

MEMO

Aan:	(GW Leidingtechniek)
Van:	(Adviesbureau Schrijvers)
Datum:	22-05-2025
Betreft:	Vervanging AC-persleiding tracé Baarlo-Blerick

1. Inleiding

GW Leidingtechniek BV is bezig met de afronding van het DO voor het vervangen van de persleiding tussen Baarlo en Blerick. Hierbij zal de bestaande AC-buis Ø500 mm vervangen worden voor een HDPE Ø560 mm SDR17. Er zal één HDD boring in zitten (ca. 140m) waar HDPE Ø630 mm SDR11 voor gebruikt zal worden. Één gedeelte van de AC-leiding (á 195m) zal gerelined worden. Het tracé heeft een lengte van ca. 5 km. De persleiding ligt langs een primaire waterkering langs de Maas, onder beheer bij Waterschap Limburg.



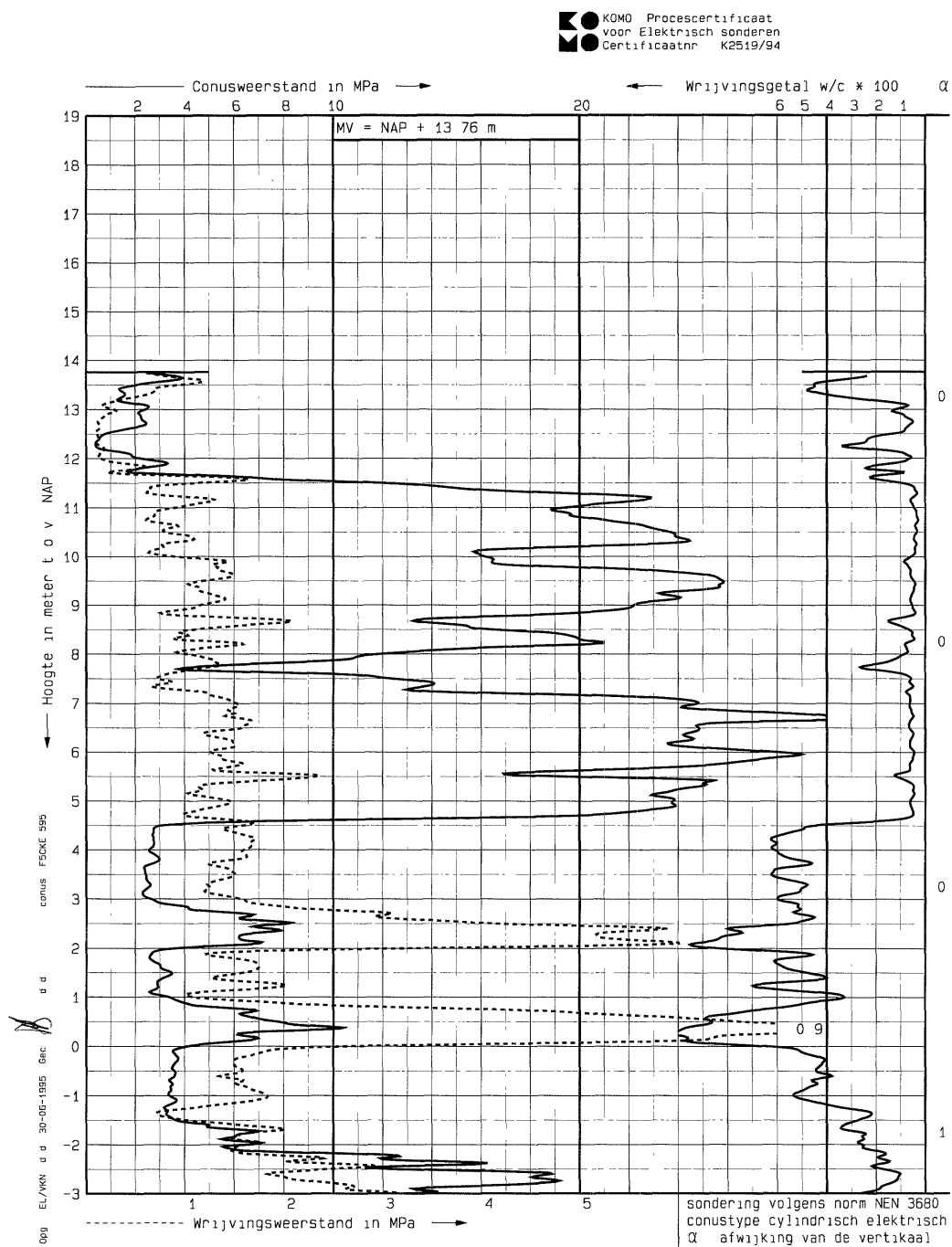
GW Leidingtechniek BV vraagt om in dit stadium vereenvoudigde sterkteberekeningen te maken van deze leiding. In een later stadium in het UO zullen uitgebreide sterkteberekeningen gemaakt worden.

Verder wordt er een tijdelijke leiding toegepast. De leiding ligt bovengronds en zal voor een gedeelte op de dijk komen te liggen, voor dit gedeelte wordt stabiliteitsberekening van de dijk gevraagd.

MEMO

De boring is tot een diepte van ca. 10 meter geprojecteerd, op een diepte van 6-7 m boven NAP. Er is weinig grondonderzoek beschikbaar. Er is een inschatting gemaakt met hetgeen op Dinoloket beschikbaar is. Volgens de dichtstbijzijnde sondering zal er hier voornamelijk sprake zijn van zand. Met bovenin een slappe laag van klei en veen.

S58E00076 (X=207.100, Y=374.015)



MEMO

Trekkrachten bovengronds:

4.1 Berekening van de benodigde trekkrachten op rollenbaan/maaiveld

Trekkracht T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N] ($f = 1,4$)	T_1 [N] ($f = 1$)
Starten met trekken	127,81	17.617	12.583
Na intrekken van C	117,98	16.262	11.616
Na intrekken van B	16,75	2.309	1.649

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = f \cdot L \cdot 0,9845 \cdot 0,1$$

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] ($f = 1,4$)	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	17.617	0,17
Na intrekken van C	16.262	0,16
Na intrekken van B	2.309	0,02

$$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{103.093,59}$$

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	0,17	2,37
Na intrekken van C	0,16	2,35
Na intrekken van B	0,02	2,22

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 3,38 + \sigma_t$$

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

$$\sigma_a \leq \sigma_{kd} \rightarrow 2,37 \leq 10,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

De maximale benodigde trekkraft tijdens de start van het trekken bedraagt 17.617 N (ca. 1,7 ton). t.g.v. het intrekken bedraagt bovengronds 2,37 N/mm² en treedt op bij de start van het intrekken. De maximaal toelaatbare spanning tijdens het intrekken bedraagt 10 N/mm².

