

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project	: Aanpassing drinkwaternet WML t.p.v. Hoofdstraat Heijen		
Projectonderdeel	: Nodulair gietijzer Ø 100 mm in waterkering		
Importatiefactor S	: 0,75		
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	Nodulair gietijzer		
Kwaliteit:	NEN-EN 545		
Minimum waarde treksterkte	R_m	= 270	N/mm ²
Materiaalfactor	γ_M	= 2,5	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t$	= 108,00	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus	E	= 170000	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α_g	= $1,2 \cdot 10^{-5}$	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiële	$\alpha_{\sigma, \tan}$	= 0,556	-
Alfa Axiaal	$\alpha_{\sigma, ax}$	= 0,77	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 3	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D_e	= 118,00	mm
Wanddikte	d_n	= 4,4	mm
Wanddikte bocht	t	= 4,4	mm
Bochtstraal	R	= 177,00	mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,5	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Aanleggegevens			
Ligging: Evenwijdig aan een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 40.000	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 1	m
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 70	°
Uitvoeringszakkingverschil	f_v	= 15	mm
Zettingsverschil	f_z	= 20	mm
Klinkpercentage	μ	= 0,1	%
Marstonfactor	f_m	= 0,3	-
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Verheeld			
		11-02-2018 00:04:36	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012 Sigma 2018 1.0 ©

Grondmechanische gegevens

Grondsoort		= Klei	
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	= 20	kN/m ³
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	= 32,5	°
Effectieve cohesie	c'	= 2	kN/m ²
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 10	kN/m ²
E-modulus sleufmateriaal	E_1	= 2,5	MN/m ²
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,04	N/mm ³
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,045	N/mm ³
Niet rekenen met horizontale steundruk			
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1	

Verkeersbelasting

Grafiek II: Fatigue Load Model 2, Lorry 4
 Niet rekenen met ontlastende invloed wegdek

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
1. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 109,20	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 113,60	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 118,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 59,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 54,60	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 56,80	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 2.536.872,24	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 42.997,83	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 7,10	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 3,23	mm ³ /mm ¹
2. Toetsing of vereenvoudigde berekeningsmethode is toegestaan			
Voor vloeistofleidingen geldt: $H^3 \cdot D_i^5$ moet kleiner dan 40 m ⁸ zijn. H is de druk in meters vloeistofkolom. Rekening houdende met $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ volgt:			
$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$			
$H = \frac{500.000}{1.000 \cdot 9,81} = 50,97 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 50,97^3 \cdot 0,11^5 = 2,06 \text{ m}^8$			
3. Berekening van de veiligheidszone			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{50,97^3 \cdot 0,11^5} = 8,75 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 0,00 + 8,75 = 8,75 \text{ m}$			
4. Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk			
$D_g/d_n = 113,60/4,40 = 25,82 \rightarrow D_g/d_n > 20 \rightarrow$ Dunwandige leiding			
$\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$			
$\sigma_p = \frac{0,5 \cdot 113,6}{2 \cdot 4,4} = 6,45 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R - D_e} \cdot \sigma_p$			
$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot 177 - 0,5 \cdot 118}{2 \cdot 177 - 118} \cdot 6,45 = 8,07 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot R + 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R + D_e} \cdot \sigma_p$			
$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot 177 + 0,5 \cdot 118}{2 \cdot 177 + 118} \cdot 6,45 = 5,65 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{y1} = \sigma_p(\text{bi}) = 8,07 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 8,07 = 2,26 \text{ N/mm}^2$			
Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$			

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
5. Berekening reroundingfactor f_{rr}	
$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_v}{E \cdot I_w} \right)$ $f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 56,8^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 7,10} \right) = 0,98$	
6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n	
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d$ $q_n = 1,1 \cdot 20 \cdot 1 = 22,00 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 22,00 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 2,60 \text{ N/mm}^1$	
7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p	
$q_p = q_n \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o} \right)$ $q_p = 22,00 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{1}{0,118} \right) = 77,93 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 77,93 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 9,20 \text{ N/mm}^1$	
8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k	
$z_{max} = 0,25 \cdot \frac{D_o}{E_1^{1,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$ $z_{max} = 0,25 \cdot \frac{0,118}{2,5^{1,5} \cdot \sqrt{1/0,118}} = 0,0026 \text{ m}$ $q_k = q_n + \frac{\frac{\mu \cdot D_o}{z_{max}} \cdot (q_p - q_n)}{1 + \frac{q_p - q_n}{z_{max} \cdot k_{v,min}}}$ $q_k = 22,00 + \frac{\frac{0,1 \cdot 0,118}{0,0026} \cdot (77,93 - 22,00)}{1 + \frac{77,93 - 22,00}{0,0026 \cdot 0,0400 \cdot 10^6}} = 188,59 \text{ kN/m}^2$ $Q_k = q_k \cdot D_o$ $Q_k = 188,59 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 22,25 \text{ N/mm}^1$ <p>Aanpassing van Q_k nodig $\rightarrow Q_k > Q_p \rightarrow Q_k = Q_p = 9,20 \text{ N/mm}^1$</p>	
9. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek II NEN 3650-1:C.17	
<p>Niet rekenen met ontlastende invloed</p> $q_v = 38,64 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 38,64 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 4,56 \text{ N/mm}^1$	
1.0.0.0/01-2018/	11-02-2018 00:04:36

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
--	------------------

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding I

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{118 \cdot 0,045}{4 \cdot 170000 \cdot 2.536.872,24}} = 0,0013 \text{ mm}^{-1}$$

