

# STATISCHE BERECHNUNG

**Projekt :** **Aluminiumsilo**  
**D = 3,000 m; H = 11,250 m; V<sub>1</sub> = 62,3 m<sup>3</sup>**

**Kommission :** **2106040**  
**Kotraco - Polytech**

**Bestell-Nr.:** **176754**

**Bauherr :** **Kotraco**  
**Plastic Machinery Benelux**  
**Korte Schaft 23 C**  
[REDACTED] **Houten**

**Bauort :** [REDACTED] **Musselkanaal**

**Tragwerksplanung :**  
**GROTE Ingenieurbüro**

**Bergstraße 4**  
[REDACTED] **Wettringen**

**Hersteller :**  
**EICHHOLZ Silo- und**  
**Anlagenbau GmbH**  
**Kolpingstraße 1**  
[REDACTED] **Schapen**

Wettringen, 13.01.2022/Gr

**1. Vorbemerkungen****1.1 Beschreibung**

Tragfähigkeitsnachweis eines Silos für Schüttgüter.  
Die Konstruktion besteht im wesentlichen aus einem Kegeldach, einem Auslauftrichter und einem Kreiszylinder, der unterhalb der Nutzhöhe als Standzarge ausgebildet wird.

**1.2 Berechnungsgrundlagen**

Die Berechnung erfolgt nach den z.Zt. gültigen Stahlbaunormen.

Der Nachweis der Tragfähigkeit ist erbracht, wenn die Auslastung (Beanspruchung/Beanspruchbarkeit)  $\leq 1$  ist.

**1.3 Normen**

- EN 1990:2010-12  
Grundlagen der Tragwerksplanung
- EN 1991-1-1:2010-12  
Allgemeine Einwirkungen - Wichten,  
Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- EN 1991-1-3:2010-12  
Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten
- EN 1991-1-4:2010-12  
Allgemeine Einwirkungen - Windlasten
- EN 1991-1-4/NA:2007  
Nationaler Anhang Allgemeine  
Einwirkungen - Windlasten
- EN 1991-4:2010  
Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbeh:
- EN 1993-1-1:2010-12  
Stahlbau - Allgemeine Bemessungsregeln  
und Regeln für den Hochbau
- EN 1993-1-6:2010-12  
Stahlbau - Festigkeit und Stabilität von  
Schalen
- EN 1993-4-1:2010-12  
Stahlbau - Silos
- EN 1998-1:2010-12  
Auslegung von Bauwerken gegen  
Erdbeben
- EN 1998-4:2007-01  
Erdbeben - Silos, Tankbauwerke und  
Rohrleitungen
- EN 1999-1-1:2010-05  
Aluminium - Allgemeine  
Bemessungsregeln
- EN 1999-1-5:2010-05  
Aluminium - Schalentragerwerke

DIN-Fachbericht 140:2005-01  
Auslegung von Siloanlagen gegen  
Staubexplosionen

VDI-Richtlinie 3673:2002-11  
Druckentlastung von Staubexplosionen

DIN 4149:2005-04  
Bauten in deutschen Erdbebengebieten -  
Lastannahmen, Bemessung und  
Ausführung üblicher Hochbauten

#### 1.4 Literatur

[REDACTED] Silo-Handbuch

#### 1.5 Material

(siehe auch Punkt 2.2)

Material 1 : Bleche  
Material 2 : Profile

EN AW-5754-O/H111  
EN AW-6060 T66

Die Werkstoffgüte ist mit dem Abnahmeprüfzeugnis  
DIN 50 049 - 3.1 B nachzuweisen.

#### 1.6 Prüfung

Es darf nur nach geprüfter statischer Berechnung  
produziert werden.

## 2. Systemwerte

### 2.1 Geometrische Größen:

Durchmesser:	$d_c =$	3,000 m
Halbmesser:	$r =$	1,500 m
Maximale Wanddicke:	$t =$	4,0 mm
Höhe des Zylinders	$h_T =$	11,250 m
Höhe des Fusses über Null:	$H_{Null} =$	0,000 m

#### Kegeldach

<b>Dachneigung</b>	$\delta =$	15,0 °
Dachrandgeländerhöhe:	$h_{Geländ} =$	1,250 m
Filterhöhe:	$h_{Filter} =$	1,900 m
Filterabmessungen:	$d_{Filter} =$	0,850 m
	$b_{Filter} =$	0,000 m

Silokammer Nr.:	1	Gesamt
Siloinhalt brutto:	$V =$ 62,32	62,3 m <sup>3</sup>
Schüttgewicht	$\gamma =$ 8,00	
Fassungsvermögen	$W =$ 498,56	498,6 kN
	50,82	50,8 to
Höhe der Standzarge:	$h_{S,i} =$ 3,300	
Minimale Wanddicke:	$_{min}t =$ 4,000	4,000 mm
Zylindrische Höhe:	$h_{i,j} =$ 7,950	3,300 m
Zylindrische Nutzhöhe:	$h_{c,i,j} =$ 7,950	m
Exzentrische Befüllung	$e_{t,i,j} =$ 0,000	m
Trichterhöhe:	$h_{Tri,i,j} =$ 2,500	m
Ausmitte des Auslaufs:	$e_{oi} =$ 0,000	m
Auslaufdurchmesser	$d_{Aus,i,j} =$ 0,115	m
Auslaufhöhe:	$h_{Aus,i,j} =$ 0,800	m
Neigung der Trichterwand:	$\alpha_{i,j} =$ 60,02	°
Trichteröffnungswinkel:	$\beta_{i,j} =$ 59,97	°
Rechn. Volumen des Zylinders	$V_{c,i,j} =$ 56,20	m <sup>3</sup>
Rechn. Volumen des Trichters	$V_{h,i,j} =$ 6,12	m <sup>3</sup>
Rechn. Gesamtvolumen	$V_{Kamm,i,j} =$ 62,32	m <sup>3</sup>

Schlankheit	$h_c/d_c =$ 2,650
	1
	schlanker Silo

erf. Anforderungsklasse	AAC 1	DIN EN 1991-4, Tabelle 2.1
gew. Anforderungsklasse	AAC 2	

Berechnungsnorm für Beulnachweise:	<i>calculation code for buckling verification of shell:</i>	1	DIN EN 1999-1-5:2017-03
Toleranzklasse:	<i>class of tolerance:</i>	3	DIN EN 1090-3
Beulklasse des Werkstoffs:	<i>class of buckling of the material:</i>	B	DIN EN 1999-1-1:2014-03; 3.22., Tab. 3.2a



DIN_EN	KL_TOL	KL_BEUL
1	3	B

Definition der Schüsse:

Schuss	$\Delta h$	zu	z	t	M	Auslastung					Gewicht	
						$\sigma_v$	Beulnachweise - DIN EN 1999-1-5					
top	1	m	m	m	mm		Axial	Umfang	Schub	Interaktion	kg	
1	1	1,250	10,000	1,250	4,0	1	0,07	0,05	0,36	0,03	0,28	127,2
2	1	2,500	7,500	3,750	4,0	1	0,18	0,25	0,32	0,06	0,27	254,5
3	1	2,500	5,000	6,250	4,0	1	0,30	0,52	0,32	0,11	0,37	254,5
4	1	1,700	3,300	7,950	4,0	1	0,38	0,68	0,32	0,16	0,57	173,0
4	11	0,000	3,300	0,000	4,0	1	0,29	0,68	0,08	0,19	0,59	0,0
4	0	0,800	2,500	0,000	4,0	1	0,30	0,70	0,08	0,13	0,60	81,4
5	0	2,500	0,000	0,000	4,0	1	0,33	0,76	0,08	0,14	0,68	254,5
Gewicht des Zylinders :											1145,1	

Kegeldach	0,402	11,250	0,000	4,5	1	0,13	0,81	0,33				88,9
Trichter 1	2,500	3,300	7,950	4,0	1	0,31	0,65	0,33	0,65			152,5
Gesamtgewicht :											1386,5	

## 2.2 Material

## Material 1 :

EN AW-5754-O/H111

t ≤ 80 mm

Spezifische Gewicht:

$\gamma = 27,0 \text{ kN/m}^3$

Elastizitätsmodul:

$E = 70000 \text{ N/mm}^2$

Schubmodul:

$G = 26923 \text{ N/mm}^2$

Querdehnungszahl:

$\mu = 0,3$

DIN EN 1999-1-1

T = 50,0 °C

Elastizitätsmodul:

$E = 70000 \text{ N/mm}^2$

Schubmodul:

$G = 26923 \text{ N/mm}^2$

Fließspannungen nach:

$f_{y,k} = 80 \text{ N/mm}^2$

Zul. Spannungen nach:

$f_{u,k} = 190 \text{ N/mm}^2$

## Material 2 :

EN AW-6060 T66

t ≤ 25 mm

Spezifische Gewicht:

$\gamma = 27,0 \text{ kN/m}^3$

Elastizitätsmodul:

$E = 70000 \text{ N/mm}^2$

Schubmodul:

$G = 26923 \text{ N/mm}^2$

Querdehnungszahl:

$\mu = 0,3$

DIN EN 1999-1-1

T = 50,0 °C

Elastizitätsmodul:

$E = 70000 \text{ N/mm}^2$

Schubmodul:

$G = 26923 \text{ N/mm}^2$

Fließspannungen nach:

$f_{y,k} = 150 \text{ N/mm}^2$

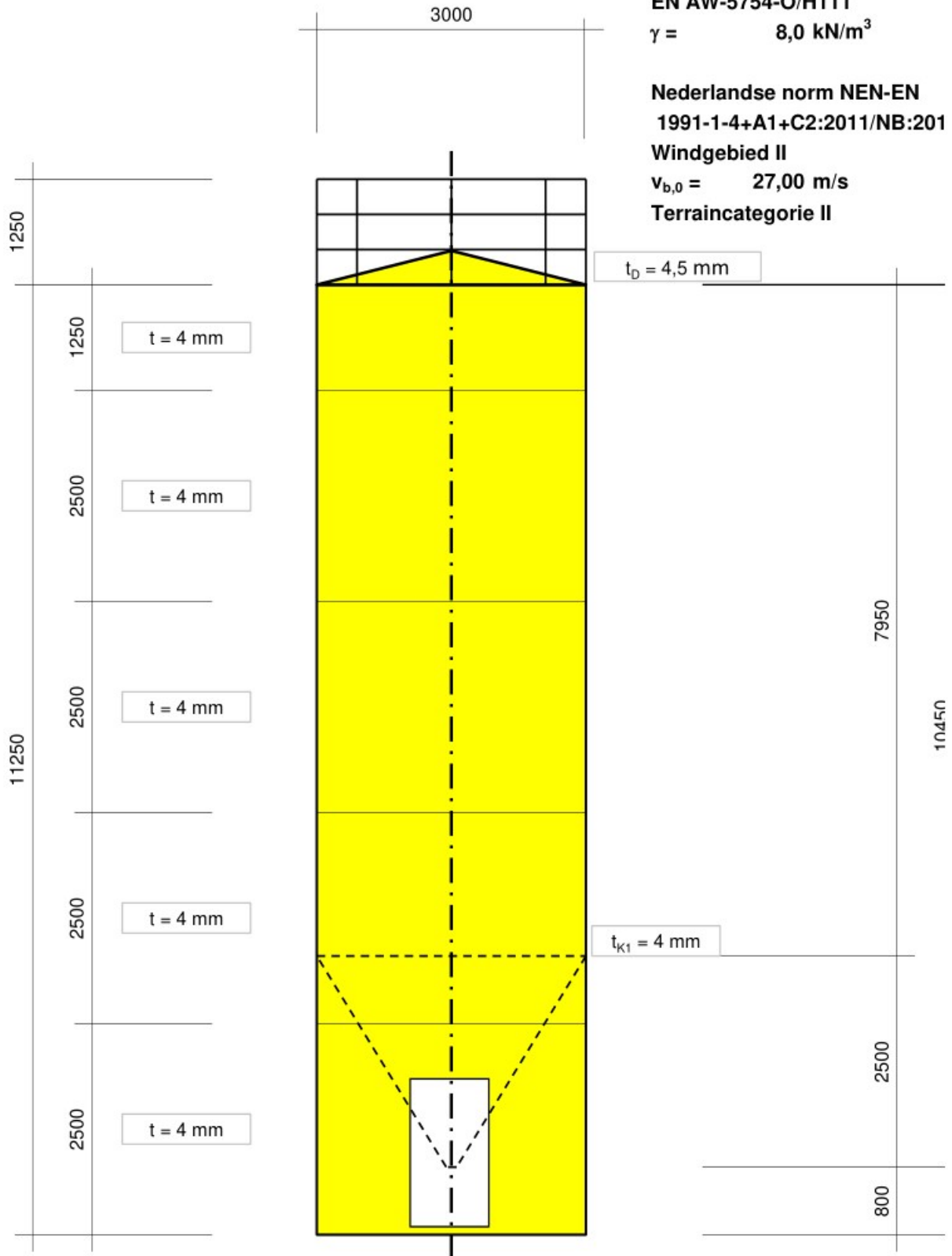
Zul. Spannungen nach:

$f_{u,k} = 195 \text{ N/mm}^2$

**SYSTEM**

M. 1: 66,7  
EN AW-5754-O/H111  
 $\gamma = 8,0 \text{ kN/m}^3$

Nederlandse norm NEN-EN  
1991-1-4+A1+C2:2011/NB:201  
Windgebied II  
 $v_{b,0} = 27,00 \text{ m/s}$   
Terraincategorie II





**3. Einwirkungen (Lasten)**

**3.1 Ständige Einwirkungen aus Eigengewicht**

Das Siloeigengewicht wird aus der Rohdichte des Materials und der Wanddicke des Silos ermittelt. Für eine eventuelle Isolierung und Verkleidung wird ein entsprechender Zuschlag als Flächenlast berücksichtigt.