MEMO

Trekkrachten ondergronds:

5.6 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Wanneer een totaalfactor van $f=1,4$ wordt toegepast gelden de volgende waarden voor de trekkrachten.

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 [N]	T_{3a} [N]	ΣT_{3b} [N]	ΣT_{3c} [N]	T_{tot} [N]	T_{tot} [ton]
Na intrekken van C	16.262	8.519	-	-	-	24.781	2,48
Na intrekken van B	2.309	-	96.247	15.536	11.427	125.519	12,55
Na intrekken van A	0	110.763	-	15.536	11.427	137.726	13,77

$$T_{tot} = T_1 + T_2 + T_{3a} + \Sigma T_{3b} + \Sigma T_{3c}$$

5.7 Karakteristieke waarden van de benodigde trekkrachten in fase II

Wanneer geen totaalfactor wordt toegepast ($f = 1$), gelden de volgende karakteristieke waarden voor de trekkrachten.

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 [N]	T_{3a} [N]	ΣT_{3b} [N]	ΣT_{3c} [N]	T_{tot} [N]	T_{tot} [ton]
Na intrekken van C	11.616	6.085	-	-	-	17.701	1,77
Na intrekken van B	1.649	-	68.748	11.097	8.162	89.656	8,97
Na intrekken van A	0	79.117	-	11.097	8.162	98.376	9,84

De maximale karakteristieke waarde voor de benodigde trekkracht bedraagt **98.376 N** ($\approx 9,84$ ton).

Volgens het voorschrift van de Drilling Contractors Association (DCA - Europe) wordt een boormachine voorgeschreven met een trekkraft 2 tot 3 keer deze maximale waarde.

5.10 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]
Na intrekken van C	24.781	0,24	-	0,24
Na intrekken van B	125.519	1,22	2,49	2,84
Na intrekken van A	137.726	1,34	-	1,34

$$\text{Rechte delen: } \sigma_a = \frac{T_{tot}}{A} = \frac{T_{tot}}{103.093,59} = \sigma_t$$

$$\text{Gebogen delen: } \sigma_a = \alpha_o \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot \sigma_b + \sigma_t$$

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

$$\sigma_a \leq \sigma_{kd} \rightarrow 2,84 \leq 10,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

Er wordt een benodigde trekkraft van 137.726 N ($\approx 13,8$ ton) verwacht voor de boring en zal optreden bij het geheel intrekken van de leiding. De maximale spanning t.g.v. het intrekken bedraagt 2,84 N/mm² en treedt op bij de bocht. De maximaal toelaatbare spanning tijdens het intrekken bedraagt 10 N/mm². Er is in de berekeningen niet uitgaan van vullen van de leiding tijdens het intrekken.

MEMO

Spanningen bedrijfsfase:

12.1 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]
1	2,53	0,48	0,65	1,96
2	5,24	0,48	0,65	3,72
3	4,20	0,48	0,65	3,04
4	4,23	0,48	0,65	3,06
5	4,91	0,48	0,65	3,51
6	1,70	0,48	0,65	1,42

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

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

Toelaatbare spanning: $\sigma_{id} = \bar{\sigma}_t = 8,00$ N/mm²

$\sigma_{y2} \leq \sigma_{id} \rightarrow 3,72 \leq 8,00 \rightarrow$ Voldoet

12.2 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]
1	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
2	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
3	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
4	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
5	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
6	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71

Rechte delen: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \sigma_{ax}$

Bochten: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_A \cdot \sigma_b + \sigma_{ax}$

Toelaatbare spanning: $\sigma_{id} = \bar{\sigma}_t = 8,00$ N/mm²

$\sigma_{y2} \leq \sigma_{id} \rightarrow 3,71 \leq 8,00 \rightarrow$ Voldoet

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ¹]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1	35,86	1,68	10,02	7,08	1,24
2	77,16	0,56	10,02	14,93	2,61
3	61,62	0,69	10,02	11,95	2,09
4	62,03	0,69	10,02	12,02	2,10
5	72,30	0,59	10,02	13,99	2,44
6	22,28	2,95	10,02	4,58	0,80

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_r) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71}$$

Toelaatbare deflectie: $\delta_{Y,max} = 8,00\% \cdot D_g = 0,08 \cdot 572,70 = 45,82$ mm

$\delta_Y \leq \delta_{Y,max} \rightarrow 14,93 \leq 45,82 \rightarrow$ Voldoet

Tijdens de bedrijfsfase treden spanningen op tot maximaal 3,72 N/mm². De toelaatbare spanningen voor de lange termijn is 8 N/mm².

