

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2016 1.4 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project	: WML Wijziging leidingnet Mook (AL-2692)		
Projectonderdeel	: Berekening Ø 300 mm Nodular Gietijzer		
Importatiefactor S	: 0,75		
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	Nodular 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	= 326,00	mm
Wanddikte	d_n	= 6,2	mm
Wanddikte bocht	t	= 6,2	mm
Bochtstraal	R	= 439,00	mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,45	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Aanleggegevens			
Ligging: Kruising met een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 36.430	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 1	m
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 70	°
Uitvoeringszakkingverschil	f_v	= 5	mm
Zettingsverschil	f_z	= 0	mm
Klinkpercentage	μ	= 0,02	%
Marstonfactor	f_m	= 0,3	-
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Verheeld			
			17-11-2017 08:59:42

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2016 1.4 ©	
Grondmechanische gegevens			
Grondsoort		= Zand	
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	= 18	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	= 10	MN/m ²
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,016	N/mm ³
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,018	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			
		17-11-2017 08:59:42	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012			Sigma 2016 1.4 ©
1. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 313,60	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i) / 2$	= 319,80	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 326,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 163,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 156,80	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 159,90	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 79.661.807,62	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 488.722,75	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 19,86	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 6,41	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:			
$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$			
$H = \frac{450.000}{1.000 \cdot 9,81} = 45,87 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 45,87^3 \cdot 0,31^5 = 292,76 \text{ m}^8$			
3. Berekening van de veiligheidszone			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{45,87^3 \cdot 0,31^5} = 16,27 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een klein gat: $R_{L1} = 0,5 \cdot R_B = 8,14 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een groot gat: $R_{L2} = R_B = 16,27 \text{ m}$			
Indien er sprake is van niet-trekvraste verbindingen: $R_{L3} = 2 \cdot R_B = 32,54 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L1} = 4 \cdot 0,00 + 8,14 = 8,14 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L2} = 4 \cdot 0,00 + 16,27 = 16,27 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L3} = 4 \cdot 0,00 + 32,54 = 32,54 \text{ m}$			
			17-11-2017 08:59:42

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2016 1.4 ©
--	------------------

4. Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk

$$D_g/d_n = 319,80/6,20 = 51,58 \rightarrow D_g/d_n > 20 \rightarrow \text{Dunwandige leiding}$$

$$\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$$

$$\sigma_p = \frac{0,45 \cdot 319,8}{2 \cdot 6,2} = 11,61 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R - D_e} \cdot \sigma_p$$

$$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot 439 - 0,5 \cdot 326}{2 \cdot 439 - 326} \cdot 11,61 = 15,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot R + 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R + D_e} \cdot \sigma_p$$

$$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot 439 + 0,5 \cdot 326}{2 \cdot 439 + 326} \cdot 11,61 = 10,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p(\text{bi}) = 15,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 15,03 = 4,21 \text{ N/mm}^2$$

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

5. Berekening reroundingfactor f_{rr}

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

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 159,9^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 19,86} \right) = 0,90$$

6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

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

$$q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 1 = 19,80 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 19,80 \cdot 10^{-3} \cdot 326 = 6,45 \text{ N/mm}^1$$

7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p

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

$$q_p = 19,80 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{1}{0,326} \right) = 38,02 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = q_p \cdot D_o$$

$$Q_p = 38,02 \cdot 10^{-3} \cdot 326 = 12,39 \text{ N/mm}^1$$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2016 1.4 ©
8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k	
$z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{D_o}{E_1^{0,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$ $z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{0,326}{10^{0,5} \cdot \sqrt{1/0,326}} = 0,012 \text{ m}$ $q_k = q_n + \frac{\frac{\mu \cdot D_o}{z_{\max}} \cdot (q_p - q_n)}{1 + \frac{q_p - q_n}{z_{\max} \cdot k_{v,\min}}}$ $q_k = 19,80 + \frac{\frac{0,02 \cdot 0,326}{0,012} \cdot (38,02 - 19,80)}{1 + \frac{38,02 - 19,80}{0,012 \cdot 0,0160 \cdot 10^6}} = 29,00 \text{ kN/m}^2$ $Q_k = q_k \cdot D_o$ $Q_k = 29,00 \cdot 10^{-3} \cdot 326 = 9,45 \text{ N/mm}^1$	
9. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek II NEN 3650-1:C.17	
<p>Niet rekenen met ontlastende invloed</p> $q_v = 37,98 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 37,98 \cdot 10^{-3} \cdot 326 = 12,38 \text{ N/mm}^1$	
10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ	
$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_{v,\text{gem}}}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda = \sqrt[4]{\frac{326 \cdot 0,018}{4 \cdot 170000 \cdot 79.661.807,62}} = 0,00057 \text{ mm}^{-1}$	
11. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (1^e en 2^e jaar)	
<p>Zettingslengte $L = 36.430 \text{ mm}$</p> $\lambda \cdot L = 0,00057 \cdot 36.430 = 20,90$ <p>$i = 0,900$ (= 90,0 % inklemming)</p> <p>$B_z = 0,000360$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)</p> $Q_z = B_z \cdot f_v \cdot D_o \cdot k_{v,\text{gem}}$ $Q_z = 0,000360 \cdot 5 \cdot 326 \cdot 0,018 = 0,011 \text{ N/mm}^1$ $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$ $Q_d = 0,011 \cdot 0,00057 \cdot 36.430 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00057 \cdot 36.430}{6}\right) = 0,89 \text{ N/mm}^1$	
12. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (na 2 jaar)	
$Q_z = B_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v,\text{gem}}$ $Q_z = 0,000360 \cdot (5 + 1,5 \cdot 0) \cdot 326 \cdot 0,018 = 0,011 \text{ N/mm}^1$ $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$ $Q_d = 0,011 \cdot 0,00057 \cdot 36.430 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00057 \cdot 36.430}{6}\right) = 0,89 \text{ N/mm}^1$	
1.4.0.0/07-2016/	17-11-2017 08:59:42