0 mm	Dämmung:	$\rho =$	1,0 kN/m <sup>3</sup> :	0,00 kN/m <sup>2</sup>
0 mm	Blechverkleidung:	$\rho =$	28,0 kN/m <sup>3</sup> :	0,00 kN/m <sup>2</sup>
	Drahtanker:			0,00 kN/m <sup>2</sup>
0 mm			$\Delta g =$	<b>0,00 kN/m<sup>2</sup></b>

**3.2 Veränderliche Einwirkungen aus Silogut**

gemäß DIN EN 1991-4:2010-12

**3.2.1 Silokammer 1 (Obere Silokammer):**

**Schüttguteigenschaften :**

gemäß Schüttgutanalyse Schwedes+Schulze, Nr. 2-0237-15 vom 19.12.2015

Bezeichnung des Schüttgutes:	PE-Granulat PP-Granulat PS-Granulat			kN/m <sup>3</sup>
Umrechnungsfaktor	$a_\gamma =$		1,000	
Spezifisches Gewicht:	$\gamma =$	8,00	8,000	8,00
Umrechnungsfaktor	$a_{\phi p} =$		1,200	
Böschungswinkel	$\phi_r =$	29,17	35,002	42,00 °
Umrechnungsfaktor	$a_{\phi i} =$		1,200	
Winkel der inn. Reibung:	$\phi_i =$	29,2	35,0	42,0 °
Umrechnungsfaktor	$a_K =$		1,265	
Horizontallastverhältnis:	$K =$	0,500	0,632	0,800
Umrechnungsfaktor	$a_\mu =$		1,195	
Wandreibungsbeiwert (Silo):	$\mu =$	0,350	0,418	0,500
Wandreibungswinkel: (Silo)	$\rho =$	19,29	22,70	26,57 °
Umrechnungsfaktor	$a_\mu =$		1,195	
Wandreibungsbeiwert (Trichter):	$\mu =$	0,350	0,418	0,500
Wandreibungswinkel: (Trichter)	$\rho =$	19,29	22,70	26,57 °
Kennwert für Teilflächenlast	$C_{op} =$		1,00	
Bodenlastfaktor:	$c_b =$		1,00	
Schlankheitsbeiwert:	$C_S =$		1,00	
Entleerungsfaktor Horizontallasten:	$C_h =$		1,15	
Entleerungsfaktor Wandreibungslasten:	$C_w =$		1,10	

**Zellenquerschnitt**

Durchmesser:	$d =$	3,000 m
Innere Querschnittsfläche:	$A =$	7,069 m <sup>2</sup>
Innerer Umfang:	$u =$	9,425 m
Hydraulischer Radius:	$A/u =$	0,750 m

**Fließprofil**

Wandreibungsbeiwert:	$\mu_h =$	0,35	-	0,50
Trichterneigung:	$90^\circ - \alpha =$	30,0 °		90,0 °
Bereichsgrenze nach Bild 4.1	$\mu_{h,gr} =$	0,33		-0,33
Bereich nach Bild 4.1		1		1

=> **Kernfluss** **Kernfluss**

**3.3 Veränderliche Einw. aus Flüssigkeitsdruck****Eigenschaften der Flüssigkeit**

Bezeichnung:

Spezifisches Gewicht:	$\gamma_1 =$	0,00 kN/m <sup>3</sup>
Spezifisches Gewicht:	$\gamma_2 =$	0,00 kN/m <sup>3</sup>

**3.4 Veränderliche Einwirkung aus Unterdruck**

Der Unterdruck wird radial auf den Zylinder angesetzt und erzeugt in der Kreiszyinderschale Umfangsdruckspannungen.

Durch die Wirkung des Unterdrucks auf den Deckel werden in der Kreiszyinderwand zusätzlich Axialdruckspannungen erzeugt.

Unterdruck lt. Angabe des Herstellers:	$p_u =$	5,0 mbar
Radiallast auf Kreiszyinderschale:	$p_{rad} =$	-0,50 kN/m <sup>2</sup>
Randlast am oberen Rand der KZS:	$P_x =$	-0,38 kN/m

**3.5 Veränderliche Einwirkung aus Überdruck**

Der Überdruck wird radial auf den Zylinder angesetzt und erzeugt in der Kreiszyinderschale Umfangszugspannungen.

Durch die Wirkung des Überdrucks auf den Deckel werden in der Kreiszyinderwand zusätzlich Axialzugspannungen erzeugt.

Überdruck lt Angabe des Herstellers:	$p_{\bar{u}} =$	45,0 mbar
Radiallast auf Kreiszyinderschale:	$p_{rad} =$	4,50 kN/m <sup>2</sup>
Randlast am oberen Rand der KZS:	$P_x =$	3,38 kN/m

**3.6 Veränderliche Einw. aus Verkehrslasten**

Standort:	NL-9581 Musselkanaal
Schneelastzone:	2
Bodenschneelast:	$s_k =$ 1,00 kN/m <sup>2</sup>
Formbeiwert:	$\mu =$ 0,80
Faktor für Norddt. Tiefeebene (2,3/1,5)	$f =$ 1,00 kN/m <sup>2</sup>
Schneelast auf Silodach:	$s_k \leq$ 1,00 kN/m <sup>2</sup>
Verkehrslast auf Silodach:	$q_k =$ 1,00 kN/m <sup>2</sup>
Einzellast auf Silodach	$Q_k =$ 1,00 kN

## 3.7 Veränderliche Einwirkungen aus Wind

## 3.7.1 Windlast auf Silomantel

## NEN-EN 1991-1-4+A1+C2:2011/NB:2011

Standort:

Windzone:	2
Basiswindgeschwindigkeit	$v_{b,0} = 27,00$ m/s
Basisgeschwindigkeitsdruck:	$q_{b,0} = 0,46$ kN/m <sup>2</sup>
Geländekategorie:	Gk: II

## Ermittlung nach EN 1991-1-4

kinematische Zähigkeit:	$v = 15 \cdot 10^6$ m <sup>2</sup> /s
Silodurchmesser:	$b = 3,000$ m
Silohöhe:	$l = 11,250$ m
Geschwindigkeitsdruck:	$q = 0,888$ kN/m <sup>2</sup>
Luftdichte:	$\rho = 1,250$ kg/m <sup>3</sup>
Windgeschwindigkeit:	$v = 37,69$ m/s
Reynoldszahl:	$Re = 7,54E+06$
äquivalente Rauigkeit:	$k = 0,050$
Verhältnis Rauigkeit/Durchmesser:	$k/b = 1,67E-05$
Grundkraftbeiwert:	$c_{f,0} = 0,697$
Grundkraftbeiwert:	$c_{f,0} = 0,007$
Grundkraftbeiwert:	$c_{f,0} = 0,697$
Effektive Schlankheit:	$\lambda = 2,625$
Effektive Schlankheit:	$\lambda = 3,750$
Effektive Schlankheit:	$\lambda = 3,750$
Völligkeitsgrad:	$\varphi = 1,000$
Abminderungsfaktor:	$\psi_{\lambda} = 0,657$
Kraftbeiwert:	$c_f = 0,458$
<b>Kraftbeiwert:</b>	<b><math>c_f \leq 0,46</math></b>

## Reihenaufstellung

Bei Silogruppen oder bei Silos neben Gebäuden wird der Kraftbeiwert  $c_f$  nach DIN 18914, Bbl1, zu Abschnitt 4.2.1 (4) in Abhängigkeit vom Abstand der Silos erhöht.

Bei Abständen  $a > 2d$  ist keine Erhöhung erforderlich.

Abstand zwischen den Silos bzw. zwischen Silo und Gebäude:

Abstand zwischen den Silos bzw. zwischen Silo und Gebäude:	$w = 0,500$ m
Silodurchmesser:	$d = 3,000$ m
Achsabstand der Silos:	$a = 3,500$ m
Erhöhung des Kraftbeiwertes:	$c_f = 1,26 \cdot c_{f,0}$
	$= 0,58$
gew.:	$c_f = 0,70$

## 3.7.2 Windlast auf Dachrandgeländer:

Über die Dachrandgeländerhöhe wird eine Windlast angesetzt.

Über die Dachrandgeländerhöhe wird eine Windlast angesetzt.	$w_D = 0,25 \cdot q_i \cdot d$
Höhe über Null:	$H_D = 11,88$ m:
	$q_i = 0,888$ kN/m <sup>2</sup>
	$w_D = 0,67$ kN/m
	<b><math>Q_{w,D} = 0,83</math> kN</b>
	<b><math>M_{w,D} = 0,52</math> kNm</b>

**3.7.3 Windlast auf Filter:**

Über die Filterhöhe wird eine Windlast angesetzt.

Rundfilter	$w_F = 0,9 * q_i * d_{Filter}$
Rechteckfilter	$w_F = 1,3 * q_i * \max(d_{Filter}, b_{Filter})$
Höhe über Null:	$H_F = 12,20 \text{ m:}$
	$q_i = 0,888 \text{ kN/m}^2$
	$w_F = 0,68 \text{ kN/m}$
	$Q_{W,F} = 1,29 \text{ kN}$
	$M_{W,F} = 1,74 \text{ kNm}$

**3.8 Außergewöhnliche Einwirkung aus Erdbeben**

nicht vorhanden

**3.9 Außergewöhnliche Einw. aus Explosionsdruck**

nicht vorhanden

**3.10 Horizontallast infolge Schiefstellung**

Bei kippgefährdeten Einbauten, die innerhalb von geschlossenen Bauwerken stehen und keiner Windbeanspruchung unterliegen, z. B. bei eingebauten frei stehenden Silos, ist eine Horizontallast von 1/100 der Gesamtlast in Höhe des Schwerpunkts zu berücksichtigen sowie das Gewicht der Silofüllung anzusetzen.

Schiefstellung:

$$\varphi = 1/100$$

Die Horizontallasten werden schussweise aus dem Eigengewicht der Silowand sowie dem Schüttgutgewicht ermittelt und als Gleichlast angesetzt.

Die Lasten aus Dachkegel und Trichter finden als Einzellasten Berücksichtigung.

nicht erforderlich

**4. Dachkonstruktion**

**4.1 Dachkegel**

Dachneigung:  $\alpha = 15,0^\circ = 0,2618 \text{ rad}$   
 Blechdicke:  $t_D = 4,5 \text{ mm}$   
 EN AW-5754-O/H111

**Lasten**

Eigengewicht Dachblech  $g = 0,12 \text{ kN/m}^2$   
 zusätzliche Eigenlast  $\Delta g = 0,00 \text{ kN/m}^2$   
 Verkehrslast/Schnee  $p = 1,00 \text{ kN/m}^2$   
 $q = 1,12 \text{ kN/m}^2$

Summe Eigengewicht:  $G = 0,86 \text{ kN}$   
 Filtergewicht:  $F = 1,20 \text{ kN}$   
 Summe Verkehrslast:  $P = 7,07 \text{ kN}$   
 Gesamtlast  $Q = 9,13 \text{ kN}$

**4.1.1 Eigengewicht**

	$\Delta h$	$z_u$	$y$	$t$	$g$	$F$	$n_y$	$n_\phi$	$\sigma_x$	$\sigma_\phi$
	m	m	m	mm	$\text{kN/m}^2$	kN	$\text{kN/m}$	$\text{kN/m}$	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
o		11,538	0,440	4,5	0,122	1,20	0,00	-0,19	0,00	-0,04
m	0,288	11,394	0,996	4,5	0,122		-0,95	-0,44	-0,21	-0,10
u		11,250	1,553	4,5	0,122		-0,83	-0,68	-0,18	-0,15

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

vertikal:  $n_x = -0,21 \text{ kN/m}; N_x = -2,02$   
 horizontal:  $n_h = -0,80 \text{ kN/m}; \text{ kN}$

**4.1.2 Trichterfüllung und -überschüttung**

**4.1.3 Flüssigkeitsdruck**

**4.1.4 Unterdruck**

siehe Punkt 3.5:  $p_u = 0,50 \text{ kN/m}^2$

	$\Delta h$	$z_u$	$y$	$t$	$p_u$	$P$	$n_y$	$n_\phi$	$\sigma_x$	$\sigma_\phi$
	m	m	m	mm	$\text{kN/m}^2$	kN	$\text{kN/m}$	$\text{kN/m}$	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
u		11,538	0,440	4,5	0,50		0,41	0,82	0,09	0,18
m	0,288	11,394	0,996	4,5	0,50		0,93	1,86	0,21	0,41
o		11,250	1,553	4,5	0,50		1,45	2,90	0,32	0,64

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

vertikal:  $n_x = 0,38 \text{ kN/m}; N_x = 3,53$   
 horizontal:  $n_h = 1,40 \text{ kN/m}; \text{ kN}$



**4.1.5 Überdruck**

siehe Punkt 3.6:

$p_u = 4,50 \text{ kN/m}^2$

	$\Delta h$	$z_u$	$y$	$t$	$p_{\bar{u}}$	$P$	$n_y$	$n_{\phi}$	$\sigma_x$	$\sigma_{\phi}$
	m	m	m	mm	$\text{kN/m}^2$	kN	kN/m	kN/m	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
u		11,538	0,440	4,5	4,50		3,69	7,39	0,82	1,64
m	0,288	11,394	0,996	4,5	4,50		8,37	16,73	1,86	3,72
o		11,250	1,553	4,5	4,50		13,04	26,08	2,90	5,80

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

$$\begin{aligned} \text{vertikal:} & \quad n_x = 3,38 \text{ kN/m}; & N_x & = 31,81 \\ \text{horizontal:} & \quad n_h = 12,60 \text{ kN/m}; & & \text{kN} \end{aligned}$$

**4.1.6 Verkehrslast/Schnee**

	$\Delta h$	$z_u$	$y$	$t$	$p$	$P$	$n_y$	$n_{\phi}$	$\sigma_x$	$\sigma_{\phi}$
	m	m	m	mm	$\text{kN/m}^2$	kN	kN/m	kN/m	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
o		11,538	0,440	4,5	1,000	0,00	0,00	-1,59	0,00	-0,35
m	0,288	11,394	0,996	4,5	1,000		-1,55	-3,59	-0,34	-0,80
u		11,250	1,553	4,5	1,000		-2,76	-5,60	-0,61	-1,24

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

$$\begin{aligned} \text{vertikal:} & \quad n_x = -0,71 \text{ kN/m}; & N_x & = -6,73 \\ \text{horizontal:} & \quad n_h = -2,67 \text{ kN/m}; & & \text{kN} \end{aligned}$$

**4.1.7 Windlast****4.1.8 Erdbeben****4.1.9 Explosionsdruck**

siehe Punkt 3.7:

$p_{Ex} = 0,00 \text{ kN/m}^2$

**4.2. Spannungsnachweise**

EN AW-5754-O/H111

$f_{y,k} = 80,00 \text{ N/mm}^2$

**4.2.1 Definition der Einwirkungskombination**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	4	5	6	7	8	9	10
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdbe.	Expl.	Schiefst.
	Index	4.1.1	4.1.2	4.1.2	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.10
		$G_k$	$Q_{k,f}$	$Q_{k,e}$	$Q_{k,pu}$	$Q_{k,pü}$	$Q_{k,p}$	$Q_{k,w}$	$A_{d,E}$	$A_{d,Ex}$	$\varphi$
günstig	$\gamma$	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	ungünstig	$\gamma$	1,35	1,35	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00
Komb	$\psi_0$	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6	1,0	1,0	
	$\psi_1$		0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5			
	$\psi_2$		0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0,0			
A.2	Kombinationen für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen										
D	11	1,35		1,35	1,20		1,05	0,90			
F	12	1,35	1,35			1,20	1,05	0,90			
S	13	1,35	1,35				1,50	0,90			
WF	14	1,35	1,35		1,20		1,05	1,50			
WE	15	0,90						1,50			
	16	1,35			1,50						
	17	1,35				1,50					
A.3	Kombinationen für außergewöhnliche Bemessungssituationen										
E	21	1,00		0,80			0,30			1,00	
c)	Kombinationen für Bemessungssituationen infolge Erdbeben										
SF	31	1,00	0,80				0,30		1,00		
SE	32	1,00					0,30		1,00		

**4.2.2 Längsspannungen**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	4	5	6	7	8	9	10
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdbe.	Expl.	Schiefst.
		4.1.1	4.1.2	4.1.2	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.10
Geometrie		Spannungen der Lastfälle									
	$z_u$	$t$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$	$\sigma_{x,d}$
	m	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
o	11,538	4,5	0,00	0,00	0,00	0,09	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00
m	11,394	4,5	-0,21	0,00	0,00	0,21	1,86	-0,34	0,00	0,00	0,00
u	11,250	4,5	-0,18	0,00	0,00	0,32	2,90	-0,61	0,00	0,00	0,00