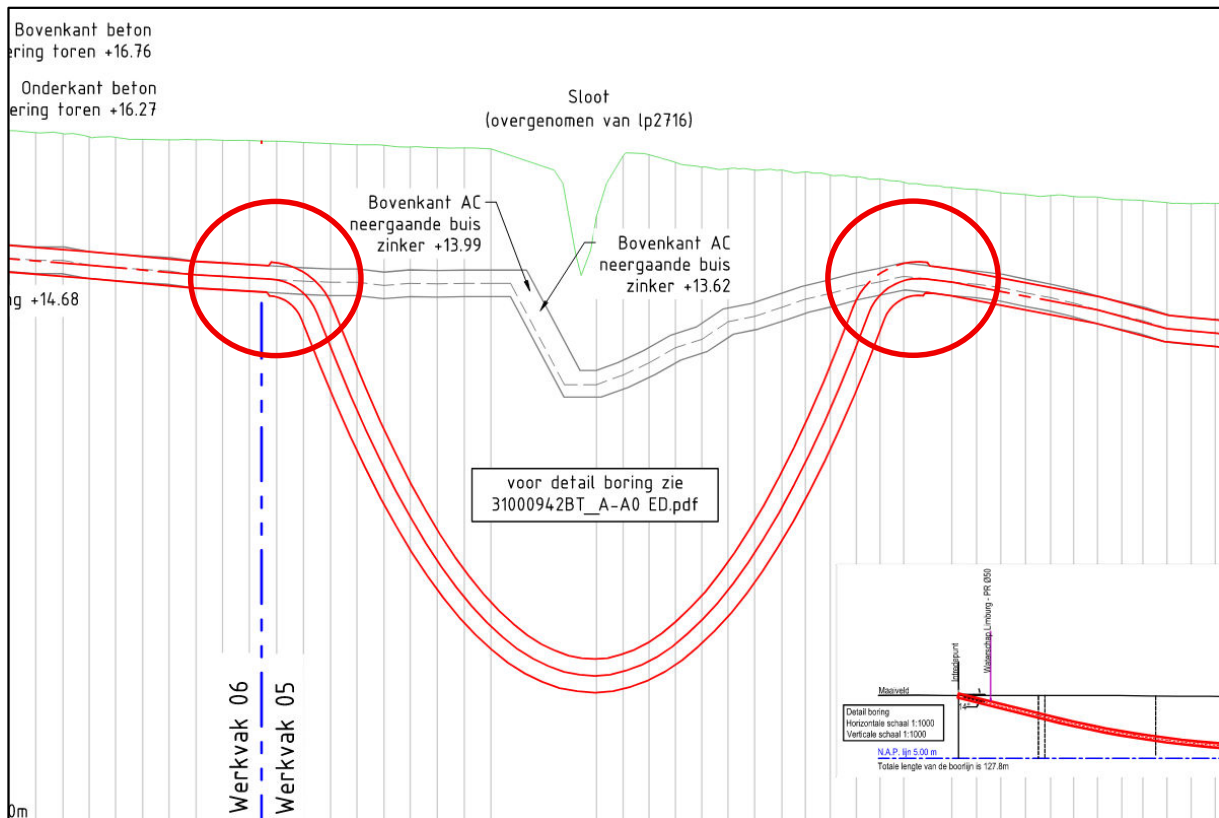
De maximaal optredende deflectie is 14,93 mm, waar 45,82 mm is toegestaan.

Uit de sterkteberekeningen blijkt dat wanneer de boring wordt uitgevoerd in PE 100 SDR-11 Ø630x57,3 mm de leiding voldoet aan de eisen gesteld in de NEN-normen 3650 en 3651. De maximaal toelaatbare deflectie en spanningen worden niet overschreden.

MEMO

2.2 Overgang HDD

Ter weerszijden van de HDD zal er een maatgevende overgang van de geboorde naar de in sleuf gelegde situatie zijn. De leiding wordt hier uitgevoerd in Ø560 PE 100 SDR-17.



De gronddekking van de leiding is zo'n 1,5-2,3 meter. De nieuwe persleiding zal rondom aangevuld worden met 20cm schoon zand, voor de rest zal de uitgekomen grond teruggeplaatst worden.

MEMO

30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (5,46 + 4,42 \cdot 0,95) = \mathbf{6,29 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,28 + 0,65 \cdot 2,21 \cdot 0,95 + 1,56 = \mathbf{4,21 \text{ N/mm}^2}$$

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

31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (5,90 + 4,42 \cdot 0,76) = \mathbf{6,02 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,28 + 0,65 \cdot 2,21 \cdot 0,76 + 1,56 = \mathbf{3,93 \text{ N/mm}^2}$$

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

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) + 0,048 \cdot 43,39) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{10,77 \text{ mm}} (= 2,04\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) + 0,048 \cdot 27,44) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{6,84 \text{ mm}} (= 1,30\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

Uitgaande van SDR-17 is de maximaal optredende spanning is 6,29 N/mm². De toelaatbare spanningen voor de lange termijn is 6 N/mm². Bij een in sleuf gelegde leiding dient een importantiefactor van 0,75 aangehouden te worden bij primaire waterkeringen. Waar de toelaatbare spanning van PE 100 8,00 N/mm² is.

De maximaal optredende deflectie is 10,77 mm, waar 31,66 mm is toegestaan.

Hierbij is echter van uit van een krappe bocht van 1xD van de geboorde situatie naar de gelegde situatie. Er is ook uitgegaan van een ligging in zand ligt en dat er geen aanvullende zettingen optreden door de werkzaamheden. Omdat de optredende spanningen op de rand van het toelaatbare zitten, heeft de het de aanbeveling om de ter weerszijden van de HDD een buislengte met SDR-11 door te leggen.

MEMO

30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,12 + 3,11 \cdot 0,75) = 2,90 \text{ N/mm}^2$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,79 + 0,65 \cdot 1,56 \cdot 0,75 + 1,56 = 3,11 \text{ N/mm}^2$$

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

31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,70 + 3,11 \cdot 0,60) = 2,96 \text{ N/mm}^2$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,79 + 0,65 \cdot 1,56 \cdot 0,60 + 1,56 = 2,95 \text{ N/mm}^2$$

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

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) + 0,048 \cdot 48,82) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 286,35^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 7,07 \text{ mm} (= 1,23\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 572,70 = 34,36 \text{ mm}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) + 0,048 \cdot 30,87) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 286,35^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 4,75 \text{ mm} (= 0,83\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 572,70 = 34,36 \text{ mm}$$

Wanneer wordt uitgegaan van SDR-11 is de maximaal optredende spanning is 2,96 N/mm². De toelaatbare spanningen voor de lange termijn is 6 N/mm². De marge is dan veel ruimer.

MEMO

2.3 Overgang bestaande AC naar PE en PE veldstrekking

Ter hoogte van metrerings 2310 en 2510 zal er een maatgevende overgang berekend worden van de bestaande AC-leiding naar de nieuwe PE-leiding. De leiding wordt hier uitgevoerd in Ø560 PE 100 SDR-17.



De gronddekking van de leiding is zo'n 1,6-1,7 meter. De nieuwe persleiding zal rondom aangevuld worden met 20cm schoon zand.

30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,46 = 3,55 \text{ N/mm}^2$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,85 + 0,65 \cdot 0,95 + 1,56 = 3,03 \text{ N/mm}^2$$

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

31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

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

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,66 = 3,68 \text{ N/mm}^2$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,85 + 0,65 \cdot 0,76 + 1,56 = 2,91 \text{ N/mm}^2$$

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

MEMO

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,JOVA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) + 0,048 \cdot 43,39) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = 10,25 \text{ mm} (= 1,94\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = 31,66 \text{ mm}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,JOVA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) + 0,048 \cdot 27,44) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,JOVA} = 6,40 \text{ mm} (= 1,21\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = 31,66 \text{ mm}$$

Uitgaande van SDR-17 is de maximaal optredende spanning is 3,68 N/mm². De toelaatbare spanningen voor de lange termijn is 6 N/mm². De maximaal optredende deflectie is 10,25 mm, waar 33,66 mm is toegestaan.

