

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2020 1.0 ©
Algemene gegevens			
Naam van het project : WML Nachtegaalstraat Projectonderdeel : Waterleiding DN100 NGIJ Importantiefactor S : 0,75			
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	Nodulair gietijzer		
Kwaliteit:	NEN-EN 545		
Minimum waarde treksterkte	R_m	= 420	N/mm ²
Materiaalfactor	γ_M	= 2,5	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t$	= 168,00	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus	E	= 170000	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α_g	= $1,2 \cdot 10^{-5}$	mm/(mm·K)
Alfa Tangentieel	$\alpha_{\sigma, \tan}$	= 0,556	-
Alfa Axiaal	$\alpha_{\sigma, ax}$	= 0,77	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 3	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D_e	= 118,00	mm
Wanddikte	d_n	= 4,8	mm
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,3	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	= 1,00	m
Gronddekking boven de grondwaterstand	H_d	= 0,8	m
Gronddekking onder de grondwaterstand	H_n	= 0,20	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}	= 1,42	m
2020-002-003			15-09-2020 13:38:10

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2020 1.0 ©	
Grondmechanische gegevens				
Grondsoort		= Zand		
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	= 19	kN/m ³	
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	= 21	kN/m ³	
Volumiek gewicht water	γ_w	= 10	kN/m ³	
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	= 32,5	°	
Effectieve cohesie	c'	= 0	kN/m ²	
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	= 0	kN/m ²	
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,004	N/mm ³	
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,006	N/mm ³	
Niet rekenen met horizontale steundruk				
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1		
Verkeersbelasting				
Grafiek I:		Fatigue Load Model 3		
Niet rekenen met ontlastende invloed wegdek				
2020-002-003			15-09-2020 13:38:10	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2020 1.0 ©
1. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 108,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i) / 2$	= 113,20	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	$r_i = D_i / 2$	= 54,20	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 56,60	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 2.739.179,95	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 46.426,78	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 m⁸ zijn. H is de druk in meters vloeistofkolom. Rekening houdende met $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ volgt: $H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$ $H = \frac{300.000}{1.000 \cdot 9,81} = 30,58 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 30,58^3 \cdot 0,11^5 = 0,43 \text{ m}^8$			
3. Berekening van de veiligheidszone			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{H^3 \cdot D_i^5}$ $R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{30,58^3 \cdot 0,11^5} = 7,19 \text{ m}$ Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 1,42 + 7,19 = 12,87 \text{ m}$ $D_K = 1,2 \cdot (D_o + H) = 1,2 \cdot (0,118 + 1,00) = 1,34 \text{ m}$			
4. Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk			
$D_g/d_n = 113,20/4,80 = 23,58 \rightarrow D_g/d_n > 20 \rightarrow$ Dunwandige leiding $\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$ $\sigma_p = \frac{0,3 \cdot 113,2}{2 \cdot 4,8} = 3,54 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{y1} = \sigma_p = 3,54 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 3,54 = 0,99 \text{ N/mm}^2$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 168,00 \cdot 0,75 = \mathbf{126,00 \text{ N/mm}^2}$			
5. Berekening reroundingfactor f_{rr}			
$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 56,6^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 9,22}) = 0,99$			
2020-002-003			15-09-2020 13:38:10

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2020 1.0 ©
6. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n		
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$ $q_n = 1,1 \cdot 19 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 21 \cdot 0,20 - 10 \cdot 0,20 = 19,34 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 19,34 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 2,28 \text{ N/mm}^1$		
7. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p		
$q_p = q_n \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o}\right)$ $q_p = 19,34 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{1,00}{0,118}\right) = 68,51 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 68,51 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 8,08 \text{ N/mm}^1$		
8. Berekening van de reële grondbelasting Q_k		
$\kappa = 1 - \sin(\varphi)$ $\kappa = 1 - \sin(32,5) = 0,463$ $\nu = \frac{\kappa}{1 + \kappa}$ $\nu = \frac{0,463}{1 + 0,463} = 0,32$ $E_1 = E_{100} / \frac{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}{1 - \nu}$ $E_1 = 50 / \frac{1 - 0,32 - 2 \cdot 0,32^2}{1 - 0,32} = 70,69 \text{ MN/m}^2$ $z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{D_o}{E_1^{0,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$ $z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{0,118}{70,69^{0,5} \cdot \sqrt{1,00/0,118}} = 0,00096 \text{ m}$ $q_k = q_n + \frac{\frac{\mu \cdot D_o}{z_{\max}} \cdot (q_p - q_n)}{1 + \frac{q_p - q_n}{z_{\max} \cdot k_{v,\min}}}$ $q_k = 19,34 + \frac{\frac{0,1 \cdot 0,118}{0,00096} \cdot (68,51 - 19,34)}{1 + \frac{68,51 - 19,34}{0,00096 \cdot 0,0040 \cdot 10^6}} = 63,11 \text{ kN/m}^2$ $Q_k = q_k \cdot D_o$ $Q_k = 63,11 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 7,45 \text{ N/mm}^1$		
9. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek I NEN 3650-1:C.17		
Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 54,17 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 54,17 \cdot 10^{-3} \cdot 118 = 6,39 \text{ N/mm}^1$		
2020-002-003	15-09-2020 13:38:10	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020

