

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
<b>Algemene gegevens</b>			
Naam van het project	: Aanleg waterleiding t.p.v. Voorstad St Jacob Roermond		
Projectonderdeel	: Sterkteberekening Nodulair gietijzer Ø 250 mm buistype C40 / grondsoort Leem		
Importatiefactor S	: 0,75		
<b>Materiaalgegevens</b>			
Materiaalsoort:	Nodulair gietijzer		
Kwaliteit:	NEN-EN 545		
Minimum waarde treksterkte	$R_m$	= 270	N/mm <sup>2</sup>
Materiaalfactor	$\gamma_M$	= 2,5	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t$	= 108,00	N/mm <sup>2</sup>
Elasticiteitsmodulus	E	= 170000	N/mm <sup>2</sup>
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$\alpha_g$	= $1,2 \cdot 10^{-5}$	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiële	$\alpha_{\sigma, \tan}$	= 0,556	-
Alfa Axiaal	$\alpha_{\sigma, ax}$	= 0,77	-
Toelaatbare deflectie	$\delta$	= 3	%
<b>Leidinggegevens</b>			
Uitwendige middellijn	$D_e$	= 274,00	mm
Wanddikte	$d_n$	= 5,5	mm
Wanddikte bocht	t	= 5,5	mm
Bochtstraal	R	= 2.000,00	mm
<b>Procesgegevens</b>			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	$p_d$	= 0,6	N/mm <sup>2</sup>
Volumieke massa vloeistof	$\rho$	= 1000	kg/m <sup>3</sup>
Temperatuurverschil	$\Delta t$	= 10	°
<b>Aanleggegevens</b>			
Ligging: Evenwijdig aan een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 40.000	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 1	m
Belastinghoek	$\alpha$	= 180	°
Ondersteuningshoek	$\beta$	= 70	°
Uitvoeringszakkingverschil	$f_v$	= 15	mm
Zettingsverschil	$f_z$	= 25	mm
Klinkpercentage	$\mu$	= 0,1	%
Marstonfactor	$f_m$	= 0,3	-
<b>Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone</b>			
Waterstaatswerk: Verheeld			
		17-01-2018 10:18:37	

