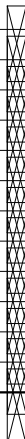
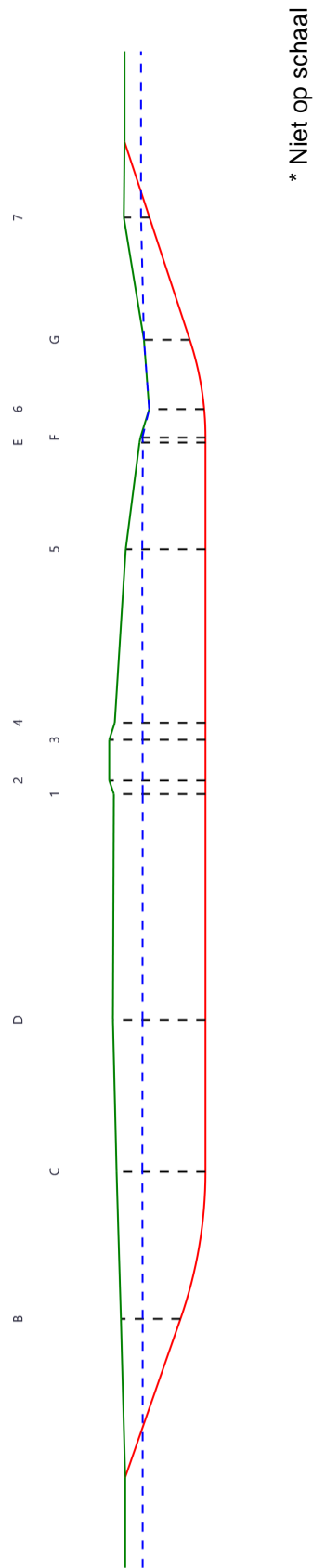


Sterkteberekening van een horizontaal gestuurde boring conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2018 1.0 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project	: Enexis HDD's 'Eiland van Bergen'		
Projectonderdeel	: HDD4 Kerkstraat $\varnothing 125$ sdr11, $\varnothing 160$ sdr11 en 2x $\varnothing 110$ sdr11		
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 11		
Lange-duur treksterkte	MRS = 10		N/mm ²
Materiaalfactor	$\gamma_M = 1,25$		-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t = 8,00$		N/mm ²
Elasticiteitsmodulus korte duur	E = 975		N/mm ²
Elasticiteitsmodulus lange duur	E' = 350		N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$\alpha_g = 16,0 \cdot 10^{-5}$		mm/(mm·K)
Alfa Tangentiëel / Alfa Axiaal	$\alpha_\sigma = 0,65$		-
Soortelijk gewicht buis	$\rho_L = 9,55$		kN/m ³
Toelaatbare deflectie	$\delta = 8$		%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	$D_e = 160,00$		mm
Wanddikte	$d_n = 14,6$		mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	$p_d = 0,8$		N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	$\rho = 1000$		kg/m ³
Temperatuurverschil	$\Delta t = 10$		°
Uitvoeringsaspecten, tracé boring, in- en uittredehoeken, onzekerheids- en wrijvingsfactoren			
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet		= 100	%
Soortelijk gewicht boorvloeistof	$\rho_m = 11,5$		kN/m ³
Zwichtspanning boorvloeistof	$\tau_y = 15$		Pa
Leiding wordt niet verzwaard t.p.v. rollenbaan			
Leiding wordt niet verzwaard t.p.v. boorgang			
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk	$D_g = 425$		mm
Diameter boorstang	$D_b = 63$		mm
Totale lengte	L = 150,39		m
Lengte 1e rechte deel	$L_1 = 18,54$		m
Lengte neergaande bocht	$L_2 = 16,58$		m
Lengte 2e rechte deel	$L_3 = 81,24$		m
Lengte opgaande bocht	$L_4 = 11,00$		m
Lengte 3e rechte deel	$L_5 = 23,03$		m
Straal maaiveld/rollenbaan	$R_r = 50,00$		m
Straal neergaande bocht	$R_1 = 50,00$		m
Straal opgaande bocht	$R_2 = 35,00$		m
Intrede-hoek (bij boorstelling)	$\alpha_1 = 19,00 / 34,43$		° / %
Uittrede-hoek (bij rollenbaan)	$\alpha_2 = 18,00 / 32,49$		° / %
Belastinghoek	$\alpha = 30$		°
Ondersteuningshoek	$\beta = 30$		°
Horizontale steundrukhoek	$\gamma = 120$		°
Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	$\gamma = 1,1$		
Totaalfactor bij boring met bundels	f = 1,8		
Belastingfactor	$f_{k,b} = 1,1$		
Belastingfactor	$f_{k,o} = 1,4$		
Wrijvingscoëff. met rollenbaan	$f_1 = 0,1$		
Wrijving tussen leiding/boorvloeistof	$f_2 = 0,00005$		N/mm ²
Wrijving tussen leiding/boorgangwand	$f_3 = 0,2$		
2018-001 Enexis HDD's 'Eiland van Bergen'		30-04-2018 08:42:34	

