Planungsgemeinschaft
Kieler Schleusen

Bauherr:	Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau (WSA Kiel-Holtenau) Schleuseninsel 2 24159 Kiel
B	Stahlwasserbau – Vorstatik Stemmtor
Bauvorhaben:	**Sensitivitätsbetrachtung** **Alte Schleuse Kiel-Holtenau** **Kiel**
Auftrag:	**H13188**
Inhalt:	**Statische Berechnung** **Vorstatik** **Stemmtor**
Tragwerksplanung:	IRS Stahlwasserbau Consulting AG Max-von-Laue-Str. 12 97080 Würzburg Bearbeiter: B.Eng Tobias Merklein Telefon: 0931 / 35 93 34 - 12

Revisionsverzeichnis
zur
Statischen Berechnung

Rev. Nr.	Versand-Datum:	Block (Kapitel):	Seiten neu / ergänzt / geändert / Bemerkungen	Aufsteller:
0	19.01.2018	1 bis 10	Deckblatt, Revisionsverzeichnis, Inhaltsverzeichnis, Statik: 100 Seiten / Ersteinreichung	Merklein

0. INHALTSVERZEICHNIS

0. INHALTSVERZEICHNIS 1
1. BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR DEN STAHLWASSERBAU 4
1.1. Normen und Bemessungsvorschriften 4
1.2. Vorschriften 4
1.3. Literatur 7
1.4. Werkstoffe 8
1.4.1. Metallwerkstoffe 8
1.4.2. Beton 11
1.5. Zulässige Spannungsdoppelamplituden 12
1.5.1. Stahlbauteile 12
1.5.2. Maschinenteile 13
1.6. Allgemeine Planungsgrundsätze Stahlwasserbau 14
1.7. Geometrische Planungsvorgaben 15
1.8. Nomenklatur 16
1.9. Wasserstände 16
1.10. Wasserstands Differenzen Kieler Förde – Kammer - NOK 16
1.10.1. Schleuse außer Betrieb 16
1.10.2. Schleuse in Betrieb 17
1.11. Einwirkungen 18
1.11.1. Eigengewicht (ständige Einwirkung) 18
1.11.2. Hydrostatische Einwirkungen 18
1.11.3. Hydrodynamische Einwirkungen 18
1.11.4. Eisauflast 19
1.11.5. Eisdruck 19
1.11.6. Verkehrs- und Auflasten 19
1.11.7. Massenkräfte 19
1.11.8. Änderung der Stützbedingungen 19
1.11.9. Temperatur 20
1.11.10. Schiffsreibung 20
1.11.11. Schiffsstoß 20
1.11.12. Windlasten 20
1.11.13. Leckwerden von Luftkammern (Außergewöhnliche Einwirkung) 21
1.11.14. Transport-, Montage- und Reparaturzustände 21
1.11.15. Bewegungsbehinderung durch Fremdkörper / Einwirkungen des Antriebes im Störfall 21
1.11.16. Weitere Einwirkungen auf die Verschlüsse 21
1.11.17. Betriebsfestigkeitsnachweise 22
1.11.18. Fahrzeiten Verschlüsse 22
1.11.19. Füll- und Entleerungszeiten Schleuse 22
2. FEM MODELL 23
2.1. Übersicht 23
2.2. Torkörper 24
2.2.1. 10 mm Blechdicken (Sohlsteifen) 25
2.2.2. 15 mm Blechdicken (Stauwand NOK) 26
2.2.3. 20mm Blechdicke (Aussteifung & Stauwand Kieler Förde) 27
2.2.4. 35 mm Blechdicke (Knaggenträger horizontal) 28
2.2.5. 50 mm Blechdicke (Knaggenträger vertikal & Zylinderanschluss) 29
2.2.6. 60 mm Blechdicke (Knaggengrundblech) 30
2.2.7. 80mm Blechstärke 31
2.2.8. 90mm Blechstärke 32

2.2.9. Stäbe 33
2.3. Knotenlager 37
2.4. Werkstoffe 39
3. LASTFÄLLE 39
3.1. LF1: Eigengewicht + 10% 39
3.2. LF2: in Betrieb: BS-P NHN -0,20 NOK gegen NHN +3,48 Förde Tor 1 40
3.3. LF3: in Betrieb: BS-P NHN -0,2 NOK gegen NHN +1,78 Förde Tor 1 41
3.4. LF4: außer Betrieb: BS-T NHN -0,20 NOK gegen NHN +4,60 Förde Tor 1 42
3.5. LF5: außer Betrieb: BS-T NHN +0,5 NOK gegen NHN -2,29 Förde Tor 2 43
3.6. LF6: Dynamische Wellenlast H=127cm 44
3.7. LF7: Eisauflast 1 kN/m^2 46
3.8. LF8: Eisdruck NN -0,20 NOK 47
3.9. LF9: Eisdruck NN +0,50 NOK 48
3.10. LF10: Eisdruck NN +1,78 Förde 49
3.11. LF11: Eisdruck NN +3,48 Förde 50
3.12. LF12: Gabelstapler und Elektrozug 51
3.13. LF13: Gabelstapler und Elektrozug, Bremslast 52
3.14. LF14: Temperatur 53
3.15. LF15: Leckwerden von Luftkammer 54
3.16. Weitere Lastfälle 54
4. KOMBINATIONEN 55
4.1. Für Bemessung 55
4.2. Für Verformungen 55
5. SPANNUNGEN 56
5.1. Übersicht 56
5.1.1. 10 mm Blechdicken (Sohlsteifen) 57
5.1.2. 15 mm Blechdicken (Stauwand NOK) 58
5.1.3. 20mm Blechdicke (Aussteifung & Stauwand Kieler Förde) 59
5.1.4. 35 mm Blechdicke (Knaggenträger horizontal) 60
5.1.5. 50 mm Blechdicke (Knaggenträger vertikal & Zylinderanschluss) 61
5.1.6. 60 mm Blechdicke (Knaggengrundblech) 62
5.1.7. 80mm Blechstärke 63
5.1.8. 90mm Blechstärke 64
5.1.9. Stäbe 65
6. VERFORMUNGEN 66
7. LAGERKRÄFTE 67
7.1. Max. / Min. Lagerkräfte aus Ergebniskombination 67
7.2. Lagerkräfte aus Lastfallkombinationen 71
7.2.1. Lastfallkombination LK1 71
7.2.2. Lastfallkombination LK2 71
7.2.3. Lastfallkombination LK3 72
7.2.4. Lastfallkombination LK4 72
7.2.5. Lastfallkombination LK5 73
7.2.6. Lastfallkombination LK6 73
7.2.7. Lastfallkombination LK7 74
7.2.8. Lastfallkombination LK8 74
7.2.9. Lastfallkombination LK101 75
7.2.10. Lastfallkombination LK102 75
7.2.11. Lastfallkombination LK103 76
7.2.12. Lastfallkombination LK104 76
7.2.13. Lastfallkombination LK105 77
7.2.14. Lastfallkombination LK106 77
7.2.15. Lastfallkombination LK107 78

7.2.16. Lastfallkombination LK108 78
7.2.17. Stemmknaggenausfall 79
8. ANTRIEBSZYLINDERKRAFTERMITTLUNG 82
8.1. Torantriebszylinder 82
8.2. Antriebszylinder für Gleitschütze 84
9. DETAILNACHWEISE 86
9.1. Halslager 86
9.1.1. Zusammenstellung der Kräfte 87
9.2. Spurlager 97
9.2.1. Werkstoffe Spurlager 97
9.2.2. Zusammenstellung der Kräfte 97
9.2.3. Pressung Spurlagerzapfen und Kalotte 98
10. BEARBEITUNG 100

1. BERECHNUNGSGRUNDLAGEN FÜR DEN STAHLWASSERBAU

1.1. Normen und Bemessungsvorschriften

Für die Bemessung des Stahlwasserbaus der „Alte Schleuse Kiel-Holtenau“ gelten folgende Bemessungsgrundlagen:

1.2. Vorschriften

[1] DIN 19704-1:2012-05 Entwurf, Stahlwasserbauten, Berechnungsgrundlagen

[2] DIN 19704-2:2012-05 Entwurf, Stahlwasserbauten, Bauliche Durchbildung und Herstellung

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

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

[5] DIN EN 1990/NA/A1:2012-08, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1

[6] 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

[7] 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

[8] DIN EN 1991-1-1/NA/A1:2014-07, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau: Änderung A1

[9] DIN EN 1991-1-4:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010

[10] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten

[11] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010

[12] DIN EN 1992-1-1 A1:2013-09, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004/prA1:2013

[13] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[14] 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

[15] DIN EN 1993-1-1/A1:2014-07, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005/FprA1:2013

[16] DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[17] 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

[18] 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

[19] DIN EN 1993-1-6:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007 + AC:2009

[20] DIN EN 1993-1-6/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen

[21] 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

[22] 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

[23] DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009

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

[25] 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

[26] DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung

[27] DIN EN 1993-1-10:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009

[28] DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung

[29] DIN EN 1090-1:2012-02, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile

[30] DIN EN 1090-2:2011-10, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken

[31] DIN EN 1090-3:2011-10, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Technische Regeln für die Ausführung von Aluminiumtragwerken

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

[33] DIN EN 10025-6:2009-08, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand

[34] DIN EN 10088-1:2005-09, Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle

[35] DIN EN 10088-2:2005-09, Nichtrostende Stähle – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung

[36] DIN EN 10088-3:2005-09, Nichtrostende Stähle – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung

[37] DIN EN ISO 3506-1:2010-04, Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen – Teil 1: Schrauben

[38] DIN EN ISO 2338:1998-02, Zylinderstifte aus ungehärtetem Stahl und austenitischem nichtrostendem Stahl

[39] DIN 743-1:2000-10, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 1: Einführung, Grundlagen

[40] DIN 743-2:2000-10, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen

[41] DIN 743-3:2000-10, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte

1.3. Literatur

[42] Stahlwasserbau – G. Wickert, G. Schmaußer, Springer Verlag 1971

[43] Stahlbau – Ch. Petersen, Vieweg Verlag, 4. Auflage 2013

[44] Stahlbaufibel – U. Engelmann, Bauwerk/Beuth Verlag, 1. Auflage 2012

[45] Stahlbaupraxis nach Eurocode 3, Band 1: Tragwerksplanung, Grundlagen – G. Wagenknecht, Bauwerk/Beuth Verlag, 4. Auflage 2012

[46] Stahlbaupraxis nach Eurocode 3, Band 2: Verbindungen und Konstruktionen – G. Wagenknecht, Bauwerk/Beuth Verlag, 3. Auflage 2012

[47] Stahlbau 78 (2009), Heft 1 - Zur Beanspruchbarkeit bei Herzschen Pressungen - H. Nölke

[48] Stability of steel plates under combined loading. Dissertation 2010. B. Braun

[49] EAU 2012

1.4. Werkstoffe

1.4.1. Metallwerkstoffe

γ_{M0} = 1,1 (nach [1])

γ_{M1} = 1,1 (nach [1])

γ_{M2} = 1,25 (nach [1])

1.4.1.1. Stahlbauteile S235J2

Blechdicke: t ≤ 16 mm

f_y = 235 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{235}{1{,}1}$ = 214 N/mm²

f_u = 360 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 16 mm ≤ t ≤ 40 mm

f_y = 235 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{225}{1{,}1}$ = 205 N/mm²

f_u = 360 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 40 mm < t ≤ 80 mm

f_y = 215 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{215}{1{,}1}$ = 195 N/mm²

f_u = 360 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 80 mm < t ≤ 100 mm

f_y = 215 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{215}{1{,}1}$ = 195 N/mm²

f_u = 360 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 100 mm < t ≤ 150 mm

f_y = 195 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{195}{1{,}1}$ = 177 N/mm²

f_u = 350 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 150 mm < t ≤ 200 mm

f_y = 185 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{185}{1{,}1}$ = 168 N/mm²

f_u = 340 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 200 mm < t ≤ 250 mm

f_y = 175 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{175}{1{,}1}$ = 159 N/mm²

f_u = 340 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 250 mm < t ≤ 400 mm

f_y = 165 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{165}{1{,}1}$ = 150 N/mm²

f_u = 330 N/mm² (nach [32])

$\sigma_{wv,Rd} = \frac{360}{0{,}80 * 1{,}25}$ = 360 N/mm² (nach [23] und [24])

$\sigma_{\perp w,Rd} = 0{,}9 * \frac{360}{1{,}25}$ = 259 N/mm² (nach [23] und [24])

1.4.1.2. Stahlbauteile S355J2

Blechdicke: t ≤ 16 mm

f_y = 355 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1{,}1}$ = 323 N/mm²

f_u = 470 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 16 mm ≤ t ≤ 40 mm

f_y = 355 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{345}{1{,}1}$ = 314 N/mm²

f_u = 470 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 40 mm < t ≤ 63 mm

f_y = 335 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{335}{1{,}1}$ = 305 N/mm²

f_u = 470 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 63 mm < t ≤ 80 mm

f_y = 315 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{325}{1{,}1}$ = 295 N/mm²

f_u = 470 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 80 mm < t ≤ 100 mm

f_y = 315 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{315}{1{,}1}$ = 286 N/mm²

f_u = 470 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 100 mm < t ≤ 150 mm

f_y = 295 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{295}{1{,}1}$ = 268 N/mm²

f_u = 450 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 150 mm < t ≤ 200 mm

f_y = 285 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{285}{1{,}1}$ = 259 N/mm²

f_u = 450 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 200 mm < t ≤ 250 mm

f_y = 275 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{275}{1{,}1}$ = 250 N/mm²

f_u = 450 N/mm² (nach [32])

Blechdicke: 250 mm < t ≤ 400 mm

f_y = 265 N/mm² (nach [32]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{265}{1{,}1}$ = 241 N/mm²

f_u = 450 N/mm² (nach [32])

$\sigma_{wv,Rd} = \frac{470}{0{,}90 * 1{,}25}$ = 418 N/mm² (nach [23] und [24])

$\sigma_{\perp w,Rd} = 0{,}9 * \frac{470}{1{,}25}$ = 338 N/mm² (nach [23] und [24])

1.4.1.3. Bolzen 1.4462

Erzeugnisdicke: t ≤ 250 mm

f_y = 450 N/mm² (nach [36]) ➡ $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{450}{1{,}5}$ = 300 N/mm²

f_u = 650 N/mm² (nach [36])

1.4.2. Beton

γ_C = 1,5 (nach [11], [12], [13])

α_{cc} = 0,85 (nach [11], [12], [13]))

1.4.2.1. Festigkeitsklasse: C25/30 (Regelfestigkeitsklasse)

f_{ck} = 25 N/mm²

$f_{cd} = f_{ck} * \alpha_{cc} / \gamma_C$ = 14,2 N/mm²

n = 856800

$\Delta f_c = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * \left(1 - \frac{\log n}{12}\right) = 0{,}85 * \frac{25}{1{,}5} * \left(1 - \frac{\log(856800)}{12}\right)$ = 7,2 N/mm²

1.4.2.2. Festigkeitsklasse: C35/45

f_{ck} = 35 N/mm²

$f_{cd} = f_{ck} * \alpha_{cc} / \gamma_C$ = 19,8 N/mm²

n = 856800

$\Delta f_c = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * \left(1 - \frac{\log n}{12}\right) = 0{,}85 * \frac{35}{1{,}5} * \left(1 - \frac{\log(856800)}{12}\right)$ = 10,0 N/mm²

1.5. Zulässige Spannungsdoppelamplituden

Festlegungen zum Nachweis der Betriebsfestigkeit der Schleusenverschlüsse nach [25] und [26]

1.5.1. Stahlbauteile

Zulässige Spannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9

Lastspiele:	Lastspiele / Betriebstag	24
Nutzungsdauer:	Jahre	70
	Betriebsttage / Jahr	340
Anzahl Spannungsschwingspiele:	N_R =	571200
Teilsicherheitsbeiwerte:	γ_{Mf} =	1,35
	Stahlfestigkeitsklasse =	S355
	f_y =	355 N/mm^2

Längsspannungsschwingbreiten

Kerbfall $\Delta\sigma_C$ (bei N_R=2*10^6 Spannungsschwingspielen)

Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (bei N_R=5*10^6 Spannungsschwingspielen)

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ (bei N_R=1*10^8 Spannungsschwingspielen)

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 0 < N_R \leq 5 \cdot 10^6$$

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 5 \cdot 10^6 < N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \cdot 0{,}549 \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 1 \cdot 10^8 < N_R$$

Kerbfall (=$\Delta\sigma_C$)	$\Delta\sigma_D$ (γ_{Mf}=1,00)	$\Delta\sigma_D$ (γ_{Mf}=1,35)	$\Delta\sigma_L$ (γ_{Mf}=1,00)	$\Delta\sigma_L$ (γ_{Mf}=1,35)	$\Delta\sigma_{Rd}$ (γ_{Mf}=1,35)
160	117,9	87,3	64,8	48,0	180
140	103,2	76,4	56,7	42,0	157
125	92,1	68,2	50,6	37,5	141
112	82,5	61,1	45,3	33,6	126
100	73,7	54,6	40,5	30,0	112
90	66,3	49,1	36,4	27,0	101
80	58,9	43,7	32,4	24,0	90
71	52,3	38,8	28,7	21,3	80
63	46,4	34,4	25,5	18,9	71
56	41,3	30,6	22,7	16,8	63
50	36,8	27,3	20,2	15,0	56
45	33,2	24,6	18,2	13,5	51
40	29,5	21,8	16,2	12,0	45
36	26,5	19,6	14,6	10,8	40

Tabelle2: *Ermüdungsfestigkeit (Längsspannung) in N/mm^2*

Schubspannungsschwingbreiten

Kerbfall $\Delta\tau_C$ (bei N_R=2*10^6 Spannungsschwingspielen)

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_L$ (bei N_R=1*10^8 Spannungsschwingspielen)

$$\Delta\tau_{Rd} = \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} fy \qquad wobei:\ 0 < N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

$$\Delta\tau_{Rd} = \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \cdot 0{,}457 \leq 1{,}5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} fy \qquad wobei:\ 1 \cdot 10^8 < N_R$$

Kerbfall (=$\Delta\tau_C$)	–	–	$\Delta\tau_L$	$\Delta\tau_L$	$\Delta\tau_{Rd}$
			(γ_{Mf}=1,00)	(γ_{Mf}=1,35)	(γ_{Mf}=1,35)
100	-	-	46	34	95
80	-	-	37	27	76

Tabelle3: *Ermüdungsfestigkeit (Schubspannung) in N/mm^2*

1.5.2. Maschinenteile

Zulässige Spannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9

Lastspiele:	Lastspiele / Betriebstag	24	
Nutzungsdauer:	Jahre	35	
	Betriebsttage / Jahr	340	
Anzahl Spannungsschwingspiele:	N_R =	285600	
Teilsicherheitsbeiwerte:	γ_{Mf} =	1,35	
	Stahlfestigkeitsklasse =	S355	
	f_y =	355	N/mm^2

Längsspannungsschwingbreiten

Kerbfall $\Delta\sigma_C$ (bei N_R=2*10^6 Spannungsschwingspielen)

Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (bei N_R=5*10^6 Spannungsschwingspielen)

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ (bei N_R=1*10^8 Spannungsschwingspielen)

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 0 < N_R \leq 5 \cdot 10^6$$

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 5 \cdot 10^6 < N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \cdot 0{,}549 \leq 1{,}5 \cdot fy \qquad wobei:\ 1 \cdot 10^8 < N_R$$

Kerbfall (=$\Delta\sigma_C$)	$\Delta\sigma_D$ (γ_{Mf}=1,00)	$\Delta\sigma_D$ (γ_{Mf}=1,35)	$\Delta\sigma_L$ (γ_{Mf}=1,00)	$\Delta\sigma_L$ (γ_{Mf}=1,35)	$\Delta\sigma_{Rd}$ (γ_{Mf}=1,35)
160	117,9	87,3	64,8	48,0	227
140	103,2	76,4	56,7	42,0	198
125	92,1	68,2	50,6	37,5	177
112	82,5	61,1	45,3	33,6	159
100	73,7	54,6	40,5	30,0	142
90	66,3	49,1	36,4	27,0	128
80	58,9	43,7	32,4	24,0	113
71	52,3	38,8	28,7	21,3	101
63	46,4	34,4	25,5	18,9	89
56	41,3	30,6	22,7	16,8	79
50	36,8	27,3	20,2	15,0	71
45	33,2	24,6	18,2	13,5	64
40	29,5	21,8	16,2	12,0	57
36	26,5	19,6	14,6	10,8	51

Tabelle2: *Ermüdungsfestigkeit (Längsspannung) in N/mm²*

Schubspannungsschwingbreiten

Kerbfall $\Delta\tau_C$ (bei N_R=2*10^6 Spannungsschwingspielen)

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_L$ (bei N_R=1*10^8 Spannungsschwingspielen)

$$\Delta\tau_{Rd} = \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \cdot \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{N_R}} \leq 1{,}5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} fy \qquad wobei:\ 0 < N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

$$\Delta\tau_{Rd} = \frac{\Delta\tau_C}{\gamma_{Mf}} \cdot 0{,}457 \leq 1{,}5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} fy \qquad wobei:\ 1 \cdot 10^8 < N_R$$

Kerbfall (=$\Delta\tau_C$)	–	–	$\Delta\tau_L$ (γ_{Mf}=1,00)	$\Delta\tau_L$ (γ_{Mf}=1,35)	$\Delta\tau_{Rd}$ (γ_{Mf}=1,35)
100	-	-	46	34	109
80	-	-	37	27	87

Tabelle3: *Ermüdungsfestigkeit (Schubspannung) in N/mm²*

1.6. Allgemeine Planungsgrundsätze Stahlwasserbau

Für den Leistungsabschnitt B „Variantenuntersuchung MSA 2100“ gelten folgende Planungsgrundsätze:

Allgemein

Die Variantenuntersuchung soll an die bisherige Machbarkeitsstudie anknüpfen. Es gelten daher die grundsätzlichen Randbedingungen der Machbarkeitsstudie.

Betriebsverschlüsse

- Für die Schleusenverschlüsse soll das Stemmtorkonzept grundsätzlich beibehalten werden. Es werden folgende Verschlusstypen untersucht:
    - Doppelkehrende Stemmtore gemäß Tor Variante 1 der Machbarkeitsstudie
    - Untersuchung der Eignung der inversen Stemmtore für die erhöhten Lasten einschließlich Überprüfung einer geänderten Toranordnung
    - Untersuchung der Kombination von doppelkehrenden Stemmtoren mit einem inversen Stemmtor

- Die bauliche Umsetzung der Tore soll zunächst maximal bis OK jetzige Planie (NHN +4,30m) erfolgen. Ein Aufstocken erfolgt dann erst bei Eintritt von TAusbau.

In dieser Berechnung wird die Zielvariante des doppelkehrenden Stemmtores nachgewiesen.

1.7. Geometrische Planungsvorgaben

Lichte Kammer- bzw. Hauptbreite	25,00 m
Drempelwinkel	20,0°

Geometriedaten der Hauptbereiche der Nord- und Südkammer

Außenhaupt

OK Planie	NN +4,27 m + Ausbaureserve
OK Drempel / Kammersohle	NN -10,00 m
OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

Binnenhaupt

OK Planie	NN +4,27 m + Ausbaureserve
OK Drempel / Kammersohle	NN -10,00 m
OK Sohle Haupt	NN -10,50 m

Die geometrischen Vorgaben sind ggf. in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Untersuchungen noch anzupassen.

1.8. Nomenklatur

NOK	Nordostseekanal
HKW	höchster Kammerwasserstand
MKW	mittlerer Kammerwasserstand
NKW	niedrigster Kammerwasserstand
HHW	höchstes Hochwasser
NNW	niedrigstes Niedrigwasser
BHW_{2100}	Bemessungshochwasser für 2100
BWo	oberer Bemessungswasserstand
BWu	unterer Bemessungswasserstand

1.9. Wasserstände

Nordostseekanal NOK

HKW	NHN + 0,50 m
NKW	NHN - 0,20 m

Kieler Förde

BHW_{2100}	NHN +4,60 m
BWo	NHN +3,48 m
BWu	NHN +0,08 m
NNW_{2100}	NHN -0,78 m
NNW_{T0}	NHN -2,29 m

1.10. Wasserstands Differenzen Kieler Förde – Kammer - NOK

1.10.1. Schleuse außer Betrieb

Kieler Förde

BHW_{2100} = +1,78 + 1,10 ·2,56 =	NHN +4,60 m
NNW_{2100} = 1,78 – (2,29 + 0,04) ·1,10 =	NHN -0,78 m
NNW_{T0}	NHN -2,29 m

Nord Ostsee Kanal

HKW	NHN +0,50m
NKW	NHN -0,20m

Maximaler Differenzstau auf das Schleusentor

BHW_{2100}	NHN +4,60 m
NKW	NHN -0,20 m
Max Δ	4,80 m

Hier soll laut Lastenheft einseitig eine Welle von 1,27 m (1,15 m + 10% Zuschlag) angesetzt werden.

1.10.2. Schleuse in Betrieb

Nord Ostsee Kanal

HKW	NHN +0,50m
NKW	NHN -0,20m

Kieler Förde

Die Betriebswasserstände für die Schleuse wurden wie folgt festgelegt:

BWo = +1,78 + 1,70 =	NHN +3,48 m
MW = +0,04 + 1,74 =	NHN +1,78 m
BWu = +1,78 – 1,70 =	NHN +0,08 m

Maximaler Differenzstau auf das Schleusentor

BWo	NHN +3,48 m
NKW	NHN -0,20 m
Max Δ	3,68 m

Für die Bemessung der Stahlwasserbaukonstruktionen ist auf die Bemessungswasserstände eine Schwallwelle bzw. Sunkwelle von 0,10 m zu addieren.

1.11. Einwirkungen

1.11.1. Eigengewicht (ständige Einwirkung)

Als ständige Einwirkungen sind die Eigenlasten der Stahlwasserbauteile anzusetzen:

Zuschlag Eigengewicht

Zusätzlich ist für die Verschlüsse gemäß [1] (5.1) ein Zuschlag von 10 % für Beschichtungen, anhaftendes Wasser, anhaftendes Eis, Bewuchs und Verschmutzungen zu den Eigenlasten zu berücksichtigen.

Eine mögliche Schlickbelastung wird durch den Zuschlag zum Eigengewicht mit abgedeckt.

1.11.2. Hydrostatische Einwirkungen

Bemessungswasserstände siehe Kap. 1.10

Für die Wichte von Süßwasser und Seewasser sind folgende Werte anzusetzen:

Süßwasser: γ = 10,0 kN/m^3

1.11.3. Hydrodynamische Einwirkungen

a) Aufschlag zu den hydrostatischen Einwirkungen:

Ansatz für die statische Bemessung der Stemmtore in geschlossener Stellung:

Die Wellenlasten wurden bereits ermittelt und es liegt eine signifikante Wellenhöhe von 62 cm und eine maximale **Wellenhöhe von 1,27 m** (1,15 m + 10% Zuschlag) vor.

Die Stauhaut der Verschlüsse ist auf den höchsten Bemessungswasserstand von + 4,60 m auszulegen. Wellenbelastungen sind bis auf diese Höhe anzusetzen. Ein möglicher, geringer Restüberlauf von wenigen Zentimetern wird vernachlässigt

b) Einwirkungen aus Torbewegung:

Für die statischen Nachweise zu berücksichtigen:

Tor geschlossen bis 90° (in Tornische) Δw = 15 cm

Für Betriebsfestigkeitsnachweise zu berücksichtigen:

Tor geschlossen bis 90° (in Tornische) Δw = 10 cm

1.11.4. Eisauflast

Für die Schleusenverschlüsse ist eine Last von 1 kN/m² infolge einer 10 cm hohen geschlossenen Eisschicht auf dem oberen horizontalen Torabschluss zu berücksichtigen.

$$p_{E,1} = 7{,}0\frac{kN}{m^3} * 0{,}1\,m \approx 1{,}0\frac{kN}{m^2}$$

1.11.5. Eisdruck

Zusätzlich zum hydrostatischen Wasserdruck ist der Eisdruck gemäß [1] (5.2.5) anzusetzen.

Es ist der in Küstengebieten vorherrschende Eisdruck anzusetzen:

- Flächenlast $p_{E,2}$ = 250 kN/m²
- Mindesteisdicke Eisdicke h_E = 0,50 m
- Der Eisdruck ist mit den Betriebswasserständen (Normalwasserständen) zu kombinieren.
- Der Eisdruck wird nach [1] 5.2.5 (4) um 30% reduziert.

1.11.6. Verkehrs- und Auflasten

Für die Torlaufstege (Bedienstege) sind Verkehrslasten nach [1] (5.2.6) anzusetzen.

Der Schleusenverschluss muss für den Dienstbetrieb und für die Schiffsausrüster mittels folgender Fahrzeuge (Bemessungsfahrzeuge) überfahrbar sein:

- Fahrzeug Gabelstapler RX 70-50, Fa. Still
- Fahrzeug Elektrozug R08-20 mit max. Anhängelast, Fa. Still

Die Fahrbahnbreite soll eine Breite von 2,0 m nicht überschreiten.

Weiterhin ist eine Mindestflächenlast von 5 kN/m² bei der Bemessung anzusetzen.

Für Bedienstege auf und im Torkörper werden Verkehrslasten nach [1] (5.2.6) angesetzt:

- Bedienstege 2,5 kN/m²
- horizontale Holmlast 0,5 kN/m

1.11.7. Massenkräfte

Massenkräfte werden gemäß [1] (5.2.7) aufgrund der geringen Beschleunigungen (< 0,5 m/s² bezogen auf den Schwerpunkt) vernachlässigt.

1.11.8. Änderung der Stützbedingungen

Auswirkungen statisch unbestimmter Lagerung

Es ist als Lastfall „Erhöhung der Auflagerlasten infolge Lastumlagerung/Ausfall“ einer Stemmknagge zu berücksichtigen.

Die Auswirkung massivbaulicher Verformung sind durch den Ansatz des Lastfalls „Erhöhung der Auflagerlasten infolge Lastumlagerung/Ausfall“ einer Stemmknagge mit abgedeckt.

1.11.9. Temperatur

Nach [1] (5.2.9) sind für beidseitig teilweise vom Wasser benetzte Verschlusskörper ± 20 K als gleichmäßige Temperaturänderungen gegenüber einer Aufstelltemperatur von 10 °C (283,15 K) sind anzusetzen.

1.11.10. Schiffsreibung

Für den geöffneten Verschluss sind nach [1] (5.2.10) folgende Lasten aus Schiffsreibung gleichzeitig zu berücksichtigen:

- Horizontallast ⊥ zur Fahrtrichtung 100 kN
- Horizontallast in Fahrtrichtung 50 kN

Die Lasten werden auf die Schrammleisten im Bereich der Wasserlinie angesetzt.

1.11.11. Schiffsstoß

Ein Schiffsstoß ist bei der Auslegung des Antriebes zu berücksichtigen. Der Antrieb soll sich bei einem bestimmten Stoß öffnen, damit er keinen Schaden nimmt. Hierzu ist eine Energie von max. 1.000 kNm anzusetzen.

Die Stoßenergie kann über eine externe Einrichtung zur Torkonstruktion abgetragen werden.

Für den Schiffsstoß ist der *maximal schleusbare Wasserstand* mit dem Stoß zu kombinieren.

Anprall ist nur für den Fall zu berücksichtigen, dass ein Schiff, das sich innerhalb der Kammer befindet, gegen das geschlossene Tor fährt. Ein Anprall von der Kanalseite her bzw. von der Fördeseite her ist nicht zu berücksichtigen.

1.11.12. Windlasten

Für die Ermittlung der Antriebskräfte der Schleusenverschlüsse sind Windlasten nach [9], mit nationalem Anhang zu berücksichtigen.