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2016 1.4 ©
--	------------------

13. Berekening evenwichtsdragvermogen en controle met bovenbelastingen

Berekening evenwichtsdragvermogen

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

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

$$B = D_o = 0,33 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,33 / 2 = 1,16 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,35$$

$$\gamma'_{gem} = (q_n + \gamma \cdot \gamma_d \cdot D_o / 2) / Z = 19,80 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 726,09 \text{ kN/m}^2 = 0,73 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 0,73 \cdot 326,00 = 236,70 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdragvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 9,45 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing	$Q_n = 6,45 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing
$Q_v = 12,38 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig	$Q_v = 12,38 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig
$Q_d = 0,89 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 0,89 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 22,73 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 19,73 \text{ N/mm}^1$	

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

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

$$M_q = 0,178 \cdot (9,45 + 12,38) \cdot 159,90$$

$$M_q = 621,49 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,89 \cdot 159,90$$

$$M_{qd} = 17,36 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,90 \cdot (621,49 + 17,36) / 6,41 = 89,74 \text{ N/mm}^2$$

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

Moment t.g.v. Q_n en Q_v

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

$$M_q = 0,178 \cdot (6,45 + 12,38) \cdot 159,90$$

$$M_q = 536,11 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,89 \cdot 159,90$$

$$M_{qd} = 17,36 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,90 \cdot (536,11 + 17,36) / 6,41 = 77,75 \text{ N/mm}^2$$

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2016 1.4 ©
16. Berekening van de spanning S_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot 5 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,018}{6,2}} = 2,13 \text{ N/mm}^2$	
17. Berekening van de spanning S_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot (5 + 1,5 \cdot 0) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,018}{6,2}} = 2,13 \text{ N/mm}^2$	
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>Berekening van de factoren i_x, i_{xp}, i_y en i_{yp} van de bocht:</p> $r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 159,90 \text{ mm}$ $h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{6,2 \cdot 439}{159,9^2} = 0,11$ $k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,11} = 15,50$ $i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,11^{(2/3)}} = 4,01$ $c_2 = 1 + 3,25 \cdot (p_d/E) \cdot (r/t)^{(5/2)} \cdot (R/r)^{(2/3)}$ $c_2 = 1 + 3,25 \cdot (0,45/170000) \cdot (159,90/6,2)^{(5/2)} \cdot (439,00/159,9)^{(2/3)} = 1,06$ $i_{xp} = \frac{i_x}{c_2} = \frac{4,01}{1,06} = 3,79$ $i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 4,01 = 8,01$ $i_{yp} = 2 \cdot i_{xp} = 2 \cdot 3,79 = 7,58$	
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> $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 19,86}{319,80^3} = 1,79 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 19,86}{319,80^3} = 0,90 \text{ N/mm}^2$ <p>Conclusie: Kans op implosie bij 89,61 m grondwater boven de leiding</p>	
1.4.0.0/07-2016/	17-11-2017 08:59:42

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2016 1.4 ©
21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie	
$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (6,45 + 12,38) - 0,083 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (6,45 + 12,38) + 0,048 \cdot 0,89) \cdot 159,90^3}{170000 \cdot 19,86} = 1,21 \text{ mm (= 0,38\%)}$ <p>Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · D_g = 0,03 · 0,75 · 319,80 = 7,20 mm</p>	
22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma, \tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (89,74 + 7,58 \cdot 2,13) = \mathbf{58,88 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma, ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 4,21 + 0,77 \cdot 3,79 \cdot 2,13 + 19,55 = \mathbf{29,98 \text{ N/mm}^2}$ <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> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma, \tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (77,75 + 7,58 \cdot 2,13) = \mathbf{52,21 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma, ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 4,21 + 0,77 \cdot 3,79 \cdot 2,13 + 19,55 = \mathbf{29,98 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}$</p>	
1.4.0.0/07-2016/	17-11-2017 08:59:42