

Statische Berechnung

Bauvorhaben: Sicherwasserrohr DA 400 x 55,2 mm

Beschreibung: BV Mülldeponie
Verlängerung der bestehenden Sickerwassersammelleitung

Auftraggeber: IG Braunschweig GmbH
Herr Dr. Ulrich Sehrbrock

Bearbeiter: Carsten Gieß / Fa. GWE

Datum: 05.05.2023

Inhaltsangabe

1 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage	3
1.1 Eingaben	3
1.1.1 Sicherheiten	3
1.1.2 Boden	3
1.1.3 Belastung	3
1.1.4 Einbau	3
1.1.5 Vollwand/Profil-Rohr	3
1.1.5.1 Thermoplast	4
1.2 Ergebnisse	5
1.2.1 Zwischenergebnisse Rohr	5
1.2.1.1 Materialeigenschaften	5
1.2.1.2 Sicherheiten	5
1.2.1.3 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12	5
1.2.2 Zwischenergebnisse	5
1.2.2.1 Belastung	5
1.2.2.2 Boden-Verformungsmoduln EB	6
1.2.2.3 Bodensteifigkeiten	6
1.2.2.4 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	6
1.2.2.5 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	7
1.2.2.6 Steifigkeitsverhältnisse	7
1.2.2.7 Beiwerte	7
1.2.2.8 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	8
1.2.2.9 Druckverteilung am Rohrumfang	9
1.2.3 Schnittkräfte	9
1.2.3.1 Schnittkräfte , Kurzzeit	9
1.2.3.2 Schnittkräfte , Langzeit	11
1.2.4 Nachweise Kurzzeit	13
1.2.4.1 Spannungsnachweis	13
1.2.4.2 Verformungsnachweis	14
1.2.5 Nachweise Langzeit	15
1.2.5.1 Spannungsnachweis	15
1.2.5.2 Verformungsnachweis	16
1.2.5.3 Nachweis Stabilität radial, linear	16
1.2.5.4 Stabilitätsnachweis, nichtlinear	17
1.2.5.5 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender	17

1 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage

Annahmen: Die Belastung des Rohres dort resultiert aus der Überschüttung mit Abfall (mechanisch grundsätzlich einem Boden vergleichbar)

Berechnungsart: Vollwand-/Profilrohr
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck: Ja

1.1 Eingaben

1.1.1 Sicherheiten

Sicherheitsklasse: A (Regelfall)
Sicherheit Stabilität nach Tabelle 13: Ohne Vorverformungen (2,5 / 2,0)
Zulässige Verformung: 6% (Regelfall)
Behandlung von Innendruck: Gemäß Fußnote des ATV-DVWK-A 127
Kleinere Biegedruck-Sicherheiten: Nein (ATV-DVWK-A 127)
Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung: Nach Regelwerk
Berücksichtigung von dyn pvh*: Nach Norm
Berücksichtigung der Vorverformungen Typ A in Verformungsnachweis: Ja
Behandlung Systemsteifigkeit VRB nach: DWA-A 161:2014 (nach Materialart)
Rohrsteifigkeit nach Regelwerk: Ja

1.1.2 Boden

Bodengruppe Einbettung: G1
Berechnung E20: Tabelle 8 (A127)
E4 = 10 · E1: Ja
Anwendung von Silotheorie: Automatisch
K2 nach Norm: Ja

1.1.3 Belastung

Überdeckungshöhe: h 50,00 m
Minimaler Grundwasserstand über Sohle: h_{W,min} 0,00 m
Maximaler Grundwasserstand über Sohle: h_{W,max} 0,00 m
Wichte des Bodens: γ_B 17,0 kN/m³
Zusätzliche Flächenlast: p₀ 0,0 kN/m²
Innendruck, kurzzeitig wirkend: P_{I,K} 0,00 bar
Innendruck, langfristig: P_{I,L} 0,00 bar
Wasserfüllung (z.B. Staukanal): Nein
Verkehrslast: Kein Verkehr

1.1.4 Einbau

Einbauweise: Damm
Bodenverhalten: E1 = E20 = E3
Einbettungsbedingung: B1
Auflagerart: Lose
Auflagerwinkel: 120°
Relative Ausladung automatisch ermitteln: Ja
Untere Sockelhöhe vorgeben: Ja
Höhe des unteren Teils des Sockels: h_{s,u} 0,250 m