Spannungen der Lastkombinationen											Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
11	12	13	14	15	16	17	21	31	32	$\sigma_{x,d}$		$\sigma_{x,R,d}$	
N/mm <sup>-</sup>											N/mm <sup>-</sup>	N/mm <sup>-</sup>	
o	0,11	0,99	0,00	0,11	0,00	0,14	1,23	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	1,23	72,7
m	-0,40	1,58	-0,80	-0,40	-0,19	0,02	2,50	-0,32	-0,32	-0,32	<b>0,03</b>	2,50	72,7
u	-0,51	2,59	-1,17	-0,51	-0,17	0,23	4,10	-0,37	-0,37	-0,37	<b>0,06</b>	4,10	72,7

**4.2.3 Beanspruchung in Umfangsrichtung**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	4	5	6	7	8	9	10	
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.	
		4.1.1	4.1.2	4.1.2	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.10	
Geometrie		Spannungen der Lastfälle										
	$z_u$	t	$\sigma_{\varphi,k,g}$	$\sigma_{\varphi,k,fl}$	$\sigma_{\varphi,k,fl}$	$\sigma_{\varphi,k,pu}$	$\sigma_{\varphi,k,pü}$	$\sigma_{\varphi,k,p}$	$\sigma_{\varphi,w}$	$\sigma_{\varphi,d,E}$	$\sigma_{\varphi,Ex}$	$\sigma_{\varphi,\varphi}$
	m	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
o	11,538	4,0	-0,04	0,00	0,00	0,18	1,64	-0,35	0,00	0,00	0,00	0,00
m	11,394	4,0	-0,10	0,00	0,00	0,41	3,72	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00
u	11,250	4,0	-0,15	0,00	0,00	0,64	5,80	-1,24	0,00	0,00	0,00	0,00

Spannungen der Lastkombinationen											Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
11	12	13	14	15	16	17	21	31	32	$\sigma_{\varphi,d}$		$\sigma_{\varphi,R,d}$	
N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
o	-0,21	1,54	-0,59	-0,21	-0,04	0,22	2,41	-0,15	-0,15	-0,15	<b>0,03</b>	2,41	72,7
m	-0,47	3,49	-1,33	-0,47	-0,09	0,49	5,45	-0,34	-0,34	-0,34	<b>0,07</b>	5,45	72,7
u	-0,74	5,44	-2,07	-0,74	-0,14	0,76	8,49	-0,52	-0,52	-0,52	<b>0,12</b>	8,49	72,7

**4.2.4 Vergleichsspannung**

Vergleichsspannungen der Lastkombinationen											Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
11	12	13	14	15	16	17	21	31	32	$\tau_d$		$\tau_{R,d}$	
N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		
o	0,24	1,83	0,59	0,24	0,04	0,26	2,70	0,15	0,15	0,15	<b>0,04</b>	2,70	72,7
m	0,62	3,84	1,55	0,62	0,21	0,49	5,99	0,46	0,46	0,46	<b>0,08</b>	5,99	72,7
u	0,89	6,03	2,38	0,89	0,21	0,80	9,43	0,64	0,64	0,64	<b>0,13</b>	9,43	72,7

**4.2.5 Kräfte am Übergang Zylinder - Dacheck**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	4	5	6	7	8	9	10
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.
		4.1.1	4.1.2	4.1.2	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.10
Geometrie		Kräfte am Übergang Zylinder - Dacheck									
	$z_u$	t	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$	$n_{i,d}$
	m	mm	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
$n_{y,d}$	3,300	4,0	-0,21	0,00	0,00	0,38	3,38	-0,71	0,00	0,00	0,00
$n_{h,d}$	0,800	4,0	-0,80	0,00	0,00	1,40	12,60	-2,67	0,00	0,00	0,00

Kräfte am Übergang Zylinder - Dacheck der Lastkombinationen											extr.	
11	12	13	14	15	16	17	21	31	32	min	max.	
kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	
$n_{y,d}$	-0,59	3,01	-1,36	-0,59	-0,19	0,27	4,77	-0,43	-0,43	-0,43	4,77	
$n_{h,d}$	-2,20	11,24	-5,08	-2,20	-0,72	1,02	17,81	-1,60	-1,60	-1,60	17,81	

#### 4.3 Beulsicherheit des Dachbleches

##### Nachweis:

gemäß DIN EN 1993-4-1:2010-12, 7.3

Tragsicherheitsnachweise für kreisrunde konische Silodächer

$$\begin{aligned}
 E &= 70000 \text{ N/mm}^2 \\
 r &= 1500 \text{ mm} \\
 t &= 4,5 \text{ mm} \\
 \alpha &= 15^\circ = 0,2618 \text{ rad} \\
 p_{n,Rcr} &= 0,01535 \text{ N/mm}^2 = 15,35 \text{ kN/m}^2 \\
 \alpha_p &= 0,2 \\
 \gamma_{M1} &= 1,10
 \end{aligned}$$

Bemessungs-Beulaußendruck (Bemessungswert des Widerstandes)

$$\begin{aligned}
 p_{n,Rd} &= 2,79 \text{ kN/m}^2 \\
 p_{n,Ed} &= 1,35 \cdot 0,12 + 1,50 \cdot 1,00 + 1,2 \cdot 0,50 \\
 &= 2,26 \text{ kN/m}^2 \\
 p_{n,Ed} / p_{n,Rd} &= 0,81 < 1
 \end{aligned}$$

#### 4.4 Dacheckring

Bemessung des Druckringes nach Greiner (Der Stahlbau 3/92)

Ringdruckkraft:

$$\begin{aligned}
 p_{h,d} &= 17,81 \text{ kN/m} \\
 N_{,d} &= 26,72 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Mitwirkende Breiten von Zylinderwand und Dachblech

$t_{Zyl,o}$	=	4,0 mm				
$b_{Zyl,o}$	=	75,5 mm	EN AW-5754-O/H11	3,02	80,00	24,17 kN
$t_{Ring}$	=	0,0 mm				
$b_{Ring}$	=	0,0 mm	EN AW-6060 T66	0,00	150,00	0,00 kN
$t_{Dach}$	=	4,5 mm				
$b_{Dach}$	=	157,5 mm	EN AW-5754-O/H11	7,09	80,00	56,68 kN
				10,11	$N_{pl,d} =$	80,85 kN

$$N_{pl,d} = 80,85 \text{ kN}$$

Spannungsnachweis:

$$N_{,d} / N_{pl,d} = 0,33 < 1,00$$

## 5. Auslaufrichter

## 5.1 Auslaufrichter 1

## DIN EN 1991-4:2010-12, Abschnitt 6.1.1

$$\alpha = 60,02^\circ$$

$$\beta = 29,98^\circ$$

$$\tan\beta = 0,577$$

$$K = 0,500$$

$$\mu_h = 0,350 \text{ (Trichter / hopper)}$$

$$(1-K)/(2\mu_h) = 0,714$$

=&gt; steiler Trichter

## 5.1.1 Einwirkungen (Lasten)

## 5.1.1.1 Ständige Einwirkungen aus Eigengewicht

Pkt	$z_u$	R	y	t	g	G
	m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN
1 (o)	3,300	1,500	3,001	4,00	0,108	2,600
2	2,675	1,139	2,280	4,00	0,108	1,975
3 (m)	2,050	0,779	1,558	4,00	0,108	1,350
4	1,425	0,418	0,837	4,00	0,108	0,725
5 (u)	0,800	0,058	0,115	4,00	0,108	0,100
	2,500	1,443	60,02			

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

Meridiankraft:

$$n_y = 0,187 \text{ kN/m;}$$

vertikal:

$$n_x = 0,162 \text{ kN/m;}$$

$$N_x = 1,53 \text{ kN}$$

horizontal:

$$n_h = -0,093 \text{ kN/m;}$$

## 5.1.1.2 Veränderliche Einwirkungen aus Silogut

DIN EN 1991-4:2010-12, 6.

## Fülllasten

Bez.:

PE-Granulat

PP-Granulat

## Lasten aus Trichterüberschüttung

Charakt. Wert der Schüttgutwichte:

$$\gamma = 8,00 \text{ kN/m}^3$$

Bodenlastvergrößerungsfaktor:

$$c_b = 1,00$$

Höhe der vertikalen Wand:

$$h_c = 7,950 \text{ m}$$

Wandreibungsbeiwert (Silo):

$$\mu_h = 0,350 \text{ MIN}$$

Horizontallastverhältnis (Silo):

$$K = 0,500 \text{ MIN}$$

Charakteristische Tiefe:

$$z_0 = 4,286 \text{ m}$$

Horizontallast in charakt. Tiefe:

$$p_{h0} = 17,143 \text{ kN/m}^2$$

Tiefenvariationsfunktion:

$$Y_J(h_c) = 0,844$$

Vertikale Fülllast:

$$p_{vf} = 34,286 * Y_J(h_c)$$

$$p_{vf} = 28,922 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{vit} = 28,922 \text{ kN/m}^2$$

Mittlere Vertikallasten:

## Summierte Wandreibungslast:

$$p_{we}(h_c) = 26,009 \text{ kN/m}$$

## Lasten aus Trichterfüllung

Koeffizient für Trichterform

$$S = 2$$

Höhe des Trichters (Scheitel)

$$h_h = 2,600 \text{ m}$$

Eff. Wandreibungskoeffizient

$$\mu_{heff} = 0,350 \quad 0,350$$

Empirischer Koeffizient

$$b = 0,200$$

Trichterneigungswinkel

$$\beta = 29,985^\circ$$

Parameter

$$F_t = 0,924$$

Parameter

$$n = 0,971$$

Vertikallast

$$p_v = p_{v,1} + p_{v,2}$$

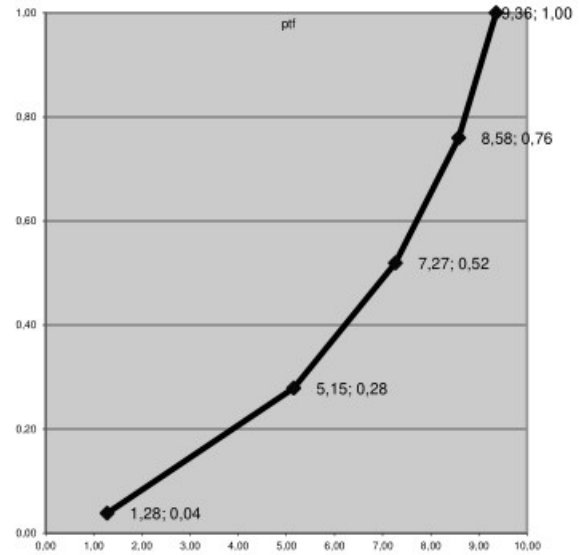
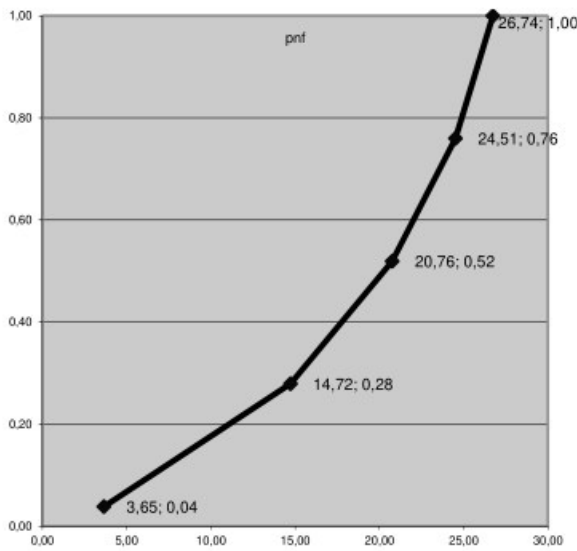
Last senkrecht auf Trichterwand

$$p_{nt} = 0,924 * p_v$$

Wandreibungslast

$$p_{rt} = 0,324 * p_v$$

Pkt	z <sub>u</sub>	R	y	t	x	x/h <sub>n</sub>	p <sub>v,1</sub>	p <sub>v,2</sub>	p <sub>v</sub>	p <sub>nt</sub>	p <sub>tt</sub>
	m	m	m	mm	m		kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	<b>4,00</b>	1,50	1,00	0,00	28,92	28,92	26,74	9,36
2	2,675	1,139	2,280	<b>4,00</b>	1,14	0,76	4,36	22,15	26,51	24,51	8,58
3 (m)	2,050	0,779	1,558	<b>4,00</b>	0,78	0,52	7,15	15,31	22,45	20,76	7,27
4	1,425	0,418	0,837	<b>4,00</b>	0,42	0,28	7,55	8,37	15,92	14,72	5,15
5 (u)	0,800	0,058	0,115	<b>4,00</b>	0,06	0,04	2,73	1,22	3,95	3,65	1,28



Pkt	z <sub>u</sub>	R	y	t	P <sub>nt</sub>	p <sub>nt</sub>	p <sub>tt</sub>	n <sub>y</sub>	n <sub>φ</sub>	σ <sub>y</sub>	σ <sub>φ</sub>
	m	m	m	mm	kN	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	<b>4,00</b>		26,74	9,36	31,05	46,30	7,76	11,58
2	2,675	1,139	2,280	<b>4,00</b>		24,51	8,58	20,98	32,24	5,24	8,06
3 (m)	2,050	0,779	1,558	<b>4,00</b>		20,76	7,27	11,94	18,66	2,98	4,67
4	1,425	0,418	0,837	<b>4,00</b>		14,72	5,15	4,92	7,10	1,23	1,78
5 (u)	0,800	0,058	0,115	<b>4,00</b>		3,65	1,28	5,98	0,24	1,50	0,06

