

Kunststoffprüfstelle Franken
Ingenieurbüro Franken
Dipl.- Ing. Helmuth W. Franken Beratender Ingenieur BYIK , VBI
Kunststoffprüfung - Bauteilprüfung - Gutachten - Beratung - Baustatik

Auftrag - Nr.: 03/05

STATISCHE BERECHNUNG

Für : Standzargenbehälter
aus textilglasverstärkten ungesättigten Phenacrylatharzen (GF-PHA)
Typ: 12 / 40 / 80 - Z - F

Füllmedium : Abwasser mit Fluoriden

Auftraggeber : M.I.P. NV
Mertens Industrial Products
Vaart 20
B - 2310 Rijkevorsel

Seiten : 34

Anlagen : 7

Erkelenz , aufgestellt im Januar 2005

Diese Statische Berechnung darf nur ungekürzt an Dritte weitergegeben werden

Gewerbestraße Süd , D - 41812 Erkelenz
Telefon : (02431) 73651
Telefax : (02431) 73652
Kreissparkasse Heinsberg (BLZ 312 512 20) 700 492

Röckertstraße 19 , D - 97271 Kleinrinderfeld
Telefon : (09366) 8312

1 Allgemeines

Für einen Standzargenbehälter aus textilglasverstärkten ungesättigten Phenacrylatharzen wird der Standsicherheitsnachweis erbracht.

Die Berechnung erfolgt für den Typ: 12 / 40 / 80 -Z - F

Volumen: 80,0 m³

Durchmesser: 4,000 m

Wichte des Füllguts: bis 12 kN/m³

Der zylindrische Teil wird als Wickellaminat, Dach und Boden als Wirrfaserlaminat hergestellt.

Abmessungen und Betriebsdaten siehe Abschnitt 4 und Anlagen.

Das tragende Laminat wird auf der Außenseite von einer Fein- bzw. Vliesschicht und auf der medienbeanspruchten Seite von einer Chemieschutzschicht geschützt.

Die Behälter können im Freien und in Reihen aufgestellt werden.

Aufnahme und Weiterleitung der Lasten aus den GF-UP-Bauteilen sind

nicht Gegenstand dieser Berechnung.

Es wird eine volle Auflagerung der Standzarge am gesamten Umfang vorausgesetzt.

2 Unterlagen

2.1 DIN 18820 Teil 1 bis 4

Lamine aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA)

2.2 Vorläufige Richtlinien für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung, Bemessung und Güteüberwachung von zulassungspflichtigen Bauteilen aus glasfaserverstärktem ungesättigtem Polyesterharz -Deutsches Institut für Bautechnik-

2.3 Stand der Beratungen und Erkenntnisse im Sachverständigenausschuß (SVA) "Kunststoffe" des Deutschen Institut für Bautechnik

2.4 DAST-Richtlinie 013 (Juli 1980)

Beulsicherheitsnachweis für Schalen

2.5 H.W. Franken "GFK-Silos (Silos aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyesterharzen GF-UP)" Silo-Handbuch, Abschnitt 7.4

Verlag Ernst und Sohn, Berlin

2.6 Berechnungsempfehlung für stehende Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (II 4-40-B1, Ausgabe Februar 2000) -Deutsches Institut für Bautechnik-

2.7 Medienlisten 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff Ausgabe Januar 2004 - Deutsches Institut für Bautechnik -

2.8 AD - Merkblatt N1

2.9 Angaben der Firma MIP

2.10 Angaben der DSM Composite Resin.

3 Baustoffe

siehe Anlagen

Die Kennwerte für die GF-PHA-Lamine sind DIN 18820 entnommen.

Wickellaminat: DIN 18820 - GF -PHA5 - FM4 -n- 35B - CSS-5

Wirrfaserlaminat: DIN 18820 - GF - PHA5 - M3 -n- 35B - CSS-5

Für die Traglamine und die Chemieschutzschicht ist nach 2.10 das Harz Atlac 590 der DSM Composite Resins zu verwenden.

Alle Lamine sind entsprechend zu tempern.

3.1 Allgemeine Kennwerte

Lochleibungsfestigkeit : 150 N/mm²

Schubfestigkeit : 50 N/mm²

Interlaminare Scherfestigkeit : 8 N/mm²

Interlaminare Zugfestigkeit : 4 N/mm²

Dichte

Wickellaminat : 1,8 g/cm³

Wirrfaserlaminat : 1,5

Wärmedehnzahl

Wickellaminat
parallel : 15
senkrecht : 30 10⁻⁶ K⁻¹

Wirrfaserlaminat : 30

3.2 Abminderungsbeiwerte, Vergrößerungsfaktoren

Alle Lamine: $C_u := 1.4$ $K_u := 1.4$

$C_\theta := 1.15$ $K_\theta := 1.15$

Betriebstemperatur (mittlere) bis 80°C
bei Verwendung des Harzes
Atlac 590, DSM Composite Resin
ausreichend

3.2.1 Wickellamine

l : Längsrichtung

u : Umfangsrichtung

$C_{tu} := 1.50$ $K_{tu} := 1.45$ $C_{su} := 1.30$ $K_{su} := 1.30$

$C_{tl} := 1.80$ $K_{tl} := 1.70$ $C_{sl} := 1.50$ $K_{sl} := 1.45$

3.2.2 Wirrfaserlamine

$C_t := 1.7$ $K_t := 1.6$ $C_s := 1.5$ $K_s := 1.40$

Für die Bemessung des Behälters wird gegen Bruchversagen ein globaler Sicherheitsbeiwert angesetzt:

$S := 2.0$

4 Abmessungen und Betriebsdaten**4.1 Abmessungen (Wanddicken siehe Berechnung und Anlagen)****4.1.1 Zylinder**Innendurchmesser: $D := 4000$ mmRadius: $r := \frac{D}{2}$ $r = 2000$ mmzylindrische Länge: $H_z := 5400$ mmVolumen: $V_z := \pi \cdot r^2 \cdot H_z \cdot 10^{-9}$ $V_z = 67.858$ m³**4.1.2 Dach**

Form: ähnlich Klöpperboden

Innenradius: $R_D := D$ $R_D = 4000$ mmKrempenradius: $r_D := 0.1 \cdot D$ $r_D = 400$ mmHöhe: $H_D := 810$ $H_D = 810$ mmVolumen: $V_D := 0.775 \cdot r^3 \cdot 10^{-9}$ $V_D = 6.2$ m³**4.1.3 Boden**

Form: ähnlich Klöpperboden

Innenradius: $R_B := D$ $R_B = 4000$ mmKrempenradius: $r_B := 0.1 \cdot D$ $r_B = 400$ mmHöhe: $H_B := 810$ $H_B = 810$ mmVolumen: $V_B := 0.775 \cdot r^3 \cdot 10^{-9}$ $V_B = 6.2$ m³**4.1.4 Höhe der Zarge**maximal: $H_{Zar} := 1465$ mm**4.1.5 Gesamthöhe**

ohne Stutzen etc auf dem Dach

 $H_G := H_z + H_D + H_{Zar}$ $H_G = 7675$ mm**4.1.6 Gesamtvolumen** $V_G := V_z + V_D + V_B$ $V_G = 80.258$ m³

4.2 Betriebsdaten

planmäßige Überdrücke

planmäßig treten keine Überdrücke auf

ständig wirkend:

$$p_{\text{üb}} := 0$$

bar

$$p_{\text{ü}} := p_{\text{üb}} \cdot 100$$

$$p_{\text{ü}} = 0$$

kN/m²

nicht dauernd wirkend: (bis 3 Monate)

$$p_{\text{ümb}} := 0$$

bar

Differenz $p_{\text{üm}} := (p_{\text{ümb}} - p_{\text{üb}}) \cdot 100$

$$p_{\text{üm}} = 0$$

kN/m²

kurzzeitig wirkend: rechnerisch beim Befüllen

$$p_{\text{ükb}} := 0.02$$

bar

Differenz $p_{\text{ük}} := (p_{\text{ükb}} - p_{\text{ümb}}) \cdot 100$

$$p_{\text{ük}} = 2$$

kN/m²

planmäßige Unterdrücke:

planmäßig treten keine Unterdrücke auf

ständig wirkend:

$$p_{\text{ub}} := 0$$

bar

$$p_{\text{u}} := p_{\text{ub}} \cdot 100$$

$$p_{\text{u}} = 0$$

kN/m²

nicht dauernd wirkend: (bis 3 Monate)

$$p_{\text{umb}} := 0$$

bar

Differenz $p_{\text{um}} := (p_{\text{umb}} - p_{\text{ub}}) \cdot 100$

$$p_{\text{um}} = 0$$

kN/m²

kurzzeitig wirkend: rechnerisch beim Entleeren

$$p_{\text{ukb}} := 0.01$$

bar

$$p_{\text{uk}} := p_{\text{ukb}} \cdot 100$$

$$p_{\text{uk}} = 1$$

kN/m²

Betriebstemperatur: (mittlere) bis

$$T := 80$$

°C

kurzzeitig beim Befüllen bis

$$T_k := 85$$

°C

Füllgut: Abwasser mit Fluoriden
Flüssigkeiten mit erheblichem Einfluß
auf GFK- Lamine
(siehe 2.7 Medienliste 40-2.1.2)
ausgenommen sind Medien der Gruppe IV
sowie Schwefelsäure.

$$C_u = 1.4$$

$$K_u = 1.4$$

Wichte: bis $\gamma_F := 12$

$$\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Rauminhalt bis h_F

$$V := 76$$

m³

max. Füllhöhe: $h_{Fz} := \frac{V - V_B}{\pi \cdot r^2} \cdot 10^9$

$$h_{Fz} = 5555$$

mm

$$h_F := (h_{Fz} + H_B) \cdot 10^{-3}$$

$$h_F = 6.365$$

m

Last des Füllgutes: $G_F := \gamma_F \cdot V$

$$G_F = 912$$

kN

Gesamteigenlast:

$$G_E := 35$$

kN

Gesamtlast:

$$G_G := G_F + G_E$$

$$G_G = 947$$

kN

Aufstellungsort:

Im Freien oder im Innern eines Gebäudes

5 Stabilitätsuntersuchung

Die Beulberechnung wird entsprechend DAST - Richtlinie 013 "Beulsicherheitsnachweise für Schalen" durchgeführt.

5.1 Dach

Form: ähnlich Klöpperboden

$$r = 2000 \quad R_D = 4000 \quad t_D := 7.0 \quad c_L := 1.0 \quad \text{mm}$$

$$E_o := 7300 \quad \text{N/mm}^2 \quad E_{Bo} := 7300 \quad \rho_M := 1.52 \quad \text{g/cm}^3$$

$$c_u = 1.4 \quad c_\theta = 1.15 \quad c_t = 1.7 \quad c_s = 1.5$$

Für Kugelkappe mit eingespanntem Rand $\alpha_\delta := 0.15$

$$p_{kD} := \alpha_\delta \cdot 1.21 \cdot E_{Bo} \cdot \left(\frac{t_D}{R_D} \right)^2 \cdot 10^3 \quad p_{kD} = 4.058 \quad \text{kN/m}^2$$

5.1.1 Belastung

5.1.1.1 Eigengewicht

$$g_{Ds} := 1.3 \cdot \rho_M \cdot 10 \cdot (t_D + c_L) \cdot 10^{-3} \quad g_{Ds} = 0.158 \quad \text{kN/m}^2$$

5.1.1.2 Schnee (Ersatzverkehrslast)

$$p_{so} := 1.00 \quad \text{kN/m}^2$$

5.1.1.3 Unterdrücke

$$p_u = 0 \quad p_{um} = 0 \quad p_{uk} = 1 \quad \text{kN/m}^2$$

aus Wind bei belüftetem Behälter

$$p_{us} := 0.6 \cdot 0.5 \quad p_{us} = 0.3 \quad \text{kN/m}^2$$

5.1.2 Nachweise

$$s_{D3} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left[\sqrt{c_t} \cdot (p_u + g_{Ds}) + \sqrt{c_s} \cdot (p_{um} + p_{so}) \right]}{p_{kD}} \quad s_{D3} = 0.85$$

$$s_{D4a} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot \left[\sqrt{c_t} \cdot (p_u + g_{Ds}) + \sqrt{c_s} \cdot (p_{um} + 0.7 \cdot p_{so}) + p_{us} \right]}{p_{kD}}$$

$$s_{D4a} = 0.71$$

$$s_{D4b} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left[\sqrt{c_t} \cdot (p_u + g_{Ds}) + \sqrt{c_s} \cdot p_{um} + p_{us} \right]}{p_{kD}} \quad s_{D4b} = 0.3$$

$$s_{D5} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left[\sqrt{c_t} \cdot (p_u + g_{Ds}) + \sqrt{c_s} \cdot p_{um} + p_{uk} \right]}{p_{kD}} \quad s_{D5} = 0.72$$

5.2 Zylinder

Laminat : FM4

$\rho_z := 1.8$ g/cm³

$C_u = 1.4$

$C_\theta = 1.15$

$C_{tu} = 1.5$

$C_{su} = 1.3$

$C_{tl} = 1.8$

$C_{sl} = 1.5$

Abmessungen : $r = 2000$

$H_z = 5400$

$H_{zar} = 1465$

$i := 0 \dots 5$

z_i m	t_{z_i} mm	E_{uB_i} N/mm ²	E_{lB_i} N/mm ²
1	7.3	8360	7040
2	8.4	8440	7032
3	9.4	8496	7023
4	10.5	8544	7023
5	11.6	8584	7016
6	12.7	8584	7016

5.2.1 Beanspruchung durch Axiallast

Jeder Schuß wird mit seiner Wanddicke t_{z_i}
für den im Schuß vorhandenen Axialdruck nachgewiesen.