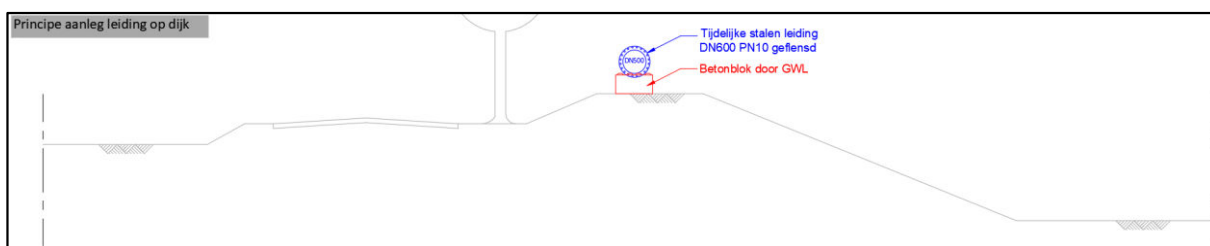
Uit de sterkteberekeningen blijkt dat wanneer de leiding wordt uitgevoerd in PE 100 SDR-17 Ø560x32,3 mm de leiding voldoet aan de eisen gesteld in de NEN-normen 3650 en 3651. De maximaal toelaatbare deflectie en spanningen worden niet overschreden. De veldstrekking en de aansluiting op de bestaande AC-persleiding kunnen uitgevoerd worden in SDR-17.

MEMO

3. Stabiliteitsberekening tijdelijke leiding

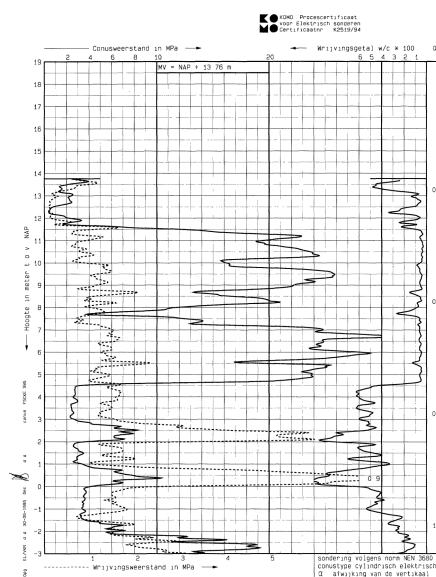
Er wordt ook een tijdelijke leiding toegepast. De leiding ligt bovengronds en zal voor een gedeelte op de kruin van de dijk komen te liggen. Met het aanbrengen van de tijdelijke leiding ontstaat een extra belasting op waterkering. Het waterschap ziet graag een onderbouwing waaruit blijkt dat deze extra belasting geen effect heeft op de stabiliteit van de waterkering. Ervan uitgaande dat de waterkering tijdens hoogwater volledig is verzadigd.

Het volgende principeprofiel is opgesteld.

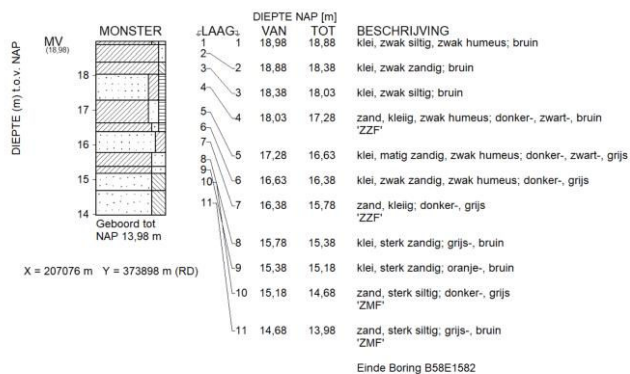


Er is weinig grondonderzoek beschikbaar. De exacte opbouw van de kering is niet bekend. Er is een inschatting gemaakt met hetgeen op Dinoloket beschikbaar is.

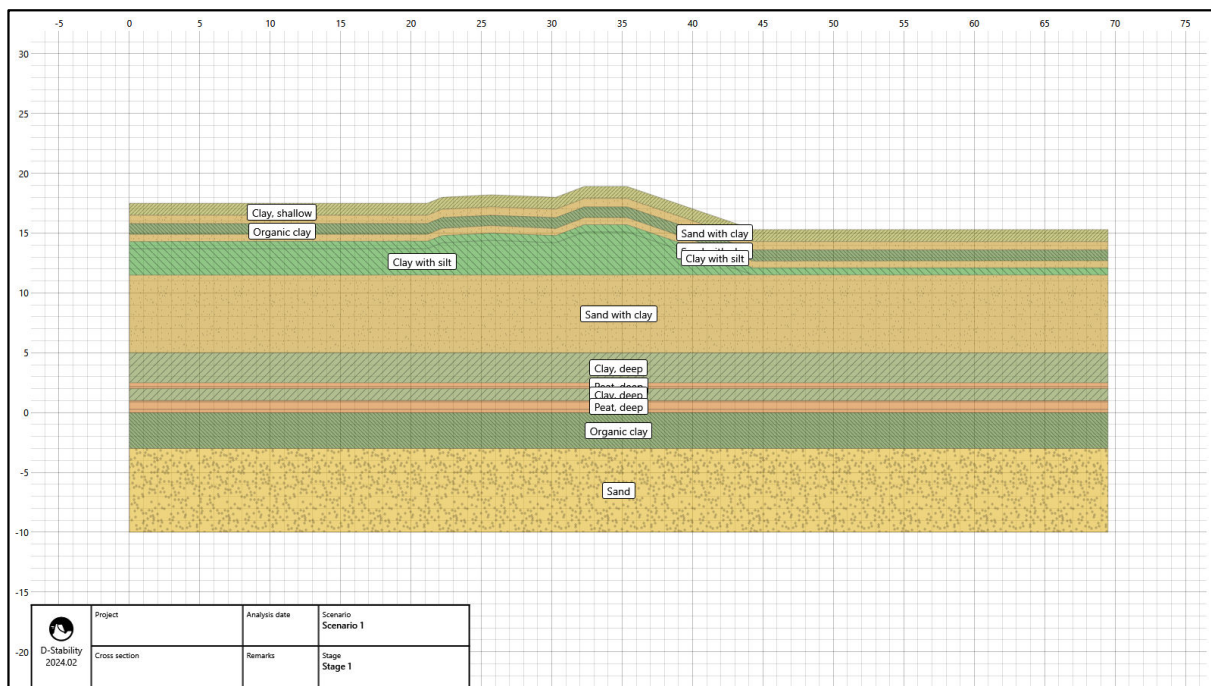
S58E00076 (X=207.100, Y=374.015)



