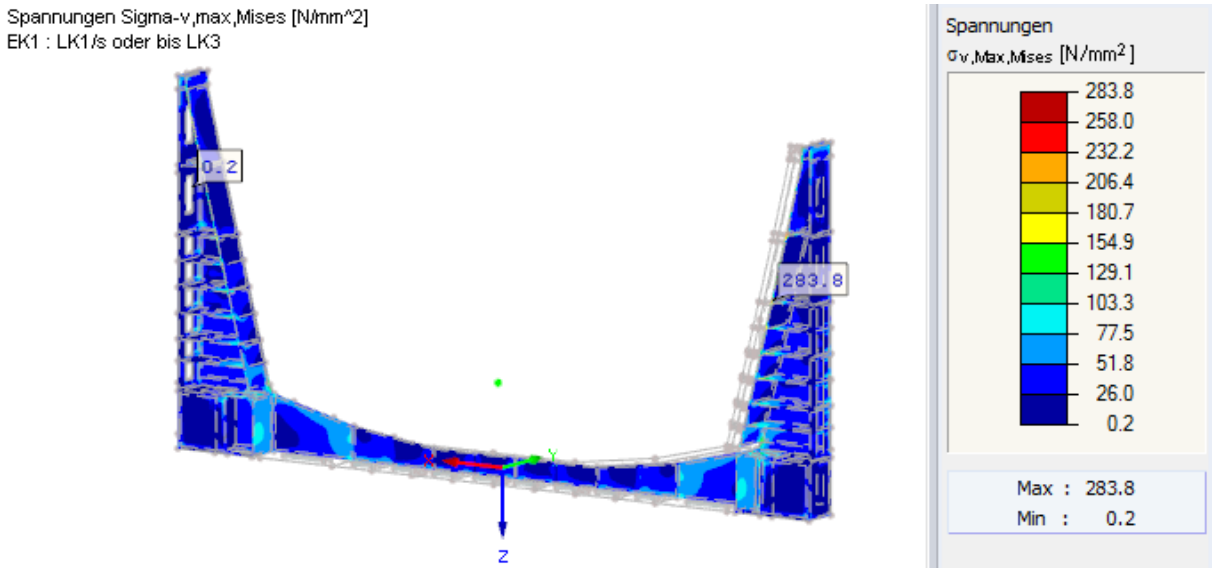


Abbildung 32 Spannungsplot Hohlkasten EK1 (t < 16mm)

Nachweis:

Maximale Blechdicke = 15 mm => $\sigma_{max,Rd}$ = 322,7 N/mm²

Die Bleche sind überwiegend gering ausgelastet. Es treten jedoch FE-Typische Spannungsspitzen auf.

Nachweis: $$\frac{\sigma_{Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{283{,}8\ N/mm^2}{322{,}7\ N/mm^2} = 0{,}88 < 1$$