$r = 2000$

5.2.1.1 Rotationssymmetrische konstante Axiallast

Für den Kreiszylinder mittlerer Länge ist

$$n_{k_i} := \alpha_{z_i} \cdot 0.605 \cdot \sqrt{\frac{E_{uB_i} \cdot E_{lB_i} \cdot (t_{z_i})^2}{r}}$$

$$\alpha_{z_i} := \frac{0.52}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t_{z_i}}}}$$

α_{z_i}	n_{k_i} kN/m
0.2689	33.25
0.2828	46.5
0.29403	60.71
0.3051	78.82
0.31506	99.52
0.32406	122.7

5.2.1.2 Biegebeanspruchung

Bei biegebeanspruchten Zylindern (" Stabbiegung ") darf α_z nach 6.2.1.1 durch

$\alpha_B := 1.2 \cdot \alpha_z$ ersetzt werden. Ersatzweise können bei Überlagerung von rotations-symmetrischen Lasten mit Lasten aus Rohrbiegung (hier : Längskräfte aus Windmomenten) die letzteren um den Faktor

verringert angesetzt werden. $k_{Bi} := 1.2$

5.2.2 Schnittkräfte (kN/m)

5.2.2.1 Eigenlast

$$g_i := \rho_z \cdot 10 \cdot (t_{z_i} + c_L) \cdot 10^{-3}$$

$$j := 0 \dots 5$$

$$n_{g_i} := g_{Ds} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3} + \sum_j g_j \cdot (j \leq i)$$

$$g_{Ds} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3} = 0.158$$

	g_i	n_{g_i}
kN/m	0.149	0.31
	0.169	0.48
	0.187	0.66
	0.207	0.87
	0.227	1.1
	0.247	1.34

5.2.2.2 Lasten aus Füllgut

keine Beanspruchung in Längsrichtung

$$\gamma_F = 12 \quad \text{kN/m}^3$$

5.2.2.3 Schnee (Ersatzverkehrslast)

$$n_s := p_{so} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3} \quad n_s = 1 \quad \text{kN/m}$$

5.2.2.4 Infolge Innendruck

$$n_{\ddot{u}} := p_{\ddot{u}} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}} = 0$$

$$n_{\ddot{u}m} := p_{\ddot{u}m} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}m} = 0$$

$$n_{\ddot{u}k} := p_{\ddot{u}k} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}k} = 2 \quad \text{kN/m}$$

$$n_u := p_u \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_u = 0$$

$$n_{um} := p_{um} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{um} = 0$$

$$n_{uk} := p_{uk} \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{uk} = 1 \quad \text{kN/m}$$

5.2.2.5 Wind

$$q := 0.5 \quad \text{kN/m}^2$$

Gesamthöhe: $H := H_G \cdot 10^{-3}$

$$H = 7.675 \quad \text{m}$$

$$H_z = 5400$$

$$c_1 := 1.2$$

$$c_2 := 1.6$$

$$A_{w2} := 0.20 \quad \text{m}^2$$

$$w := q \cdot \left(c_1 \cdot 2 \cdot \frac{r}{10^3} + c_2 \cdot A_{w2} \right)$$

$$w = 2.56 \quad \text{kN/m}$$

$$M_{w_i} := \frac{w \cdot (z_i + H_D \cdot 10^{-3})^2}{2}$$

$$H_D = 810$$

$$n_{w_i} := \frac{M_{w_i}}{\pi \cdot r^2} \cdot 10^6$$

m	z_i	kNm	M_{w_i}	kN/m	n_{w_i}
	1		4.19		0.33
	2		10.11		0.8
	3		18.58		1.48
	4		29.61		2.36
	5		43.21		3.44
	6		59.36		4.72

5.2.3 Nachweise

$$n_{ki_i} := n_{k_i}$$

	n_{w_i}	n_{g_i}	n_{k_i} kN/m	n_{ki_i}
$n_s = 1$	0.334	0.307	33.25	33.25
$n_u = 0$	0.804	0.477	46.5	46.5
$n_{um} = 0$	1.479	0.664	60.71	60.71
	2.357	0.871	78.82	78.82
	3.438	1.098	99.52	99.52
$n_{uk} = 1$	4.724	1.344	122.7	122.7

$$S_{3_i} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left[\sqrt{\sqrt{c_{su} \cdot c_{sl}} \cdot (n_s + n_{um})} + \sqrt{\sqrt{c_{tu} \cdot c_{tl}} \cdot (n_{g_i} + n_u)} \right]}{n_{ki_i}}$$

$$c_{t4_i} := \sqrt{\sqrt{c_{tu} \cdot c_{tl}} \cdot (n_{g_i} + n_u)}$$

$$S_{4a_i} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot \left[\sqrt{\sqrt{c_{su} \cdot c_{sl}} \cdot (0.7 \cdot n_s + n_{um})} + c_{t4_i} + \frac{n_{w_i}}{k_{Bi}} \right]}{n_{ki_i}}$$

$$S_{4b_i} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left(\sqrt{\sqrt{c_{su} \cdot c_{sl}} \cdot n_{um}} + c_{t4_i} + \frac{n_{w_i}}{k_{Bi}} \right)}{n_{ki_i}}$$

$$S_{5a_i} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot \left[\sqrt{\sqrt{c_{su} \cdot c_{sl}} \cdot (0.7 \cdot n_s + n_{um})} + c_{t4_i} \right]}{n_{ki_i}}$$

$$S_{5b_i} := \frac{1.5 \cdot c_u \cdot c_\theta \cdot \left(\sqrt{\sqrt{c_{su} \cdot c_{sl}} \cdot n_{um}} + c_{t4_i} \right)}{n_{ki_i}}$$

z_i	t_{z_i}	s_{3_i}	s_{4a_i}	s_{4b_i}	s_{5a_i}	s_{5b_i}
1	7.3	0.114	0.095	0.049	0.077	0.029
2	8.4	0.093	0.095	0.067	0.065	0.032
3	9.4	0.081	0.101	0.083	0.058	0.034
4	10.5	0.07	0.104	0.094	0.052	0.034
5	11.6	0.063	0.108	0.104	0.047	0.034
6	12.7	0.057	0.111	0.111	0.044	0.034

5.2.4 Leerer Behälter

Beispiel : $z_5 = 6$ m z entspricht z_5 entspricht Zylinderlänge l

5.2.4.1 Beanspruchung durch Radialdruck

$$l := z_5$$

nach DAST-Richtlinie 013, 2.3.2

$$\begin{aligned} l_o &:= 3.00 & l_m &:= 1.5 & l_u &:= 1.50 & l &= 6 & \text{m} \\ t_o &:= 8.37 & t_m &:= 10.87 & t_u &:= 12.33 & & & \text{mm} \end{aligned}$$

$$\frac{l_o}{l} = 0.5 \quad \frac{t_m}{t_o} = 1.299 \quad \frac{t_u}{t_o} = 1.473$$

nach Bilder 2.9 der Richtlinie $\beta := 0.73$

$$E_{uBm} := 8544 \quad E_{lBm} := 7023$$

$$E_v := \sqrt[3]{E_{uBm}^3 \cdot E_{lBm}} \quad E_v = 8135 \quad \text{N/mm}^2$$

t_{z_i}	E_{uB_i}	E_{lB_i}
7.3	8360	7040
8.4	8440	7032
9.4	8496	7023
10.5	8544	7023
11.6	8584	7016
12.7	8584	7016

$$p_k := 0.64 \cdot \beta \cdot E_v \cdot \frac{r}{l_o} \cdot \left(\frac{t_o}{r} \right)^{2.5} \quad p_k = 2.871 \quad \text{kN/m}^2$$

$$\max q_j := 0.5 \quad \text{kN/m}^2 \quad p_{uk} = 1 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{eu} := 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt[3]{1.0 \cdot \frac{r}{1 \cdot 10^3} \cdot \frac{r}{t_m}} \right) \cdot \max q_j \quad p_{us} = 0.3 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{eu} = 0.279$$

$$S_{u4a_i} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot (P_{us} + P_{eu})}{P_k}$$

$$S_{u5a_i} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot P_{uk}}{P_k}$$

$$S_{u4b_i} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot C_\theta \cdot (P_{us} + P_{eu})}{P_k}$$

$$S_{u5b_i} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot C_\theta \cdot P_{uk}}{P_k}$$

S_{u4a_i}

0.423
0.423
0.423
0.423
0.423
0.423

S_{u4b_i}

0.487
0.487
0.487
0.487
0.487
0.487

S_{u5a_i}

0.731
0.731
0.731
0.731
0.731
0.731

S_{u5b_i}

0.841
0.841
0.841
0.841
0.841
0.841

5.2.4.3 Kombination von Axial- und Radialdruck

$$S_{lu4a_i} := (S_{4a_i})^{1.25} + (S_{u4a_i})^{1.25}$$

$$S_{lu5a_i} := (S_{5a_i})^{1.25} + (S_{u5a_i})^{1.25}$$

$$S_{lu4b_i} := (S_{4b_i})^{1.25} + (S_{u4b_i})^{1.25}$$

$$S_{lu5b_i} := (S_{5b_i})^{1.25} + (S_{u5b_i})^{1.25}$$

S_{lu4a_i}

0.394
0.394
0.398
0.401
0.403
0.406

S_{lu4b_i}

0.43
0.441
0.451
0.459
0.466
0.471

S_{lu5a_i}

0.717
0.709
0.705
0.701
0.698
0.696

S_{lu5b_i}

0.817
0.819
0.82
0.82
0.82
0.82

6 Festigkeits - und Dehnungsbemessung

6.1 Dach Laminat: M3 DIN 18820

$$\begin{aligned} n_{Bt} &:= 85 \quad \text{N/mm/mm} & m_{Bt} &:= 18 \quad \text{Nm/m/mm}^2 \\ E_o &= 7300 \quad \text{N/mm}^2 & \rho_M &= 1.52 \quad \text{g/cm}^3 \\ t_D &= 7 & t_{Dk} &:= 7.0 \quad \text{mm} \\ n_{BD} &:= n_{Bt} \cdot t_D & n_{BD} &= 595 \quad \text{N/mm} \\ m_{BD} &:= m_{Bt} \cdot t_{Dk}^2 & m_{BD} &= 882 \quad \text{Nm/m} \\ K_u &= 1.4 & K_\theta &= 1.15 & K_t &= 1.6 & K_s &= 1.4 \\ C_u &= 1.4 & C_\theta &= 1.15 & C_t &= 1.7 & C_s &= 1.5 \end{aligned}$$

6.1.1 Schnittkäfte

Eigengewicht wird vernachlässigt

Form: Klöpperboden $r = 2000$

Kalotte :

$$\begin{aligned} n_{\ddot{u}D} &:= 0.6 \cdot p_{\ddot{u}} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\ddot{u}D} &= 0 \quad \text{N/mm} \\ n_{\ddot{u}mD} &:= 0.6 \cdot p_{\ddot{u}m} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\ddot{u}mD} &= 0 \\ n_{\ddot{u}kD} &:= 0.6 \cdot p_{\ddot{u}k} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\ddot{u}kD} &= 4.8 \\ n_{uD} &:= 0.6 \cdot p_u \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{uD} &= 0 \\ n_{umD} &:= 0.6 \cdot p_{um} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{umD} &= 0 \\ n_{ukD} &:= 0.6 \cdot p_{uk} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{ukD} &= 2.4 \\ n_{gDs} &:= 0.6 \cdot g_{Ds} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{gDs} &= 0.379 \\ n_{sD} &:= 0.6 \cdot p_{so} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{sD} &= 2.4 \\ n_{usD} &:= 0.6 \cdot p_{us} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{usD} &= 0.72 \end{aligned}$$

Krempe :

$$\begin{aligned} m_{\ddot{u}D} &:= 0.25 \cdot p_{\ddot{u}} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{\ddot{u}D} &= 0 \quad \text{Nm/m} \\ m_{\ddot{u}mD} &:= 0.25 \cdot p_{\ddot{u}m} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{\ddot{u}mD} &= 0 \\ m_{\ddot{u}kD} &:= 0.25 \cdot p_{\ddot{u}k} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{\ddot{u}kD} &= 14 \\ m_{uD} &:= 0.25 \cdot p_u \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{uD} &= 0 \\ m_{umD} &:= 0.25 \cdot p_{um} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{umD} &= 0 \\ m_{ukD} &:= 0.25 \cdot p_{uk} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{ukD} &= 7 \\ m_{gDs} &:= 0.25 \cdot g_{Ds} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{gDs} &= 1.107 \\ m_{sD} &:= 0.25 \cdot p_{so} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{sD} &= 7 \\ m_{usD} &:= 0.25 \cdot p_{us} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Dk} \cdot 10^{-3} & m_{usD} &= 2.1 \end{aligned}$$

6.1.2 Nachweise

$$S = 2$$

$$\text{Kalotte: } F_{zD5} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_t \cdot n_{üD} + K_s \cdot n_{ümD} + n_{ükD})}{n_{BD}} \quad F_{zD5} = 0.026$$

$$\varepsilon_{D5} := \frac{(C_t \cdot n_{üD} + C_s \cdot n_{ümD} + n_{ükD})}{t_D \cdot E_o \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{D5} = 0.009 \quad \%$$

$$F_{D3} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (n_{uD} + n_{gDs}) + K_s \cdot (n_{umD} + n_{sD})]}{n_{BD}}$$

$$F_{D4a} := \frac{S \cdot K_u \cdot [K_t \cdot (n_{uD} + n_{gDs}) + K_s \cdot (n_{umD} + 0.7 \cdot n_{sD}) + n_{usD}]}{n_{BD}}$$

$$F_{D4b} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (n_{uD} + n_{gDs}) + K_s \cdot n_{umD} + n_{usD}]}{n_{BD}}$$

$$F_{D5} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (n_{uD} + n_{gDs}) + K_s \cdot n_{umD} + n_{ükD}]}{n_{BD}}$$

$$F_{D3} = 0.021 \quad F_{D4a} = 0.017 \quad F_{D4b} = 0.007 \quad F_{D5} = 0.016$$

