

3 Statische Berechnung von erdbetteten Rohrleitungen (ATV-DVWK-A 127) und Rohrsanierungen (ATV-M 127-2)

Hinweis: Die zu den Vorschriften A 127 und M 127-2 veröffentlichten Berichtigungen der Druckfehler sind in den Abschnitt 3 eingearbeitet.

3.1 Rohr, Boden, Einbau, Lasten

3.1.1 Rohr

Steinzeugrohre (Stz)

DN		100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	
F_N in kN/m	N	34	34	34	32	40	48	56	64	-	60	57	60	60	60	60	60	60	60
	H	-	-	-	48	60	72	70	80	72	80	96	84	96	-	-	-	-	-
d_i in mm	N	100	126	151	200	250	300	348	404	-	496	597	697	797	897	998	1198	1396	
	H	-	-	-	200	250	300	348	398	447	496	597	697	797	-	-	-	-	
d_a in mm	N	131	159	186	242	299	355	417	486	-	581	687	795	895	1008	1119	1320	1550	
	H	-	-	-	254	318	376	430	492	548	609	721	831	941	-	-	-	-	

Nach DIN EN 295 und Werknorm WN 295, N = Normallastrohr, H = Hochlastrohr.

Steinzeugrohre Creativ (Stz)

DN = d_i in mm	200	250
F_N in kN/m	32	40
d_a in mm	231	287
Tragfähigkeitsklasse	160	160

Bei Kreisquerschnitten mit konstanter Wanddicke wird die Biegezugfestigkeit σ_R in N/mm² wie folgt aus der Scheiteldruckkraft F_N in kN/m (d_m und s in mm) ermittelt:

$$\sigma_R = 0,9 \cdot F_N \cdot \frac{d_m}{s^2} \cdot \alpha_{ki} \quad \text{mit} \quad \alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m}$$

Steinzeug-Vortriebsrohre (Stz)

DN	150	200	250	300	400	500	600	700	800	1000
F_N in kN/m	60	80	100	108	132	120	96	84	96	95
d_i in mm	151	200	250	300	402	503	603	704	805	1007
d_a in mm	213	276	360	406	556	661	766	866	971	1182
F in kN	698	1164	2660	3282	7081	8460	9663	9802	11556	14013
F_1 in kN	175	291	665	820	1770	2115	2416	2451	2889	3503
F_2 in kN	210	350	880	1000	2200	2600	3000	3000	3000	3000

Nach DIN EN 295-7, F Vortriebsbemessungskraft, F_1 Vortriebskraft bei manueller Aufzeichnung ($\gamma = 4$), F_2 Vortriebskraft bei automatischer Aufzeichnung und Kontrolle ($\gamma = 3,2$).

Betonrohre mit Kreisquerschnitt (Bet)

DN = d_i in mm		100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400
F_N in kN/m	K, KF	24	26	27	28	30	32	35	38	41	43	-	-	-	-
	KW, KFW	-	-	-	-	50	63	80	98	111	125	138	152	181	207
d_a in mm	K, KF	144	198	252	310	380	490	600	720	840	950	-	-	-	-
	KW	-	-	-	-	400	530	670	800	930	1060	1190	1320	1580	1840
	KFW	-	-	-	-	400	500	640	770	900	1030	1160	1290	1540	1840
s_1	KF	22	24	26	30	40	45	50	60	70	75	-	-	-	-
s_2, s_3		22	24	26	30	40	45	60	70	80	90	-	-	-	-
s_1	KFW	-	-	-	-	50	50	70	85	100	115	130	145	170	200
s_2		-	-	-	-	50	65	85	100	115	130	145	160	190	220
s_3		-	-	-	-	65	90	110	130	150	170	195	215	260	300
σ_R in N/mm ²	K, KF	6,1	7,7	8,7	8,4	6,2	6,8	7,4	6,7	6,2	6,4	-	-	-	-
	KW	-	-	-	-	6,9	6,8	6,4	6,8	6,7	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8
	KFW	-	-	-	-	6,9	11,0	9,1	9,1	8,7	8,4	8,2	8,1	8,4	8,1

Nach DIN 4032, K = Betonrohr mit Kreisquerschnitt ohne Fuß, KF = Kreisquerschnitt mit Fuß; KW = Kreisquerschnitt ohne Fuß, wandverstärkt, KFW = Kreisquerschnitt mit Fuß, wandverstärkt; Wanddicken s_1 (Kämpfer), s_2 (Scheitel), s_3 (Sohle).

Betonrohre mit Eiquerschnitt (Bet)

$d_i \times h_i$ in mm		500×750	600×900	700×1050	800×1200	900×1350	1000×1500	1200×1800
F_N in kN/m	EF	61	69	75	77	80	83	86
$d_a \times h_a$ in mm		628×918	748×1096	868×1270	988×1444	1104×1618	1220×1792	1444×2120
s_1 in mm		64	74	84	94	102	110	122
s_2, s_3 in mm		84	98	110	122	134	146	160
σ_R in N/mm ²		9,5	9,6	9,4	8,8	8,7	8,6	8,6

Nach DIN 4032, EF = Betonrohr mit Eiquerschnitt mit Fuß, Wanddicken s_1 (Kämpfer), s_2 (Scheitel), s_3 (Sohle).

Rohre aus duktilem Gusseisen (GGG)

DN	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600
d_a in mm	118	144	170	222	274	326	378	429	532	635
s in mm	5	5	5	5	5,3	5,6	6	6,3	7	8,8
s_{ZM} in mm	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	5	5	5	5
S in kN/m ²	250	130	80	60	54	47	36	30	22	18

DN	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000
d_a in mm	738	842	945	1048	1255	1462	1668	1875	2082
s in mm	9,6	10,4	11,2	12	15,3	17,1	18,9	20,7	22,5
s_{ZM} in mm	6	6	6	6	7,5	9	9	9	9
S in kN/m ²	24	20	18	16	20	18	17	16	16

Nach DIN EN 598, erhöhte Wanddicken nach DIN EN 545; s_{ZM} Zementmörtelauskleidung (bei der Ermittlung der Rohrsteifigkeit darf s um $s_{ZM}/6$ erhöht werden), S Mindestringsteifigkeit (mit d_m ermittelt).

Vollwandrohre aus Polyvinylchlorid (PVC-U)

DN / OD = d_a in mm	110	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	
min s	SN 4	3,2	3,2	4,0	4,9	6,2	7,7	9,8	12,3	15,4	19,6	24,5
in mm	SN 8	3,2	3,7	4,7	5,9	7,3	9,2	11,7	14,6	18,4	-	-

Nach DIN EN 1401-1 (Formstücke: DIN V 19534), Nennringsteifigkeit SN in kN/m² (mit d_m ermittelt).

Vollwandrohre aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)

DN	100	100	125	125	150	150	200	200	250	250	
d_a in mm	110	125	125	140	160	180	200	225	250	280	
s in mm	Reihe 2 (SN 1)	3,5	-	3,9	4,4	5,0	-	6,2	7,0	7,8	8,7
	Reihe 3 (SN 2)	4,3	-	4,9	5,4	6,2	-	-	8,7	-	10,8
	Reihe 4 (SN 8)	-	7,1	-	8,0	-	10,2	-	12,8	-	15,9

DN	300	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	
d_a in mm	315	355	450	560	630	710	800	900	1000	1200	
s in mm	Reihe 2 (SN 1)	9,8	-	14,0	17,4	19,6	22,1	24,9	28,0	31,1	37,3
	Reihe 3 (SN 2)	-	13,7	17,4	21,6	24,3	27,4	30,8	34,7	38,5	46,2
	Reihe 4 (SN 8)	-	20,1	25,5	31,7	35,7	40,2	45,3	-	-	-

Nach DIN 19537 und DIN 8074, Nennringsteifigkeit SN in kN/m² (mit d_m ermittelt).

Profilierte Rohre SN 8 aus Polypropylen (PP) - ULTRA RIB 2

DN	150	200	250	300	400	500
d_i in mm	148,6	196,4	245,3	293,1	394,8	491,5
d_a in mm	170	225	280	335	450	560
A in mm ² /mm	3,93	5,42	6,91	8,56	9,07	12,12
I in mm ⁴ /mm	24,16	56,76	110,90	191,04	459,55	894,76
W_i in mm ³ /mm	8,44	15,85	25,55	37,45	59,22	93,10
W_a in mm ³ /mm	3,63	6,74	11,48	16,75	29,19	47,36
z_s in mm	2,86	3,58	4,34	5,10	7,76	9,61

Angegeben sind die für die statische Berechnung erforderlichen Querschnittswerte, vgl. ATV-A 127, Abschnitt 9.6.

z_s Abstand der Schwerachse der Rohrwand, von innen gemessen

Nach Kunststoffrohrhandbuch und Firmenangaben, Nennringsteifigkeit SN in kN/m² (mit d_m ermittelt).

Weitere profilierte, kerngeschäumte und mineralverstärkte Rohre s. Kunststoffrohrhandbuch [13.66].

Rohre aus glasfaserverstärktem Kunststoff (UP-GF), geschleudert

Durchmesserreihe 2, DN		200	250	300	350	400	500
d_a in mm		220,8	272,6	324,5	376,1	427,1	530,2
s in mm	SN 5000 in N/m ² = SN 5 in kN/m ²	4,9	5,7	6,6	7,5	8,3	10,0
	SN 10 000 in N/m ² = SN 10 in kN/m ²	5,8	6,9	8,0	9,1	10,2	12,3

Durchmesserreihe 1, DN		600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000
d_a in mm		616,4	718,8	820,4	924,1	1026,1	1229	1439	1638	1842	2047
s in mm	SN 5000 in N/m ²	11,5	13,2	14,9	16,6	18,3	21,7	25,5	28,5	31,9	35,3
	SN 10 000 in N/m ²	14,1	16,3	18,4	20,6	22,8	27,0	31,5	35,7	40,0	44,2

Nach DIN 16 869 und 19 565, Nennringsteifigkeit SN mit d_m ermittelt;
 GFK-Rohre, gewickelt nach DIN 16 868 s. Kunststoffrohrhandbuch.

