

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2022 1.3 ©
Algemene gegevens			
Naam van het project : 40033 Goudbloemsedijk Halderberge-Hoeven Projectonderdeel : 1x Ø63mm PE100 SDR11 Importantiefactor S : 0,75			
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 11		
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 Tangentieel / Alfa Axiaal	α_σ	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 8,00	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 63,00	mm
Wanddikte	d _n	= 5,8	mm
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)	= Vloeistof		
Ontwerpdruk	p _d	= 0,35	N/mm ²
Volumieke massa medium	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δ_t	= 10	°
Aanleggegevens			
Ligging: Evenwijdig aan een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 40.000	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 1,0	m
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 70	°
Uitvoeringszakkingverschil	f _v	= 15	mm
Zettingsverschil	f _z	= 25	mm
Klinkpercentage	μ	= 0,1	%
Marstonfactor	f _m	= 0,3	-
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld	H _{werk}	= 1,8	m
			17-11-2022 13:11:43

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2022 1.3 ©
Grondmechanische gegevens			
Grondsoort		= Klei	
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	= 17,0	kN/m ³
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	= 17,5	°
Effectieve cohesie	c'	= 5	kN/m ²
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 50	kN/m ²
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,016	N/mm ³
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,024	N/mm ³
E-modulus ondergrond	E_{100}	= 2	MN/m ²
Niet rekenen met horizontale steundruk			
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1	
Verkeersbelasting			
Grafiek ½ x II:		½ · Fatigue Load Model 2, Lorry 4	
Niet rekenen met ontlastende invloed wegdek			
			17-11-2022 13:11:43

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2022 1.3 ©
1. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 51,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i) / 2$	= 57,20	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 63,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 31,50	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 25,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 28,60	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 430.644,04	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 13.671,24	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 16,26	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 5,61	mm ³ /mm ¹
2. Toetsing of vereenvoudigde berekeningsmethode is toegestaan			
<p>Voor vloeistofleidingen geldt: $H^3 \cdot D_i^5$ moet kleiner dan 40 m⁸ zijn.</p> <p>H is de druk in meters vloeistofkolom.</p> <p>Rekening houdende met $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ volgt:</p> $H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$ $H = \frac{350.000}{1.000 \cdot 9,81} = 35,68 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 35,68^3 \cdot 0,05^5 = 0,016 \text{ m}^8$			
3. Berekening van de veiligheidszone			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{H^3 \cdot D_i^5}$ $R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{35,68^3 \cdot 0,05^5} = 4,78 \text{ m}$ Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 1,80 + 4,78 = 11,98 \text{ m}$ $D_K = 1,2 \cdot (D_o + H) = 1,2 \cdot (0,063 + 1,0) = 1,28 \text{ m}$			
4. Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk			
$D_g/d_n = 57,20/5,80 = 9,86 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding}$ $\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d$ $\sigma_p = \frac{31,50^2 + 25,70^2}{31,50^2 - 25,70^2} \cdot 0,35 = 1,74 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{y1} = \sigma_p = 1,74 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 1,74 = 0,70 \text{ N/mm}^2$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$			
5. Berekening reroundingfactor f_{rr}			
$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,35 \cdot 28,6^3 \cdot 0,102}{975 \cdot 16,26}) = 0,90$			

6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

$$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d$$

$$q_n = 1,1 \cdot 17,0 \cdot 1,0 = 18,70 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 18,70 \cdot 10^{-3} \cdot 63 = 1,18 \text{ N/mm}^1$$