Krempe:

$$F_{zDk} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_t \cdot m_{üD} + K_s \cdot m_{ümD} + m_{ükD})}{m_{BD}} \quad F_{zDk} = 0.051$$

$$\varepsilon_{Dk} := \frac{(C_t \cdot m_{üD} + C_s \cdot m_{ümD} + m_{ükD}) \cdot 6}{t_{Dk}^2 \cdot E_o \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{Dk} = 0.021 \quad \%$$

$$F_{Dk3} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (m_{uD} + m_{gDs}) + K_s \cdot (m_{umD} + m_{sD})]}{m_{BD}}$$

$$F_{Dk4a} := \frac{S \cdot K_u \cdot [K_t \cdot (m_{uD} + m_{gDs}) + K_s \cdot (m_{umD} + 0.7 \cdot m_{sD}) + m_{usD}]}{m_{BD}}$$

$$F_{Dk4b} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (m_{uD} + m_{gDs}) + K_s \cdot m_{umD} + m_{usD}]}{m_{BD}}$$

$$F_{Dk5} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (m_{uD} + m_{gDs}) + K_s \cdot m_{umD} + m_{ükD}]}{m_{BD}}$$

$$F_{Dk3} = 0.042 \quad F_{Dk4a} = 0.034 \quad F_{Dk4b} = 0.014 \quad F_{Dk5} = 0.032$$

Mindestlängen:

$$l_{Dk} := \sqrt{D \cdot t_{Dk}}$$

$$l_{Dk} = 167 \quad \text{mm}$$

$$h_{Dz} := 3.0 \cdot t_{Dk}$$

$$h_{Dz} = 21$$

6.2 Zylinder

Laminat : FM4

$$\begin{aligned} K_u &= 1.4 & K_\theta &= 1.15 & K_{tu} &= 1.45 & K_{t1} &= 1.7 \\ & & & & K_{su} &= 1.3 & K_{s1} &= 1.45 \\ C_u &= 1.4 & C_\theta &= 1.15 & C_{tu} &= 1.5 & C_{t1} &= 1.8 \\ & & & & C_{su} &= 1.3 & C_{s1} &= 1.5 \end{aligned}$$

Abmessungen: $r = 2000$ $h_F = 6.365$ $h_{Fz} = 5555$
 $H_z = 5400$

m	mm	N/mm ²				N/mm	
z_i	t_{z_i}	E_{uB_i}	E_{lB_i}	$E_{uZ_i} :=$	$E_{lZ_i} :=$	$n_{Bu_i} :=$	$n_{Bl_i} :=$
1	7.3	8360	7040	8832	7040	850	504
2	8.4	8440	7032	8856	7032	979	576
3	9.4	8496	7023	8872	7024	1109	648
4	10.5	8544	7023	8888	7024	1238	720
5	11.6	8584	7016	8896	7016	1368	792
6	12.7	8584	7016	8896	7016	1498	864

6.2.1 Längsrichtung

6.2.1.1 Schnittkräfte

entsprechend 5.2.2

6.2.1.2 Nachweise

$$S = 2$$

$$F_{1z5_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + K_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k})}{n_{Bl_i}}$$

$$\varepsilon_{15_i} := \frac{(C_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + C_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k})}{t_{z_i} \cdot E_{lZ_i} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \%$$

$$F_{1z4_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + K_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{w_i})}{n_{Bl_i}}$$

$$\varepsilon_{14_i} := \frac{(C_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + C_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{w_i})}{t_{z_i} \cdot E_{lZ_i} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \%$$

z_i	t_{z_i}	F_{1z5_i}	ε_{15_i}	F_{1z4_i}	ε_{14_i}
1	7.3	0.01	0	0	0
2	8.4	0.01	0	0	0
3	9.4	0.01	0	0.01	0
4	10.5	0.01	0	0.01	0
5	11.6	0.01	0	0.01	0
6	12.7	0.01	0	0.02	0

$$F_{1d3_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_u + n_{g_i}) + K_{s1} \cdot (n_{um} + n_s)]}{n_{Bl_i}}$$

$$F_{1d4a_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot [K_{t1} \cdot (n_u + n_{g_i}) + K_{s1} \cdot (n_{um} + 0.7 \cdot n_s) + n_{w_i}]}{n_{Bl_i}}$$

$$F_{1d4b_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_u + n_{g_i}) + K_{s1} \cdot n_{um} + n_{w_i}]}{n_{Bl_i}}$$

$$F_{1d5a_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot [K_{t1} \cdot (n_u + n_{g_i}) + K_{s1} \cdot (n_{um} + 0.7 \cdot n_s) + n_{uk}]}{n_{Bl_i}}$$

$$F_{1d5b_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_u + n_{g_i}) + K_{s1} \cdot n_{um} + n_{uk}]}{n_{Bl_i}}$$

z_i	t_{z_i}	F_{1d3_i}	F_{1d4a_i}	F_{1d4b_i}	F_{1d5a_i}	F_{1d5b_i}
1	7.3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	8.4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	9.4	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
4	10.5	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
5	11.6	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
6	12.7	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01

6.2.2 Umfangsrichtung

$$\gamma_F = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$D = 4000 \text{ mm}$$

6.2.2.1 Schnittkräfte

$$n_{\ddot{u}u} := p_{\ddot{u}} \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}u} = 0$$

$$\text{kN/m : N/mm}$$

$$n_{\ddot{u}m} := p_{\ddot{u}m} \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}m} = 0$$

$$n_{Fu_i} := \gamma_F \cdot (z_i) \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}k} := p_{\ddot{u}k} \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{\ddot{u}k} = 4$$

$$n_{Fu_i}$$

24
48
72
96
120
144

$$n_{uu} := p_u \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{uu} = 0$$

$$n_{umu} := p_{um} \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{umu} = 0$$

$$n_{uku} := p_{uk} \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-3}$$

$$n_{uku} = 2$$

6.2.2.2 Nachweise

$$s = 2$$

$$F_{uz5_i} := \frac{s \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{tu} \cdot (n_{\ddot{u}u} + n_{Fu_i}) + K_{su} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k}]}{n_{Bu_i}}$$

$$\varepsilon_{u5_i} := \frac{[C_{tu} \cdot (n_{\ddot{u}u} + n_{Fu_i}) + C_{su} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k}]}{t_{z_i} \cdot E_{uZ_i} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \%$$

z_i	t_{z_i}	F_{uz5_i}	ε_{u5_i}
1	7.3	0.147	0.056
2	8.4	0.242	0.093
3	9.4	0.315	0.122
4	10.5	0.372	0.144
5	11.6	0.419	0.162
6	12.7	0.457	0.177

Andere Lastfälle sind nicht maßgeblich

6.3 Boden Laminat: M3 DIN 18820

$$\begin{aligned}
 n_{Bt} &:= 85 \quad \text{N/mm/mm} & m_{Bt} &:= 18 \quad \text{Nm/m/mm}^2 & s &= 2 \\
 E_o &:= 7300 \quad \text{N/mm}^2 & \rho_M &:= 1.52 \quad \text{g/cm}^3 \\
 E_{BB} &:= E_o & t_B &:= 14 & t_{Bk} &:= 54 \quad \text{mm} \\
 n_{BB} &:= n_{Bt} \cdot t_B & n_{BB} &= 1190 \quad \text{N/mm} \\
 m_{BB} &:= m_{Bt} \cdot t_{Bk}^2 & m_{BB} &= 52488 \quad \text{Nm/m} \\
 K_u &= 1.4 & K_\theta &= 1.15 & K_t &= 1.6 & K_s &= 1.4 \\
 C_u &= 1.4 & C_\theta &= 1.15 & C_t &= 1.7 & C_s &= 1.5 \\
 \alpha_{\theta B} &:= 30 \cdot 10^{-6} & \Delta_{\theta B} &:= 45 \quad \text{für maximale, kurzzeitige Temperatur bis} \\
 & & & & T_k &= 85 \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

6.3.1 Schnittkäfte Form: Klöpperboden

Eigengewicht wird vernachlässigt $\gamma_F = 12$ $h_F = 6.365$ $\gamma_F \cdot h_F = 76.37$

$$H_z = 5400 \quad H_B = 810 \quad D = 4000 \quad r = 2000$$

Kalotte:

$$\begin{aligned}
 n_{\dot{u}B} &:= 0.6 \cdot p_{\dot{u}} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\dot{u}B} &= 0 \quad \text{N/mm} \\
 n_{\dot{u}mB} &:= 0.6 \cdot p_{\dot{u}m} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\dot{u}mB} &= 0 \\
 n_{\dot{u}kB} &:= 0.6 \cdot p_{\dot{u}k} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{\dot{u}kB} &= 4.8 \\
 n_{FB} &:= 0.6 \cdot \gamma_F \cdot h_F \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & n_{FB} &= 183.3 \quad \text{N/mm}
 \end{aligned}$$

Krempe:

$$\begin{aligned}
 m_{\dot{u}B} &:= 0.3 \cdot p_{\dot{u}} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Bk} \cdot 10^{-3} & m_{\dot{u}B} &= 0 \quad \text{Nm/m} \\
 m_{\dot{u}mB} &:= 0.3 \cdot p_{\dot{u}m} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Bk} \cdot 10^{-3} & m_{\dot{u}mB} &= 0 \\
 m_{\dot{u}kB} &:= 0.3 \cdot p_{\dot{u}k} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Bk} \cdot 10^{-3} & m_{\dot{u}kB} &= 129.6 \\
 m_{FB} &:= 0.3 \cdot \gamma_F \cdot h_F \cdot t_{Bk} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} & m_{FB} &= 4949.041 \\
 m_{\theta B} &:= 0.15 \cdot E_{BB} \cdot t_{Bk}^2 \cdot \alpha_{\theta B} \cdot \Delta_{\theta B} & m_{\theta B} &= 4310.577
 \end{aligned}$$

6.3.2 Nachweise

Kalotte :

$$r = 2000$$

$$F_{B5} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (n_{\dot{u}B} + n_{FB}) + K_s \cdot n_{\dot{u}mB} + n_{\dot{u}kB}]}{n_{BB}} \quad F_{B5} = 0.807$$

$$\varepsilon_{B5} := \frac{[C_t \cdot (n_{\dot{u}B} + n_{FB}) + C_s \cdot n_{\dot{u}B} + n_{\dot{u}kB}]}{t_B \cdot E_o \cdot 1.1} \cdot 10^2$$

$$\varepsilon_{B5} = 0.281 \quad \%$$

Krempe :

$$F_{Bk5} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (m_{\dot{u}B} + m_{FB}) + K_s \cdot m_{\dot{u}mB} + m_{\dot{u}kB} + m_{\theta B}]}{m_{BB}}$$

$$\varepsilon_{\theta B} := 6 \cdot \frac{m_{\theta B}}{t_{Bk}^2 \cdot E_{BB}} \quad F_{Bk5} = 0.758$$

$$\varepsilon_{Bk5} := \left[\frac{[C_t \cdot (m_{\dot{u}B} + m_{FB}) + C_s \cdot m_{\dot{u}mB} + m_{\dot{u}kB}] \cdot 6}{t_{Bk}^2 \cdot E_o \cdot 1.1} + \varepsilon_{\theta B} \right] \cdot 10^2$$

$$\varepsilon_{Bk5} = 0.34 \quad \%$$

Mindestlängen:

$$l_{Bk} := \sqrt{D \cdot t_{Bk}}$$

$$l_{Bk} = 465$$

$$t_{Bk} = 54 \quad \text{mm}$$

$$h_{Bz} := 3.0 \cdot t_{Bk}$$

$$h_{Bz} = 162$$

6.4 Übergang Zylinder/Boden/Zarge

6.4.1 Zylinderrand unten

$$t_{Zü} := 39.0 \quad t_{Bk} = 54 \quad \text{mm}$$

$$\kappa_{Züv} := 0.205 - \frac{t_{Zü}}{t_{Bk}} \cdot 0.06$$

$$E_{ZZü} := 7016 \text{ N/mm}^2$$

$$n_{BZü} := 2633 \text{ N/mm}$$

$$\kappa_{Züv} = 0.162$$

$$E_{BZü} := 7016$$

$$m_{BZü} := 19230 \text{ Nm/m}$$

$$0.125 \leq \kappa_{Zü} \leq 0.165$$

$$\alpha_{\theta Zü} := 30 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta_{\theta Zü} := 45$$

$$\kappa_{Zü} := 0.162$$

6.4.1.1 Schnittkräfte

Längskräfte nach Abschnitt 6.2.1

$$i := 5$$

$$n_{\ddot{u}} = 0 \quad n_u = 0 \quad n_{g_i} = 1.34 \quad \text{kN/m}$$

$$n_{\ddot{u}m} = 0 \quad n_{um} = 0 \quad n_s = 1$$

$$n_{\ddot{u}k} = 2 \quad n_{uk} = 1 \quad n_{w_i} = 4.72$$

$$\text{aus Füllgut} \quad n_v := \gamma_F \cdot \frac{V}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 10^3 \quad n_v = 72.57 \quad \text{kN/m}$$