4.2.2. max. Blechdicke 16 mm < t < 40 mm

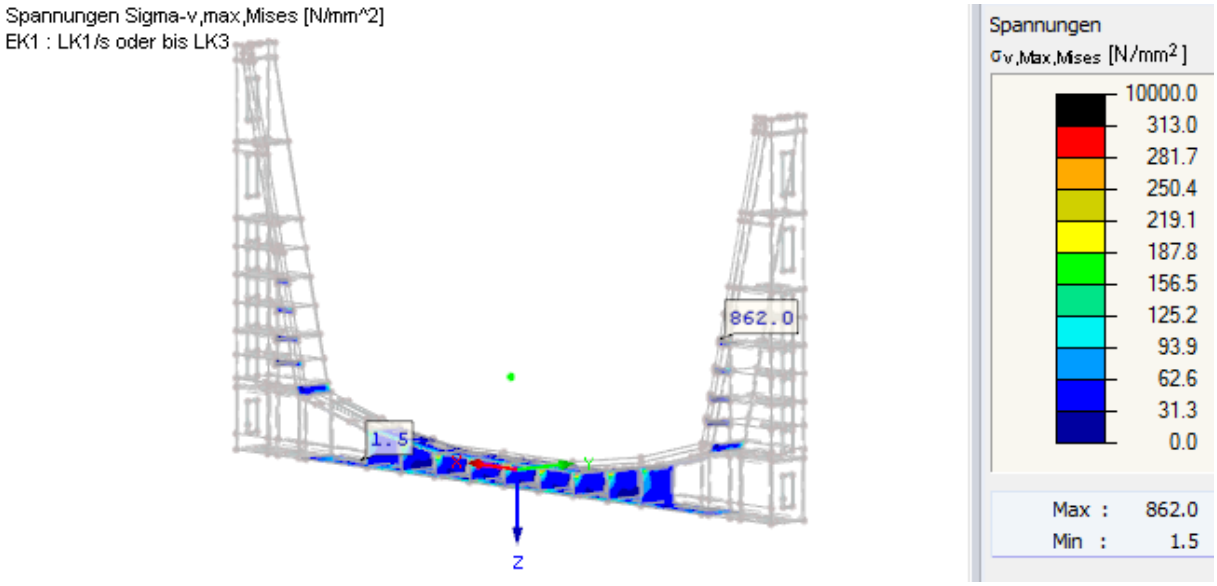


Abbildung 33 Spannungsplot Hohlkasten EK1 (16mm < t < 25mm)

Nachweis:

Maximale Blechdicke = 40 mm => $\sigma_{max,Rd}$ = 313,0 N/mm²

Die Bleche sind überwiegend gering ausgelastet. Es treten jedoch FE-Typische Spannungsspitzen im Bereich der äußeren Steifen (siehe Abbildung 13 - Detail A) auf (siehe Abbildung 34).