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
B	18,54	6,50	2,37	Zand	16,24	20,27	35,00
C	35,12	9,70	2,81	Zand	16,04	20,95	35,00
D	51,91	10,10	3,23	Zand	16,39	20,87	35,00
1	76,91	10,00	3,15	Zand	16,33	20,65	35,00
2	78,41	10,50	3,64	Zand	16,58	20,72	35,00
3	82,91	10,50	3,64	Zand	16,58	20,84	35,00
4	84,81	9,90	3,03	Zand	16,21	20,85	35,00
5	104,01	8,70	1,80	Zand	16,21	20,85	35,00
E	115,81	7,20	0,37	Zand	18,53	20,56	35,00
F	116,36	7,10	0,21	Zand	19,33	20,75	35,00
6	119,51	6,00	0,00	Zand	0,00	20,44	35,00
G	127,36	5,00	0,00	Zand	0,00	20,46	35,00
7	141,59	2,80	1,88	Zand	15,48	20,91	35,00

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Hor. steun- druk	Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
B	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
C	Homogeen (zand)		0,0320	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
D	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
1	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
2	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
3	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
4	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
5	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
E	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
F	Homogeen (zand)		0,0320	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
6	Homogeen (zand)		0,0320	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
G	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II
7	Homogeen (zand)		-	0,00	75,00	Grafiek ½ x II



Sterkteberekening van een horizontaal gestuurde boring conform NEN 3650/3651:2012	Sigma 2018 1.0 ©
---	------------------

2. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 130,80	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 145,40	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 160,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 80,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 65,40	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 72,70	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 17.801.758,07	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 222.521,98	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 259,34	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 35,53	mm ³ /mm ¹
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 6.669,10	mm ²
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 0,0637	N/mm ¹

3. Berekening van het gewicht van de leiding tijdens het intrekken van de leiding

	<i>Leiding op rollenbaan/maaiveld</i>	<i>Leiding in boorgat</i>
Gewicht mediumleiding	$g = 0,0637 \text{ N/mm}^1$	$g = 0,0637 \text{ N/mm}^1$
Gewicht vulling	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$
Totaal gewicht	$g_{rol} = 0,0637 \text{ N/mm}^1$	$g_{gat} = 0,0637 \text{ N/mm}^1$

4. Berekening van de trekkrachten en spanningen bovengronds

4.1 Berekening van de benodigde trekkrachten op rollenbaan/maaiveld

Trekkraft T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N]
Starten met trekken	150,39	1.724
Na 1 ^e deel intrekken	127,36	1.460
Na 2 ^e deel intrekken	116,36	1.334
Na 3 ^e deel intrekken	35,12	403
Na 4 ^e deel intrekken	18,54	213

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = 1,8 \cdot L \cdot 0,0637 \cdot 0,1$$

4.2 Berekening van de optredende spanningen t.g.v. de trekkrachten op rollenbaan/maaiveld

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	1.724	0,26
Na 1 ^e deel intrekken	1.460	0,22
Na 2 ^e deel intrekken	1.334	0,20
Na 3 ^e deel intrekken	403	0,06
Na 4 ^e deel intrekken	213	0,03

$$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{6.669,10}$$

4.3 Berekening van de optredende spanning t.g.v. kromming van de leiding op rollenbaan/maaiveld

$$M_b = f_{k,b} \cdot E \cdot \frac{I_b}{R_r}$$

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{17.801.758}{50.000} = 381.847,71 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

$$\sigma_b = \frac{381.847,71}{222.522} = 1,72 \text{ N/mm}^2$$

4.4 Totalisatie van de optredende spanningen op rollenbaan/maaiveld

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	0,26	1,37
Na 1 ^e deel intrekken	0,22	1,33
Na 2 ^e deel intrekken	0,20	1,32
Na 3 ^e deel intrekken	0,06	1,18
Na 4 ^e deel intrekken	0,03	1,15