Biege-
momente

$$m_{\ddot{u}Zü} := \kappa_{Zü} \cdot p_{\ddot{u}} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zü} \cdot 10^{-3} \quad m_{\ddot{u}Zü} = 0 \quad \text{Nm/m}$$

$$m_{\ddot{u}mZü} := \kappa_{Zü} \cdot p_{\ddot{u}m} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zü} \cdot 10^{-3} \quad m_{\ddot{u}mZü} = 0$$

$$m_{\ddot{u}kZü} := \kappa_{Zü} \cdot p_{\ddot{u}k} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zü} \cdot 10^{-3} \quad m_{\ddot{u}kZü} = 50.54$$

$$m_{FZü} := \kappa_{Zü} \cdot \gamma_F \cdot h_F \cdot t_{Zü} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} \quad m_{FZü} = 1930$$

$$m_{\theta Zü} := 0.1 \cdot E_{BZü} \cdot t_{Zü}^2 \cdot \alpha_{\theta Zü} \cdot \Delta \theta_{Zü} \quad m_{\theta Zü} = 1441$$

6.4.1.2 Nachweise

$$s = 2$$

$$F_{Züzn5} := \frac{s \cdot \kappa_u \cdot \kappa_{\theta} \cdot (K_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + K_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k})}{n_{BZü}} \quad F_{Züzn5} = 0$$

$$F_{Züzm5} := \frac{s \cdot \kappa_u \cdot \kappa_{\theta} \cdot [K_{t1} \cdot (m_{\ddot{u}Zü} + m_{FZü}) + K_{s1} \cdot m_{\ddot{u}mZü} + m_{\ddot{u}kZü} + m_{\theta Zü}]}{m_{BZü}}$$

$$F_{Züzm5} = 0.8$$

$$F_{Züz5} := F_{Züzn5} + F_{Züzm5}$$

$$F_{Züz5} = 0.8$$

$$\varepsilon_{Zün5} := \frac{(C_{t1} \cdot n_{\ddot{u}} + C_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k})}{t_{Zü} \cdot E_{ZZü} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{Zün5} = 0 \quad \%$$

$$\varepsilon_{Züm5} := \frac{[C_{t1} \cdot (m_{\ddot{u}Zü} + m_{FZü}) + C_{s1} \cdot m_{\ddot{u}mZü} + m_{\ddot{u}kZü}] \cdot 6}{t_{Zü}^2 \cdot E_{BZü} \cdot 1.1} \cdot 10^2$$

$$\varepsilon_{Züm5} = 0.18$$

$$\varepsilon_{\theta Zü} := m_{\theta Zü} \cdot \frac{6}{t_{Zü}^2 \cdot E_{BZü}} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{\theta Zü} = 0.081$$

$$\varepsilon_{Zü5} := \varepsilon_{Zün5} + \varepsilon_{Züm5} + \varepsilon_{\theta Zü} \quad \varepsilon_{Zü5} = 0.262 \quad \%$$

$$F_{Züzn4} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_{tl} \cdot n_{\ddot{u}} + K_{sl} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{w_i})}{n_{BZ\ddot{u}}} \quad F_{Züzn4} = 0.01$$

$$F_{Züzm4} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{tl} \cdot (m_{\ddot{u}Z\ddot{u}} + m_{FZ\ddot{u}}) + K_{sl} \cdot m_{\ddot{u}mZ\ddot{u}} + m_{\theta Z\ddot{u}}]}{m_{BZ\ddot{u}}}$$

$$F_{Züzm4} = 0.79$$

$$F_{Züz4} := F_{Züzn4} + F_{Züzm4}$$

$$F_{Züz4} = 0.8$$

$$\varepsilon_{Zün4} := \frac{(C_{tl} \cdot n_{\ddot{u}} + C_{sl} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{w_i})}{t_{Z\ddot{u}} \cdot E_{ZZ\ddot{u}} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{Zün4} = 0.002 \quad \%$$

$$\varepsilon_{Züm4} := \frac{[C_{tl} \cdot (m_{\ddot{u}Z\ddot{u}} + m_{FZ\ddot{u}}) + C_{sl} \cdot m_{\ddot{u}mZ\ddot{u}}] \cdot 6}{t_{Z\ddot{u}}^2 \cdot E_{BZ\ddot{u}} \cdot 1.1} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{Züm4} = 0.18$$

$$\varepsilon_{\theta Z\ddot{u}} = 0.081$$

$$\varepsilon_{Zü4} := \varepsilon_{Zün4} + \varepsilon_{Züm4} + \varepsilon_{\theta Z\ddot{u}} \quad \varepsilon_{Zü4} = 0.26 \quad \%$$

$$F_{Züdn4} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{tl} \cdot (n_{g_i} + n_v) + K_{sl} \cdot n_s + n_{w_i}]}{n_{BZ\ddot{u}}} \quad F_{Züdn4} = 0.16$$

$$F_{Züdm4} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{tl} \cdot (m_{\ddot{u}Z\ddot{u}} + m_{FZ\ddot{u}}) + K_{sl} \cdot m_{\ddot{u}mZ\ddot{u}} + m_{\theta Z\ddot{u}}]}{m_{BZ\ddot{u}}}$$

$$F_{Züdm4} = 0.79$$

$$F_{Züd4} := F_{Züdn4} + F_{Züdm4}$$

$$F_{Züd4} = 0.95$$

$$p_{\ddot{u}} = 0 \quad p_{\ddot{u}m} = 0 \quad p_{\ddot{u}k} = 2 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_u = 0 \quad p_{um} = 0 \quad p_{uk} = 1$$

Mindestlängen:

$$l_{Z\ddot{u}} := 1.4 \cdot \sqrt{D \cdot t_{Z\ddot{u}}}$$

$$l_{Z\ddot{u}} = 553 \quad \text{mm}$$

$$t_{Z\ddot{u}} = 39$$

6.4.2 Zargenrand oben

$$r_{Zar} := r \quad r = 2000 \quad \text{mm} \quad v = 76 \quad \text{m}^3$$

$$t_{Zaü} := 37.9 \quad t_{Bk} = 54 \quad t_{Zü} = 39$$

$$E_{ZZaü} := 7016 \quad \text{N/mm}^2 \quad n_{BZaü} := 2559 \quad \text{N/mm}$$

$$E_{BZaü} := 7016 \quad m_{BZaü} := 18161 \quad \text{Nm/m}$$

$$\alpha_{\theta Zaü} := 30 \cdot 10^{-6} \quad \Delta_{\theta Zaü} := 45$$

6.4.2.1 Schnittkräfte

$$K_{\theta Zaü} := \frac{1.0 + K_{\theta}}{2} \quad K_{\theta Zaü} = 1.075$$

Längskraft aus Füllgut

$$n_v = 72.57 \quad \text{kN/m}$$

Längskräfte

$$\text{nach Abschnitt 6.2.1} \quad i = 5 \quad n_{g_i} = 1.34 \quad n_s = 1 \quad n_{w_i} = 4.72$$

Biege-
momente

$$m_{üZaü} := 0.2 \cdot p_{ü} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{üZaü} = 0 \quad \text{Nm/m}$$

$$m_{ümZaü} := 0.2 \cdot p_{üm} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{ümZaü} = 0$$

$$m_{ükZaü} := 0.2 \cdot p_{ük} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{ükZaü} = 60.64$$

$$m_{FZaü} := 0.2 \cdot \gamma_F \cdot h_F \cdot t_{Zaü} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} \quad m_{FZaü} = 2316$$

$$m_{\theta Zaü} := 0.25 \cdot E_{BZaü} \cdot t_{Zaü}^2 \cdot \alpha_{\theta Zaü} \cdot \Delta_{\theta Zaü} \quad m_{\theta Zaü} = 3401$$

6.4.2.2 Nachweise

$$F_{Zaüdn4} := \frac{S \cdot K_{\theta Zaü} \cdot \left[K_{t1} \cdot (n_{g_i} + n_v) + K_{s1} \cdot n_s + n_{w_i} \right]}{n_{BZaü}}$$

$$F_{Zaüdn4} = 0.11$$

$$F_{Zaüdm4} := \frac{S \cdot K_{\theta Zaü} \cdot \left[K_{t1} \cdot (m_{üZaü} + m_{FZaü}) + K_{s1} \cdot m_{ümZaü} + m_{\theta Zaü} \right]}{m_{BZaü}}$$

$$F_{Zaüdm4} = 0.87$$

$$F_{Zaüd4} := F_{Zaüdn4} + F_{Zaüdm4}$$

$$F_{Zaüd4} = 0.979$$

$$F_{Zaüd5} := \frac{S \cdot K_{\theta Zaü} \cdot \left[K_{t1} \cdot (n_{g_i} + n_v) + K_{sl} \cdot n_s \right]}{n_{BZaü}} \quad F_{Zaüd5} = 0.11$$

$$m_{tZaü} := K_{t1} \cdot (m_{üZaü} + m_{fZaü})$$

$$F_{Zaüdm5} := \frac{S \cdot K_{\theta Zaü} \cdot (m_{tZaü} + K_{sl} \cdot m_{ümZaü} + m_{ükZaü} + m_{\theta Zaü})}{m_{BZaü}}$$

$$F_{Zaüd5} := F_{Zaüdn5} + F_{Zaüdm5} \quad F_{Zaüdm5} = 0.88$$

$$F_{Zaüd5} = 0.983$$

Mindestlängen:

$$l_{Zaü} := 1.4 \cdot \sqrt{D \cdot t_{Zaü}} \quad l_{Zaü} = 545 \quad \text{mm}$$

$$t_{Zaü} = 37.9$$

6.4.3 Überlaminat Zarge/Zylinder

$$r_{Zar} := r \quad r = 2000 \quad \text{mm} \quad v = 76 \quad \text{m}^3$$

$$t_{Lü} := 20.3 \quad t_{Bk} = 54 \quad t_{Zü} = 39 \quad t_{Zaü} = 37.9 \quad \text{mm}$$

$$n_{BLü} := 1375 \quad \text{N/mm} \quad m_{BLü} := 5210 \quad \text{Nm/m}$$

6.4.3.1 Schnittkräfte

$$\text{Längskraft aus Füllgut} \quad n_v = 72.57 \quad \text{kN/m}$$

Längskräfte

$$\text{nach Abschnitt 6.2.1} \quad i = 5 \quad n_{g_i} = 1.34 \quad n_s = 1 \quad n_{w_i} = 4.72$$

$$\text{Biege-} \quad m_{üLü} := 0.05 \cdot p_{ü} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{üLü} = 0 \quad \text{Nm/m}$$

$$m_{ümLü} := 0.05 \cdot p_{üm} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{ümLü} = 0$$

$$m_{ükLü} := 0.05 \cdot p_{ük} \cdot 2 \cdot r \cdot t_{Zaü} \cdot 10^{-3} \quad m_{ükLü} = 15.16$$

$$m_{FLü} := 0.05 \cdot \gamma_F \cdot h_F \cdot t_{Zaü} \cdot 2 \cdot r \cdot 10^{-3} \quad m_{FLü} = 579$$

6.4.2.2 Nachweise

$$F_{\text{Lüdn4}} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_{g_i} + n_v) + K_{s1} \cdot n_s + n_{w_i}]}{n_{\text{BLü}}} \quad F_{\text{Lüdn4}} = 0.31$$

$$F_{\text{Lüdm4}} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (m_{\text{üLü}} + m_{\text{FLü}}) + K_{s1} \cdot m_{\text{ümlü}}]}{m_{\text{BLü}}} \quad F_{\text{Lüdm4}} = 0.61$$

$$F_{\text{Lüd4}} := F_{\text{Lüdn4}} + F_{\text{Lüdm4}}$$

$$F_{\text{Lüd4}} = 0.92$$

$$F_{\text{Lüdn5}} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_{g_i} + n_v) + K_{s1} \cdot n_s]}{n_{\text{BLü}}} \quad F_{\text{Lüdn5}} = 0.3$$

$$m_{\text{tLü}} := K_{t1} \cdot (m_{\text{üLü}} + m_{\text{FLü}})$$

$$F_{\text{Lüdm5}} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (m_{\text{tLü}} + K_{s1} \cdot m_{\text{ümlü}} + m_{\text{üklü}})}{m_{\text{BLü}}} \quad F_{\text{Lüdm5}} = 0.62$$

$$F_{\text{Lüd5}} := F_{\text{Lüdn5}} + F_{\text{Lüdm5}}$$

$$F_{\text{Lüd5}} = 0.92$$

Mindestlängen:

$$l_{\text{Lü}} := \sqrt{D \cdot t_{\text{Zü}}} \quad l_{\text{Lü}} = 395 \quad \text{mm}$$

$$l_{\text{Zaü}} = 545 \quad l_{\text{Zü}} = 553$$

$$t_{\text{Lü}} = 20.3 \quad t_{\text{Zü}} = 39 \quad t_{\text{Zaü}} = 37.9 \quad t_{\text{Bk}} = 54 \quad t_{\text{B}} = 14$$

$$i = 5 \quad t_{z_i} = 12.7$$

7 Standzarge

7.1 System und Schnittkräfte

System siehe Anlagen

$$r_{Zar} := r \quad r_{Zar} = 2000 \quad \text{mm}$$

$$H_{Zar} = 1465 \quad \text{mm} \quad H_z = 5400 \quad \text{mm} \quad H_D = 810 \quad \text{m}$$

$$H = 7.675 \quad \text{m}$$

Last aus Füllgut :

$$v = 76 \quad \text{m}^3 \quad \gamma_F = 12 \quad n_v = 72.575 \quad \text{kN/m}$$