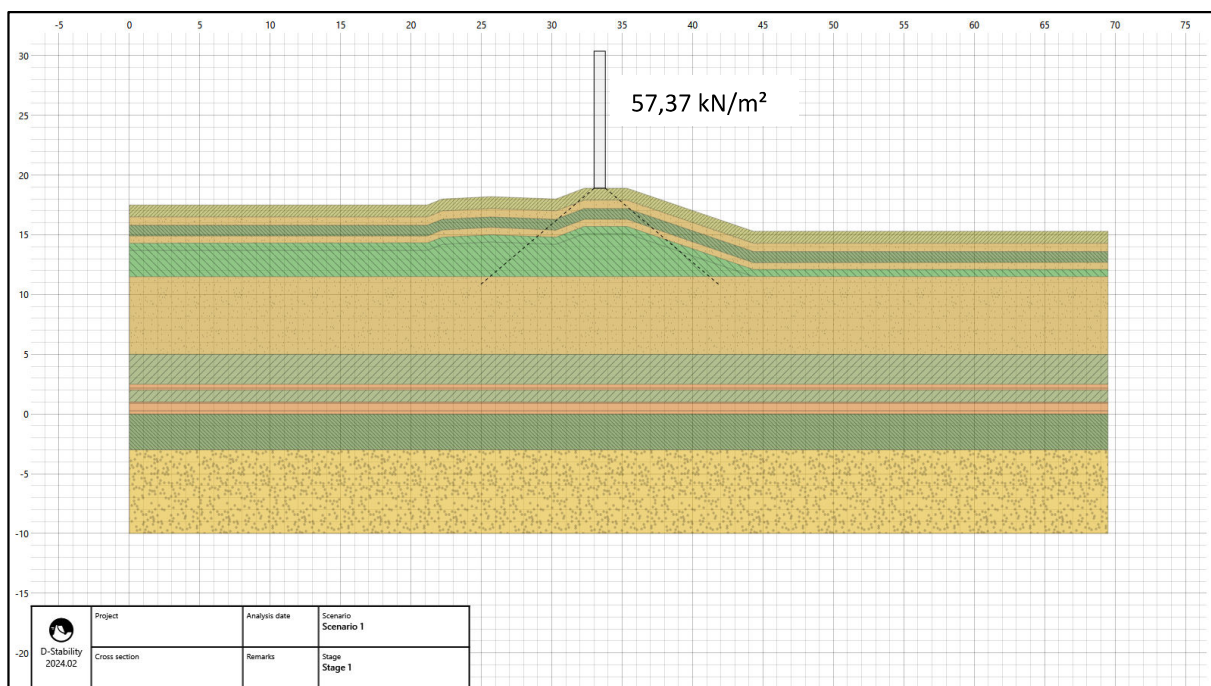
B58E1582 (X=207.076, Y=373.898)



MEMO

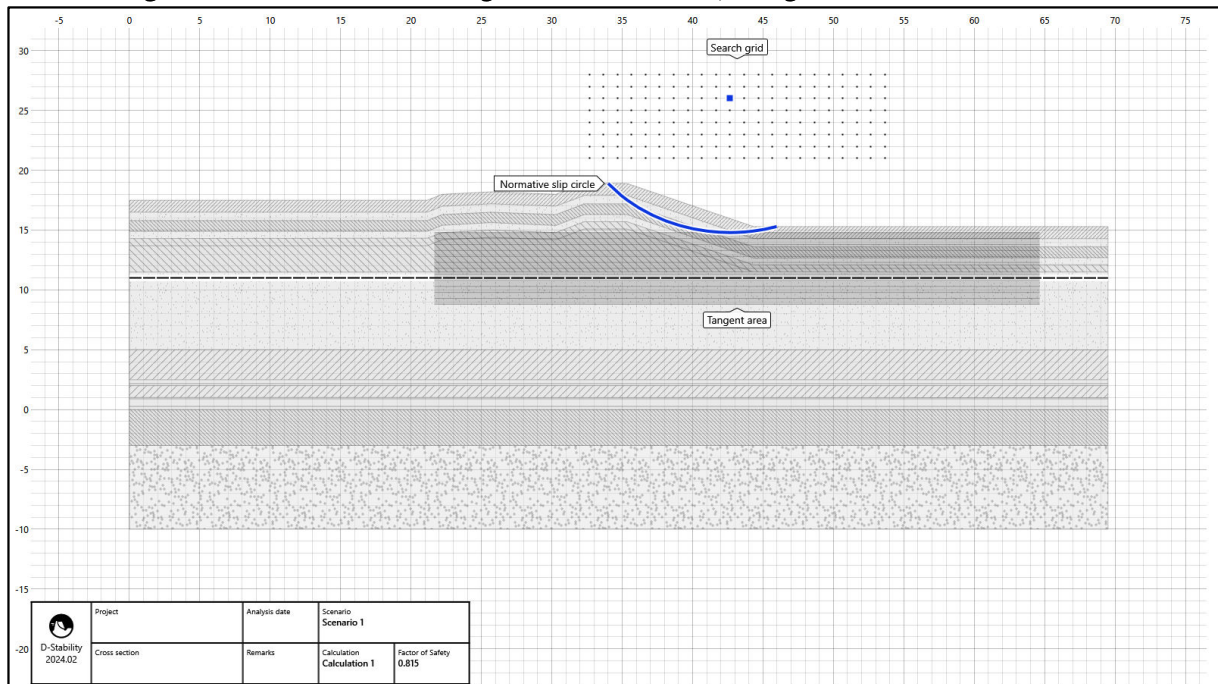


Er wordt een DN600 tijdelijke stalen leiding aangebracht op legioblokken. De legioblokken hebben afmeting van 80x80x80 cm. Uitgaande van een gewicht van beton van 2.400 kg/m³ komt dat op 1.229 kg. De leiding heeft een gewicht inclusief vulling van 2.443 kg per 6 meter. Uitgaande van een legioblok elke 6 meter komt dat op een belasting van 57,37 kN/m².