Tafel 13.79 Kennwerte der Rohrwerkstoffe

Rohrwerkstoff	Wichte γ_R	Rechenwert des Elastizitätsmoduls E_R		Rechenwert der Biegezugfestigkeit σ_R		Schwingbreite $2\sigma_A$
	kN/m ³	N/mm ²		N/mm ²		N/mm ²
Steinzeug	22	50 000		aus F_N		EN 295-1
Beton	24	30 000		6,0 oder aus F_N		0,4 · β_{RBZ}
Stahlbeton	25	30 000		DIN 4035		80 ¹⁾
Spannbeton	25	39 000		DIN 4227		DIN 4227
Gusseisen-(ZM) duktil	70,5	170 000		550		135
Gusseisen Lamellengraphit	71,5	100 000		350, bei DN ≥ 250: 332		70
Stahl-(ZM)	77	210 000		336		ATV-A 161
		Kurzzeit E_{RK}	Langzeit E_{RL} ²⁾	Kurzzeit σ_{RK}	Langzeit σ_{RL} ³⁾	
PVC-U	14	3000	1500	90	50	vgl. A 127, Tab. 3 Fußnote 18
PP-B und PP-H	9	1250	312	39	17	
PP-R	9	800	200	27	14	
PE-HD	9,4	800	160	21	14	
UP-GF	17,5	Rechenwerte in N/m ²		Rechenwerte von $\Delta d_{Bruch} / d_m$ in % ⁴⁾		
Nennringsteifigkeit	SN 1250	S_{OK}	S_{OL}			vgl. A 127, Tab. 3 Fußnote 18
	SN 2500	1250	625	30	18	
	SN 5000	2500	1250	25	15	
	SN 10 000	5000	2500	20	12	
		10 000	5000	15	9	

¹⁾ BSt 500 P. ²⁾ Langzeitwert für 2 Jahre (Kriechfaktor: S_{OK} / S_{OL}).
³⁾ Bei Druckrohren gilt für den Lastfall Innendruck die Vergleichsspannung σ_v ; sie wird bei Kunststoffrohren aus dem Zeitstandinnendruckversuch ermittelt [13.66].
⁴⁾ Hieraus folgt der Rechenwert der Randdehnung $\epsilon_R = \pm 4,28 \cdot s / d_m \cdot (\Delta d_{Bruch} / d_m)$.

$$S_0 = \frac{E_R \cdot I}{d_m^3} \quad \text{Rohrsteifigkeit für Rohre mit beliebigem Wandaufbau (z. B. profiliert)}$$

Für Rohre mit glatter Wand gilt das Flächenmoment 2. Grades:

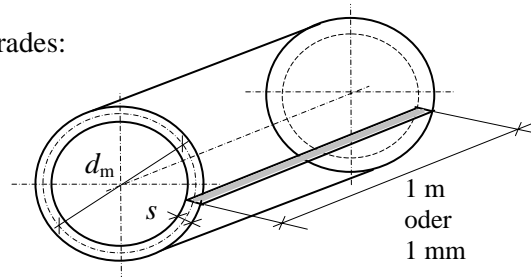
$$I = 1 \cdot s^3 / 12 \quad \text{z. B. in mm}^4/\text{mm und die}$$

$$\text{Rohrsteifigkeit } S_0 = \frac{E_R}{12} \cdot \left(\frac{s}{d_m} \right)^3$$

(gefordert ist min $S_{OL} = 0,375 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$)

Bei Kunststoffrohren wird unterschieden in:

$$\text{Kurzzeit-Rohrsteifigkeit } S_{OK} = \frac{E_{RK} \cdot I}{d_m^3} \quad \text{und} \quad \text{Langzeit-Rohrsteifigkeit } S_{OL} = \frac{E_{RL} \cdot I}{d_m^3}$$



3.1.2 Boden

Tafel 13.80 Bodengruppen – Richtwerte

Boden- gruppe	Wichte	Wichte unter Auf- trieb γ_B'	Innerer Rei- bungswinkel ϕ'	Verformungsmodul E_B in N/mm ² bei Verdichtungsgrad D_{Pr} in %						Expo- nent z	zeitabh. Verhalten f_1
	γ_B	γ_B'		85	90	92	95	97	100		
	kN/m ³	kN/m ³	°							-	-
G1	20	11	35	2	6	9	16	23	40	0,4	1,0
G2	20	11	30	1,2	3	4	8	11	20	0,5	1,0
G3	20	10	25	0,8	2	3	5	8	13	0,6	0,8
G4	20	10	20	0,6	1,5	2	4	6	10	0,7	0,5

G1: Nichtbindige Böden (GE, GW, GI, SE, SW, SI)

G2: Schwachbindige Böden (GU, GT, SU, ST)

G3: Bindige Mischböden, Schluff (z. B. bindiger Sand und Kies, bindiger, steiniger Verwitterungs-
boden, GU, GT, SU, ST, UL, UM)

G4: Bindige Böden (z. B. Ton, Lehm, TL, TM, TA, OU, OT, OH, OK)

(...) Kurzzeichen nach DIN 18 196. Für Bodenarten, die sich nicht in die Tafel 13.80 einordnen lassen (z. B. Müll, organische Böden, Schüttgüter), sind die Rechenwerte zu bestimmen.

Gleichung für die Verformungsmoduln in Tafel 13.80: $E_B = \frac{40}{G} \cdot e^{-0,188 \cdot (100 - D_{Pr})}$

mit $G = 1$ bis 4 für die Bodengruppe. Werte für $E_B > 2$ N/mm² sind ganzzahlig zu runden.

Bei Dammschüttung mit Überdeckungen $h > 5$ m ist eine auflastabhängige Erhöhung des Verfor-
mungsmoduls zulässig: $E_{B,\sigma} = E_B \cdot (p_E / 100)^z$ mit p_E in kN/m², z und E_B nach Tafel 13.80.

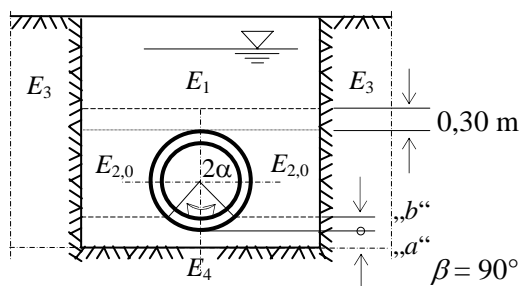


Abb. 13.80a) Bodenzonen im Rohrgraben

Verformungsmoduln des Bodens, Bodenzonen:

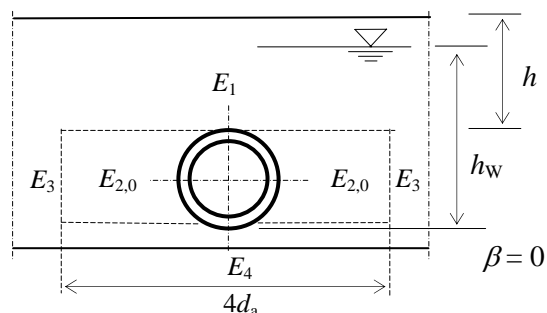
E_1 Überschüttung über dem Rohrscheitel
[Hauptverfüllung]

$E_{2,0}$ Leitungszone des Rohres (Grundwert)
[Seitenverfüllung]
Ausführung bis 0,3 m über Rohrscheitel,
rechnerischer Ansatz bis Rohrscheitel

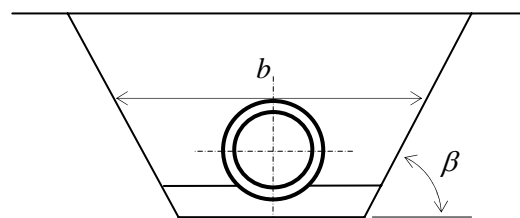
E_3 anstehender Boden neben dem Graben
(bei Dammschüttung: neben der Rohrleitungszone
eingebauter Boden)

E_4 Boden unter dem Rohr (Baugrund)
[„a“ = untere, „b“ = obere Bettungsschicht]

in [...]: Bezeichnungen nach DIN EN 1610



b) Bodenzonen bei Dammschüttung



c) Bodenzonen bei geböschtem Graben

3.1.3 Einbaubedingungen

Grundlage einer statischen Berechnung ist der Einbau der Rohrleitung nach DIN EN 1610 und ATV-A 139 – mit entsprechender Ausführung des Rohrauflegers und der Einbettung.

Tafel 13.81a Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610

Nennweite	Mindestgrabenbreite in m			Graben- tiefe in m	Mindestgraben- breite in m
	verbauter Graben	unverbauter Graben			
		$\beta > 60^\circ$	$\beta \leq 60^\circ$		
DN \leq 225	OD + 0,40	OD + 0,40		< 1,00	-
225 < DN \leq 350	OD + 0,50	OD + 0,50	OD + 0,40	1,00 $\leq t$ \leq 1,75	0,80
350 < DN \leq 700	OD + 0,70	OD + 0,70	OD + 0,40	1,75 < t \leq 4,00	0,90
700 < DN \leq 1200	OD + 0,85	OD + 0,85	OD + 0,40	> 4,00	1,00
DN > 1200	OD + 1,00	OD + 1,00	OD + 0,40		

Hinweise: OD ist der Außendurchmesser (outer diameter). Die für die statische Berechnung benötigte Grabenbreite b ergibt sich, wenn zur Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610 die doppelte Verbautdicke addiert wird. Bei geböschten Gräben wird die Mindestgrabenbreite in DIN EN 1610 in der Sohle angegeben, in der statischen Berechnung ist b die Breite in Rohrscheitelebene.