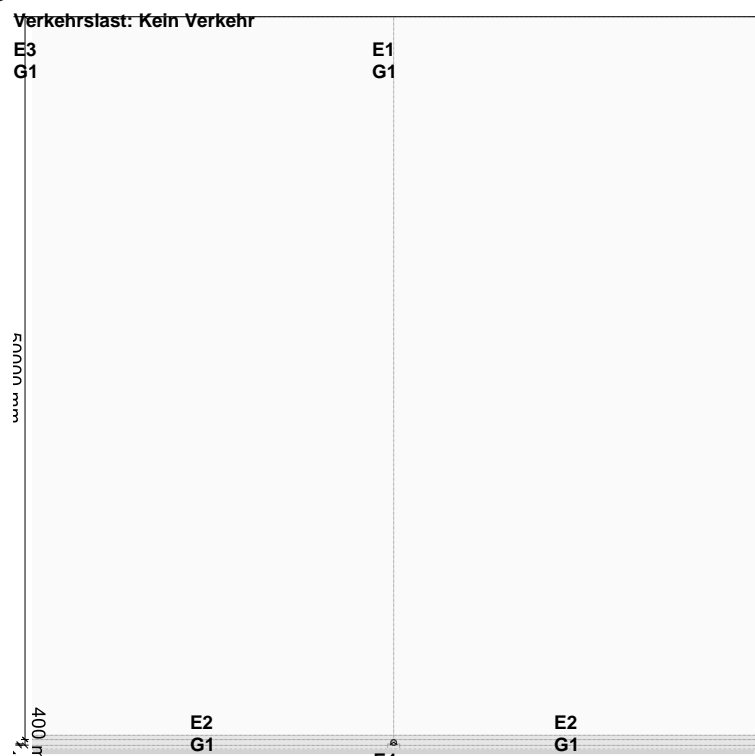
1.1.5 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl: Vollwand

Material-Klasse:	Thermoplast		
Vorverformung Typ A:	$\delta_{v,A}$	1,0	%
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	0,0	%
Auswahl der Eingaben:	Da und s		
Außendurchmesser:	d_a	400,0	mm
Wandstärke:	s	55,2	mm
Perforation:	Ohne Perforation		

1.1.5.1 Thermoplast

Auswahl Material:	Nach DWA A 127-10
Material:	PVC-U
Grund der Abminderung:	Keine



1.2 Ergebnisse

1.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d_i	289,6	mm
Außendurchmesser:	d_a	400,0	mm
Mittlerer Radius:	r_m	172,40	mm
Wanddicke:	s	55,20	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r_m/s	3,123	[-]
$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m}$			
			A 127 (8.14a)
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,107	[-]
$\alpha_{ka} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m}$			
			A 127 (8.14b)
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,893	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v,A}$	1,00	%
Radiale Profilfläche:	A_{rad}	55,20	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	27,60	mm
Trägheitsmoment:	I	14.016,38	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	507,84	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	507,84	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	κ_Q	1,2	[-]

1.2.1.1 Materialeigenschaften

		Kurzzeit	Langzeit	
Wichte des Rohrwerkstoffs	γ_R	14,0	14,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl	ν	0,38	0,38	[-]
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	E_R	3.200,0	1.600,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit	σ_{RBZ}	90,0	50,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit	σ_{RBD}	150,0	80,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit	σ_{RZ}	50,0	27,8	N/mm ²
Schwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen:		$2\sigma_{a,2E6}$	n. def.	N/mm ²
Schwingbreite bei $5 \cdot 10^6$ Lastspielen:		$2\sigma_{a,5E6}$	n. def.	N/mm ²
Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen:		$2\sigma_{a,1E8}$	n. def.	N/mm ²

1.2.1.2 Sicherheiten

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen	erf γ_{RBZ}	2,50	2,50	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen	erf γ_{RBD}	2,50	2,50	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität	erf γ_{stab}	2,50	2,50	[-]

1.2.1.3 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12

Die Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610 / DWA-A 139 wird nicht überprüft.

1.2.2 Zwischenergebnisse

1.2.2.1 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	0,00	m
$P_{Erd} = h \cdot \gamma_B$			
			(5.01)
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	850,00	kN/m ²

$$P_E = P_{Erd} + p_0 \quad (5.03)$$

Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:

Spannung aufgrund Verkehrslast:

Enthaltener Stoßfaktor:

Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:

P_E	850,00	kN/m ²
P_V	0,00	kN/m ²
ϕ	1,00	[-]
p_T	0,00	kN/m ²

1.2.2.2 Boden-Verformungsmoduln EB

Verformungsmodul:

E_{20}	16,00	N/mm ²
----------	-------	-------------------

Spannungsexponent:

z	0,40	[-]
-----	------	-----

$$E_{20,\sigma} = E_{20} \cdot \left(\frac{P_E}{100} \right)^z \quad (3.02)$$

E-Modul Einbettung unter Last:

Reduktionsfaktor für das Kriechen:

Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):

Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):

$E_{20,\sigma}$	37,66	N/mm ²
f_1	1,000	[-]
f_2	1,000	[-]
α_B	1,000	[-]