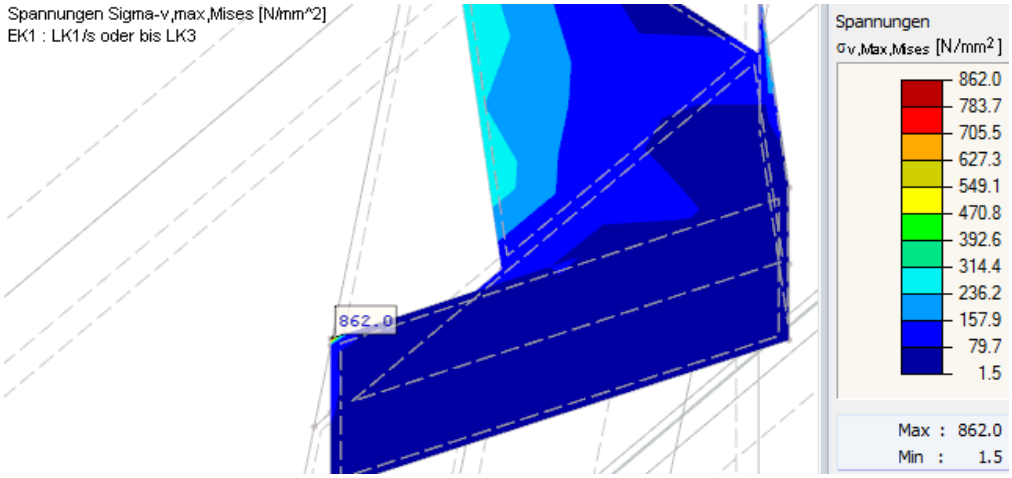


Abbildung 34 FE- Typische Spannungsspitze

4.2.3. max. Blechdicke 40 mm < t < 63 mm

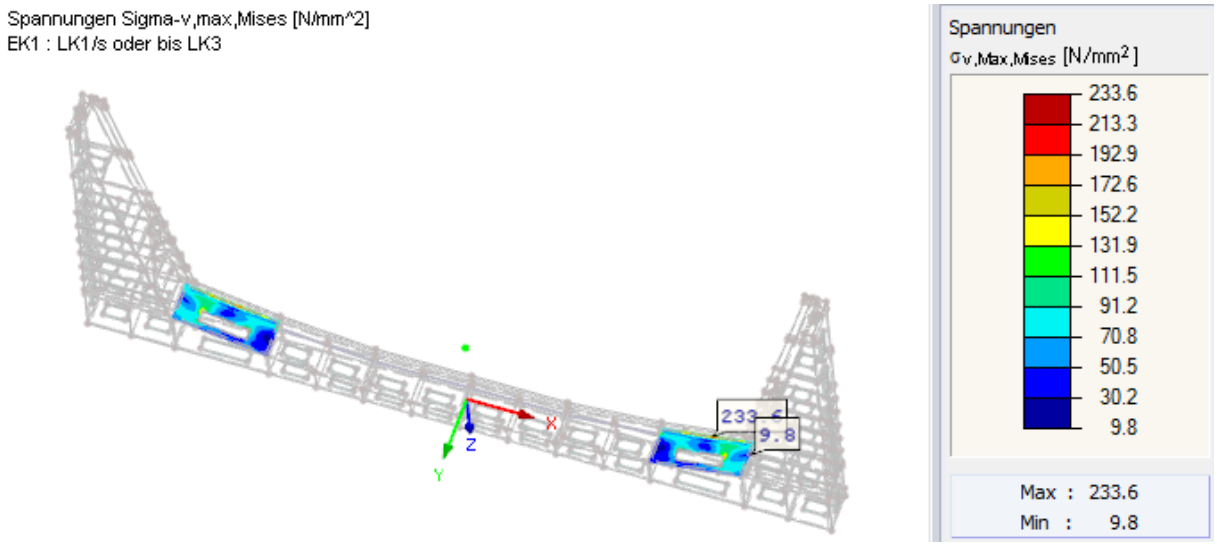


Abbildung 35 Spannungsplot Hohlkasten EK1 (40mm < t < 63mm)

Nachweis:

Maximale Blechdicke = 63 mm => $\sigma_{max,Rd}$ = 304,0 N/mm²

Die Bleche sind überwiegend gering ausgelastet. Es treten jedoch FE-Typische Spannungsspitzen auf.

Nachweis: $$\frac{\sigma_{Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{233{,}6\ N/mm^2}{304{,}0\ N/mm^2} = 0{,}76 < 1$$