Geschwindigkeitsdruck nach [9]; Windzone WZ3:

Geschwindigkeitsdruck → $q = 1{,}05\ kN/m^2$

Aerodynamischer Beiwert des Geländeniveaus nach [1] (5.2.12) → $c_f = 0{,}5$

1.11.13. Leckwerden von Luftkammern (Außergewöhnliche Einwirkung)

Das Leckwerden von Luftkammern der Verschlüsse ist gemäß [1] zu berücksichtigen. Es ist der ungünstigste Fall für die Bemessung heranzuziehen. Das Tor muss in diesem Zustand noch in die Revisionsstellung gefahren werden können.

1.11.14. Transport-, Montage- und Reparaturzustände

Die Einwirkungen bei Transport, Montage und Reparatur sind zu berücksichtigen:

a) Revision der Schleusenverschlüsse

Im Revisionsfall werden entsprechende Revisionsverschlüsse gesetzt. Auf den Verschluss wirkt kein Wasserdruck Rückwand: nicht wasserbenetzt (Kammer, Haupt abgepumpt).

b) Druckprüfung von Hohlkörpern

p_{min} = 0,3 bar

c) Montagezustand

Eigengewicht Verschluss ohne Auftrieb > Belastbarkeit der Auflager

1.11.15. Bewegungsbehinderung durch Fremdkörper / Einwirkungen des Antriebes im Störfall

Es sind außergewöhnliche Einwirkungen durch den Antrieb bei Blockierung der Verschlüsse (Verklemmen) nachzuweisen. Der Stahl- und Maschinenbau ist so auszulegen, dass infolge Bewegungsbehinderung keine Schäden an den Stahlbauteilen entstehen. Lokale Beschädigungen an der Verklemmstelle sind nicht auszuschließen. Im Störfall werden die größtmöglichen Antriebskräfte / Antriebsmomente des Antriebs auf die Verschlusskörper mit den Ansätzen nach [1], Abschnitt 8 und 9.3 und die außergewöhnlichen Kombinationen nach [1], Tabelle 6 plus Überlastschutz (25%) des Antriebes erfasst.

1.11.16. Weitere Einwirkungen auf die Verschlüsse

Reibungskräfte

Die auf Stahl- und Maschinenbaukonstruktionen einwirkenden Reibkräfte sind nach [1], Kapitel 6, zu ermitteln.

1.11.17. Betriebsfestigkeitsnachweise

Stahlkonstruktionen

Folgende Angaben sind den Betriebsfestigkeitsnachweisen für die Stahlkonstruktionen zu Grunde zu legen:

Betriebszeit:	70 Jahre
Betriebstage pro Jahr:	340 Tage/Jahr
Kreuzungsschleusungen pro Tag:	24
Lastspielanzahl:	n = 571.200

Maschinenkonstruktionen

Folgende Angaben sind den Betriebsfestigkeitsnachweisen für die Maschinenkonstruktionen zu Grunde zu legen:

Betriebszeit:	35 Jahre
Betriebstage pro Jahr:	340 Tage/Jahr
Kreuzungsschleusungen pro Tag:	24
Lastspielanzahl:	n = 285.600

1.11.18. Fahrzeiten Verschlüsse

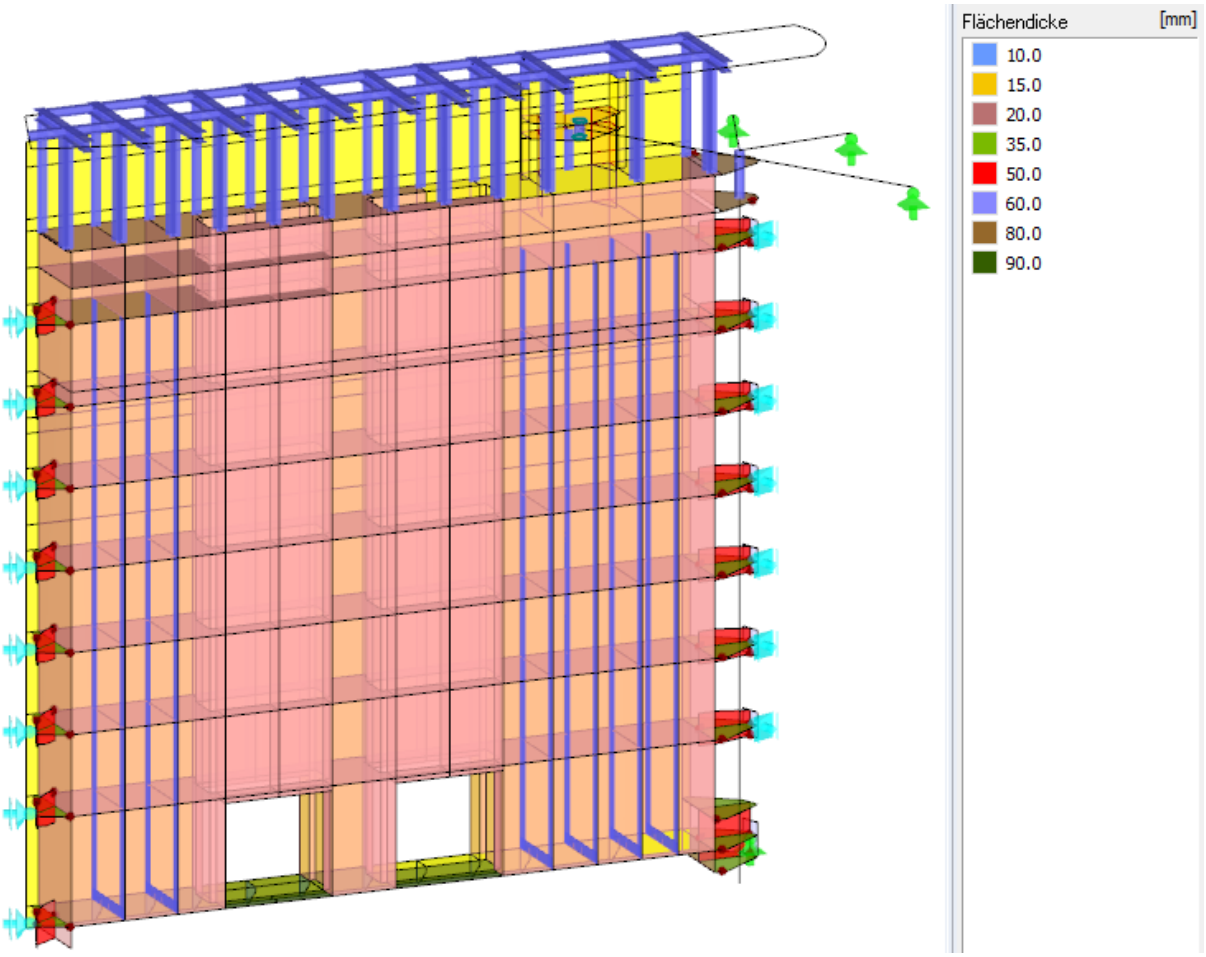
Verschluss Schleuse	90 s
Verschluss Füll- und Entleerungsorgane	120 s

1.11.19. Füll- und Entleerungszeiten Schleuse

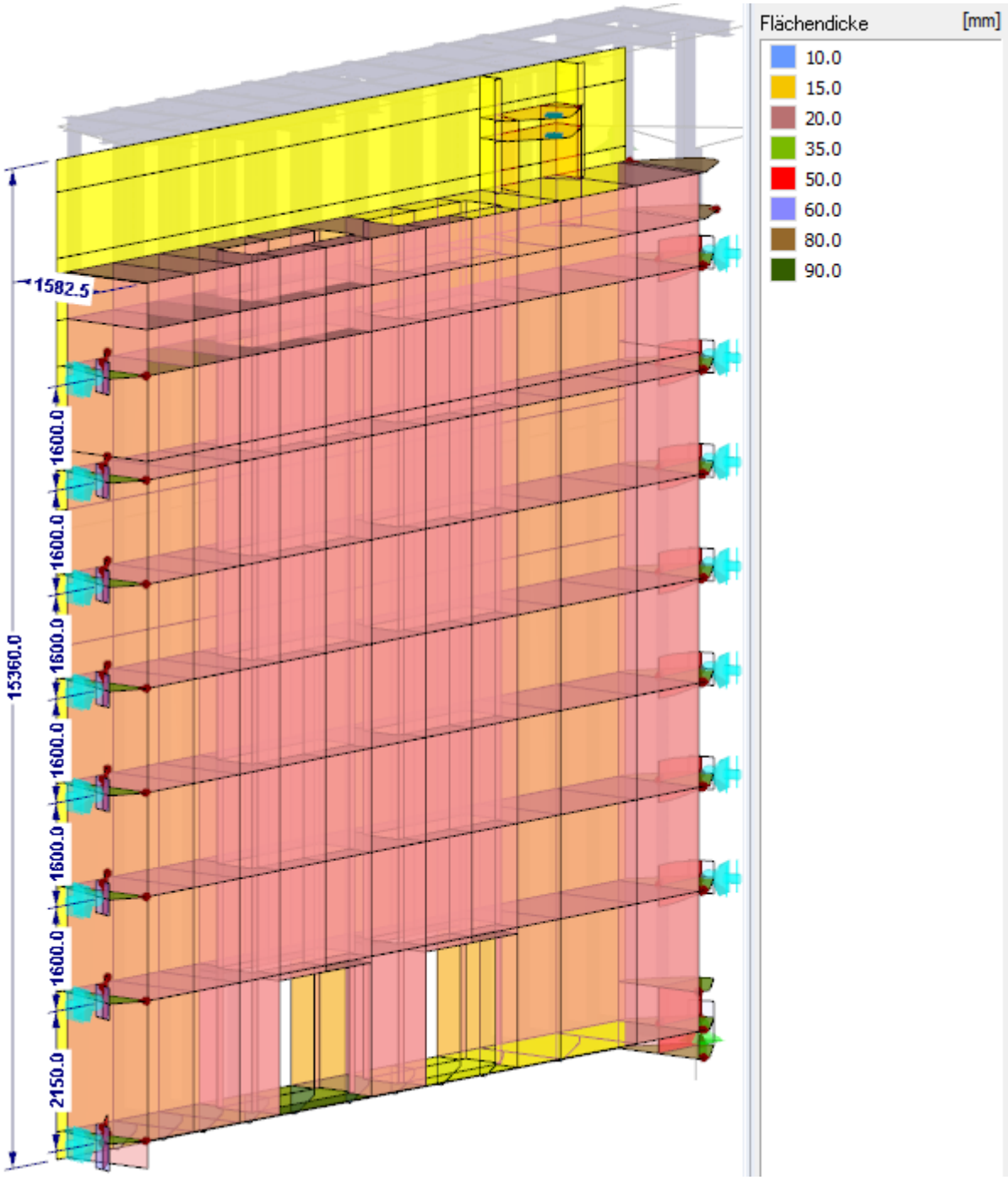
Füll- und Entleerungszeiten gemäß Abstimmung mit der BAW

2. FEM MODELL

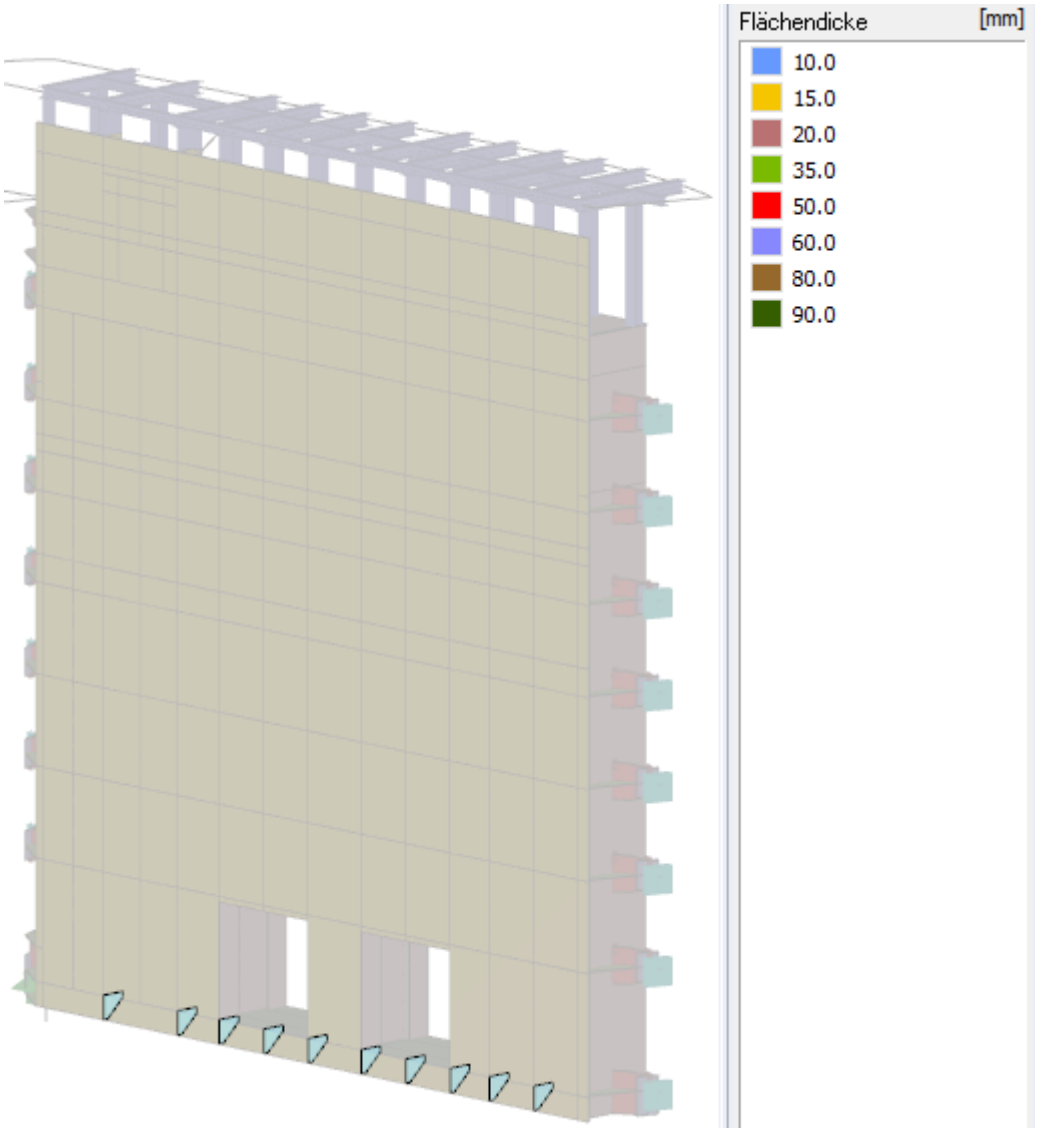
2.1. Übersicht



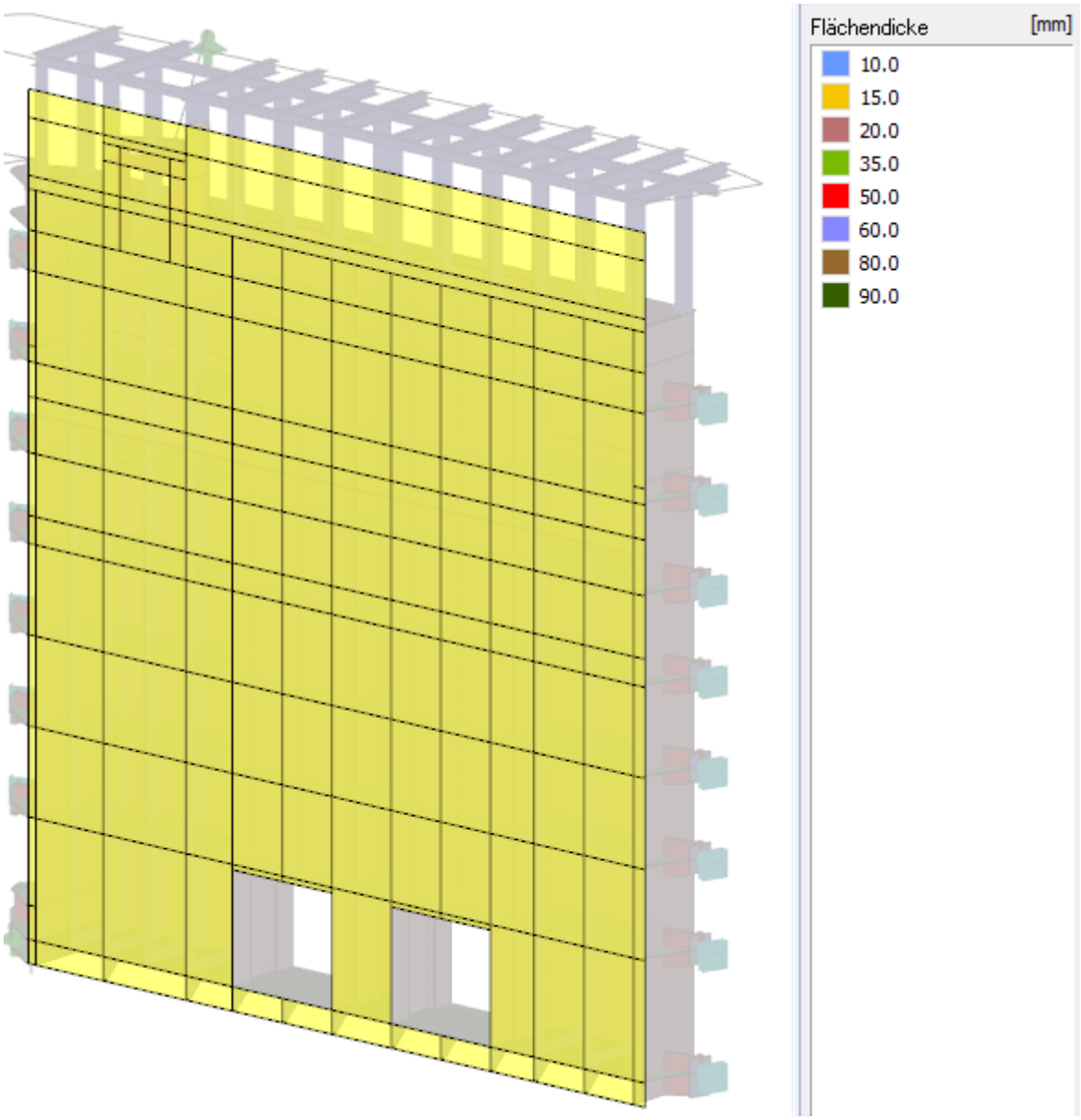
2.2. Torkörper



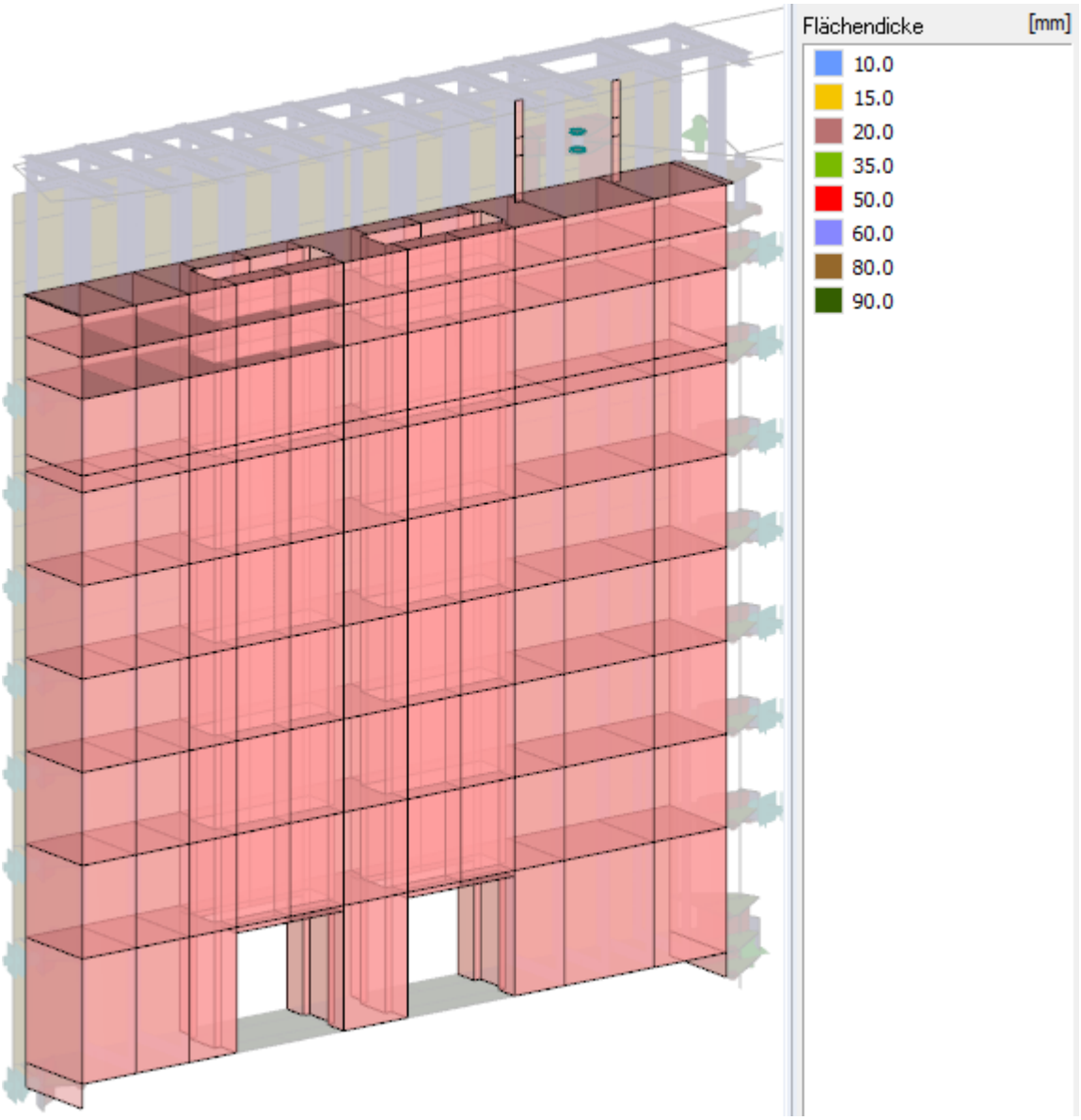
2.2.1. 10 mm Blechdicken (Sohlsteifen)



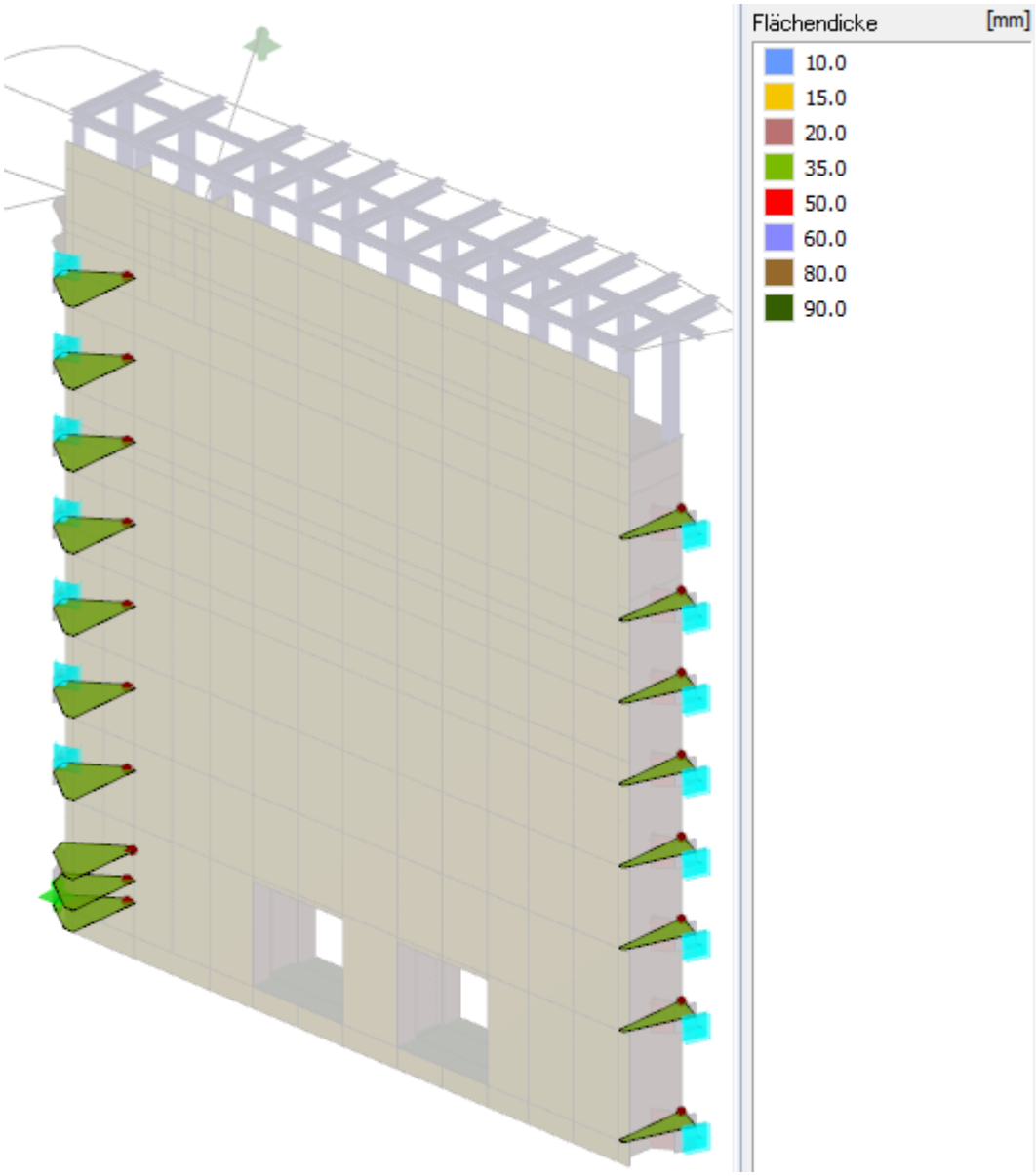
2.2.2. 15 mm Blechdicken (Stauwand NOK)



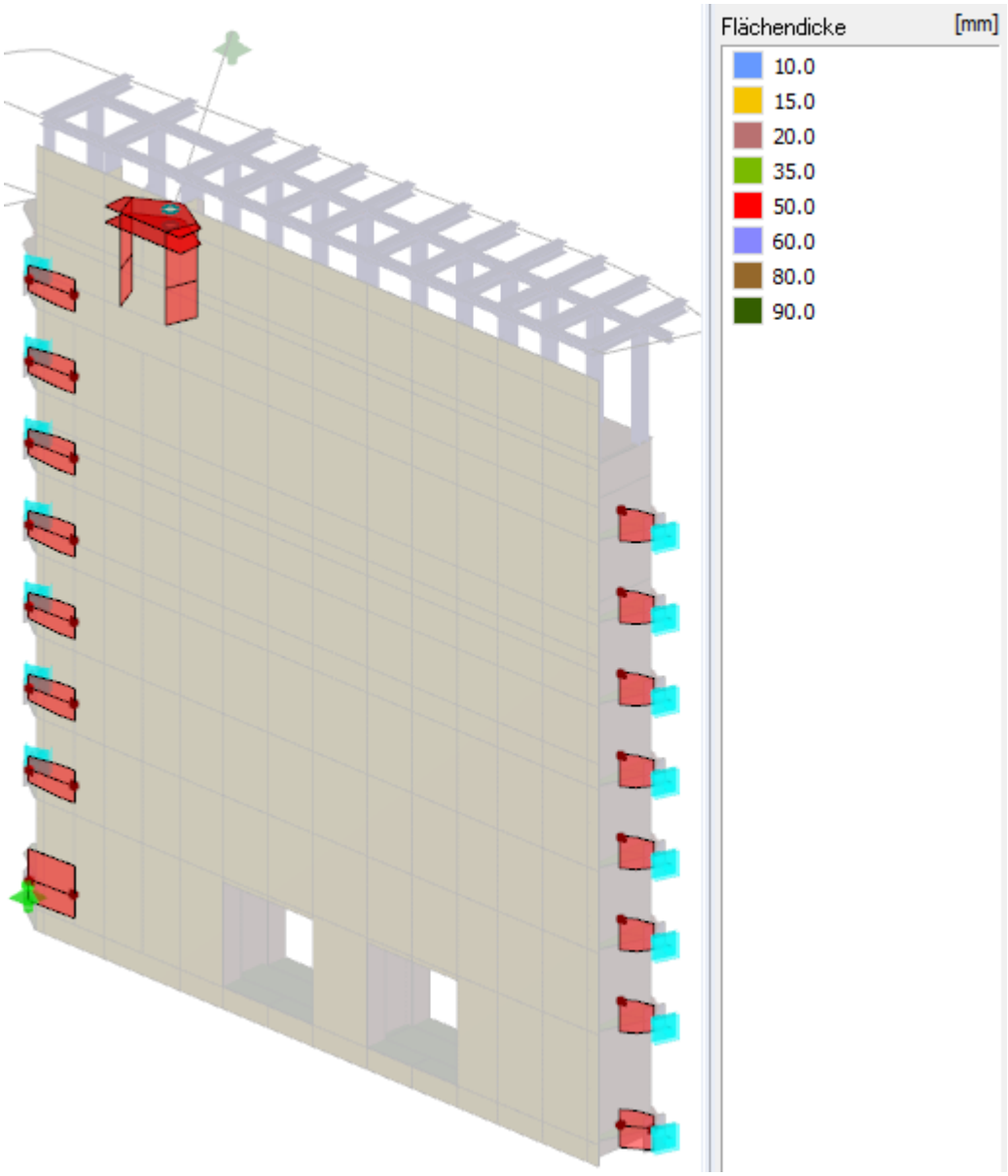
2.2.3. 20mm Blechdicke (Aussteifung & Stauwand Kieler Förde)



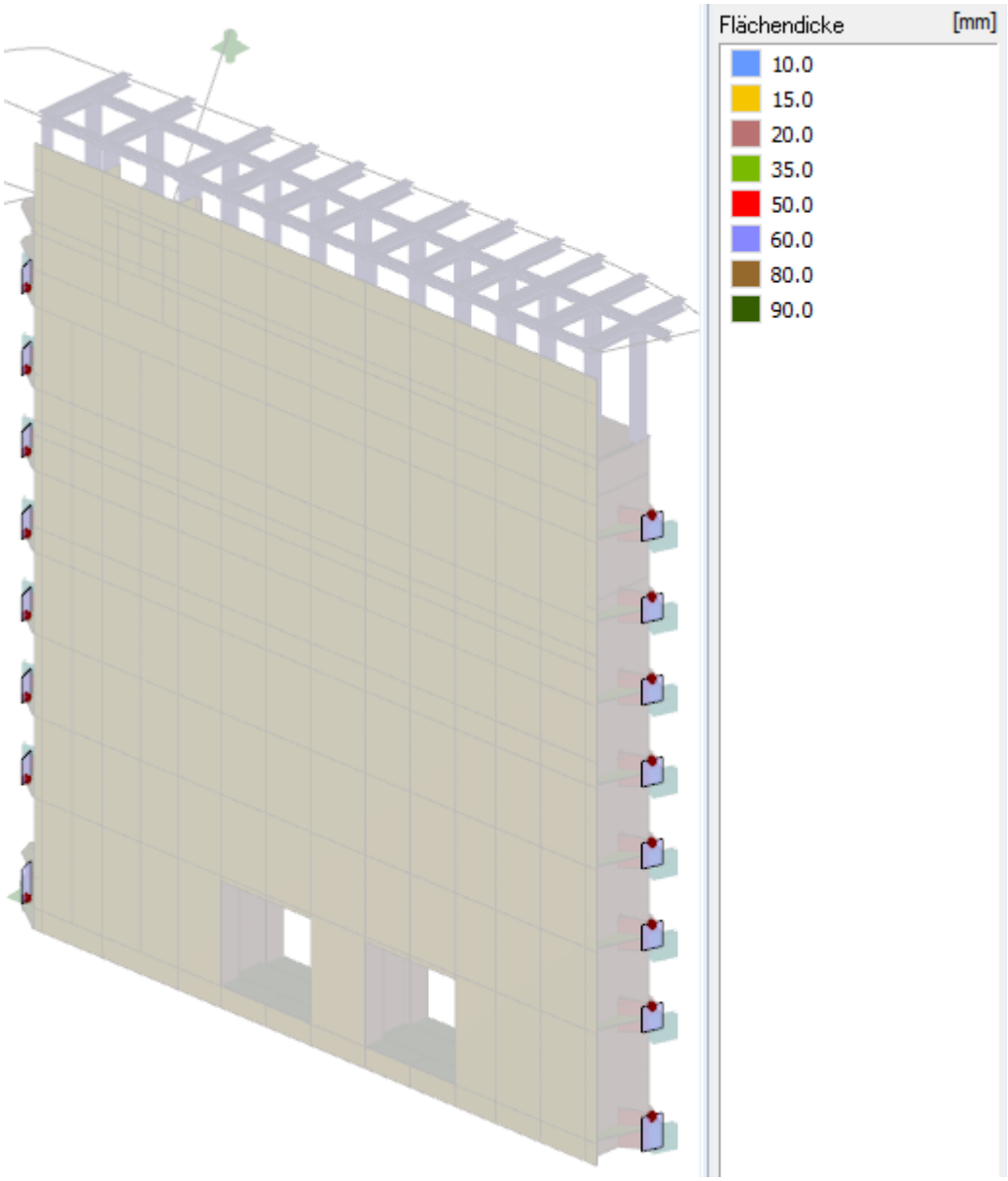
2.2.4. 35 mm Blechdicke (Knaggenträger horizontal)