Sigma 2020 1.0 ©

10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding I

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{118 \cdot 0,006}{4 \cdot 170000 \cdot 2.739.179,95}} = 0,00079 \text{ mm}^{-1}$$

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

Zettingslengte $L = 40.000 \text{ mm}$
 $\lambda \cdot L = 0,00079 \cdot 40.000 = 31,41$
 $i = 0,934$ (= 93,4 % inklemming)
 $B_z = 0,0000782$ (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)
 $Q_z = B_z \cdot f_v \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$
 $Q_z = 0,0000782 \cdot 15 \cdot 118 \cdot 0,006 = 0,00083 \text{ N/mm}^1$
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$
 $Q_d = 0,00083 \cdot 0,00079 \cdot 40.000 \cdot \left(0,934 + \frac{0,934 \cdot 0,00079 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,15 \text{ N/mm}^1$

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

$Q_z = B_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$
 $Q_z = 0,0000782 \cdot (15 + 2,0 \cdot 25) \cdot 118 \cdot 0,006 = 0,0036 \text{ N/mm}^1$
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot \left(i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6}\right)$
 $Q_d = 0,0036 \cdot 0,00079 \cdot 40.000 \cdot \left(0,934 + \frac{0,934 \cdot 0,00079 \cdot 40.000}{6}\right) = 0,66 \text{ N/mm}^1$

13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen
Berekening evenwichtsdraagvermogen

$N_q = e^{\pi \cdot \tan(\varphi)} \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 24,58$
 $N_y = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi) = 22,54$
 $B = D_o = 0,12 \text{ m}$
 $B/L = 0,1$
 $Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,12 / 2 = 1,06 \text{ m}$
 $S_y = 1 - 0,4 \cdot B/L = 0,96$
 $d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,40$
 $\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 18,99 \text{ kN/m}^3$
 $P_{we} = 0,95 \cdot (0,5 \cdot \gamma'_{gem} \cdot D_o \cdot N_y \cdot S_y \cdot d_y + S_q \cdot N_q \cdot d_q \cdot (q_n + c' \cdot \cot(\varphi)) - c' \cdot \cot(\varphi))$
 $P_{we} = 688,53 \text{ kN/m}^2 = 0,69 \text{ N/mm}^2$
 $P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 0,69 \cdot 118,00 = 81,25 \text{ N/mm}^1$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Situatie 1 ^e en 2 ^e jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 7,45 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing van Q_d nodig	$Q_n = 2,28 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing van Q_d nodig
$Q_v = 6,39 \text{ N/mm}^1$		$Q_v = 6,39 \text{ N/mm}^1$	
$Q_d = 0,15 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 0,66 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 13,99 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 9,33 \text{ N/mm}^1$	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2020 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> $M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$ $M_q = 0,178 \cdot (7,45 + 6,39) \cdot 56,60$ $M_q = 139,43 \text{ Nmm/mm}^1$		<i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 0,15 \cdot 56,60$ $M_{qd} = 1,05 \text{ Nmm/mm}^1$
<i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 0,99 \cdot (139,43 + 1,05) / 3,84 = \mathbf{36,32 \text{ N/mm}^2}$		
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> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$ $M_q = 0,178 \cdot (2,28 + 6,39) \cdot 56,60$ $M_q = 87,40 \text{ Nmm/mm}^1$		<i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 0,66 \cdot 56,60$ $M_{qd} = 4,54 \text{ Nmm/mm}^1$
<i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 0,99 \cdot (87,40 + 4,54) / 3,84 = \mathbf{23,77 \text{ N/mm}^2}$		
16. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,00967 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,006}{4,8}} = \mathbf{2,11 \text{ N/mm}^2}$		
17. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z		
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,00967 \cdot (15 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,006}{4,8}} = \mathbf{9,16 \text{ N/mm}^2}$		
18. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil		
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000115 \cdot 170000 = \mathbf{19,55 \text{ N/mm}^2}$		
19. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht		
Aangezien er geen bocht wordt toegepast volgt: $i_x = 1, i_y = 0, i_{xp} = 1, i_{yp} = 0$		
2020-002-003	15-09-2020 13:38:11	

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2020 1.0 ©
20. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk		
Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$ $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 9,22}{113,20^3} = 18,75 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 9,22}{113,20^3} = 9,38 \text{ N/mm}^2$ Conclusie: Kans op implosie bij 937,56 m grondwater boven de leiding		
21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie		
$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (2,28 + 6,39) - 0,083 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (2,28 + 6,39) + 0,048 \cdot 0,66) \cdot 56,60^3}{170000 \cdot 9,22} = \mathbf{0,05 \text{ mm}} (= 0,048\%)$ Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · $D_g = 0,03 \cdot 0,75 \cdot 113,20 = \mathbf{2,55 \text{ mm}}$		
22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma,tan} \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 36,32 = \mathbf{20,20 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma,ax} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,99 + 0,77 \cdot 2,11 + 19,55 = \mathbf{22,17 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 168,00 \cdot 0,75 = \mathbf{126,00 \text{ N/mm}^2}$		
23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma,tan} \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot 23,77 = \mathbf{13,22 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma,ax} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,99 + 0,77 \cdot 9,16 + 19,55 = \mathbf{27,59 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 168,00 \cdot 0,75 = \mathbf{126,00 \text{ N/mm}^2}$		
2020-002-003	15-09-2020 13:38:11	