4.2.1. max. Blechdicke 80 mm < t < 100 mm

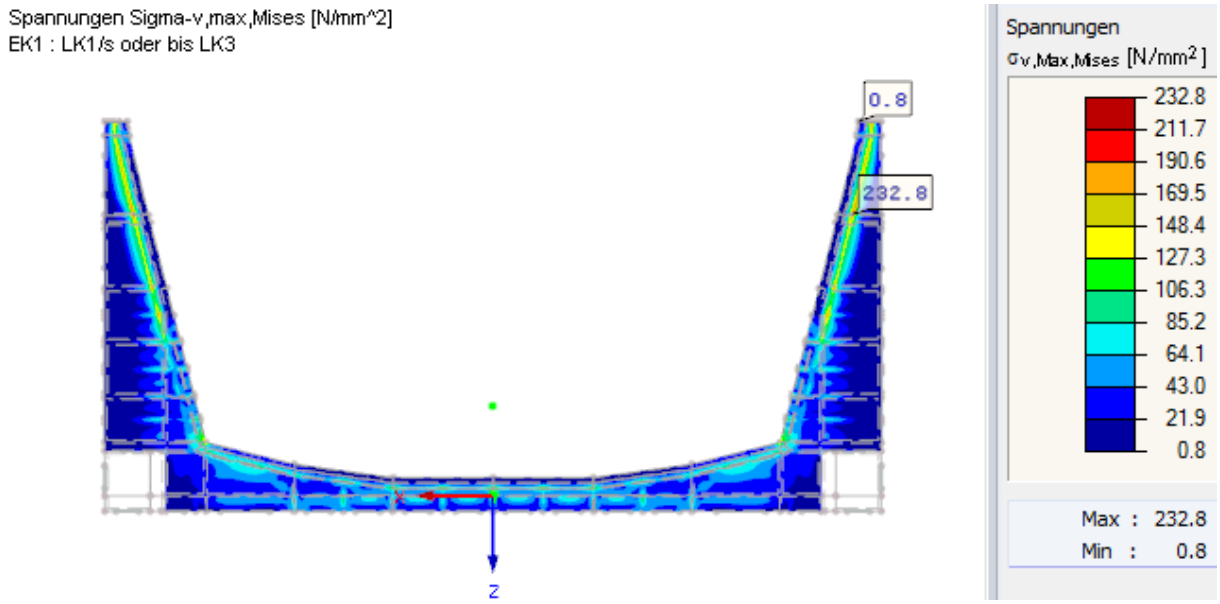


Abbildung 36 Spannungsplot Hohlkasten EK1 (80mm < t < 100mm)

Nachweis:

Maximale Blechdicke = 63 mm => $\sigma_{max,Rd}$ = 286,0 N/mm²

Die Bleche sind überwiegend gering ausgelastet. Es treten jedoch FE-Typische Spannungsspitzen auf.

Nachweis: $$\frac{\sigma_{Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{212{,}8\ N/mm^2}{286{,}0\ N/mm^2} = 0{,}74 < 1$$

4.3. Verformungsnachweise

Sämtliche Verformungsnachweise werden für die EK2 ausgewertet.

4.3.1. Gesamtverformung u

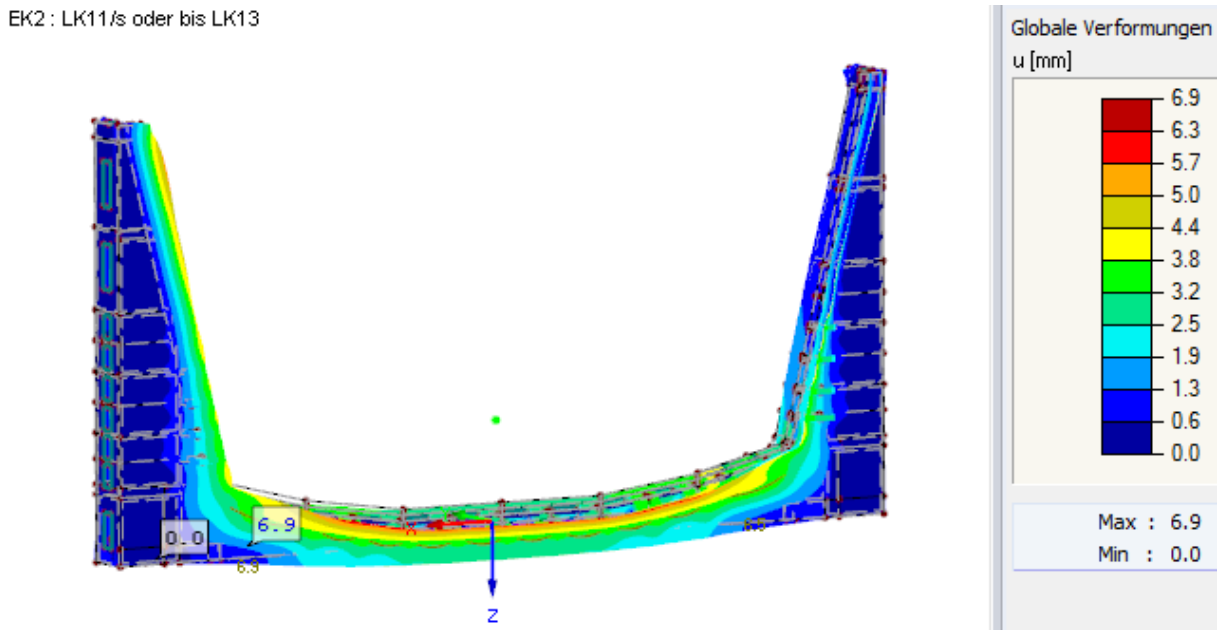


Abbildung 37 Gesamtverformung

Die Verformungen von 6,9 mm werden als verträglich bewertet.