253,43 kN

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

$$n_x = 26,89 \text{ kN/m}; \quad N_x = 253,43 \text{ kN}$$

$$\leq \text{ Fassungsvermögen / capacity} = 498,56 \text{ kN}$$

Meridiankraft:

vertikal:

horizontal:

$$n_y = 31,05 \text{ kN/m};$$

$$n_x = 26,89 \text{ kN/m};$$

$$n_h = -15,52 \text{ kN/m};$$

$$N_x = 253,43 \text{ kN}$$

**Entleerungslasten****Lasten aus Trichterüberschüttung**

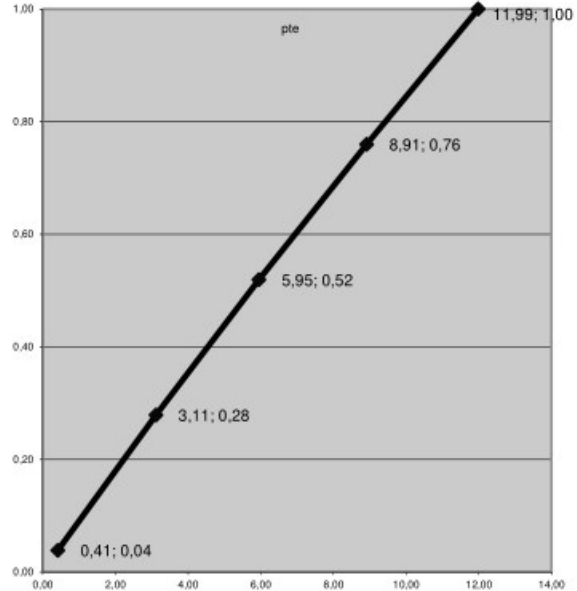
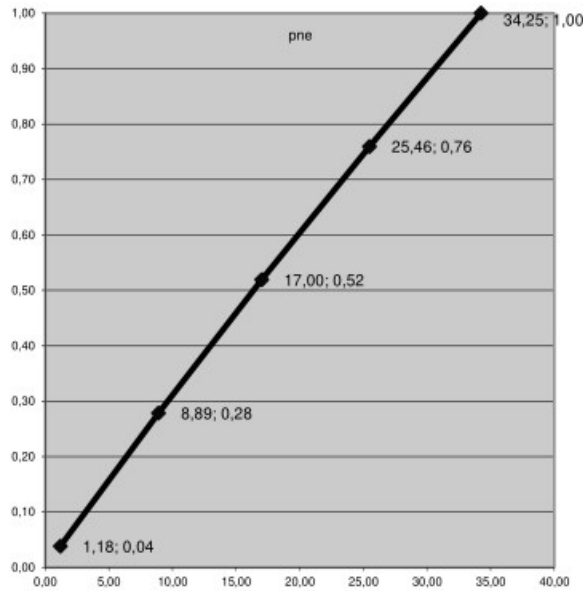
Charakt. Wert der Schüttgutwichte:	$\gamma =$	8,00 kN/m <sup>3</sup>
Bodenlastvergrößerungsfaktor:	$c_b =$	1,00
Höhe der vertikalen Wand:	$h_c =$	7,950 m
Wandreibungsbeiwert (Silo):	$\mu_h =$	0,350 MIN
Horizontallastverhältnis (Silo):	$K =$	0,500 MIN
Charakteristische Tiefe:	$z_0 =$	4,286 m
Horizontallast in charakt. Tiefe:	$p_{h0} =$	17,143 kN/m <sup>2</sup>
Tiefenvariationsfunktion:	$Y_J(h_c) =$	0,844
Vertikale Fülllast:	$p_{vf} =$	$34,286 * Y_J(h_c)$
	$p_{vf} =$	28,922 kN/m <sup>2</sup>
Mittlere Vertikallasten:	$p_{vft} =$	28,922 kN/m <sup>2</sup>
<b>Summierte Wandreibungslast:</b>	$p_{wf}(h_c) =$	26,009 kN/m

**Lasten aus Trichterfüllung**

Koeffizient für Trichterform	$S =$	2
Höhe des Trichters (Scheitel)	$h_h =$	2,600 m
Eff. Wandreibungskoeffizient	$\mu_{heff} =$	0,350
Trichterneigungswinkel	$\beta =$	29,985 °
Unterer charakt. Wert des Wandreibungskoeffizienten:	$\mu_h =$	0,350
Oberer charakt. Wert des Winkels der inneren Reibung:	$\phi_i =$	42,000 °
Wandreibungswinkel	$\phi_{wh} =$	19,290 °
Parameter	$\varepsilon =$	48,874 °
Parameter	$F_e =$	1,184
Parameter	$n =$	1,805
Vertikallast	$p_v =$	$p_{v,1} + p_{v,2}$
Last senkrecht auf Trichterwand	$p_{ne} =$	1,184 * $p_v$
Wandreibungslast	$p_{te} =$	0,414 * $p_v$



Pkt	z <sub>u</sub> m	R m	y m	t mm	x m	x/h <sub>n</sub>	p <sub>v,1</sub> kN/m <sup>2</sup>	p <sub>v,2</sub> kN/m <sup>2</sup>	p <sub>v</sub> kN/m <sup>2</sup>	p <sub>ne</sub> kN/m <sup>2</sup>	p <sub>te</sub> kN/m <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	4,00	1,50	1,00	0,00	28,92	28,92	34,25	11,99
2	2,675	1,139	2,280	4,00	1,14	0,76	3,90	17,61	21,50	25,46	8,91
3 (m)	2,050	0,779	1,558	4,00	0,78	0,52	5,50	8,86	14,36	17,00	5,95
4	1,425	0,418	0,837	4,00	0,42	0,28	4,63	2,88	7,51	8,89	3,11
5 (u)	0,800	0,058	0,115	4,00	0,06	0,04	0,92	0,08	1,00	1,18	0,41



Pkt	z <sub>u</sub> m	R m	y m	t mm	P <sub>ne</sub> kN	p <sub>ne</sub> kN/m <sup>2</sup>	p <sub>te</sub> kN/m <sup>2</sup>	n <sub>y</sub> kN/m	n <sub>φ</sub> kN/m	σ <sub>y</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>φ</sub> N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	4,00		34,25	11,99	31,14	59,31	7,79	14,83
2	2,675	1,139	2,280	4,00		25,46	8,91	17,69	33,50	4,42	8,37
3 (m)	2,050	0,779	1,558	4,00		17,00	5,95	8,15	15,29	2,04	3,82
4	1,425	0,418	0,837	4,00		8,89	3,11	2,34	4,29	0,58	1,07
5 (u)	0,800	0,058	0,115	4,00		1,18	0,41	0,00	0,08	0,00	0,02

254,23 kN

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

Meridiankraft:  
vertikal:  
horizontal:

$$n_x = 26,97 \text{ kN/m}; \quad N_x = 254,23 \text{ kN}$$

$$\leq \text{ Fassungsvermögen / capacity} = 498,56 \text{ kN}$$

$$n_y = 31,14 \text{ kN/m};$$

$$n_x = 26,97 \text{ kN/m}; \quad N_x = 254,23 \text{ kN}$$

$$n_h = -15,56 \text{ kN/m};$$

## 5.1.1.3 Flüssigkeitsdruck

nicht vorhanden

## 5.1.1.4 Unterdruck

	$z_u$	R	y	t	P	p		$n_y$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
	m	m	m	mm	kN/m	kN/m <sup>2</sup>		kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	4,00		-0,500		-0,43	-0,87	-0,11	-0,22
2	2,675	1,139	2,280	4,00		-0,500		-0,33	-0,66	-0,08	-0,16
3 (m)	2,050	0,779	1,558	4,00		-0,500		-0,22	-0,45	-0,06	-0,11
4	1,425	0,418	0,837	4,00		-0,500		-0,12	-0,24	-0,03	-0,06
5 (u)	0,800	0,058	0,115	4,00	-0,014	-0,500		-0,02	-0,03	0,00	-0,01

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

Meridiankraft:

$$n_y = -0,43 \text{ kN/m;}$$

vertikal:

$$n_x = -0,38 \text{ kN/m;}$$

$$N_x = -3,53 \text{ kN}$$

horizontal:

$$n_h = 0,22 \text{ kN/m;}$$

## 5.1.1.5 Überdruck

	$z_u$	R	y	t	P	p		$n_y$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
	m	m	m	mm	kN/m	kN/m <sup>2</sup>		kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	1,500	3,001	4,00		4,500		3,90	7,79	0,97	1,95
2	2,675	1,139	2,280	4,00		4,500		2,96	5,92	0,74	1,48
3 (m)	2,050	0,779	1,558	4,00		4,500		2,02	4,05	0,51	1,01
4	1,425	0,418	0,837	4,00		4,500		1,09	2,17	0,27	0,54
5 (u)	0,800	0,058	0,115	4,00	0,129	4,500		0,15	0,30	0,04	0,07

Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

Meridiankraft:

$$n_y = 3,90 \text{ kN/m;}$$

vertikal:

$$n_x = 3,38 \text{ kN/m;}$$

$$N_x = 31,81 \text{ kN}$$

horizontal:

$$n_h = -1,95 \text{ kN/m;}$$

## 5.1.1.6 Verkehrslasten

## 5.1.1.7 Windlast

## 5.1.1.8 Erdbeben

$$F_{b,i} = 0,000 \cdot W_{E,i}$$

## 5.1.1.9 Explosionsdruck

$$p_{red} = 0,00 \text{ bar } \ddot{u}$$

**5.1.2. Spannungsnachweise**

Material:

**EN AW-5754-O/H111**

$f_{y,k} = 80,00 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M0} = 1,00$   
 $f_{u,k} = 190,00 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1,25$

**5.1.2.1 Bemessungskombinationen**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdbe.	Expl.	Schiefst.
	Index	5.1.1	5.1.2	5.1.2	5.1.3	5.1.4	5.1.5	5.1.6	5.1.7	5.1.8	5.1.9	5.1.10
		$G_k$	$Q_{k,f}$	$Q_{k,e}$	$Q_{k,f}$	$Q_{k,pu}$	$Q_{k,pü}$	$Q_{k,p}$	$Q_{k,w}$	$A_{d,E}$	$A_{d,Ex}$	$\varphi$
günstig	$\gamma$	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ungünstig	$\gamma$	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	
Kombinationswert e	$\psi_0$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6	1,0	1,0	
	$\psi_1$		0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5			
	$\psi_2$		0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0,0			
A.2	Kombinationen für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen											
		<i>Längsspannungen</i>										
D	11	1,35		1,35		1,20		1,05	0,90			
F	12	1,35	1,35				1,20	1,05	0,90			
S	13	1,35	1,35					1,50	0,90			
WF	14	1,35	1,35			1,20		1,05	1,50			
WE	15	0,90							1,50			
	16	1,35				1,50						
	17	1,35					1,50					
A.3	Kombinationen für außergewöhnliche Bemessungssituationen											
E	21	1,00	0,50								1,00	
E	22	1,00		0,50							1,00	
A.4	Kombinationen für Bemessungssituationen infolge Erdbeben											
SF	31	1,00	1,00							1,00		
SF	32	1,00		1,00						1,00		

**5.1.2.2 Längsspannungen**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.	
		5.1.1	5.1.2	5.1.2	5.1.3	5.1.4	5.1.5	5.1.6	5.1.7	5.1.8	5.1.9	5.1.10	
Geometrie		Spannungen der Lastfälle											
	$z_u$	$t$	$\sigma_{y,k,g}$	$\sigma_{y,k,f}$	$\sigma_{y,k,e}$	$\sigma_{y,k,f}$	$\sigma_{y,k,pu}$	$\sigma_{y,k,pü}$	$\sigma_{y,k,p}$	$\sigma_{y,k,w}$	$\sigma_{y,k,E}$	$\sigma_{y,k,Ex}$	$\sigma_{y,k,e}$
	m	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	<b>4,0</b>	0,05	7,76	7,79	0,00	-0,11	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,675	<b>4,0</b>	0,04	5,24	4,42	0,00	-0,08	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 (m)	2,050	<b>4,0</b>	0,02	2,98	2,04	0,00	-0,06	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,425	<b>4,0</b>	0,01	1,23	0,58	0,00	-0,03	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 (u)	0,800	<b>4,0</b>	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Spannungen der Lastkombinationen										Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
	11	12	13	14	15	16	17	21	31	32			
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>			
1 (o)	10,44	11,71	10,54	10,41	0,04	-0,10	1,52	3,93	7,81	7,83	<b>0,16</b>	11,71	72,7
2	5,92	8,02	7,13	7,03	0,03	-0,08	1,16	2,66	5,28	4,46	<b>0,11</b>	8,02	72,7
3 (m)	2,71	4,67	4,06	3,99	0,02	-0,05	0,79	1,52	3,01	2,06	<b>0,06</b>	4,67	72,7
4	0,77	2,00	1,68	1,64	0,01	-0,03	0,42	0,63	1,24	0,60	<b>0,03</b>	2,00	72,7
5 (u)	0,00	2,06	2,02	2,01	0,00	-0,01	0,06	0,75	1,50	0,00	<b>0,03</b>	2,06	72,7

**5.1.2.3 Beanspruchung in Umfangsrichtung**

Einwirkung	Nr.	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.	
		5.1.1	5.1.2	5.1.2	5.1.3	5.1.4	5.1.5	5.1.6	5.1.7	5.1.8	5.1.9	5.1.10	
Geometrie		Spannungen der Lastfälle											
	$z_u$	$t$	$\sigma_{\phi,k,g}$	$\sigma_{\phi,k,f1}$	$\sigma_{\phi,k,f1}$	$\sigma_{\phi,k,f2}$	$\sigma_{\phi,k,pu}$	$\sigma_{\phi,k,pü}$	$\sigma_{\phi,k,p}$	$\sigma_{\phi,w}$	$\sigma_{\phi,d,E}$	$\sigma_{\phi,Ex}$	$\sigma_{\phi,e}$
	m	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1 (o)	3,300	<b>4,0</b>	0,02	11,58	14,83	0,00	-0,22	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,675	<b>4,0</b>	0,02	8,06	8,37	0,00	-0,16	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 (m)	2,050	<b>4,0</b>	0,01	4,67	3,82	0,00	-0,11	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,425	<b>4,0</b>	0,01	1,78	1,07	0,00	-0,06	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 (u)	0,800	<b>4,0</b>	0,00	0,06	0,02	0,00	-0,01	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Spannungen der Lastkombinationen										Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
	11	12	13	14	15	16	17	21	31	32			
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>			
1 (o)	19,79	18,00	15,66	15,40	0,02	-0,29	2,95	5,81	11,60	14,85	<b>0,27</b>	19,79	72,7
2	11,13	12,68	10,90	10,71	0,02	-0,22	2,24	4,05	8,08	8,39	<b>0,17</b>	12,68	72,7
3 (m)	5,04	7,53	6,32	6,18	0,01	-0,15	1,53	2,35	4,68	3,83	<b>0,10</b>	7,53	72,7
4	1,39	3,06	2,41	2,33	0,01	-0,08	0,82	0,89	1,78	1,08	<b>0,04</b>	3,06	72,7
5 (u)	0,02	0,17	0,08	0,07	0,00	-0,01	0,11	0,03	0,06	0,02	<b>0,00</b>	0,17	72,7

**5.1.2.4 Vergleichsspannungen**

	Vergleichsspannungen der Lastkombinationen										Aus- nutzung	extr	$f_{y,d}$
	11	12	13	14	15	16	17	21	31	32			
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>			
1 (o)	22,38	21,47	18,88	18,59	0,05	0,31	3,32	7,01	13,98	16,79	<b>0,31</b>	22,38	72,7
2	12,61	15,00	13,03	12,81	0,04	0,24	2,52	4,84	9,65	9,50	<b>0,21</b>	15,00	72,7
3 (m)	5,73	8,86	7,51	7,36	0,02	0,16	1,73	2,79	5,56	4,35	<b>0,12</b>	8,86	72,7
4	1,58	3,66	2,93	2,85	0,01	0,09	0,93	1,09	2,17	1,23	<b>0,05</b>	3,66	72,7
5 (u)	0,02	2,07	2,02	2,01	0,00	0,01	0,13	0,75	1,50	0,02	<b>0,03</b>	2,07	72,7

\* Nachweis der Trichter-Zylinder-Ecke wird im Abschnitt 5.4 erbracht

## 5.1.2.5 Kräfte am Übergang Zylinder-Trichter

Einwirkung	Nr.	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		Eigeng.	Füllen	Entleeren	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.	
		5.1.1	5.1.2	5.1.2	5.1.3	5.1.4	5.1.5	5.1.6	5.1.7	5.1.8	5.1.9	5.1.10	
Geometrie		Kräfte am Übergang Zylinder - Trichter											
	$z_u$	$t$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$	$n_{i,k}$
	m	mm	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
$n_{y,k}$	3,300	4,0	0,19	31,05	31,14	0,00	-0,43	3,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$n_{x,k}$	3,300	4,0	0,16	26,89	26,97	0,00	-0,38	3,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$n_{h,k}$	0,800	4,0	-0,09	-15,52	-15,56	0,00	0,22	-1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Kräfte am Übergang Zylinder - Trichter der Lastkombinationen											extr.	
	11	12	13	14	15	16	17	21	31	32	min	max.
	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
$n_{y,d}$	41,77	46,84	42,16	41,64	0,17	-0,40	6,10	15,71	31,23	31,33	-0,40	46,84
$n_{x,d}$	36,18	40,57	36,52	36,07	0,15	-0,34	5,28	13,61	27,05	27,14	-0,34	40,57
$n_{h,d}$	-20,88	-23,41	-21,07	-20,81	-0,08	0,20	-3,05	-7,85	-15,61	-15,66	-23,41	0,20