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 1,72 + \sigma_t$$

 Toelaatbare spanning: $\sigma_{kd} = MRS = 10,00 \text{ N/mm}^2$

5. Berekening van de optredende spanningen tijdens het intrekken van de leiding in het boorgat
5.1 Berekening van de vereiste trekkracht T_2 en T_{3a} in verband met wrijving tussen leiding en boorvloeistof/boorgangwand

Tijdens het intrekken van de leiding in het boorgat treedt er wrijving op tussen de leiding en boorvloeistof.

100% van de omtrek van de leiding komt in aanraking met bentoniet. Hieruit volgt: $D_{e,omtrek} = 502,65 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 0,0637 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_e^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 160,00^2 \cdot \pi/4 = 0,231 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 0,168 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	23,03	2.431	-
2 ^e deel intrekken	34,03	-	3.592
3 ^e deel intrekken	115,27	12.167	-
4 ^e deel intrekken	131,85	-	13.917
Geheel ingetrokken	150,39	15.874	-

Rechte delen: $T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,8 \cdot L \cdot (502,65 \cdot 0,00005 + 0,168 \cdot 0,2)$

Gebogen delen: $T_{3a} = f \cdot L_B \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,8 \cdot L \cdot (502,65 \cdot 0,00005 + 0,168 \cdot 0,2)$

5.3 Berekening van de vereiste trekkracht T_{3b} in verband met wrijving door grondreactie in de bochten

Locatie	λ [mm ⁻¹]	R [m]	Q_r [N/mm ²]	T_{3b} [N]
C	0,0029	50,0	0,0067	823
F	0,0029	35	0,0095	1.176
6	0,0029	35	0,0095	1.176

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

$$Q_r = \frac{0,322 \cdot \lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot 0,9 \cdot R}$$

$$T_{3b} = f \cdot 4 \cdot \frac{Q_r}{2} \cdot D_o \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot f_3 = 1,8 \cdot 4 \cdot \frac{Q_r}{2} \cdot 160 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot 0,2$$

Sterkteberekening van een horizontaal gestuurde boring conform NEN 3650/3651:2012

Sigma 2018 1.0 ©

5.4 Berekening van de wrijving door bochtkracht T_{3c}

Trekkraft T_{bocht} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_{3a} [N]	$T_{3b,\text{neer}}$ [N]	$T_{3b,\text{op}}$ [N]	T_{bocht} [N]
Neergaande bocht	1.334	3.592	823	-	5.749
Opgaande bocht	213	13.917	823	1.176	16.129

Neergaande bocht: $T_{\text{bocht}} = T_1 + T_{3a,\text{neer}} + T_{3b,\text{neer,max}}$ Opgaande bocht: $T_{\text{bocht}} = T_1 + T_{3a,\text{neer}} + T_{3b,\text{neer,max}} + T_{3a,\text{op}} + T_{3b,\text{op,max}}$

Trekkraft T_{3c} tijdens verschillende stadia [N]	α [°]	T_{bocht} [N]	T_{3c} [N]
Neergaande bocht	9,50	5.749	683
Opgaande bocht	9,00	16.129	1.917

$$T_{3c} = f \cdot L_B \cdot g_t \cdot f_3$$

$$L_B = 2 \cdot R \cdot 2\pi \cdot \frac{\alpha}{360}$$

$$g_t = \frac{2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha)}{L_B}$$

$$\rightarrow T_{3c} = f \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot f_3 = 1,8 \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot 0,2$$