4.3.2. Verformung in x- Richtung u_x

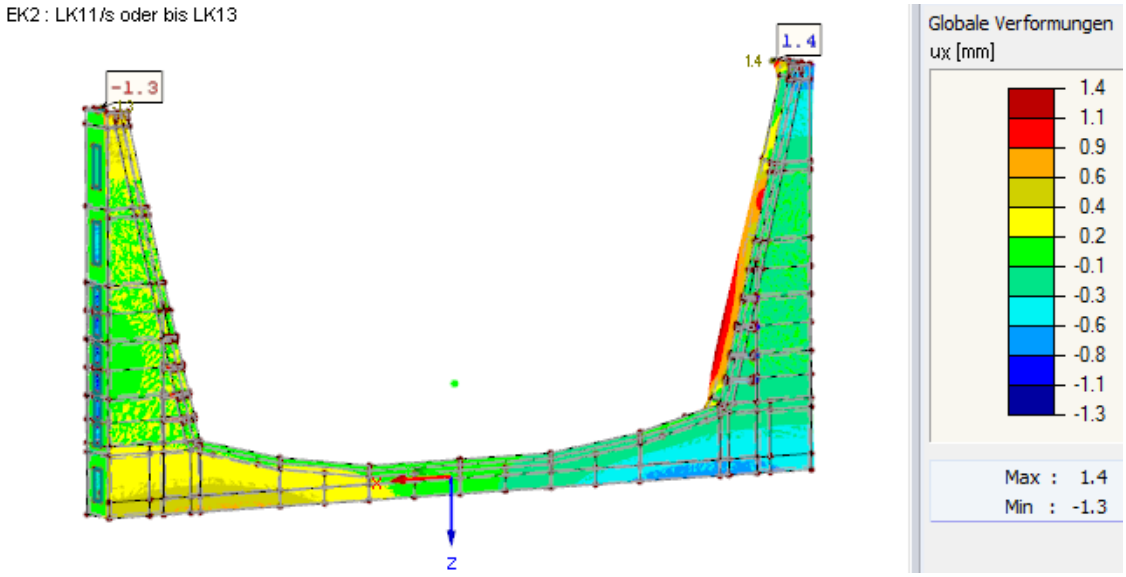


Abbildung 38 Verformungen in x-Richtung

Die Verformungen von 1,4 mm werden als verträglich bewertet.