Bei einem Verhältnis (Breite Graben/Außendurchmesser) ≥ 4 , ergibt die Formel 6.03 immer den Wert 1,0.

$$E_{2,\sigma} = f_1 \cdot f_2 \cdot \alpha_B \cdot E_{20,\sigma} \quad (6.02)$$

E-Modul Einbettung (abgemindert):

$E_{2,\sigma}$	37,66	N/mm ²
----------------	-------	-------------------

$$E_{1,\sigma} = E_{20,\sigma}$$

E-Modul Verfüllung unter Last:

$E_{1,\sigma}$	37,66	N/mm ²
----------------	-------	-------------------

$$E_{3,\sigma} = E_{20,\sigma}$$

E-Modul anstehender Boden:

$E_{3,\sigma}$	37,66	N/mm ²
----------------	-------	-------------------

$$E_{4,\sigma} = E_{1,\sigma} \cdot 10$$

E-Modul Boden unter dem Rohr:

$E_{4,\sigma}$	376,61	N/mm ²
----------------	--------	-------------------

1.2.2.3 Bodensteifigkeiten

$$\zeta = \frac{1,667}{\Delta_f + (1,667 - \Delta_f) \cdot \frac{E_{2,\sigma}}{E_{3,\sigma}}} \quad (6.17)$$

Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:

ζ	1,000	[-]
---------	-------	-----

Der Korrekturfaktor ζ nach 6.17 ist bei Dammbedingungen immer 1,0, da das Verhältniss (Breite in Kämpferhöhe/Außendurchmesser) mit > 4 angenommen wird.

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot \zeta \cdot E_{2,\sigma} \quad (6.16)$$

Horizontale Bettungssteifigkeit:

S_{Bh}	22,596	N/mm ²
----------	--------	-------------------

$$S_{Bv} = \frac{E_{2,\sigma}}{a} \quad (6.12)$$

Vertikale Bettungssteifigkeit:

S_{Bv}	23,176	N/mm ²
----------	--------	-------------------

1.2.2.4 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:

2α	120	°
-----------	-----	---

$$t_r = r_a - \cos(2\alpha/2) \cdot r_a$$

Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:
Höhe untere Bettungsschicht UK Rohr bis Grabensohle:

t_r 0,100 m
 h_{su} 0,250 m

$$a = \frac{d_a + h_s - t_r}{d_a}$$

Berechnete Ausladung:

a 1,63 [-]

$$a' = a \cdot \frac{E_1}{E_2} \geq 0,26$$

(6.05)

Wirksame Ausladung:
Innerer Reibungswinkel:

a' 1,625 [-]
 φ' 35,000 °

Kurzzeit
alle Lasten Langzeit
Erdlasten
Verkehrslast Langzeit
sonstige
Lasten

1.2.2.5 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Elastizitätsmodul in Ringrichtung	E_R	3.200,0	1.600,0	1.600,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit	σ_{RBZ}	90,0	50,0	50,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit	σ_{RBD}	150,0	80,0	80,0	N/mm ²
Rohrsteifigkeit	S_R	8.753	4.377	4.377	kN/m ²

$$S_R = \frac{E_R \cdot I}{r_m^3}$$

(6.10a)

1.2.2.6 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet	$V_{RB,w}$	0,3874	0,1937	0,1937	[-]
------------------------------	------------	--------	--------	--------	-----

$$V_{RB,w} = \frac{S_R}{S_{Bh}} = \frac{8 \cdot S_0}{S_{Bh}}$$

(6.15)

Steifigkeitsverhältnis	V_S	4,1473	2,3342	---	[-]
------------------------	-------	--------	--------	-----	-----

$$V_S = \frac{S_R}{|c_v^*| \cdot S_{Bv}}$$

(6.08a)

Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,091	-0,081	---	[-]
--------------------------------------	---------	--------	--------	-----	-----

1.2.2.7 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung)	K_2	0,400	0,400	---	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck	K^*	0,207	0,355	---	[-]

$$K^* = \frac{c'_h}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

(6.14)

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0961	0,0961	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_{h,qh^*}	-0,0773	-0,0773	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,091	-0,081	---	[-]

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*$$

(6.13)

1.2.2.8 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

$$\max \lambda = 1 + \frac{\frac{h}{d_a}}{\frac{3,5}{a'} + \frac{2,2}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0,25)} + \left[\frac{0,62}{a'} + \frac{1,6}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0,25)} \right] \cdot \frac{h}{d_a}} \quad (6.04)$$

Maximaler Konzentrationsfaktor	$\max \lambda$	2,936	2,936	---	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor	K'	0,795	0,766	---	[-]

$$K' = - \frac{c_{v,qh} + \frac{c_{h,qh}}{c_{h,qv}} \cdot c_{v,qh*} \cdot K^*}{c_{v,qv} + c_{v,qh*} \cdot K^*} \quad (6.06b)$$