7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p

$$\sigma_{\text{vert}} = \frac{\gamma_d}{\gamma} \cdot H_d$$

$$\sigma_{\text{vert}} = \frac{17,0}{1,1} \cdot 1,0 = 15,45 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{hor}} = \sigma_{\text{vert}} \cdot (1 - \sin(\varphi))$$

$$\sigma_{\text{hor}} = 15,45 \cdot (1 - \sin(17,5)) = 10,81 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_o' = \frac{\sigma_{\text{vert}} + \sigma_{\text{hor}}}{2}$$

$$\sigma_o' = \frac{15,45 + 10,81}{2} = 13,13 \text{ kN/m}^2$$

$$p_f' = \sigma_o' \cdot (1 + \sin(\varphi)) + c \cdot \cos(\varphi)$$

$$p_f' = 13,13 \cdot (1 + \sin(17,5)) + 5 \cdot \cos(17,5) = 21,85 \text{ kN/m}^2$$

$$\kappa = 1 - \sin(\varphi)$$

$$\kappa = 1 - \sin(17,5) = 0,699$$

$$\nu = \frac{\kappa}{1 + \kappa}$$

$$\nu = \frac{0,699}{1 + 0,699} = 0,41$$

$$G = \frac{E_{100}}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

$$G = \frac{2}{2 \cdot (1 + 0,41)} = 0,44$$

$$Q = \frac{\sigma_o' \cdot \sin(\varphi) + c \cdot \cos(\varphi)}{G}$$

$$Q = \frac{13,13 \cdot \sin(17,5) + 5 \cdot \cos(17,5)}{0,44 \cdot 10^3} = 0,020$$

$$p_{\text{max}}' = (p_f' + c \cdot \cot(\varphi)) \cdot \left(\frac{0,5 \cdot D_o^2}{0,5 \cdot D_o + H} + Q \right)^{\frac{-\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cdot \cot(\varphi)$$

$$p_{\text{max}}' = (21,85 + 17,5 \cdot \cot(5)) \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 0,063^2}{0,5 \cdot 0,063 + 1,0} + 0,02 \right)^{\frac{-\sin 17,5}{1 + \sin 17,5}} - 5 \cdot \cot(17,5)$$

$$p_{\text{max}}' = 76,35 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = p_{\text{max}}' \cdot D_o$$

$$Q_p = 76,35 \cdot 10^{-3} \cdot 63 = 4,81 \text{ N/mm}^1$$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020	Sigma 2022 1.3 ©
--	------------------

8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k

$$E_{100, \text{norm}} = E_{100} \cdot (q_n/100)^{0,8} = 2 \cdot (18,70/100)^{0,8} = 0,52 \text{ MN/m}^2$$

$$E_1 = E_{100, \text{norm}} / \frac{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}{1 - \nu}$$

$$E_1 = 0,52 / \frac{1 - 0,41 - 2 \cdot 0,41^2}{1 - 0,41} = 1,23 \text{ MN/m}^2$$

$$z_{\text{max}} = 0,25 \cdot \frac{D_o}{E_1^{1,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$$

$$z_{\text{max}} = 0,25 \cdot \frac{0,063}{1,23^{1,5} \cdot \sqrt{1,0/0,063}} = 0,0029 \text{ m}$$

$$q_k = q_n + \frac{\frac{\mu \cdot D_o}{z_{\text{max}}} \cdot (q_p - q_n)}{1 + \frac{q_p - q_n}{z_{\text{max}} \cdot k_{v, \text{min}}}}$$

$$q_k = 18,70 + \frac{\frac{0,1 \cdot 0,063}{0,0029} \cdot (76,35 - 18,70)}{1 + \frac{76,35 - 18,70}{0,0029 \cdot 0,0160 \cdot 10^6}} = 74,63 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = q_k \cdot D_o$$

$$Q_k = 74,63 \cdot 10^{-3} \cdot 63 = 4,70 \text{ N/mm}^1$$

9. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek 1/2 x II NEN 3650-1:C.17

Niet rekenen met ontlastende invloed

$$q_v = 19,36 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_v = q_v \cdot D_o$$

$$Q_v = 19,36 \cdot 10^{-3} \cdot 63 = 1,22 \text{ N/mm}^1$$

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{63 \cdot 0,024}{4 \cdot 975 \cdot 430.644,04}} = 0,0055 \text{ mm}^{-1}$$

11. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (1^e en 2^e jaar)

Zettingslengte $L = 40.000 \text{ mm}$

$$\lambda \cdot L = 0,0055 \cdot 40.000 = 219,10$$

$i = 0,991$ (= 99,1 % inklemming)

