

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. Dorpstraat		
Projectonderdeel	: Nodulair gietijzer Ø 100 mm kruisend met 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 Tangentiëel	$\alpha_{\sigma, \tan}$	= 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
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,5	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δ_t	= 10	°
Aanleggegevens			
Ligging: Kruising met een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 18.464	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 4,32	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: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld		= 2,65	m
		10-04-2018 16:07:07	



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	= 18,04	kN/m ³
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	= 25,0	°
Effectieve cohesie	c'	= 2	kN/m ²
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 25	kN/m ²
E-modulus sleufmateriaal	E_1	= 2	MN/m ²
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,016	N/mm ³
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,024	N/mm ³
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			
		10-04-2018 16:07:07	

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			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{50,97^3 \cdot 0,11^5} = 8,75 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een klein gat: $R_{L1} = 0,5 \cdot R_B = 4,38 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een groot gat: $R_{L2} = R_B = 8,75 \text{ m}$			
Indien er sprake is van niet-trekvraste verbindingen: $R_{L3} = 2 \cdot R_B = 17,51 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L1} = 4 \cdot 2,65 + 4,38 = 14,98 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L2} = 4 \cdot 2,65 + 8,75 = 19,35 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L3} = 4 \cdot 2,65 + 17,51 = 28,11 \text{ m}$			
4. Berekening van de spanningen σ_p en σ_{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			
$\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$			
$\sigma_p = \frac{0,5 \cdot 113,6}{2 \cdot 4,4} = 6,45 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{y1} = \sigma_p = 6,45 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 6,45 = 1,81 \text{ N/mm}^2$			
Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$			
5. Berekening reroundingfactor f_{rr}			
$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w} \right)$			
$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 56,8^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 7,10} \right) = 0,98$			

6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

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

$$q_n = 1,1 \cdot 18,04 \cdot 4,32 = 85,73 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 85,73 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 10,12 \text{ N/mm}^1$$

7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p

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

$$\sigma_{\text{vert}} = \frac{18,04}{1,1} \cdot 4,32 = 70,85 \text{ kN/m}^2$$

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

$$\sigma_{\text{hor}} = 70,85 \cdot (1 - \sin(25,0)) = 40,91 \text{ kN/m}^2$$

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

$$\sigma_o' = \frac{70,85 + 40,91}{2} = 55,88 \text{ kN/m}^2$$

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

$$p_f' = 55,88 \cdot (1 + \sin(25,0)) + 2 \cdot \cos(25,0) = 81,30 \text{ kN/m}^2$$

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

$$G = \frac{2,0}{2 \cdot (1 + 0,4)} = 0,71 \text{ MN/m}^2$$

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

$$Q = \frac{55,88 \cdot \sin(25,0) + 2 \cdot \cos(25,0)}{0,71 \cdot 10^3} = 0,036$$

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

$$p'_{\text{max}} = (81,30 + 25,0 \cdot \cot(25)) \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 0,118^2}{0,5 \cdot 0,118 + 4,32} + 0,04 \right)^{\frac{-\sin 25,0}{1 + \sin 25,0}} - 2 \cdot \cot(25,0)$$

$$p'_{\text{max}} = \mathbf{225,91 \text{ kN/m}^2}$$

$$Q_p = p'_{\text{max}} \cdot D_o$$

$$Q_p = 225,91 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 26,66 \text{ N/mm}^1$$



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

8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k

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

$$z_{\max} = 0,25 \cdot \frac{0,118}{2^{1,5} \cdot \sqrt{4,32/0,118}} = 0,0017 \text{ m}$$

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

$$q_k = 85,73 + \frac{\frac{0,1 \cdot 0,118}{0,0017} \cdot (225,91 - 85,73)}{1 + \frac{225,91 - 85,73}{0,0017 \cdot 0,0160 \cdot 10^6}} = 243,49 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = q_k \cdot D_o$$

$$Q_k = 243,49 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 28,73 \text{ N/mm}^1$$

Aanpassing van Q_k nodig $\rightarrow Q_k > Q_p \rightarrow Q_k = Q_p = 26,66 \text{ N/mm}^1$

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

Niet rekenen met ontlastende invloed

$$q_v = 2,41 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_v = q_v \cdot D_o$$

$$Q_v = 2,41 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 0,28 \text{ N/mm}^1$$