Eigengewicht : entsprechend 6.2.2 für das jeweils nächstgrößere z

$$i = 5 \quad z_i = 6 \quad \text{m} \quad n_{g_i} = 1.344 \quad \text{kN/m}$$

Das Eigengewicht der Zarge kann vernachlässigt werden

Schnee,Ersatzverkehrslast :

$$n_s = 1 \quad \text{kN/m}$$

Windlast :

$$q_1 := 0.5 \quad \text{kN/m}^2$$

$$c_1 = 1.2 \quad c_2 = 1.6 \quad A_{w2} = 0.2$$

$$w_j := q_1 \cdot \left(c_1 \cdot 2 \cdot \frac{r}{10^3} + c_2 \cdot A_{w2} \right) \quad w_j = 2.56 \quad \text{kN/m}$$

$$M_{wZar} := \frac{w_j \cdot H^2}{2} \quad M_{wZar} = 75.4 \quad \text{kNm}$$

$$n_{wZar} := \frac{M_{wZar}}{\pi \cdot r^2} \cdot 10^6 \quad n_{wZar} = 6 \quad \text{kN/m}$$

$$n_{w_i} = 4.72$$

7.2 Stabilitätsuntersuchung

Laminat : FM4

$$C_{uZa} := 1.0$$

$$C_{tu} = 1.5$$

$$C_{su} = 1.3$$

$$C_{\theta Za} := \frac{1.0 + C_{\theta}}{2}$$

$$C_{\theta Za} = 1.075$$

$$C_{t1} = 1.8$$

$$C_{s1} = 1.5$$

$$C_{\theta} = 1.15$$

$$t_{Zar} := 14.8 \text{ mm}$$

$$E_{uBZar} := 8584$$

$$E_{lBZar} := 7016$$

$$\text{N/mm}^2$$

7.2.1 Normalbereich

7.2.1.1 Beanspruchung durch Axiallast

Rotationssymmetrische konstante Axiallast

Für den Kreiszylinder mittlerer Länge ist

$$\alpha_{z2} := \frac{0.52}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t_{Zar}}}}$$

$$n_{kZar} := \alpha_{z2} \cdot 0.605 \cdot \sqrt{E_{uBZar} \cdot E_{lBZar}} \cdot \frac{(t_{Zar})^2}{r}$$

$$\alpha_{z2} = 0.339$$

$$n_{kZar} = 174.4 \text{ kN/m}$$

Biegebeanspruchung

Bei biegebeanspruchten Zylindern ("Stabbiegung") darf α_z durch
 $\alpha_B := 1.2 \cdot \alpha_z$ ersetzt werden. Ersatzweise können bei Überlagerung von rotations-symmetrischen Lasten mit Lasten aus Rohrbiegung (hier: Längskräfte aus Windmomenten)

die letzteren um den Faktor

$$k_{Bi} := 1.2$$

verringert angesetzt werden.

Nachweise :

$$n_{SZar} := \left[\sqrt{C_{su} \cdot C_{s1} \cdot n_s} + \sqrt{C_{tu} \cdot C_{t1} \cdot (n_{gi} + n_v)} + \frac{n_{wZar}}{k_{Bi}} \right]$$

$$n_{SZar} = 100.9 \quad S_{Zarl} := \frac{1.5 \cdot C_{uZa} \cdot C_{\theta Za} \cdot n_{SZar}}{n_{kZar}} \quad S_{Zarl} = 0.93$$

7.2.1.2 Beanspruchung durch Radialdruck

nach DAST-Richtlinie 013

$$E_{vZar} := \sqrt{E_{uBZar}^3 \cdot E_{lBZar}}$$

$$E_{vZar} = 8162 \text{ N/mm}^2$$

$$H_{Zar} = 1465 \text{ mm}$$

$$P_{kZar} := 0.64 \cdot E_v \cdot \frac{r}{H_{Zar}} \cdot \left(\frac{t_{Zar}}{r} \right)^{2.5} \cdot 10^3 \quad P_{kZar} = 33.483 \quad \text{kN/m}^2$$

$$P_{euZar} := 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt{1.0 \cdot \frac{r}{H_{Zar} \cdot 10^3} \cdot \frac{r}{t_{Zar}}} \right) \cdot q_1 \quad P_{euZar} = 0.233 \quad \text{kN/m}^2$$

$$S_{Zaru} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot C_\theta \cdot P_{euZar}}{P_{kZar}} \quad S_{Zaru} = 0.017$$

7.2.1.3 Kombination von Axial- und Radialdruck

$$S_{Zarlu} := (S_{Zarl})^{1.25} + (S_{Zaru})^{1.25} \quad S_{Zarlu} = 0.923$$

7.3 Festigkeitsnachweis

$$t_{Zar} = 14.8 \quad \text{mm} \quad n_{lBZar} := 1008 \quad \text{N/mm} \quad m_{lBZar} := 2828 \quad \text{Nm/m}$$

$$K_{\theta Za} := \frac{1 + K_\theta}{2} \quad K_{uZa} := 1.0 \quad K_{sl} = 1.45 \quad K_{tl} = 1.7$$

$$K_\theta = 1.15 \quad K_{\theta Za} = 1.075 \quad K_{su} = 1.3 \quad K_{tu} = 1.45$$

$$n_s = 1 \quad n_v = 72.6 \quad n_{g_i} = 1.3 \quad n_{wZar} = 6 \quad \text{kN/m}$$

$$n_{Zar} := K_{sl} \cdot n_s + K_{tl} \cdot (n_{g_i} + n_v) + n_{wZar}$$

$$F_{Zar} := S \cdot K_{uZa} \cdot K_{\theta Za} \cdot \frac{n_{Zar}}{n_{lBZar}} \quad F_{Zar} = 0.28$$

8.0 Öffnungsränder

nach AD - Merkblatt N1

Maße in mm Überlamine: M3 DIN 18820 $n_{Bt} = 85$ N/mm²

8.1 Dach

$$D_D := 2 \cdot R_D \quad R_D = 4000 \quad D_D = 8000 \quad t_D = 7$$

Nach 2.6. darf statt des doppelten Krümmungsradius des Daches mit dem Zylinderdurchmesser gerechnet werden.

8.1.1 Mannloch

Durchmesser Öffnung : $d_{AMD} := 600$ $t_{üMD} := 3$

$$n_{üMDB} := t_{üMD} \cdot n_{Bt} \quad n_{üMDB} = 255 \quad \text{N/mm}$$

$$t_{AMD} := t_D + t_{üMD} \quad t_{AMD} = 10$$

$$b_{üMD} := \sqrt{D \cdot t_{AMD}} \quad b_{üMD} = 200 \quad \text{mm}$$

$$l_{üMD} := \sqrt{d_{AMD} \cdot t_{AMD}} \quad l_{üMD} = 77 \quad \text{mm}$$

$$v_{AMD} := \frac{1}{1.5 \cdot \left(1 + \frac{d_{AMD}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{AMD}}} \right)} \quad v_{AMD} = 0.267$$

$$F_{MD} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_t \cdot n_{üD} + K_s \cdot n_{üMD} + n_{üKD})}{(n_{BD} + n_{üMDB}) \cdot v_{AMD}} \quad F_{MD} = 0.068$$

Dehnungsnachweis :

$$\varepsilon_{MD} := \frac{(C_t \cdot n_{üD} + C_s \cdot n_{üMD} + n_{üKD})}{1.1 \cdot (E_o \cdot t_{AMD}) \cdot v_{AMD}} \cdot 10^2 \quad \varepsilon_{MD} = 0.022 \quad \%$$

8.1.2 Stützen

$$i := 0 \dots 3$$

Durchmesser Öffnung : $d_{ASD_i} :=$ $t_{üSD_i} :=$

$$n_{üSDB} := t_{üSD_i} \cdot n_{Bt}$$

$$t_{ASD_i} := t_D + t_{üSD_i}$$

50
80
150
200

3
3
3
3

$$b_{\text{üSD}_i} := \sqrt{D \cdot t_{\text{ASD}_i}} \quad l_{\text{üSD}_i} := \sqrt{d_{\text{ASD}_i} \cdot t_{\text{ASD}_i}}$$

$$b_{\text{üSD}_i} := \text{if}(d_{\text{ASD}_i} \leq 150, 100, b_{\text{üSD}_i})$$

$$v_{\text{ASD}_i} := \frac{1}{1.5 \cdot \left(1 + \frac{d_{\text{ASD}_i}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{\text{ASD}_i}}} \right)}$$

v_{ASD_i}	$b_{\text{üSD}_i}$	$l_{\text{üSD}_i}$	t_{ASD_i}	$n_{\text{üSDB}_i}$ N/mm
0.593	100	22	10	255
0.556	100	28	10	255
0.485	100	39	10	255
0.444	200	45	10	255

$$F_{\text{SD}_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot (K_t \cdot n_{\text{üD}} + K_s \cdot n_{\text{üMD}} + n_{\text{üKD}})}{(n_{\text{BD}} + n_{\text{üSDB}_i}) \cdot v_{\text{ASD}_i}}$$

$$F_{\text{SD}_i}$$

0.031
0.033
0.038
0.041

Dehnungsnachweis :

$$\varepsilon_{\text{SD}_i} := \frac{(C_t \cdot n_{\text{üD}} + C_s \cdot n_{\text{üMD}} + n_{\text{üKD}})}{1.1 \cdot (E_o \cdot t_{\text{ASD}_i}) \cdot v_{\text{ASD}_i}} \cdot 10^2$$

$$\varepsilon_{\text{SD}_i} \quad \%$$

0.01
0.011
0.012
0.013

8.2 Zylinder

8.2.1 Mannloch

bei $j := 5$ entspricht einer Zylinderlänge von $z_j = 6$ m

$$d_{\text{AMz}} := 600 \quad t_{\text{üMz}} := 9 \quad t_{z_j} = 12.7 \quad t_{\text{AMz}} := t_{z_j} + t_{\text{üMz}}$$

$$t_{\text{AMz}} = 21.7$$

$$l_{\text{üMz}} := \sqrt{d_{\text{AMz}} \cdot t_{\text{AMz}}}$$

$$l_{\text{üMz}} = 114 \quad \text{mm}$$

$$b_{\text{üMz}} := \sqrt{D \cdot t_{\text{AMz}}}$$

$$b_{\text{üMz}} = 295 \quad \text{mm}$$

$$n_{\text{üMzB}} := t_{\text{üMz}} \cdot n_{\text{Bt}}$$

$$v_{\text{AMz}} := \frac{1}{1.5 \cdot \left(1 + \frac{d_{\text{AMz}}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{\text{AMz}}}} \right)}$$

$$n_{\text{üMzB}} = 765 \quad \text{N/mm}$$

$$v_{\text{AMz}} = 0.33$$

Stabilitätsnachweis

$$\frac{d_{AMz}}{\sqrt{r \cdot t_{z_j}}} = 3.765$$

$$k := \frac{0.33}{\sqrt{1 + \frac{r}{100 \cdot t_{z_j}}}}$$

$$k = 0.206$$

$$n_{kr} := k \cdot \sqrt{E_{uB_j} \cdot E_{lB_j} \cdot \frac{(t_{z_j})^2}{r}}$$

$$n_{kr} = 128.7 \quad \text{N/mm}$$

Öffnungswinkel: $\alpha_{AM} := \arcsin\left(\frac{d_{AMz}}{2 \cdot r}\right)$

$$\alpha_{AMG} := \alpha_{AM} \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha_{AMG} = 8.627^\circ$$

Ausmittigkeit: $e_{AM} := \frac{r \cdot \sin(\alpha_{AM})}{\pi - \alpha_{AM}}$

$$e_{AM} = 100 \quad \text{mm}$$

Fläche: $A_{AM} := 2 \cdot r \cdot t_{z_j} \cdot (\pi - \alpha_{AM})$

$$A_{AM} = 151944 \quad \text{mm}^2$$

Widerstandsmoment:

$$W_{AM} := \frac{r^3 \cdot t_{z_j} \cdot (\pi - \alpha_{AM} - 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_{AM})) - A_{AM} \cdot e_{AM}^2}{e_{AM} + r \cdot \cos(\alpha_{AM})}$$

$$W_{AM} = 138275877 \quad \text{mm}^3$$

$$n_{g_j} = 1.344$$

$$n_u = 0$$

$$n_{um} = 0$$

$$n_{uk} = 1$$

$$n_s = 1$$

$$n_{w_j} = 4.724$$

$$n_{AM} := \sqrt{C_{tl} \cdot C_{tu} \cdot (n_{g_j} + n_u)} + \sqrt{C_{sl} \cdot C_{su} \cdot n_{um} + n_{uk} + n_{w_j}}$$

$$n_{AM} = 7.933$$

$$s_{AM} := \frac{1.5 \cdot C_u \cdot C_\theta \cdot t_{z_j}}{n_{kr}} \cdot \left(\frac{n_{AM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{A_{AM}} + \frac{n_{AM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot e_{AM}}{W_{AM}} \right)$$

$$s_{AM} = 0.17$$

8.2.2 Stutzen $i := 0 \dots 1$ $j := 5$ entspricht einer Zylinderlänge von $z_j = 6$ m

Durchmesser Öffnung :

 $d_{ASz_i} :=$ $t_{\ddot{u}Sz_i} :=$ $n_{\ddot{u}SzB_i} := n_{Bt} \cdot t_{\ddot{u}Sz_i}$

50
80

3.0
3.0

 $n_{\ddot{u}SzB_i}$

255
255

 $t_{ASz_i} := t_{z_j} + t_{\ddot{u}Sz_i}$ $l_{\ddot{u}Sz_i} := \sqrt{d_{ASz_i} \cdot t_{ASz_i}}$ $b_{\ddot{u}Sz_i} := \sqrt{D \cdot t_{ASz_i}}$ $b_{\ddot{u}Sz_i} := \text{if}(d_{ASz_i} \leq 150, 100, b_{\ddot{u}Sz_i})$

$$v_{ASz_i} := \frac{1}{1.5 \cdot \left(1 + \frac{d_{ASz_i}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{ASz_i}}} \right)}$$
 v_{ASz_i} $b_{\ddot{u}Sz_i}$ $l_{\ddot{u}Sz_i}$ t_{ASz_i} $n_{\ddot{u}SzB_i}$