## 5.1.3 Anschluß Trichter an Kreisringträger

Die Schweißnaht wird bemessen für die maximale Meridiankraft  $n_y$  aus dem Trichter (siehe 5.2.6):

$$\text{Meridiankraft:} \quad n_{y,d} = 46,84 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Schweißnaht:} \quad \text{gew.: } a &= 2,8 \text{ mm} \\ \sigma_w &= 16,73 \text{ N/mm}^2 \\ &< 69,09 \text{ N/mm}^2 \\ &= 0,95 * f_{y,k} / \gamma_M \end{aligned}$$

**5.1.4 Nachweis der Abzweigung (Zylinder - Trichter)**

r =	1,500 m =	1500,0 mm
$\alpha$ =	60,0 °	1,04746
$\beta$ =	30,0 °	0,52334
E =	70000 N/mm <sup>2</sup>	
$f_{y,k1}$ =	80,0 N/mm <sup>2</sup>	EN AW-5754-O/H111
$f_{y,k3}$ =	80,0 N/mm <sup>2</sup>	EN AW-5083-O/H111
$f^*$ =	80,0 / 80,0 =	1,00



**Ermittlung der vorhandenen größten Druckspannung gemäß DIN EN 1993-4-1:2010-12, 8.2.2**

Effektive Querschnittsflächen des Ersatzringes

$\alpha$ =	0,707		(8.14)
$\Psi$ =	0,896		(8.13)
$A_{et}$ =	689,3 mm <sup>2</sup>	4,00 Kontrolle:	(8.12)
$t_c / l_{ec}$ =	4,0 / 60,3 mm	$A_c$ =	241,1 mm <sup>2</sup> (8.6) bis (8.8)
$t_s / l_{es}$ =	4,0 / 54,0 mm	$A_s$ =	216,1 mm <sup>2</sup> (8.6) bis (8.8)
$t_h / l_{eh}$ =	4,0 / 58,0 mm	$A_h$ =	232,2 mm <sup>2</sup> (8.6) bis (8.8)
<b>Gesamtquerschnittsfläche des Ersatzringes:</b>		$A_{et}$ =	689,3 mm <sup>2</sup>
$t_R / d_R$ =	0,0 / 0,0 mm	$A_R$ =	0,0 mm <sup>2</sup>

Bemessungswert der in Umfangsrichtung an der Abzweigung wirksamen Druckkraft

$n_{\theta,Ed}$ =	46,84 kN/m	max. Bemessungswert der Meridianzugkraft am oberen Trichterrand
$p_{nc}$ =	12,96 kN/m <sup>2</sup>	min. charakt. Wert des gemittelten Wanddrucks im Zylinder
$l_{ec}$ =	60,3 mm	Mittragende Länge des Zylindersegmentes
$p_{nh}$ =	26,74 kN/m <sup>2</sup>	min. charakt. Wert des gemittelten Wanddrucks im Trichter
$l_{eh}$ =	58,0 mm	Mittragende Länge des Kegelsegmentes
$\mu$ =	0,50	Wandreibungsbeiwert an der Trichterwand
<b><math>N_{\theta,Ed}</math> =</b>	<b>32,51 kN</b>	<b>Bemessungswert der wirksamen Druckkraft</b>

(8.15)

Bemessungswert der vorhandenen größten Druckspannung

$\sigma_{\theta,Ed} = N_{\theta,Ed} / A_{et} = 47,2 \text{ N/mm}^2$  (mit  $\eta = 1$ ) (8.16), (8.17)

**Tragwiderstände gemäß DIN EN 1993-4-1:2010-12, 8.3**

**Widerstand gegen plastisches Versagen**

$f_y$ =	80,0 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$ =	1,1
$f_{p,Rd} = f_{y,k} / \gamma_{M0} =$	72,7 N/mm <sup>2</sup>

(8.26)

**Widerstand gegen Knicken innerhalb der**

Die Berechnung kann entfallen, wenn der halbe Kegelloffnungswinkel größer ist als der Grenzwinkel.

**Widerstand gegen Knicken aus der Ringebene**

Ermittlung der Querschnittswerte

	$A_i$	$e_i$	$A_i \cdot e_i$	$A_i \cdot e_i^2$	$I_i$	
	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
$t_c / l_{ec}$ =	4,0 / 60,3	mm	241,1	0,000	0,0	321,4
$t_s / l_{es}$ =	4,0 / 54,0	mm	216,1	0,000	0,0	288,1
$t_h / l_{eh}$ =	4,0 / 58,0	mm	232,2	-14,505	-3367,9	48852,7
			<b>689,3</b>	<b>-3367,9</b>	<b>48852,7</b>	<b>16284,2</b>
			<b>e =</b>	<b>-4,8858 mm</b>	<b>I =</b>	<b>49291,4 mm<sup>4</sup></b>

**Bemessungswert des Beulwiderstandes der an den  
Abzweigungsbereich angrenzenden Wände**

$$\begin{aligned}
 E &= 70000,0 \text{ N/mm}^2 \\
 f_{yk} &= 80,0 \text{ N/mm}^2 \\
 r_g &= 1495,1 \text{ mm} \\
 \gamma_{M1} &= 1,10 \\
 A_{\text{et}} &= 689,3 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

**Zylinderwand**

$$\begin{aligned}
 t &= 4,0 \text{ mm} \\
 \beta &= 0,0^\circ \\
 r_s &= 1500,0 \text{ mm} \\
 \sigma_{\text{op,Rd}} &= 72,7 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.31}$$

**Trichterwand**

$$\begin{aligned}
 t &= 4,0 \text{ mm} \\
 \beta &= 30,0^\circ \\
 r_s &= 1731,8 \text{ mm} \\
 \sigma_{\text{op,Rd}} &= 72,7 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.31}$$

**Tragsicherheitsnachweise gemäß DIN EN 1993-4-  
1:2010-12, 8.4****Nachweis gegen plastisches Versagen**

$$\sigma_{\text{u}\theta, \text{Ed}} = 47,2 \text{ N/mm}^2 < 72,7 \text{ N/mm}^2 = f_{p, \text{Rd}} \tag{8.45}$$

**Nachweis gegen Knicken innerhalb der**

$$\beta = 30,0^\circ > 10^\circ = \beta_{\text{lim}} \tag{8.4.1 (6)}$$

**Nachweis gegen Knicken aus der Ringebene**

$$\sigma_{\text{u}\theta, \text{Ed}} = 47,2 \text{ N/mm}^2 < 72,7 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{\text{op, Rd}} \tag{8.4.1 (7)}$$

$$\Rightarrow \text{ausreichend dimensioniert!} \tag{8.49}$$

**6. Kreiszylinder****6.1 Schnittgrößen und Spannungen****6.1.1 Eigengewicht**

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$g$	$\Delta g$	$g$	$G$	$\Sigma G$	$n_x$	$\sigma_x$
		m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN	kN	kN/m	N/mm <sup>2</sup>
top			11,250	0,000	<b>4,0</b>				2,06	2,06	-0,22	<b>-0,05</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	3,33	-0,35	<b>-0,09</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	5,88	-0,62	<b>-0,16</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	8,42	-0,89	<b>-0,22</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	10,15	-1,08	<b>-0,27</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	<b>4,0</b>	0,000	0,00	0,00	1,53	11,68	-1,24	<b>-0,31</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	12,49	-1,33	<b>-0,33</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,108	0,00	1,02	0,00	15,04	-1,60	<b>-0,40</b>

Eigengewicht des Silos:

**G = 15,04 kN**

Lasteinleitung aus Dach an der Stelle:

**z = 11,250 m:**

Eigengewicht:

**G ≤ 2,06 kN****n<sub>x</sub> = -0,218 kN/m**

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

**z = 3,300 m:**

Eigengewicht:

**G = 1,53 kN****n<sub>x</sub> = -0,162 kN/m**



6.1.2 Schüttgut

DIN EN 1991-4;2010-12

6.1.2.1 Fülllasten - Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände

Kammer:	1		
$\min \mu$	<b>0,350</b>	Unterer Grenzwert	
$\max K$	<b>0,800</b>	Oberer Grenzwert	
$\min \varphi_i$	<b>29,2°</b>	Unterer Grenzwert	
$h_c$	7,950		
$p_{hf}(z)$	17,14	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.1)
$p_{wf}(z)$	6,00	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.2)
$p_{vf}(z)$	21,43	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.3)
$p_{ho}$	17,14		kN/m <sup>2</sup> (5.4)
$z_0$	2,679		m (5.5)
$e_f$	0,00		(5.10)
$E$	0,000		(5.10)
$C_{op}$	1,00		Vorgabe
$C_{pf}$	0,192		(5.11)
$p_{hf,u}(z)$	18,79	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.42)
$p_{wf,u}(z)$	7,15	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.43)
$p_{wf}(h_c)$	38,70		kN/m (5.7)
$l \leq$	52,90		kN/m

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$p_{wf1}$	$p_{hf1}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	0		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,373	<b>4,0</b>	2,67	7,01	-1,80	10,51	<b>-0,45</b>	<b>2,63</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,753	<b>4,0</b>	5,39	14,16	-12,39	21,24	<b>-3,10</b>	<b>5,31</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,903	<b>4,0</b>	6,46	16,97	-27,41	25,45	<b>-6,85</b>	<b>6,36</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,949	<b>4,0</b>	6,79	17,83	-38,70	26,74	<b>-9,67</b>	<b>6,68</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -364,7 \text{ kN}$

$N_x = 133,9 \text{ kN}$

$n_x = -14,20 \text{ kN/m}$

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_2 = 0,0 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 0,0 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = 0,0 \text{ kN}$

$N_x = 0,0 \text{ kN}$

$n_x = 0,00 \text{ kN/m}$

**6.1.2.2 Fülllasten - Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände**

Kammer:	1		
$\max \mu$	<b>0,500</b>	Oberer Grenzwert	
$\max K$	<b>0,800</b>	Oberer Grenzwert	
$\min \varphi_i$	<b>29,2°</b>	Unterer Grenzwert	
$h_c$	7,950		
$p_{hf}(z)$	12,00	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.1)
$p_{wf}(z)$	6,00	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.2)
$p_{vf}(z)$	15,00	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.3)
$p_{ho}$	12,00		kN/m <sup>2</sup> (5.4)
$z_0$	1,875		m (5.5)
$e_t$	0,00		(5.10)
$E$	0,000		(5.10)
$C_{op}$	1,00		Vorgabe
$C_{pf}$	0,192		(5.11)
$p_{hf,u}(z)$	13,15	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.42)
$p_{wf,u}(z)$	7,15	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.43)
$p_{wf}(h_c)$	43,65		kN/m (5.7)
$! \leq$	52,90		kN/m

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$p_{wf2}$	$ph_{i2}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,487	<b>4,0</b>	3,48	6,40	-2,42	9,60	<b>-0,60</b>	<b>2,40</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,865	<b>4,0</b>	6,19	11,37	-15,23	17,06	<b>-3,81</b>	<b>4,27</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,964	<b>4,0</b>	6,90	12,68	-31,78	19,03	<b>-7,94</b>	<b>4,76</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,986	<b>4,0</b>	7,05	12,96	-43,65	19,45	<b>-10,91</b>	<b>4,86</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -411,4 \text{ kN}$

$N_x = 87,1 \text{ kN}$

$n_x = -9,25 \text{ kN/m}$

**6.1.2.3 Fülllasten - Mittlere Horizontal- und Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände**

Kammer:	1		
$\mu$	<b>0,418</b>	Mittelwert	
$K$	<b>0,632</b>	Mittelwert	
$\varphi_i$	<b>35,0°</b>	Mittelwert	
$h_c$	7,950		
$p_{hf}(z)$	14,34	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.1)
$p_{wf}(z)$	6,00	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.2)
$p_{vf}(z)$	22,68	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.3)
$p_{ho}$	14,34		kN/m <sup>2</sup> (5.4)
$z_0$	2,835		m (5.5)
$e_t$	0,00		(5.10)
$E$	0,000		(5.10)
$C_{op}$	1,00		Vorgabe
$C_{pf}$	0,192		(5.11)
$p_{hf,u}(z)$	15,72	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.42)
$p_{wf,u}(z)$	7,15	* $Y_J(z)$	kN/m <sup>2</sup> (5.43)
$p_{wf}(h_c)$	37,82		kN/m (5.7)
$! \leq$	52,90		kN/m

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$p_{wfm}$	$ph_{fm}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,357	<b>4,0</b>	2,55	5,61	-1,71	8,41	<b>-0,43</b>	<b>2,10</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,734	<b>4,0</b>	5,25	11,53	-11,95	17,30	<b>-2,99</b>	<b>4,33</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,890	<b>4,0</b>	6,37	13,99	-26,67	20,98	<b>-6,67</b>	<b>5,25</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,939	<b>4,0</b>	6,72	14,77	-37,82	22,16	<b>-9,46</b>	<b>5,54</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -356,5 \text{ kN}$

$N_x = 142,1 \text{ kN}$

$n_x = -15,08 \text{ kN/m}$

**6.1.2.4 Entleerungslasten - Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände**

Kammer:	1		
$\min \mu$	<b>0,350</b>	Unterer Grenzwert	
$\max K$	<b>0,800</b>	Oberer Grenzwert	
$\min \varphi_i$	<b>29,2°</b>	Unterer Grenzwert	
$h_c$	7,950		
$C_s$	1,000		(5.87)
$C_h$	1,150		(5.85)
$C_w$	1,100		(5.86)
$p_{he}(z)$	19,71	* $Y_J(z)$	$\text{kN/m}^2$ (5.18)
$p_{we}(z)$	6,60	* $Y_J(z)$	$\text{kN/m}^2$ (5.19)
$p_{wf}(z)$	21,43	* $Y_J(z)$	$\text{kN/m}^2$ (5.3)
$p_{ho}$	17,14		$\text{kN/m}^2$ (5.4)
$z_0$	2,679		m (13)
$e_0$	0,00		(5.25)
$E$	0,000		(5.31)
$C_{op}$	1,00		
$C_{pe}$	0,385		(5.28) (5.29) (5.30)
$p_{he,u}(z)$	23,51	* $Y_J(z)$	$\text{kN/m}^2$ (5.44)
$p_{we,u}(z)$	9,14	* $Y_J(z)$	$\text{kN/m}^2$ (5.45)
$p_{we}(h_c)$	49,43		$\text{kN/m}$ (5.7)
$l \leq$	52,90		$\text{kN/m}$