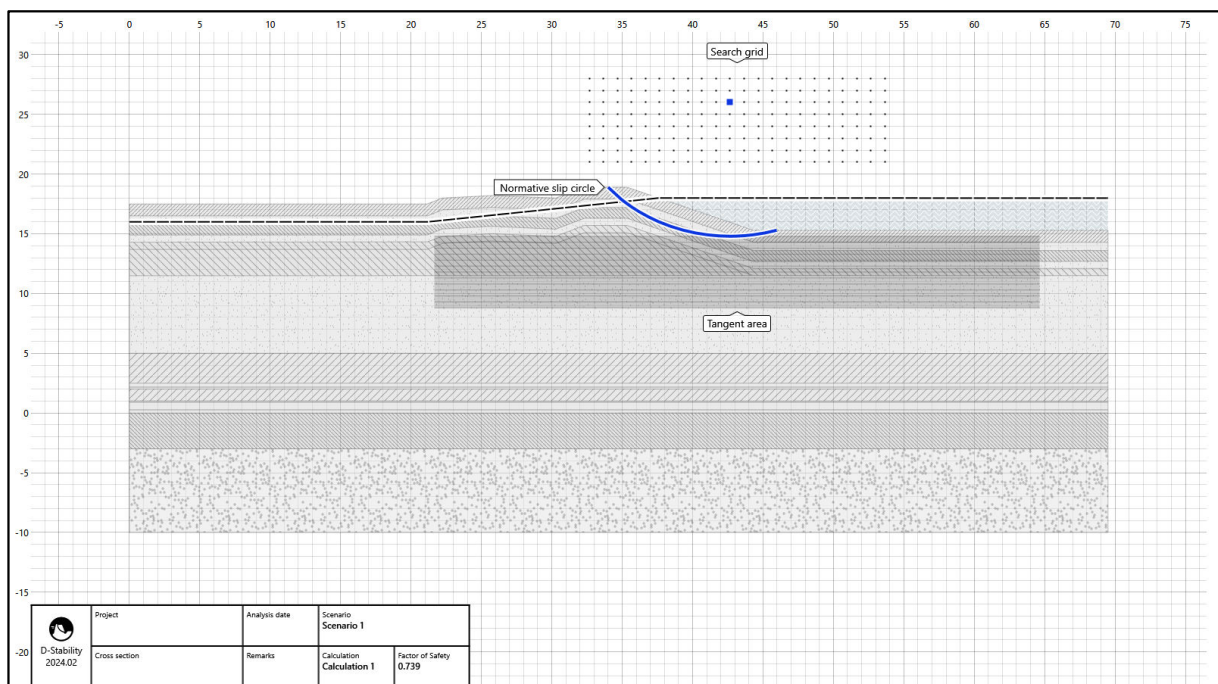
MEMO

In de huidige situatie wordt een veiligheidsfactor van 0,815 gevonden.



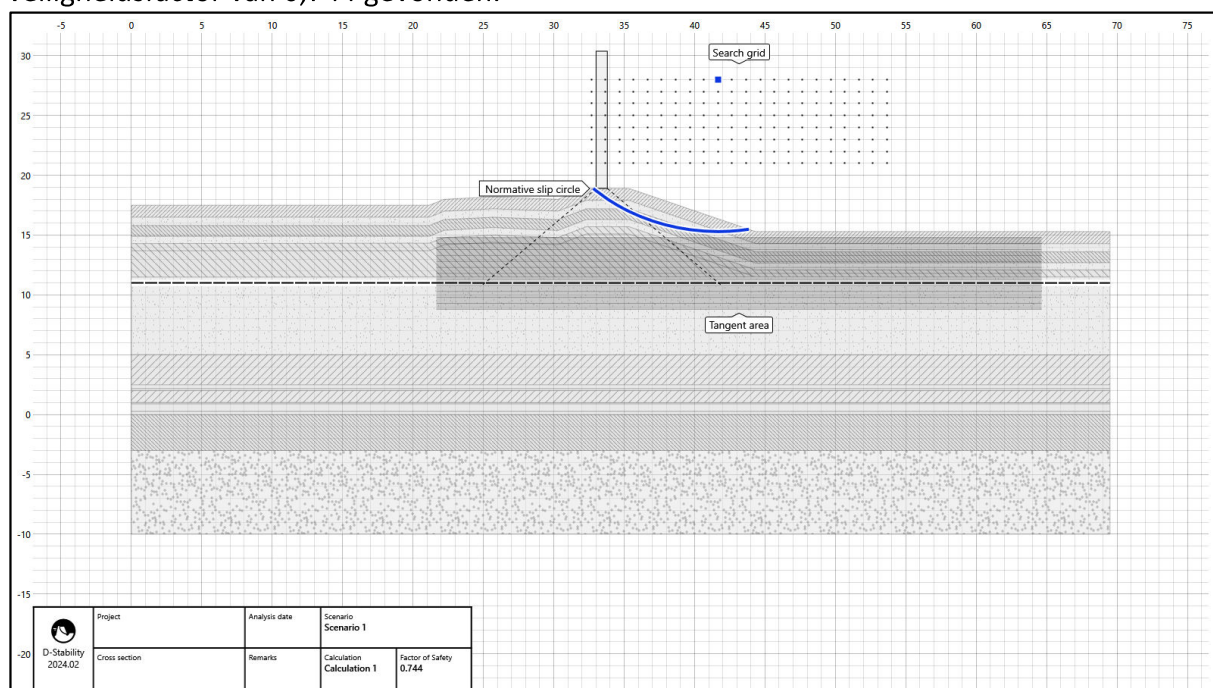
Er wordt voor de stabiliteit van de waterkering, in de bestaande situatie, een veiligheid gevonden < 1 . Dat betekent dat dit niet de correcte grondgelaagdheid is/opbouw van de waterkering. Ook is er gerekend met maagdelijke grond, waar de ondergrond in werkelijkheid verdicht is en sterker is.

Uitgaande van een maatgevend hoge waterstand van NAP+18 m wordt de veiligheid 0,739.