N/mm

0.606
0.575

100
100

28
35

15.7
15.7

255
255

Längsrichtung

 $K_{t1} = 1.7$ $K_{s1} = 1.45$ $K_t = 1.6$ $K_s = 1.4$ $n_{Bl_j} = 864$ N/mm
$$F_{zls_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{t1} \cdot (n_{\ddot{u}}) + K_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k}]}{(n_{Bl_j} + n_{\ddot{u}SzB_i}) \cdot v_{ASz_i}}$$
 F_{zls_i}

0.009
0.01

Umfangsrichtung

 $K_{tu} = 1.45$ $K_{su} = 1.3$ $n_{Bu_j} = 1498$ N/mm
$$F_{zus_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_{tu} \cdot (n_{\ddot{u}u} + n_{Fu_j}) + K_{su} \cdot n_{\ddot{u}mu} + n_{\ddot{u}ku}]}{\left(n_{Bu_j} + n_{\ddot{u}SzB_i} \cdot \frac{K_{tu}}{K_t} \right) \cdot v_{ASz_i}}$$
 F_{zus_i}

0.654
0.689

Dehnungsnachweis : $C_u = 1.4$ $C_\theta = 1.15$
 Längsrichtung $C_{t1} = 1.8$ $C_{s1} = 1.5$
 $n_{\ddot{u}} = 0$ $n_{\ddot{u}m} = 0$ $n_{\ddot{u}k} = 2$ kN/m
 $E_{1Z_j} = 7016$ N/mm² $t_{z_j} = 12.7$ mm

$$\varepsilon_{z1S_i} := \frac{[C_{t1} \cdot (n_{\ddot{u}}) + C_{s1} \cdot n_{\ddot{u}m} + n_{\ddot{u}k}]}{1.1 \cdot (E_{1Z_j} \cdot t_{z_j} + E_o \cdot t_{\ddot{u}Sz_i}) \cdot v_{ASz_i}} \cdot 10^2$$

 $\varepsilon_{z1S_i} \quad \%$

0.003

0.003

Umfangsrichtung $C_{tu} = 1.5$ $C_{su} = 1.3$
 $n_{\ddot{u}u} = 0$ $n_{\ddot{u}mu} = 0$ $n_{\ddot{u}ku} = 4$ kN/m
 $E_{uZ_j} = 8896$ N/mm² $t_{z_j} = 12.7$ mm

$$\varepsilon_{zuS_i} := \frac{[C_{tu} \cdot (n_{\ddot{u}u} + n_{Fu_j}) + C_{su} \cdot n_{\ddot{u}mu} + n_{\ddot{u}ku}]}{1.1 \cdot (E_{uZ_j} \cdot t_{z_j} + E_o \cdot t_{\ddot{u}Sz_i} \cdot \frac{C_{tu}}{C_t}) \cdot v_{ASz_i}} \cdot 10^2$$

 $\varepsilon_{zuS_i} \quad \%$

0.249

0.263

8.3 Boden

8.3.1 Stutzen

$$i := 0$$

$$d_{ASB_i} := 100 \quad t_{üSB_i} := 7 \quad \text{mm} \quad t_B = 14$$

Durchmesser Öffnung :

$$n_{üSBB} := t_{üSB} \cdot n_{Bt} \quad n_{üSBB_i} = 595 \quad \text{N/mm}$$

$$t_{ASB_i} := t_B + t_{üSB_i}$$

$$l_{üSB_i} := \sqrt{d_{ASB_i} \cdot t_{ASB_i}}$$

$$b_{üSB_i} := \sqrt{D \cdot t_{ASB_i}}$$

$$b_{üSB_i} := \text{if}(d_{ASB_i} \leq 150, 100, b_{üSB_i})$$

$$d_{ASB_i} = 100 \quad t_{üSB_i} = 7 \quad t_{ASB_i} = 21 \quad l_{üSB_i} = 46 \quad b_{üSB_i} = 100 \quad \text{mm}$$

$$v_{ASB_i} := \frac{1}{1.5 \cdot \left(1 + \frac{d_{ASB_i}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t_{ASB_i}}} \right)} \quad v_{ASB_i} = 0.569$$

$$F_{SB_i} := \frac{S \cdot K_u \cdot K_\theta \cdot [K_t \cdot (n_{üB} + n_{FB}) + K_s \cdot n_{üMB} + n_{ükB}]}{(n_{BB} + n_{üSBB_i}) \cdot v_{ASB_i}} \quad F_{SB_i} = 0.946$$

Dehnungsnachweis :

$$\varepsilon_{SB_i} := \frac{[C_t \cdot (n_{üB} + n_{FB}) + C_s \cdot n_{üMB} + n_{ükB}]}{1.1 \cdot (E_o \cdot t_{ASB_i}) \cdot v_{ASB_i}} \cdot 10^2$$

$$\varepsilon_{SB_i} = 0.33 \quad \%$$

9.0 Verankerung

Anzahl Anker : $n_A := 6$ Schrauben pro Anker : $n_S := 2$ $H = 7.675$ m $r = 2000$ mmDurchmesser : $d_S := 12$ $M_{wZar} = 75.399$ kNm $n_{wZar} = 6$ kN/m

Eigengewicht:

$n_{g_i} = 0.307$ Boden: $n_{gB} := 1.3 \cdot \rho_M \cdot 10 \cdot (t_B + c_L) \cdot \frac{r}{2} \cdot 10^{-6}$ kN/m
 $n_{gB} = 0.296$

Zarge: $n_{gZ} := \rho_Z \cdot 10 \cdot (t_{Zar} + c_L) \cdot H_{Zar} \cdot 10^{-6}$
 $n_{gZ} = 0.417$

 $G_{Er} := (n_{g_i} + n_{gB} + n_{gZ}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot 10^{-3}$ $G_{Er} = 12.8$ kN

 $N_A := \frac{2 \cdot M_{wZar}}{n_A \cdot r} \cdot 10^3 - 0.9 \cdot \frac{G_{Er}}{n_A}$ $N_A = 10.6$ kN
Lochleibungsfestigkeit: $\beta_L := 150$ N/mm²Schubfestigkeit : $\tau_{1B} := 50$

Nachweis :

 $t_{Zar} = 14.8$ $t_{vuZa} := 14.8$ $t_{Zaü} = 37.9$ $s = 2$ $t_{uZar} := t_{Zar} + t_{vuZa}$ $t_{uZar} = 29.6$ mm
 $F_{L_i} := \frac{s \cdot K_{uZa} \cdot K_{\theta Za} \cdot N_A \cdot 10^3}{n_S \cdot d_S \cdot t_{uZar} \cdot 150}$ $F_{L_i} = 0.215$ $d_S = 12$
 $N_S := \frac{N_A}{n_S}$ $n_S = 2$ $N_S = 5.321$ kN

Festigkeitsklasse der Schrauben mindestens : 5.6-2 zul N : 19.2 kN

Abstand vom unteren Zargenrand größer als $a_S := 3.5 \cdot d_S$ $a_S = 42$ mm

Der Behälter ist auf vollem Umfang der Standzarge aufzulagern, die Anker sind für die Ankerkraft

 $N_A = 10.6$ kN Anzahl Anker : $n_A = 6$

auszulegen.

Erkelenz im Januar 2005

Kunststoffprüfstelle
 Dipl.-Ing. Helmut W. Franken
 Gewerbestraße Süd 24
 41812 Erkelenz
 Telefon 02431/73651

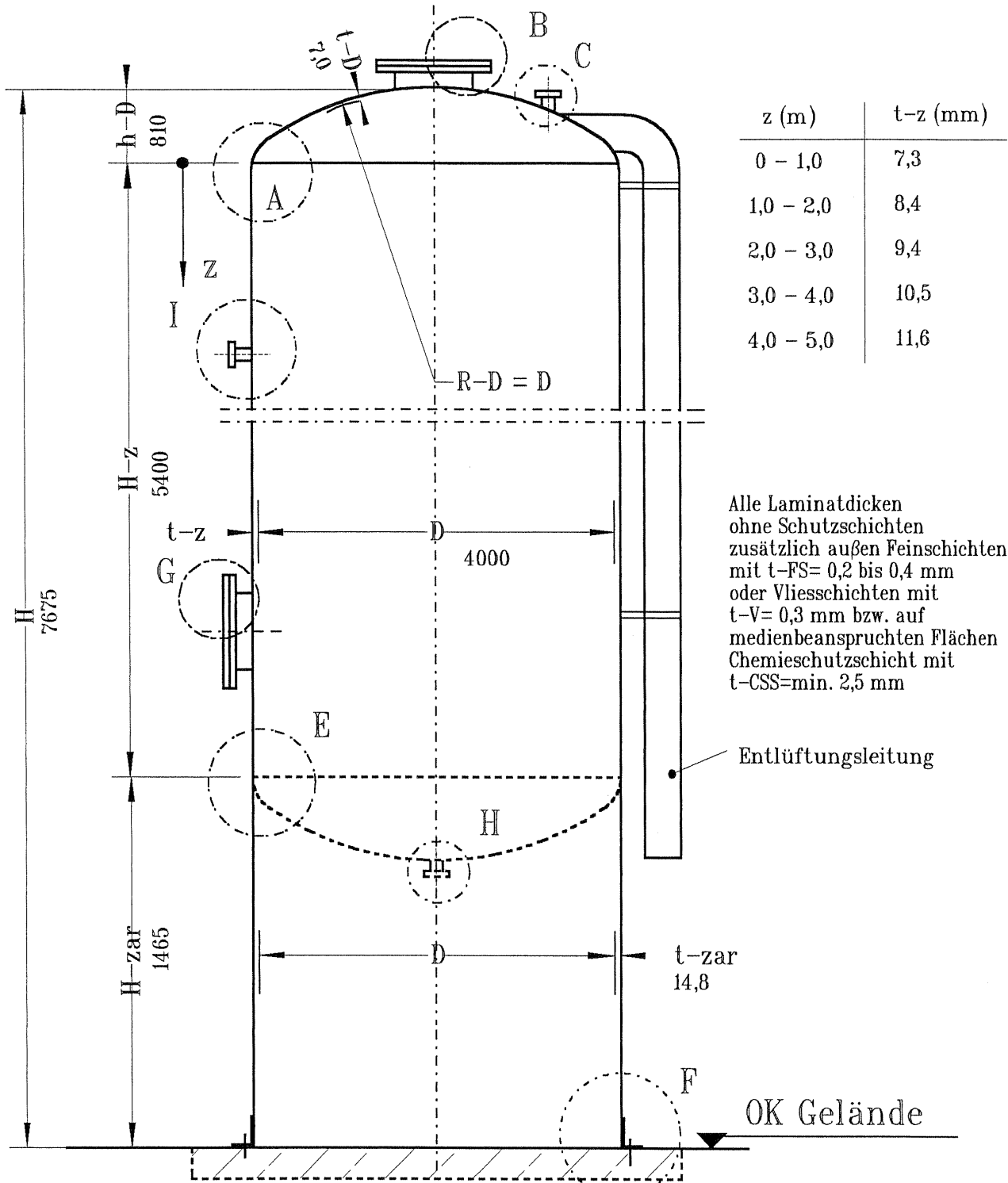
Standzargenbehälter

Übersicht

Typ : 12 / 40 / 80-Z-F

Weitere Maße und Details
siehe Anlagen 2 bis 7

Dach, Boden : Laminat DIN 18820-GF-PHA5-M3-n-35B-CSS-5



Zylinder und Zarge : Laminat DIN 18820-GF-PHA5-FM4-n-35B-CSS-5

Für das Traglaminat und die Chemieschutzschicht ist das Harz Atlac 590 der DSM Composite Resins zu verwenden. Es ist ausschließlich ECR-Glas zu verwenden. Der Behälter ist zu tempern.