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$p_{we1}$	$p_{he1}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	mm	$\text{kN/m}^2$	$\text{kN/m}^2$	$\text{kN/m}$	$\text{kN/m}$	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
top	1		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,373	<b>4,0</b>	3,41	8,77	-2,30	13,15	<b>-0,57</b>	<b>3,29</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,753	<b>4,0</b>	6,89	17,71	-15,83	26,56	<b>-3,96</b>	<b>6,64</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,903	<b>4,0</b>	8,25	21,23	-35,01	31,84	<b>-8,75</b>	<b>7,96</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,949	<b>4,0</b>	8,67	22,30	-49,43	33,45	<b>-12,36</b>	<b>8,36</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -465,9 \text{ kN}$

$N_x = 32,7 \text{ kN}$

$n_x = -3,47 \text{ kN/m}$

**6.1.2.5 Entleerungslasten - Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände**

Kammer:	1	
$\min \mu =$	<b>0,500</b>	Oberer Grenzwert
$\max K =$	<b>0,800</b>	Oberer Grenzwert
$\varphi_l =$	<b>29,2°</b>	Unterer Grenzwert
$h_c =$	7,950	
$C_s =$	1,000	(5.87)
$C_h =$	1,150	(5.85)
$C_w =$	1,100	(5.86)
$p_{hf}(z) =$	13,80	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.18)
$p_{wf}(z) =$	6,60	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.19)
$p_{vf}(z) =$	15,00	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.3)
$p_{ho} =$	12,00	kN/m <sup>2</sup> (5.4)
$z_0 =$	1,875	m (13)
$e_t =$	0,00	(5.25)
$E =$	0,000	(5.31)
$C_{op} =$	1,00	
$C_{pf} =$	0,385	(5.30)
$p_{hf,u}(z) =$	16,45	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.44)
$p_{wf,u}(z) =$	9,14	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.45)
$p_{wf}(h_c) =$	55,76	kN/m (5.7)
$l \leq$	52,90	kN/m

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$p_{we2}$	$p_{he2}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm		kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,487	<b>4,0</b>	4,45	8,01	-3,09	12,01	<b>-0,77</b>	<b>3,00</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,865	<b>4,0</b>	7,90	14,23	-19,45	21,34	<b>-4,86</b>	<b>5,34</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,964	<b>4,0</b>	8,81	15,87	-40,59	23,80	<b>-10,15</b>	<b>5,95</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,986	<b>4,0</b>	9,01	16,22	-52,90	24,33	<b>-13,22</b>	<b>6,08</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -498,6 \text{ kN}$

$N_x = 0,00 \text{ kN}$

$n_x = 0,00 \text{ kN/m}$

**6.1.2.6 Entleerungslasten - Mittlere Horizontal- und Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände**

Kammer:	1	
$\mu =$	<b>0,418</b>	Mittelwert
$K =$	<b>0,632</b>	Mittelwert
$\varphi_i =$	<b>35,0°</b>	Mittelwert
$h_c =$	7,950	
$C_s =$	1,000	(5.87)
$C_h =$	1,150	(5.85)
$C_w =$	1,100	(5.86)
$p_{hf}(z) =$	16,49	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.18)
$p_{wf}(z) =$	6,60	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.19)
$p_{vf}(z) =$	22,68	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.3)
$p_{ho} =$	14,34	kN/m <sup>2</sup> (5.4)
$z_0 =$	2,835	m (13)
$e_t =$	0,00	(5.25)
$E =$	0,000	(5.31)
$C_{op} =$	1,00	
$C_{pf} =$	0,385	(5.30)
$p_{hf,u}(z) =$	19,67	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.44)
$p_{wf,u}(z) =$	9,14	* $Y_J(z)$ kN/m <sup>2</sup> (5.45)
$p_{wf}(h_c) =$	48,32	kN/m (5.7)
$l \leq$	52,90	kN/m

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$Y_J$	$t$	$P_{wem}$	$P_{hem}$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	0,357	<b>4,0</b>	3,26	7,01	-2,19	10,52	<b>-0,55</b>	<b>2,63</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	0,734	<b>4,0</b>	6,70	14,43	-15,26	21,64	<b>-3,82</b>	<b>5,41</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	0,890	<b>4,0</b>	8,13	17,50	-34,07	26,25	<b>-8,52</b>	<b>6,56</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	0,939	<b>4,0</b>	8,59	18,48	-48,32	27,71	<b>-12,08</b>	<b>6,93</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	-52,90	0,00	<b>-13,22</b>	<b>0,00</b>

Lasteinleitung aus Trichter an der Stelle:

$V_1 = 62,3 \text{ m}^3$

Gewicht des Schüttgutes:

$P_f = 498,6 \text{ kN}$

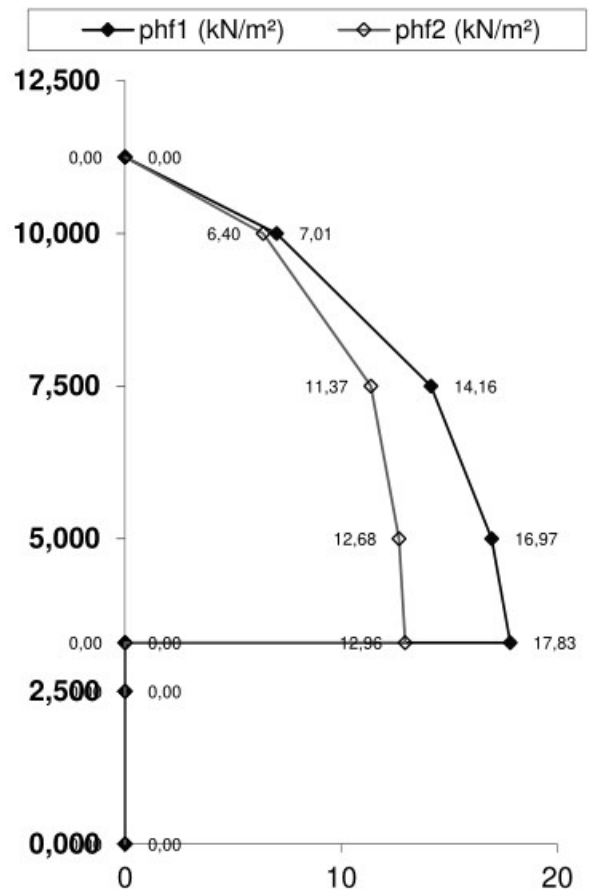
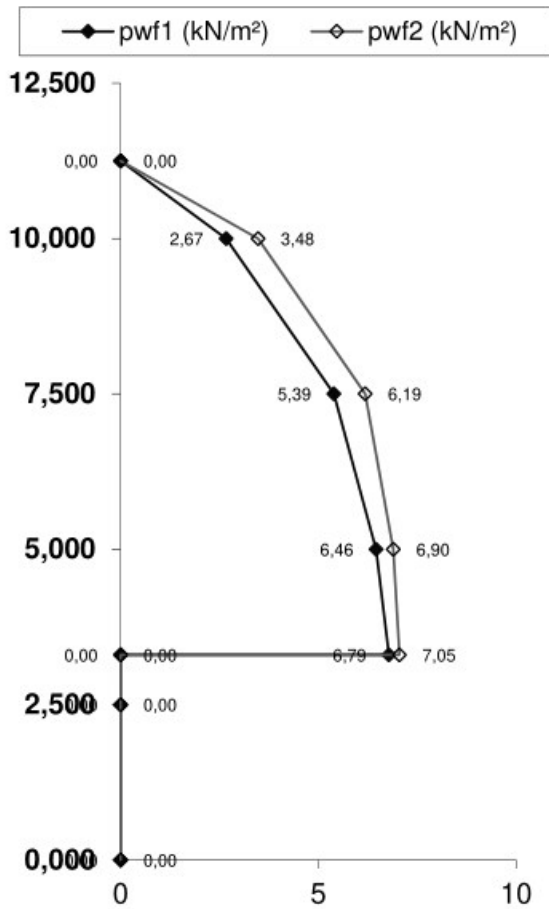
abzgl. aufsumm. Wandreibung:

$- P_{wf} = -455,4 \text{ kN}$

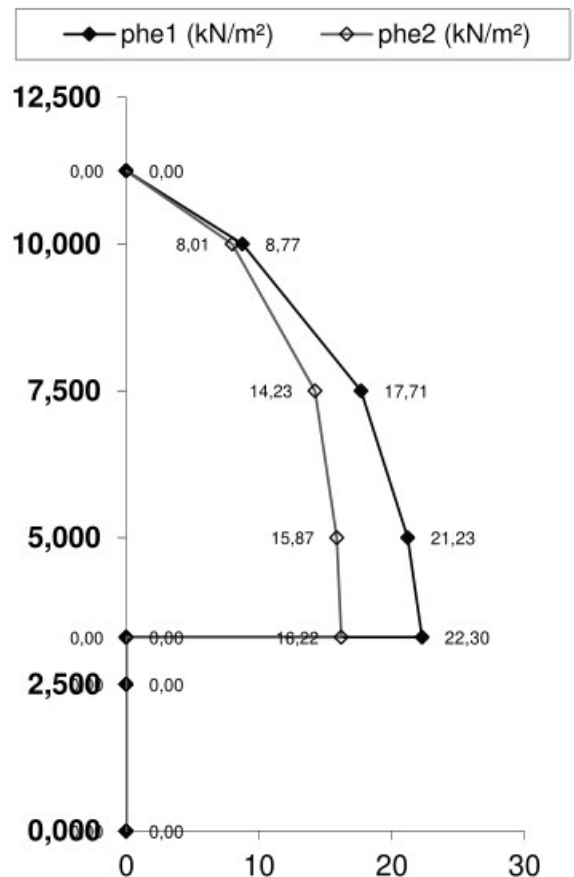
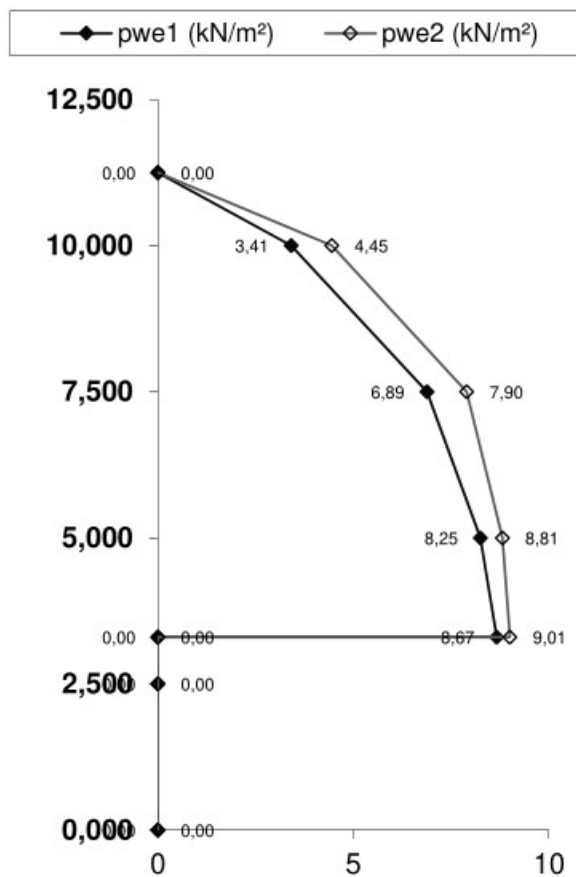
$N_x = 43,20 \text{ kN}$

$n_x = -4,58 \text{ kN/m}$

**Fülllasten**



**Entleerungslasten**



**6.1.3 Flüssigkeitsdruck**

nicht vorhanden

**6.1.4 Unterdruck**

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$p_u$	$P_u$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1	0,000	11,250	0,000	<b>4,0</b>	-0,50	-0,38	-0,38	-0,75	<b>-0,09</b>	<b>-0,19</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	<b>4,0</b>	-0,50	0,00	-0,38	-0,75	<b>-0,09</b>	<b>-0,19</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	<b>4,0</b>	-0,50	0,00	-0,38	-0,75	<b>-0,09</b>	<b>-0,19</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	<b>4,0</b>	-0,50	0,00	-0,38	-0,75	<b>-0,09</b>	<b>-0,19</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	<b>4,0</b>	-0,50	0,38	-0,38	-0,75	<b>-0,09</b>	<b>-0,19</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>



**6.1.5 Überdruck**

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$p_u$	$P_u$	$n_x$	$n_\varphi$	$\sigma_x$	$\sigma_\varphi$
		m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1	0,000	11,250	0,000	<b>4,0</b>	4,50	3,38	3,38	6,75	<b>0,84</b>	<b>1,69</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	<b>4,0</b>	4,50	0,00	3,38	6,75	<b>0,84</b>	<b>1,69</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	<b>4,0</b>	4,50	0,00	3,38	6,75	<b>0,84</b>	<b>1,69</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	<b>4,0</b>	4,50	0,00	3,38	6,75	<b>0,84</b>	<b>1,69</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	<b>4,0</b>	4,50	-3,38	0,00	6,75	<b>0,00</b>	<b>1,69</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

**6.1.6 Nutzlasten / Schneelasten**

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$p$	$P$	$\Sigma P$	$n_x$	$\sigma_x$
		m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN	kN	kN/m	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	<b>4,0</b>	0,00	7,07	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
1	1	1,250	10,000	1,250	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
2	1	2,500	7,500	3,750	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
3	1	2,500	5,000	6,250	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
4	1	1,700	3,300	7,950	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
4	11	0,000	3,300	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
4	0	0,800	2,500	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>
5	0	2,500	0,000	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	7,07	-0,75	<b>-0,19</b>

Nutzlast:

$$P = 7,07 \text{ kN}$$

Lasteinleitung aus Kegeldach an der Stelle:

$$z_{u, \text{Dach}} = 11,250 \text{ m}$$

Nutzlast:

$$P = 7,07 \text{ kN}$$

$$n_x = -0,75 \text{ kN/m}$$

6.1.7 Windlast

NEN-EN 1991-1-4+A1+C2:2011/NB:2011

DIN EN 1991-1-4 / NA:2010-12

**WZ:** 2  
 $V_{ref} = 27,00 \text{ m/s}$   
 $q_{ref} = 0,46 \text{ kN/m}^2$   
 $c_f = 0,70$

**GK:**  
 $z_{min} =$   
 Faktor  
 Expon.  
 Faktor

II	I	II	III	IV	RB	RK
4,00	2,00	4,00	8,00	16,00	7,00	4,00
2,10	2,6	2,1	1,6	1,1	1,7	2,3
0,24	0,19	0,24	0,31	0,40	0,37	0,27
1,70	1,9	1,7	1,5	1,3	1,5	1,8

3

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$q(z_u)$	$w$	$W$	$Q_w$	$M_w$	$n_x$	$\sigma_x$	$\tau$
		m	m	m	mm	kN/m <sup>2</sup>	kN/m	kN	kN/m	kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	4,0	0,888	1,864	0,00	2,12	2,26	-0,32	-0,08	0,11
1	1	1,250	10,000	1,250	4,0	0,853	1,790		4,36	6,32	-0,89	-0,22	0,23
2	1	2,500	7,500	3,750	4,0	0,769	1,615		8,40	22,26	-3,15	-0,79	0,45
3	1	2,500	5,000	6,250	4,0	0,657	1,380		11,85	47,57	-6,73	-1,68	0,63
4	1	1,700	3,300	7,950	4,0	0,598	1,256		13,98	69,52	-9,84	-2,46	0,74
4	11	0,000	3,300	0,000	4,0	0,598	1,256		13,98	69,52	-9,84	-2,46	0,74
4	0	0,800	2,500	0,000	4,0	0,598	1,256		14,99	81,11	-11,47	-2,87	0,80
5	0	2,500	0,000	0,000	4,0	0,598	1,256		18,13	122,50	-17,33	-4,33	0,96