Tafel 13.81b Überschüttungsbedingungen

	Definition	Erddruck- beiwert K_1	Wandreibungs- winkel δ
A1	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung (ohne Nachweis des Verdichtungsgrades); gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau)	0,5	$2/3 \varphi'$
A2	Senkrechter Verbau innerhalb des Rohrgrabens mit Kanaldielen, die erst nach der Verfüllung gezogen werden. Verbauplatten oder -geräte, die bei der Verfüllung des Grabens schrittweise entfernt werden. Unverdichtete Grabenverfüllung. Einspülen der Verfüllung (nur geeignet bei Böden der Gruppe G1)	0,5	$1/3 \varphi'$
A3	Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Spundwänden, Leichtspundprofilen, Holzbohlen, Verbauplatten oder -geräten, die erst nach dem Verfüllen entfernt werden.	0,5	0 ($\kappa = \kappa_0 = 1$)
A4	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung mit Nachweis des nach ZTVE-StB erforderlichen Verdichtungsgrades; gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau). A4 ist nicht anwendbar bei Böden der Gruppe G4.	0,5	φ'

Tafel 13.81c Einbettungsbedingungen

	Definition	Beiwert α_{Bi}
B1	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden bzw. lagenweise in der Dammschüttung verdichtete Einbettung (ohne Nachweis des Verdichtungsgrades); gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau)	2/3
B2	Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Kanaldielen, die bis zur Grabensohle reichen und erst nach der Verfüllung und Verdichtung gezogen werden, Verbauplatten und -geräte unter der Voraussetzung, dass die Verdichtung des Bodens nach dem Ziehen des Verbaus erfolgt.	1/3
B3	Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Spundwänden oder Leichtspundprofilen und Verdichtung gegen den Verbau, der bis unter die Grabensohle reicht.	0
B4	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden bzw. lagenweise in der Dammschüttung verdichtete Einbettung mit Nachweis des nach ZTVE-StB erforderlichen Verdichtungsgrades. B4 ist nicht anwendbar auf Böden der Gruppe G4.	1

Tafel 13.82a Verformungsmoduln E_1 und $E_{2,0}$ in Abhängigkeit von der Einbaubedingung

Überschüttungsbedingung Einbettungsbedingung		A1 B1		A2 und A3 B2 und B3		A4 B4	
Verdichtungsgrad D_{Pr} in % Verformungsmodul E in N/mm ²		D_{Pr}	$E_1, E_{2,0}$	D_{Pr}	$E_1, E_{2,0}$	D_{Pr}	$E_1, E_{2,0}$
Bodengruppe	G1	95	16	90	6	97	23
	G2	95	8	90	3	97	11
	G3	92	3	90	2	95	5
	G4	92	2	90	1,5	-	-

Bei gleichwertiger Verdichtung des Bodens neben und über dem Rohr gilt $E_{2,0} = E_1$. $E_{2,0}$ darf nicht größer als E_1 angenommen werden, ausgenommen bei Bodenaustausch in der Leitungszone oder Einbettungsbedingung B4. Bei Gräben mit zusätzlicher Dammschüttung und einer Sohlbreite $b < 3 d_a$ darf E_2 nicht größer als E_3 angesetzt werden.

Bei Einbau im Damm gilt in der Regel $E_1 = E_{2,0} = E_3$, jedoch ist auch $E_{2,0} > E_3$ möglich.

Abminderung des Grundwertes $E_{2,0}$ nach Tafel 13.82a auf den wirksamen Verformungsmodul E_2 :

- bei schmalem Graben $1 < b/d_a < 4$: $\alpha_B = 1 - (4 - b/d_a) \cdot (1 - \alpha_{Bi}) / 3 \leq 1$ (s. Tafel 13.82b) mit α_{Bi} nach Tafel 13.81c
- für Kriechen des Bodens (G3 + G4): $f_1 \leq 1$ mit f_1 nach Tafel 13.80

- für Grundwassereinfluss: $f_2 = \frac{D_{Pr} - 75}{20} \leq 1$

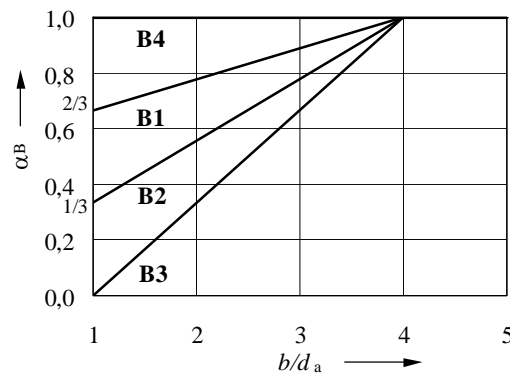
→ $E_2 = \alpha_B \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot E_{2,0}$

horizontale Bettungssteifigkeit $S_{Bh} = 0,6 \cdot \zeta \cdot E_2$

mit $\zeta = \frac{1,667}{\Delta f + (1,667 - \Delta f) \cdot E_2 / E_3}$

und $\Delta f = \frac{b/d_a - 1}{0,982 + 0,283 \cdot (b/d_a - 1)}$

Tafel 13.82b Abminderungsfaktor α_B für $E_{2,0}$ zur Berücksichtigung des schmalen Grabens



ζ = Faktor für E_2 zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Bodensteifigkeiten in den Bodenzonen 2 und 3; für $E_2 = E_3$ gilt: $\zeta = 1$, für $E_2 > E_3$ gilt: $\zeta < 1$, für $E_2 < E_3$ gilt: $\zeta > 1$.

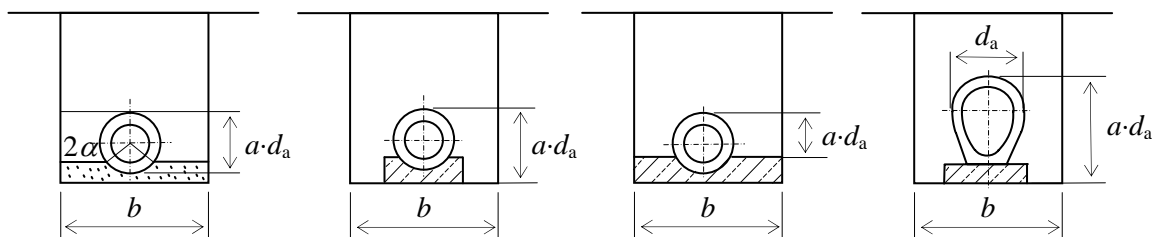
Steifigkeitsverhältnis (Rohrsteifigkeit / horizontale Bettungssteifigkeit in der Leitungszone):

$V_{RB} = 8 \cdot S_0 / S_{Bh} \leq 1,0 \rightarrow$ Berechnung als **biegeweiches** Rohr

$> 1,0 \rightarrow$ Berechnung als **biegesteifes** Rohr

In Zweifelsfällen ist das Rohr sowohl biegeweich als auch biegesteif zu betrachten.

3.1.4 Auflagerausbildung, Ausladung



Ausführung: Sandbettung
relative Ausladung: $a = 1$
Lagerungsfall: I

schmales Betonlager
 $a > 1$
II

breites Betonlager
 $a < 1$
II

Eiprofil mit Sockel
 $a > 1$
-

Definition der Ausladung $a \cdot d_a$:

„Höhe der Bodenschicht neben dem Rohr, die gegenüber der vertikalen Rohrverformung abweichende Setzungen erfahren kann“.

Weitere Beispiele für $a > 1$: auf Pfahljochen gelagerte Rohre, seitlich unter die Rohrsohle gerammter Spundverbau. Im letzteren Fall kann a mit ca. 2 abgeschätzt werden, vgl. auch [13.65] und [13.67].

Wirksame relative Ausladung $a' = a \cdot E_1 / E_2 \geq 0,26$ (a' beeinflusst den Konzentrationsfaktor, s. 3.2.1)

Tafel 13.83a
Auflagerwinkel 2α

biegesteifes Rohr		biegeweiches Rohr	
Lagerungsfall	2α abhängig von	Einbettingsbedingung	2α
I	Ausführung	B1, B4	180°
II	Betonummantelung	B2, B3	120°

3.1.5 Lastfälle

- **Erdlasten, Oberflächenlast (Aufschüttung p_0)**

$$p_E = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h + \kappa_0 \cdot p_0 \quad \text{in kN/m}^2$$

mit κ und $\kappa_0 =$ Abminderungsfaktor der statischen Erdlasten und Oberflächenlast nach der Silotheorie (darf nur angesetzt werden, wenn die Grabenwände auf Dauer erhalten bleiben; sind spätere Aufgrabungen möglich, so ist $\kappa = \kappa_0 = 1$ zu setzen).

$$\text{mit } \kappa = \frac{1 - e^{-2 \cdot (h/b) \cdot K_1 \cdot \tan \delta}}{2 \cdot (h/b) \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \leq 1 \quad \text{und} \quad \kappa_0 = e^{-2 \cdot (h/b) \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \leq 1$$

Voraussetzung für $\kappa < 1$: $E_1 \leq E_3$, Voraussetzung für $\kappa_0 < 1$: $E_1 < E_3$

Bei der Überschüttungsbedingung A3 mit $\delta = 0^\circ$ folgt $\kappa = \kappa_0 = 1$.

Bei Gräben mit geböschten Wänden (Böschungswinkel β) ist κ bzw. κ_0 durch κ_β zu ersetzen:

$$\kappa_\beta = 1 - \frac{\beta}{90} + \kappa \cdot \frac{\beta}{90}$$

Für den Grenzfall der Dammschüttung folgt $\kappa = \kappa_0 = 1$.