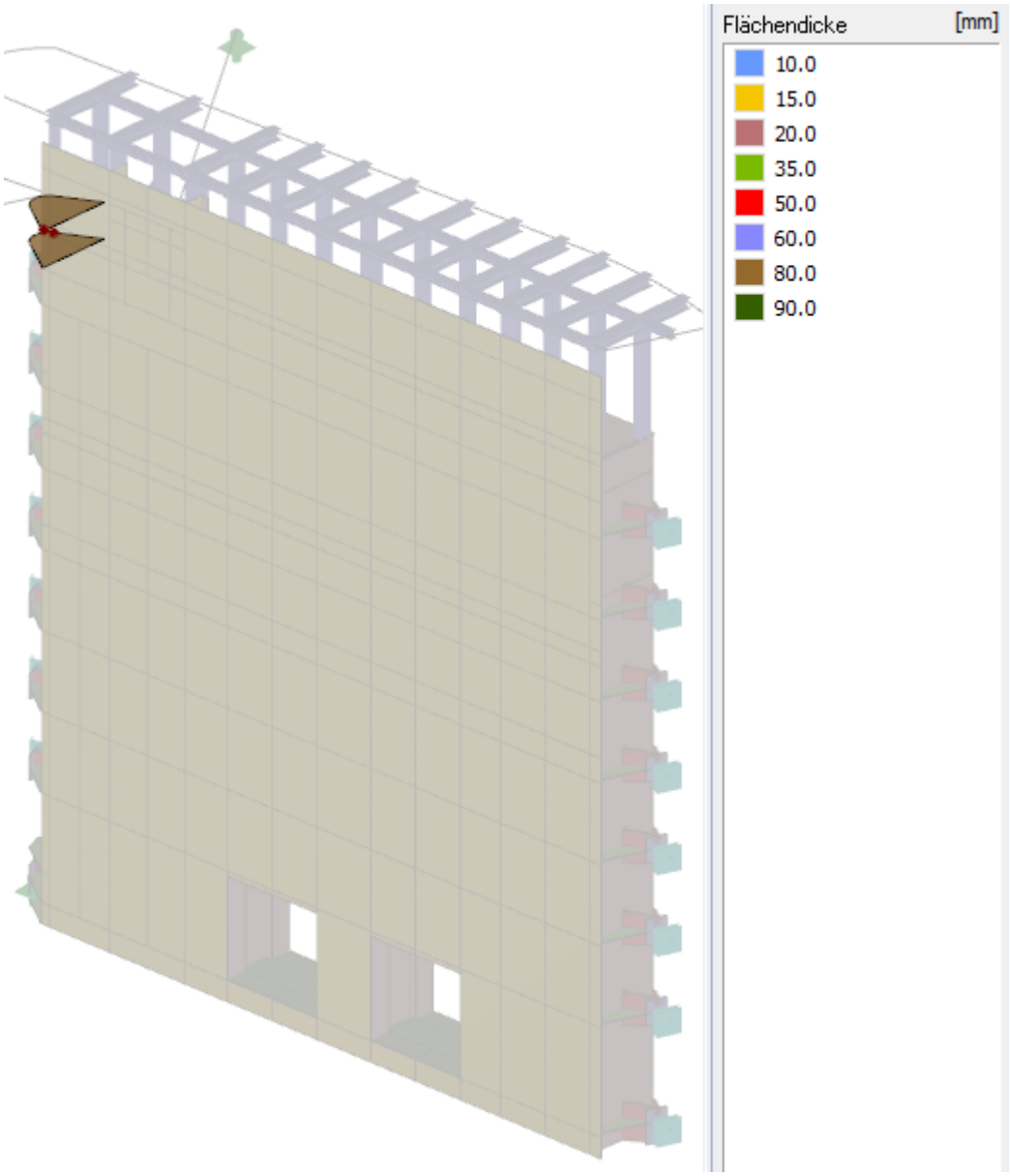
2.2.5. 50 mm Blechdicke (Knaggenträger vertikal & Zylinderanschluss)



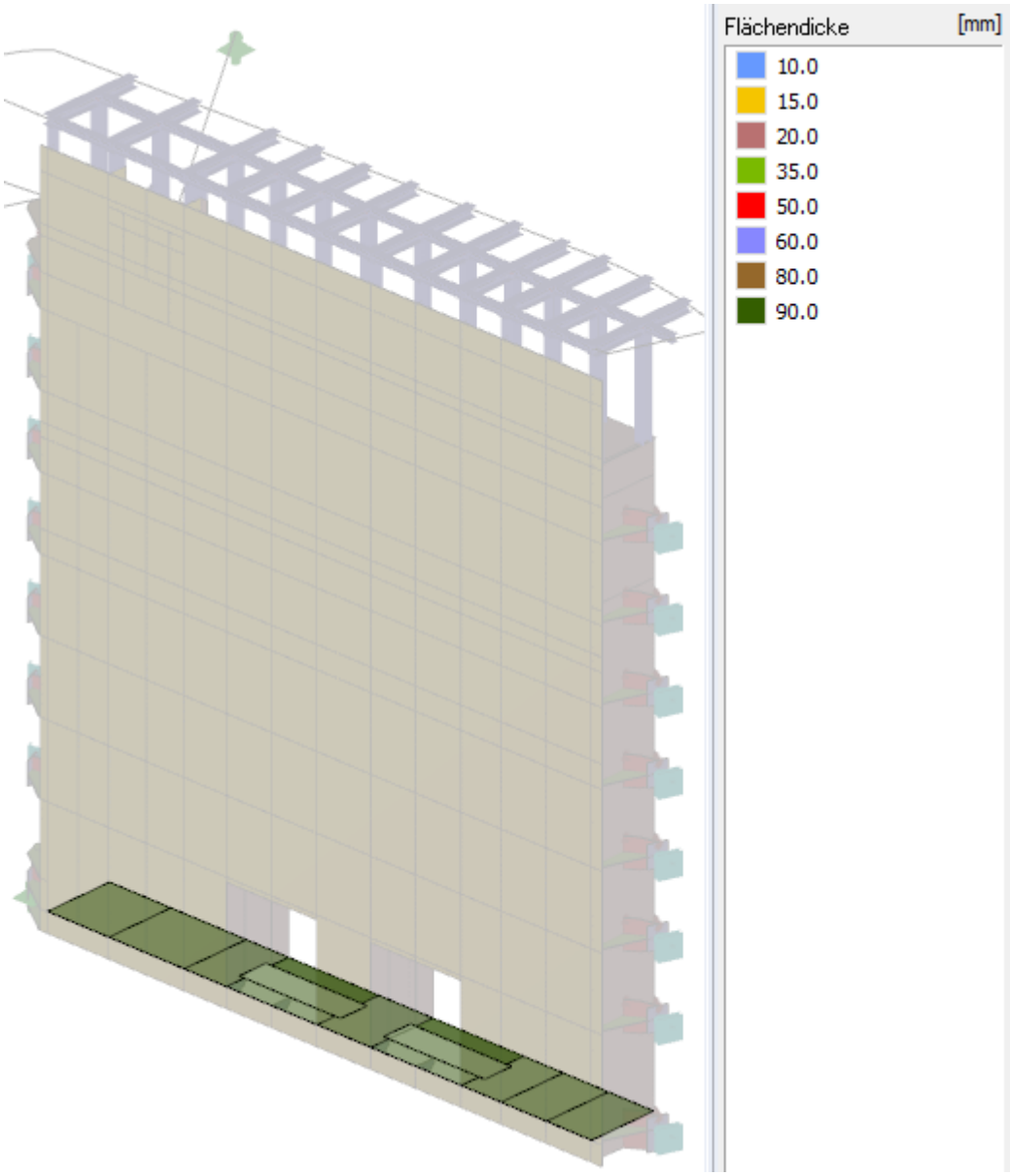
2.2.6. 60 mm Blechdicke (Knaggengrundblech)



2.2.7. 80mm Blechstärke

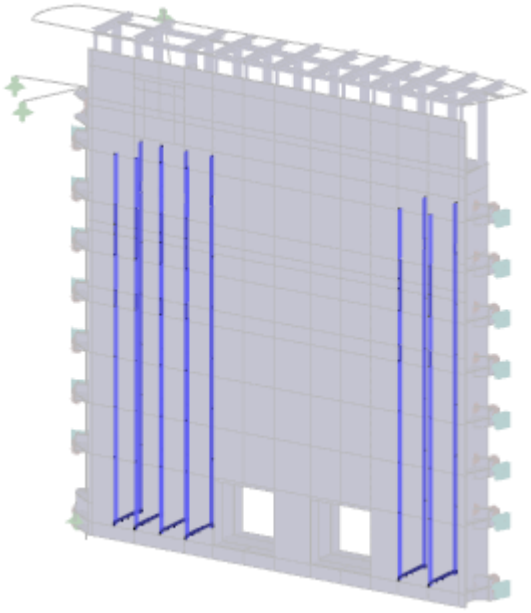


2.2.8. 90mm Blechstärke

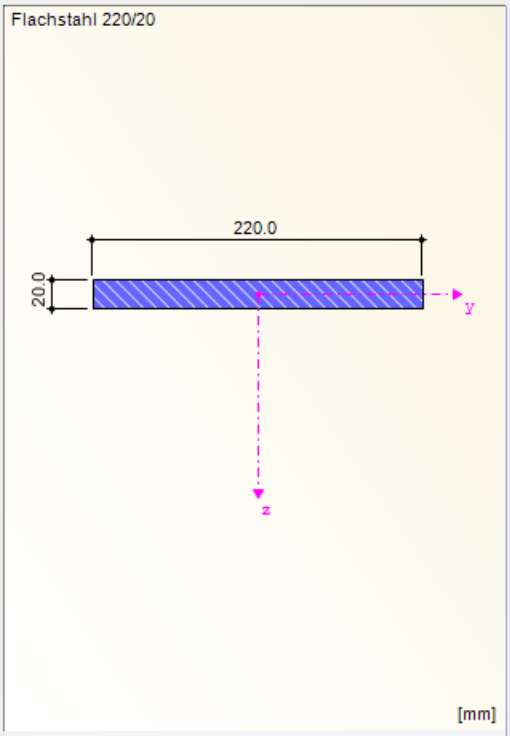


2.2.9. Stäbe

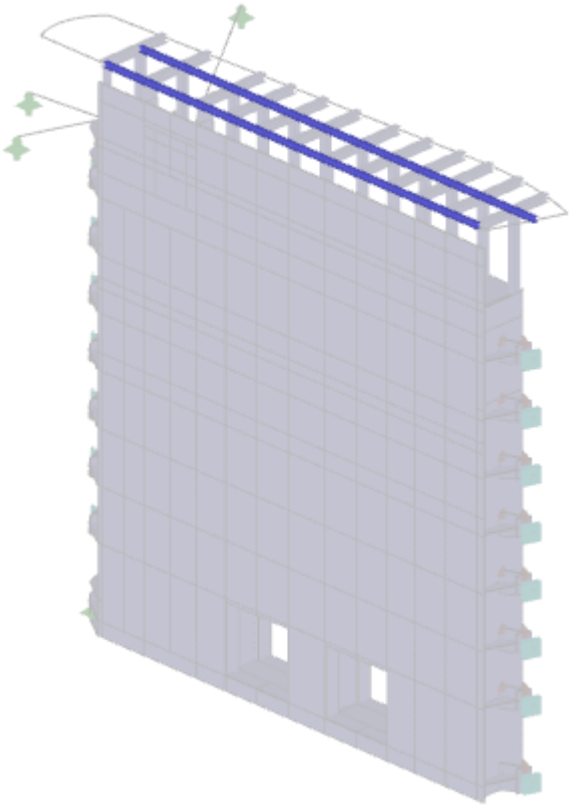
2.2.9.1. Flachstahl 220/20



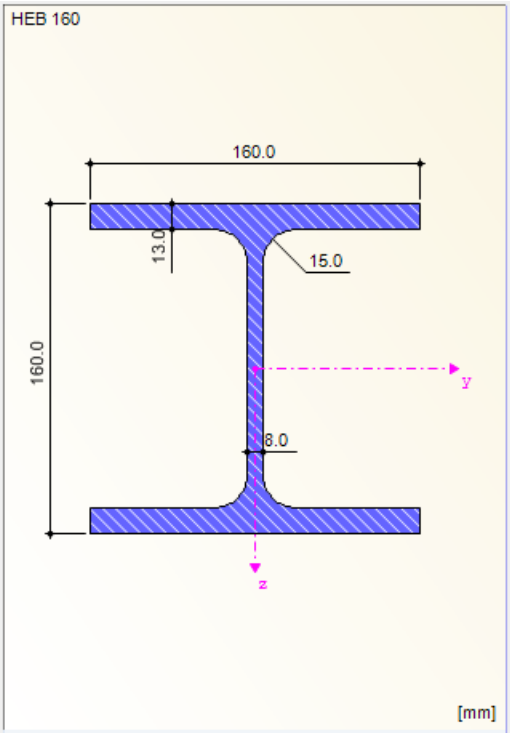
Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Blechbreite	b	220.0	mm
Blechdicke	t	20.0	mm
Querschnittsfläche	A	44.00	cm^2
Schubfläche	A_y	36.67	cm^2
Schubfläche	A_z	36.67	cm^2
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_y	14.67	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_z	1774.67	cm^4
Trägheitsradius	i_y	5.8	mm
Trägheitsradius	i_z	63.5	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	63.8	mm
Querschnittsgewicht	G	34.5	kg/m
Mantelfläche	A_{Mantel}	0.480	m^2/m
Torsionsträgheitsmoment	I_t	55.31	cm^4
Widerstandsmoment für Torsion	W_t	29.30	cm^3
Widerstandsmoment	W_y	14.67	cm^3
Widerstandsmoment	W_z	161.33	cm^3
Statisches Moment	$S_{y,max}$	11.00	cm^3
Statisches Moment	$S_{z,max}$	121.00	cm^3
Plastisches Widerstandsmoment	$W_{pl,y,max}$	22.00	cm^3
Plastisches Widerstandsmoment	$W_{pl,z,max}$	242.00	cm^3
Plastischer Formbeiwert	$\alpha_{pl,y,max}$	1.500	
Plastischer Formbeiwert	$\alpha_{pl,z,max}$	1.500	
Knicklinie (DIN 18800-2:2008-11)	$KL_{y,DIN}$	c	



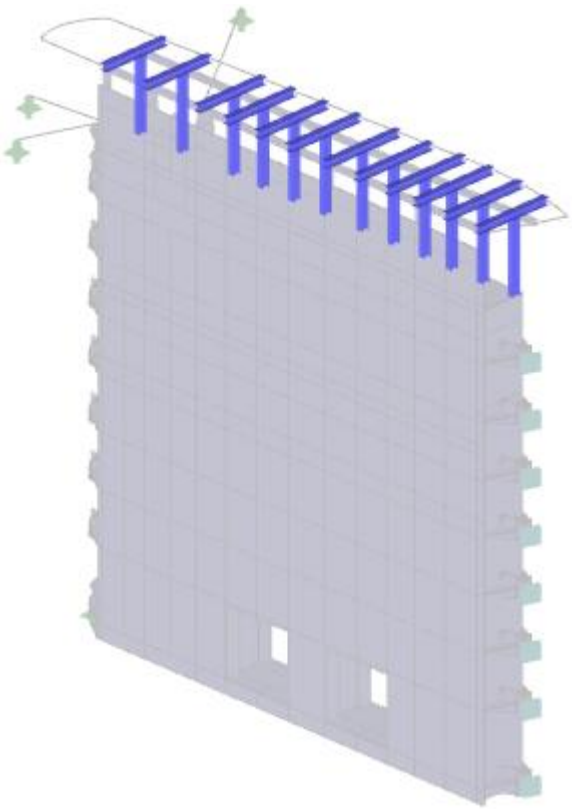
2.2.9.2. HEB 160



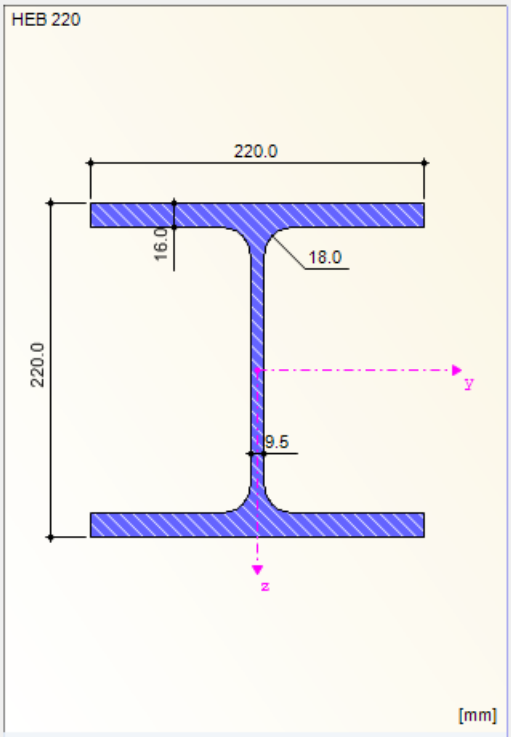
Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe	h	160.0	mm
Profilbreite	b	160.0	mm
Stegdicke	t_s	8.0	mm
Flanschdicke	t_g	13.0	mm
Ausrundungsradius	r	15.0	mm
Innere Höhe zwischen Flanschen	h_i	134.0	mm
Höhe des geraden Stegteils	d	104.0	mm
Querschnittsfläche	A	54.25	cm^2
Schubfläche	A_y	34.72	cm^2
Schubfläche	A_z	10.81	cm^2
Wirksame Schubfläche nach EC 3	$A_{v,y}$	43.44	cm^2
Wirksame Schubfläche nach EC 3	$A_{v,z}$	17.59	cm^2
Plastische Schubfläche	$A_{pl,y}$	41.60	cm^2
Plastische Schubfläche	$A_{pl,z}$	11.76	cm^2
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_y	2492.00	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_z	889.20	cm^4
Trägheitsradius	i_y	67.8	mm
Trägheitsradius	i_z	40.5	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	79.0	mm
Trägheitsradius des Gurtquerschnitts (1/5	i_{zg}	43.1	mm
Volumen	V	5.43	cm^3/mm
Querschnittsgewicht	G	42.6	kg/m
Mantelfläche	A_{Mantel}	0.920	m^2/m



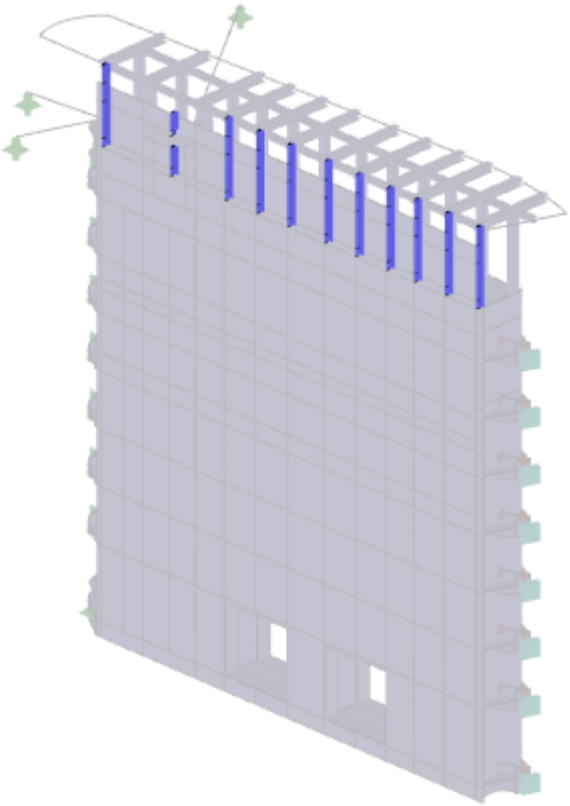
2.2.9.3. HEB 220



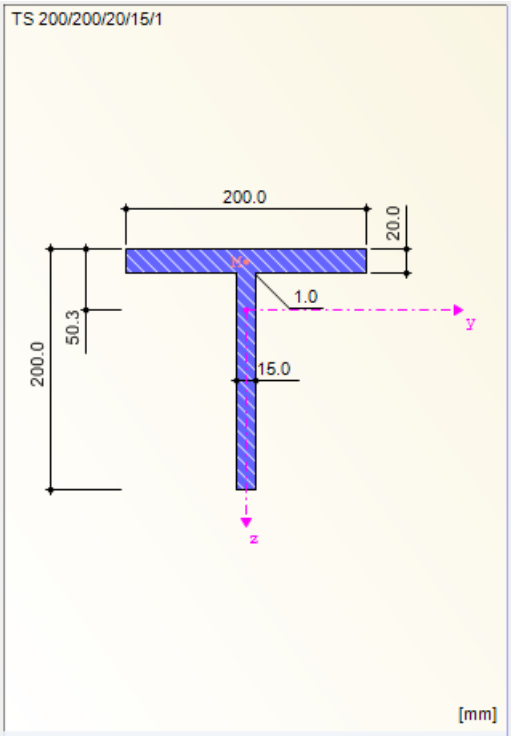
Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe	h	220.0	mm
Profilbreite	b	220.0	mm
Stegdicke	t_s	9.5	mm
Flanschdicke	t_g	16.0	mm
Ausrundungsradius	r	18.0	mm
Innere Höhe zwischen Flanschen	h_i	188.0	mm
Höhe des geraden Stegteils	d	152.0	mm
Querschnittsfläche	A	91.04	cm^2
Schubfläche	A_y	58.71	cm^2
Schubfläche	A_z	17.87	cm^2
Wirksame Schubfläche nach EC 3	$A_{v,y}$	73.01	cm^2
Wirksame Schubfläche nach EC 3	$A_{v,z}$	27.92	cm^2
Plastische Schubfläche	$A_{pl,y}$	70.40	cm^2
Plastische Schubfläche	$A_{pl,z}$	19.38	cm^2
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_y	8091.00	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_z	2843.00	cm^4
Trägheitsradius	i_y	94.3	mm
Trägheitsradius	i_z	55.9	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	109.6	mm
Trägheitsradius des Gurtquerschnitts (1/5	i_{zg}	59.5	mm
Volumen	V	9.10	cm^3/mm
Querschnittsgewicht	G	71.5	kg/m
Mantelfläche	A_{Mantel}	1.270	m^2/m



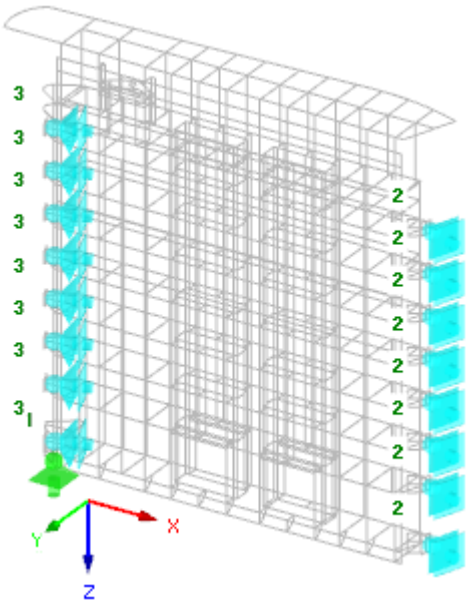
2.2.9.4. TS 200/200/20/15

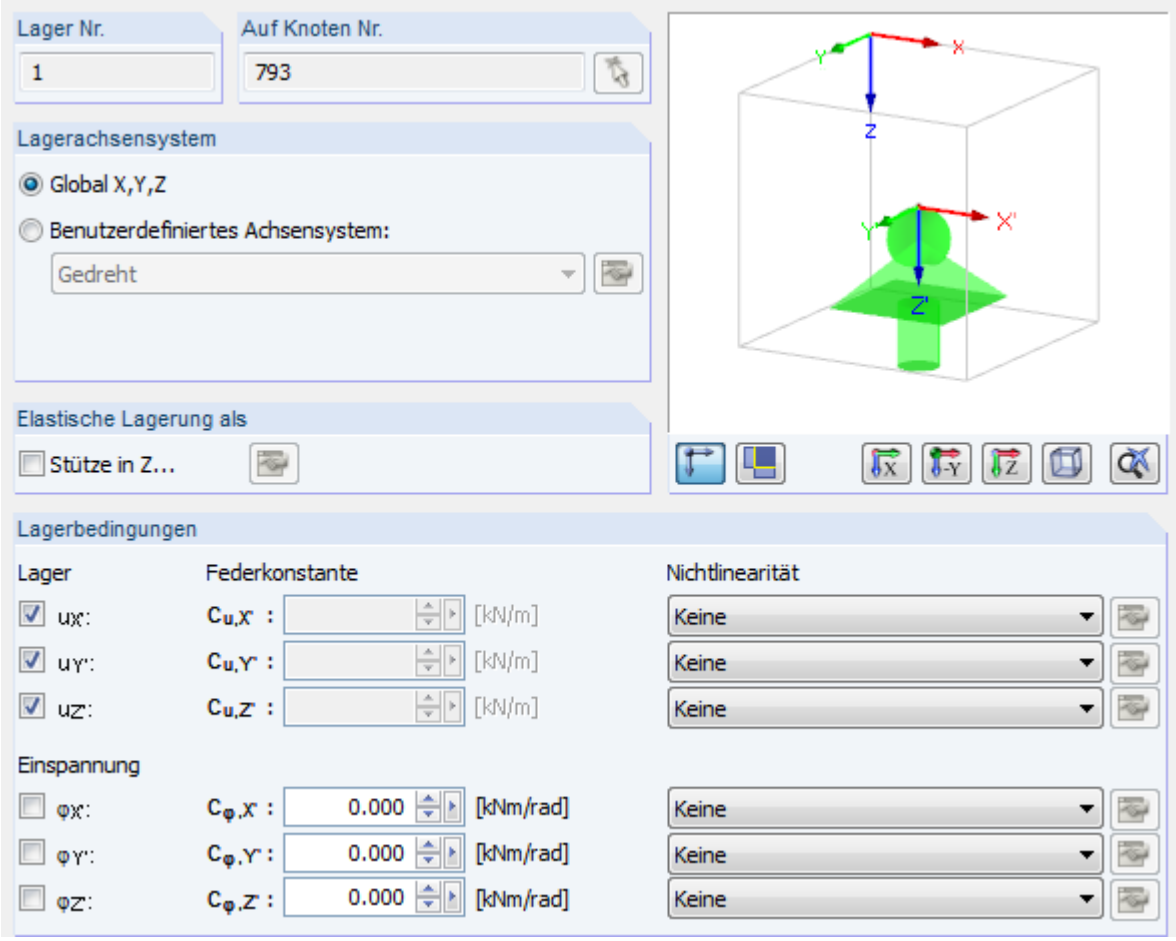


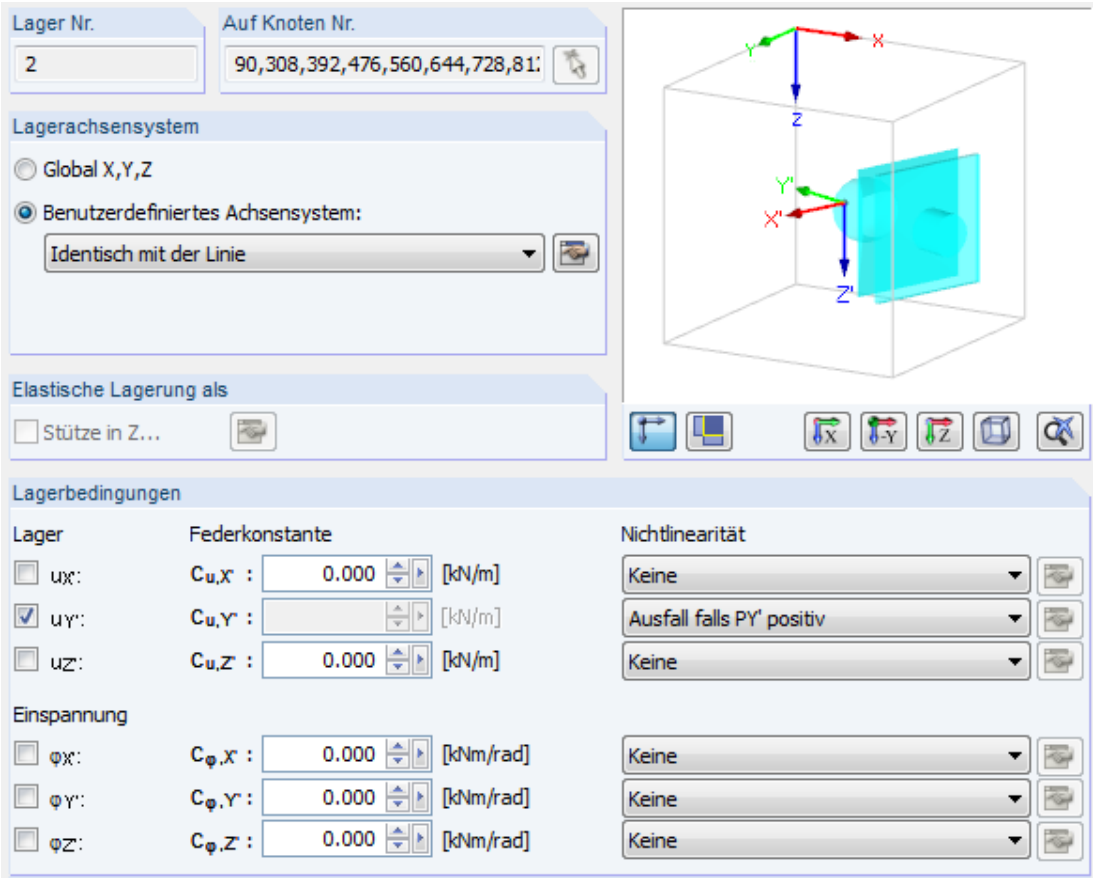
Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Höhe	h	200.0	mm
Breite	b	200.0	mm
Flanschdicke	t	20.0	mm
Stegdicke	s	15.0	mm
Kehlnahtdicke	a	1.0	mm
Querschnittsfläche	A	67.00	cm^2
Schubfläche	A_y	33.62	cm^2
Schubfläche	A_z	22.53	cm^2
Wirksame Schubfläche nach EC 3	$A_{v,z}$	28.50	cm^2
Schwerpunktabstand	e_z	50.3	mm
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_y	2354.27	cm^4
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac	I_z	1338.40	cm^4
Polares Trägheitsmoment	I_p	3692.67	cm^4
Trägheitsradius	i_y	59.3	mm
Trägheitsradius	i_z	44.7	mm
Polarer Trägheitsradius	i_p	74.2	mm
Querschnittsgewicht	G	52.6	kg/m
Mantelfläche	A_{Mantel}	0.800	m^2/m
Torsionsträgheitsmoment	I_t	70.82	cm^4
Schubmittelpunkt-Lage bezogen auf S	z_M	-40.3	mm
Wölbwiderstand bezogen auf M	I_ω	0.00	cm^6
Wölbwiderstand für Eigenverwölbung der	$I_{\omega,eigen}$	1087.48	cm^6
Widerstandsmoment	$W_{v,max}$	157.26	cm^3