Schnittgrößen am Fuß:

$Q_w = 18,13 \text{ kN}$

$M_w = 122,50 \text{ kNm}$

**Beanspruchung aus rotationssymmetrischem Ersatzwind zum Nachweis der Beulsicherheit in Umfangsrichtung**

$\delta$  nach DIN EN 1993-1-6, D.1.3.2. Gleichungen (D.28) bis (D.30)

$\delta$

		$\Delta h$	$z_u$	$z$	$t$	$q_0$	$\omega / C_{e0}$	$C_{e0} / \omega$	$k_w$	$q_{eq}$	$n_p$	$\sigma_p$
		m	m	m	mm	kN/m				kN/m	kN/m	N/mm <sup>2</sup>
top	1		11,250	0,000	4,0	0,888						
1	1	1,250	10,000	1,250	4,0	0,853	102,634	0,010	0,65	0,55	-0,831	-0,21
2	1	2,500	7,500	3,750	4,0	0,769	102,634	0,010	0,65	0,50	-0,750	-0,19
3	1	2,500	5,000	6,250	4,0	0,657	102,634	0,010	0,65	0,43	-0,640	-0,16
4	1	1,700	3,300	7,950	4,0	0,598	102,634	0,010	0,65	0,39	-0,583	-0,15
4	11	0,000	3,300	0,000	4,0	0,598	102,634	0,010	0,65	0,39	-0,583	-0,15
4	0	0,800	2,500	0,000	4,0	0,598	34,082	0,029	0,65	0,39	-0,583	-0,15
5	0	2,500	0,000	0,000	4,0	0,598	34,082	0,029	0,65	0,39	-0,583	-0,15

**6.1.8 Erdbeben**

nicht vorhanden

**6.1.9 Explosionsdruck**

nicht vorhanden

**6.1.10 Schiefstellung**

nicht erforderlich

**6.2. Spannungsnachweise**

**6.2.1 Definition der Einwirkungskombination**

Einwirkung	Nr.	1	2a	2b	2c	2d	3	4	5	6	7	8	9	10
		Eigeng.	Füllen	Füllen	Entleerer	Entleerer	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.
		6.1.1	6.1.2.1	6.1.2.2	6.1.2.4	6.1.2.5	6.1.3	6.1.4	6.1.5	6.1.6	6.1.7	6.1.8	6.1.9	6.1.10
	Index	$G_k$	$Q_{k,f}$	$Q_{k,f}$	$Q_{k,e}$	$Q_{k,e}$	$Q_{k,FL}$	$Q_{k,pu}$	$Q_{k,p0}$	$Q_{k,p}$	$Q_{k,w}$	$A_{d,E}$	$A_{d,Ex}$	$\phi$
günstig	$\gamma$	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ungünstig	$\gamma$	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	
Kombinationswerte	$\psi_0$		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,7	0,6			
	$\psi_1$		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5			
	$\psi_2$		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0,0			
A.2		Kombinationen für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen												
D	11	1,35			<b>1,35</b>			1,20		1,05	0,90			1,00
D	12	1,35				<b>1,35</b>		1,20		1,05	0,90			1,00
I / S	13	1,35		1,35						<b>1,50</b>	0,90			1,00
I / S	14	1,35		1,35						<b>1,50</b>	0,90			1,00
WF	15	1,35									<b>1,50</b>			1,00
WE	16	0,90									<b>1,50</b>			1,00
PU	17	1,35						<b>1,50</b>						
PÜ	18	1,35							<b>1,50</b>					
	19													
	20													
A.3		Kombinationen für außergewöhnliche Bemessungssituationen												
E	21	1,00	0,90							0,30			<b>1,00</b>	
		Kombinationen für Bemessungssituationen infolge Erdbeben												
SF	31	1,00	0,80							0,30		<b>1,00</b>		
SE	32	1,00								0,30		<b>0,10</b>		



**6.2.4 Beanspruchung durch Schub**

Einwirkung	Nr.	1	2a	2b	2c	2d	3	4	5	6	7	8	9	10	
		Eigeng.	Füllen	Füllen	Entleerer	Entleerer	Flüssigk.	Unterdr.	Überdr.	Nutzlast	Wind	Erdb.	Expl.	Schiefst.	
		6.1.1	6.1.2.1	6.1.2.2	6.1.2.4	6.1.2.5	6.1.3	6.1.4	6.1.5	6.1.6	6.1.7	6.1.8	6.1.9	6.1.10	
Geometrie		Spannungen der Lastfälle													
	Z <sub>d</sub>	t	τ <sub>q,g</sub>	τ <sub>q,k1</sub>	τ <sub>q,k12</sub>	τ <sub>q,k1e1</sub>	τ <sub>q,k1e2</sub>	τ <sub>q,k,FL</sub>	τ <sub>q,k,pu</sub>	τ <sub>q,k,pü</sub>	τ <sub>q,k,p</sub>	τ <sub>q,k,w</sub>	τ <sub>q,d,E</sub>	τ <sub>q,Ex</sub>	τ <sub>q,v</sub>
	m	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	11,250	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,02
1	10,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,08
2	7,500	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,15
3	5,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,22
4	3,300	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00	0,24
4	3,300	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00	0,27
4	2,500	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,27
5	0,000	<b>4,0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00	0,27

	Spannungen der Lastkombinationen													Aus- nutzun ~	extr	f <sub>y,d</sub> /√3
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32		τ <sub>d</sub>	τ <sub>R,d</sub>
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	0,12	0,12	0,12	0,12	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	0,19	42,0
1	0,28	0,28	0,28	0,28	0,42	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,01</b>	0,42	42,0
2	0,55	0,55	0,55	0,55	0,82	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	0,82	42,0
3	0,78	0,78	0,78	0,78	1,16	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,03</b>	1,16	42,0
4	0,91	0,91	0,91	0,91	1,36	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,03</b>	1,36	42,0
4	0,94	0,94	0,94	0,94	1,38	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,03</b>	1,38	42,0
4	0,99	0,99	0,99	0,99	1,46	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,03</b>	1,46	42,0
5	1,14	1,14	1,14	1,14	1,71	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,04</b>	1,71	42,0

**6.2.5 Vergleichspannung**

	Vergleichsspannungen der Lastkombinationen													Aus- nutzun ~	extr	f <sub>y,d</sub>
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32		τ <sub>d</sub>	τ <sub>R,d</sub>
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
top	0,45	0,45	0,48	0,48	0,38	0,37	0,25	2,19	0,00	0,00	0,11	0,11	0,11	<b>0,03</b>	2,19	72,7
1	4,92	4,74	4,00	4,00	0,84	0,83	0,27	2,20	0,00	0,00	2,68	2,39	0,14	<b>0,07</b>	4,92	72,7
2	13,30	12,82	10,51	10,51	2,01	1,96	0,32	2,20	0,00	0,00	6,79	6,06	0,21	<b>0,18</b>	13,30	72,7
3	21,54	21,17	17,29	17,29	3,70	3,62	0,39	2,21	0,00	0,00	10,55	9,40	0,28	<b>0,30</b>	21,54	72,7
4	27,41	26,25	22,22	22,22	5,15	5,05	0,44	2,73	0,00	0,00	13,12	11,69	0,33	<b>0,38</b>	27,41	72,7
4	21,32	21,32	21,40	21,40	5,22	5,10	0,42	0,42	0,00	0,00	12,27	10,95	0,37	<b>0,29</b>	21,40	72,7
4	21,87	21,87	21,95	21,95	5,99	5,86	0,45	0,45	0,00	0,00	12,29	10,97	0,39	<b>0,30</b>	21,95	72,7
5	23,74	23,74	23,82	23,82	8,69	8,52	0,54	0,54	0,00	0,00	12,36	11,03	0,46	<b>0,33</b>	23,82	72,7

**6.3 Beuluntersuchung nach EN 1993-1-6**

DIN EN 1999-1-5:2017-03 (Aluminium)

Vorwerte:

$I$	=	11250 mm	$r$	=	1500 mm
$E$	=	70000 N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_F$	=	80,0 N/mm <sup>2</sup>
$E/\sigma_F$	=	875,0 = 875,0 =		=	210000/240 (St37)
$E_{\text{fiktiv}}$	=	70000 N/mm <sup>2</sup>			
$\sigma_{F,\text{fiktiv}}$	=	80,0 N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_F/\sqrt{3}$	=	46,2 N/mm <sup>2</sup>

**6.3.1 Druckbeanspruchung in Axialrichtung**  
gemäß EN 1993-1-6, D.1.2

**Bereich Nutzhöhe 1**

Randbedingungen gemäß DIN EN 1993-1-6:2017-07, Bild 8.1

$l$	=	7,950 m	$\min t$	=	4,0 mm	<b>BC2f-BC2f</b>
$l/r$	=	5,300	$r/t$	=	375,0	$\omega = 102,63$ (D.1)
	=>	mittellanger Zylinder				
$C_x$	=	1,00				(D.4)

**Bereich Standzarge**

Randbedingungen gemäß DIN EN 1993-1-6:2017-07, Bild 8.1

$l$	=	3,300 m	$\min t$	=	4,000 mm	<b>BC2f-BC1r</b>
$l/r$	=	2,200	$r/t$	=	375,0	$\omega = 42,603$ (D.1)
	=>	mittellanger Zylinder				
$C_x$	=	1,00				(D.4)

**DIN EN 1999-1-5:2017-03 (Aluminium) - Meridianbeulen** **23**

$E$	=	70000 N/mm <sup>2</sup>	
$f_0$	=	80 N/mm <sup>2</sup>	
$\sigma_{x,Rcr}$	=	-> kritische Beulspannung	(A.3)
Klasse	=	3 Toleranzklasse EN 1090 - 3: excellent	Tab. A.3
$Q$	=	40 Toleranzparameter	Tab. A.3
Klasse	=	B Beulklasse	Tab. A.4
$\lambda_{x0}$	=	0,10 Schlankheitsparameter	Tab. A.4
$\mu_x$	=	0,20 Legierungsfaktor	Tab. A.4
$\Delta W_k$	=	-> charakteristische Imperfektionsamplitude	SK2015
$\alpha_x$	=	-> elastischer Imperfektionsfaktor	(A.6)
$\phi_x$	=	-> Faktor in Gleichung (6.14)	(6.15)
$\chi_{x,\text{perf}}$	=	-> Abminderungsfaktor für perfekte Schale	(6.14)
$\chi_x$	=	1,0 Abminderungsfaktor für WEZ	S. 31
$\chi$	=	-> Produkt aller Abminderungsfaktoren	(6.9)
$\gamma_{M1}$	=	1,1 Teilsicherheitsbeiwert	2.1 (3)
$\sigma_{x,Rd}$	=	-> Bemessungswert der Beultragfähigkeit	(6.9)

		$\Delta h$	$z_u$	$t$	$\sigma_{x,cr}$	$\lambda_{x0}$	$\Delta W_k$	$\alpha_x$	$\phi_x$	$\chi_{x,\text{perf}}$	$P_{x,w}$	$\chi_x$	$\sigma_{x,R,d}$	$\sigma_{x,d}$	Auslast.
		m	m	mm	(A.3) N/mm <sup>2</sup>	(6.16) -	SK2016 mm	(A.6) -	(6.15) -	(6.14) -	S.31 -	(6.9) -	(6.9) N/mm <sup>2</sup>	(6.9) N/mm <sup>2</sup>	
top	1		11,250	4,0											
1	1	1,250	10,000	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-1,69	0,05
2	1	2,500	7,500	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-7,94	0,25
3	1	2,500	5,000	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-16,22	0,52
4	1	1,700	3,300	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-21,38	0,68
4	11	0,000	3,300	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-21,41	0,68
4	0	0,800	2,500	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-21,95	0,70
5	0	2,500	0,000	4,0	112,9	0,84	1,70	0,569	0,928	0,758	1,000	0,431	31,34	-23,81	0,76



**6.3.2 Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung**  
gemäß EN 1993-1-6, D.1.3

**Bereich Nutzhöhe 1**

Randbedingungen gemäß EN 1993-1-6 Bild 8.1

$l =$	7,950 m													<b>BC2f-BC2f</b>
$l_a =$	3,975 m	D. 2.3.1		$t_a$	=	4,000 mm								(D.58)
$l_b =$	1,988 m	(D.56)		$t_b$	=	4,000 mm								(D.59)
$l_c =$	1,988 m	(D.57)		$t_c$	=	4,000 mm								(D.60)
$l_a/l =$	0,50			$t^*$	=	4,000 mm								
$t_b/t_a =$	1,000			$t_c/t_a$	=	1,000								
$\kappa =$	<b>0,500</b>	Bild D.6												
$l_{eff} =$	7,950 m													
$l/r =$	5,300			$r/t =$	=	375,0								(55)
$\omega =$	102,63	(D.19)		$1,63 r/t =$	=	611,3								
$C_{\Theta} =$	1,000	Tab. D.3		$\omega/C_{\Theta S} =$	=	102,63								
$\Rightarrow$ Mittellanger Zylinder														
$\sigma_{\Theta,cr} =$	=	1,673 N/mm <sup>2</sup>												(D.62, 65)

**Bereich Standzarge**

Randbedingungen gemäß EN 1993-1-6 Bild 8.1

$l =$	3,300 m													<b>BC2f-BC2f</b>
$l_a =$	1,650 m	D. 2.3.1		$t_a$	=	4,000 mm								(D.58)
$l_b =$	0,825 m	(D.56)		$t_b$	=	4,000 mm								(D.59)
$l_c =$	0,825 m	(D.57)		$t_c$	=	4,000 mm								(D.60)
$l_a/l =$	0,21			$t^*$	=	4,000 mm								
$t_b/t_a =$	1,000			$t_c/t_a$	=	1,000								
$\kappa =$	<b>0,500</b>	Bild D.6												
$l_{eff} =$	3,30													
$l/r =$	2,200			$r/t =$	=	375,0								(55)
$\omega =$	42,60	(D.19)		$1,63 r/t =$	=	611,3								
$C_{\Theta} =$	1,250	Tab. D.3		$\omega/C_{\Theta S} =$	=	34,08								
$\Rightarrow$ Mittellanger Zylinder														
$\sigma_{\Theta,cr} =$	=	5,0 N/mm <sup>2</sup>												(D.62, 65)

**DIN EN 1999-1-5:2017-03 (Aluminium) - Umfangsbeulen** **21**

$\sigma_{\Theta,cr}$	->	kritische Beulspannung in Umfangsrichtung	(A.10,11)
$\lambda_{\Theta}$	->	Schlankheitsparameter	(6.17)
$\alpha_{\Theta}$	=	s. Tab. elastischer Imperfektionsfaktor	(A.12)
Klasse	3	Toleranzklasse 3: excellent	Tab. A.7
$\alpha_{\Theta,ref}$	=	0,75 Bezugs-Imperfektionsfaktor	Tab. A.7
Klasse	B	Beulklasse des Werkstoffs	Tab. A.8
$\lambda_{\Theta 0}$	=	0,20 Schlankheitsparameter für die Quetschgrenze	Tab. A.8
$\mu_{\Theta}$	=	0,70 Legierungsfaktor	Tab. A.8
$\phi_{\Theta}$	->	Faktor in Gleichung (6.14)	(6.15)
$\chi_{\Theta,perf}$	->	Abminderungsfaktor für perfekte Schale	(6.14)
$\rho_{\Theta,w}$	=	1,00 Abminderungsfaktor für WEZ	S. 31
$\chi_{\Omega}$	->	Abminderungsfaktor	(6.14)
$\gamma_{M1}$	=	1,10 Teilsicherheitsbeiwert	2.1 (3)
$\sigma_{\Theta,Rd}$	->	Bemessungswert der Beulspannung	(6.10)