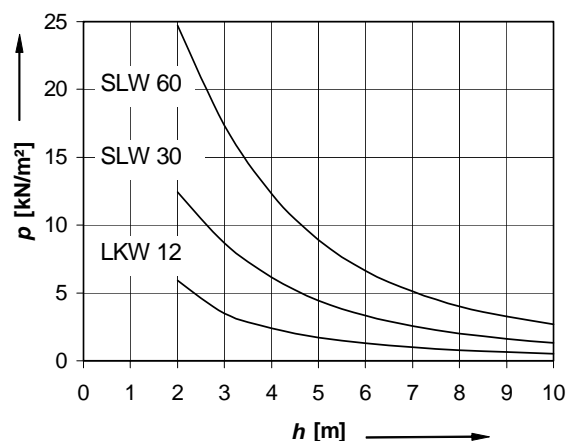
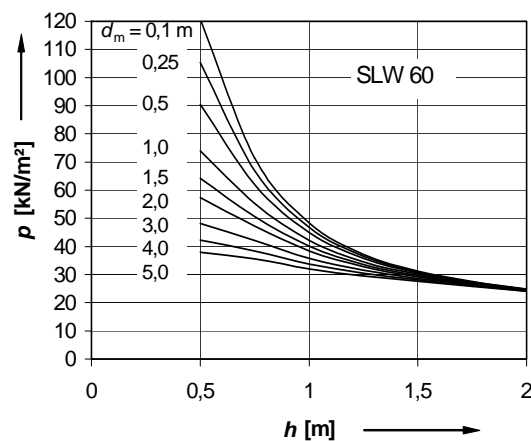
- **Straßenverkehrslast**

$$p_V = \varphi \cdot p \quad \text{in kN/m}^2$$

p für Regelfahrzeug SLW 60 s. Tafel 13.83b,c (Stoßbeiwert $\varphi = 1,2$)

p für Regelfahrzeuge SLW 30 ($\varphi = 1,4$) und LKW 12 ($\varphi = 1,5$) $h \leq 2\text{m}$, $h > 2\text{m}$ s. A 127, D2b,c Radlasten und Aufstandsflächen s. DIN 1072.

Tafel 13.83b,c Lasten in Rohrscheitelebens infolge Straßenverkehrslast SLW 60



- **Eisenbahnverkehrslast** nach DS 804 der DB AG

$$p_V = \varphi \cdot p \text{ in kN/m}^2 \quad \text{mit } \varphi = 1,40 - 0,1 \cdot (h - 0,60) \geq 1 \quad (h \text{ in m})$$

Tafel 13.84a Lasten in Rohrscheitelebene infolge Eisenbahnverkehrslast UIC 71

h in m		1,5	2,75	5,5	≥ 10
p in kN/m ²	1 Gleis	48	39	20	10
	≥ 2 Gleise	48	39	26	15

Zwischen den angegebenen Werten darf linear interpoliert werden.

Es gilt die Mindestüberdeckung $h = 1,5 \text{ m}$ oder $h = d_a$. Ansatz von h ab Oberkante Schwelle für die lastverteilende Wirkung von Schienen und Schwellen.

- **Flugzeugverkehrslast** (Näheres s. ATV-A 127)
- **Konzentrierte Flächenlast** p_K

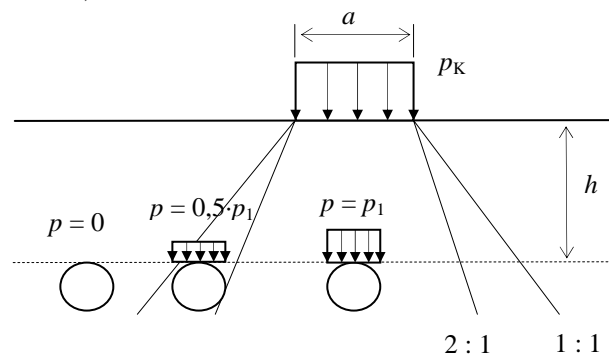
aus Fundamenten etc.:

Aufstandsfläche: $a \cdot b$

Abstand zum Rohrscheitel: h

$$p_1 = p_K \cdot \frac{a \cdot b}{(a + h) \cdot (b + h)}$$

In Rohrlängsrichtung darf die mittragende Wirkung berücksichtigt werden, vgl. [13.64].



3.2 Spannungen, Verformungen, Stabilität

3.2.1 Lastverteilung am Rohrumfang

Durch unterschiedliche Verformungsfähigkeit des Rohres und des Bodens neben dem Rohr werden die Bodenspannungen p_E in Rohrscheitelebene umgelagert, s. Abb. Das Maß der Umlagerung wird durch die Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B beschrieben (vgl. die Theorie des schubsteifen Balkens nach Leonhardt [13.63] und Abb. 13.84).

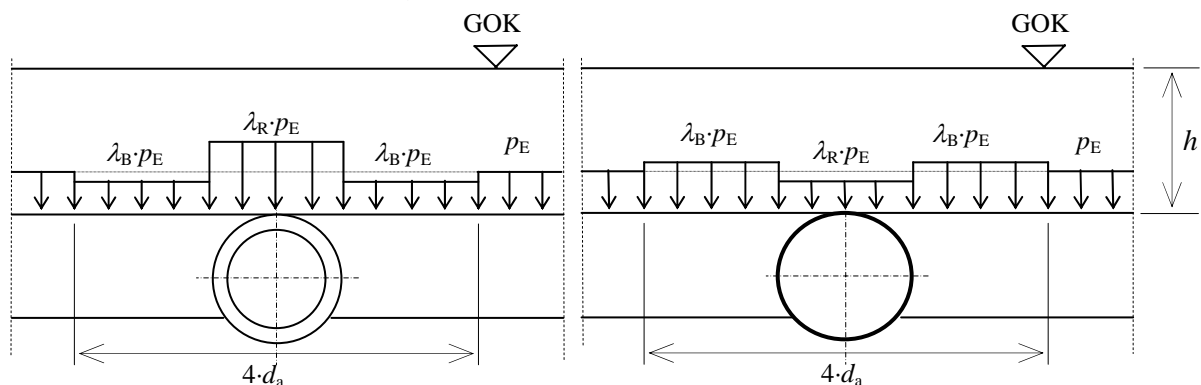
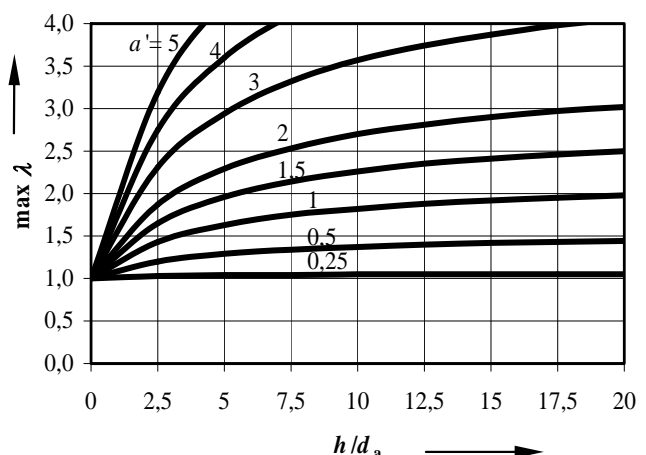


Abb. 13.84a Verteilung der vertikalen Bodenspannungen in Rohrscheitelebene (Dammbedingung)

Tafel 13.84b Konzentrationsfaktor max λ für $E_4/E_1 = 10$ und Dammbedingung

Bei biegesteifen Rohren ($V_{RB} > 1$) ist $\lambda_R = \max \lambda$, die weitere Berechnung bis λ_R ist zu überspringen.



Bei biegeweichen Rohren ($V_{RB} \leq 1$) wird zunächst die vertikale Bettungssteifigkeit ermittelt:

$$S_{Bv} = \frac{E_2}{a}$$

Für die Verformungsbeiwerte der folgenden Gleichungen genügen in der Regel die Biegemomentenanteile c . Lediglich bei profilierten und dickwandigen biegeweichen Rohren können die Kriterien in Tafel 13.85 a maßgebend werden – für den Verformungsnachweis ist statt c der Verformungsbeiwert

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

mit $\kappa_Q \approx A/A_{Steg}$ für profilierte Rohre, $\kappa_Q = 1,2$ für glattwandige Rohre, und $\nu = 0,35$ für Kunststoffe zu verwenden. Für die Ermittlung der Lastverteilung am Rohrumfang genügen c und c^Q .

Tafel 13.85a Verformungsbeiwerte

Beiwerte c für Biegemomentenverformungen								
Auflagerwinkel 2α	vertikal				horizontal			
	$c_{v,qv}$	$c_{v,qh}$	$c_{v,w}$	c_{v,qh^*}	$c_{h,qv}$	$c_{h,qh}$	$c_{h,w}$	c_{h,qh^*}
120°	-0,0893		-0,0477		+0,0891		+0,0476	
180°	-0,0833	+0,0833	-0,0417	+0,0640	+0,0833	-0,0833	+0,0418	-0,0658
Beiwerte c^Q für Querkraftverformungen bei $\kappa_Q \cdot I / (A \cdot r_m^2) > 0,001$								
120°	-0,359				+0,354			
180°	-0,335	+0,335	-	+0,243	+0,335	-0,335	-	-0,274
Beiwerte c^N für Normalkraftverformungen bei $I / (A \cdot r_m^2) > 0,001$								
120°	-0,683				-0,352			
180°	-0,648	-0,681	-	-0,247	-0,338	-0,684	-	-0,437

Reaktionsdruckbeiwert:
$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

Beiwert für vertikale Verformung:
$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*$$

Steifigkeitsverhältnis:
$$V_S = \frac{8 \cdot S_0}{|c_v^*| \cdot S_{Bv}}$$

Beiwert für Verformungen:
$$K' = - \frac{c_{v,qh} + \frac{c_{h,qh}}{c_{h,qv}} \cdot c_{v,qh^*} \cdot K^*}{c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*}$$

Hinweis: Bei $2\alpha = 180^\circ$ sowie vernachlässigbaren N - und Q -Verformungen gilt $K'=1$.