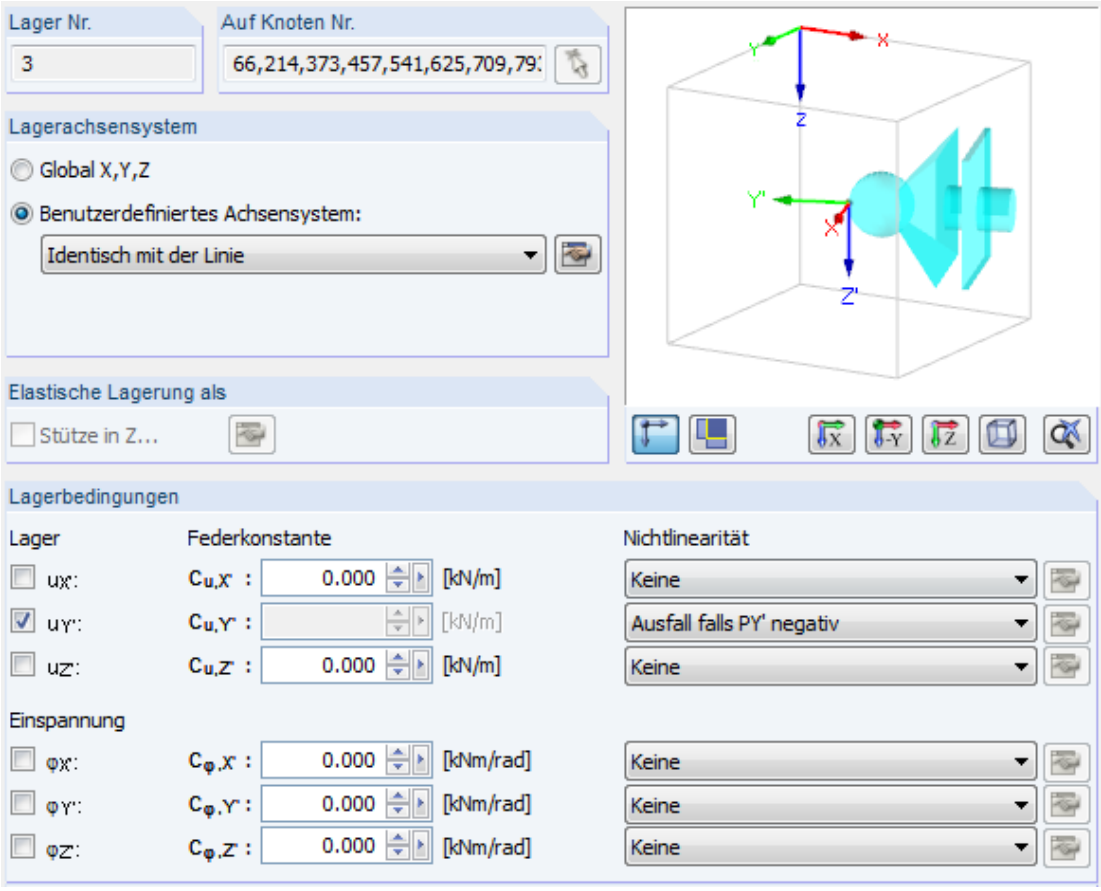


2.3. Knotenlager






Lager Nr.
2
Auf Knoten Nr.
90,308,392,476,560,644,728,81
Lagerachsensystem
Global X,Y,Z
Benutzerdefiniertes Achsensystem:
Identisch mit der Linie
Elastische Lagerung als
Stütze in Z...
Lagerbedingungen
Lager
Federkonstante
Nichtlinearität
uX:
uY:
uZ:
Einspannung
φX:
φY:
φZ:
0.000
[kN/m]
[kNm/rad]
Keine
Ausfall falls PY' positiv


Lager Nr.
3
Auf Knoten Nr.
66,214,373,457,541,625,709,79
Lagerachsensystem
Global X,Y,Z
Benutzerdefiniertes Achsensystem:
Identisch mit der Linie
Elastische Lagerung als
Stütze in Z...
Lagerbedingungen
Lager
Federkonstante
Nichtlinearität
uX:
uY:
uZ:
Einspannung
φX:
φY:
φZ:
0.000
[kN/m]
[kNm/rad]
Keine
Ausfall falls PY' negativ

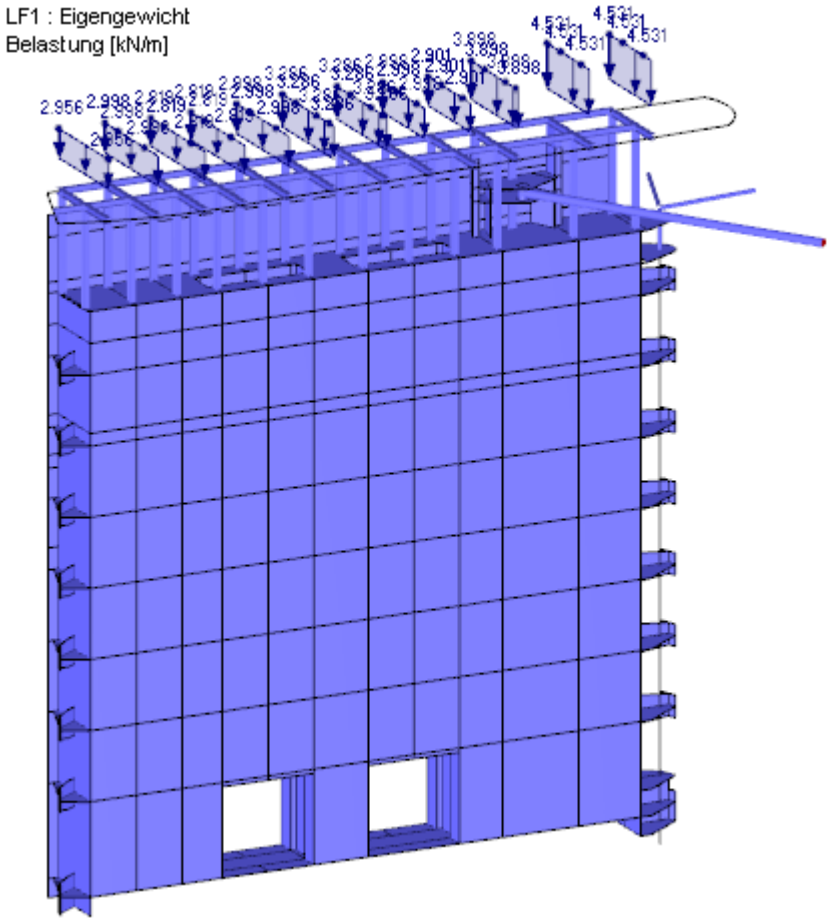
2.4. Werkstoffe

Torkörper: S355J2

Befahrbarer Steg: S355J2

3. LASTFÄLLE

3.1. LF1: Eigengewicht + 10%



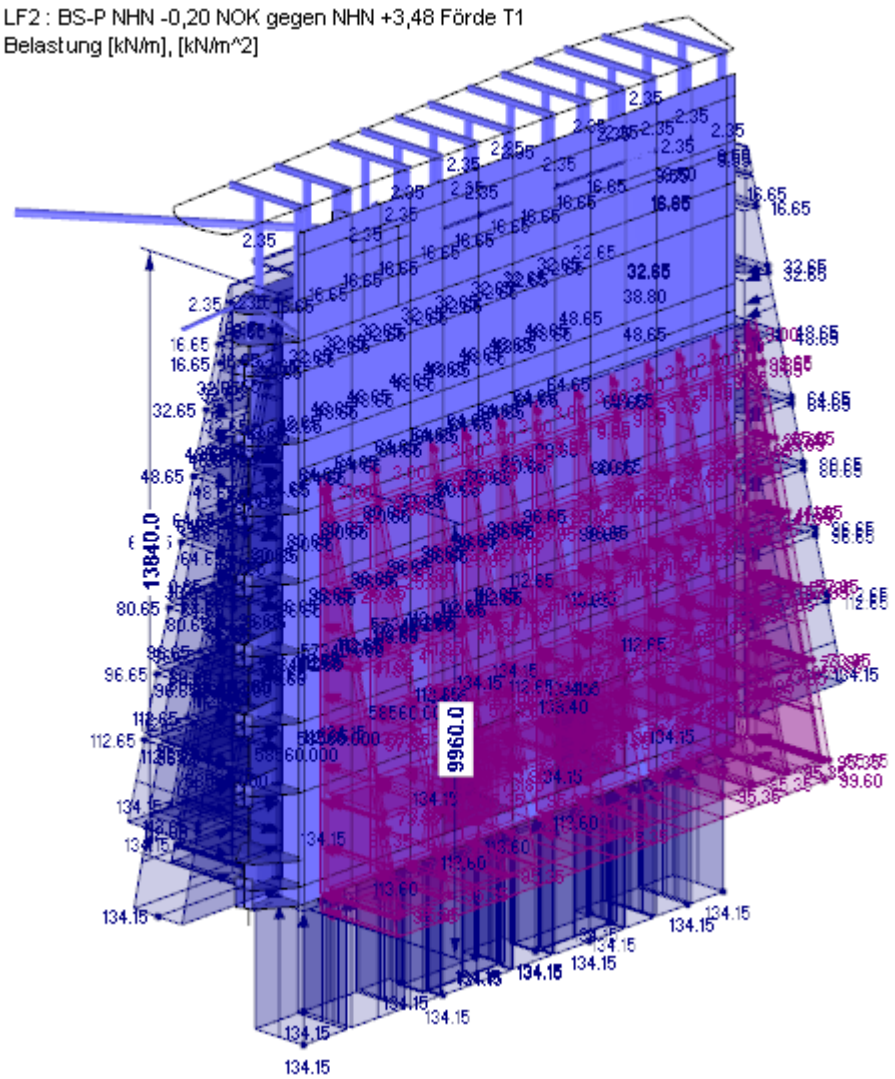
Eigengewicht des Modells wird automatisch vom Programm berücksichtigt.

Für die Fahrbahn werden Schwerlastgitterroste mit einem Gewicht von ca. 250 kg/m^2 berücksichtigt.

3.2. LF2: in Betrieb: BS-P NHN -0,20 NOK gegen NHN +3,48 Förde Tor 1

Unter Berücksichtigung von 0,10 m Schwall und Sunk ergeben sich:

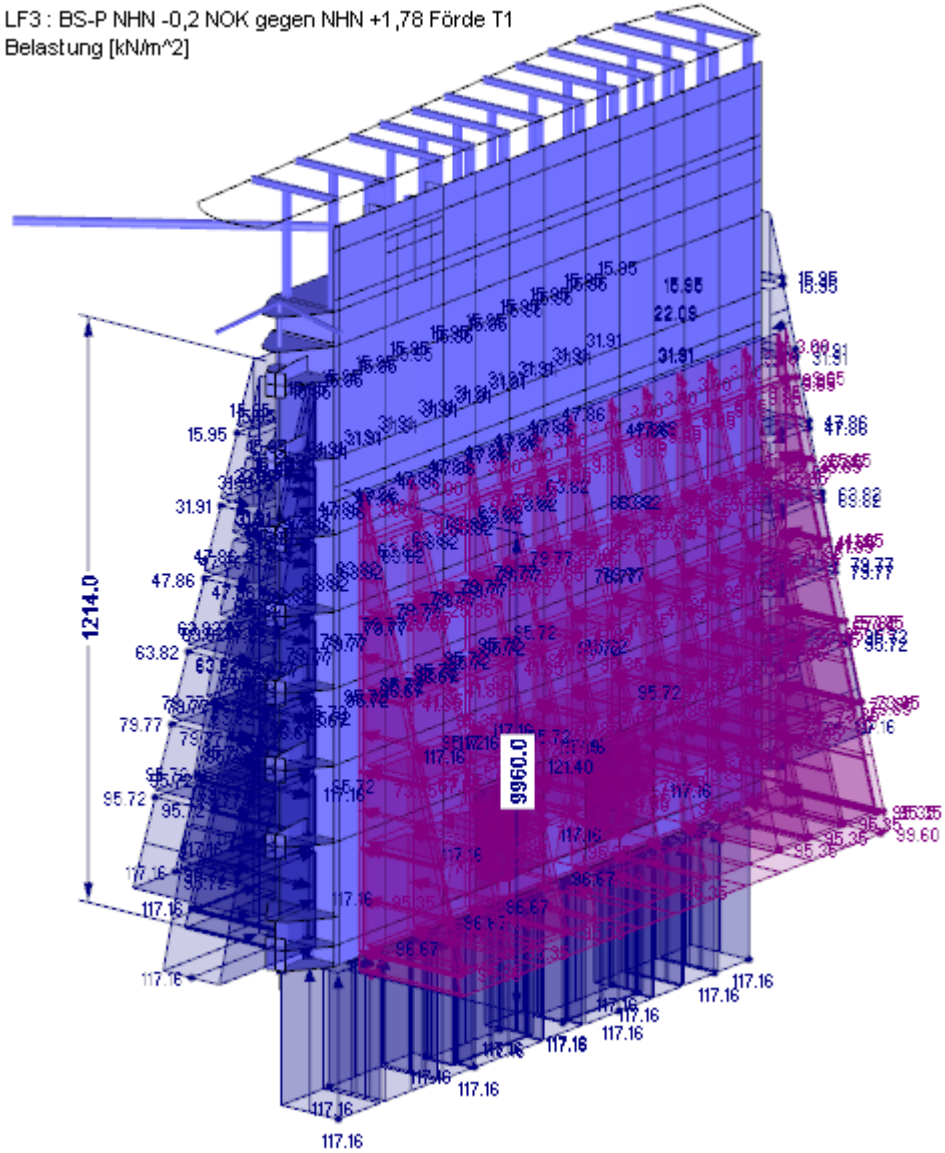
	NOK:		NHN -0,30 m
	Kieler Förde		NHN +3,58 m
	OK Stauwand		NHN +5,10 m
	Torhöhe		15,360 m
Kieler Förde:	15,360 - (5,10 - 3,58)	=	13,84 mWS
NOK:	15,360 - (5,10 + 0,30)	=	9,96 mWS



3.3. LF3: in Betrieb: BS-P NHN -0,2 NOK gegen NHN +1,78 Förde Tor 1

Unter Berücksichtigung von 0,10 m Schwall und Sunk ergeben sich:

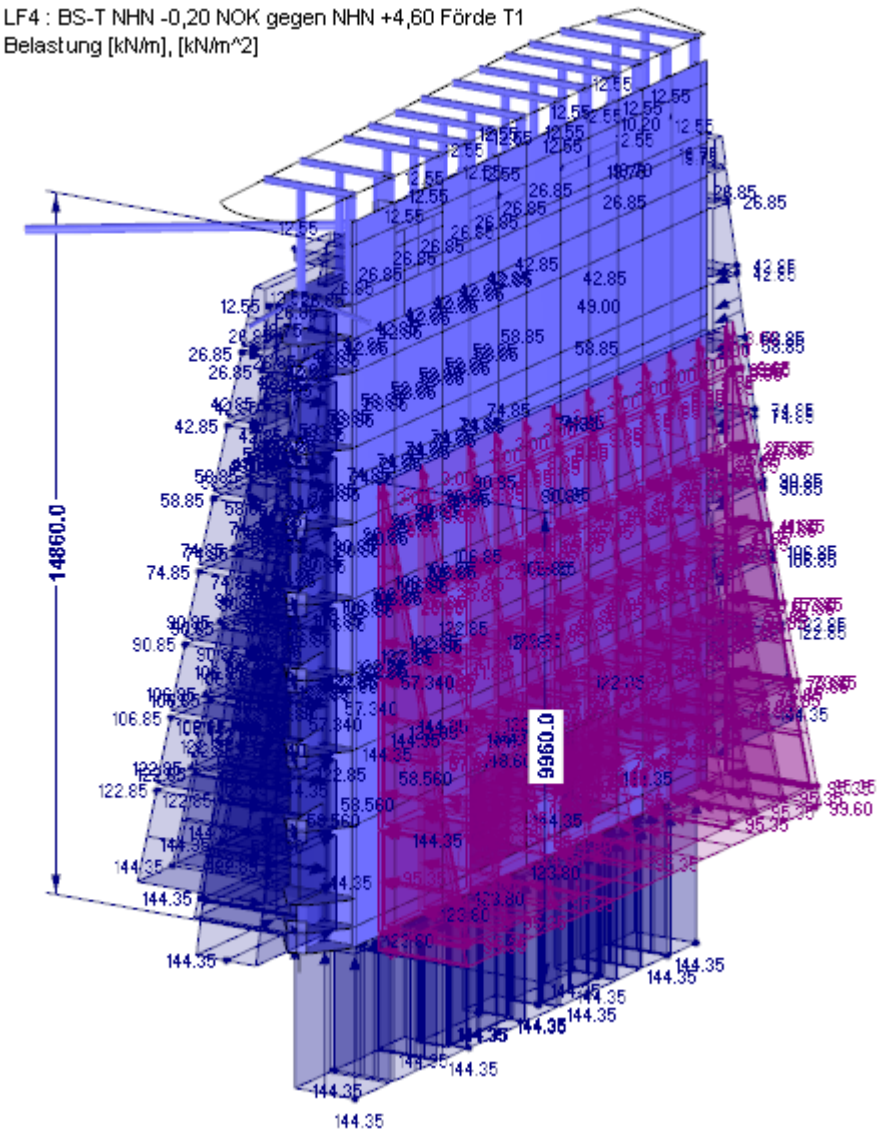
	NOK:		NHN -0,30 m
	Kieler Förde		NHN +1,88 m
	OK Stauwand		NHN +5,10 m
	Torhöhe		15,360 m
Kieler Förde:	15,360 - (5,10 - 1,88)	=	12,14 mWS
NOK:	15,360 - (5,10 + 0,30)	=	9,96 mWS



3.4. LF4: außer Betrieb: BS-T NHN -0,20 NOK gegen NHN +4,60 Förde Tor 1

Hier wird kein Schwall oder Sunk angesetzt, da laut:

	NOK:		NHN -0,20 m
	Kieler Förde		NHN +4,60 m
	OK Stauwand		NHN +5,10 m
	Torhöhe		15,360 m
Kieler Förde:	15,360 - (5,10 - 4,60)	=	14,86 mWS
NOK:	15,360 - (5,10 + 0,20)	=	9,96 mWS

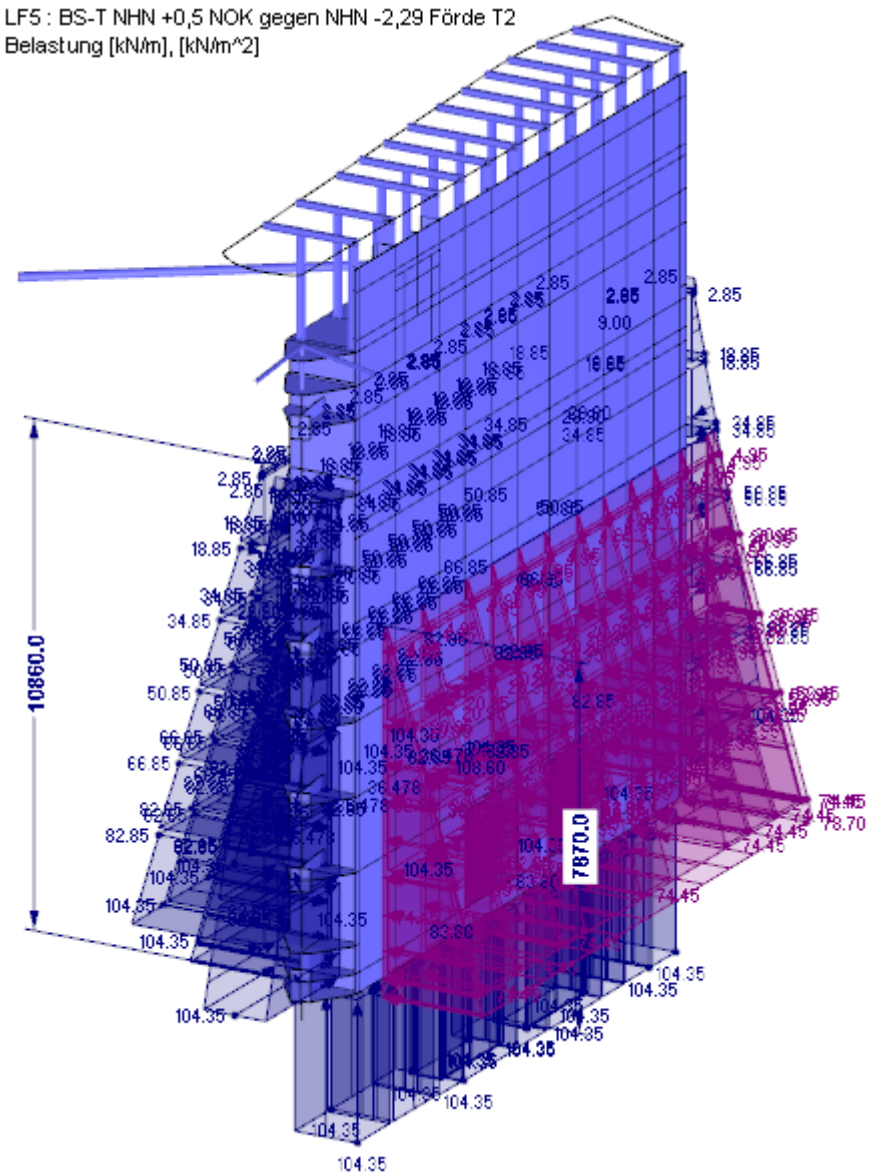


3.5. LF5: außer Betrieb: BS-T NHN +0,5 NOK gegen NHN -2,29 Förde Tor 2

Da das Haupt aus 2 Stemmtoren besteht, wird der Wasserstand von NHN -2,29 in der Kieler Förde nicht von der Stemmseite angetragen.

Unter Berücksichtigung von 0,10 m Schwall und Sunk ergeben sich:

	NOK:		NHN +0,60 m
	Kieler Förde		NHN -2,39 m
	OK Stauwand		NHN +5,10 m
	Torhöhe		15,360 m
Kieler Förde:	15,360 - (5,10 - 0,60)	=	10,86 mWS
NOK:	15,360 - (5,10 + 2,39)	=	7,87 mWS



3.6. LF6: Dynamische Wellenlast H=127cm

Eingangswerte:

$H_b := 1.27m$ — Brecherwellenhöhe

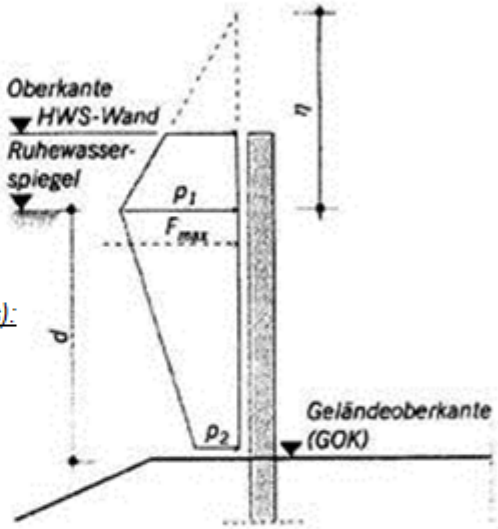
$\varphi_{stoß} := 1.40$ — Stoßfaktor [Annahme ungünstigster Wert (Wand mit starrer Stützung, NW oberhalb 1,50m unter GOK (GOK, hier = Sohle))]

$\gamma_w := 10.5 \frac{kN}{m^3}$ — Wichte des Wassers

$H_W := 4.6m$ — Höhe Ruhewasserspiegel

$H_{Sohle} := -10.3m$ — Höhe Sohle

$d_b := H_W - H_{Sohle} = 14.9\,m$



Maximal anzusetzende Horizontalkraft:

$$F_{max} := \varphi_{stoß} \cdot 8.0 \cdot \gamma_w \cdot H_b^{\,2} = 189.677 \cdot \frac{kN}{m}$$

Druckordinate p_1 (in Höhe des Ruhewasserspiegels):

$$p_1 := \frac{F_{max}}{0.625 \cdot d_b + 0.65 \cdot H_b} = 18.71 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

$\eta := 1.3 \cdot H_b = 1.651\,m$ — Höhe der Druckfigur

Druckordinate p_2 (in Höhe Geländeoberkante)

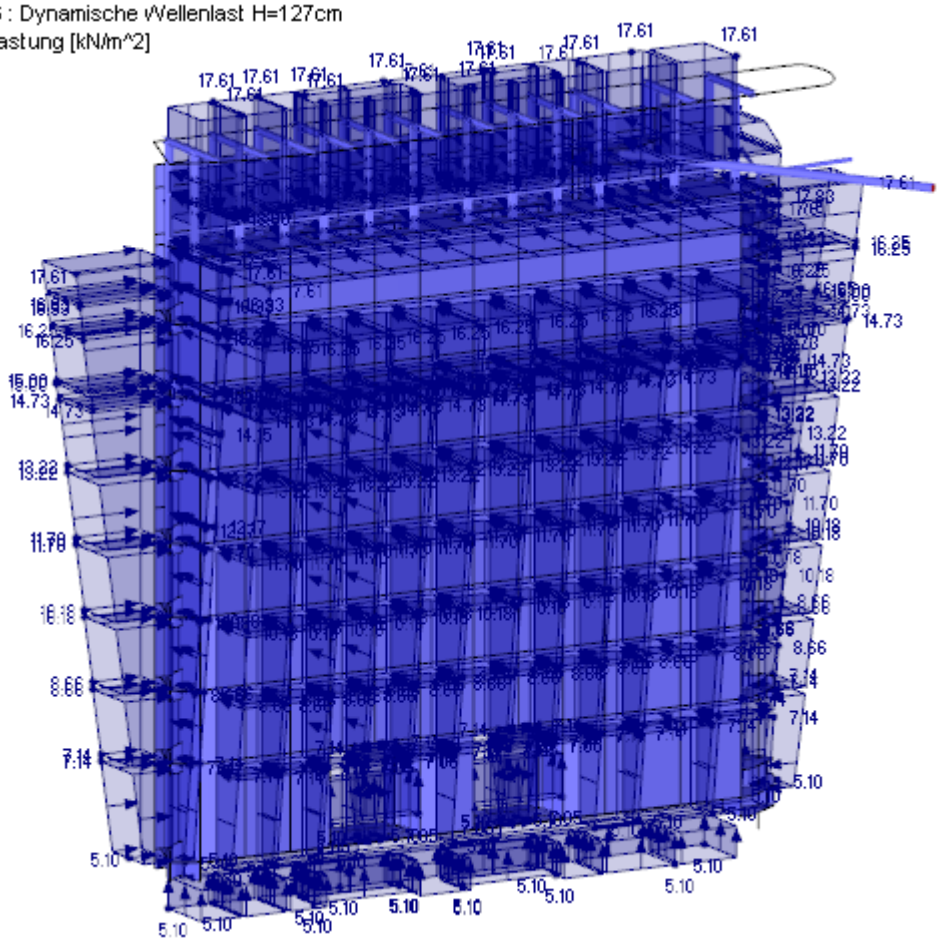
$$p_2 := 0.25 \cdot p_1 = 4.677 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Druckordinate p_3 (an der Oberkante des Verschlusses)

$H_{Verschluss} := 5.10m$ — Höhe Verschluss

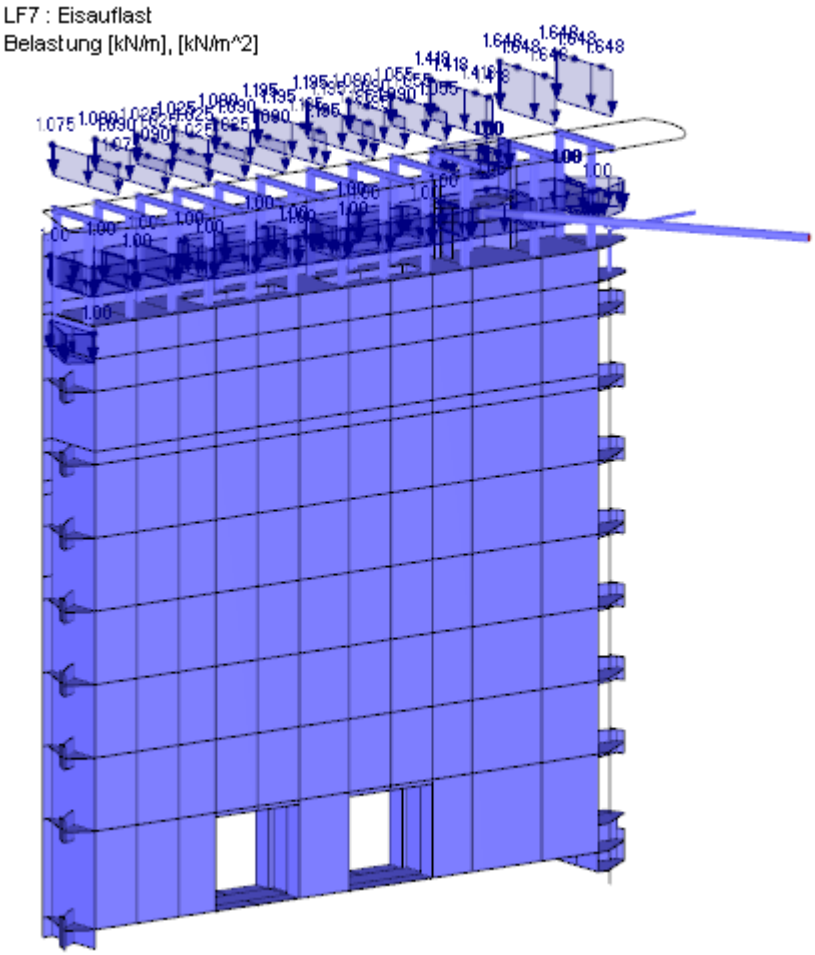
$$p_{oben} := \begin{cases} \dfrac{p_1 \cdot \left[\eta - \left(H_{Verschluss} - H_W\right)\right]}{\eta} & \text{if } H_{Verschluss} \le H_W + \eta \\ 0.0 \dfrac{kN}{m^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 13.043 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

LF6 : Dynamische Wellenlast H=127cm
Belastung [kN/m^2]



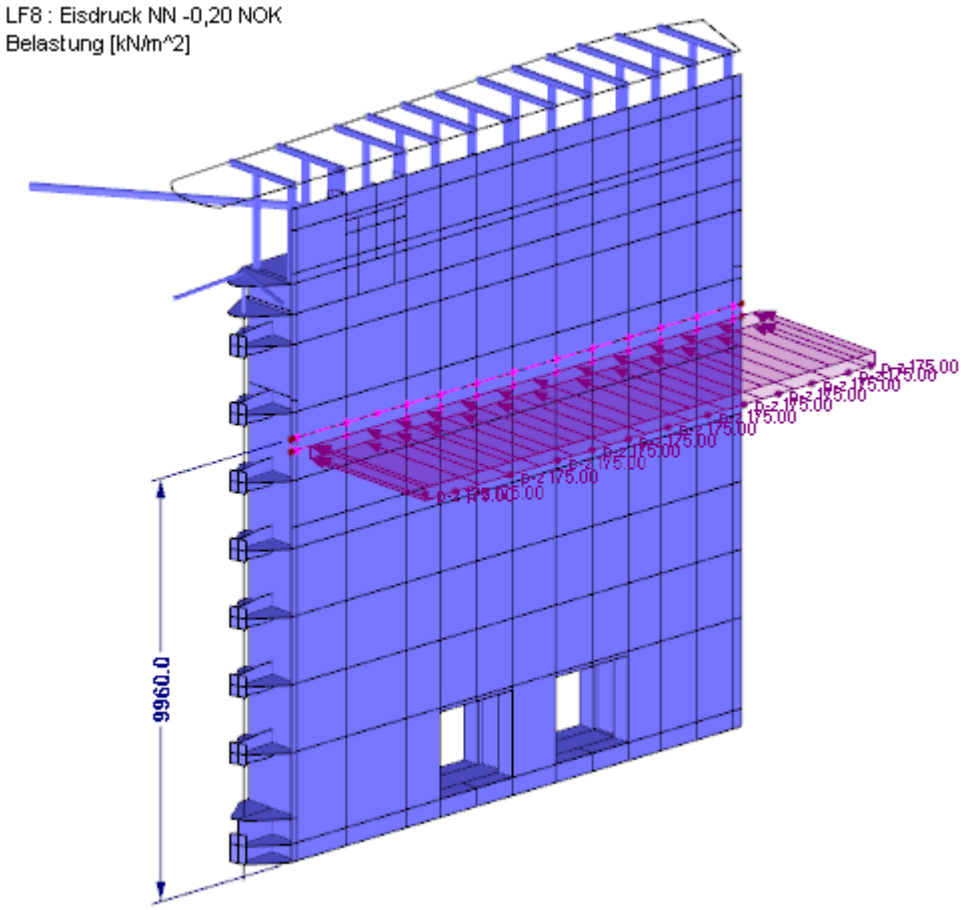
3.7. LF7: Eisauflast 1 kN/m²

Eisauflast wurde bis zur Kote NN +1,70 auf dem Torkörper und auf der Fahrbahn sowie auf der Unterkonstruktion.