5.5 Totalisatie van de trekkraften in fase II

Trekkraft T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,\text{neer}}$ [N]	$T_{3c,\text{neer}}$ [N]	$T_{3b,\text{op}}$ [N]	$T_{3c,\text{op}}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	1.460	2.431	-	-	-	-	3.891
2 ^e deel intrekken	1.334	3.592	823	683	-	-	6.432
3 ^e deel intrekken	403	12.167	823	683	-	-	14.076
4 ^e deel intrekken	213	13.917	823	683	1.176	1.917	18.628
Geheel intrekken	0	15.874	823	683	1.176	1.917	20.373

$$T_{\text{tot}} = T_1 + T_2 + T_{3a} + T_{3b,\text{neer,max}} + T_{3c,\text{neer}} + T_{3b,\text{op,max}} + T_{3c,\text{op}}$$

5.6 Berekening van de optredende spanningen t.g.v. de trekkraften in fase II

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]
1 ^e deel intrekken	3.891	0,58
2 ^e deel intrekken	6.432	0,96
3 ^e deel intrekken	14.076	2,11
4 ^e deel intrekken	18.628	2,79
Geheel intrekken	20.373	3,05

$$\sigma_t = \frac{T_{\text{tot}}}{A} = \frac{T_{\text{tot}}}{6.669,10}$$

5.7 Optredende spanningen t.g.v. kromming van de leiding in het boorgat

5.7.1 Neergaande bocht

$$M_b = f_{k,o} \cdot E \cdot \frac{l_b}{0,9 \cdot R}$$

$$M_b = 1,4 \cdot 975 \cdot \frac{17.801.758,07}{0,9 \cdot 50.000} = 539.986,66 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

$$\sigma_b = \frac{539.986,66}{222.521,98} = \mathbf{2,43 \text{ N/mm}^2}$$

5.7.2 Opgaande bocht

$$M_b = f_{k,o} \cdot E \cdot \frac{l_b}{0,9 \cdot R}$$

$$M_b = 1,4 \cdot 975 \cdot \frac{17.801.758,07}{0,9 \cdot 35.000} = 771.409,52 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

$$\sigma_b = \frac{771.409,52}{222.521,98} = \mathbf{3,47 \text{ N/mm}^2}$$

5.8 Totalisatie van de spanningen in het boorgat tijdens de trekoperatie

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	3.891	0,58	-	0,58
Na 1 ^e deel intrekken	6.432	0,96	2,43	2,54
Na 2 ^e deel intrekken	14.076	2,11	-	2,11
Na 3 ^e deel intrekken	18.628	2,79	3,47	5,05
Na 4 ^e deel intrekken	20.373	3,05	-	3,05

Rechte delen: $\sigma_a = \frac{T_{tot}}{A} = \frac{T_{tot}}{6.669,10} = \sigma_t$

Gebogen delen: $\sigma_a = \alpha_\sigma \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot \sigma_b + \sigma_t$

Toelaatbare spanning: $\sigma_{kd} = MRS = \mathbf{10,00 \text{ N/mm}^2}$

6. Fase III: Berekening van de optredende spanningen tijdens de gebruiksfase
6.1 Berekening van de spanningen s_p en s_{pl} t.g.v. inwendige druk

$$D_g/d_n = 145,40/14,60 = 9,96 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding}$$

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

$$\sigma_p = \frac{80,00^2 + 65,40^2}{80,00^2 - 65,40^2} \cdot 0,8 = 4,02 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 4,02 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 4,02 = 1,61 \text{ N/mm}^2$$

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

6.2 Berekening reroundingfactor f_{rr}

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

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 72,7^3 \cdot 0,143}{975 \cdot 259,34} \right) = 0,74$$

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	h [m]	GWS [m]	γ [kN/m ³]
B	6,50	2,37	14,33
C	9,70	2,81	14,38
D	10,10	3,23	14,58
1	10,00	3,15	14,37
2	10,50	3,64	14,68
3	10,50	3,64	14,77
4	9,90	3,03	14,43
5	8,70	1,80	13,95
E	7,20	0,37	13,02
F	7,10	0,21	13,07
6	6,00	0,00	12,48
G	5,00	0,00	12,51
7	2,80	1,88	15,70

