

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2016 1.4 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project	: Grubbenvorst		
Projectonderdeel	: GUR002		
Importatiefactor S	: 0,75		
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 13,6		
Lange-duur treksterkte	MRS	= 10	N/mm ²
Materiaalfactor	γ_M	= 1,25	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t$	= 8,00	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus korte duur	E	= 975	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus lange duur	E'	= 350	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α_g	= 16,0·10 ⁻⁵	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiëel / Alfa Axiaal	α_σ	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 8	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 710,00	mm
Wanddikte	d _n	= 52,2	mm
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p _d	= 0,05	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δ_t	= 10	°
Aanleggegevens			
Ligging: Kruising met een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 21.849	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 3,85	m
Gronddekking boven de grondwaterstand	H _d	= 2,71	m
Gronddekking onder de grondwaterstand	H _n	= 1,14	m
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 120	°
Horizontale steundrukhoek	γ	= 120	°
Uitvoeringszakkingverschil	f _v	= 10	mm
Zettingsverschil	f _z	= 3	mm
Klinkpercentage	μ	= 0,02	%
Marstonfactor	f _m	= 0,3	-
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld		= 1,15	m
		30-10-2017 11:42:04	

Grondmechanische gegevens

Grondsoort		= Zand	
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	= 19	kN/m ³
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	= 21	kN/m ³
Volumiek gewicht water	γ_w	= 10	kN/m ³
Inwendige wrijvingshoek grond	φ	= 32,5	°
Effectieve cohesie	c'	= 0	kN/m ²
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 0	kN/m ²
E-modulus sleufmateriaal	E_1	= 7	MN/m ²
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,0091	N/mm ³
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,027	N/mm ³
Rekenen met horizontale steundruk			
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1	

Verkeersbelasting

Grafiek I:		Fatigue Load Model 3	
Rekenen met ontlastende invloed wegdek:		Tweelagen structuur	
Dikte deklaag	H_1	= 200	mm
Elast. mod. deklaag	E_1	= 500	MPa
Elast. mod. ondergrond	E_3	= 100	MPa

1. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 605,60	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 657,80	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 710,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 355,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 302,80	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 328,90	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 5.871.354.414,06	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 16.539.026,52	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 11.853,05	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 454,14	mm ³ /mm ¹

2. Toetsing of vereenvoudigde berekeningsmethode is toegestaan

Voor vloeistofleidingen geldt: $H^3 \cdot D_i^5$ moet kleiner dan 40 m⁸ zijn.

H is de druk in meters vloeistofkolom.

Rekening houdende met $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ volgt:

$$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$$

$$H = \frac{50.000}{1.000 \cdot 9,81} = 5,10 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 5,10^3 \cdot 0,61^5 = 10,79 \text{ m}^8$$

3. Berekening van de veiligheidszone

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$$

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{5,10^3 \cdot 0,61^5} = 10,77 \text{ m}$$

Indien er sprake is van een klein gat: $R_{L1} = 0,5 \cdot R_B = 5,38 \text{ m}$

Indien er sprake is van een groot gat: $R_{L2} = R_B = 10,77 \text{ m}$

Indien er sprake is van niet-trekvraste verbindingen: $R_{L3} = 2 \cdot R_B = 21,54 \text{ m}$

Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L1} = 4 \cdot 1,15 + 5,38 = 9,98 \text{ m}$

Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L2} = 4 \cdot 1,15 + 10,77 = 15,37 \text{ m}$

Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L3} = 4 \cdot 1,15 + 21,54 = 26,14 \text{ m}$

4. Berekening van de spanningen σ_p en σ_{pl} t.g.v. inwendige druk

$D_g/d_n = 657,80/52,20 = 12,60 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow$ Dikwandige leiding

$$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d$$

$$\sigma_p = \frac{355,00^2 + 302,80^2}{355,00^2 - 302,80^2} \cdot 0,05 = 0,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 0,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 0,32 = 0,13 \text{ N/mm}^2$$

Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = 6,00 \text{ N/mm}^2$

5. Berekening reroundingfactor f_{rr}

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w} \right)$$

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 328,9^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 11.853,05} \right) = 0,97$$

6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

$$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$$

$$q_n = 1,1 \cdot 19 \cdot 2,71 + 1,1 \cdot 21 \cdot 1,14 - 10 \cdot 1,14 = 71,57 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 71,57 \cdot 10^{-3} \cdot 710 = 50,82 \text{ N/mm}^1$$

7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p

$$q_p = q_n \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o} \right)$$

$$q_p = 71,57 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{3,85}{0,71} \right) = 188,01 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = q_p \cdot D_o$$

$$Q_p = 188,01 \cdot 10^{-3} \cdot 710 = 133,48 \text{ N/mm}^1$$

8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k

$$z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{D_o}{E_1^{0,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$$

$$z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{0,71}{70^{0,5} \cdot \sqrt{3,85/0,71}} = 0,023 \text{ m}$$

$$q_k = q_n + \frac{\mu \cdot D_o \cdot (q_p - q_n)}{z_{\max}}$$

$$1 + \frac{q_p - q_n}{z_{\max} \cdot k_{v,\min}}$$

$$q_k = 71,57 + \frac{0,02 \cdot 0,71}{0,023} \cdot (188,01 - 71,57) = 117,70 \text{ kN/m}^2$$

$$1 + \frac{188,01 - 71,57}{0,023 \cdot 0,0091 \cdot 10^6}$$

$$Q_k = q_k \cdot D_o$$

$$Q_k = 117,70 \cdot 10^{-3} \cdot 710 = 83,57 \text{ N/mm}^1$$

9. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek I NEN 3650-1:C.17

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek: Tweelagen structuur

$$H_{1eq} = 0,9 \cdot H_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} = 0,9 \cdot 200 \cdot \sqrt[3]{\frac{500}{100}} = 307,80 \text{ mm}$$

Fictieve dekkingshoogte: $H_{eq} = H_{1eq} + H - H_1$

$$H_{eq} = 307,80 + 3850,00 - 200 = 3.957,80 \text{ mm} = 3,96 \text{ m}$$

Gelet op de fictieve dekkingshoogte volgt: $q_v = 12,94 \text{ kN/m}^2$

$$Q_v = q_v \cdot D_o$$

$$Q_v = 12,94 \cdot 10^{-3} \cdot 710 = 9,19 \text{ N/mm}^1$$

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_{v,\text{gem}}}{4 \cdot E \cdot I_b}}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{710 \cdot 0,027}{4 \cdot 975 \cdot 5.871.354.414,06}} = 0,00096 \text{ mm}^{-1}$$

11. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (1^e en 2^e jaar)Zettingslengte $L = 21.849$ mm

$$\lambda \cdot L = 0,00096 \cdot 21.849 = 20,90$$

 $i = 0,900$ (= 90,0 % inklemming) $B_z = 0,000360$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)

$$Q_z = B_z \cdot f_v \cdot D_o \cdot k_{v, \text{gem}}$$

$$Q_z = 0,000360 \cdot 10 \cdot 710 \cdot 0,027 = 0,069 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6} \right)$$

$$Q_d = 0,069 \cdot 0,00096 \cdot 21.849 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00096 \cdot 21.849}{6} \right) = 5,81 \text{ N/mm}^1$$

12. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (na 2 jaar)

$$Q_z = B_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v, \text{gem}}$$

$$Q_z = 0,000360 \cdot (10 + 1,5 \cdot 3) \cdot 710 \cdot 0,027 = 0,100 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6} \right)$$

$$Q_d = 0,100 \cdot 0,00096 \cdot 21.849 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00096 \cdot 21.849}{6} \right) = 8,43 \text{ N/mm}^1$$