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

**Grondmechanische gegevens**

Grondsoort		= Klei	
Volumiek gewicht droge grond	$\gamma_d$	= 20	kN/m <sup>3</sup>
Inwendige wrijvingshoek grond	$\phi$	= 27,5	°
Effectieve cohesie	$c'$	= 1	kN/m <sup>2</sup>
Ongedraineerde schuifsterkte	$c_u$	= 50	kN/m <sup>2</sup>
E-modulus sleufmateriaal	$E_1$	= 1	MN/m <sup>2</sup>
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,004	N/mm <sup>3</sup>
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,006	N/mm <sup>3</sup>
Niet rekenen met horizontale steundruk			
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	$\gamma$	= 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 ©	
<b>1. Eigenschappen van de leiding</b>			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 263,00	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i) / 2$	= 268,50	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 274,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 137,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 131,50	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 134,25	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 41.825.162,56	mm <sup>4</sup>
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 305.293,16	mm <sup>3</sup>
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 13,86	mm <sup>4</sup> /mm <sup>1</sup>
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 5,04	mm <sup>3</sup> /mm <sup>1</sup>
<b>2. Toetsing of vereenvoudigde berekeningsmethode is toegestaan</b>			
Voor vloeistofleidingen geldt: $H^3 \cdot D_i^5$ moet kleiner dan 40 m <sup>8</sup> zijn. H is de druk in meters vloeistofkolom. Rekening houdende met $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ volgt:			
$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$			
$H = \frac{600.000}{1.000 \cdot 9,81} = 61,16 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 61,16^3 \cdot 0,26^5 = 287,89 \text{ m}^8$			
<b>3. Berekening van de veiligheidszone</b>			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$			
$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{61,16^3 \cdot 0,26^5} = 16,24 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 0,00 + 16,24 = 16,24 \text{ m}$			
<b>4. Berekening van de spanningen <math>\sigma_p</math> en <math>\sigma_{pl}</math> t.g.v. inwendige druk</b>			
$D_g/d_n = 268,50/5,50 = 48,82 \rightarrow D_g/d_n > 20 \rightarrow$ Dunwandige leiding			
$\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$			
$\sigma_p = \frac{0,6 \cdot 268,5}{2 \cdot 5,5} = 14,65 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R - D_e} \cdot \sigma_p$			
$\sigma_p(\text{bi}) = \frac{2 \cdot 2000 - 0,5 \cdot 274}{2 \cdot 2000 - 274} \cdot 14,65 = 15,18 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot R + 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R + D_e} \cdot \sigma_p$			
$\sigma_p(\text{bu}) = \frac{2 \cdot 2000 + 0,5 \cdot 274}{2 \cdot 2000 + 274} \cdot 14,65 = 14,18 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{y1} = \sigma_p(\text{bi}) = 15,18 \text{ N/mm}^2$			
$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,28 \cdot 15,18 = 4,25 \text{ N/mm}^2$			
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 ©
<b>5. Berekening reroundingfactor <math>f_{rr}</math></b>	
$f_{rr} = 1 / \left( 1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_v}{E \cdot I_w} \right)$ $f_{rr} = 1 / \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 134,25^3 \cdot 0,102}{170000 \cdot 13,86} \right) = 0,89$	
<b>6. Berekening van de neutrale grondbelasting <math>Q_n</math></b>	
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d$ $q_n = 1,1 \cdot 20 \cdot 1 = 22,00 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 22,00 \cdot 10^{-3} \cdot 274 = 6,03 \text{ N/mm}^1$	
<b>7. Berekening van de passieve grondbelasting <math>Q_p</math></b>	
$q_p = q_n \cdot \left( 1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o} \right)$ $q_p = 22,00 \cdot \left( 1 + 0,3 \cdot \frac{1}{0,274} \right) = 46,09 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 46,09 \cdot 10^{-3} \cdot 274 = 12,63 \text{ N/mm}^1$	
<b>8. Berekening van de reële grondbelasting <math>Q_k</math></b>	
$z_{max} = 0,25 \cdot \frac{D_o}{E_1^{1,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$ $z_{max} = 0,25 \cdot \frac{0,274}{1^{1,5} \cdot \sqrt{1/0,274}} = 0,036 \text{ m}$ $q_k = q_n + \frac{\frac{\mu \cdot D_o}{z_{max}} \cdot (q_p - q_n)}{1 + \frac{q_p - q_n}{z_{max} \cdot k_{v,min}}}$ $q_k = 22,00 + \frac{\frac{0,1 \cdot 0,274}{0,036} \cdot (46,09 - 22,00)}{1 + \frac{46,09 - 22,00}{0,036 \cdot 0,0040 \cdot 10^6}} = 37,76 \text{ kN/m}^2$ $Q_k = q_k \cdot D_o$ $Q_k = 37,76 \cdot 10^{-3} \cdot 274 = 10,35 \text{ N/mm}^1$	
<b>9. Berekening van de verkeersbelasting <math>Q_v</math> volgens Grafiek II NEN 3650-1:C.17</b>	
<p>Niet rekenen met ontlastende invloed</p> $q_v = 38,20 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 38,20 \cdot 10^{-3} \cdot 274 = 10,47 \text{ N/mm}^1$	
<b>10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding <math>\lambda</math></b>	
$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_{v,gem}}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda = \sqrt[4]{\frac{274 \cdot 0,006}{4 \cdot 170000 \cdot 41.825.162,56}} = 0,00049 \text{ mm}^{-1}$	
	17-01-2018 10:18:37

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

**11. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar)**

Zettingslengte  $L = 40.000$  mm  
 $\lambda \cdot L = 0,00049 \cdot 40.000 = 19,61$   
 $i = 0,893$  (= 89,3 % inklemming)  
 $B_z = 0,000455$  (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)  
 $Q_z = B_z \cdot f_v \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$   
 $Q_z = 0,000455 \cdot 15 \cdot 274 \cdot 0,006 = 0,011$  N/mm<sup>1</sup>  
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot (i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6})$   
 $Q_d = 0,011 \cdot 0,00049 \cdot 40.000 \cdot (0,893 + \frac{0,893 \cdot 0,00049 \cdot 40.000}{6}) = 0,84$  N/mm<sup>1</sup>