Tafel 13.85b Erddruckbeiwert

Konzentrationsfaktor der Bodenspannungen über dem Rohr (biegeweiches Rohr):

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

Boden- gruppe	Erddruckbeiwert K_2	
	biegesteifes Rohr	biegeweiches Rohr
G1	0,5	0,4
G2	0,5	0,3
G3	0,5	0,2
G4	0,5	0,1

Einfluss der Grabenbreite bei $b / d_a < 4$:

$$\lambda_{RG} = \frac{\lambda_R - 1}{3} \cdot \frac{b}{d_a} + \frac{4 - \lambda_R}{3}$$

oberer und unterer Grenzwert des Konzentrationsfaktors λ_{RG} : $\lambda_{fo} = 4,0 - 0,15 \cdot h \geq 2,5$ mit h in m

$$\lambda_{fu} = \frac{1 - e^{-\frac{2}{d_a} \cdot K_1 \cdot \tan \varphi'}}{2 \frac{h}{d_a} \cdot K_1 \cdot \tan \varphi'} \quad (\text{mit } K_1 = 0,5 \text{ und } \delta = \varphi' \text{ für Überschüttungsbedingung A4})$$

Konzentrationsfaktor der Bodenspannungen neben dem Rohr: $\lambda_B = (4 - \lambda_R) \cdot \frac{1}{3}$

Spannungen am Rohrumfang:

- Vertikale Gesamtbelastung des Rohrscheitels:
 $q_v = \lambda_{RG} \cdot p_E + p_V$ in kN/m²
- Seitendruck neben dem Rohr:
 $q_h = K_2 \cdot (\lambda_B \cdot p_E + \gamma_B \cdot \frac{d_a}{2})$ in kN/m²
(Hinweis: Auf der sicheren Seite wird aus der Verkehrsbelastung p_v kein horizontaler Erddruck angesetzt.)

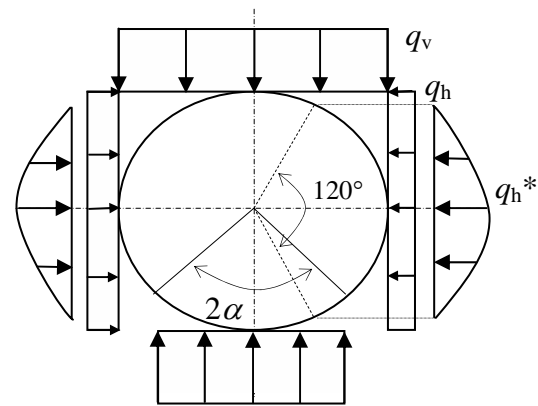


Abb. 13.86 Spannungen am Rohrumfang

- Horizontaler Bettungsreaktionsdruck (biegeweiche Rohre):
 $q_h^* = \frac{c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h}{V_{RB} - c_{h,qh}^*}$ in kN/m²
- Bettungsreaktionsdruck aus dem Lastfall Wasserfüllung (biegeweiche Rohre):
 $q_{hw}^* = \frac{c_{h,w} \cdot q_w}{V_{RB} - c_{h,qh}^*}$ in kN/m²
mit $q_w = 1,0 \cdot r_i^2 \cdot \pi \cdot \gamma_w / d_m$

3.2.2 Schnittgrößen, Rohrspannungen

Tafel 13.86a Beiwerte zur Ermittlung der Schnittgrößen für Kreisrohre, LF I und III

Lagerungsfall / 2α	Schnittstelle	Biegemomentenbeiwerte					Normalkraftbeiwerte				
		m_{qv}	m_{qh}	m_{qh}^*	m_g	m_w	n_{qv}	n_{qh}	n_{qh}^*	n_g	n_w
I/60°	Scheitel	+0,286	-0,250	-0,181	+0,459	+0,229	+0,080	-1,0	-0,577	+0,417	+0,7085
	Kämpfer	-0,293	+0,250	+0,208	-0,529	-0,264	-1,000	0	0	-1,571	+0,2158
	Sohle	+0,377	-0,250	-0,181	+0,840	+0,420	-0,080	-1,0	-0,577	-0,417	+1,2921
I/90°	Scheitel	+0,274	-0,250	-0,181	+0,419	+0,210	+0,053	-1,0	-0,577	+0,333	+0,667
	Kämpfer	-0,279	+0,250	+0,208	-0,485	-0,243	-1,000	0	0	-1,571	+0,215
	Sohle	+0,314	-0,250	-0,181	+0,642	+0,321	-0,053	-1,0	-0,577	-0,333	+1,333
I/120°	Scheitel	+0,261	-0,250	-0,181	+0,381	+0,190	+0,027	-1,0	-0,577	+0,250	+0,625
	Kämpfer	-0,265	+0,250	+0,208	-0,440	-0,220	-1,000	0	0	-1,571	+0,215
	Sohle	+0,275	-0,250	-0,181	+0,520	+0,260	-0,027	-1,0	-0,577	-0,250	+1,375
III/180°	Scheitel	+0,250	-0,250	-0,181	+0,345	+0,172	0	-1,0	-0,577	+0,167	+0,583
	Kämpfer	-0,250	+0,250	+0,208	-0,393	-0,196	-1,000	0	0	-1,571	+0,215
	Sohle	+0,250	-0,250	-0,181	+0,441	+0,220	0	-1,0	-0,577	-0,167	+1,417

Hinweise:

Positive Biegemomente erzeugen auf der Rohrinneenseite Zugspannungen, negative Biegemomente Druckspannungen.

Der Lagerungsfall III entspricht Fall I bei $2\alpha = 180^\circ$.

Schnittgrößenbeiwerte von Betonrohren mit Fuß und Eiquerschnitt s. [13.64] oder [13.67].

Schnittgrößenbeiwerte für den Lagerungsfall II (mit Beton ummantelte Kreisrohre) s. A 127, Tabelle T3 II, Ausführung nach ATV-A 139.

Schnittgrößen aus den **Einzellastfällen** (M in kNm/m = 1000 Nmm/mm, N in kN/m = N/mm):

- Vertikale Gesamtbelastung q_v :

$$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_m^2$$

$$N_{qv} = n_{qv} \cdot q_v \cdot r_m$$
- Horizontaler Bettungsreaktionsdruck q_h^* aus Erdlasten:

$$M_{qh^*} = m_{qh^*} \cdot q_h^* \cdot r_m^2$$

$$N_{qh^*} = n_{qh^*} \cdot q_h^* \cdot r_m$$
- Horizontaler Bettungsreaktionsdruck q_{hw}^* aus Wasserfüllung:

$$M_{qw^*} = m_{qw^*} \cdot q_{hw}^* \cdot r_m^2$$

$$N_{qw^*} = n_{qw^*} \cdot q_{hw}^* \cdot r_m$$
- Eigenlast g :

$$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2$$

$$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m$$
- Seitendruck q_h :

$$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_m^2$$

$$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_m$$
- Wasserfüllung:

$$M_w = m_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^3$$

$$N_w = n_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^2$$
- innerer/äußerer Wasserdruck p_a/p_i (bei Druckrohren gilt $p_i > 0$):

$$M_{pw} = (p_i - p_a) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \right)$$

Für dünnwandige Rohre gilt $M_{pw} \approx 0$.

$$N_{pw} = p_i \cdot r_i - p_a \cdot r_a$$
 (Kesselformel)

Die maßgebende **Lastfallkombination** ergibt sich aus Oberflächenlast, Erdlast (bei minimalem Grundwasserstand), Verkehr, Wasserfüllung und Eigenlast. Es folgen die Spannungen

$$\sigma_{i,a} = \frac{\sum N}{A} \pm \alpha_{k,i,a} \cdot \frac{\sum M}{W} \quad \text{mit } A = 1 \cdot s \text{ in mm}^2/\text{mm} \quad \text{und } W = 1 \cdot s^2/6 \text{ in mm}^3/\text{mm}$$

mit den Beiwerten $\alpha_{k,i} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m}$ (innen) und $\alpha_{k,a} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m}$ (außen) für die Krümmung der Rohrwand. Die Rohrspannungen sind im Scheitel, in den Kämpfern und der Sohle zu ermitteln.

Bei profilierten Rohren sind die Spannungen auf der Innen- und Außenseite mit den dazugehörigen Widerstandsmomenten zu berechnen:

$$\sigma_i = \frac{\sum N}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M}{W_i} \quad \text{und} \quad \sigma_a = \frac{\sum N}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M}{W_a}$$

3.2.3 Verformungen (nur biegeeweiche Rohre)

Vertikale Durchmesseränderung (negatives Vorzeichen: Verkleinerung):

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

Auf den mittleren Rohrdurchmesser bezogene Verformung: $\delta_v = \frac{\Delta d_v}{d_m} \cdot 100\%$

3.2.4 Stabilität (nur biegeeweiche Rohre)

- **Beulen infolge Erddruck und Verkehrslasten:**

Beullast für $V_{RB} \leq 0,1$: $\text{krit } q_v = 2 \cdot \kappa_{v2} \cdot \sqrt{8 \cdot S_0 \cdot S_{Bh}}$

$$V_{RB} > 0,1: \text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot \left(3 + \frac{1}{3 \cdot V_{RB}} \right) \cdot 8 \cdot S_0$$

mit dem Abminderungsfaktor für Vorverformungen und plastisches Bodenverhalten:

$$\kappa_{v2} = x + 0,36 \cdot (\log V_{RB} + 4) \leq 0,9$$

Bodengruppe	x	Bodengruppe	x
G1	0,52	G3	0,46
G2	0,50	G4	0,40

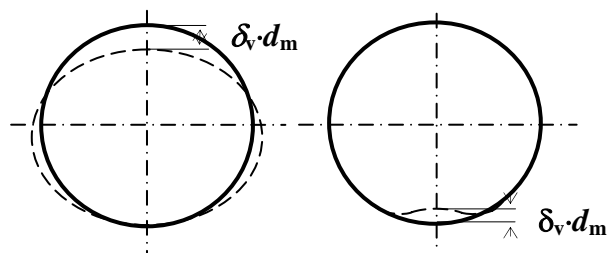
• **Beulen infolge äußeren Wasserdrucks**

Beullast: $krit\ p_a = \kappa_a \cdot \alpha_D \cdot 8S_0$

mit dem Durchschlagbeiwert α_D
nach Tafel 13.88a (zum Vergleich:
für ein ungebettetes Rohr gilt $\alpha_D = 3$).