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

$$N_q = e^{\pi \tan(\varphi)} \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 24,58$$

$$N_y = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi) = 22,54$$

$$B = D_o = 0,71 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 3,85 + 0,71 / 2 = 4,21 \text{ m}$$

$$S_y = 1 - 0,4 \cdot B/L = 0,96$$

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,38$$

$$\gamma'_{\text{gem}} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 18,13 \text{ kN/m}^3$$

$$P_{we} = 0,95 \cdot (0,5 \cdot \gamma'_{\text{gem}} \cdot D_o \cdot N_y \cdot S_y \cdot d_y + S_q \cdot N_q \cdot d_q \cdot (q_n + c' \cdot \cot(\varphi)) - c' \cdot \cot(\varphi))$$

$$P_{we} = 2.568,07 \text{ kN/m}^2 = 2,57 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 2,57 \cdot 710,00 = 1.823,33 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

<i>Situatie 1^e en 2^e jaar</i>	<i>Conclusie:</i>	<i>Situatie na 2 jaar</i>	<i>Conclusie:</i>
$Q_k = 83,57 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing	$Q_n = 50,82 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing
$Q_v = 9,19 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig	$Q_v = 9,19 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig
$Q_d = 5,81 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 8,43 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 98,57 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 68,43 \text{ N/mm}^1$	

14. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (1^e en 2^e jaar)*Moment t.g.v. Q_k en Q_v*

$$M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,138 \cdot (83,57 + 9,19) \cdot 328,90 - 0,143 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot \sin(1/2 \cdot 120^\circ) \cdot (83,57 + 9,19) \cdot 328,90$$

$$M_q = 2.461,91 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

$$M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$$

$$M_{qd} = 0,083 \cdot 5,81 \cdot 328,90$$

$$M_{qd} = 158,68 \text{ Nmm/mm}^1$$

Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$$

$$\sigma_q = 0,97 \cdot (2.461,91 + 158,68) / 454,14 = 5,62 \text{ N/mm}^2$$

15. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (na 2 jaar)*Moment t.g.v. Q_n en Q_v*

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,138 \cdot (50,82 + 9,19) \cdot 328,90 - 0,143 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot \sin(1/2 \cdot 120^\circ) \cdot (50,82 + 9,19) \cdot 328,90$$

$$M_q = 1.592,66 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

$$M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$$

$$M_{qd} = 0,083 \cdot 8,43 \cdot 328,90$$

$$M_{qd} = 230,09 \text{ Nmm/mm}^1$$

Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$$

$$\sigma_q = 0,97 \cdot (1.592,66 + 230,09) / 454,14 = 3,91 \text{ N/mm}^2$$

16. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot 10 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,027}{52,2}} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

17. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot (10 + 1,5 \cdot 3) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,027}{52,2}} = 0,20 \text{ N/mm}^2$$

18. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil

$$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$$

$$\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,00016 \cdot 975 = \mathbf{1,56 \text{ N/mm}^2}$$

19. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht

Aangezien er geen bocht wordt toegepast volgt:
 $i_x = 1, i_y = 0, i_{xp} = 1, i_{yp} = 0$

20. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N

$$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$$

$$S_N = 975 \cdot \frac{11.853,05}{657,8^3} = 0,0406 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{40,60 \text{ kN/m}^2}$$

Minimaal vereiste ringstijfheid = **2 kN/m²**

21. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk

Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$
 Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$

$$p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$$

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 11.853,05}{657,80^3} = 0,77 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 11.853,05}{657,80^3} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **13,88 m** grondwater boven de leiding

22. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (50,82 + 9,19) - 0,083 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (50,82 + 9,19) + 0,048 \cdot 8,43) \cdot 328,90^3}{350 \cdot 11.853,05} = \mathbf{29,51 \text{ mm}} (= 4,49\%)$$

Toelaatbare deflectie = 8% · importantiefactor S · $D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 657,80 = \mathbf{39,47 \text{ mm}}$

23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,62 = \mathbf{3,65 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,13 + 0,65 \cdot 0,14 + 1,56 = \mathbf{1,78 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$$

24. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,91 = \mathbf{2,54 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,13 + 0,65 \cdot 0,20 + 1,56 = \mathbf{1,82 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$$