$B_z = 0,0000000402$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)

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

$$Q_z = 0,0000000402 \cdot 15 \cdot 63 \cdot 0,024 = 0,00000091 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,00000091 \cdot 0,0055 \cdot 40.000 \cdot \left(0,991 + \frac{0,991 \cdot 0,0055 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,01 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_z = B_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v, \text{gem}}$$

$$Q_z = 0,0000000402 \cdot (15 + 2,0 \cdot 25) \cdot 63 \cdot 0,024 = 0,0000039 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,0000039 \cdot 0,0055 \cdot 40.000 \cdot \left(0,991 + \frac{0,991 \cdot 0,0055 \cdot 40.000}{6} \right) = 0,03 \text{ N/mm}^1$$

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen

Berekening evenwichtsdraagvermogen

$$B = D_o = 0,06 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,06 / 2 = 1,03 \text{ m}$$

$$S_c = 0,2 \cdot B/L = 0,02$$

$$d_c = 0,4 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 0,4 \cdot \tan^{-1}(1,03/0,06) = 0,60$$

$$P_{we} = 0,85 \cdot c_u \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + S_c + d_c)$$

$$P_{we} = 0,85 \cdot 50 \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + 0,02 + 0,60)$$

$$P_{we} = 354,85 \text{ kN/m}^2 = 0,35 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,35 \cdot 63,00 = 22,36 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 4,70 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing	$Q_n = 1,18 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing
$Q_v = 1,22 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig	$Q_v = 1,22 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig
$Q_d = 0,01 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 0,03 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 5,93 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 2,43 \text{ N/mm}^1$	

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

$$M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,177 \cdot (4,70 + 1,22) \cdot 28,60$$

$$M_q = 29,97 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,01 \cdot 28,60$$

$$M_{qd} = 0,03 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,90 \cdot (29,97 + 0,03) / 5,61 = 4,84 \text{ N/mm}^2$$

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

Moment t.g.v. Q_n en Q_v

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,177 \cdot (1,18 + 1,22) \cdot 28,60$$

$$M_q = 12,14 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,03 \cdot 28,60$$

$$M_{qd} = 0,11 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,90 \cdot (12,14 + 0,11) / 5,61 = 1,98 \text{ N/mm}^2$$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2022 1.3 ©
16. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,000254 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,024}{5,8}} = \mathbf{0,01 \text{ N/mm}^2}$		
17. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,000254 \cdot (15 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,024}{5,8}} = \mathbf{0,03 \text{ N/mm}^2}$		
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		
$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$ $S_N = 975 \cdot \frac{16,26}{57,2^3} = 0,0847 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{84,71 \text{ kN/m}^2}$ Minimaal vereiste ringstijfheid = 2 kN/m²		
21. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk		
Veiligheidsfactor γ voor langdurige overdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende overdruk: $\gamma = 1,5$ $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 16,26}{57,20^3} = 1,61 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 16,26}{57,20^3} = 0,29 \text{ N/mm}^2$ Conclusie: Kans op implosie bij 28,96 m grondwater boven de leiding		
22. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie		
$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (1,18 + \frac{1}{2} \cdot 1,22) - 0,095 \cdot (1 - \sin(17,5^\circ)) \cdot (1,18 + \frac{1}{2} \cdot 1,22) + 0,048 \cdot 0,03) \cdot 28,60^3}{350 \cdot 16,26} = \mathbf{0,17 \text{ mm} (= 0,30\%)}$ Toelaatbare deflectie = 8% · importantiefactor S · $D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 57,20 = \mathbf{3,43 \text{ mm}}$		
		17-11-2022 13:11:43

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020	Sigma 2022 1.3 ©
23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 4,84 = \mathbf{3,15 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,70 + 0,65 \cdot 0,01 + 1,56 = \mathbf{2,26 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$</p>	
24. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 1,98 = \mathbf{1,28 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,70 + 0,65 \cdot 0,03 + 1,56 = \mathbf{2,28 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$</p>	
	17-11-2022 13:11:44