

Sterkteberekening van een leiding in open sleuf conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2016 1.4 ©	
<b>Algemene gegevens</b>			
Naam van het project	: Grubbenvorst		
Projectonderdeel	: GUR009		
Importatiefactor S	: 0,75		
<b>Materiaalgegevens</b>			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100		
Lange-duur treksterkte	MRS	= 10	N/mm <sup>2</sup>
Materiaalfactor	$\gamma_M$	= 1,25	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t$	= 8,00	N/mm <sup>2</sup>
Elasticiteitsmodulus korte duur	E	= 975	N/mm <sup>2</sup>
Elasticiteitsmodulus lange duur	E'	= 350	N/mm <sup>2</sup>
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$\alpha_g$	= 16,0·10 <sup>-5</sup>	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiëel / Alfa Axiaal	$\alpha_\sigma$	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	$\delta$	= 8	%
<b>Leidinggegevens</b>			
Uitwendige middellijn	D <sub>e</sub>	= 1.000,00	mm
Wanddikte	d <sub>n</sub>	= 73,52	mm
Geen bocht aanwezig			
<b>Procesgegevens</b>			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p <sub>d</sub>	= 0,05	N/mm <sup>2</sup>
Volumieke massa vloeistof	$\rho$	= 1000	kg/m <sup>3</sup>
Temperatuurverschil	$\Delta_t$	= 10	°
<b>Aanleggegevens</b>			
Ligging: Kruising met een waterstaatswerk			
Zettingslengte	L	= 30.449	mm
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld	H	= 3,96	m
Gronddekking boven de grondwaterstand	H <sub>d</sub>	= 2,71	m
Gronddekking onder de grondwaterstand	H <sub>n</sub>	= 1,25	m
Belastinghoek	$\alpha$	= 180	°
Ondersteuningshoek	$\beta$	= 120	°
Horizontale steundrukhoek	$\gamma$	= 120	°
Uitvoeringszakkingverschil	f <sub>v</sub>	= 10,0	mm
Zettingsverschil	f <sub>z</sub>	= 4	mm
Klinkpercentage	$\mu$	= 0,02	%
Marstonfactor	f <sub>m</sub>	= 0,3	-
<b>Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone</b>			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld		= 3,17	m
		30-10-2017 11:42:35	

**Grondmechanische gegevens**

Grondsoort		= Zand	
Volumiek gewicht droge grond	$\gamma_d$	= 19	kN/m <sup>3</sup>
Volumiek gewicht natte grond	$\gamma_n$	= 21	kN/m <sup>3</sup>
Volumiek gewicht water	$\gamma_w$	= 10	kN/m <sup>3</sup>
Inwendige wrijvingshoek grond	$\phi$	= 32,5	°
Effectieve cohesie	$c'$	= 0	kN/m <sup>2</sup>
Ongedraineerde schuifsterkte	$c_u$	= 0	kN/m <sup>2</sup>
E-modulus sleufmateriaal	$E_1$	= 7	MN/m <sup>2</sup>
Minimale verticale beddingconstante	$k_{v,min}$	= 0,0068	N/mm <sup>3</sup>
Gemiddelde verticale beddingconstante	$k_{v,gem}$	= 0,02	N/mm <sup>3</sup>
Rekenen met horizontale steundruk			
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	$\gamma$	= 1,1	

**Verkeersbelasting**

Grafiek I:		Fatigue Load Model 3	
Rekenen met ontlastende invloed wegdek:		Tweelagen structuur	
Dikte deklaag	$H_1$	= 200	mm
Elast. mod. deklaag	$E_1$	= 500	MPa
Elast. mod. ondergrond	$E_3$	= 100	MPa

### 1. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 852,96	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i) / 2$	= 926,48	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 1.000,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 500,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 426,48	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 463,24	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 23.104.668.430,07	mm <sup>4</sup>
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 46.209.336,86	mm <sup>3</sup>
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 33.115,80	mm <sup>4</sup> /mm <sup>1</sup>
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 900,87	mm <sup>3</sup> /mm <sup>1</sup>

### 2. Toetsing of vereenvoudigde berekeningsmethode is toegestaan

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:

$$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$$

$$H = \frac{50.000}{1.000 \cdot 9,81} = 5,10 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 5,10^3 \cdot 0,85^5 = 59,78 \text{ m}^8$$

### 3. Berekening van de veiligheidszone

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{H^3 \cdot D_i^5}$$

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[3]{5,10^3 \cdot 0,85^5} = 13,34 \text{ m}$$