4.3.3. Verformung in y- Richtung u_y

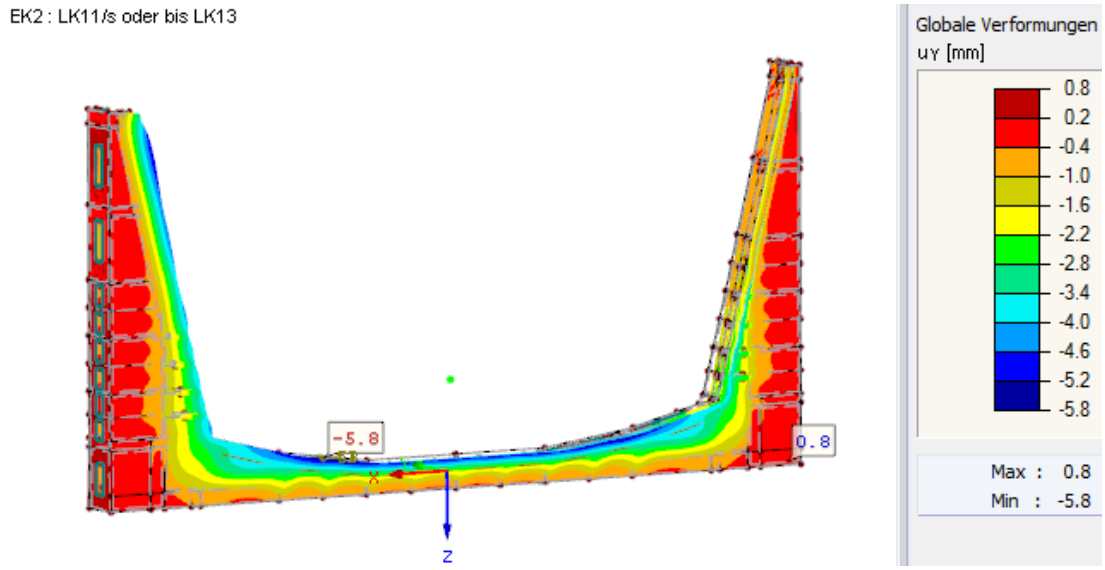
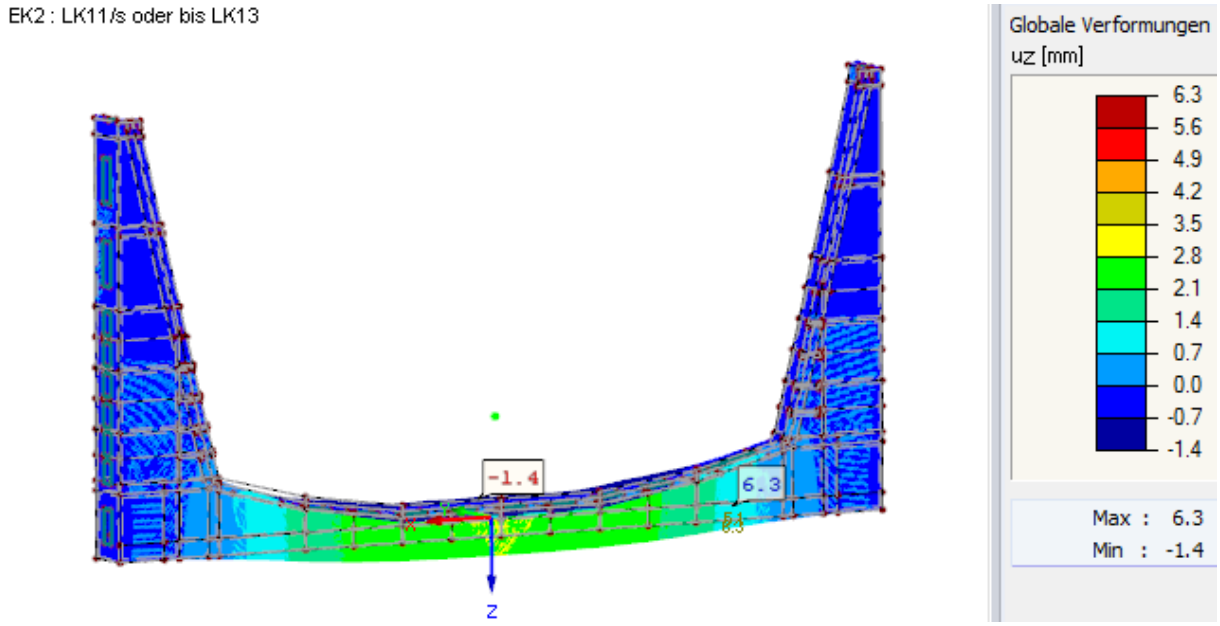


Abbildung 39 Verformungen in y-Richtung

Die Verformungen von 5,8 mm werden als verträglich bewertet.

4.3.4. Verformung in z- Richtung u_z



Die Verformungen von 6,3 mm werden als verträglich bewertet.

5. Detailnachweise

5.1. Nachweis der Betonpressung

Die maximalen Auflagerreaktionen / Kontaktspannungen wurden an den Schubknaggen festgestellt. Für die folgende Berechnung wurden die maximalen Kontaktspannungen Abschnitt 4.1 entnommen.
Die maximal zulässigen Pressungen für den Massivbau (Betonfestigketisklasse C 20/25) ergeben sich zu:

$$\sigma_{max,zul} = \frac{20\ \frac{N}{mm^2} * 0{,}85}{1{,}5} * 0{,}6 = 6{,}8\ N/mm^2$$

Wobei:

0,6 = Zuschlag für uniaxiale Pressung

Die maximalen Spannungen betragen:

5389,9 kN/m² ≈ 5,40 MN/m² = 5,4 N/mm²

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{Ed}}{\sigma_{Rd}} = \frac{4{,}60\ N/mm^2}{6{,}80\ N/mm^2} = 0{,}67 < 1$$