3.8. LF8: Eisdruck NN -0,20 NOK

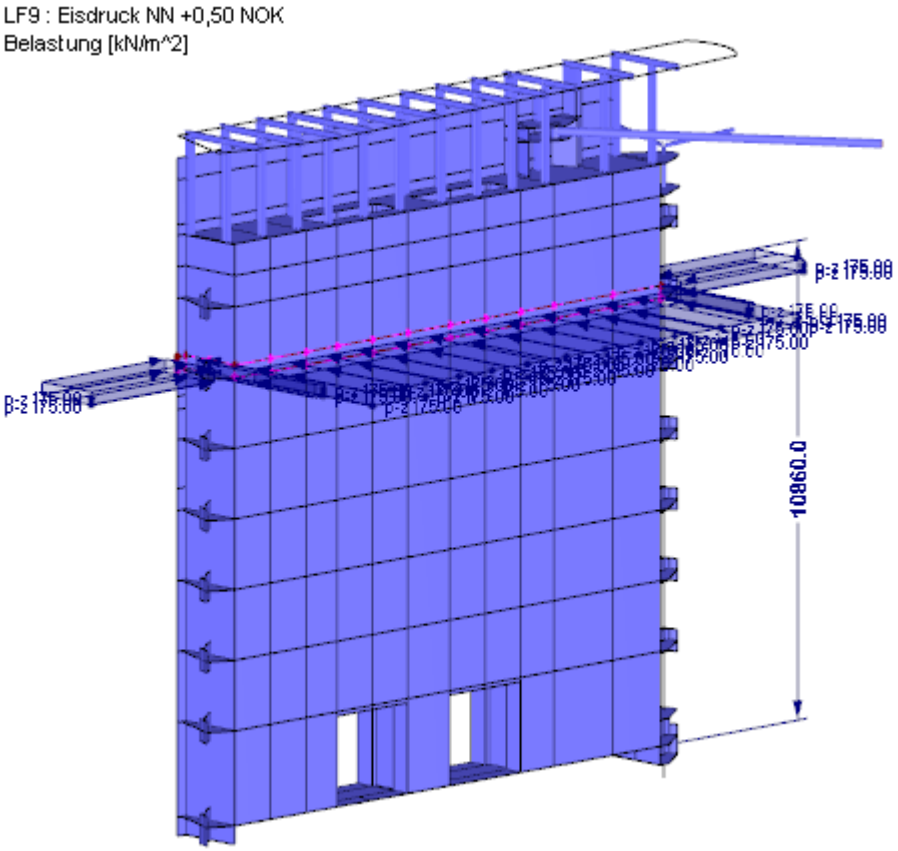
Der Eisdruck wird reduziert um 30% nach [1] 5.2.5 (5).



3.9. LF9: Eisdruck NN +0,50 NOK

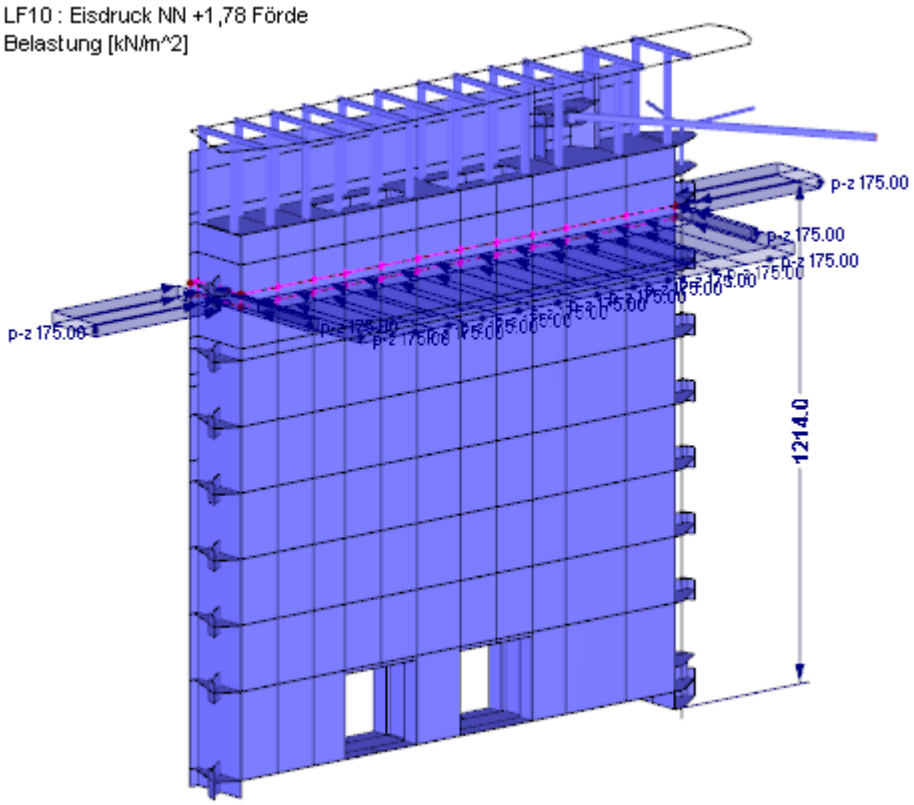
Da das Haupt aus 2 Stemmtoren besteht, wird der Wasserstand von NHN +0,5 im NOK von der Stemmseite angetragen. Deshalb wird auch der Eisdruck hier angetragen.

Der Eisdruck wird reduziert um 30% nach [1] 5.2.5 (5).



3.10. LF10: Eisdruck NN +1,78 Förde

Der Eisdruck wird reduziert um 30% nach [1] 5.2.5 (5).

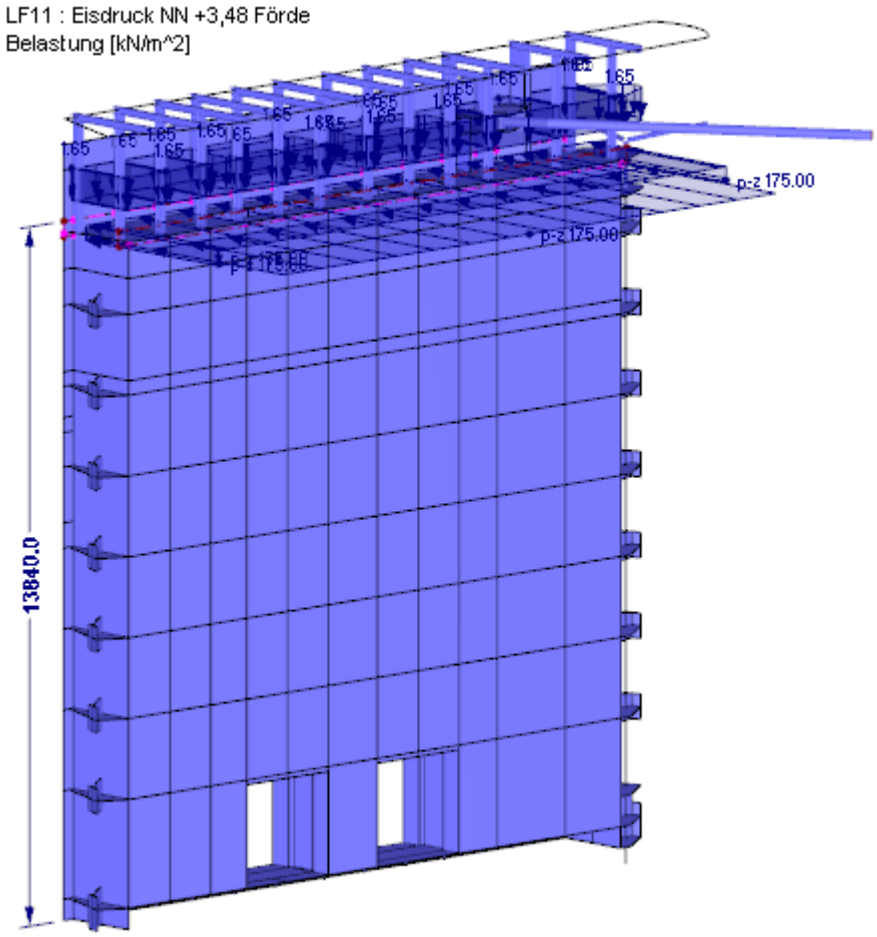


3.11. LF11: Eisdruck NN +3,48 Förde

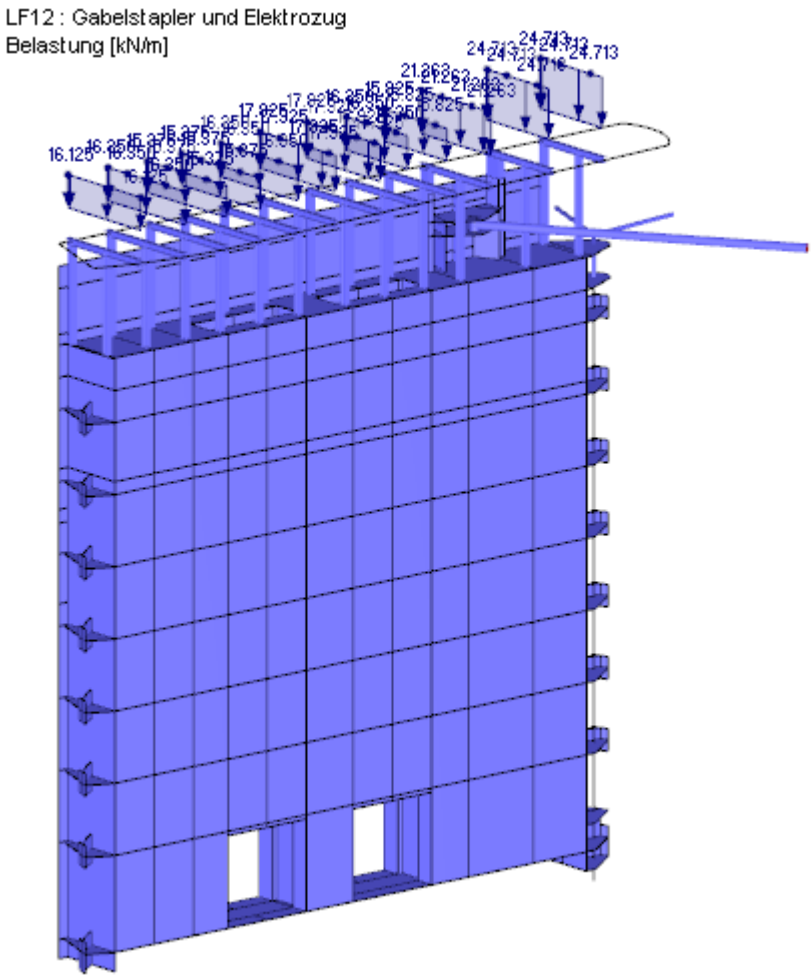
Der Eisdruck wird reduziert um 30% nach [1] 5.2.5 (5).

Da die Eislast durch den Hohlkasten des Tores geteilt wird, wird vertikal eine Last von:

$$p_{E,z} = 7{,}0\frac{kN}{m^3} * 0{,}265m = 1{,}65\frac{kN}{m^2}$$



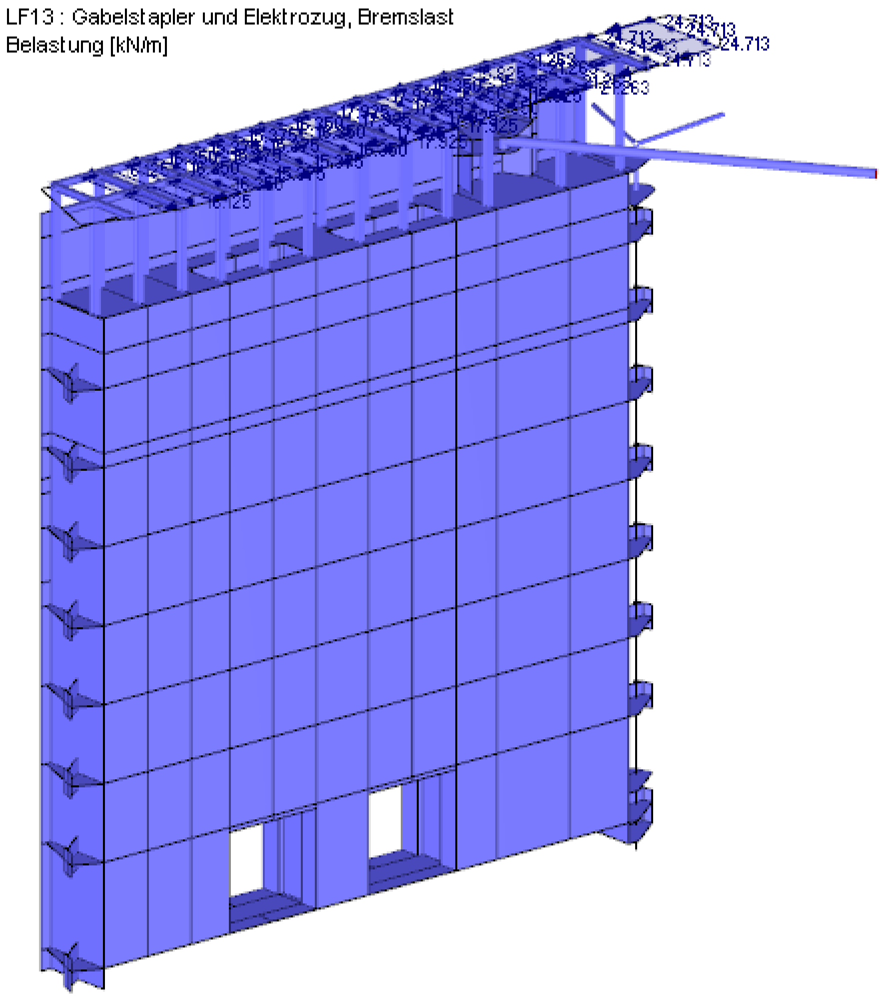
3.12. LF12: Gabelstapler und Elektrozug



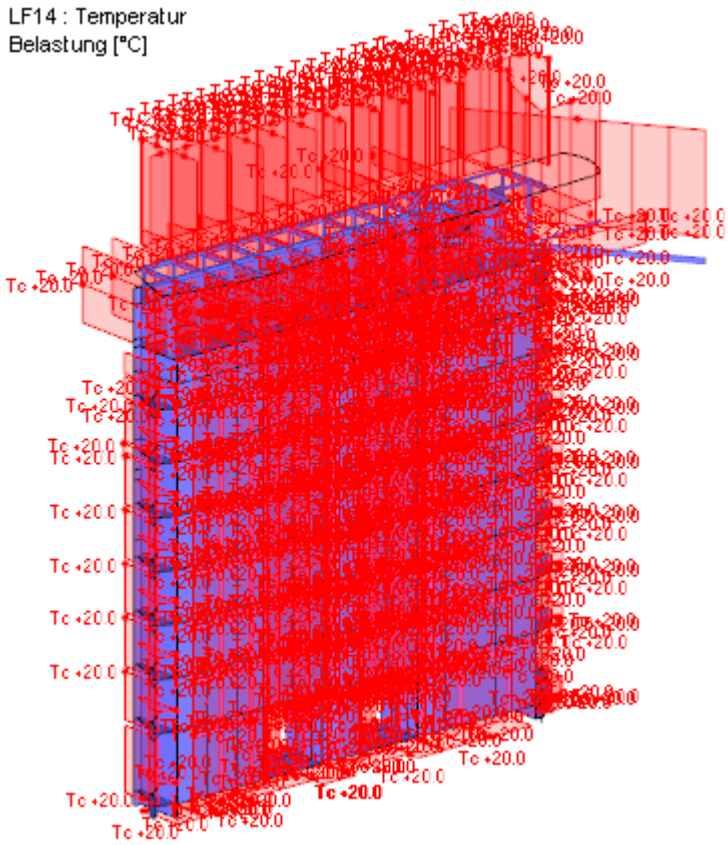
Als Verkehrslast wird eine gleichmäßige Flächenlast von 15 kN/m^2 (aus den Gesamtgewichten der Fahrzeuge mit einem Schwingbeiwert von 1,4 und verteilt auf der Oberfläche) eingesetzt.

3.13. LF13: Gabelstapler und Elektrozug, Bremslast

Als Bremslast wurde die Gewichtskraft in Fahrtrichtung angesetzt.

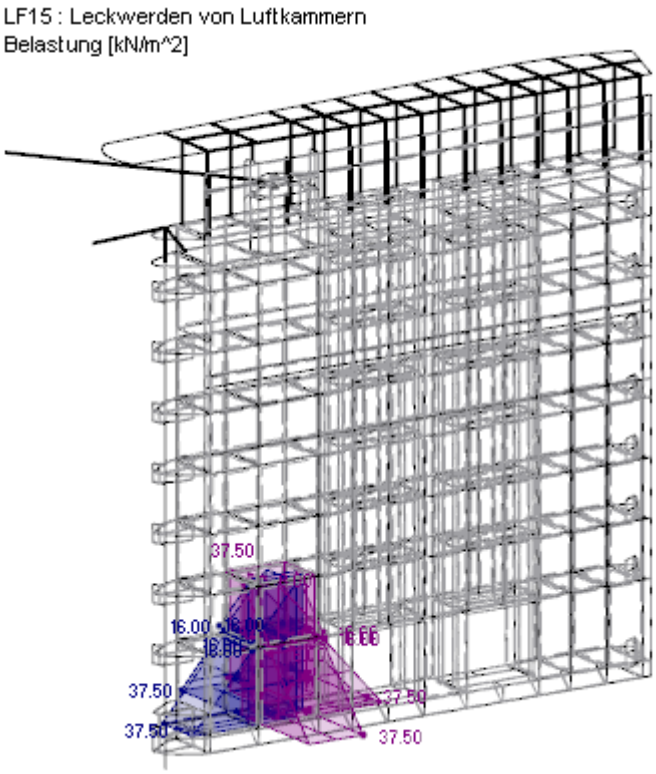


3.14. LF14: Temperatur



3.15. LF15: Leckwerden von Luftkammer

Für die Leckage Untersuchungen wurden die größten benachbarten Zellen gewählt.



3.16. Weitere Lastfälle

Die Lastfälle Wind, Bewegungsbehinderung, Schiffstoß und Schiffsreibung haben in erster Linie Auswirkungen auf Antriebs- und Lagerungselemente des Stemmtores. Deshalb werden diese Lastfälle nur bei der Bemessung dieser berücksichtigt.

4. KOMBINATIONEN

4.1. Für Bemessung

Last-kombin.	Bezeichnung
LK1	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.5*LF7 + 1.5*LF12 + 1.5*LF13
LK2	1.35*LF1 + 1.35*LF3 + 1.5*LF7 + 1.5*LF12 + 1.5*LF13
LK3	1.35*LF1 + 1.25*LF2 + 1.35*LF7 + 1.35*LF8 + 1.35*LF11 + 1.35*LF12 + 1.35*LF13 - 1.35*LF14
LK4	1.35*LF1 + 1.25*LF3 + 1.35*LF7 + 1.35*LF8 + 1.35*LF10 + 1.35*LF12 + 1.35*LF13 - 1.35*LF14
LK5	1.35*LF1 + 1.25*LF4 + 1.35*LF12 + 1.35*LF13
LK6	1.35*LF1 + 1.25*LF5 + 1.35*LF12 + 1.35*LF13
LK7	1.35*LF1 + 1.1*LF4 + 1.1*LF6
LK8	1.35*LF1 + 1.1*LF4 + 1.1*LF6

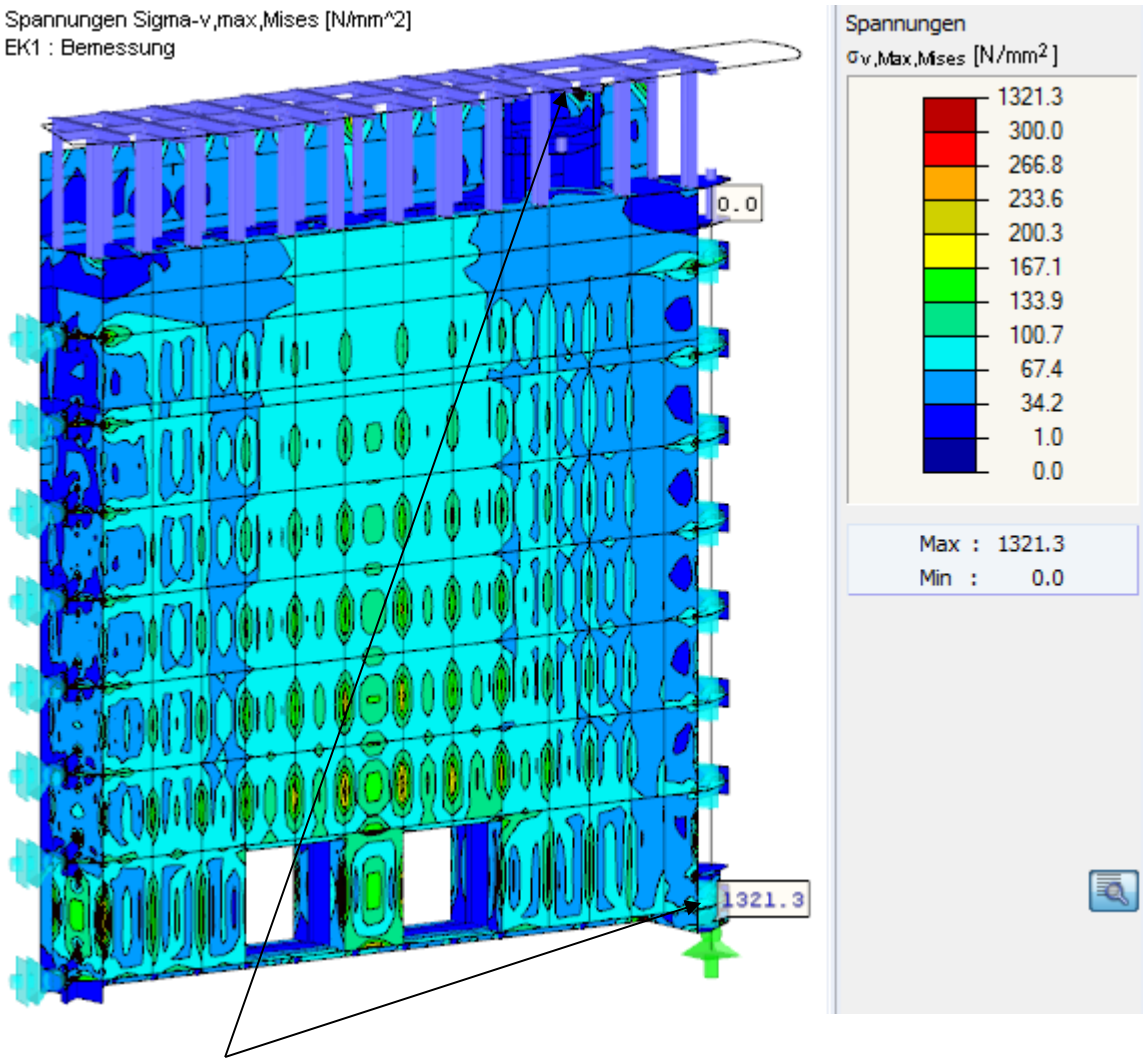
4.2. Für Verformungen

Last-kombin.	Bezeichnung
LK101	LF1 + LF2 + LF7 + LF12 + LF13
LK102	LF1 + LF3 + LF7 + LF12 + LF13
LK103	LF1 + LF2 + LF7 + LF8 + LF11 + LF12 + LF13 - LF14
LK104	LF1 + LF3 + LF7 + LF8 + LF10 + LF12 + LF13 - LF14
LK105	LF1 + LF4 + LF12 + LF13
LK106	LF1 + LF5 + LF12 + LF13
LK107	LF1 + LF4 + LF6
LK108	LF1 + LF4 + LF6

Ergebn.-		Belastung.1		Belastung.2		Belastung.3		Belastung.4		Belastung.5		Belastung.6		Belastung.7		Belastung.8	
Kombin.	Bezeichnung	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.	Faktor	Nr.
EK1	Bemessung	1,0	LK1	1,0	LK2	1,0	LK3	1,0	LK4	1,0	LK5	1,0	LK6	1,0	LK7	1,0	LK8
EK2	Verformung	1,0	LK101	1,0	LK102	1,0	LK103	1,0	LK104	1,0	LK105	1,0	LK106	1,0	LK107	1,0	LK108

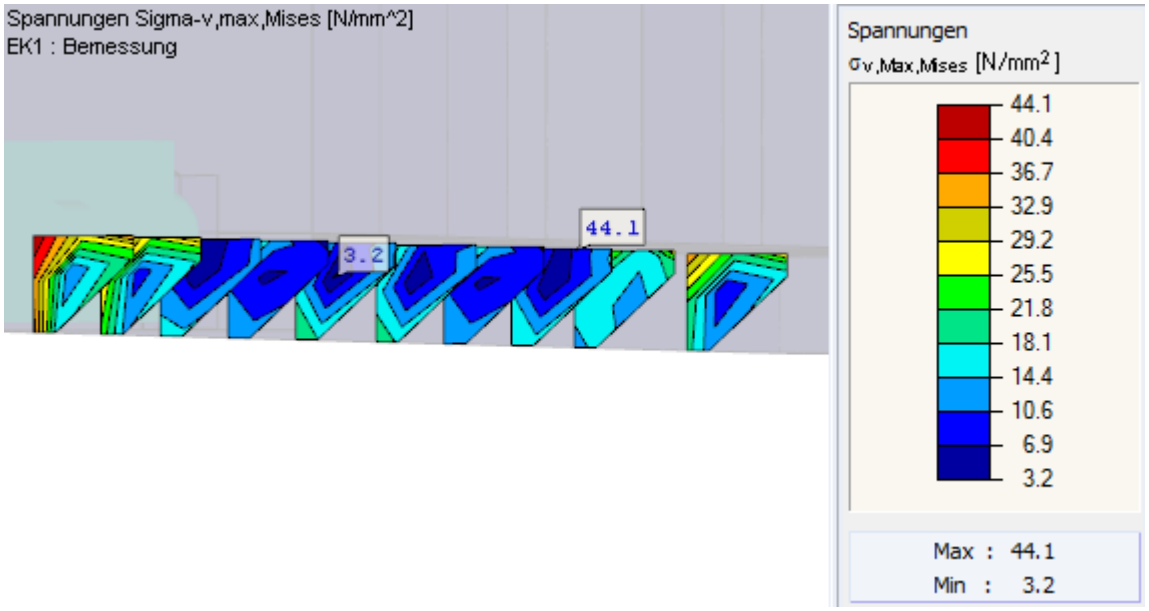
5. SPANNUNGEN

5.1. Übersicht



Die oben angedeuteten Stellen werden bei der Auswertung vernachlässigt, da diese bei der Modellierung nur vereinfacht dargestellt wurden.