Verhältnis:	$I/(A \cdot r_m^2)$	0,00854	[-]
Verhältnis $I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa \sim Q'$:	$I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa_Q$	0,01025	[-]

	q_v	q_h	q_{h*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Verformungsbeiwert für Normalkräfte	c_v^N	-0,6830	-0,6810	-0,2470 [-]
Verformungsbeiwert für Querkräfte	c_v^Q	-0,3590	0,3350	0,2430 [-]

$$c' = c + \frac{I}{A \cdot r_m^2} \cdot [c^N + 2(1 + \nu) \cdot \kappa_Q \cdot c^Q] \quad (6.20)$$

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,1053	0,0870	0,0688	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0961	-0,0986	-0,0773	[-]

$$\lambda_R = \frac{\max \lambda \cdot V_s + a' \cdot \frac{4 \cdot K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\max \lambda - 1}{a' - 0,25}}{V_s + a' \cdot \frac{3 + K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\max \lambda - 1}{a' - 0,25}} \quad (6.06a)$$

Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert	λ_R	1,969	1,604	---	[-]
---	-------------	-------	-------	-----	-----

$$\lambda_{RG} = \lambda_R \quad (6.21b)$$

Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss	λ_{RG}	1,969	1,604	---	[-]
--	----------------	-------	-------	-----	-----

$$\lambda_{fo} = 2,5 \quad (6.23b)$$

Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert	λ_{fo}	2,500	2,500	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert	λ_{fu}	0,011	0,011	---	[-]

$$\lambda_{RG} = \lambda_{RG}$$

Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert	λ_{RG}	1,969	1,604	---	[-]
--	----------------	-------	-------	-----	-----

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad (6.07)$$

Konzentrationsfaktor Boden	λ_B	0,677	0,799	---	[-]
----------------------------	-------------	-------	-------	-----	-----

1.2.2.9 Druckverteilung am Rohrumfang

		Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten	
$q_v = \lambda_{RG} \cdot P_E + P_V$					(6.24)
Vertikale Gesamtlast	q_v	1.673,47	1.363,24	---	kN/m ²
$q_h = K_2 \cdot \left(\lambda_B \cdot P_E + \gamma_B \cdot \frac{d_a}{2} \right)$					(7.01)
Seitendruck	q_h	231,56	272,93	---	kN/m ²
$q_{h}^* = \frac{c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h}{V_{RB} - c_{h,qh}^*}$					(7.02a)
Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten)	q_{h}^*	296,99	384,18	---	kN/m ²
$q_{hw}^* = \frac{c_{hw} \cdot q_w}{V_{RB} - c_{h,qh}^*}$					(7.02b)
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung)	q_{hw}^*	0,00	0,00	---	kN/m ²

1.2.3 Schnittkräfte

1.2.3.1 Schnittkräfte, Kurzzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):

			r	1,000	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	172,40	172,40	172,40	mm
	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
	m_{qh}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
	m_{qh}^*	-0,181	0,208	-0,181	[-]
	m_g	0,381	-0,440	0,520	[-]
	m_w	0,190	-0,220	0,260	[-]
$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_m^2 \cdot r$					(8.01)
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	12,982	-13,181	13,678	kNm/m
$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_m^2 \cdot r$					(8.03)
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-1,721	1,721	-1,721	kNm/m
$M_{qh}^* = m_{qh}^* \cdot q_{h}^* \cdot r_m^2 \cdot r$					(8.05a)
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M_{qh}^*	-1,598	1,836	-1,598	kNm/m
$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot A_{rad} \cdot r_m^2 \cdot r$					(8.07)
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,009	-0,010	0,012	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$\Sigma M = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^* + M_{qw}^* + M_g + M_w + M_{pw}$					
Summe der Momente	ΣM	9,672	-9,634	10,372	kNm/m