$$\gamma' = \frac{\gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w}{h}$$

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
B	Homogeen (zand)	1,70	14,90	1,63 ⁽¹⁾
C	Homogeen (zand)	1,70	22,31	1,64 ⁽¹⁾
D	Homogeen (zand)	1,70	23,56	1,66 ⁽¹⁾
1	Homogeen (zand)	1,70	22,99	1,64 ⁽¹⁾
2	Homogeen (zand)	1,70	24,66	1,67 ⁽¹⁾
3	Homogeen (zand)	1,70	24,81	1,68 ⁽¹⁾
4	Homogeen (zand)	1,70	22,86	1,64 ⁽¹⁾
5	Homogeen (zand)	1,70	19,42	1,59 ⁽¹⁾
E	Homogeen (zand)	1,70	14,99	1,48 ⁽¹⁾
F	Homogeen (zand)	1,70	14,85	1,49 ⁽¹⁾
6	Homogeen (zand)	1,70	11,98	1,42 ⁽¹⁾
G	Homogeen (zand)	1,70	10,00	1,42 ⁽¹⁾
7	Homogeen (zand)	1,70	7,04	1,75 ⁽¹⁾

$$B_1 = \frac{1}{2} \cdot D_o + D_o \cdot \tan(45^\circ - \frac{1}{2} \cdot \varphi) \geq R$$

$$K = 1 - \sin(\varphi)$$

$$Q_n = (\gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_o$$

Indien gereduceerde grondbelasting volgens berekeningswijze 'Homogeen (zand)': ($h \geq 8 \cdot B_1$):


$$Q_{n,r1} = \frac{B_1 \cdot (\gamma' - c/B_1)}{K \cdot \tan(\varphi)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot h \cdot \tan \varphi}{B_1}}\right) \cdot D_o \quad (1)$$

6.4 Berekening van de verkeersbelasting Q_v

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Verkeers- belasting	q_v [kN/m ²]	Q_v [N/mm ¹]
B	6,50	Grafiek ½ x II	1,46	0,23
C	9,70	Grafiek ½ x II	0,87	0,14
D	10,10	Grafiek ½ x II	0,83	0,13
1	10,00	Grafiek ½ x II	0,84	0,13
2	10,50	Grafiek ½ x II	0,78	0,13
3	10,50	Grafiek ½ x II	0,78	0,13
4	9,90	Grafiek ½ x II	0,85	0,14
5	8,70	Grafiek ½ x II	1,01	0,16
E	7,20	Grafiek ½ x II	1,28	0,21
F	7,10	Grafiek ½ x II	1,31	0,21
6	6,00	Grafiek ½ x II	1,61	0,26
G	5,00	Grafiek ½ x II	2,01	0,32
7	2,80	Grafiek ½ x II	4,15	0,66

$$Q_v = q_v \cdot D_o = q_v \cdot 160$$

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Hor. steundruk	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
B		14,90	1,63	0,23	1,86	30,29 ⁽²⁾	0,63
C		22,31	1,64	0,14	1,78	28,86 ⁽²⁾	0,60
D		23,56	1,66	0,13	1,79	29,11 ⁽²⁾	0,61
1		22,99	1,64	0,13	1,77	28,75 ⁽²⁾	0,60
2		24,66	1,67	0,13	1,80	29,19 ⁽²⁾	0,61
3		24,81	1,68	0,13	1,81	29,35 ⁽²⁾	0,61
4		22,86	1,64	0,14	1,78	28,90 ⁽²⁾	0,60
5		19,42	1,59	0,16	1,75	28,42 ⁽²⁾	0,59
E		14,99	1,48	0,21	1,69	27,41 ⁽²⁾	0,57
F		14,85	1,49	0,21	1,70	27,58 ⁽²⁾	0,58
6		11,98	1,42	0,26	1,68	27,27 ⁽²⁾	0,57
G		10,00	1,42	0,32	1,74	28,34 ⁽²⁾	0,59
7		7,04	1,75	0,66	2,42	39,27 ⁽²⁾	0,82

$$\text{Indien horizontale steundruk: } M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g \quad (1)$$

$$M_q = 0,257 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 72,70 - 0,143 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 72,70$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g \quad (2)$$

$$M_q = 0,257 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 72,70 - 0,143 \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 72,70$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,74 \cdot \frac{M_q}{35,53}$$

6.6 Optredende spanning s_{qr} t.g.v. grondreactie in de bochten

Locatie	R [m]	Q_r [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]
C	50,0	0,0067	0,43
F	35	0,0095	0,61
6	35	0,0095	0,61