Die Beullast ist für Vorverformungen
der Größe $\delta_v + 1\%$
(δ_v aus Erd- und Verkehrslasten)
nach Tafel 13.88b,c abzumindern.

Die Abminderung ist für Verformungen,
die der Beulfigur (in der Regel einwellig)
ähnlich sind, stärker. Meist genügt jedoch
der Ansatz einer zweiwelligen Vorver-
formung, Näheres s. [13.67].



Tafel 13.88a Durchschlagbeiwert α_D

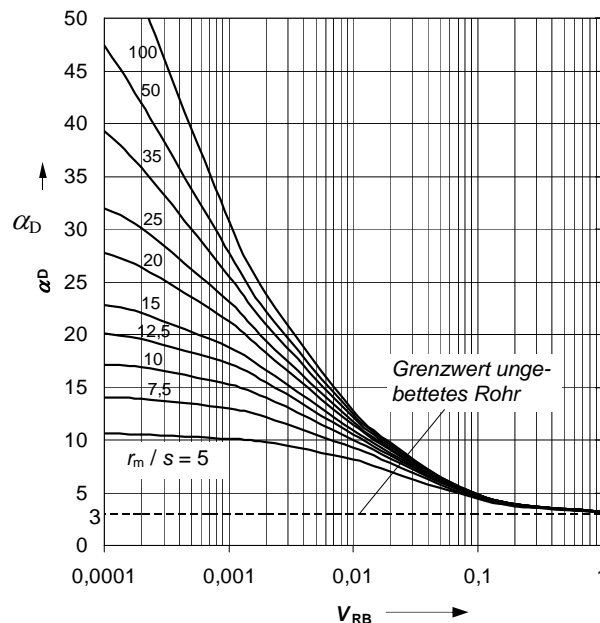
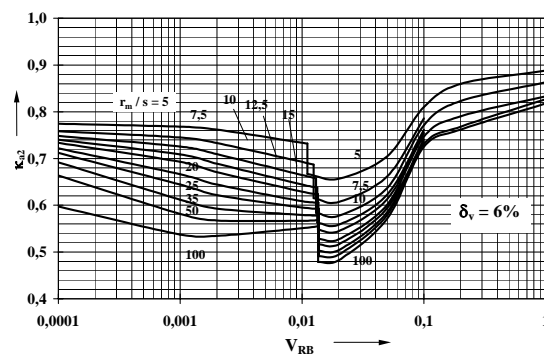
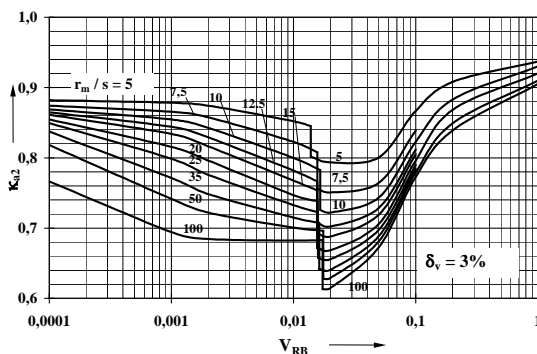


Abb. 13.88 Vorverformungen von Rohren

links: oval (zweiwellig)
rechts: örtlich (einwellig)

Tafel 13.88b,c Abminderungsfaktoren κ_{a2} für zweiwellige Vorverformungen



Abminderungsfaktoren κ_{a1} für einwellige Vorverformungen s. A 127, D 13a-f.
Näherungsgleichungen für die Abminderungsfaktoren s. A 127, D 12 und D 13.

3.3 Bemessung

3.3.1 Sicherheitsbeiwerte, zulässige Verformungen

Sicherheitsklasse A: Gefährdung des Grundwassers, Beeinträchtigung der Nutzung, Versagen hat beträchtliche wirtschaftliche Folgen.

Sicherheitsklasse B: keine Gefährdung des Grundwassers, geringe Beeinträchtigung der Nutzung, Versagen hat geringe wirtschaftliche Folgen.

Tafel 13.89a erforderliche Sicherheitsbeiwerte, zulässige Verformungen

Rohrwerkstoff	erf γ für Spannungsnachweise		zulässige Rohrverformung	zul δ_v in %
	Sicherheitsklasse A (Regelfall), $p_f = 10^{-5}$	Sicherheitsklasse B (Sonderfall), $p_f = 10^{-3}$		
Beton, Steinzeug	2,2	1,8	unter Straßen	6
Stahlbeton	1,75	1,4	Rohre mit ZM-Auskleidung	4
PE-HD, PVC-U, PP	2,5	2,0	unter Gleisen der DB AG	2
Stahl-ZM, duktiler Gusseisen-ZM	1,5	1,3		
UP-GF	2,0	1,75		
	erf γ für Stabilitätsnachweise			
PE-HD, PVC-U, PP, Stahl-ZM, duktiler Gusseisen-ZM, UP-GF	2,5 (2,0 bei Berücksichtigung von Vorverformungen)	2,0 (1,6 bei Berücksichtigung von Vorverformungen)		

3.3.2 Spannungsnachweis (biegesteife und biegeweiche Rohre)

Mit der maximalen Zugspannung $\max \sigma$ (bei Stahl- und Gussrohren die betragsmäßig maximale Spannung) und der Rechenfestigkeit σ_R nach Tafel 13.80 folgt der Sicherheitsbeiwert

$$\gamma = \frac{\sigma_R}{\max \sigma} \geq \text{erf } \gamma \text{ nach Tafel 13.89b}$$

3.3.3 Tragfähigkeitsnachweis (nur bei biegesteifen Rohren mit definierter Scheiteldruckkraft F_N)

Bei Rohren mit definierter Scheiteldruckkraft F_N kann alternativ die Tragfähigkeit nachgewiesen werden:

$$\gamma = \frac{F_N \cdot EZ}{q_v \cdot d_a} \geq \text{erf } \gamma$$

mit der Einbauziffer EZ nach Tafel 13.89b

Tafel 13.89b Einbauziffer EZ

Lagerungsfall	Auflagerwinkel 2α	Einbauziffer (Bettungsziffer) EZ
I	60°	1,59
	90°	1,91
	120°	2,18
II	90°	2,17
	120°	2,50
	180°	2,68

3.3.4 Verformungsnachweis (biegeweiche Rohre)

$\text{vorh } \delta_v \leq \text{zul } \delta_v$ nach Tafel 13.89a

3.3.5 Stabilitätsnachweis (biegeweiche Rohre)

- **Erd- und Verkehrslasten** (maßgebende Lastfallkombination: Erdlasten bei min h_w , Verkehr):

$$\gamma(q_v) = \frac{\text{krit } q_v}{q_v} \geq \text{erf } \gamma \text{ nach Tafel 13.89a}$$

- **Äußerer Wasserdruck** (maßgebende Lastfallkombination: max h_w , keine Wasserfüllung):

$$\gamma(p_a) = \frac{\text{krit } p_a}{p_a} \geq \text{erf } \gamma \text{ nach Tafel 13.89a}$$

mit $p_a = \gamma_w \cdot \max h_w$ ($\max h_w = \max$. Grundwasserstand über Rohrsohle)

- **Interaktion** (maßgebende Lastfallkombination: in der Regel max h_w , keine Wasserfüllung, dazugehörige Erdlasten, Verkehr):

$$\gamma(q_v + p_a) = \frac{1}{\frac{q_{v,A}}{\text{krit } q_v} + \frac{p_a}{\text{krit } p_a}} \geq \text{erf } \gamma \text{ nach Tafel 13.89a}$$

wobei für $q_{v,A}$ die Erdlast unter Auftrieb angesetzt werden darf.

3.3.6 Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung

Es dürfen nur Rohre mit genormter Schwingbreite $2\sigma_A$ (oder Ermittlung durch anerkanntes Prüfinstitut und Überwachung) verwendet werden.

Berücksichtigung der befestigten Fahrbahn durch $h + 0,3$ m. Veränderlicher Spannungsanteil:

$$\text{dyn } p_V = \alpha_V \cdot \varphi \cdot p$$

$$\text{Schnittgrößen: } M_{qV} = m_{qV} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m^2$$

$$N_{qV} = n_{qV} \cdot \text{dyn } p_V \cdot r_m$$

Bei biegeweichen Rohren unter den folgenden Voraussetzungen: Bodengruppe G1 oder G2, Proctordichte $D_{Pr} \geq 97\%$ ($S_{Bh} \geq 6 \text{ N/mm}^2$): $\text{dyn } p_{Vh^*} = \text{dyn } p_V \cdot K^*$

Nachweis:

$$\text{dyn } \sigma_{pV} = \frac{N_{qV} + N_{qh^*}}{A} \pm \alpha_{ki,a} \cdot \frac{M_{qV} + M_{qh^*}}{W} \leq \frac{2\sigma_A}{\gamma} \quad \text{mit } \gamma = 2,0 \text{ für UIC 71, sonst } \gamma = 1$$

Tafel 13.90a Abminderungsfaktor α_V

Verkehrslast	α_V	Nachweis erforderlich bei
SLW 60	0,5	$h \leq 1,5 \text{ m}$
SLW 30	0,8	
LKW 12	-	
UIC 71	1,0	alle h
BFZ	0,6	alle h