$\Sigma M_{qv,qh,qh^*} = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^*$					
Summe der Momente aufgrund Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*}$	9,663	-9,624	10,360	kNm/m
$\Sigma M_{sonst} = M_{qw}^* + M_g + M_w + M_{pw}$					
Summe der Momente anderer Lasten	ΣM_{sonst}	0,009	-0,010	0,012	kNm/m
$\Sigma M' = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^* + M_g$					
Summe ohne Wasserfüllung und Druck	$\Sigma M'$	9,672	-9,634	10,372	kNm/m
Mittlerer Radius					
	r_m	Scheitel 172,40	Kämpfer 172,40	Sohle 172,40	mm
	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
	n_{qh}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
	n_{qh}^*	-0,577	0,000	-0,577	[-]
	n_{qh}^*	-0,577	0,000	-0,577	[-]
	n_g	0,250	-1,571	-0,250	[-]
	n_w	0,625	0,215	1,375	[-]
	n_{pa}	-0,625	-0,215	-1,375	[-]
$N_{qv} = n_{pv} \cdot q_v \cdot r_m$ (8.02)					
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	7,790	-288,507	-7,790	kN/m
$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_m$ (8.04)					
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-39,922	0,000	-39,922	kN/m
$N_{qh}^* = n_{qh}^* \cdot q_h^* \cdot r_m$ (8.06a)					
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N_{qh}^*	-29,543	0,000	-29,543	kN/m
$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot A_{rad} \cdot r_m$ (8.08)					
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,033	-0,209	-0,033	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
$N_{pw} = P_i \cdot r_i - 10.000 \cdot h_w \cdot r_a$ (8.12)					
Normalkraft aufgrund WasserdruckInnenendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
$\Sigma N = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^* + N_{qw}^* + N_g + N_w + N_{pw}$					
Summe der Normalkräfte	ΣN	-61,641	-288,716	-77,287	kN/m
$\Sigma N_{qv,qh,qh^*} = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^*$					
Summe der Normalkräfte aufgrund Erd- und Verkehrsl.	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*}$	-61,675	-288,507	-77,254	kN/m
$\Sigma N_{sonst} = N_{qw}^* + N_g + N_w + N_{pw}$					
Summe der Normalkräfte anderer Lasten	ΣN_{sonst}	0,033	-0,209	-0,033	kN/m
$\Sigma N' = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^* + N_g$					
Summe ohne Wasserfüllung und Druck	$\Sigma N'$	-61,641	-288,716	-77,287	kN/m
Enthaltener Stoßfaktor:					
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:		ϕ p_T		1,00 0,00	[-] kN/m ²

Abminderungsfaktor α_V nach Tabelle 14 für Verkehrslasten:

α_V 1,00 [-]

$$\text{dyn } p_V = \alpha_V \cdot p_T \quad (9.19)$$

Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung:

$\text{dyn } p_V$ 0,000 kN/m²

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da der Verdichtungsgrad < 97% ist (manuell gewählt oder nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 8; hier nur für B4 \geq 97%).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
$\text{dyn } M_{qv} = m_{qv} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m^2 \quad (9.20)$					

Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung
aufgrund dynamischer Last $\text{dyn } M_{qv}$ 0,000 0,000 0,000 kNm/m

$$M_{QK,dyn} = \text{dyn } M_{qv} + \text{dyn } M_{qh}$$

Summe der Momente aufgrund Verkehrslast	$M_{QK,dyn}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	--------------	-------	-------	-------	-------

	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
$\text{dyn } N_{qv} = n_{qv} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m \quad (9.20)$					

Normalkraft aufgrund vertikaler
Bodenspannung aufgrund dynamischer Last $\text{dyn } N_{qv}$ 0,000 0,000 0,000 kN/m

$$N_{QK,dyn} = \text{dyn } N_{qv} + \text{dyn } N_{qh}$$

Summe der Normalkräfte aufgrund Verkehrslast	$N_{QK,dyn}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
---	--------------	-------	-------	-------	------

1.2.3.2 Schnittkräfte , Langzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):

r 1,000 [-]

Mittlerer Radius	r_m	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
		172,40	172,40	172,40	mm
	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
	m_{qh}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
	m_{qh}^*	-0,181	0,208	-0,181	[-]
	m_g	0,381	-0,440	0,520	[-]
	m_w	0,190	-0,220	0,260	[-]

$$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_m^2 \cdot r \quad (8.01)$$

Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung M_{qv} 10,575 -10,737 11,142 kNm/m

$$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_m^2 \cdot r \quad (8.03)$$

Moment aufgrund Seitendruck M_{qh} -2,028 2,028 -2,028 kNm/m

$$M_{qh}^* = m_{qh}^* \cdot q_{h}^* \cdot r_m^2 \cdot r \quad (8.05a)$$

Moment aufgrund horiz.
Bettungsreaktionsdruck M_{qh}^* -2,067 2,375 -2,067 kNm/m

$$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot A_{rad} \cdot r_m^2 \cdot r \quad (8.07)$$

Moment aufgrund Eigengewicht M_g 0,009 -0,010 0,012 kNm/m

Moment aufgrund Wasserfüllung M_w 0,000 0,000 0,000 kNm/m

Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck M_{pw} 0,000 0,000 0,000 kNm/m

$$\Sigma M = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^* + M_{qw} + M_g + M_w + M_{pw}$$