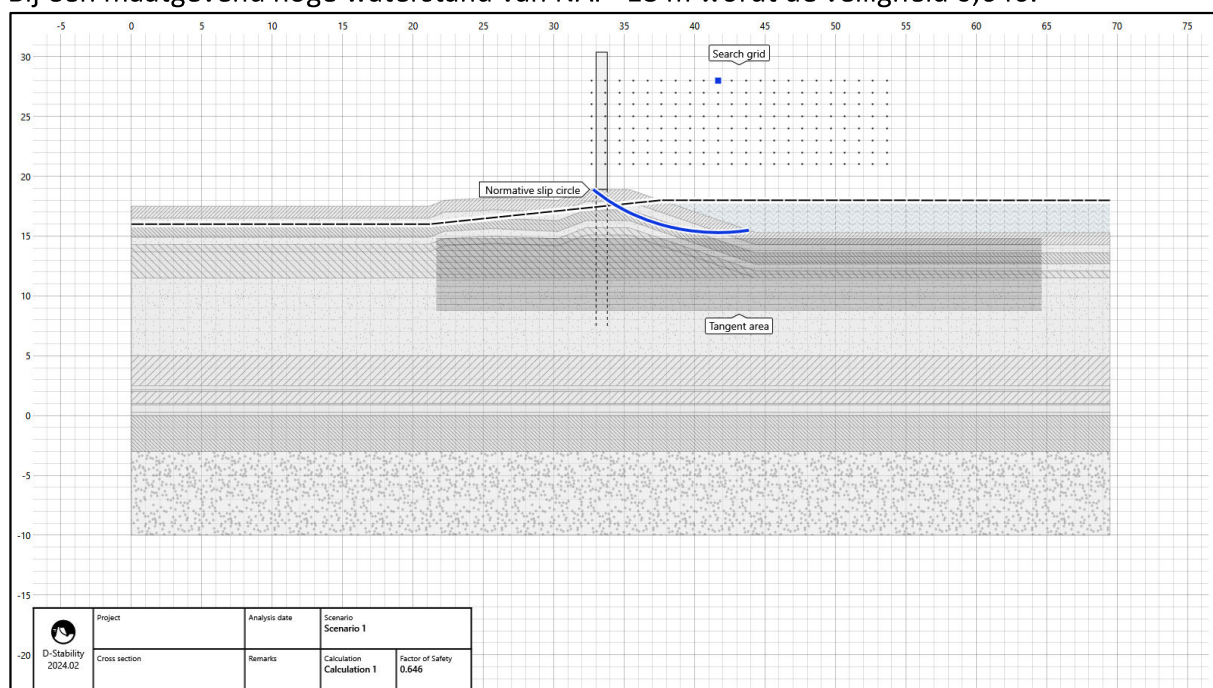


MEMO

Na het toepassen van het extra gewicht wordt, bij de normale waterstand (NAP+11 m) een veiligheidsfactor van 0,744 gevonden.



Bij een maatgevend hoge waterstand van NAP+18 m wordt de veiligheid 0,646.



MEMO

Er wordt in de bestaande situatie een veiligheid gevonden < 1 . Dat betekent dat dit niet de correcte grondgelaagdheid is/opbouw van de waterkering. Ook is er gerekend met maagdelijke grond, waar de ondergrond in werkelijkheid verdicht is en sterker is. De werkelijke gelaagdheid en opbouw van de waterkering is vooralsnog niet bekend.

Wel is te zien dat het extra gewicht van de tijdelijke leiding invloed heeft op de stabiliteit van de waterkering.

De berekening zou dus een met een correct dwarsprofiel van de waterkering en een correcte opbouw van de grondlagen opnieuw gemaakt moeten worden om een uitspraak te kunnen doen over de stabiliteit van de waterkering bij het toepassen van een tijdelijke leiding op de kruin van de dijk.

Het waterschap zal in het bezit zijn van stabiliteitsberekeningen en modellen van de waterkering. Het ligt voor de hand om deze modellen te gebruiken om een goed oordeel te kunnen doen over de stabiliteit van de kering.

MEMO

4. Conclusie

Uit de sterkteberekeningen blijkt dat wanneer de leiding in de veldstrekking wordt uitgevoerd in PE 100 SDR-17 Ø560x32,3 mm de leiding voldoet aan de eisen gesteld in de NEN-normen 3650 en 3651. Ook ter plaatse van de aansluitingen op de bestaande AC-leiding zal een SDR-17 buis voldoen.

De HDD kan uitgevoerd worden in PE 100 SDR-11 Ø630x57,3. Er wordt een benodigde trekkracht van ca. 13,8 ton verwacht. De maximale spanning t.g.v. het intrekken bedraagt 2,84 N/mm² en treedt op bij de bocht. De maximaal toelaatbare spanning tijdens het intrekken bedraagt 10 N/mm². Er is in de berekeningen niet uitgaan van vullen van de leiding tijdens het intrekken. Uit de sterkteberekeningen blijkt dat wanneer de boring ook tijdens de bedrijfsfase voldoet aan de eisen gesteld in de NEN-normen 3650 en 3651. De maximaal toelaatbare deflectie en spanningen worden niet overschreden.

Ter weerszijden van de HDD zal er een maatgevende overgang van de geboorde naar de in sleuf gelegde situatie zijn. De leiding wordt hier uitgevoerd in Ø560x32,3 PE 100 SDR-17. Omdat de optredende spanningen op de rand van het toelaatbare zitten, afhankelijk van de mate van verdichting en toe te passen bochten bij de overgang, heeft de aanbeveling om de bochten en een extra deel ter weerszijden van de HDD een buislengte met SDR-11 door te leggen.

Er wordt voor de stabiliteit van de waterkering, in de bestaande situatie, een veiligheid gevonden <1. Dat betekent dat er niet met de correcte grondgelaagdheid /opbouw van de waterkering is gerekend. Ook is er gerekend met maagdelijke grond, waar de ondergrond in werkelijkheid verdicht en/of voorbelast is en dus sterker is. Het waterschap zal in het bezit zijn van stabiliteitsberekeningen en modellen van de waterkering. Het ligt voor de hand om deze modellen te gebruiken om een goed oordeel te kunnen doen over de stabiliteit van de kering na toepassen van het extra gewicht van de tijdelijke leiding.

Wel is te zien dat het extra gewicht van de tijdelijke leiding invloed heeft op de stabiliteit van de waterkering.