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

Typ : 12/40/80-Z-F

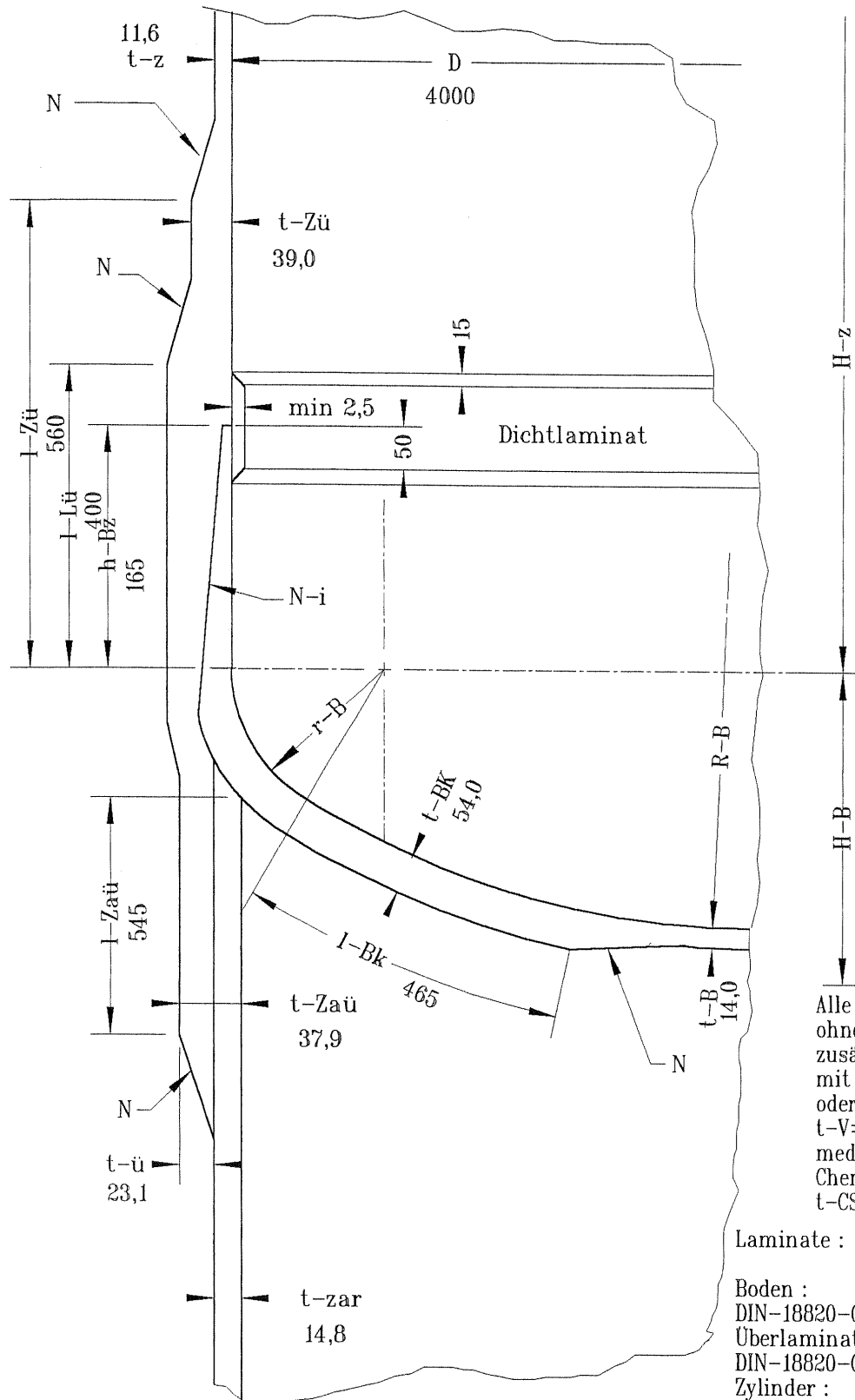
Übersicht

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 1

Detail E Maße im Übergangsbereich
Boden / Zylinder / Zarge

me030502



Alle Laminatdicken
ohne Schutzschichten
zusätzlich außen Feinschichten
mit $t-FS = 0,2$ bis $0,4$ mm
oder Vliesschichten mit
 $t-V = 0,3$ mm bzw. auf
medienbeanspruchten Flächen
Chemieschutzschicht mit
 $t-CSS = \min. 2,5$ mm

Lamine:

Boden :
DIN-18820-GF-PHA5-M3-35B-CSS-5
Überlamine :
DIN-18820-GF-PHA5-M3-35B-CSS-5
Zylinder :
DIN-18820-GF-PHA5-FM4-n-35B-CSS-5

N : Neigung max 1:6

$N-i$: Neigung max 1:10, Länge min 100 mm

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

Typ : 12/40/80-Z-F

Boden / Zylinder,

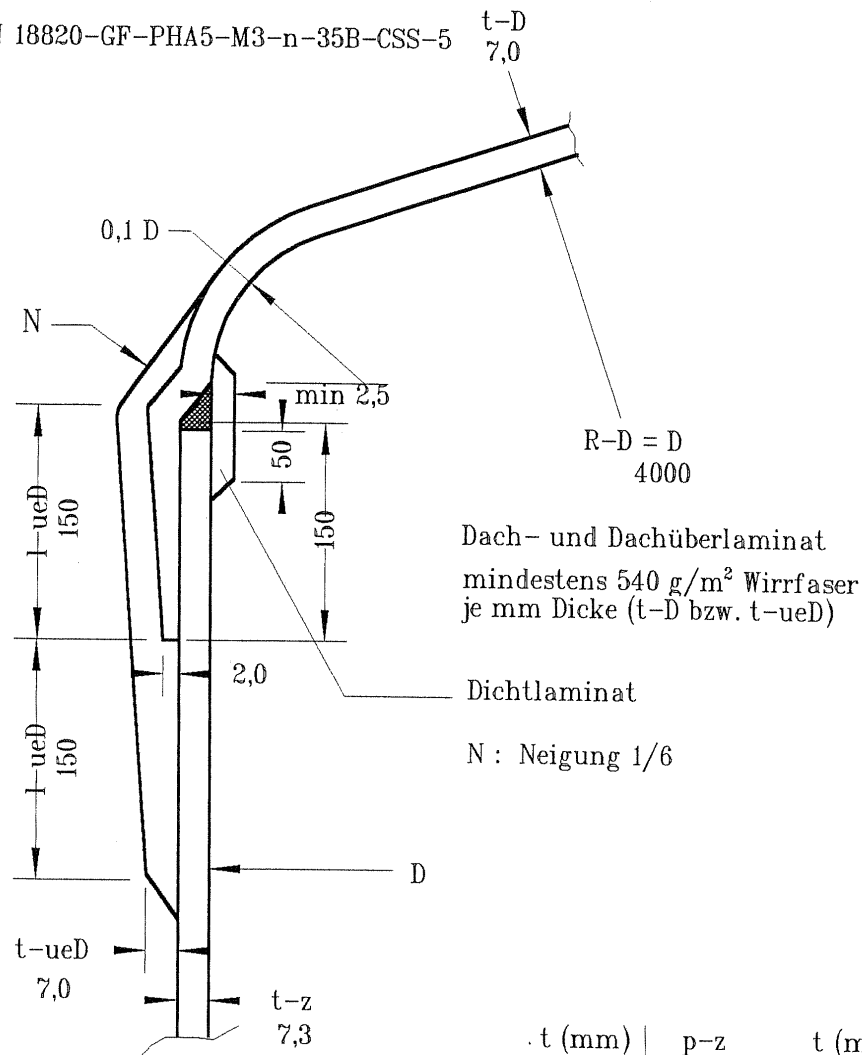
Standzarge

Detail E

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 2

Dach :
Laminat DIN 18820-GF-PHA5-M3-n-35B-CSS-5



Aufbau Wickellaminat für Zylinder und Zarge

Laminat DIN 18820-GF-PHA5-FM4-35B-CSS-5

$$M - p-z \times (F - M)$$

M = Wirrfaser 450 g/m²

$$F = \text{Roving } 120 \text{ g/m}^2$$

Alle Laminatdicken
ohne Schutzschichten
zusätzlich außen Feinschichten
mit t-FS= 0,2 bis 0,4 mm
oder Vliesschichten mit
t-V= 0,3 mm bzw. auf
medienbeanspruchten Flächen
Chemieschutzschicht mit
t-CSS=min. 2,5 mm

t (mm)	p-z	t (mm)	p-z
4,0	3	26,9	24
5,1	4	28,0	25
6,2	5	29,1	26
7,3	6	30,2	27
8,4	7	31,3	28
9,4	8	32,4	29
10,5	9	33,5	30
11,6	10	34,6	31
12,7	11	35,7	32
13,8	12	36,8	33
14,8	13	37,9	34
15,9	14	39,0	35
17,0	15	40,1	36
18,1	16	41,2	37
19,2	17	42,3	38
20,3	18	43,4	39
21,4	19	44,5	40
22,5	20	45,6	41
23,6	21	46,7	42
24,7	22	47,8	43
25,8	23	48,9	44

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]
Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

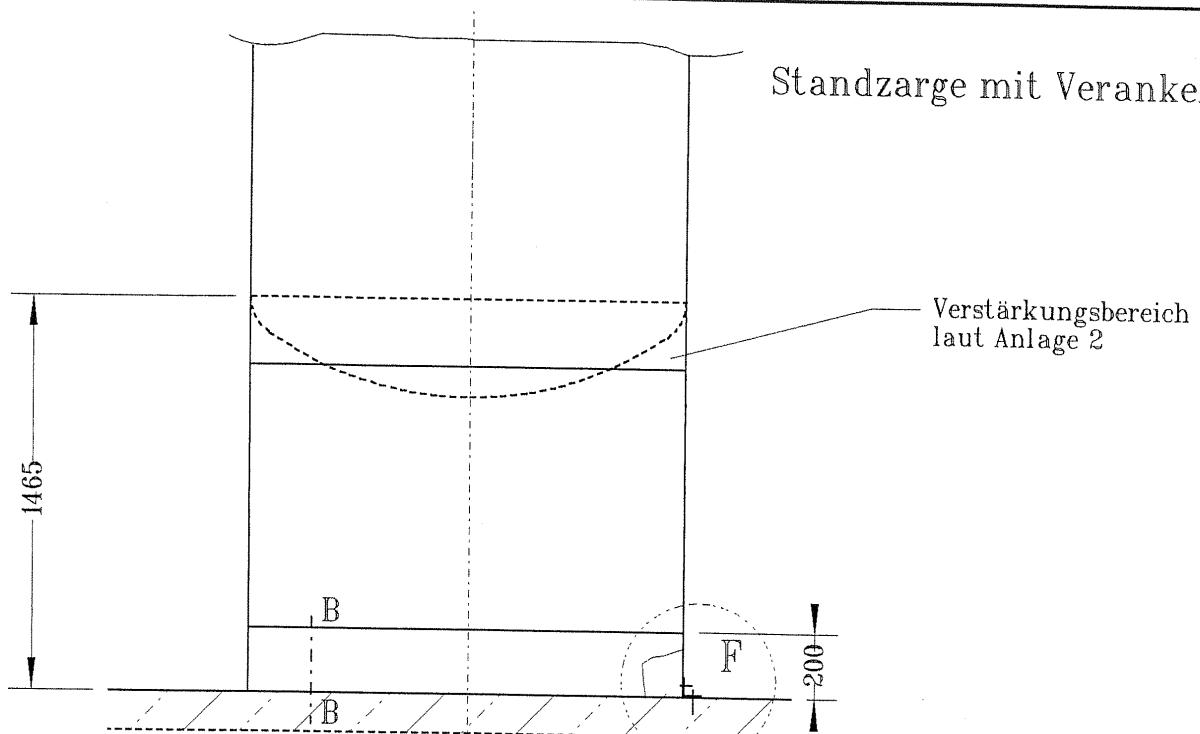
Typ : 12/40/80-Z-F

Verbindung Dach/Zylinder, Detail A

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 3

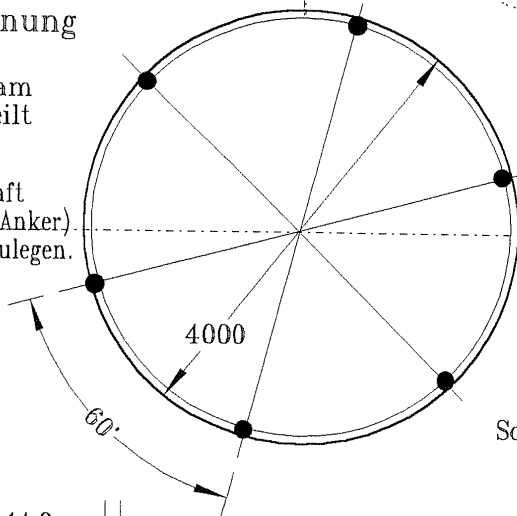
Standzarge mit Verankerung

Verstärkungsbereich
laut Anlage 2

Ankeranordnung

6 Anker
gleichmäßig am
Umfang verteilt

Die Anker sind
für die Ankerkraft
 $N-A=10,6 \text{ kN}$ (je Anker)
(abhebend) auszulegen.



Es wird eine volle Auflagerung der Standzarge
am gesamten Umfang vorausgesetzt.

Alle Laminatdicken
ohne Schutzschichten $t\text{-FS} = 0,2$ bis $0,4 \text{ mm}$
bzw. $t\text{-V} = 0,3$

Verstärkungen :

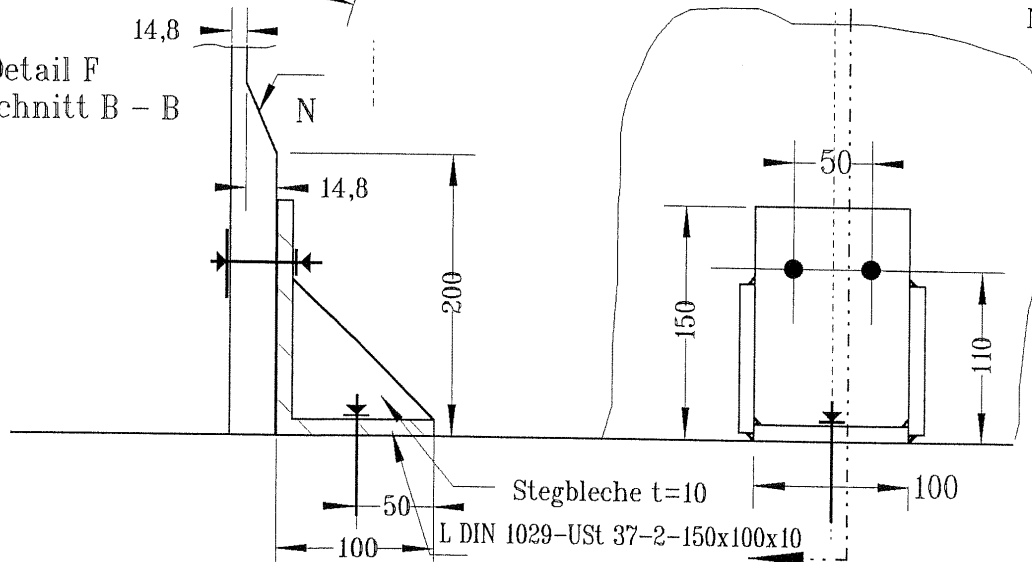
Laminat DIN 18820-GF-PHA5-FM4-n-35B-FS(VS)

oder
Laminat DIN 18820-GF-PHA5-M3-n-35B-FS(VS)