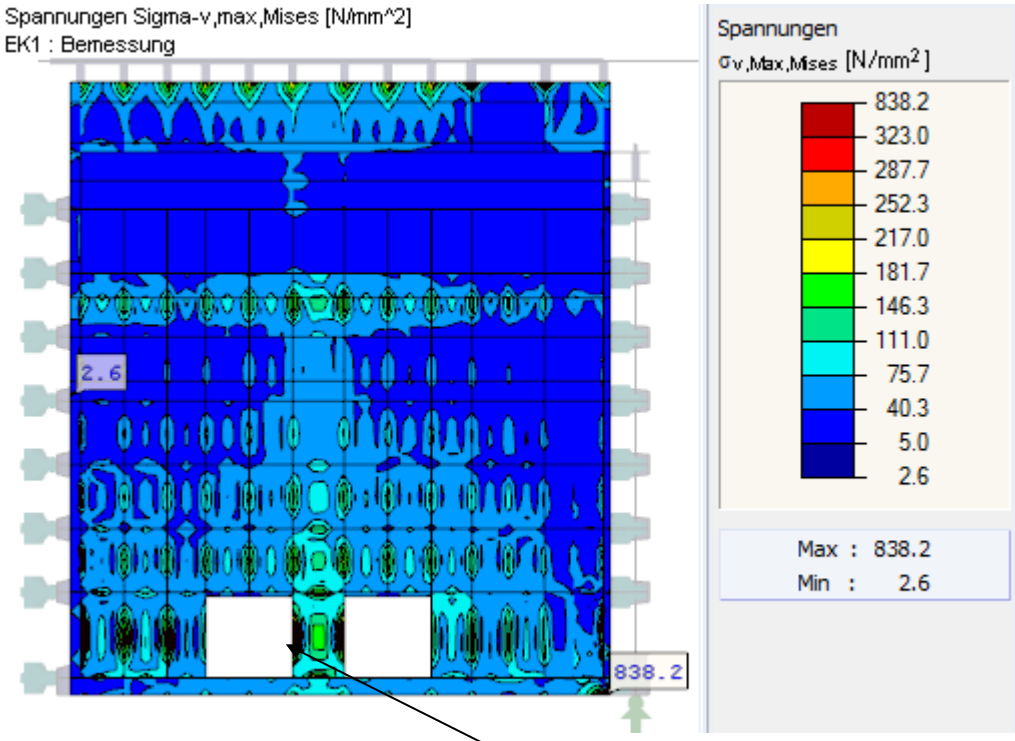
5.1.1. 10 mm Blechdicken (Sohlsteifen)



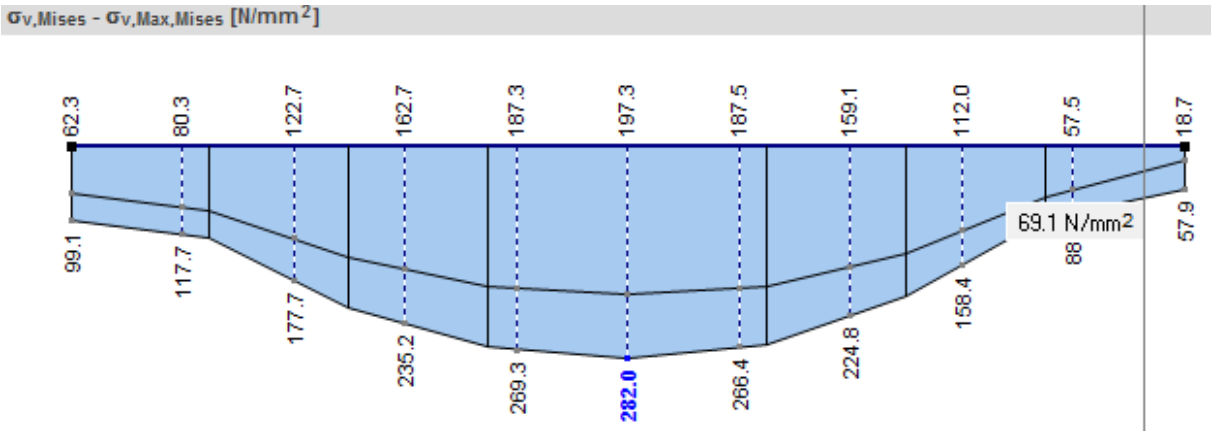
max σ_v = ca. 44,1 N/mm^2 (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{44{,}1}{323}$ = **0,14** $\leq$ 1,0

5.1.2. 15 mm Blechdicken (Stauwand NOK)



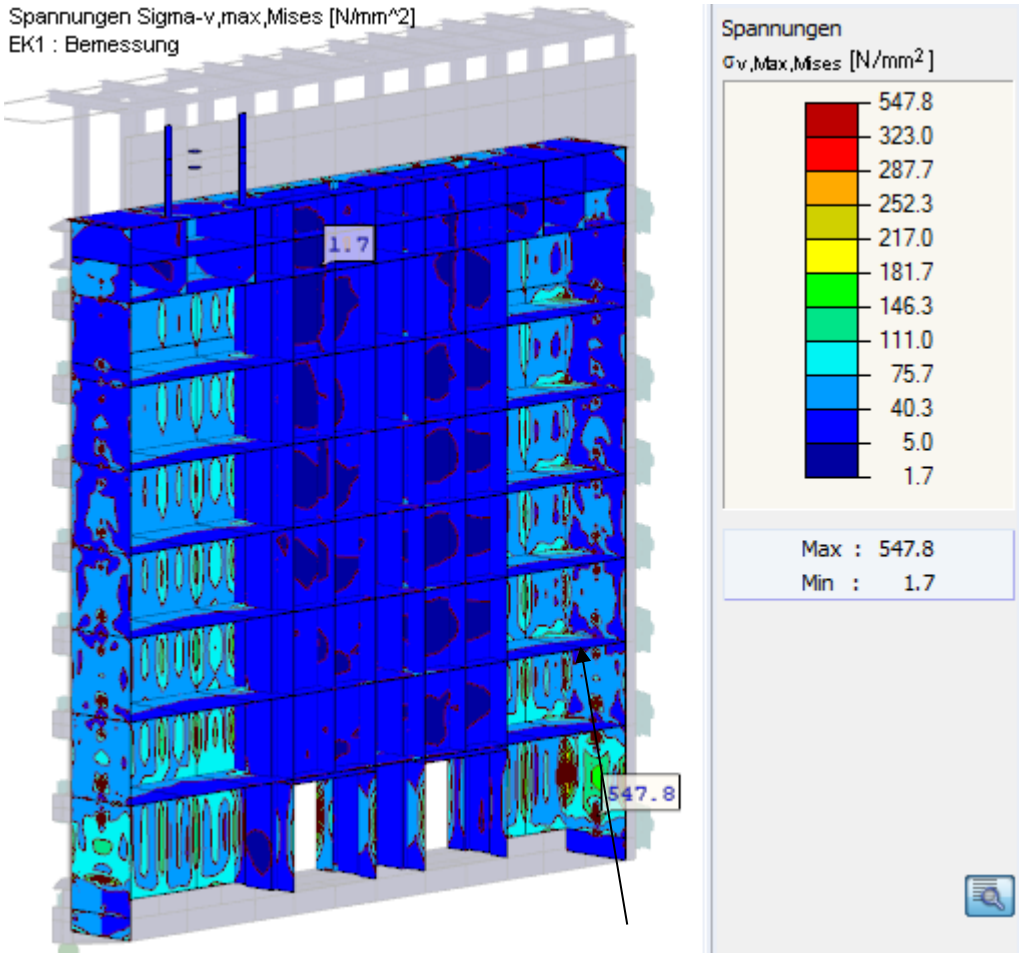
Der folgende Schnitt wurde an dem oben angedeuteten Blech geführt.



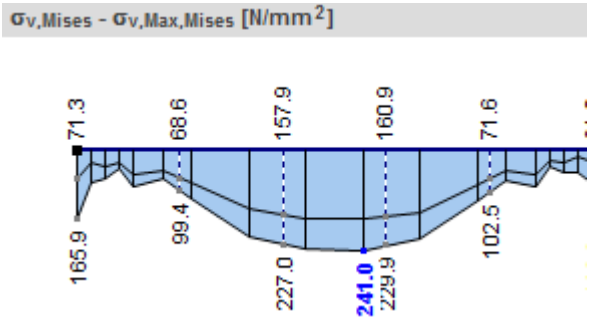
max σ_v = ca. 282 N/mm² (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{282}{323}$ = **0,87** $\leq$ 1,0

5.1.3. 20mm Blechdicke (Aussteifung & Stauwand Kieler Förde)



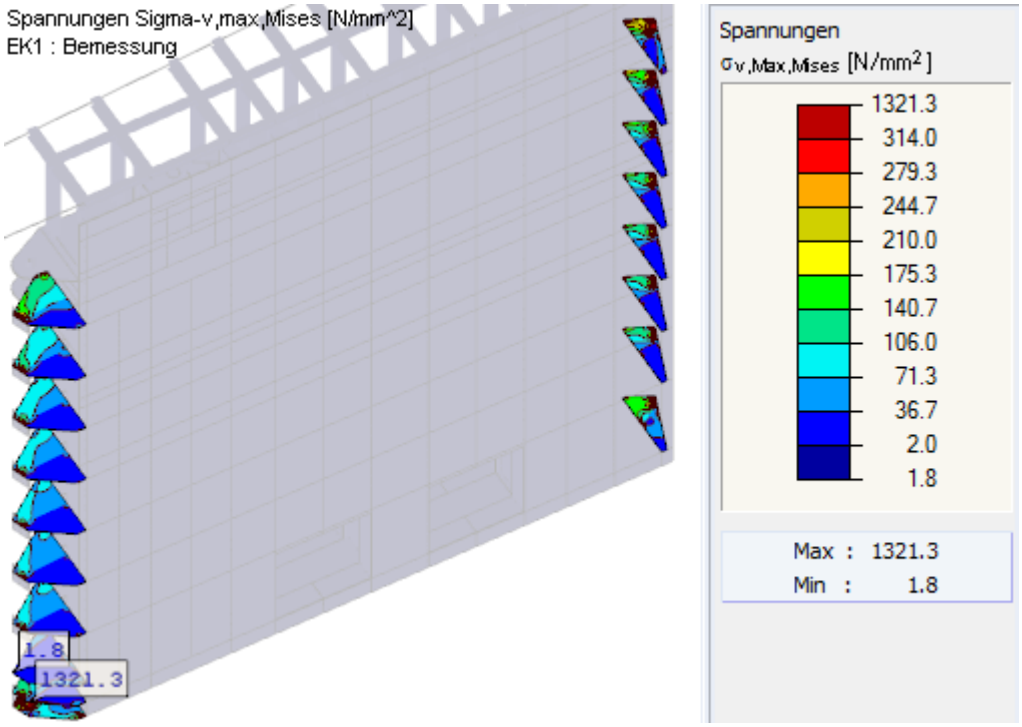
Der folgende Schnitt wurde an dem oben angedeuteten Blech geführt.



max σ_v = ca. 241 N/mm² (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{241}{314}$ = **0,77** ≤ 1,0

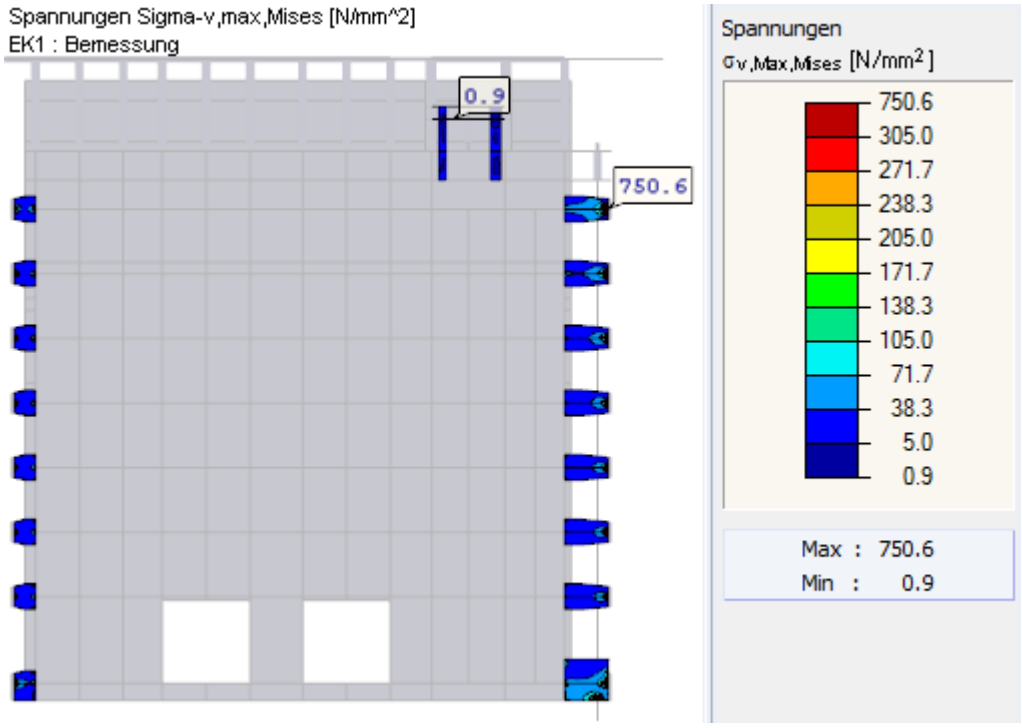
5.1.4. 35 mm Blechdicke (Knaggenträger horizontal)



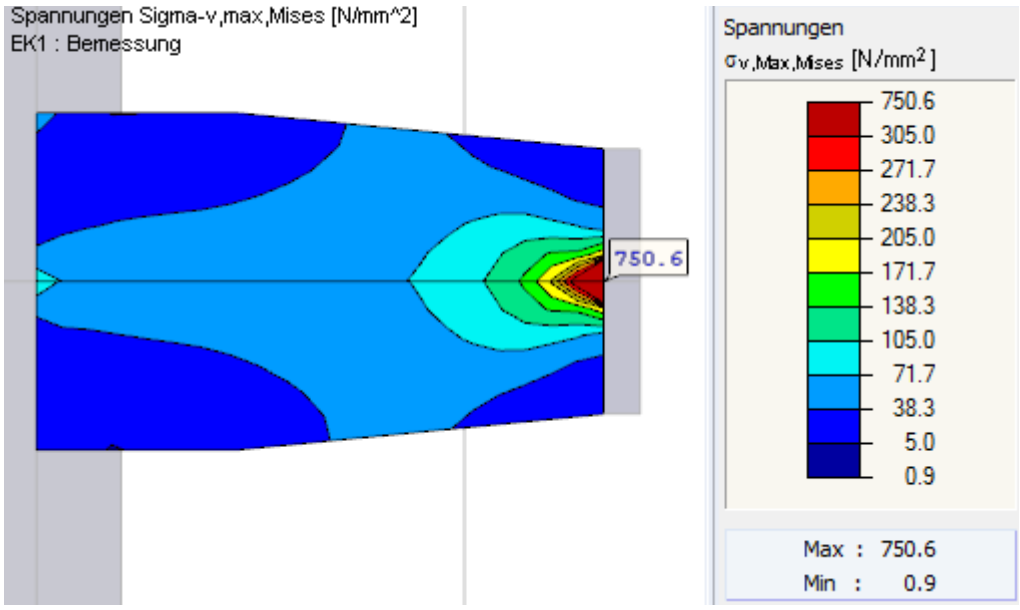
max σ_v = ca. 215 N/mm^2 (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{215}{314}$ = **0,68** $\leq$ 1,0

5.1.5. 50 mm Blechdicke (Knaggenträger vertikal & Zylinderanschluss)



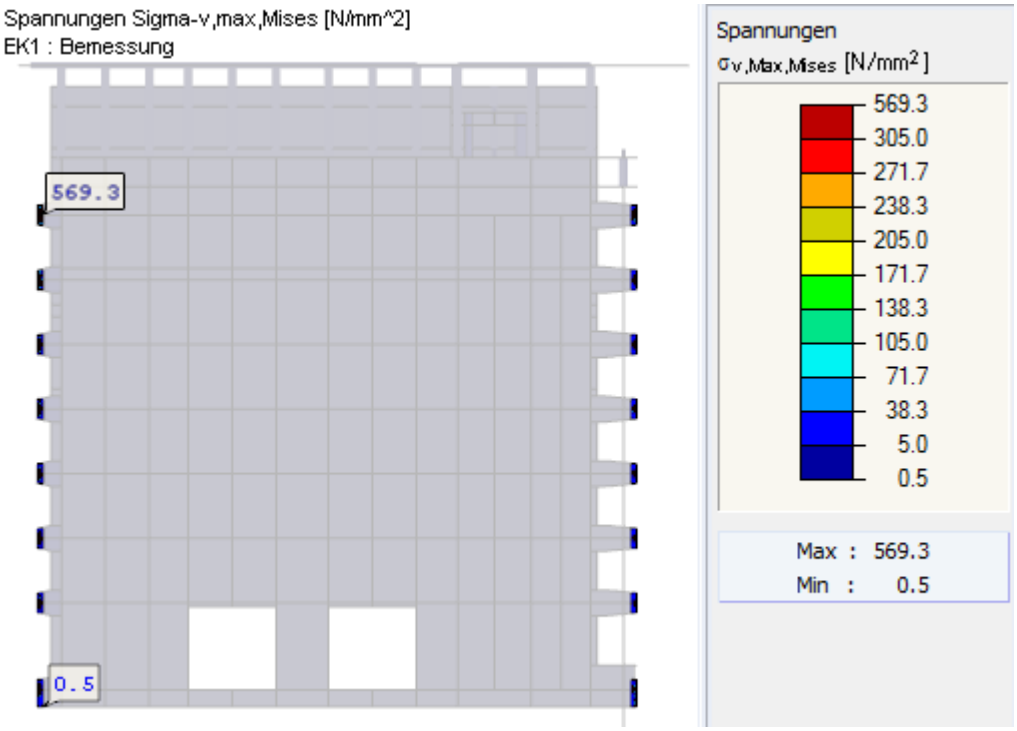
Die Spannungsüberschreitung ist auf die punktförmige Modellierung der Knaggenlager (Knotenlager) zurückzuführen.



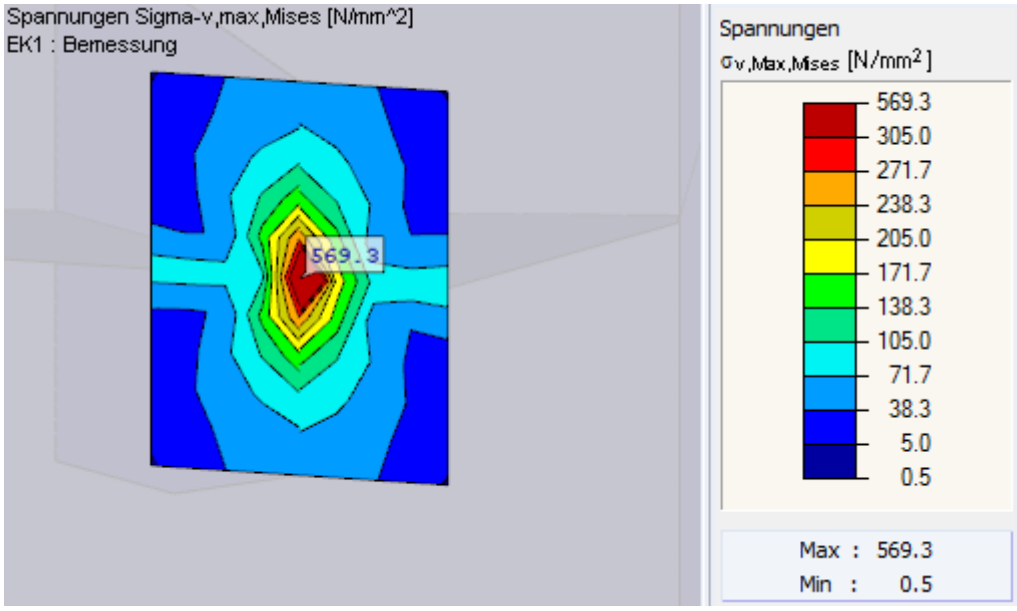
Geglättet ergeben sich ca. σ_v = ca. 138 N/mm² (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{138}{305}$ = **0,45** $\leq$ 1,0

5.1.6. 60 mm Blechdicke (Knaggengrundblech)



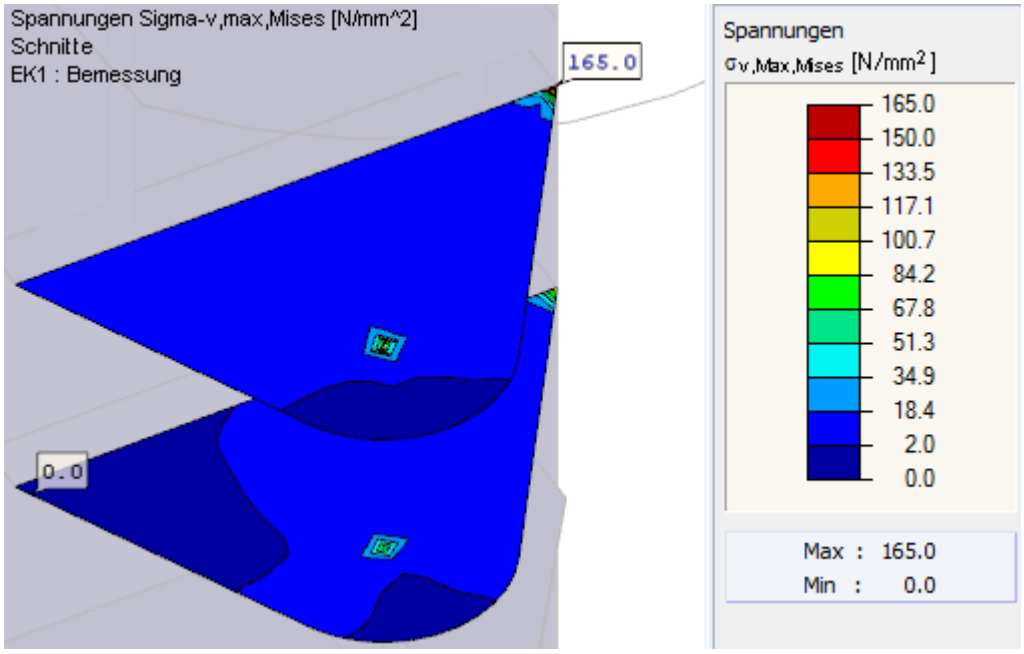
Die Spannungsüberschreitung ist auf die punktförmige Modellierung der Knaggenlager (Knotenlager) zurückzuführen.



Geglättet ergeben sich ca. σ_v = ca. 179 N/mm² (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{179}{305}$ = **0,59** $\leq$ 1,0

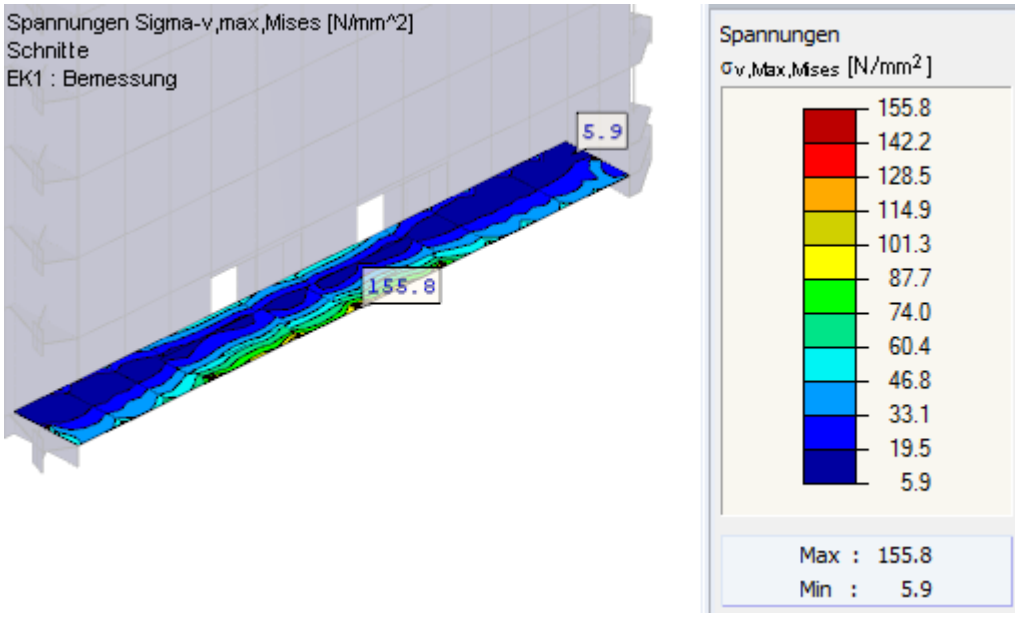
5.1.7. 80mm Blechstärke



max σ_v = ca. 165 N/mm^2 (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{165}{286}$ = **0,58** $\leq$ 1,0

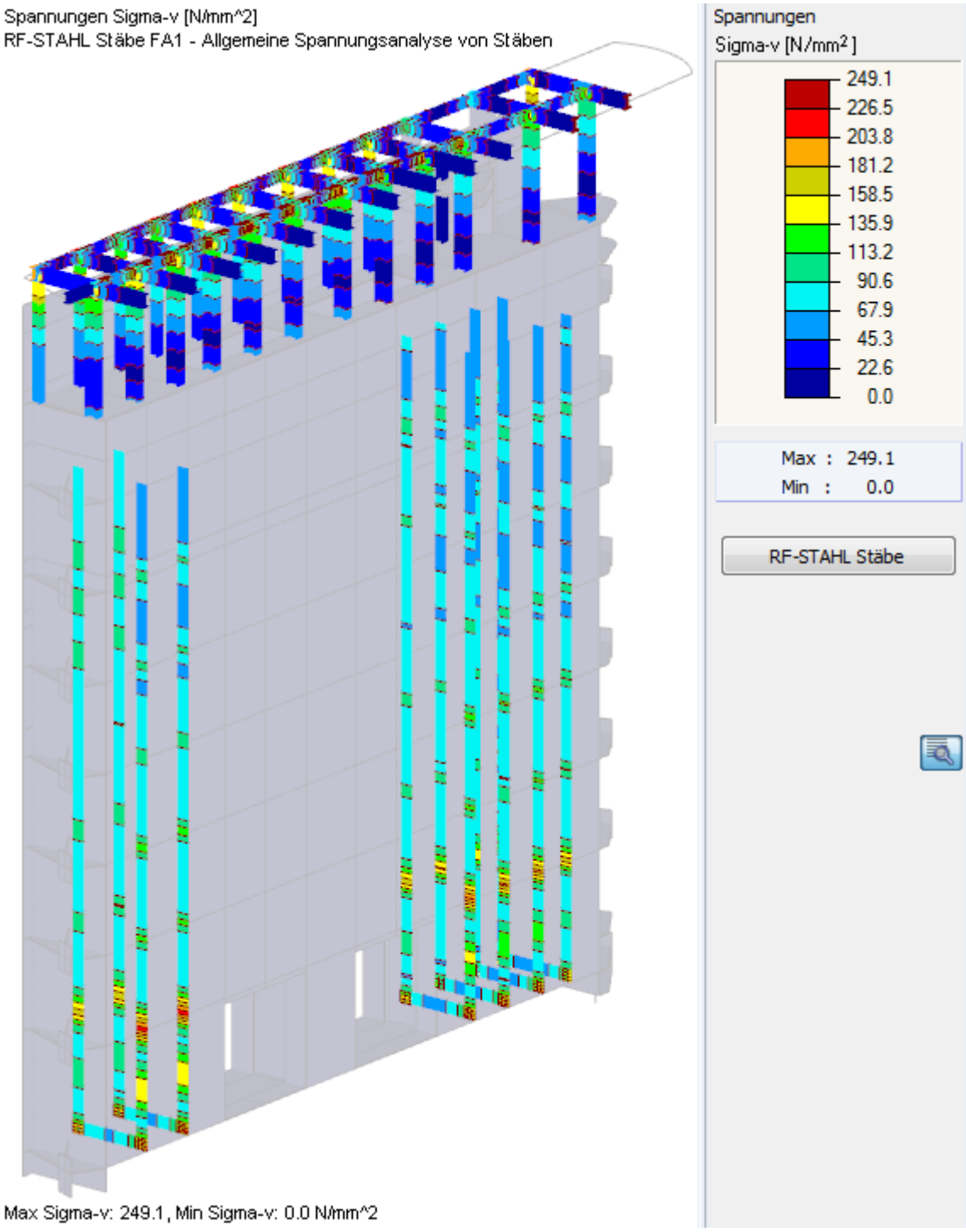
5.1.8. 90mm Blechstärke



max σ_v = ca. 155,8 N/mm^2 (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{155{,}8}{286}$ = **0,54** $\leq$ 1,0

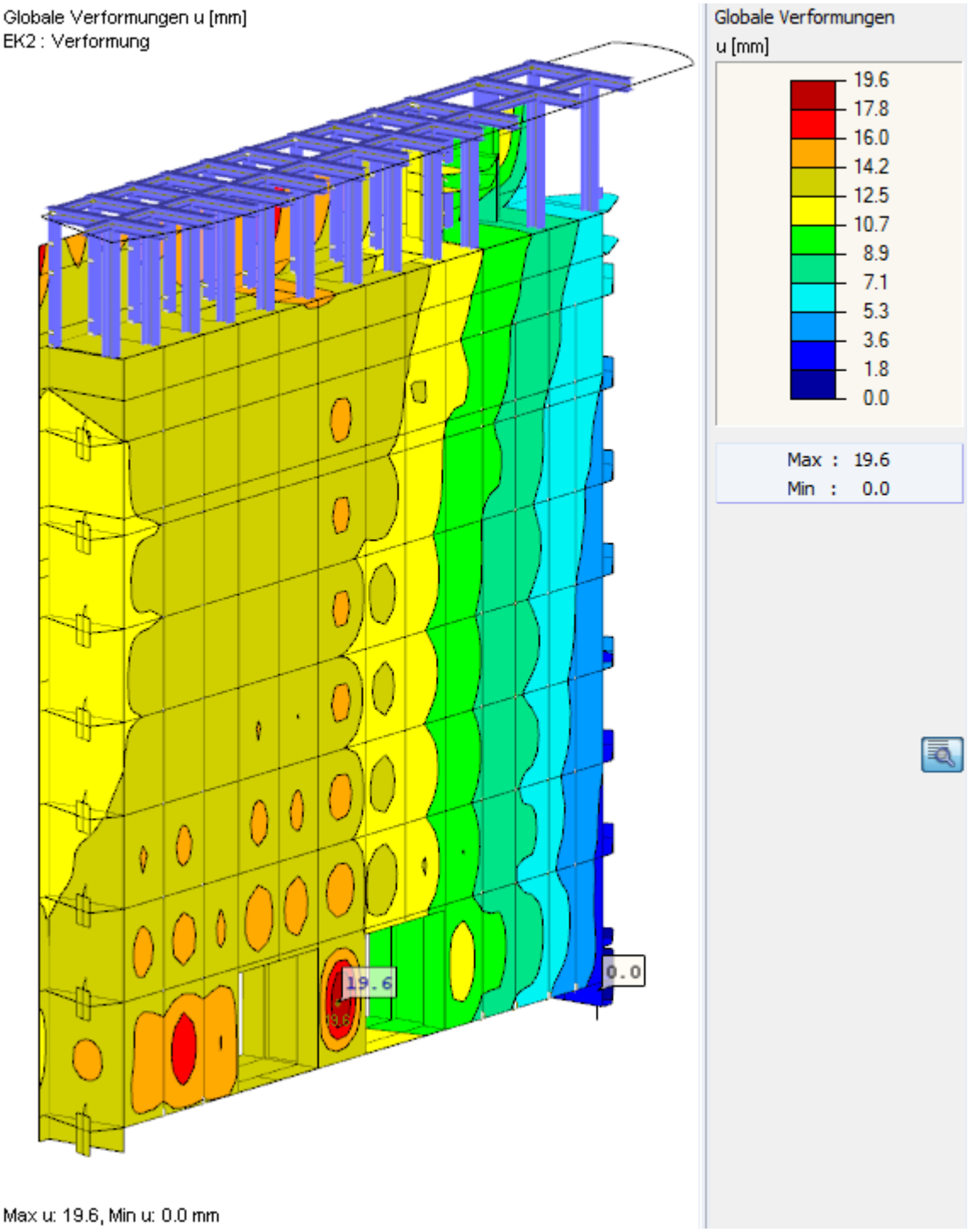
5.1.9. Stäbe



max σ_v = ca. 249,1 N/mm^2 (ohne FE-spezifische Spannungsspitzen)

Nachweis: $\frac{\sigma_v}{f_{yd}} = \frac{249{,}1}{323}$ = **0,77** $\leq$ 1,0

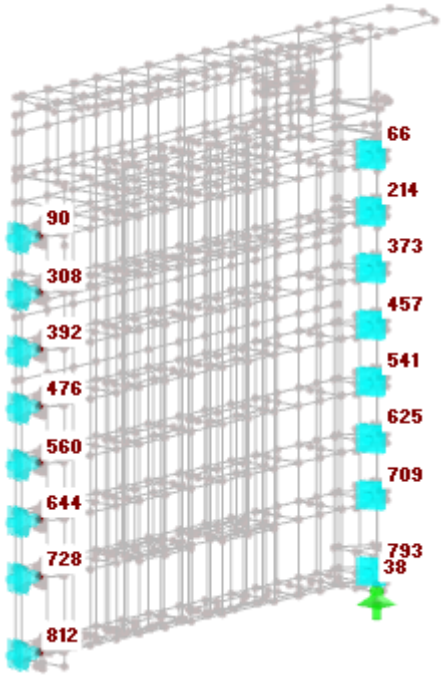
6. VERFORMUNGEN



Die maximalen Verformungen von 19,6mm sind auf die vereinfachte Modellierung sowie auf den Planungsstand zurückzuführen. In der nächsten Planungsstufe muss hier eine weitere Steife angebracht werden.