3.4 Beispiele

Eingabe	Einheit	biegesteifes Rohr	biegeweiches Rohr
Rohr			
Bezeichnung		Stz DN 400 N	PVC DN 400
d_i	mm	404	380,4
d_a	mm	486	400
s	mm	41	9,8
F_N	kN/m	64	-
γ_R	kN/m ³	22	14
$E_{R, \text{kurz}}$	N/mm ²	50 000	3000
$E_{R, \text{lang}}$	N/mm ²		1500
Sicherheitsklasse		A	A
Spannungsnachweis erf γ		2,2	2,5
Stabilitätsnachweis erf γ		-	2,0
zul δ_v		-	6
Einbaubedingungen			
h	m	2,8	2,8
b	m	1,4	1,4
β		90°	90°
Einbettungsbedingung		B2	B2
Überschüttungsbeding.		A2	A2
Lagerungsfall		I	I
Auflagerwinkel 2α		90°	120°
relative Ausladung a		1	1
Lasten			
Verkehrslast (Regelfahrzeug nach DIN 1072)		SLW 60	SLW 60

Eingabe	Einheit	biegesteifes Rohr	biegeweiches Rohr
Boden			
Anstehender Boden:			
Gruppe		G3	G3
D_{Pr}	%	90	90
φ'		25°	25°
max h_W über Sohle	m	2,3	2,3
min h_W	m	0	0
Verfüllung der Leitungszone:			
Gruppe		G1	G1
D_{Pr}	%	90	90
γ_B	kN/m ³	20	20
Überschüttung:			
Gruppe		G3	G3
D_{Pr}	%	90	90
γ_B	kN/m ³	20	20
γ_B'	kN/m ³	10	10
φ'		25°	25°
Verformungsmoduln E_B :			
E_1	N/mm ²	2	2
$E_{2,0}$	N/mm ²	6	6
E_3	N/mm ²	2	2
$E_4 = 10E_1$	N/mm ²	20	20
K_1	-	0,5	0,5
$\delta = \varphi'/3$		8,33°	8,33°

Berechnungsgang:

1. Steinzeugrohr DN 400 N

Boden, Einbaubedingungen: Aus der Überschüttungsbedingung A2 und der Bodengruppe G3 folgt der Verformungsmodul $E_1 = 2 \text{ N/mm}^2$; aus der Einbettungsbedingung B2 und der Bodengruppe G1 folgt der Verformungsmodul $E_{2,0} = 6 \text{ N/mm}^2$ (Tafel 13.82a);

Abminderung von $E_{2,0}$ mit $\alpha_B = 0,751, f_1 = 1, f_2 = (90 - 75)/20 = 0,75$

→ $E_2 = 0,751 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 6,0 = 3,38 \text{ N/mm}^2$; $E_4 = 10 \cdot E_1 = 20 \text{ N/mm}^2$;
relative Ausladung $a = 1$ (Kreisrohr, Sand-/Kiesauflager);
wirksame relative Ausladung: $a' = a \cdot E_1/E_2 = 1 \cdot 2/3,38 = 0,59 (> 0,26)$

Erdlast: Grabenwände bleiben auf Dauer nicht erhalten → $\kappa = 1$

$p_E = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h = 1,0 \cdot 20 \cdot 2,8 = 56,0 \text{ kN/m}^2$ (min $h_w = 0$: keine Berücksichtigung des Auftriebs in p_E)

Verkehrslast: $p_V = \varphi \cdot p$ (mit $\varphi = 1,2$ nach 3.1.5 und $p = 18,6 \text{ kN/m}^2$ aus Tafel 13.83c),

$p_V = 1,2 \cdot 18,6 = 22,3 \text{ kN/m}^2$

Lastaufteilung:

$h/d_a = 2,8/0,486 = 5,76 \rightarrow \max \lambda = 1,38$ (Tafel 13.84b) = λ_R ; $b/d_a = 1,4/0,486 = 2,88 < 4 \rightarrow$ Einfluss der Grabenbreite $\lambda_{RG} = (\lambda_R - 1)/3 \cdot b/d_a + (4 - \lambda_R)/3 = (1,38 - 1)/3 \cdot 2,88 + (4 - 1,38)/3 = 1,24$

Obergrenze für λ_{RG} : $\lambda_{fo} = 4,0 - 0,15 \cdot 2,8 = 3,58$

Untergrenze für λ_{RG} : $x = 2 \cdot h/d_a \cdot K_1 \cdot \tan \varphi' = 2 \cdot 5,76 \cdot 0,5 \cdot \tan 25^\circ = 2,69$

$\lambda_{fu} = (1 - e^{-x})/x = (1 - e^{-2,69})/2,69 = 0,35 \rightarrow \lambda_{fu} = 0,35 < \lambda_{RG} = 1,24 < \lambda_{fo} = 3,58$

$\lambda_B = (4 - \lambda_R)/3 = (4 - 1,38)/3 = 0,87$

Vertikale Gesamtbelastung: $q_v = \lambda_{RG} \cdot p_E + p_V = 1,24 \cdot 56,0 + 22,3 = 91,7 \text{ kN/m}^2$

... weiter mit dem Tragfähigkeitsnachweis

Seitendruck: Erddruckbeiwert $K_2 = 0,5$ (Tafel 13.85b)

$q_h = K_2 \cdot (\lambda_B \cdot p_E + \gamma_B \cdot d_a/2) = 0,5 \cdot (0,87 \cdot 56,0 + 20 \cdot 0,486/2) = 26,8 \text{ kN/m}^2$

Schnittgrößen: Für Lagerungsfall I/90° (Sand-/Kiesauflager) ist die Rohrsohle die maßgebende Nachweisstelle; $r_m = (d_a + d_i)/4 = (0,486 + 0,404)/4 = 0,2225 \text{ m}$

Lastgröße	Biegemomente	Normalkräfte
vertikale Belastung q_v	$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_m^2 = 1,424 \text{ kNm/m}$	$N_{qv} = n_{qv} \cdot q_v \cdot r_m = -1,080 \text{ kN/m}$
Seitendruck q_h	$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_m^2 = -0,333 \text{ kNm/m}$	$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_m = -5,989 \text{ kN/m}$
Eigenlast g (γ_R s. Tafel 13.79)	$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 = 0,029 \text{ kNm/m}$	$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m = -0,067 \text{ kN/m}$
Wasserfüllung w	$M_w = m_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^3 = 0,035 \text{ kNm/m}$	$N_w = n_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^2 = 0,660 \text{ kN/m}$
Summe	$\Sigma M = 1,154 \text{ kNm/m} = 1154 \text{ Nmm/mm}$	$\Sigma N = -6,475 \text{ kN/m} = -6,475 \text{ N/mm}$

Querschnittswerte: $s = 41 \text{ mm}$, $A = 1 \cdot 41 = 41 \text{ mm}^2/\text{mm}$, $W = 1 \cdot 41^2/6 = 280,2 \text{ mm}^3/\text{mm}$

Beiwert für Krümmung der Rohrwand: $\alpha_{ki} = 1 + s/(3 \cdot r_m) = 1 + 41/(3 \cdot 222,5) = 1,061$

Spannungen: $\sigma_i = \Sigma N/A + \alpha_{ki} \cdot \Sigma M/W = -6,475/41 + 1,061 \cdot 1154/280,2 = 4,21 \text{ N/mm}^2$

Biegezugfestigkeit aus F_N ermittelt:

$\sigma_R = 0,9 \cdot F_N \cdot (d_i + s)/s^2 \cdot \alpha_{ki} = 0,9 \cdot 64 \cdot (0,404 + 0,041)/0,041^2 \cdot 1,061 = 16180 \text{ kN/m}^2 \cong 16,2 \text{ N/mm}^2$

Spannungsnachweis: $\gamma = \sigma_R/\sigma_i = 16,2/4,21 = 3,84 > 2,2 = \text{erf } \gamma$ (Tafel 13.89a)

→ Das Steinzeugrohr DN 400 N ist standsicher.

Alternativ ist auch der **Tragfähigkeitsnachweis** möglich:

Lagerungsfall I/90°: $EZ = 1,91$ (Tafel 13.89b)

Nachweis: $\gamma = F_N \cdot EZ/(q_v \cdot d_a) = 64 \cdot 1,91/(91,7 \cdot 0,486) = 2,74 > 2,2 = \text{erf } \gamma$ (Tafel 13.89a)

Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung: Für Rohre unter Straßen mit Überdeckungen $h \geq 1,5 \text{ m}$ kann der Nachweis der Schwingbreite $2\sigma_A$ entfallen.