Indien er sprake is van een klein gat:  $R_{L1} = 0,5 \cdot R_B = 6,67 \text{ m}$

Indien er sprake is van een groot gat:  $R_{L2} = R_B = 13,34 \text{ m}$

Indien er sprake is van niet-trekvraste verbindingen:  $R_{L3} = 2 \cdot R_B = 26,68 \text{ m}$

Veiligheidszone =  $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L1} = 4 \cdot 3,17 + 6,67 = 19,35 \text{ m}$

Veiligheidszone =  $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L2} = 4 \cdot 3,17 + 13,34 = 26,02 \text{ m}$

Veiligheidszone =  $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L3} = 4 \cdot 3,17 + 26,68 = 39,36 \text{ m}$

### 4. Berekening van de spanningen $\sigma_p$ en $\sigma_{pl}$ t.g.v. inwendige druk

$D_g/d_n = 926,48/73,52 = 12,60 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow$  Dikwandige leiding

$$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d$$

$$\sigma_p = \frac{500,00^2 + 426,48^2}{500,00^2 - 426,48^2} \cdot 0,05 = 0,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 0,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 0,32 = 0,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$$

### 5. Berekening reroundingfactor $f_{rr}$

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

$$f_{rr} = 1 / \left( 1 + \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 463,24^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 33.115,80} \right) = 0,97$$

**6. Berekening van de neutrale grondbelasting  $Q_n$** 

$$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$$

$$q_n = 1,1 \cdot 19 \cdot 2,71 + 1,1 \cdot 21 \cdot 1,25 - 10 \cdot 1,25 = 73,01 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 73,01 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 73,01 \text{ N/mm}^1$$

**7. Berekening van de passieve grondbelasting  $Q_p$** 

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

$$q_p = 73,01 \cdot \left( 1 + 0,3 \cdot \frac{3,96}{1} \right) = 159,75 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_p = q_p \cdot D_o$$

$$Q_p = 159,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 159,75 \text{ N/mm}^1$$

**8. Berekening van de reële grondbelasting  $Q_k$** 

$$z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{D_o}{E_1^{0,5} \cdot \sqrt{H/D_o}}$$

$$z_{\max} = 0,2 \cdot \frac{1}{70,5 \cdot \sqrt{3,96/1}} = 0,038 \text{ m}$$

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

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

$$q_k = 73,01 + \frac{0,02 \cdot 1}{0,038} \cdot (159,75 - 73,01)$$

$$q_k = 73,01 + \frac{159,75 - 73,01}{1 + \frac{159,75 - 73,01}{0,038 \cdot 0,0068 \cdot 10^6}} = 107,20 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = q_k \cdot D_o$$

$$Q_k = 107,20 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 107,20 \text{ N/mm}^1$$

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

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek: Tweelagen structuur

$$H_{1eq} = 0,9 \cdot H_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} = 0,9 \cdot 200 \cdot \sqrt[3]{\frac{500}{100}} = 307,80 \text{ mm}$$

Fictieve dekkingshoogte:  $H_{eq} = H_{1eq} + H - H_1$

$$H_{eq} = 307,80 + 3960,00 - 200 = 4.067,80 \text{ mm} = 4,07 \text{ m}$$

Gelet op de fictieve dekkingshoogte volgt:  $q_v = 12,57 \text{ kN/m}^2$

$$Q_v = q_v \cdot D_o$$

$$Q_v = 12,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 12,57 \text{ N/mm}^1$$

**10. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding  $\lambda$** 

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{1000 \cdot 0,02}{4 \cdot 975 \cdot 23.104.668.430,07}} = 0,00069 \text{ mm}^{-1}$$

**11. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar)**Zettingslengte  $L = 30.449$  mm

$$\lambda \cdot L = 0,00069 \cdot 30.449 = 20,90$$

 $i = 0,900$  (= 90,0 % inklemming) $B_z = 0,000360$  (volgens NEN 3651 - 8.5.2.4 tabel 5)

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

$$Q_z = 0,000360 \cdot 10,0 \cdot 1000 \cdot 0,02 = 0,072 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,072 \cdot 0,00069 \cdot 30.449 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00069 \cdot 30.449}{6}\right) = 6,06 \text{ N/mm}^1$$

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

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

$$Q_z = 0,000360 \cdot (10,0 + 1,5 \cdot 4) \cdot 1000 \cdot 0,02 = 0,12 \text{ N/mm}^1$$

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

$$Q_d = 0,12 \cdot 0,00069 \cdot 30.449 \cdot \left(0,900 + \frac{0,900 \cdot 0,00069 \cdot 30.449}{6}\right) = 9,70 \text{ N/mm}^1$$