7. LAGERKRÄFTE

Lagerknotenübersicht



7.1. Max. / Min. Lagerkräfte aus Ergebniskombination

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN] $P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	
38	Max	363,85	405,80	752,07	
	Min	-176,04	201,87	-95,18	
	Max $P_{X'}$	**363,85**	327,84	-75,02	LK 1
	Min $P_{X'}$	**-176,04**	405,80	752,07	LK 6
	Max $P_{Y'}$	-176,04	**405,80**	752,07	LK 6
	Min $P_{Y'}$	251,69	**201,87**	-95,18	LK 7
	Max $P_{Z'}$	-176,04	405,80	**752,07**	LK 6
	Min $P_{Z'}$	251,69	201,87	**-95,18**	LK 7
66*	Max	0,00	3173,40	0,00	
	Min	0,00	0,00	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1095,17	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1095,17	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**3173,40**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**0,00**	0,00	LK 6
	Max $P_{Z'}$	0,00	1095,17	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1095,17	**0,00**	LK 1

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN] $P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	
90*	Max	0,00	-870,68	0,00	
	Min	0,00	-3185,48	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1920,97	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1920,97	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-870,68**	0,00	LK 6
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-3185,48**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1920,97	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1920,97	**0,00**	LK 1
214*	Max	0,00	2400,14	0,00	
	Min	0,00	123,45	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1187,80	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1187,80	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**2400,14**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**123,45**	0,00	LK 6
	Max $P_{Z'}$	0,00	1187,80	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1187,80	**0,00**	LK 1
308*	Max	0,00	-713,79	0,00	
	Min	0,00	-2383,91	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1514,74	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1514,74	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-713,79**	0,00	LK 6
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-2383,91**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1514,74	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1514,74	**0,00**	LK 1
373*	Max	0,00	2089,23	0,00	
	Min	0,00	490,15	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1305,23	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1305,23	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**2089,23**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**490,15**	0,00	LK 6
	Max $P_{Z'}$	0,00	1305,23	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1305,23	**0,00**	LK 1
392*	Max	0,00	-709,81	0,00	
	Min	0,00	-2053,24	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1396,01	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1396,01	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-709,81**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-2053,24**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1396,01	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1396,01	**0,00**	LK 1

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN] $P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	
457*	Max	0,00	1930,48	0,00	
	Min	0,00	661,06	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1393,70	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1393,70	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**1930,48**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**661,06**	0,00	LK 4
	Max $P_{Z'}$	0,00	1393,70	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1393,70	**0,00**	LK 1
476*	Max	0,00	-644,44	0,00	
	Min	0,00	-1881,39	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1361,43	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1361,43	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-644,44**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-1881,39**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1361,43	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1361,43	**0,00**	LK 1
541*	Max	0,00	1828,61	0,00	
	Min	0,00	712,91	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1451,79	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1451,79	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**1828,61**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**712,91**	0,00	LK 4
	Max $P_{Z'}$	0,00	1451,79	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1451,79	**0,00**	LK 1
560*	Max	0,00	-612,47	0,00	
	Min	0,00	-1779,28	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1353,81	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1353,81	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-612,47**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-1779,28**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1353,81	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1353,81	**0,00**	LK 1
625*	Max	0,00	1723,88	0,00	
	Min	0,00	710,28	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1472,93	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1472,93	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**1723,88**	0,00	LK 7
	Min $P_{Y'}$	0,00	**710,28**	0,00	LK 4
	Max $P_{Z'}$	0,00	1472,93	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1472,93	**0,00**	LK 1

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN] $P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	
644*	Max	0,00	-566,12	0,00	
	Min	0,00	-1688,47	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1336,53	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1336,53	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-566,12**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-1688,47**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1336,53	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1336,53	**0,00**	LK 1
709*	Max	0,00	1698,54	0,00	
	Min	0,00	650,81	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	1486,64	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	1486,64	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**1698,54**	0,00	LK 5
	Min $P_{Y'}$	0,00	**650,81**	0,00	LK 4
	Max $P_{Z'}$	0,00	1486,64	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	1486,64	**0,00**	LK 1
728*	Max	0,00	-493,22	0,00	
	Min	0,00	-1577,06	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1297,87	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1297,87	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-493,22**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-1577,06**	0,00	LK 7
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1297,87	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1297,87	**0,00**	LK 1
793*	Max	0,00	2566,95	0,00	
	Min	0,00	980,50	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	2301,07	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	2301,07	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**2566,95**	0,00	LK 5
	Min $P_{Y'}$	0,00	**980,50**	0,00	LK 4
	Max $P_{Z'}$	0,00	2301,07	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	2301,07	**0,00**	LK 1
812*	Max	0,00	-738,30	0,00	
	Min	0,00	-2224,69	0,00	
	Max $P_{X'}$	**0,00**	-1953,42	0,00	LK 1
	Min $P_{X'}$	**0,00**	-1953,42	0,00	LK 1
	Max $P_{Y'}$	0,00	**-738,30**	0,00	LK 4
	Min $P_{Y'}$	0,00	**-2224,69**	0,00	LK 5
	Max $P_{Z'}$	0,00	-1953,42	**0,00**	LK 1
	Min $P_{Z'}$	0,00	-1953,42	**0,00**	LK 1

7.2. Lagerkräfte aus Lastfallkombinationen

7.2.1. Lastfallkombination LK1

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	363,85	327,84	-75,02	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	1095,17	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-1920,97	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	1187,80	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-1514,74	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	1305,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-1396,01	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	1393,70	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-1361,43	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	1451,79	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-1353,81	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	1472,93	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-1336,53	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	1486,64	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-1297,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	2301,07	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-1953,42	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.2. Lastfallkombination LK2

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	62,88	336,35	345,61	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	139,54	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-1106,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	428,46	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-831,24	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	612,31	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-748,60	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	725,58	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-722,62	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	792,09	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-710,48	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	816,82	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-687,15	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	814,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-648,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	1330,74	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-967,77	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.3. Lastfallkombination LK3

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	164,52	359,71	146,07	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	1422,75	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-2263,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	1225,96	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-1575,54	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	1212,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-1314,75	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	1255,10	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-1214,53	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	1287,79	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-1172,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	1273,61	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-1121,36	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	1217,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-1038,03	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	1770,82	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-1535,38	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.4. Lastfallkombination LK4

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	-94,45	360,44	493,96	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	336,96	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-1300,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	473,91	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-881,18	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	572,29	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-709,81	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	661,06	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-644,44	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	712,91	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-612,47	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	710,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-566,12	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	650,81	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-493,22	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	980,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-738,30	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.5. Lastfallkombination LK5

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	343,67	350,65	-12,74	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	1737,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-2513,42	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	1627,66	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-1933,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	1650,71	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-1733,42	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	1687,67	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-1653,57	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	1716,13	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-1618,77	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	1711,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-1580,21	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	1698,54	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-1517,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	2566,95	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-2224,69	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.6. Lastfallkombination LK6

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	-176,04	405,80	752,07	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
90*	0,00	-870,68	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
214*	0,00	123,45	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
308*	0,00	-713,79	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
373*	0,00	490,15	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
392*	0,00	-712,47	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
457*	0,00	728,68	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
476*	0,00	-759,65	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
541*	0,00	882,13	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
560*	0,00	-808,55	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
625*	0,00	965,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
644*	0,00	-832,95	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
709*	0,00	997,15	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
728*	0,00	-833,42	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$
793*	0,00	1725,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 69.94°$
812*	0,00	-1315,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'} = 110.00°$

7.2.7. Lastfallkombination LK7

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	251,69	201,87	-95,18	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	3173,40	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-3185,48	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	2400,14	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-2383,91	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	2089,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-2053,24	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1930,48	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1881,39	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1828,61	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1779,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1723,88	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1688,47	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1623,74	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-1577,06	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	2236,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-2183,34	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.8. Lastfallkombination LK8

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	251,69	201,87	-95,18	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	3173,40	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-3185,48	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	2400,14	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-2383,91	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	2089,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-2053,24	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1930,48	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1881,39	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1828,61	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1779,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1723,88	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1688,47	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1623,74	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-1577,06	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	2236,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-2183,34	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.9. Lastfallkombination LK101

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	288,64	217,54	-119,62	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	852,38	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-1377,40	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	897,32	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-1101,84	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	973,58	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-1026,16	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1034,13	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1007,76	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1075,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1007,59	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1091,53	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1000,33	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1106,52	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-977,81	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	1709,60	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-1485,72	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.10. Lastfallkombination LK102

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	65,71	223,85	191,96	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	144,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-773,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	334,85	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-595,54	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	460,31	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-546,60	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	539,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-534,57	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	586,61	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-531,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	605,53	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-519,31	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	608,45	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-496,79	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	990,84	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-755,62	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.11. Lastfallkombination LK103

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	234,95	237,02	-89,01	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	1168,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-1714,14	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	996,96	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-1218,91	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	979,30	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-1037,28	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1009,98	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-972,14	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1036,03	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-949,08	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1030,20	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-919,49	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1002,64	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-865,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	1460,03	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-1307,78	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.12. Lastfallkombination LK104

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	26,60	238,02	191,77	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	311,55	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-956,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	398,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-667,06	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	467,39	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-553,66	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	533,29	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-514,80	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	574,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-499,14	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	576,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-472,57	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	546,15	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-426,73	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	821,37	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-663,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.13. Lastfallkombination LK105

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	371,58	232,19	-209,25	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	1444,85	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-1942,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	1325,94	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-1514,90	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	1330,53	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-1373,31	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1354,03	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1320,59	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1375,50	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1301,56	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1375,75	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1279,90	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1378,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-1240,47	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	2076,49	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-1844,04	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.14. Lastfallkombination LK106

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	-43,78	276,15	402,60	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-627,52	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	164,93	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-539,17	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	420,66	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-556,69	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	594,57	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-605,75	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	710,46	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-653,78	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	777,23	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-682,55	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	813,85	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-693,29	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	1393,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-1115,34	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

7.2.15. Lastfallkombination LK107

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	471,10	95,45	-533,60	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	2958,11	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-2791,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	2214,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-2117,07	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	1914,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-1844,04	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1762,64	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1705,18	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1670,18	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1626,56	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1584,39	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1559,19	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1523,59	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-1475,55	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	2089,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-2091,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

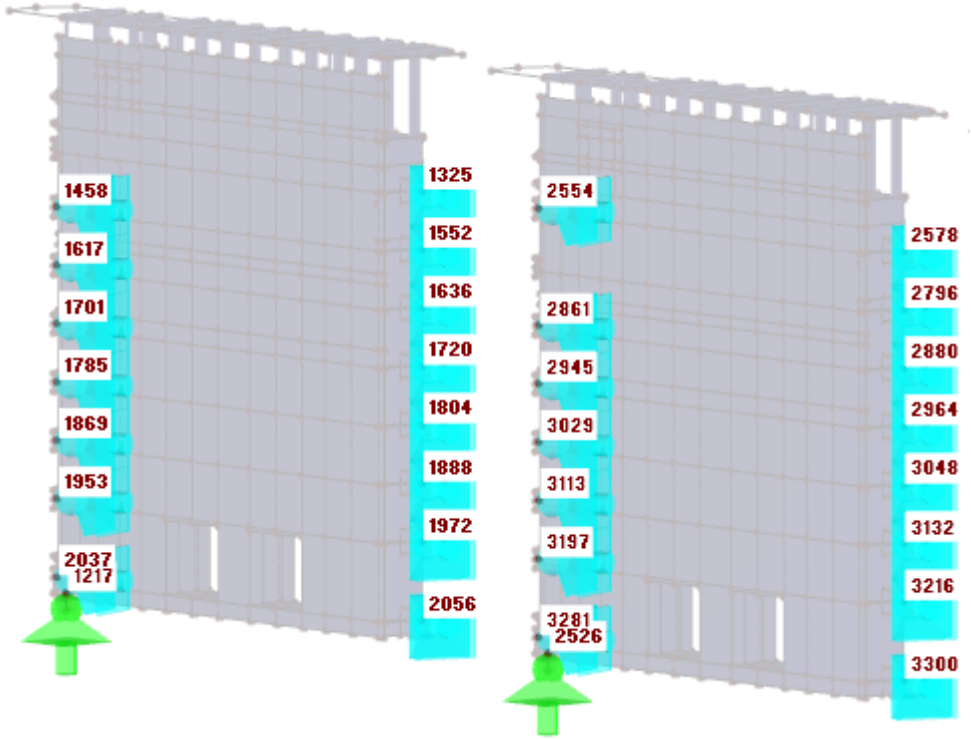
7.2.16. Lastfallkombination LK108

Knoten	Lagerkräfte [kN]			Lagermomente [kNm]			
Nr.	$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	$M_{X'}$	$M_{Y'}$	$M_{Z'}$	
38	471,10	95,45	-533,60	0,00	0,00	0,00	
66*	0,00	2958,11	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
90*	0,00	-2791,87	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
214*	0,00	2214,92	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
308*	0,00	-2117,07	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
373*	0,00	1914,27	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
392*	0,00	-1844,04	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
457*	0,00	1762,64	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
476*	0,00	-1705,18	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
541*	0,00	1670,18	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
560*	0,00	-1626,56	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
625*	0,00	1584,39	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
644*	0,00	-1559,19	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
709*	0,00	1523,59	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
728*	0,00	-1475,55	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °
793*	0,00	2089,25	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 69.94 °
812*	0,00	-2091,05	0,00	0,00	0,00	0,00	$\varphi_{Z'}$ = 110.00 °

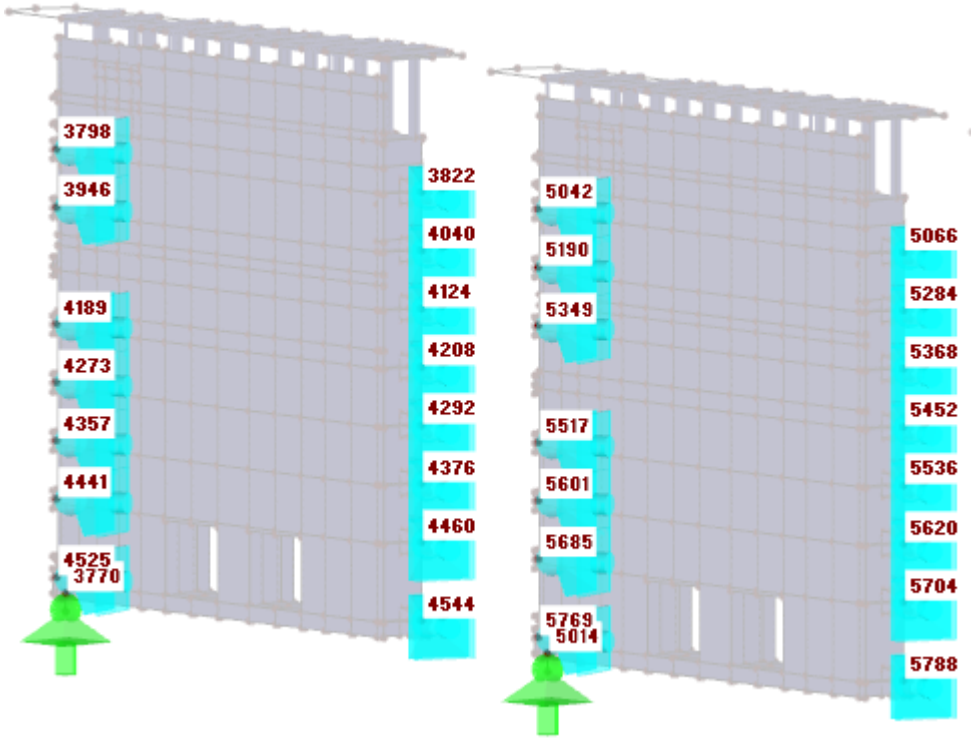
7.2.17. Stemmknaggenausfall

Um den Lastfall Stemmknaggenausfall für alle Knaggen simulieren zu können wurde das oben beschriebene Modell wie folgt kopiert und modifiziert:

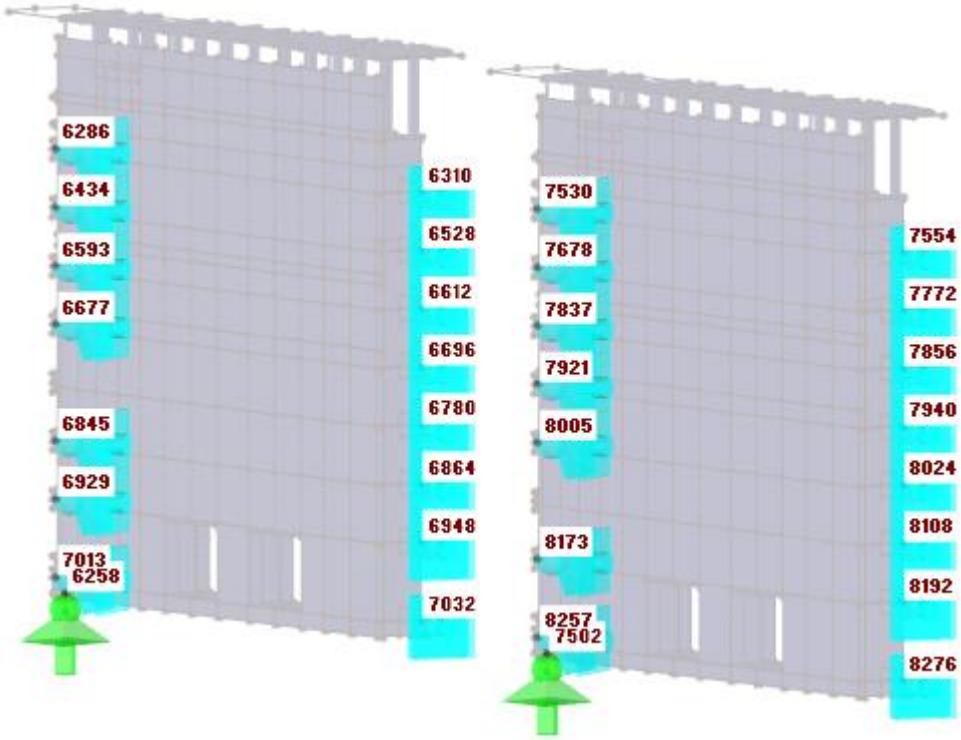
- Ausfall Stemmknagge 1 (links) und 2 (rechts)



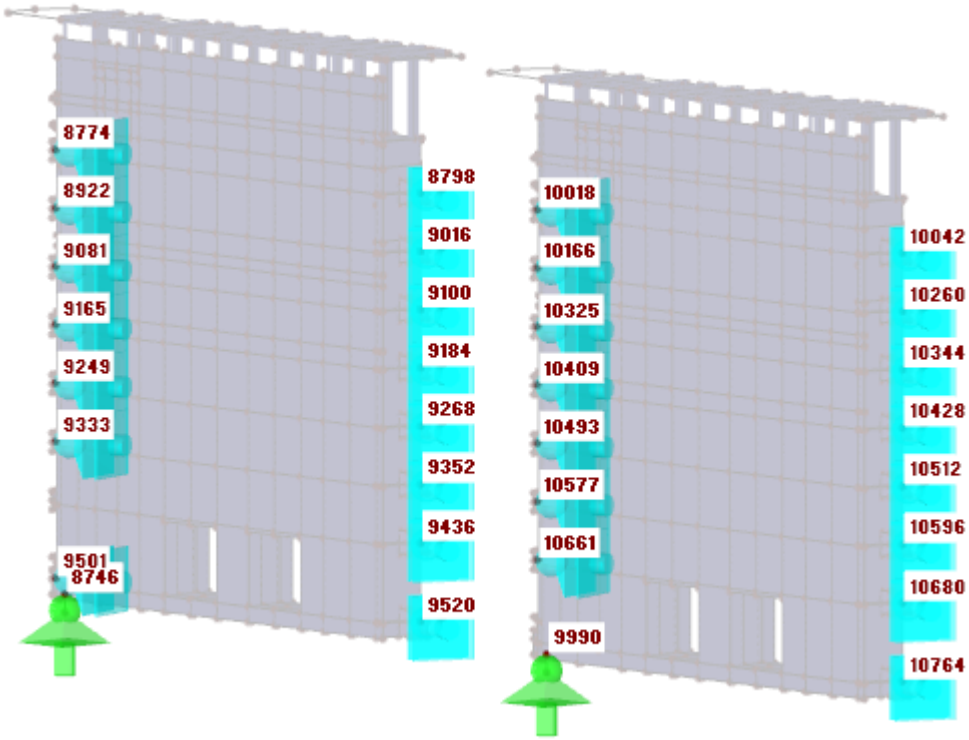
- Ausfall Stemmknagge 3 (links) und 4 (rechts)



- Ausfall Stemmknagge 5 (links) und 6 (rechts)



- Ausfall Stemmknagge 7 (links) und 8 (rechts)



Es wurden die oben Beschriebenen Lastfälle wie folgt kombiniert:

Last-kombin.	Bezeichnung
LK1	1.35*LF1 + 1.35*LF2
LK2	1.35*LF1 + 1.25*LF2 + 1.35*LF8 + 1.35*LF11
LK3	1.35*LF1 + 1.25*LF4
LK4	1.35*LF1 + 1.1*LF4 + 1.1*LF6

Aufgrund der Fülle der Daten werden folgend nur die maximalen Werte angegeben.

Knoten Nr.		Lagerkräfte [kN]			
		$P_{X'}$	$P_{Y'}$	$P_{Z'}$	
8746	Max $P_{X'}$	**715,19**	-47,93	-939,85	LK 1
9990	Min $P_{X'}$	**-749,27**	565,20	-95,34	LK 4
1458	Max $P_{Y'}$	0,00	**4893,38**	0,00	LK 4
6310	Min $P_{Y'}$	0,00	**-3278,18**	0,00	LK 4
-	Max $P_{Z'}$	-	-	-	-
1217	Min $P_{Z'}$	676,85	-34,00	**-939,85**	LK 1

8. ANTRIEBSZYLINDERKRAFTERMITTLUNG

8.1. Torantriebszylinder

Alte Schleuse Kiel Holtenau (Sensitivtät) - Öffnen des Stemmtores

eingetauchte Höhe (T): $T = OW(UW) - H_{UKTor} + \Delta H$

Freibord (F): $F = H_{OKTor} - H_{UKTor} - T$

Breite des Torflügels (B):	B =	13,500	m
Winddruck (w):	w =	0,845	kN/m²
Abstand Drehachse zu Torflügel (a):	a =	0,700	m

Moment aus Wasserlast ($M_{Überstau}$): $M_{Überstau} = T * B * \Delta H * B/2$

Moment aus Wind (M_{Wind}): $M_{Wind} = F * B * w * B/2$

	OW [m]	UW [m]	H_{UKTor} [m]	H_{OKTor} [m]	
Betriebsfest	3,38	3,48	-10,20	5,1	(ohne Wind; Betriebsfestigkeit)
Statisch	3,33	3,58	-10,20	5,1	(mit Wind, max. Statische Last)

Hebelarme (laut graphischer Ermittlung)

		Betriebsfest					
α [°]	e [m]	ΔH [m]	T [m]	$M_{Überstau}$ [kNm]	F [m]	M_{Wind} [kNm]	M_{ges} [kNm]
20	2,534	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
30	2,767	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
40	2,962	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
50	3,107	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
60	3,189	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
70	3,186	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
80	3,066	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5
90	2,778	-0,10	13,68	-1375,87	1,62	-137,68	-1513,5

		Statisch					
α [°]	e [m]	ΔH [m]	T [m]	$M_{Überstau}$ [kNm]	F [m]	M_{Wind} [kNm]	M_{ges} [kNm]
20	2,534	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
30	2,767	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
40	2,962	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
50	3,107	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
60	3,189	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
70	3,186	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
80	3,066	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0
90	2,778	-0,25	13,78	-3464,81	1,52	-129,18	-3594,0

Antriebskräfte $F_{Zyl} = M / e$ [kN]								
α Winkel des Tores [°]	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
Betriebsfest	-597	-547	-511	-487	-475	-475	-494	-545
Statisch	-1418	-1299	-1213	-1157	-1127	-1128	-1172	-1294

	20	30	40	50	60	70	80	90
Betriebsfest	-597	-547	-511	-487	-475	-475	-494	-545
Statisch	-1418	-1299	-1213	-1157	-1127	-1128	-1172	-1294

Für Lastenplan:

Betriebsfest	Max	-474,6 kN	Statisch	Max	-1127,0 kN
	Min	-597,3 kN		Min	-1418,3 kN
	maßgebend	597,3 kN		maßgebend	1418,3 kN
	Zuschlag Reibung / Trägheit			*Zuschlag Reibung / Trägheit*	
	20%	119,5 kN		20%	283,7 kN
	zw.-Summe	716,8 kN		zw.-Summe	1702,0 kN
	Zuschlag Statik			Zuschlag Statik	
	20%	143,4 kN		20%	340,4 kN
	Summe	**860,1 kN**		**Summe**	**2042,4 kN**
	gerundet:	**875,0 kN**		**gerundet:**	**2050,0 kN**

8.2. Antriebszylinder für Gleitschütze

Nachfolgende Werte je Schütz!

Eigengewicht Schütz

	t [mm]	B [mm]	L [mm]	n	G [kg]
Stauwand KiFö	25	2170	2170	1	924
Stauwand NOK	25	2170	2170	1	924
Seitenschotte	25	490	2170	2	417
Horizontalträger oben	25	490	2170	1	209
Horizontalträger unten	25	490	2170	1	209
Steifen Stauwand KiFö	25	200	2170	3	256
Steifen Stauwand NOK	25	200	2170	3	256
				Summe	3194
Kleinteile	10%				319
Gesamtgewicht					**3513**

Eigengewicht Hubgestänge

Länge:	L =	5870	mm
Rohr Ø114,3x6,3	A =	21,38	cm^2
	g =	16,78	kg/m
Gewicht	G =	98	kg
Kleinteile	30%	30	kg
Gesamtgewicht		**128**	kg

Reibkraft aus Wasserdruck

$\gamma_{Wasser\text{-}KiFö}$ = 10,0 kN/m^3 $\gamma_{Wasser\text{-}NOK}$ = 10,0 kN/m^3

Wasserdrücke:	NN	HW-KiFö	HW-NOK	ΔHW	HW-KiFö	HW-NOK	ΔHW
		3,48 m	0,20 m		-2,29 m	0,50 m	
	[m]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]	[kN/m^2]
OK-Gleitschütz	-7,47	109,50	76,70	32,80	51,80	79,70	-27,90
UK-Gleitschütz	-9,64	131,20	98,40	32,80	73,50	101,40	-27,90

Reibungsbeiwert	μ =	1,0			[kN]		[kN]
Seitendichtung	2 x	2170	mm		77,2		65,7
Kopfdichtung	1 x	2170	mm		38,6		32,8
Fußdichtung	1 x	2170	mm		38,6		32,8
				Summe	**154,5**	Summe	131,4

Reibkraft aus Vorspannung

Einbausituation ⑥ aus Semperitkatalog!

Vorspannung	v =	5,0	mm				
Vorspannkraft	f =	20,0	N/cm		[kN]		[kN]
Seitendichtung	4 x	2170	mm		17,4		17,4
Kopfdichtung	2 x	2170	mm		8,7		8,7
Fußdichtung	2 x	2170	mm		8,7		8,7
				Summe	34,7	Summe	34,7

Auftrieb – Hohlkörper Schütz

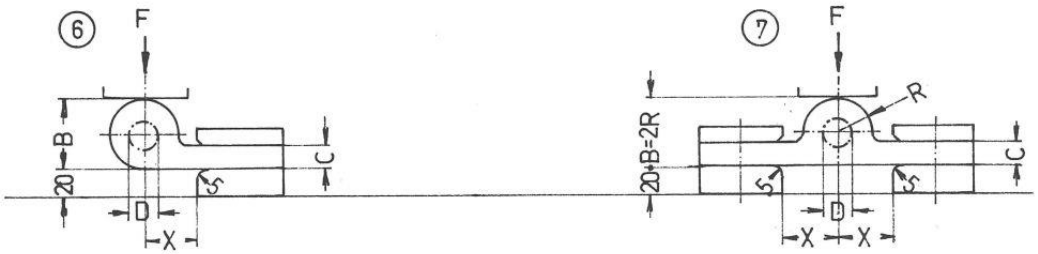
T [mm]	B [mm]	H [mm]
540	2170	2170

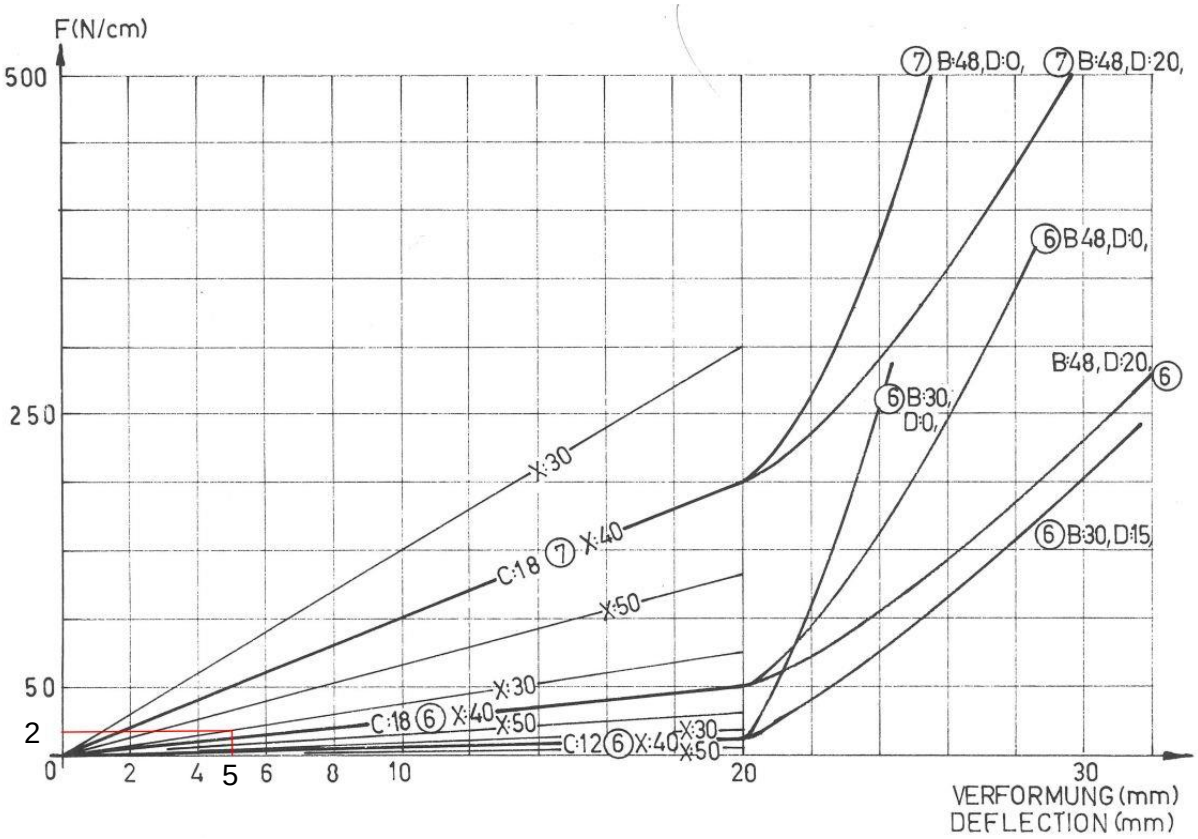
A [kN]
25,4

A [kN]
25,4

Zusammenstellung

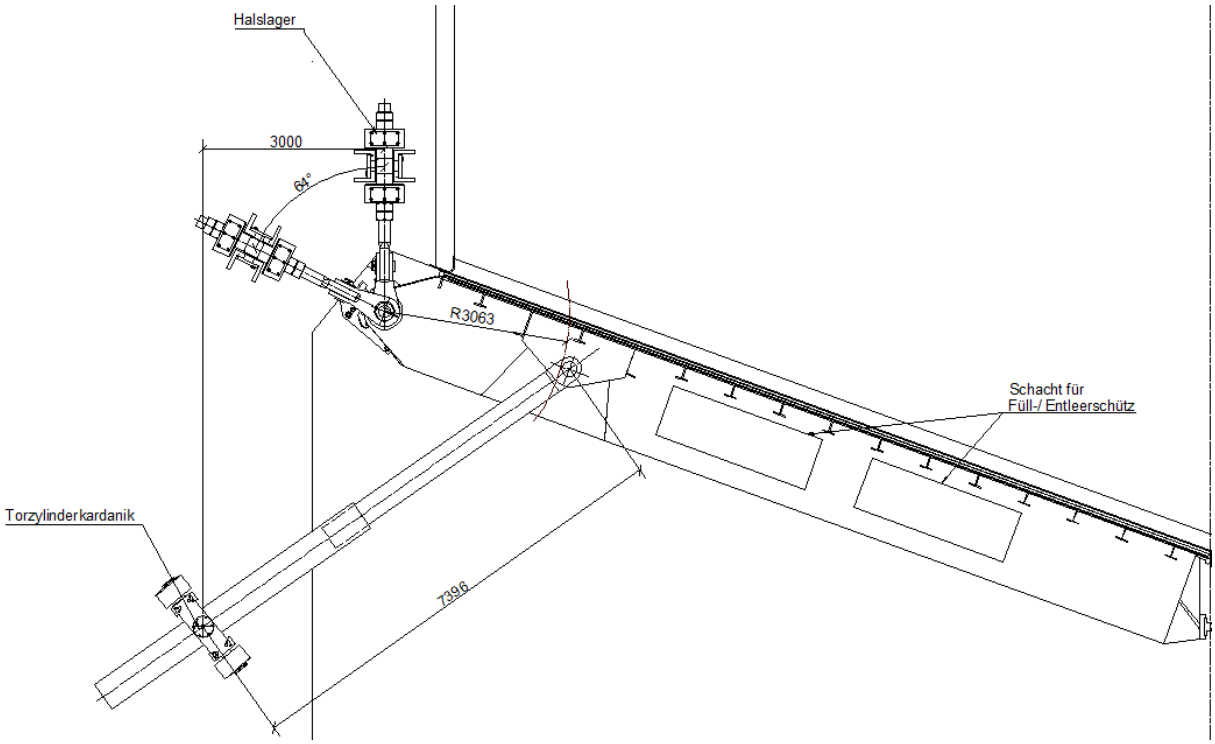
		[kN]		[kN]
Eigengewicht Schütz		35,1		35,1
Eigengewicht Hubgestänge		1,3		1,3
Reibkraft aus Wasserdruck		154,5		131,4
Reibkraft aus Vorspannung		34,7		34,7
Auftrieb – Hohlkörper Schütz		-25,4		-25,4
	Summe	**200,2**	Summe	177,1





9. DETAILNACHWEISE

9.1. Halslager



Aufgrund der Anordnung der Halslagerstangen wird davon ausgegangen, dass im geschlossenen Zustand die zur Fließrichtung geneigte und im geöffneten Zustand die parallel zur Fließrichtung angeordnete Stange zum Tragen kommt. Zudem kann angenommen werden, dass die maximale Belastung der Halslagerstangen im trockenen Zustand (ohne Auftrieb) entsteht.

