

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project	: Sanering leidingnet Diepstraat Bat		
Projectonderdeel	: NGY Ø60 Sanering leidingnet Diepstraat Bat		
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	= 77,00	mm
Wanddikte	d_n	= 4,8	mm
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,8	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	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	= 10,0	mm
Zettingsverschil	f_z	= 15	mm
Klinkpercentage	μ	= 0,075	%
Marstonfactor	f_m	= 0,3	-
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Verheeld			
			31-05-2018 08:49:08

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	= 17	kN/m ³
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	= 17,5	°
Effectieve cohesie	c'	= 5,0	kN/m ²
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 50,0	kN/m ²
E-modulus sleufmateriaal	E_1	= 1,0	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 II:		Fatigue Load Model 2, Lorry 4	
Niet rekenen met ontlastende invloed wegdek			
		31-05-2018 08:49:08	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
1. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 67,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 72,20	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 77,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 38,50	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 33,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 36,10	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 712.570,77	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 18.508,33	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 9,22	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 3,84	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:			
$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$			
$H = \frac{800.000}{1.000 \cdot 9,81} = 81,55 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 81,55^3 \cdot 0,07^5 = 0,75 \text{ m}^8$			
3. Berekening van de veiligheidszone			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{81,55^3 \cdot 0,07^5} = 7,72 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 0,00 + 7,72 = 7,72 \text{ m}$			
4. Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk			
$D_g/d_n = 72,20/4,80 = 15,04 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow$ Dikwandige leiding			
$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d$			
$\sigma_p = \frac{38,50^2 + 33,70^2}{38,50^2 - 33,70^2} \cdot 0,8 = 6,04 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{y1} = \sigma_p = 6,04 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 6,04 = 1,69 \text{ N/mm}^2$			
Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = 81,00 \text{ N/mm}^2$			
5. Berekening reroundingfactor f_{rr}			
$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w} \right)$			
$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 36,1^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 9,22} \right) = 1,00$			
6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n			
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d$			
$q_n = 1,1 \cdot 17 \cdot 1,0 = 18,70 \text{ kN/m}^2$			
$Q_n = q_n \cdot D_o$			
$Q_n = 18,70 \cdot 10^{-3} \cdot 77 = 1,44 \text{ N/mm}^1$			
		31-05-2018 08:49:08	

7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p

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

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

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

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

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

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

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

$$p_f' = 13,13 \cdot (1 + \sin(17,5)) + 5,0 \cdot \cos(17,5) = 21,85 \text{ kN/m}^2$$

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

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

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

$$Q = \frac{13,13 \cdot \sin(17,5) + 5,0 \cdot \cos(17,5)}{0,71 \cdot 10^3} = 0,012$$

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

$$p'_{\text{max}} = (21,85 + 17,5 \cdot \cot(17,5)) \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 0,077^2}{0,5 \cdot 0,077 + 1,0} + 0,01 \right)^{\frac{-\sin 17,5}{1 + \sin 17,5}} - 5,0 \cdot \cot(17,5)$$

$$p'_{\text{max}} = \mathbf{86,02 \text{ kN/m}^2}$$

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

$$Q_p = 86,02 \cdot 10^{-3} \cdot 77 = 6,62 \text{ N/mm}^1$$

8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k

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

$$z_{\text{max}} = 0,25 \cdot \frac{0,077}{1,0^{1,5} \cdot \sqrt{1,0/0,077}} = 0,0053 \text{ m}$$

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

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

$$q_k = 18,70 + \frac{\frac{0,075 \cdot 0,077}{0,0053} \cdot (86,02 - 18,70)}{1 + \frac{86,02 - 18,70}{0,0053 \cdot 0,0160 \cdot 10^6}} = 59,41 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = q_k \cdot D_o$$

$$Q_k = 59,41 \cdot 10^{-3} \cdot 77 = 4,57 \text{ N/mm}^1$$

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

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

Niet rekenen met ontlastende invloed

$$q_v = 38,70 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_v = q_v \cdot D_o$$

$$Q_v = 38,70 \cdot 10^{-3} \cdot 77 = 2,98 \text{ N/mm}^1$$

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{77 \cdot 0,024}{4 \cdot 170000 \cdot 712.570,77}} = 0,0014 \text{ mm}^{-1}$$