Summe der Momente	ΣM	6,489	-6,344	7,060	kNm/m
$\Sigma M_{qv,qh,qh^*} = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^*$					
Summe der Momente aufgrund Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*}$	6,480	-6,334	7,048	kNm/m
$\Sigma M_{sonst} = M_{qw}^* + M_g + M_w + M_{pw}$					
Summe der Momente anderer Lasten	ΣM_{sonst}	0,009	-0,010	0,012	kNm/m
$\Sigma M' = M_{qv} + M_{qh} + M_{qh}^* + M_g$					
Summe ohne Wasserfüllung und Druck	$\Sigma M'$	6,489	-6,344	7,060	kNm/m
Mittlerer Radius					
	r_m	Scheitel 172,40	Kämpfer 172,40	Sohle 172,40	mm
	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
	n_{qh}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
	n_{qh}^*	-0,577	0,000	-0,577	[-]
	n_{qh}^*	-0,577	0,000	-0,577	[-]
	n_g	0,250	-1,571	-0,250	[-]
	n_w	0,625	0,215	1,375	[-]
	n_{pa}	-0,625	-0,215	-1,375	[-]
$N_{qv} = n_{pv} \cdot q_v \cdot r_m$ (8.02)					
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	6,346	-235,023	-6,346	kN/m
$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_m$ (8.04)					
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-47,053	0,000	-47,053	kN/m
$N_{qh}^* = n_{qh}^* \cdot q_h^* \cdot r_m$ (8.06a)					
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N_{qh}^*	-38,216	0,000	-38,216	kN/m
$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot A_{rad} \cdot r_m$ (8.08)					
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,033	-0,209	-0,033	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
$N_{pw} = P_i \cdot r_i - 10.000 \cdot h_w \cdot r_a$ (8.12)					
Normalkraft aufgrund WasserdruckInnenendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
$\Sigma N = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^* + N_{qw}^* + N_g + N_w + N_{pw}$					
Summe der Normalkräfte	ΣN	-78,890	-235,233	-91,648	kN/m
$\Sigma N_{qv,qh,qh^*} = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^*$					
Summe der Normalkräfte aufgrund Erd- und Verkehrsl.	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*}$	-78,923	-235,023	-91,615	kN/m
$\Sigma N_{sonst} = N_{qw}^* + N_g + N_w + N_{pw}$					
Summe der Normalkräfte anderer Lasten	ΣN_{sonst}	0,033	-0,209	-0,033	kN/m
$\Sigma N' = N_{qv} + N_{qh} + N_{qh}^* + N_g$					
Summe ohne Wasserfüllung und Druck	$\Sigma N'$	-78,890	-235,233	-91,648	kN/m

Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,00	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	p_T	0,00	kN/m ²
Abminderungsfaktor α_V nach Tabelle 14 für Verkehrslasten:	α_V	1,00	[-]

$$\text{dyn } p_V = \alpha_V \cdot p_T \quad (9.19)$$

Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung:	$\text{dyn } p_V$	0,000	kN/m ²
--	-------------------	-------	-------------------

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da der Verdichtungsgrad < 97% ist (manuell gewählt oder nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 8; hier nur für B4 \geq 97%).

	m_{qv}	Scheitel 0,261	Kämpfer -0,265	Sohle 0,275	[-]
$\text{dyn } M_{qv} = m_{qv} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m^2$					(9.20)

Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung aufgrund dynamischer Last	$\text{dyn } M_{qv}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	----------------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{QK,dyn} = \text{dyn } M_{qv} + \text{dyn } M_{qh}$$

Summe der Momente aufgrund Verkehrslast	$M_{QK,dyn}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	--------------	-------	-------	-------	-------

	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
$\text{dyn } N_{qv} = n_{qv} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m$					(9.20)

Normalkraft aufgrund vertikaler Bodenspannung aufgrund dynamischer Last	$\text{dyn } N_{qv}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
--	----------------------	-------	-------	-------	------

$$N_{QK,dyn} = \text{dyn } N_{qv} + \text{dyn } N_{qh}$$

Summe der Normalkräfte aufgrund Verkehrslast	$N_{QK,dyn}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
---	--------------	-------	-------	-------	------

1.2.4 Nachweise Kurzzeit

1.2.4.1 Spannungsnachweis

$$\sigma_{R,res} = \frac{|\sigma_{qv,qh,qh^*}| \cdot \bar{\sigma}_R + |\sigma_{sonst}| \cdot \sigma_{R,L}}{|\sigma_{qv,qh,qh^*}| + |\sigma_{sonst}|} \quad (9.01c)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	$\text{erf } \gamma_{RBZ}$	2,50	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	$\text{erf } \gamma_{RBD}$	2,50	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res}$	90,00	90,00	90,00	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res}$	150,00	150,00	150,00	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,107	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
$\sigma_{qv,qh,qh^*} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*}}{W_i}$					(8.13)

Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	σ_{qv,qh,qh^*}	19,942	-26,200	21,177	N/mm ²
--	-----------------------	--------	---------	--------	-------------------

$$\sigma_{sonst} = \frac{\sum N_{sonst}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{sonst}}{W_i} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	0,020	-0,026	0,025	N/mm ²
----------------------------------	------------------	-------	--------	-------	-------------------

$$\sigma = \sigma_{qv,qh,qh^*} + \sigma_{sonst}$$

Spannung gesamt	σ	19,962	-26,226	21,203	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	4,509	---	4,245	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	---	5,720	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:

α_{ka}	0,893	[-]
Scheitel	Kämpfer	Sohle

$$\sigma_{qv,qh,qh^*} = \frac{\Sigma N_{qv,qh,qh^*}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\Sigma M_{qv,qh,qh^*}}{W_a} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	σ_{qv,qh,qh^*}	-18,115	11,702	-19,622	N/mm ²
--	-----------------------	---------	--------	---------	-------------------

$$\sigma_{sonst} = \frac{\Sigma N_{sonst}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\Sigma M_{sonst}}{W_a} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	-0,015	0,014	-0,022	N/mm ²
----------------------------------	------------------	--------	-------	--------	-------------------

$$\sigma = \sigma_{qv,qh,qh^*} + \sigma_{sonst}$$

Spannung gesamt	σ	-18,130	11,716	-19,644	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	7,682	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	8,274	---	7,636	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Spannungsnachweises sind ausreichend.

1.2.4.2 Verformungsnachweis

Rechenmodus:

Verhältnis:	linear	
Verhältnis $I/(A \cdot r_m^2)$:	$I/(A \cdot r_m^2)$	0,00854 [-]
Verhältnis $I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa_Q$:	$I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa_Q$	0,01025 [-]

		q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert für Normalkräfte	c_v^N	-0,6830	-0,6810	-0,2470	[-]
Verformungsbeiwert für Querkräfte	c_v^Q	-0,3590	0,3350	0,2430	[-]

$$c' = c + \frac{I}{A \cdot r_m^2} \cdot [c^N + 2(1 + \nu) \cdot \kappa_Q \cdot c^Q] \quad (6.20)$$

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,1053	0,0870	0,0688	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0961	-0,0986	-0,0773	[-]

$$\Delta d_v = \frac{2 \cdot r_m}{8 S_0} \cdot (c_{v,qv} \cdot q_v + c_{v,qh} \cdot q_h + c_{v,qh^*} \cdot q_{h^*}) \quad (8.16a)$$

$$\Delta d_h = \frac{2 \cdot r_m}{8 S_0} \cdot (c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h + c_{h,qh^*} \cdot q_{h^*}) \quad (8.16b)$$

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	5,34	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	4,53	mm

$$\delta_{v,B} = \frac{\Delta d_v}{2 \cdot r_m} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (8.17)$$

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	1,55	%
Vorverformung (z. B. aus Fertigung, plastisch, Typ A):	$\delta_{v,A}$	1,00	%

$$\delta_{v,Ges} = \delta_{v,A} + \delta_{v,B}$$

Vertikale Gesamtverformung (Typ A + Typ B):
Zulässige Verformung:

$\delta_{v,Ges}$	2,55	%
zul δ_v	6,00	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

1.2.5 Nachweise Langzeit

1.2.5.1 Spannungsnachweis

$$\sigma_{R,res} = \frac{|\sigma_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\sigma}_R + |\sigma_{sonst}| \cdot \sigma_{R,L}}{|\sigma_{qv,qh,qh*}| + |\sigma_{sonst}|} \quad (9.01c)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:

erf γ_{RBZ}	2,50	[-]
erf γ_{RBD}	2,50	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res}$	50,00	50,00	50,00	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res}$	80,00	80,00	80,00	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:

α_{ki}	1,107	[-]
---------------	-------	-----

Scheitel Kämpfer Sohle

$$\sigma_{qv,qh,qh*} = \frac{\Sigma N_{qv,qh,qh*}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\Sigma M_{qv,qh,qh*}}{W_i} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{qv,qh,qh*}$	12,693	-18,062	13,699	N/mm ²
--	----------------------	--------	---------	--------	-------------------

$$\sigma_{sonst} = \frac{\Sigma N_{sonst}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\Sigma M_{sonst}}{W_i} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	0,020	-0,026	0,025	N/mm ²
----------------------------------	------------------	-------	--------	-------	-------------------

$$\sigma = \sigma_{qv,qh,qh*} + \sigma_{sonst}$$

Spannung gesamt	σ	12,713	-18,088	13,725	N/mm ²
-----------------	----------	--------	---------	--------	-------------------

Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	3,933	---	3,643	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	4,423	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:

α_{ka}	0,893	[-]
---------------	-------	-----

Scheitel Kämpfer Sohle

$$\sigma_{qv,qh,qh*} = \frac{\Sigma N_{qv,qh,qh*}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\Sigma M_{qv,qh,qh*}}{W_a} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{qv,qh,qh*}$	-12,829	6,884	-14,056	N/mm ²
--	----------------------	---------	-------	---------	-------------------

$$\sigma_{sonst} = \frac{\Sigma N_{sonst}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\Sigma M_{sonst}}{W_a} \quad (8.13)$$

Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	-0,015	0,014	-0,022	N/mm ²
----------------------------------	------------------	--------	-------	--------	-------------------

$$\sigma = \sigma_{qv,qh,qh*} + \sigma_{sonst}$$

Spannung gesamt	σ	-12,843	6,898	-14,078	N/mm ²
-----------------	----------	---------	-------	---------	-------------------

Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	7,248	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	6,229	---	5,683	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Spannungsnachweises sind ausreichend.

1.2.5.2 Verformungsnachweis

Rechenmodus:

Verhältnis:

Verhältnis $I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa \sim Q$:

linear

$I/(A \cdot r_m^2)$

0,00854 [-]

$I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa_Q$

0,01025 [-]

		q_v	q_h	q_h^*	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert für Normalkräfte	c_v^N	-0,6830	-0,6810	-0,2470	[-]
Verformungsbeiwert für Querkräfte	c_v^Q	-0,3590	0,3350	0,2430	[-]

$$c' = c + \frac{I}{A \cdot r_m^2} \cdot [c^N + 2(1 + \nu) \cdot \kappa_Q \cdot c^Q] \quad (6.20)$$

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,1053	0,0870	0,0688	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0961	-0,0986	-0,0773	[-]

$$\Delta d_v = \frac{2 \cdot r_m}{8S_0} \cdot (c_{v,qv} \cdot q_v + c_{v,qh} \cdot q_h + c_{v,qh^*} \cdot q_h^*) \quad (8.16a)$$

$$\Delta d_h = \frac{2 \cdot r_m}{8S_0} \cdot (c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h + c_{h,qh^*} \cdot q_h^*) \quad (8.16b)$$

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	7,36	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	5,86	mm

$$\delta_{v,B} = \frac{\Delta d_v}{2 \cdot r_m} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (8.17)$$

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	2,13	%
Vorverformung (z. B. aus Fertigung, plastisch, Typ A):	$\delta_{v,A}$	1,00	%

$$\delta_{v,Ges} = \delta_{v,A} + \delta_{v,B}$$

Vertikale Gesamtverformung (Typ A + Typ B):	$\delta_{v,Ges}$	3,13	%
Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

1.2.5.3 Nachweis Stabilität radial, linear

Erd- und Verkehrslasten

Rohrsteifigkeit:

\bar{S}_R

4.377

kN/m²

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot \zeta \cdot E_{2,\sigma} \quad (6.16)$$

Horizontale Bettungssteifigkeit:

S_{Bh}

22,596

N/mm²

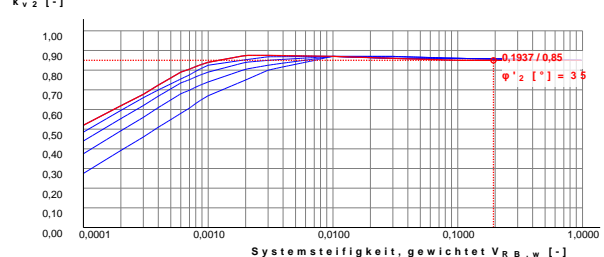
Systemsteifigkeit, gewichtet:

$V_{RB,w}$

0,1937

[-]

D 11: Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verke



Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verkehrslasten:

k_{v2}

0,85

[-]

Reibungswinkel in der Leitungszone:

$\phi'2$

35,000

°

$$\text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot \left(3 + \frac{1}{3 \cdot V_{RB,w}} \right) \cdot \bar{S}_R \quad (9.06b)$$

Kritische vertikale Gesamtlast:
 Vertikale Gesamtlast:

krit q_v	17.562,8	kN/m ²
q_v	1.363,24	kN/m ²

$$Y_{\text{Stab,rad}} = \frac{\text{krit } q_v}{q_v} \quad (9.07)$$

Sicherheit Stabilität, radial:
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:

$Y_{\text{Stab,rad}}$	12,88	[-]
erf y_{stab}	2,50	[-]

Der Stabilitätsnachweis ist erbracht.

1.2.5.4 Stabilitätsnachweis, nichtlinear

Der nichtlineare Stabilitätsnachweis entfällt, da $VRB > 1.0$ (biegesteifes Rohr) oder relative vertikale Verformung $< 6\%$.

1.2.5.5 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender Belastung

Nach Norm ist der dynamische Nachweis nicht notwendig (z.B. bei Straßenverkehrslasten $> 1,5 \text{ m}$).

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.