Scheiben : DIN 7989-A14-A2 / DIN 440-R14-A2
A2 nach DIN 267 Teil 11

Schrauben : Sechskant-DIN 7990-M12 x 1 Mu-A2

N = Neigung 1 : 6

Detail F
Schnitt B - B

Standzargenbehälter

Typ : 12/40/80-Z-F

Standzarge mit Verankerung

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 4

KPF
Erkelenz

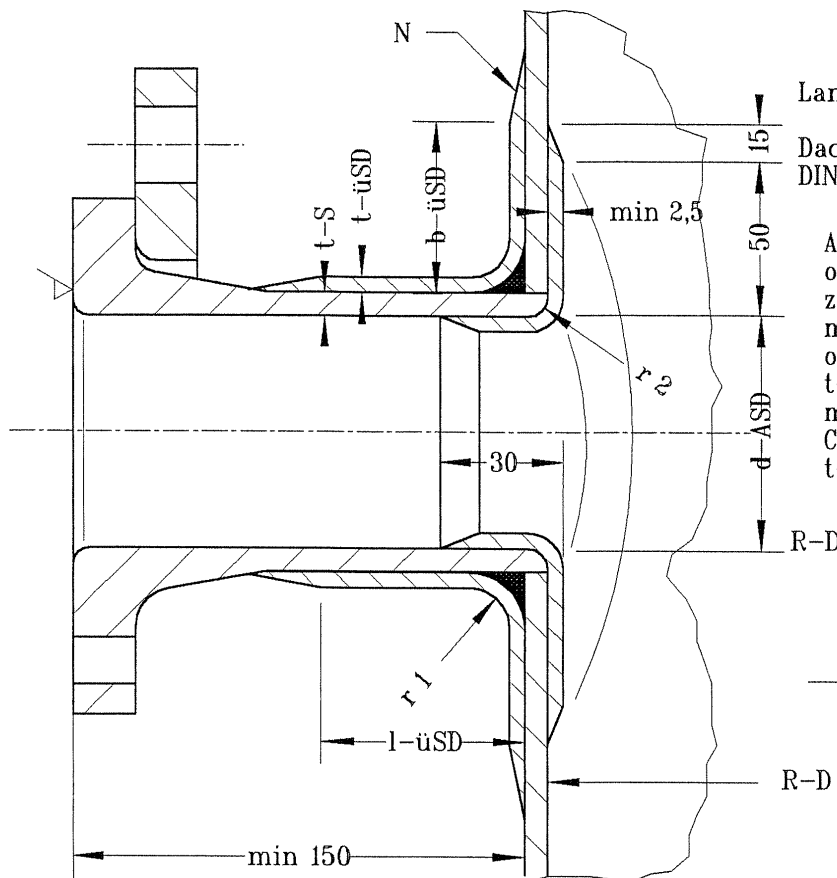
Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Detail C Stutzen im Dach

me030505

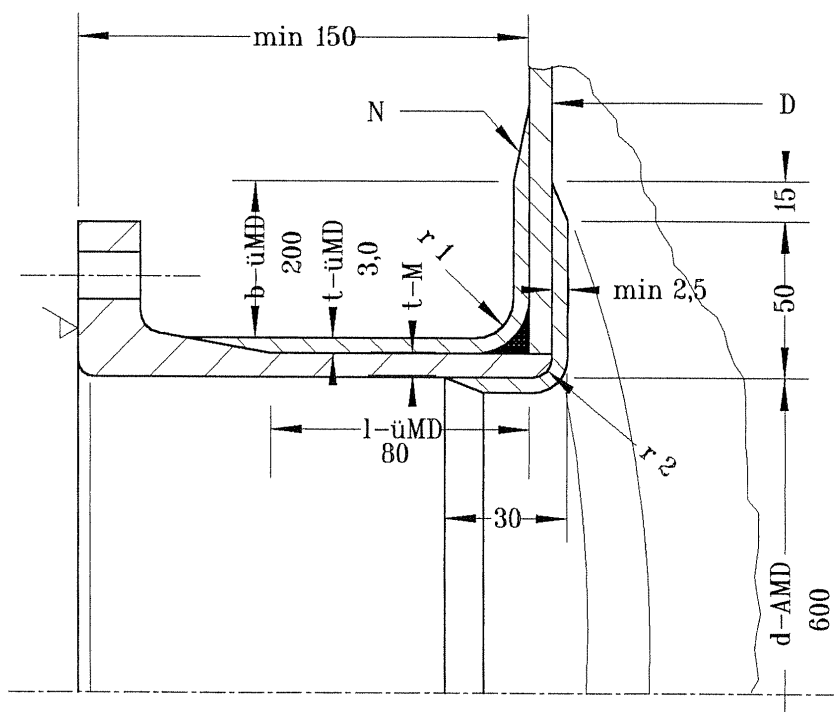


Lamine :
Dach u. Überlamine :
DIN 18820-GF-PHA5-M3-n-35B-CSS-5

Alle Laminatdicken
ohne Schutzschichten
zusätzlich außen Feinschichten
mit t-FS= 0,2 bis 0,4 mm
oder Vliesschichten mit
t-V= 0,3 mm bzw. auf
medienbeanspruchten Flächen
Chemieschutzschicht mit
t-CSS=min. 2,5 mm

d-ASD	t-üSD	b-üSD	l-üSD
50	3	100	50
80	3	100	50
150	3	100	50
200	3	100	50

Detail B Mannloch im Dach



r 1 : min 20
r 2 : min t-S bzw. t-M
N : Neigung max 1:6

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

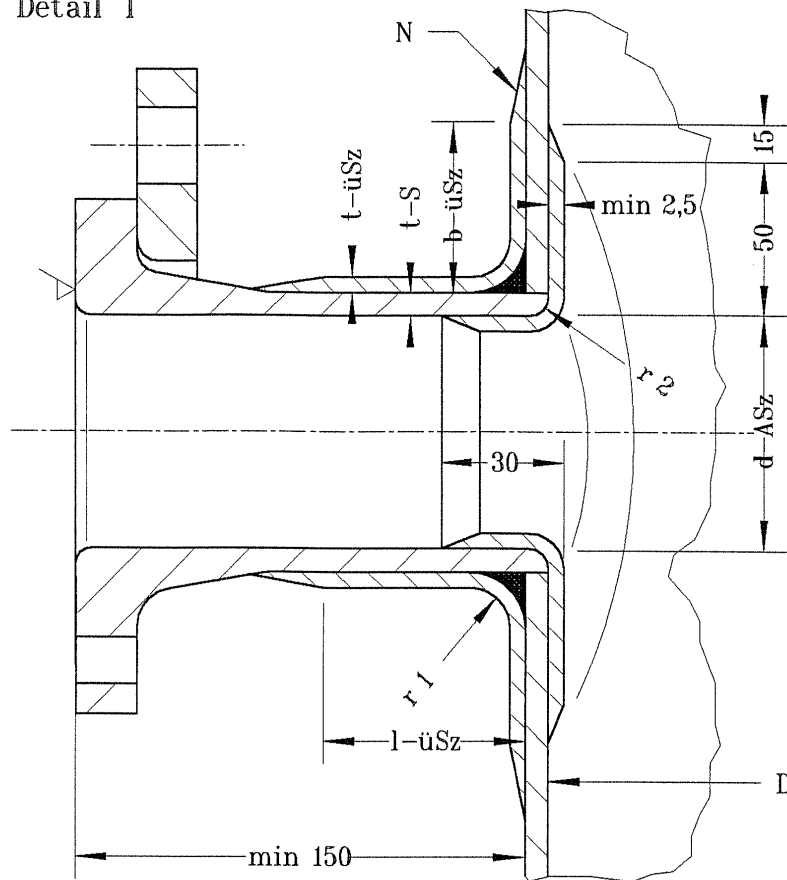
Typ : 12/40/80-Z-F

Details B und C

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 5

Detail I



Lamine :

Zylinder :

DIN 18820-GF-PHA5-FM4-n-35B-CSS-5

M-P-z x (F-M)

M = Wirrfaser 450 g/m²F = Roving 120 g/m²

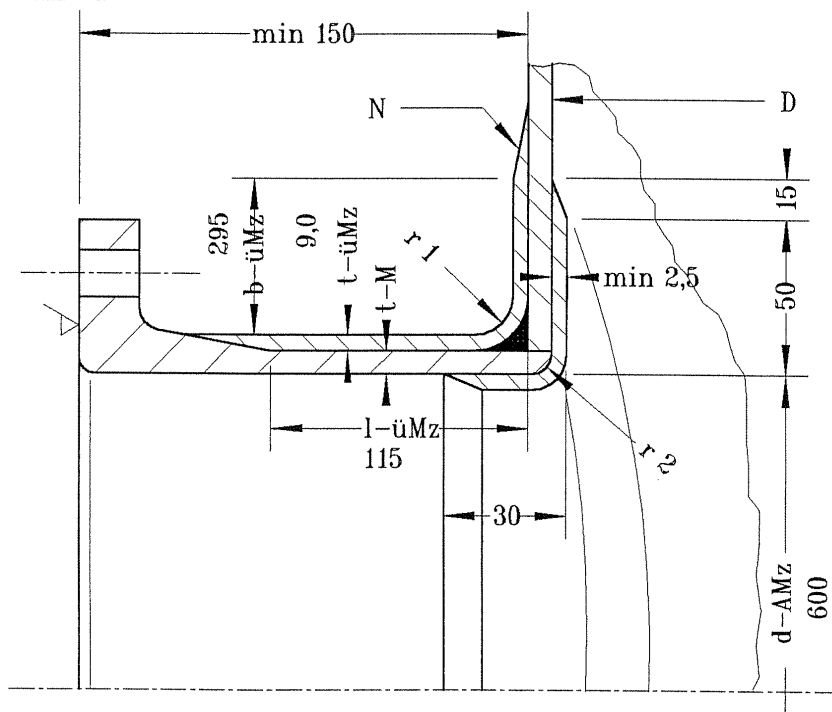
Überlamine :

DIN-18820-GF-PHA5-M3-n-35B-CSS-5

Alle Laminatdicken ohne
Oberflächenschichten :
zusätzlich außen Feinschichten
mit t-FS=0,2 bis 0,4 mm oder
Vliesschichten mit mindestens
t-V = 0,3 mm bzw.
auf medienbeanspruchten Flächen
Chemieschutzschicht (CSS)
t-CSS = min. 2,5 mm

d-ASz	t-üSz	b-üSz	l-üSz
50	3	100	50
80	3	100	50

Detail G



r 1 : min 20
r 2 : min t-S bzw. t-M
N : Neigung max 1:6

Maße in mm

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Berater Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

Typ : 12/40/80 Z-F

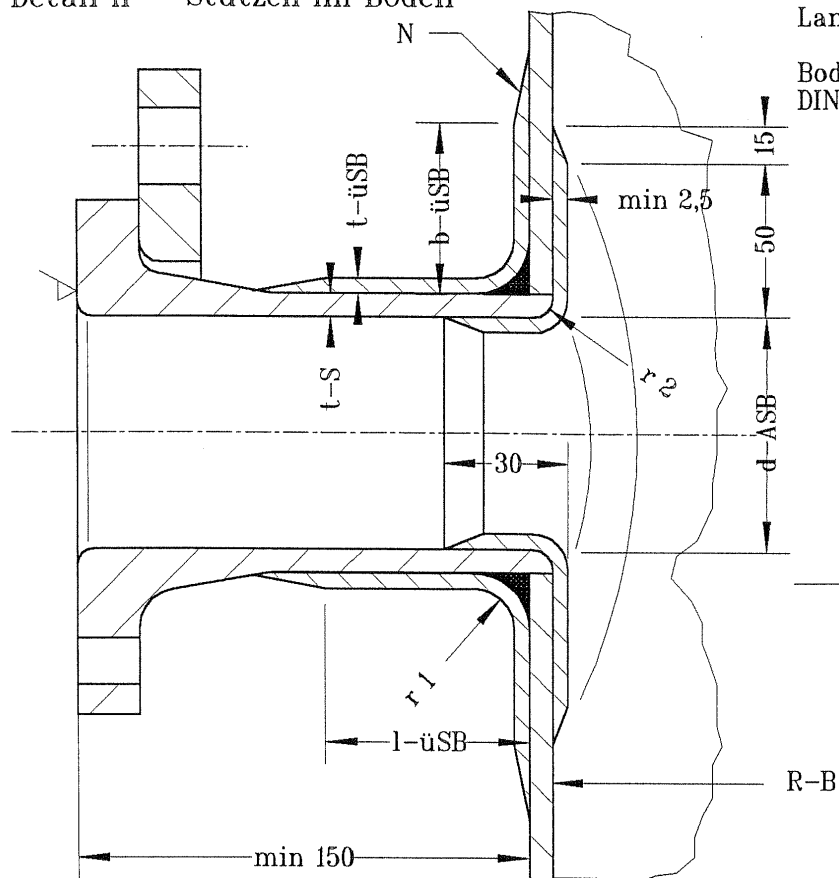
Details G, I

Öffnung im Zylinder

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 6

Detail H Stutzen im Boden



Lamine :

Boden u. Überlamine :
DIN 18820-GF-PHA5-M3-n-35B-CSS-5

Alle Laminatdicken
ohne Schutzschichten
zusätzlich außen Feinschichten
mit $t\text{-FS} = 0,2$ bis $0,4$ mm
oder Vliesschichten mit
 $t\text{-V} = 0,3$ mm bzw. auf
medienbeanspruchten Flächen
Chemieschutzschicht mit
 $t\text{-CSS} = \text{min. } 2,5$ mm

d-ASB	t-üSB	b-üSB	l-üSB
100	7	100	50

r_1 : min 20
 r_2 : min $t\text{-S}$ bzw. $t\text{-M}$
N : Neigung max 1:6

Maße in mm

KPF
Erkelenz

Kunststoffprüfstelle Franken

Dipl.-Ing. [REDACTED]

Beratender Ingenieur BYIK, VBI

Standzargenbehälter

Typ : 12/40/80-Z-F

Detail H

Auftr.-Nr.: 03/05

Anlage 7