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{118 \cdot 0,024}{4 \cdot 170000 \cdot 2.536.872,24}} = 0,0011 \text{ mm}^{-1}$$

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

Zettingslengte $L = 18.464 \text{ mm}$

$$\lambda \cdot L = 0,0011 \cdot 18.464 = 20,90$$

$i = 0,900$ (= 90,0 % inklemming)

$B_z = 0,000360$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)

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

$$Q_z = 0,000360 \cdot 15 \cdot 118 \cdot 0,024 = 0,015 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,015 \cdot 0,0011 \cdot 18.464 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,0011 \cdot 18.464}{6}\right) = 1,29 \text{ N/mm}^1$$

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

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

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

$$Q_z = 0,000360 \cdot (15 + 1,5 \cdot 20) \cdot 118 \cdot 0,024 = 0,046 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,046 \cdot 0,0011 \cdot 18.464 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,0011 \cdot 18.464}{6}\right) = 3,86 \text{ N/mm}^1$$

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen

Berekening evenwichtsdraagvermogen

$$B = D_o = 0,12 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 4,32 + 0,12 / 2 = 4,38 \text{ m}$$

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

$$d_c = 0,4 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 0,4 \cdot \tan^{-1}(4,38/0,12) = 0,62$$

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

$$P_{we} = 0,85 \cdot 25 \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + 0,02 + 0,62)$$

$$P_{we} = 178,92 \text{ kN/m}^2 = 0,18 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,18 \cdot 118,00 = 21,11 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 26,66 \text{ N/mm}^1$	Aanpassing van	$Q_n = 10,12 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing
$Q_v = 0,28 \text{ N/mm}^1$	Q_d nodig	$Q_v = 0,28 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig
$Q_d = 1,29 \text{ N/mm}^1 +$	$Q_d = 0,00 \text{ N/mm}^1$	$Q_d = 3,86 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 28,23 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 14,26 \text{ N/mm}^1$	

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

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

$$M_q = 0,178 \cdot (26,66 + 0,28) \cdot 56,80$$

$$M_q = 272,39 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,00 \cdot 56,80$$

$$M_{qd} = 0,00 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,98 \cdot (272,39 + 0,00) / 3,23 = \mathbf{83,13 \text{ N/mm}^2}$$

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

Moment t.g.v. Q_n en Q_v

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

$$M_q = 0,178 \cdot (10,12 + 0,28) \cdot 56,80$$

$$M_q = 105,14 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 3,86 \cdot 56,80$$

$$M_{qd} = 26,78 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,98 \cdot (105,14 + 26,78) / 3,23 = \mathbf{40,26 \text{ N/mm}^2}$$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
16. Berekening van de spanning S_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,024}{4,4}} = 8,77 \text{ N/mm}^2$	
17. Berekening van de spanning S_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot (15 + 1,5 \cdot 20) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,024}{4,4}} = 26,30 \text{ N/mm}^2$	
18. Berekening van de spanning S_{ax} t.g.v. temperatuurverschil	
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000115 \cdot 170000 = 19,55 \text{ N/mm}^2$	
19. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht	
<p>Aangezien er geen bocht wordt toegepast volgt:</p> $i_x = 1, i_y = 0, i_{xp} = 1, i_{yp} = 0$	
20. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk	
<p>Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$</p> $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 7,10}{113,60^3} = 14,29 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 7,10}{113,60^3} = 7,15 \text{ N/mm}^2$ <p>Conclusie: Kans op implosie bij 714,56 m grondwater boven de leiding</p>	
21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie	
$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (10,12 + 0,28) - 0,083 \cdot (1 - \sin(25,0^\circ)) \cdot (10,12 + 0,28) + 0,048 \cdot 3,86) \cdot 56,80^3}{170000 \cdot 7,10} = 0,09 \text{ mm} (= 0,082\%)$	
<p>Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · $D_g = 0,03 \cdot 0,75 \cdot 113,60 = 2,56 \text{ mm}$</p>	
1.0.0.0/01-2018/	10-04-2018 16:07:07



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)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 83,13 = \mathbf{46,22 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,81 + 0,77 \cdot 8,77 + 19,55 = \mathbf{28,11 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$$

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

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 40,26 = \mathbf{22,39 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,81 + 0,77 \cdot 26,30 + 19,55 = \mathbf{41,61 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$$