2. Abwasserrohr DN 400 aus PVC-U

Boden, Einbaubedingungen: Verformungsmoduln $E_1 = 2 \text{ N/mm}^2$; $E_{2,0} = 6 \text{ N/mm}^2$;

$E_4 = 10 \cdot E_1 = 20 \text{ N/mm}^2$ (s. Beispiel Stz.-Rohr DN 400 N);

aus der Einbettungsbedingung B2 folgt der Auflagerwinkel $2\alpha = 120^\circ$ (Tafel 13.83a);

relative Ausladung $a = 1$ (Kreisrohr, Sand-/Kiesauflager)

Erdlast: $p_E = 56,0 \text{ kN/m}^2$ (s. Beispiel Stz.-Rohr DN 400 N)

Verkehrslast: $p_V = 22,3 \text{ kN/m}^2$ (s. Beispiel Stz.-Rohr DN 400 N)

Größe	Einheit	Spannungsnachweis, Kurzzeit		Verformungs- / Stabilitätsnachweis, Langzeit
Verformungsmodul Leitungszone $E_{2,0}$	N/mm ²	6		
Einfluss des schmalen Grabens α_B	-	0,889		
Kriechen des Bodens f_1	-	1,0		
Grundwassereinfluss f_2	-	0,75		
abgeminderter Verformungsmodul E_2	N/mm ²	4,0		
Rohrsteifigkeit $S_0 = E_R \cdot (s/d_m)^3/12 (=S_R/8)$	N/mm ²	0,00396		0,00198
Δf und ζ	-	1,480 und 0,899		
hor. Bettungssteifigkeit $S_{Bh} = 0,6 \cdot \zeta \cdot E_2$	N/mm ²	2,158		
Steifigkeitsverhältnis $V_{RB} = 8S_0 / S_{Bh}$ → biegeweiches Rohr, $V_{RB} < 1,0$	-	0,01468 < 1,0		0,00734 < 1,0
Erddruckverhältnis K_2 für Bodengr. G1	-	0,4		
max. Konzentrationsfaktor max λ_R	-	1,333		
vertikale Bettungssteifigkeit S_{Bv}	N/mm ²	4,0		
κ_Q für glattwandiges Rohr	-	1,2		
Kriterium $\kappa_Q \cdot I/A/r_m^2 = \kappa_Q \cdot s^2/12/r_m^2$ für Verformungsbeiwerte → $c = c'$	-	0,00025 < 0,001		
Verformungsbeiwerte für $2\alpha = 120^\circ$	$c_{v,qv} = -0,0893$ $c_{h,qv} = +0,0891$	$c_{v,qh} = +0,0833$ $c_{h,qh} = -0,0833$	$c_{v,w} = -0,0477$ $c_{h,w} = +0,0476$	$c_{v,qh*} = +0,0640$ $c_{h,qh*} = -0,0658$
Reaktionsdruckbeiwert K^*	-	1,107		1,218
Beiwert für vertikale Verformung c_v^*	-	-0,0184		-0,0113
Steifigkeitsverhältnis V_s	-	0,429		0,349
wirksame relative Ausladung a'	-	0,50		
Beiwert für Verformungen K'	-	0,925		0,918
Konzentrationsfaktor über dem Rohr λ_R	-	0,765		0,722
Konzentrationsfaktor im Graben λ_{RG}	-	0,804		0,768
Vertikale Gesamtbelastung q_v	kN/m ²	67,39		65,38
Konzentrationsfaktor neben dem Rohr λ_B	-	1,078		1,093
Seitendruck q_h	kN/m ²	25,75		26,08
Horizontaler Bettungsreaktionsdruck q_h^*	kN/m ²	47,95		49,95
Bettungsreaktionsdruck $q_{h,w}^*$ aus LF w	kN/m ²	1,72 ¹⁾		1,89 ¹⁾

¹⁾ Die entlastende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $q_{h,w}^*$ aus Wasserfüllung wird im Weiteren vernachlässigt.

Schnittgrößen: Für Lagerungsfall I/120° (Sand-/Kiesauflager) ist die Rohrsohle die maßgebende Nachweisstelle; $r_m = (d_a + d_i) / 4 = (0,400 + 0,3804) / 4 = 0,1951$ m

Lastgröße	Biegemomente	Normalkräfte
vertikale Belastung q_v	$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_m^2 = 0,705$ kNm/m	$N_{qv} = n_{qv} \cdot q_v \cdot r_m = -0,355$ kN/m
Seitendruck q_h	$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_m^2 = -0,245$ kNm/m	$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_m = -5,025$ kN/m
hor. Bettungsreaktionsdr. q_{h}^*	$M_{qh^*} = m_{qh^*} \cdot q_{h}^* \cdot r_m^2 = -0,330$ kNm/m	$N_{qh^*} = n_{qh^*} \cdot q_{h}^* \cdot r_m = -5,398$ kN/m
Eigenlast g (γ_R s. Tafel 13.85)	$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 = 0,003$ kNm/m	$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m = -0,007$ kN/m
Wasserfüllung w ($\gamma_w = 10$ kN/m ³)	$M_w = m_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^3 = 0,019$ kNm/m	$N_w = n_w \cdot \gamma_w \cdot r_m^2 = 0,523$ kN/m
Summe	$\Sigma M = 0,152$ kNm/m = 152 Nmm/mm	$\Sigma N = -10,26$ kN/m = -10,26 N/mm

Querschnittswerte: $s = 9,8$ mm, $A = 1 \cdot 9,8 = 9,8$ mm²/mm, $W = 1 \cdot 9,8^2/6 = 16,0$ mm³/mm

Beiwert für Krümmung der Rohrwand: $\alpha_{ki} = 1 + s / (3 \cdot r_m) = 1 + 9,8 / (3 \cdot 195,1) = 1,017$

Spannungen (Kurzzeit): $\sigma_i = \Sigma N / A + \alpha_{ki} \cdot \Sigma M / W = -10,261 / 9,8 + 1,017 \cdot 152 / 16,0 = 8,61$ N/mm²

Spannungsnachweis: $\gamma = \sigma_R / \sigma_i = 90 / 8,61 = 10,45 > 2,5 = \text{erf } \gamma$ (Tafel 13.89a)

Verformungsnachweis (Langzeit):

$$\Delta d_v = \frac{2 \cdot 195,1}{8 \cdot 0,00198} \cdot (-0,0893 \cdot 65,38 + 0,0833 \cdot 26,08 + 0,0640 \cdot 49,95) \cdot 10^{-3} = -11,6 \text{ mm}$$

$$\delta_v = |\Delta d_v| / d_m \cdot 100 \% = 11,6 / 390,2 \cdot 100 = 2,97 \% < 6 \% = \text{zul } \delta_v \text{ (Tafel 13.89a)}$$

Stabilitätsnachweis (Langzeit):

- **Erddruck und Verkehrslasten:** Abminderungsfaktor $\kappa_{v2} = 0,9$

$$\text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot 2 \cdot \sqrt{8S_0 \cdot S_{Bh}} = 0,9 \cdot 2 \cdot \sqrt{8 \cdot 0,00198 \cdot 2,16} = 0,333 \text{ N/mm}^2 = 333 \text{ kN/m}^2$$

gegeben: $h_{w,S_0} = 2,3 \text{ m}$, Grundwasserstand über dem Rohrscheitel: $h_{w,S} = 2,3 - 0,4 = 1,9 \text{ m}$

$$q_{v,A} = \lambda_{RG} \cdot [h_{w,S} \cdot \gamma_B + (h - h_{w,S}) \cdot \gamma_B] + p_V = 0,768 \cdot [1,9 \cdot 10 + (2,8 - 1,9) \cdot 20] + 22,3 = 50,7 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sicherheit } \gamma_{qv} = \text{krit } q_v / q_{v,A} = 333 / 50,7 = 6,57$$

- **Äußerer Wasserdruck:**

Zweiwellige Vorverformung $\delta_v + 1 \% = 4 \% ; r_m/s = 195,1 / 9,8 = 20 ; V_{RB} = 0,0073$

→ Interpolation des Abminderungsfaktors nach Tafel 13.88b,c: $\kappa_{a2} \approx 0,76 - 0,15/3 = 0,71$

Durchschlagbeiwert $\alpha_D \approx 12,5$ (Tafel 13.88a)

$$\text{krit } p_a = \kappa_{a2} \cdot \alpha_D \cdot 8 \cdot S_0 = 0,71 \cdot 12,5 \cdot 8 \cdot 0,00198 = 0,140 \text{ N/mm}^2 = 140 \text{ kN/m}^2$$

$$p_a = \gamma_w \cdot h_{w,S_0} = 10 \cdot 2,3 = 23,0 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{Sicherheit } \gamma_{pa} = \text{krit } p_a / p_a = 140 / 23,0 = 6,09$$

- **Interaktion:**

$$\gamma(q_v + p_a) = \frac{1}{1/\gamma_{qv} + 1/\gamma_{pa}} = \frac{1}{1/6,57 + 1/6,09} = 3,16 > 2,0 = \text{erf } \gamma \text{ (Tafel 13.89a)}$$

→ Das PVC-Rohr DN 400 ist standsicher.

Ergänzende Hinweise:

1. Der Spannungsnachweis ist auch für Langzeitbedingungen zu führen. Für das Beispiel folgt die Spannung $\sigma_i = +6,14 \text{ N/mm}^2$ in der Rohrsohle und mit $\sigma_{RL} = 50 \text{ N/mm}^2$ der Nachweis:
 $\gamma = \sigma_R / \sigma_i = 50 / 6,14 = 8,14 > 2,5 = \text{erf } \gamma$
2. Für den Langzeitnachweis ist eine Wichtung der Rohrsteifigkeit und der Biegezugfestigkeit mit den kurz- und den langfristig wirkenden Lastanteilen p_V und p_E möglich. Für das Beispiel gilt:

$$\bar{S}_0 = \frac{p_V \cdot S_{0K} + p_E \cdot S_{0L}}{p_V + p_E} = \frac{22,3 \cdot 0,00396 + 56,0 \cdot 0,00198}{22,3 + 56,0} = 0,00254 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_R = \frac{p_V \cdot \sigma_{RK} + p_E \cdot \sigma_{RL}}{p_V + p_E} = \frac{22,3 \cdot 90 + 56,0 \cdot 50}{22,3 + 56,0} = 61,4 \text{ N/mm}^2$$

Der hier nicht wiedergegebene Berechnungsgang mit gewichteten Größen führt zu kleineren Spannungen.

Sonderfall unsymmetrischer Graben, Stufengraben

Vorgehen zur Berechnung des oben liegenden Rohres:

1. Spiegelung der linken Grabenseite um die Symmetrieachse nach rechts (= geböschter Graben), Ermittlung von q_{v1} usw.

2. Spiegelung der rechten Grabenseite um die Symmetrieachse nach links, Ermittlung von q_{v2} usw. Graben mit Sockel ($a \gg 1$),

3. Mittelwerte aus q_{v1} und q_{v2} (q_h sinngemäß),

4. Spannungsnachweis nach 3.3.2 oder Tragfähigkeitsnachweis nach 3.3.3.

Für das untere Rohr wird die Erdauflast der Höhe h_2 als Oberflächenlast p_0 betrachtet.