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

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

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

$$B = D_o = 1,00 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 3,96 + 1,00 / 2 = 4,46 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,37$$

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 17,84 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 2.642,06 \text{ kN/m}^2 = 2,64 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 2,64 \cdot 1.000,00 = 2.642,06 \text{ N/mm}^1$$

*Controle bovenbelastingen met evenwichtsdragvermogen*

<i>Situatie 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar</i>	<i>Conclusie:</i>	<i>Situatie na 2 jaar</i>	<i>Conclusie:</i>
$Q_k = 107,20 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing van $Q_d$ nodig	$Q_n = 73,01 \text{ N/mm}^1$	Geen aanpassing van $Q_d$ nodig
$Q_v = 12,57 \text{ N/mm}^1$		$Q_v = 12,57 \text{ N/mm}^1$	
$Q_d = 6,06 \text{ N/mm}^1 +$		$Q_d = 9,70 \text{ N/mm}^1 +$	
$\Sigma = 125,84 \text{ N/mm}^1$		$\Sigma = 95,29 \text{ N/mm}^1$	

**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  $Q_v$* 

$$M_q = K_b \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_k + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,138 \cdot (107,20 + 12,57) \cdot 463,24 - 0,143 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot \sin(1/2 \cdot 120^\circ) \cdot (107,20 + 12,57) \cdot 463,24$$

$$M_q = 4.477,54 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$M_{qd} = 0,083 \cdot 6,06 \cdot 463,24$$

$$M_{qd} = 233,17 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,97 \cdot (4.477,54 + 233,17) / 900,87 = \mathbf{5,09 \text{ N/mm}^2}$$

**15. Momenten en spanningen t.g.v. directe en indirecte bovenbelastingen (na 2 jaar)***Moment t.g.v.  $Q_n$  en  $Q_v$* 

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$$

$$M_q = 0,138 \cdot (73,01 + 12,57) \cdot 463,24 - 0,143 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot \sin(1/2 \cdot 120^\circ) \cdot (73,01 + 12,57) \cdot 463,24$$

$$M_q = 3.199,49 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$M_{qd} = 0,083 \cdot 9,70 \cdot 463,24$$

$$M_{qd} = 373,08 \text{ Nmm/mm}^1$$

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

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

$$\sigma_q = 0,97 \cdot (3.199,49 + 373,08) / 900,87 = \mathbf{3,86 \text{ N/mm}^2}$$

**16. Berekening van de spanning  $\sigma_{bx}$  t.g.v. uitvoeringszakkingverschil  $f_v$** 

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

$$\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot 10,0 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,02}{73,52}} = \mathbf{0,10 \text{ N/mm}^2}$$

**17. Berekening van de spanning  $\sigma_{bx}$  t.g.v. uitvoeringszakkingverschil  $f_v$  en zettingsverschil  $f_z$** 

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 1,5 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0192 \cdot (10,0 + 1,5 \cdot 4) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,02}{73,52}} = \mathbf{0,16 \text{ N/mm}^2}$$

**18. Berekening van de spanning  $\sigma_{ax}$  t.g.v. temperatuurverschil**

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

$$\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,00016 \cdot 975 = \mathbf{1,56 \text{ N/mm}^2}$$

**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 minimale ringstijfheid  $S_N$**

$$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$$

$$S_N = 975 \cdot \frac{33.115,80}{926,48^3} = 0,0406 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{40,60 \text{ kN/m}^2}$$

Minimaal vereiste ringstijfheid = **2 kN/m<sup>2</sup>**

**21. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk**

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

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

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 33.115,80}{926,48^3} = 0,77 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 33.115,80}{926,48^3} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **13,88 m** grondwater boven de leiding

**22. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie**

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

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (73,01 + 12,57) - 0,083 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (73,01 + 12,57) + 0,048 \cdot 9,70) \cdot 463,24^3}{350 \cdot 33.115,80} = \mathbf{41,13 \text{ mm} (= 4,44\%)}$$

Toelaatbare deflectie = 8% · importantiefactor S ·  $D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 926,48 = \mathbf{55,59 \text{ mm}}$

**23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> jaar)**

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,09 = \mathbf{3,31 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,13 + 0,65 \cdot 0,10 + 1,56 = \mathbf{1,75 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$$

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

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,86 = \mathbf{2,51 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,13 + 0,65 \cdot 0,16 + 1,56 = \mathbf{1,79 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$$