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

Zettingslengte $L = 40.000 \text{ mm}$

$$\lambda \cdot L = 0,0014 \cdot 40.000 = 55,90$$

$i = 0,964$ (= 96,4 % inklemming)

$B_z = 0,00000858$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)

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

$$Q_z = 0,00000858 \cdot 10,0 \cdot 77 \cdot 0,024 = 0,00016 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,00016 \cdot 0,0014 \cdot 40.000 \cdot \left(0,964 + \frac{0,964 \cdot 0,0014 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,09 \text{ N/mm}^1$$

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

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

$$Q_z = 0,00000858 \cdot (10,0 + 1,5 \cdot 15) \cdot 77 \cdot 0,024 = 0,00052 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,00052 \cdot 0,0014 \cdot 40.000 \cdot \left(0,964 + \frac{0,964 \cdot 0,0014 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,29 \text{ N/mm}^1$$

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

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen

Berekening evenwichtsdraagvermogen

$$B = D_o = 0,08 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,08 / 2 = 1,04 \text{ m}$$

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

$$d_c = 0,4 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 0,4 \cdot \tan^{-1}(1,04/0,08) = 0,60$$

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

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

$$P_{we} = 353,72 \text{ kN/m}^2 = 0,35 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,35 \cdot 77,00 = 27,24 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 4,57 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing	$Q_n = 1,44 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing
$Q_v = 2,98 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig	$Q_v = 2,98 \text{ N/mm}^1$	van Q_d nodig
$Q_d = 0,09 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 0,29 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 7,64 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 4,71 \text{ N/mm}^1$	

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

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

$$M_q = 0,178 \cdot (4,57 + 2,98) \cdot 36,10$$

$$M_q = 48,54 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,09 \cdot 36,10$$

$$M_{qd} = 0,39 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 1,00 \cdot (48,54 + 0,39) / 3,84 = 12,68 \text{ N/mm}^2$$

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

Moment t.g.v. Q_n en Q_v

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

$$M_q = 0,178 \cdot (1,44 + 2,98) \cdot 36,10$$

$$M_q = 28,40 \text{ Nmm/mm}^1$$

Moment t.g.v. Q_d

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

$$M_{qd} = 0,122 \cdot 0,29 \cdot 36,10$$

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

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

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

$$\sigma_q = 1,00 \cdot (28,40 + 1,26) / 3,84 = 7,69 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$\sigma_{bx} = 0,00345 \cdot 10,0 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,024}{4,8}} = 1,00 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1.5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00345 \cdot (10,0 + 1.5 \cdot 15) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,024}{4,8}} = 3,27 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000115 \cdot 170000 = 19,55 \text{ N/mm}^2$$

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 implosie: berekening van de alzijdige overdruk

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

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

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 9,22}{72,20^3} = 72,27 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 9,22}{72,20^3} = 36,13 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **3.613,49** m grondwater boven de leiding

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

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

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (1,44 + 2,98) - 0,083 \cdot (1 - \sin(17,5^\circ)) \cdot (1,44 + 2,98) + 0,048 \cdot 0,29) \cdot 36,10^3}{170000 \cdot 9,22} = 0,00 \text{ mm (= 0,0063\%)}$$

Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · $D_g = 0,03 \cdot 0,75 \cdot 72,20 = 1,62 \text{ mm}$

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)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 12,68 = \mathbf{7,05 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,69 + 0,77 \cdot 1,00 + 19,55 = \mathbf{22,02 \text{ N/mm}^2}$$

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

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

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 7,69 = \mathbf{4,27 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,69 + 0,77 \cdot 3,27 + 19,55 = \mathbf{23,76 \text{ N/mm}^2}$$

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