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

$Q_z = B_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot D_o \cdot k_{v,gem}$   
 $Q_z = 0,000455 \cdot (15 + 1,5 \cdot 25) \cdot 274 \cdot 0,006 = 0,039$  N/mm<sup>1</sup>  
 $Q_d = Q_z \cdot \lambda \cdot L \cdot (i + \frac{i \cdot \lambda \cdot L}{6})$   
 $Q_d = 0,039 \cdot 0,00049 \cdot 40.000 \cdot (0,893 + \frac{0,893 \cdot 0,00049 \cdot 40.000}{6}) = 2,94$  N/mm<sup>1</sup>

**13. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen**

*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

$B = D_o = 0,27$  m  
 $B/L = 0,1$   
 $Z = h + D_o / 2 = 1,00 + 0,27 / 2 = 1,14$  m  
 $S_c = 0,2 \cdot B/L = 0,02$   
 $d_c = 0,4 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 0,4 \cdot \tan^{-1}(1,14/0,27) = 0,53$   
 $P_{we} = 0,85 \cdot c_u \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + S_c + d_c)$   
 $P_{we} = 0,85 \cdot 50 \cdot (\pi + 2) \cdot (1 + 0,02 + 0,53)$   
 $P_{we} = 339,52$  kN/m<sup>2</sup> = 0,34 N/mm<sup>2</sup>  
 $P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,34 \cdot 274,00 = 93,03$  N/mm<sup>1</sup>

*Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen*

Situatie 1 <sup>e</sup> en 2 <sup>e</sup> jaar	Conclusie:	Situatie na 2 jaar	Conclusie:
$Q_k = 10,35$ N/mm <sup>1</sup>	Geen aanpassing	$Q_n = 6,03$ N/mm <sup>1</sup>	Geen aanpassing
$Q_v = 10,47$ N/mm <sup>1</sup>	van $Q_d$ nodig	$Q_v = 10,47$ N/mm <sup>1</sup>	van $Q_d$ nodig
$Q_d = 0,84$ N/mm <sup>1</sup> +		$Q_d = 2,94$ N/mm <sup>1</sup> +	
$\Sigma = 21,65$ N/mm <sup>1</sup>		$\Sigma = 19,43$ N/mm <sup>1</sup>	

**14. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar)**

*Moment t.g.v.  $Q_k$  en  $Q_v$*

$M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$   
 $M_q = 0,178 \cdot (10,35 + 10,47) \cdot 134,25$   
 $M_q = 497,35$  Nmm/mm<sup>1</sup>

*Moment t.g.v.  $Q_d$*

$M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$   
 $M_{qd} = 0,122 \cdot 0,84 \cdot 134,25$   
 $M_{qd} = 13,74$  Nmm/mm<sup>1</sup>

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

$\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$   
 $\sigma_q = 0,89 \cdot (497,35 + 13,74) / 5,04 = 90,06$  N/mm<sup>2</sup>