9.1.1. Zusammenstellung der Kräfte

9.1.1.1. Nach Handrechnung (trocken)

LF1 Vertikale Last aus Tor

Zusatzinformationen

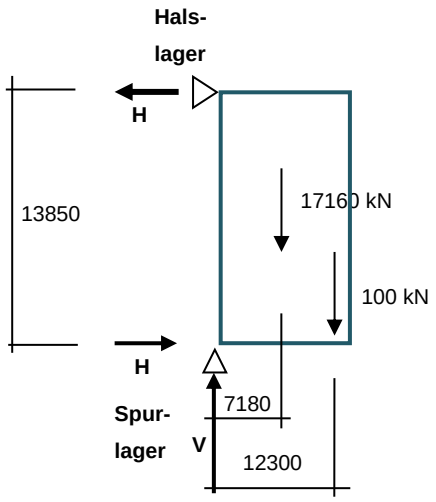
Fläche der Flächen:	A :	8.49115E+08	[mm²]
Länge der Stäbe	L :	261233.0	[mm]
Oberfläche	S :	1.89945E+09	[mm²]
Material-Volumen	V :	1.98682E+10	[mm³]
Material-Masse	W :	155966.00	[kg]

F_{EG} = 156t * 1,1 (Lasterhöhung für Verschmutzung, …) ≅ 1716 kN

LF2 Leckwerden von Luftkammern

Da die genaue Geometrie der Hohlzellen noch nicht festgelegt wurde wird die folgende Last angenommen:

$F_{volle\ Zellen}$ = 100 kN



Hals- und Spurlagerlasten

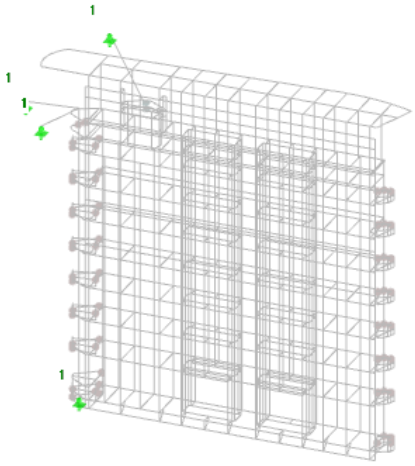
max $F_{Ed,H}$ = (1200 * $\frac{7180}{13850}$ + 100 * $\frac{12300}{13850}$) * 1,35 = (625 + 95) * 1,35 = 972 kN

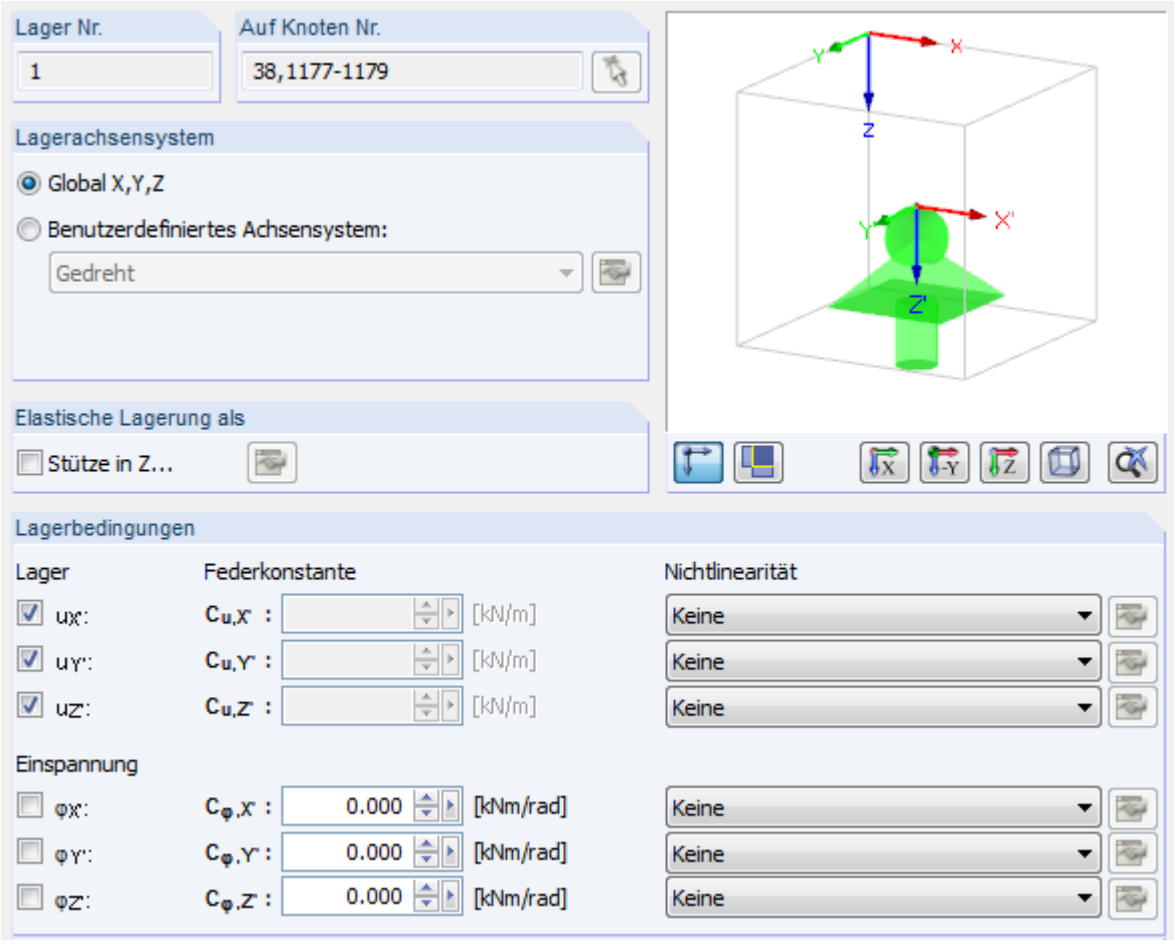
max $F_{Ed,V}$ = (1200 + 100) * 1,35 = 1755 kN

9.1.1.2. Aus RFEM (nass)

Für die Berechnung der Zylinder- Halslager und Spurlagerkräfte wurde das oben beschriebene Modell wie folgt modifiziert:

Lagerbedingungen:



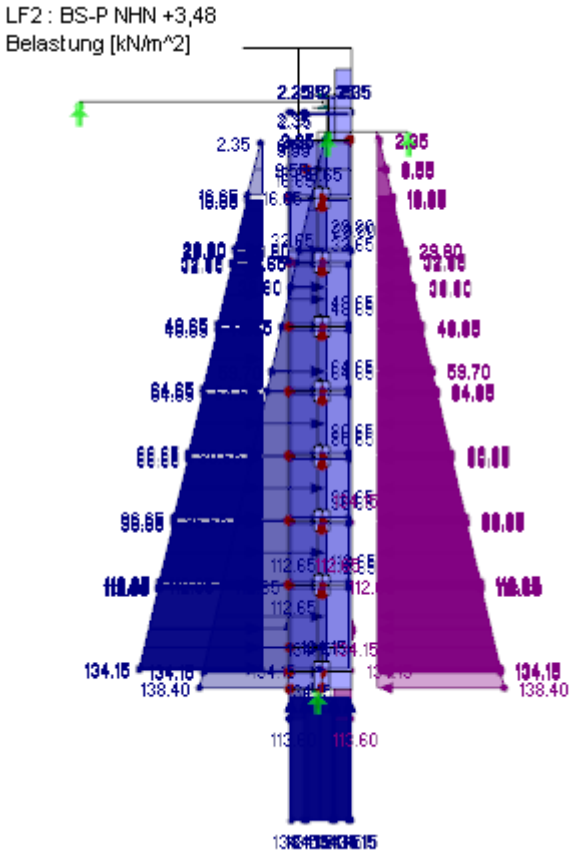


9.1.1.2.1. Lastfälle

- LF1 Eigengewicht

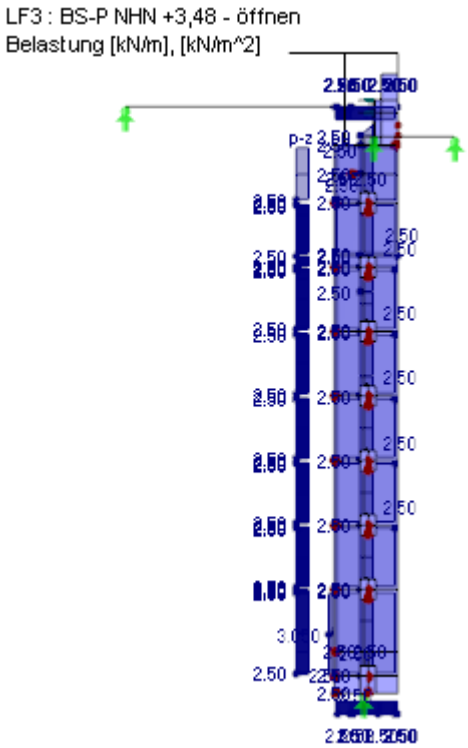
Das Eigengewicht wurde wie unter 3.1 definiert angesetzt.

- LF2 BS-P NHN +3,48



Der Wasserdruck wurde beidseitig bis NHN +3,48 angesetzt

- LF3 BS-P NHN +3,48 - öffnen

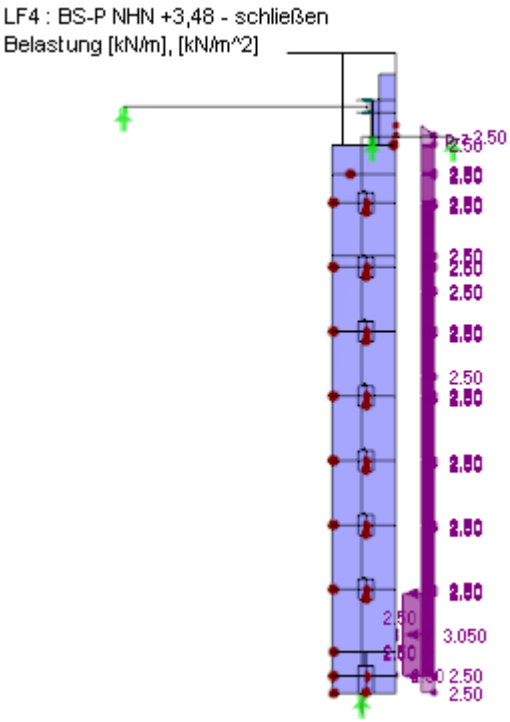


Es wird wie unter 1.11.3 definiert folgende Welle angesetzt

Für die statischen Nachweise zu berücksichtigen:

Tor geschlossen bis 90° (in Tornische) Δw = 15 cm + 10 cm (Schwall)

- LF3 BS-P NHN +3,48 - schließen



Es wird wie unter 1.11.3 definiert folgende Welle angesetzt

Für die statischen Nachweise zu berücksichtigen:

Tor geschlossen bis 90° (in Tornische) Δw = -15 cm - 10 cm (Sunk)

9.1.1.2.2. Lastfallkombinationen

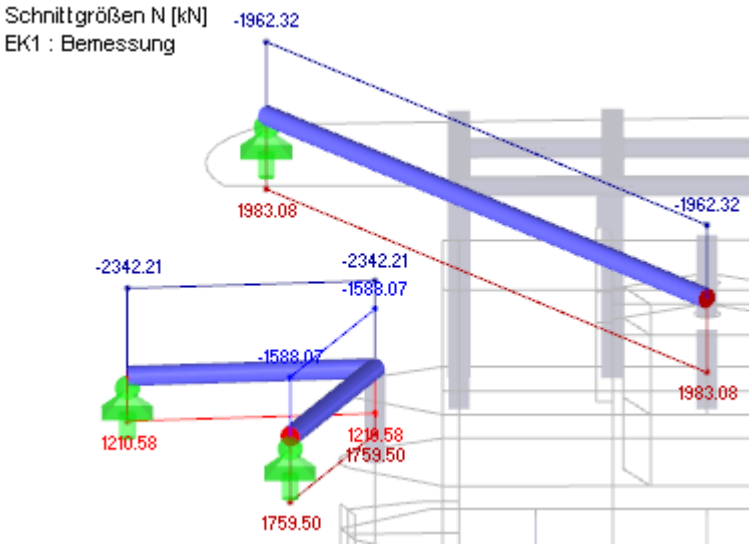
Last-kombin.	Bezeichnung
LK1	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.35*LF3
LK2	1.35*LF1 + 1.35*LF2 + 1.35*LF4

9.1.1.2.3. Ergebnisse

Es wurden 3 verschiedene Positionen untersucht (0° 35° und 70°)

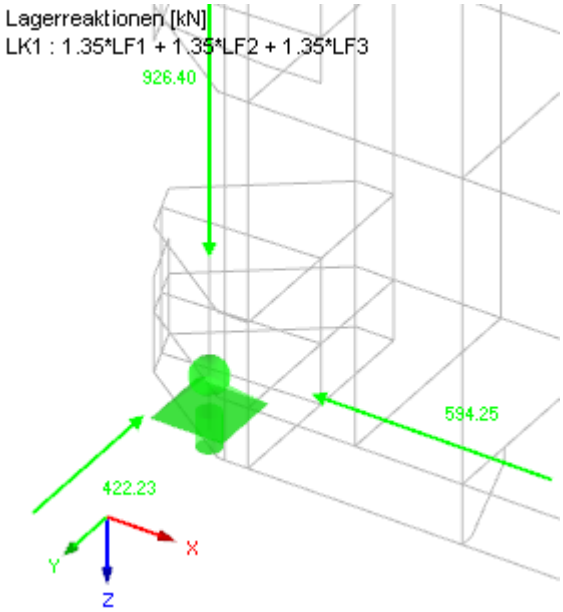
Ergebnisse für 0°

- Halslager

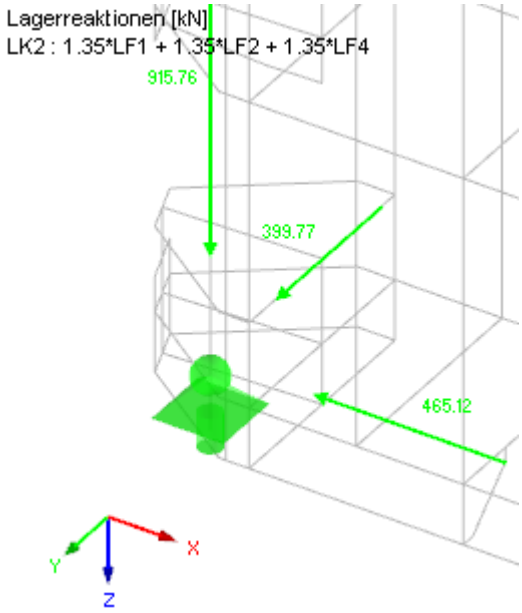


- Spurlager

LK1

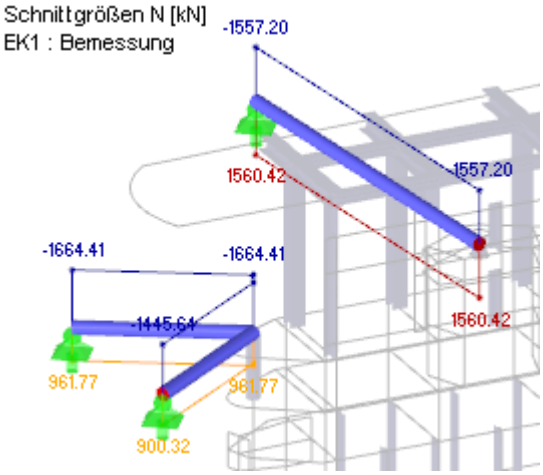


LK2



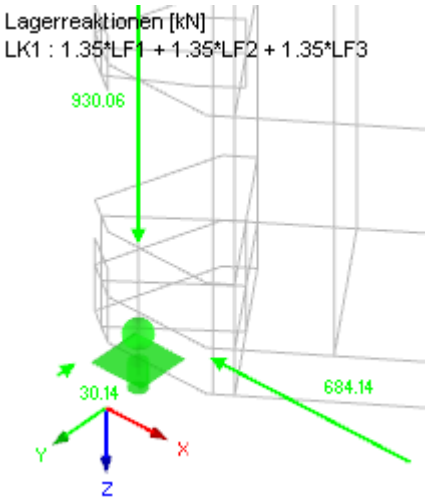
Ergebnisse für 35°

- Halslager

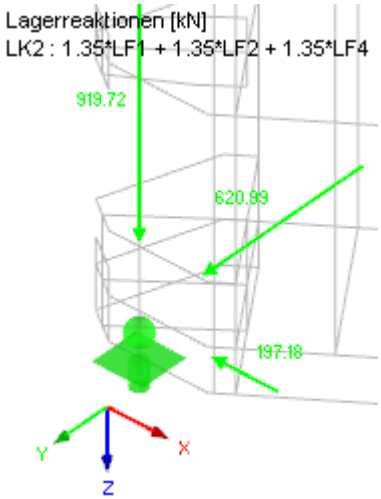


- Spurlager

LK1

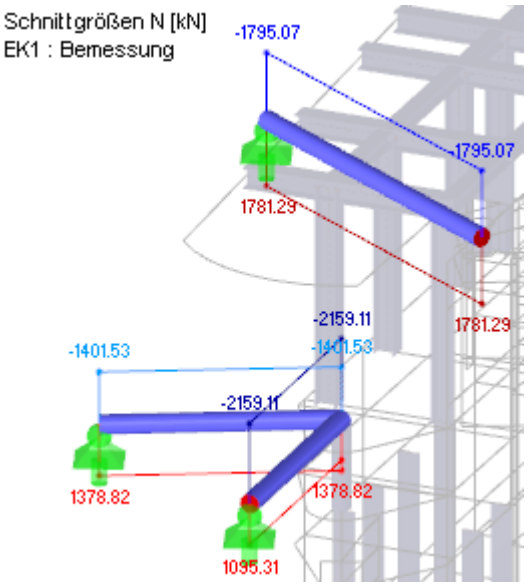


LK2



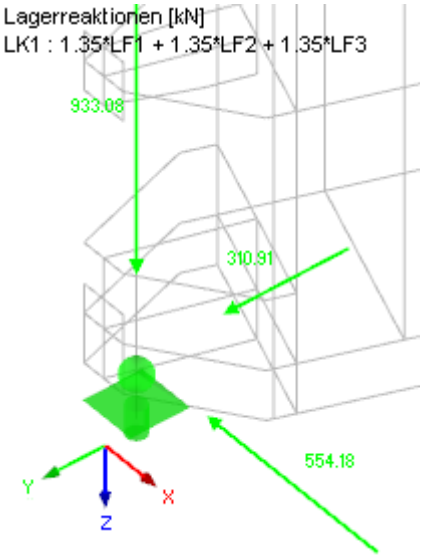
Ergebnisse für 70°

- Halslager

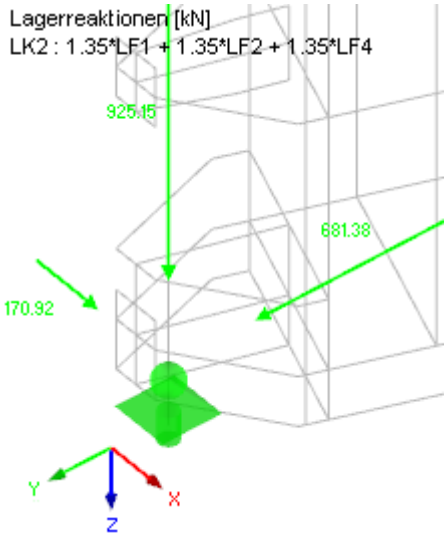


- Spurlager

LK1



LK2



Torwinkel	Halslagerkräfte				Spurlagerkräfte					
	Stange 1		Stange 2		$F_{Ed,H}$				$F_{Ed,V}$	
	max	min	max	min	$F_{Ed,H,x,LK1}$	$F_{Ed,H,x,LK2}$	$F_{Ed,H,y,LK1}$	$F_{Ed,H,y,LK2}$	$F_{Ed,V,LK1}$	$F_{Ed,V,LK2}$
0°	1211	-2345	1760	-1590	595	466	423	400	927	916
35°	973	-1671	907	-1460	685	198	31	621	931	920
70°	1379	-1402	1096	-2160	555	171	311	682	934	925

Werkstoff:	S355	
Schaftdurchmesser:	220	mm
Regelgewinde M:	6	mm Steigung
mit Nenndurchmesser:	210	mm

für Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Charakteristischer Wert der Zugkraft:	max N_d =	1760	[kN]
Charakteristischer Wert der Druckkraft:	min N_d =	-2345	[kN]

Gleitlagerdurchmesser	220	mm
Tägliche Lastspielzahl	36	
Betriebstage je Jahr	340	

Spannungsquerschnitt nach DIN 13-28:	d_2 =	206,10	mm
	d_3 =	202,64	mm
	A_{sp} =	32.804	mm²

Weitere Tragsicherheitsnachweise mit den Ausgangswerten:

Teilsicherheitsbeiwerte:	γ_F =	1,35	γ_M =	1,5
Schaftquerschnitt:	A_s =	38.013	mm²	
Trägheitsmoment:	I_s =	114.990.145	mm^4	
Widerstandsmoment:	W_s =	1.045.365	mm³	
Streckgrenze:	$f_{y,k}$ =	295	N/mm²	
Zugfestigkeit:	$f_{u,k}$ =	450	N/mm²	

Nachweis der Zugkraft im Gewindeende:

Grenzzugspannung

$\sigma_{1,R,d} = f_{y,k}/(1{,}1\ \gamma_M) =$ 179 N/mm²

oder $\sigma_{2,R,d} = f_{u,k}/(1{,}25\ \gamma_M) =$ 240 N/mm²

Grenzzugkraft

$N_{R,d} = \sigma_{1,R,d}\ A_s =$ 6.796 kN

oder $N_{R,d} = \sigma_{2,R,d}\ A_{sp} =$ 7.873 kN

Bemessungswert der Zugkraft:

$N_d = \max N_k\ \gamma_F =$ 1760,0 kN

Nachweis:

1760,0 / 6796 = 0,26 ≤ 1

Knicksicherheitsnachweis (Biegeknicken):

Elastizitätsmodul:	E =	210.000	N/mm²
Knicklänge: Von Druckstück bis zum Bolzen Lagerstück	s_k =	2.200	mm

Bemessungswert der *Euler*schen Knicklast:

$N_{ki,d} = \pi^2\ (E\ I_s)_d/s_k^2 =$ 32.827.895 N

Bemessungswert der Druckkraft:

$N_d = \min N_k\ \gamma_F =$ -3165,8 kN

Verzweigungslastfaktor (*Euler*sche Knicksicherheit):

$\eta_{Ki} = N_{ki,d} / N_d =$ 10,370

kein KSNW notwendig

Knicksicherheitslinie c
Stich der anzunehmenden Vorkrümmung

v_0 = 11 mm

Größtes Biegemoment infolge Vorkrümmung nach Theorie 1. Ordnung:

$M_0 = N_d\ v_0$ = 34.823.250 Nmm

Größtes Reibmoment des Gleitlagers:

$M_\mu = \mu\ N_d\ d/2$ = 52.234.875 Nmm

Vergrößerungsfaktor:

$c = 1/[1-(N_d/N_{ki,d})] = 1/(1-1/\eta_{Ki})$ = 1,107

Randdruckspannung im Schaftquerschnitt:

σ = 175,4 N/mm²

Bemessungswert der Streckgrenze:

$f_{y,d} = f_{y,k} / \gamma_M$ = 197 N/mm²

Nachweis:

175,4 / 197 = 0,89 ≤ 1

Nachweis der Zugspannungen im Schaftquerschnitt:
Größtes Reibmoment des Gleitlagers:

$M_\mu = \mu\ N_d\ d/2$ = 29.040.000 Nmm

Randzugspannung im Schaftquerschnitt:

σ = 74 N/mm²

Nachweis:

74 / 197 = 0,38 ≤ 1

9.2. Spurlager

9.2.1. Werkstoffe Spurlager

Kalotte: Bronze (z.B PAN SoMs 140)

Zapfen: Niro (1.4462)

Sonstige Stahlteile: S235J2 / S355J2

9.2.2. Zusammenstellung der Kräfte

9.2.2.1. nach Handrechnung (trocken)

Die maximalen Lasten für Spur und Halslager entstehen im Trockenen Zustand (kein Auftrieb).

LF1 Vertikale Last aus Tor

Zusatzinformationen

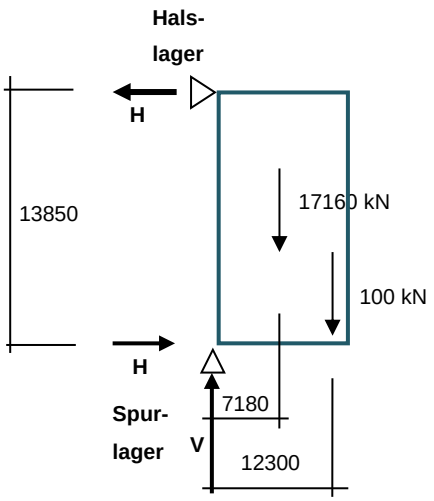
Fläche der Flächen:	A :	8.49115E+08	[mm²]
Länge der Stäbe	L :	261233.0	[mm]
Oberfläche	S :	1.89945E+09	[mm²]
Material-Volumen	V :	1.98682E+10	[mm³]
Material-Masse	W :	155966.00	[kg]

F_{EG} = 156t * 1,1 (Lasterhöhung für Verschmutzung, …) ≅ 1716 kN

LF2 Leckwerden von Luftkammern

Da die genaue Geometrie der Hohlzellen noch nicht festgelegt wurde wird die folgende Last angenommen:

$F_{volle\ Zellen}$ = 100 kN



Hals- und Spurlagerlasten

max $F_{Ed,H}$ = (1200 * $\frac{7180}{13850}$ + 100 * $\frac{12300}{13850}$) * 1,35 = (625 + 95) * 1,35 = 972 kN

max $F_{Ed,V}$ = (1200 + 100) * 1,35 = 1755 kN

9.2.2.2. Aus RFEM (nass)

Torwinkel	Halslagerkräfte				Spurlagerkräfte					
	Stange 1		Stange 2		$F_{Ed,H}$				$F_{Ed,V}$	
	max	min	max	min	$F_{Ed,H,x,LK1}$	$F_{Ed,H,x,LK2}$	$F_{Ed,H,y,LK1}$	$F_{Ed,H,y,LK2}$	$F_{Ed,V,LK1}$	$F_{Ed,V,LK2}$
0°	1211	-2345	1760	-1590	595	466	423	400	927	916
35°	973	-1671	907	-1460	685	198	31	621	931	920
70°	1379	-1402	1096	-2160	555	171	311	682	934	925

9.2.3. Pressung Spurlagerzapfen und Kalotte

Typ: PAN-SoMs 140

Maximale zulässige dynamische Spannung:

$\sigma_{R,L}^{1}$ = 80 N/mm^2

Maximale zulässige statische Spannung:

135 N/mm^2

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit nach DIN 19704-1; 10.12:

$\sigma_{R,L}$ = 1,3 * HBS * (1/s)^(1/5) N/mm^2

Darin ist für s der Jahresgleitweg (in m) einzusetzen

Der Jahresgleitweg s ergibt sich aus

s = n * ε * d* / 2

Dabei ist:

n = die Anzahl der Schwenkbewegungen des belasteten Gelenkes pro Jahr =		8160	
ε = Schwenkwinkel in Grad =		70	
d = der Gleitlagerdurchmesser =		0,33	m
d* = d * cos (arctg (F_v / wurzel(F_h^2 + $F_{h,II}^2$))			
d* = Breitenkreisdurchmesser der Hertzschen Fläche =		0,160	m
s = Jahresweg =		797	m
Brinellhärte des Gleitlagers =	HBS	140	
$\sigma_{R,L}^{2}$ =	(= 1,3 * HBS * $(1/s)^{1/5}$)	47,8	N/mm^2

$\sigma_{R,L}$ = min ($\sigma_{R,L}^1$; $\sigma_{R,L}^2$) = 47,8 N/mm²

Beanspruchung

Die maximale Hertzsche Pressung bei der Berührung zweier Bauteile mit kugelförmigen Oberflächen mit den Radien R1 und R2 ergibt sich aus

$$\max p_d = 1{,}5 * F_d / (\pi * a^2)$$

mit dem Radius der in diesem Fall kreisförmig sich einstellenden Berührungsfläche

$$a = [1{,}5 * F_d * (1 - \nu^2) * R / E] \wedge (1/3)$$

mit dem Ersatzradius

$$R = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$$

Bei Berührung einer Hohlkugel auf der Innenseite ist der Radius dieser Oberfläche negativ einzusetzen

Bei allen Kontaktproblemen von Bauteilen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul $E_1 \neq E_2$ kann der Ersatz-Elastizitätsmodul eingesetzt

$$E = 2 * E_1 * E_2 / (E_1 + E_2)$$

E_1 =	200000	N/mm²	(1.4462)	
E_2 =	100000	N/mm²		
E =	133333	N/mm²		
R_1 =	164,960	mm	(165 h7)	Innenradius
R_2 =	-165,068	mm	(165F6)	Außenradius
R =	252126,09	mm		
$F_{v,d}$ =	1755	kN		
$F_{h,d}$ =	972	kN		
$F_{res,d}$ =	2006	kN		
a =	173,0	mm		
max p_d =	45,7	N/mm²	(= 1,5 * F / (a^2 * π * 0,70))	
			(30%ige Flächenabzug für eingelagerte Festschmiersoffe)	

Nachweis:

max p_d / $\sigma_{R,L}$ =	0,96	<	1	**OK**

10. BEARBEITUNG

Vorstatik Stemmtor

Schleuse Kiel-Holtenau

Bearbeitet:

Würzburg, 18.01.2018

Bearbeiter

.....	.....
B. Eng Tobias Merklein	Dr.-Ing M. Schäfers