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_r \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w} = 0,179 \cdot Q_r \cdot 160 \cdot \frac{80,00}{35,53}$$

6.7 Berekening van de spanning s_{ax} t.g.v. temperatuurverschil

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

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

7. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N

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

$$S_N = 975 \cdot \frac{259,34}{145,4^3} = 0,0823 \text{ N/mm}^2 = 82,26 \text{ kN/m}^2$$

Minimaal vereiste ringstijfheid = 2 kN/m²

8. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk

 Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$

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

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

$$P_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 259,34}{145,40^3} = 1,57 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 259,34}{145,40^3} = 0,28 \text{ N/mm}^2$$

 Conclusie: Kans op implosie bij **28,12** m grondwater boven de leiding

9. Berekening van het totaal aan optredende spanningen
9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
B	0,63	-	0,65	0,41
C	0,60	0,43	0,65	0,67
D	0,61	-	0,65	0,40
1	0,60	-	0,65	0,39
2	0,61	-	0,65	0,40
3	0,61	-	0,65	0,40
4	0,60	-	0,65	0,39
5	0,59	-	0,65	0,39
E	0,57	-	0,65	0,37
F	0,58	0,61	0,65	0,77
6	0,57	0,61	0,65	0,77
G	0,59	-	0,65	0,38
7	0,82	-	0,65	0,53

 Rechte delen: $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_q$

 Bochten: $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot (\sigma_q + \sigma_{qr})$

 Toelaatbare spanning: $\sigma_{td} = \bar{\sigma}_t = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$

9.2 Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

Locatie	σ_{pl} [N/mm ²]	σ_{ax} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	α_{σ} [-]	σ_x [N/mm ²]
B	1,61	1,56	-	-	3,17
C	1,61	1,56	2,43	0,65	4,75
D	1,61	1,56	-	-	3,17
1	1,61	1,56	-	-	3,17
2	1,61	1,56	-	-	3,17
3	1,61	1,56	-	-	3,17
4	1,61	1,56	-	-	3,17
5	1,61	1,56	-	-	3,17
E	1,61	1,56	-	-	3,17
F	1,61	1,56	3,47	0,65	5,42
6	1,61	1,56	3,47	0,65	5,42
G	1,61	1,56	-	-	3,17
7	1,61	1,56	-	-	3,17

Rechte delen: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \sigma_{ax}$ Bochten: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_A \cdot \sigma_b + \sigma_{ax}$ Toelaatbare spanning: $\sigma_{ld} = \bar{\sigma}_t = 8,00$ N/mm²

10. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
B	14,90	1,63	0,23	-	0,52⁽²⁾	0,29
C	22,31	1,64	0,14	0,0067	0,50⁽²⁾	0,28
D	23,56	1,66	0,13	-	0,50⁽²⁾	0,28
1	22,99	1,64	0,13	-	0,50⁽²⁾	0,28
2	24,66	1,67	0,13	-	0,51⁽²⁾	0,28
3	24,81	1,68	0,13	-	0,51⁽²⁾	0,28
4	22,86	1,64	0,14	-	0,50⁽²⁾	0,28
5	19,42	1,59	0,16	-	0,49⁽²⁾	0,27
E	14,99	1,48	0,21	-	0,48⁽²⁾	0,26
F	14,85	1,49	0,21	0,0095	0,48⁽²⁾	0,27
6	11,98	1,42	0,26	0,0095	0,47⁽²⁾	0,26
G	10,00	1,42	0,32	-	0,49⁽²⁾	0,27
7	7,04	1,75	0,66	-	0,68⁽²⁾	0,38

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_r) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w} \quad (1)$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 72,70^3}{350 \cdot 259,34}$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{h,r} + 0,048 \cdot Q_r) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w} \quad (2)$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) - 0,083 \cdot \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)} \cdot (Q_{n,r} + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 72,70^3}{350 \cdot 259,34}$$