		$\Delta h$	$z_u$	$t$	$\sigma_{\Theta,cr}$	$\lambda_{\Theta}$	$\alpha_{\Theta}$	$\phi_{\Theta}$	$\chi_{\Theta,perf}$	$\rho_{\Theta,w}$	$\chi_{\Theta}$	$\sigma_{\Theta,Rd}$	$\sigma_{\Theta,d}$	<b>Auslast.</b>
					(A.10/11) N/mm <sup>2</sup>	(6.17)	(A.12)	(6.15)	(6.14)	S.31	(6.10)	(6.10)	N/mm <sup>2</sup>	
top	1		11,250	<b>4,0</b>										
1	1	1,250	10,000	<b>4,0</b>	1,673	6,915	0,626	26,756	0,019	1,000	0,012	0,866	<b>-0,312</b>	<b>0,36</b>
2	1	2,500	7,500	<b>4,0</b>	1,673	6,915	0,626	26,756	0,019	1,000	0,012	0,866	<b>-0,281</b>	<b>0,32</b>
3	1	2,500	5,000	<b>4,0</b>	1,673	6,915	0,626	26,756	0,019	1,000	0,012	0,866	<b>-0,281</b>	<b>0,32</b>
4	1	1,700	3,300	<b>4,0</b>	1,673	6,915	0,626	26,756	0,019	1,000	0,012	0,866	<b>-0,281</b>	<b>0,32</b>
4	11	0,000	3,300	<b>4,0</b>	5,039	3,985	0,748	9,763	0,054	1,000	0,040	2,914	<b>-0,219</b>	<b>0,08</b>
4	0	0,800	2,500	<b>4,0</b>	5,039	3,985	0,748	9,763	0,054	1,000	0,040	2,914	<b>-0,219</b>	<b>0,08</b>
5	0	2,500	0,000	<b>4,0</b>	5,039	3,985	0,748	9,763	0,054	1,000	0,040	2,914	<b>-0,219</b>	<b>0,08</b>

**6.3.3 Beanspruchung durch Schub**

gemäß EN 1993-1-6, D.1.4  
Die idealen Schubbeulspannungen werden für jedem Zylinderschuss an einem gedachten Ersatzzylinder mit der konstanten Wanddicke entsprechend der jeweiligen Wanddicke des Schusses ermittelt.

**Bereich Nutzhöhe 1**

Randbedingungen gemäß EN 1993-1-6 Bild 8.1

l	=	7,950 m	$\min t$	=	4,000 mm	<b>BC2f-BC2f</b>
l/r	=	5,300	r/t	=	375,0	
$\omega$	=	102,63 (D.31)	8,7 r/t	=	3262,5	(D.33)
=> Mittellanger Zylinder						
$\tau_{x\theta,Rcr}$	=	13,82				(D.32, 37)
$C_{\tau}$	=	1,00				(D.34, 36, 38)

**Bereich Standzarge**

Randbedingungen gemäß EN 1993-1-6 Bild 8.1

l	=	3,300 m	$\min t$	=	4,000 mm	<b>BC2f-BC2f</b>
l/r	=	2,200	r/t	=	375,0	
$\omega$	=	42,60 (D.31)	8,7 r/t	=	3262,5	(D.33)
=> Mittellanger Zylinder						
$\tau_{x\theta,Rcr}$	=	21,45				(D.32, 37)
$C_{\tau}$	=	1,00				(D.34, 36, 38)

**DIN EN 1999-1-5:2017-03 (Aluminium) - Schubbeulen 21**

$\tau_{cr}$	->	durch Schub erzeugte kritische Beulspannung	(A.18)
$\lambda_{\tau}$	->	Schlankheitsparameter	(6.18)
Klasse	3	Toleranzklasse 3: excellent	Tab. A.10
$\alpha_{\tau,ref}$	=	0,75 Faktor	Tab. A.10
Klasse	B	Beulklasse des Werkstoffs	Tab. A.11
$\lambda_{\tau,0}$	=	0,40 Werte für Schub	Tab. A.11
$\mu_{\tau}$	=	0,40 Werte für Schub	Tab. A.11
$\alpha_{\tau}$	->	Schubimperfektionsfaktor	(A.19)
$\rho_{\tau,w}$	=	1,0 Abminderungsfaktor für die Wärmeeinflusszone	S. 31
$\phi_{\tau}$	->	Beiwert für Gleichung (6.14)	(6.15)
$\chi_{\tau,perf}$	->	Abminderungsfaktor für perfekte Schale	(6.14)
$\chi_{\tau}$	->	Produkt aller Abminderungsfaktoren	(6.9)
$\gamma_{M1}$	=	1,1 Teilsicherheitsbeiwert	2.1 (3)
$\tau_{Rd}$	s. Tab.	Bemessungswert der Beulspannung	(6.11)

		$\Delta h$	$z_u$	t	$\tau_{cr}$	$\lambda_{\tau}$	$\alpha_{\tau}$	$\phi_{\tau}$	$\chi_{\tau,perf}$	$\rho_{\tau,w}$	$\chi_{\tau}$	$\tau_{x\theta,Rd}$		
		m	m	mm	(A.18)	(6.17)	(A.19)	(6.15)	(6.14)	S.31	(6.11)	(6.11)		<b>Auslast.</b>
					N/mm <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	N/mm <sup>2</sup>		
top	1		11,250	<b>4,0</b>										
1	1	1,250	10,000	<b>4,0</b>	13,819	1,828	0,000	0,887	2,885	0,195	1,000	0,173	7,28	<b>0,19 0,03</b>
2	1	2,500	7,500	<b>4,0</b>	13,819	1,828	0,000	0,887	2,885	0,195	1,000	0,173	7,28	<b>0,42 0,06</b>
3	1	2,500	5,000	<b>4,0</b>	13,819	1,828	0,000	0,887	2,885	0,195	1,000	0,173	7,28	<b>0,82 0,11</b>
4	1	1,700	3,300	<b>4,0</b>	13,819	1,828	0,000	0,887	2,885	0,195	1,000	0,173	7,28	<b>1,16 0,16</b>
4	11	0,000	3,300	<b>4,0</b>	13,819	1,828	0,000	0,887	2,885	0,195	1,000	0,173	7,28	<b>1,36 0,19</b>
4	0	0,800	2,500	<b>4,0</b>	21,449	1,467	0,000	0,913	2,110	0,276	1,000	0,252	10,57	<b>1,38 0,13</b>
5	0	2,500	0,000	<b>4,0</b>	21,449	1,467	0,000	0,913	2,110	0,276	1,000	0,252	10,57	<b>1,46 0,14</b>

**6.3.4 Kombinierte Beanspruchung**

Bei gleichzeitiger Wirkung von Axialdruck-, Umfangsdruck- und Schubspannungen ist außer den Einzelnachweisen ein Nachweis der Interaktionsbedingung nach DIN EN 1993-1-6, D.1.6 zu führen.

		Axialdruckspannungen													
		$\sigma_{x,d} / \sigma_{xS,r,d}$													
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32	
top	1														
1	1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	
2	1	0,21	0,25	0,21	0,21	0,05	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,10	0,09	0,01	
3	1	0,46	0,52	0,42	0,42	0,10	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,21	0,18	0,01	
4	1	0,64	0,68	0,58	0,58	0,15	0,15	0,02	0,01	0,00	0,00	0,29	0,26	0,01	
4	11	0,68	0,68	0,68	0,68	0,15	0,15	0,01	0,01	0,00	0,00	0,39	0,35	0,01	
4	0	0,70	0,70	0,70	0,70	0,18	0,17	0,01	0,01	0,00	0,00	0,39	0,35	0,01	
5	0	0,76	0,76	0,76	0,76	0,26	0,26	0,02	0,02	0,00	0,00	0,39	0,35	0,01	

		Umfangsdruckspannungen													
		$\sigma_{\varphi,d} / \sigma_{\varphi S,r,d}$													
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32	
top	1														
1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,36	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,28	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	11	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

		Schubspannungen													
		$\tau_{d} / \tau_{S,r,d}$													
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32	
top	1														
1	1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	11	0,13	0,13	0,13	0,13	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5	0	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

		Interaktionsbedingung														Aus- nutzung
		$(\sigma_{x,Ed}/\sigma_{x,Rd})^{k\alpha} + k_{\beta} (\sigma_{x,Ed}/\sigma_{x,Rd}) (\sigma_{\varphi,Ed}/\sigma_{\varphi,Rd}) + (\sigma_{\varphi,Ed}/\sigma_{\varphi,Rd})^{k\beta} + (\tau_{x\varphi,Ed}/\tau_{x\varphi,Rd})^{k\gamma}$														
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	31	32		
top	1															
1	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,28	0,28	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,28</b>	
2	1	0,10	0,12	0,09	0,09	0,27	0,27	0,24	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	<b>0,27</b>	
3	1	0,31	0,37	0,28	0,28	0,26	0,26	0,24	0,00	0,00	0,00	0,08	0,07	0,00	<b>0,37</b>	
4	1	0,53	0,57	0,45	0,45	0,27	0,27	0,24	0,00	0,00	0,00	0,14	0,12	0,00	<b>0,57</b>	
4	11	0,59	0,59	0,59	0,59	0,14	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,19	0,00	<b>0,59</b>	
4	0	0,60	0,60	0,60	0,60	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,19	0,00	<b>0,60</b>	
5	0	0,68	0,68	0,68	0,68	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,19	0,00	<b>0,68</b>	

**7. Nachweis der Türöffnung in der Standzarge**

Türöffnung:

$b_T = 850,0 \text{ mm}$   
 $h_T = 1800,0 \text{ mm}$

Maximale Druckspannungen am Fuß:

$\sigma_{x,d} = -23,81 \text{ N/mm}^2$   
 $\sigma_{x,d}/\sigma_{xS,R,d} = 0,76$

Maximale Normalkraft am Fuß:

$t = 4,0 \text{ mm}$   
 $n_{x,d} = -95,23 \text{ kN/m}$

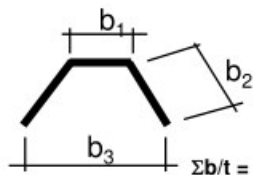
Nachweis der Verstärkung:

nach Silo-Handbuch, [redacted] Seite 310:

Mindestquerschnitt der seitlichen Verstärkung:

$erf A_v = 1291,5 \text{ mm}^2$

gew.: gekantetes Trapezprofil



$b_1 = 50,0 \text{ mm}$   
 $b_2 = 180,0 \text{ mm}$   
 $b_3 = 260,0 \text{ mm}$   
 $t = 4,0 \text{ mm}$   
 $\alpha = 30,3^\circ$

$\Sigma b/t = 466,8 \times 4,0 \text{ mm}$

$A_v = 1867,1 \text{ mm}^2$

Streifen neben der Tür einschl. Verstärkung:

$b_S = 250,0 \text{ mm}$   
 $t_S = 4,0 \text{ mm}$

Querschnittswerte des Streifens mit Verstärkung

Anz.	b [mm]	d [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	e [mm]	A e [mm <sup>3</sup> ]	A e <sup>2</sup> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>e</sub> [mm <sup>4</sup> ]
1	250	4,0	1000,00	2,00	2000,0	4000,0	1333,3
2	4,63	152,0251	1408,00	80,01	112657,7	9014026,0	2711764,2
1	50	4	200,00	158,03	31605,0	4994385,6	266,7
			<b>2608,00</b>		<b>146262,7</b>	<b>14012411,6</b>	<b>2713364,2</b>

$e = 56,08 \text{ mm}$

$A_{ges} = 2608,00 \text{ mm}^2$

$I_{ges} = 8523026,2 \text{ mm}^4$

Normaldruckkraft im Streifen mit Verstärkung:

$$\begin{aligned} N_{,d} &= n_{x,d} * (b_s + b_T/2) \\ &= -64,28 \text{ kN} \end{aligned}$$

Knicknachweis:

$$\begin{aligned} I_y &= 852,30 \text{ cm}^4 \\ A &= 26,08 \text{ cm}^2 \\ i_y &= 5,72 \text{ cm} \\ N_{pl,d} &= 189,67 \text{ kN} \\ S_{ky} &= h_T \\ &= 180,00 \text{ cm} \\ \lambda_{ky} &= 31,49 \\ \lambda_a &= 92,93 \\ \lambda_{ky}^- &= 0,339 \\ &=> \kappa = 0,950 \end{aligned}$$

EN AW-5754-O/H111

Knickspannungskurve b:

$$N_{,d}/(\kappa * N_{pl,d}) = 0,357 < 1$$

Länge der Steifen:

Die Steifen sind zur allmählichen Lasteinleitung um ca. die halbe Türbreite nach oben zu verlängern.

$$\begin{aligned} b_T/2 &= 425 \text{ mm} \\ h_T &= 1800,0 \text{ mm} \\ h_A &=< 250,0 \text{ mm} \\ \text{Länge} &>= 2475,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

**8. Verankerung am Fuß mit Halfen-Ankerschienen**

Maßgebende Schnittgrößen am Fuß:

	V	Q	M
	kN	kN	kNm
Eigengewicht	15,04		
Füllung	498,56		
Dach	7,07		
Wind		18,13	122,50

Nachweis der Ankerschrauben:

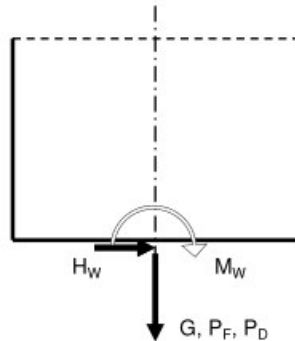
**Halfen Ankerschienen Typ HTA-Q 78/48; L  $\geq$  250 mm  
mit zugehörigen HALFEN-Spezialschrauben Typ 72/48 M20-8.8**

Die Nachweise der HALFEN-Ankerschienen mit den zugehörigen Schrauben und deren Verankerung in die Betongrundplatten sowie die Nachweise zu den Betongrundplatten erfolgen in einer separaten statischen Berechnung.

Detail des Fußpunktes siehe Zeichnung der Fa. Eichholz bzw. statische Berechnung der Betonplatte.

**9. Lastangaben**

Die Lastangaben gelten für ein Silo ohne Sicherheitsbeiwerte:



Eigengewicht des Silos:	G =	15,0 kN
Verkehrslast aus Füllung:	P <sub>F</sub> =	498,6 kN
Verkehrslast aus Dach:	P <sub>D</sub> =	7,1 kN
Horizontallast aus Wind:	H <sub>W</sub> =	+/- 18,1 kN
Moment am Fuß aus Wind:	M <sub>W</sub> =	+/- 122,5 kNm

**10. Grundplatte (Bodenplatte)**

siehe statische Berechnung der Bodenplatte,

$$a / b / t = 2 \times 3500 / 1750 / 350 \text{ mm}$$