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

Zettingslengte L = 40.000 mm
 $\lambda \cdot L = 0,0013 \cdot 40.000 = 52,98$
i = 0,962 (= 96,2 % inklemming)
 $B_z = 0,0000106$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)
 $Q_z = B_z \cdot f_v \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$
 $Q_z = 0,0000106 \cdot 15 \cdot 118 \cdot 0,045 = 0,00084 \text{ N/mm}^1$
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$
 $Q_d = 0,00084 \cdot 0,0013 \cdot 40.000 \cdot \left(0,962 + \frac{0,962 \cdot 0,0013 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,42 \text{ N/mm}^1$

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

$Q_z = B_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$
 $Q_z = 0,0000106 \cdot (15 + 1,5 \cdot 20) \cdot 118 \cdot 0,045 = 0,0025 \text{ N/mm}^1$
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$
 $Q_d = 0,0025 \cdot 0,0013 \cdot 40.000 \cdot \left(0,962 + \frac{0,962 \cdot 0,0013 \cdot 40.000}{6}\right) = 1,26 \text{ N/mm}^1$

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen

Berekening evenwichtsdraagvermogen

$B = D_o = 0,12 \text{ m}$
 $B/L = 0,1$
 $Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,12 / 2 = 1,06 \text{ m}$
 $S_c = 0,2 \cdot B/L = 0,02$
 $d_c = 0,4 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 0,4 \cdot \tan^{-1}(1,06/0,12) = 0,58$
 $P_{we} = 0,85 \cdot c_u \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + S_c + d_c)$
 $P_{we} = 0,85 \cdot 10 \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + 0,02 + 0,58)$
 $P_{we} = 70,10 \text{ kN/m}^2 = 0,07 \text{ N/mm}^2$
 $P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,07 \cdot 118,00 = 8,27 \text{ N/mm}^1$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 9,20 \text{ N/mm}^1$	Aanpassing van	$Q_n = 2,60 \text{ N/mm}^1$	Aanpassing van
$Q_v = 4,56 \text{ N/mm}^1$	Q_d nodig	$Q_v = 4,56 \text{ N/mm}^1$	Q_d nodig
$Q_d = 0,42 \text{ N/mm}^1 +$	$Q_d = 0,00 \text{ N/mm}^1$	$Q_d = 1,26 \text{ N/mm}^1 +$	$Q_d = 1,12 \text{ N/mm}^1$
$\Sigma = 14,18 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 8,42 \text{ N/mm}^1$	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©
14. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (1^e en 2^e jaar)		
<i>Moment t.g.v. Q_k en Q_v</i>		<i>Moment t.g.v. Q_d</i>
$M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$		$M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$
$M_q = 0,178 \cdot (9,20 + 4,56) \cdot 56,80$		$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,00 \cdot 56,80$
$M_q = 139,08 \text{ Nmm/mm}^1$		$M_{qd} = 0,00 \text{ Nmm/mm}^1$
<i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i>		
$\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$		
$\sigma_q = 0,98 \cdot (139,08 + 0,00) / 3,23 = \mathbf{42,44 \text{ N/mm}^2}$		
15. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (na 2 jaar)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i>		<i>Moment t.g.v. Q_d</i>
$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$		$M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$
$M_q = 0,178 \cdot (2,60 + 4,56) \cdot 56,80$		$M_{qd} = 0,122 \cdot 1,12 \cdot 56,80$
$M_q = 72,35 \text{ Nmm/mm}^1$		$M_{qd} = 7,73 \text{ Nmm/mm}^1$
<i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i>		
$\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$		
$\sigma_q = 0,98 \cdot (72,35 + 7,73) / 3,23 = \mathbf{24,44 \text{ N/mm}^2}$		
16. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$		
$\sigma_{bx} = 0,00380 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,045}{4,4}} = \mathbf{2,38 \text{ N/mm}^2}$		
17. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$		
$\sigma_{bx} = 0,00380 \cdot (15 + 1,5 \cdot 20) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,045}{4,4}} = \mathbf{7,13 \text{ N/mm}^2}$		
18. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil		
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$		
$\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000115 \cdot 170000 = \mathbf{19,55 \text{ N/mm}^2}$		
		11-02-2018 00:04:36

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
--	------------------

19. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht

Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 56,80 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{4,4 \cdot 177}{56,8^2} = 0,24$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,24} = 6,84$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,24^{(2/3)}} = 2,32$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (p_d/E) \cdot (r/t)^{(5/2)} \cdot (R/r)^{(2/3)}$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (0,5/170000) \cdot (56,80/4,4)^{(5/2)} \cdot (177,00/56,8)^{(2/3)} = 1,01$$

$$i_{xp} = \frac{i_x}{c_2} = \frac{2,32}{1,01} = 2,29$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 2,32 = 4,64$$

$$i_{yp} = 2 \cdot i_{xp} = 2 \cdot 2,29 = 4,59$$

20. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk

Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$

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

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

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 7,10}{113,60^3} = 14,29 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 7,10}{113,60^3} = 7,15 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **714,56** m grondwater boven de leiding

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

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

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (2,60 + 4,56) - 0,083 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (2,60 + 4,56) + 0,048 \cdot 1,12) \cdot 56,80^3}{170000 \cdot 7,10} = \mathbf{0,06 \text{ mm}} (= 0,056\%)$$

Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · $D_g = 0,03 \cdot 0,75 \cdot 113,60 = \mathbf{2,56 \text{ mm}}$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma, \tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (42,44 + 4,59 \cdot 2,38) = \mathbf{29,66 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma, ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 2,26 + 0,77 \cdot 2,29 \cdot 2,38 + 19,55 = \mathbf{26,01 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$</p>	
23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma, \tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (24,44 + 4,59 \cdot 7,13) = \mathbf{31,78 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma, ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 2,26 + 0,77 \cdot 2,29 \cdot 7,13 + 19,55 = \mathbf{34,41 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$</p>	
1.0.0.0/01-2018/	11-02-2018 00:04:36