Toelaatbare deflectie = 8% · D_g = 0,08 · 145,40 = **11,63** mm

11. Berekening van de boorspoeldrukken tijdens de trekfase

Locatie	H [m]	σ_{vert} [kN/m ²]	σ_{hor} [kN/m ²]	σ_o' [kN/m ²]	p_f' [kN/m ²]	G [MN/m ²]
B	6,50	69,79	29,76	49,78	78,33	28,85
C	9,70	103,30	44,05	73,67	115,93	28,85
D	10,10	109,77	46,81	78,29	123,19	28,85
1	10,00	106,86	45,57	76,21	119,92	28,85
2	10,50	115,48	49,24	82,36	129,60	28,85
3	10,50	116,23	49,56	82,90	130,44	28,85
4	9,90	106,17	45,27	75,72	119,15	28,85
5	8,70	88,31	37,66	62,99	99,11	28,85
E	7,20	65,59	27,97	46,78	73,61	28,85
F	7,10	64,76	27,62	46,19	72,68	28,85
6	6,00	51,49	21,96	36,72	57,79	28,85
G	5,00	43,00	18,34	30,67	48,26	28,85
7	2,80	34,75	14,82	24,78	38,99	28,85

$$\sigma_{vert} = \frac{\gamma_d}{\gamma} \cdot H_d + \frac{\gamma_n}{\gamma} \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$$

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

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

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

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

Locatie	Q [-]	$R_{p,max}$ [m]	u [N/mm ²]	p_{st} [N/mm ²]	Δ_p [N/mm ²]	p_{lim} [N/mm ²]
B	0,00099	2,14	0,0413	0,04659	0,00	1,02
C	0,0015	1,76	0,0689	0,07773	0,01	1,32
D	0,0016	1,70	0,0687	0,07750	0,01	1,37
1	0,0015	1,73	0,0685	0,07728	0,01	1,35
2	0,0016	1,66	0,0686	0,07739	0,01	1,41
3	0,0016	1,66	0,0686	0,07739	0,01	1,42
4	0,0015	1,73	0,0687	0,07750	0,01	1,34
5	0,0013	1,90	0,0690	0,07784	0,02	1,20
E	0,00093	2,20	0,0683	0,07705	0,02	1,01
F	0,00092	2,22	0,0689	0,07773	0,02	1,00
6	0,00073	2,49	0,0600	0,06769	0,02	0,86
G	0,00061	2,50	0,0500	0,05641	0,02	0,77
7	0,00049	1,40	0,0092	0,01038	0,02	0,64

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

$$R_{p,max} = \frac{H}{2}, R_{p,max,zand} = \sqrt{\frac{R_o^2}{Q} \cdot 2 \cdot \varepsilon_{g,max}} \text{ of } \frac{H}{2}$$

$$u = \gamma_w \cdot H_n$$

$$p_{st} = \rho_m \cdot g \cdot h_z$$

$$\Delta_p = 4 \cdot \frac{\tau_y}{D_g - D_b} \cdot L$$

$$p_{lim} = (p_f' + c \cdot \cot(\varphi)) \cdot Q \cdot \frac{-\sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - c \cdot \cot(\varphi) + u$$

Locatie	p_{max} [kPa]	90% p_{lim} [kPa]	p_{min} [kPa]	p_{max} [bar]	90% p_{lim} [bar]	p_{min} [bar]
B	448,19	914,80	49,67	4,48	9,15	0,50
C	590,91	1.187,95	83,55	5,91	11,88	0,84
D	611,26	1.232,10	86,11	6,11	12,32	0,86
1	601,87	1.212,09	90,03	6,02	12,12	0,90
2	628,94	1.270,36	90,39	6,29	12,70	0,90
3	631,25	1.275,33	91,13	6,31	12,75	0,91
4	599,89	1.207,56	91,56	6,00	12,08	0,92
5	541,52	1.081,29	95,08	5,42	10,81	0,95
E	459,44	905,13	96,25	4,59	9,05	0,96
F	456,88	898,86	97,02	4,57	8,99	0,97
6	395,38	777,38	87,50	3,95	7,77	0,87
G	332,63	690,11	77,52	3,33	6,90	0,78
7	162,15	571,66	33,85	1,62	5,72	0,34

$$p_{max} = (p'_f + c \cdot \cot(\varphi)) \cdot \left(\frac{R_o}{R_{p,max}} \right)^2 + Q - c \cdot \cot(\varphi) + u$$

$$p_{min} = p_{st} + \Delta p$$