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
<b>15. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (na 2 jaar)</b>	
<p>Moment t.g.v. <math>Q_n</math> en <math>Q_v</math></p> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$ $M_q = 0,178 \cdot (6,03 + 10,47) \cdot 134,25$ $M_q = 394,16 \text{ Nmm/mm}^1$ <p>Spanning t.g.v. <math>M_q</math> en <math>M_{qd}</math></p> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 0,89 \cdot (394,16 + 48,08) / 5,04 = 77,93 \text{ N/mm}^2$	<p>Moment t.g.v. <math>Q_d</math></p> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 2,94 \cdot 134,25$ $M_{qd} = 48,08 \text{ Nmm/mm}^1$
<b>16. Berekening van de spanning <math>\sigma_{bx}</math> t.g.v. uitvoeringszakkingverschil <math>f_v</math></b>	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0213 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,006}{5,5}} = 4,35 \text{ N/mm}^2$	
<b>17. Berekening van de spanning <math>\sigma_{bx}</math> t.g.v. uitvoeringszakkingverschil <math>f_v</math> en zettingsverschil <math>f_z</math></b>	
$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$ $\sigma_{bx} = 0,0213 \cdot (15 + 1,5 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{170000 \cdot 0,006}{5,5}} = 15,21 \text{ N/mm}^2$	
<b>18. Berekening van de spanning <math>\sigma_{ax}</math> t.g.v. temperatuurverschil</b>	
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000115 \cdot 170000 = 19,55 \text{ N/mm}^2$	
<b>19. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht</b>	
<p>Berekening van de factoren <math>i_x</math>, <math>i_{xp}</math>, <math>i_y</math> en <math>i_{yp}</math> van de bocht:</p> $r = \left( \frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 134,25 \text{ mm}$ $h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{5,5 \cdot 2000}{134,25^2} = 0,61$ $k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,61} = 2,70$ $i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,61^{(2/3)}} = 1,25$ $c_2 = 1 + 3,25 \cdot (p_d/E) \cdot (r/t)^{(5/2)} \cdot (R/r)^{(2/3)}$ $c_2 = 1 + 3,25 \cdot (0,6/170000) \cdot (134,25/5,5)^{(5/2)} \cdot (2.000,00/134,25)^{(2/3)} = 1,20$ $i_{xp} = \frac{i_x}{c_2} = \frac{1,25}{1,20} = 1,04$ $i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 1,25 = 2,50$ $i_{yp} = 2 \cdot i_{xp} = 2 \cdot 1,04 = 2,08$	
1.0.0.0/01-2018/	17-01-2018 10:18:38

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
<b>20. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk</b>	
<p>Veiligheidsfactor <math>\gamma</math> voor langdurige onderdruk: <math>\gamma = 3</math>          Veiligheidsfactor <math>\gamma</math> voor kortdurende onderdruk: <math>\gamma = 1,5</math></p> $P_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $P_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 13,86}{268,50^3} = 2,11 \text{ N/mm}^2$ $P_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,28^2)} \cdot \frac{24 \cdot 170.000,00 \cdot 13,86}{268,50^3} = 1,06 \text{ N/mm}^2$ <p>Conclusie: Kans op implosie bij <b>105,70</b> m grondwater boven de leiding</p>	
<b>21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie</b>	
$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$ $\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (6,03 + 10,47) - 0,083 \cdot (1 - \sin(27,5^\circ)) \cdot (6,03 + 10,47) + 0,048 \cdot 2,94) \cdot 134,25^3}{170000 \cdot 13,86} = \mathbf{0,90 \text{ mm}} (= 0,33\%)$ <p>Toelaatbare deflectie = 3% · importantiefactor S · <math>D_g = 0,03 \cdot 0,75 \cdot 268,50 = \mathbf{6,04 \text{ mm}}</math></p>	
<b>22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar)</b>	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma,tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (90,06 + 2,08 \cdot 4,35) = \mathbf{55,09 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma,ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 4,25 + 0,77 \cdot 1,04 \cdot 4,35 + 19,55 = \mathbf{27,28 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = <math>\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}</math></p>	
<b>23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)</b>	
<p>Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding</p> $\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma,tan} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,556 \cdot (77,93 + 2,08 \cdot 15,21) = \mathbf{60,89 \text{ N/mm}^2}$ <p>Optredende spanningen in langsrichting van de leiding</p> $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma,ax} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 4,25 + 0,77 \cdot 1,04 \cdot 15,21 + 19,55 = \mathbf{35,96 \text{ N/mm}^2}$ <p>Toelaatbare spanning = <math>\bar{\sigma}_t \cdot S = 108,00 \cdot 0,75 = \mathbf{81,00 \text{ N/mm}^2}</math></p>	
1.0.0.0/01-2018/	17-01-2018 10:18:38