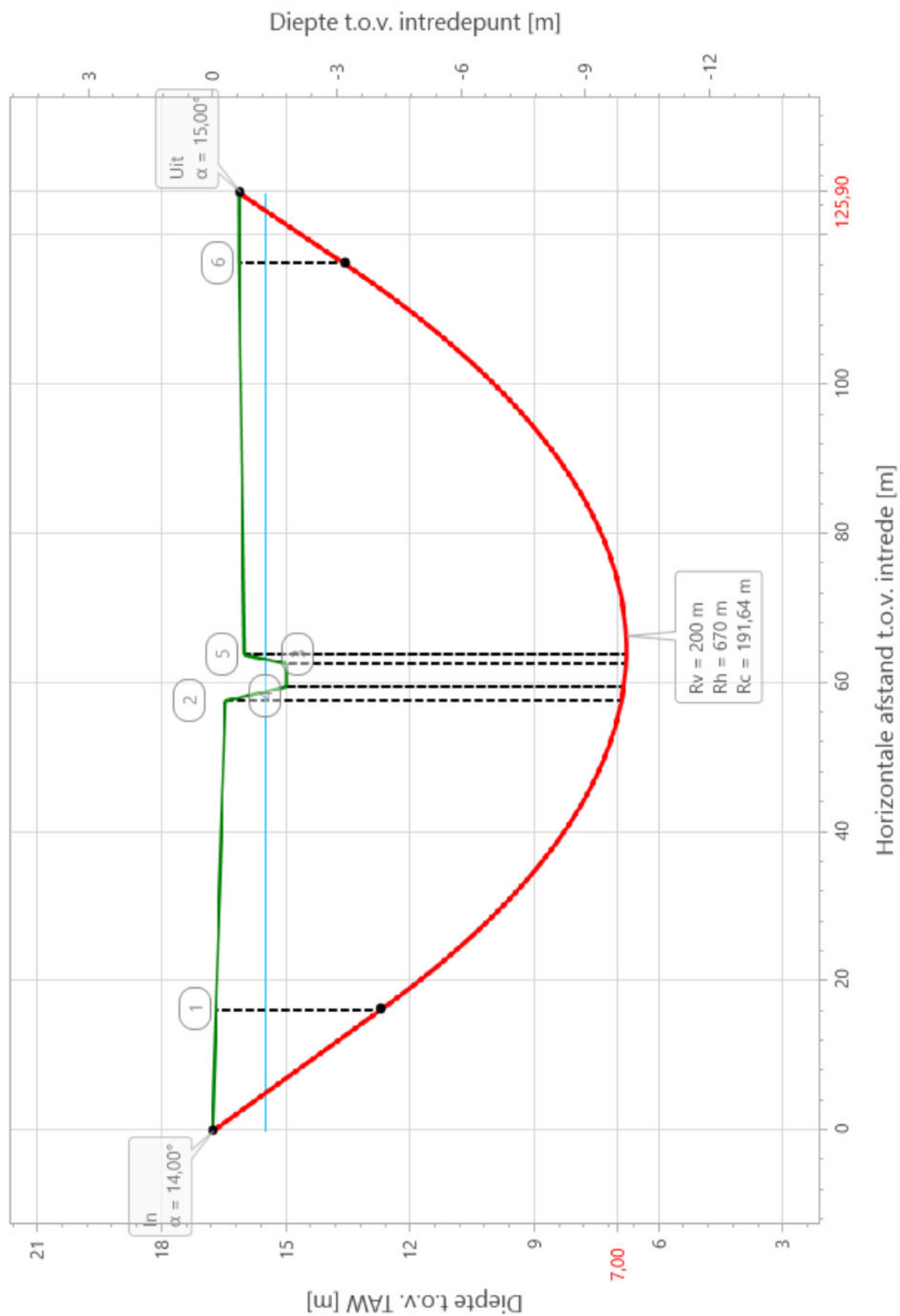
MEMO

Berekening HDD

Sterkteberekening van een horizontaal gestuurde boring conform NEN 3650/3651:2020					Sigma 2025 1.3 ©		
Algemene gegevens							
Naam van het project : 2.1 HDD metring 1535 t/m 1650 Projectonderdeel : Persleiding Ø630 PE 100 SDR-11 - 2,6 bar							
Materiaalgegevens							
Materiaalsoort: PE Kwaliteit: PE 100 SDR 11 Lange-duur treksterkte MRS = 10 N/mm ² Materiaalfactor γ_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 α_g = 16,0·10 ⁻⁵ mm/(mm·K) Alfa Tangentieel / Alfa Axiaal α_σ = 0,65 - Soortelijk gewicht buis ρ_L = 9,55 kN/m ³ Toelaatbare deflectie δ = 8,00 %							
Leidinggegevens							
Uitwendige middellijn D _e = 630,00 mm Wanddikte d _n = 57,3 mm							
Procesgegevens							
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos) = Vloeistof Ontwerpdruk p _d = 0,26 N/mm ² Volumieke massa medium ρ = 1000 kg/m ³ Temperatuurverschil Δt = 10 °							
Uitvoeringsaspecten, tracé boring, in- en uittredehoeken							
Totale lengte L = 127,81 m Totale horizontale lengte L _{hor} = 125,90 m Straal maaiveld/rollenbaan R _r = 100,00 m Intredehoek (bij boorstelling) α_1 = 14,00 / 24,93 ° / % Uittredehoek (bij rollenbaan) α_2 = 15,00 / 26,79 ° / % Belastinghoek α = 180 ° Ondersteuningshoek β = 120 ° Horizontale steundrukhoek γ = 120 ° MV intrede t.o.v. TAW MV _{in} = 16,77 m MV uittrede t.o.v. TAW MV _{uit} = 16,14 m							
Beschrijving	Lengte langs buis [m]	Horizontale lengte [m]	Cummulatieve lengte langs buis [m]	Cummulatieve horizontale lengte [m]	Verticale straal [m]	Horizontale straal [m]	Gecombineerde straal [m]
A	16,75	16,25	16,75	16,25	-	-	-
B	101,23	100,15	117,98	116,40	200,00	670,00	191,64
C	9,83	9,50	127,81	125,90	-	-	-
					22-05-2025 10:05:27		

Sterkteberekening van een horizontaal gestuurde boring conform NEN 3650/3651:2020				Sigma 2025 1.3 ©			
Uitvoeringsaspecten							
Diameter boorstang		D_b	= 127	mm			
Tijdens pilot							
Diameter boorkop/boorgat		D_p	= 311	mm			
Soortelijk gewicht boorvloeistof		$\rho_{m,p}$	= 11,5	kN/m ³			
Zwichtspanning boorvloeistof		$\tau_{y,p}$	= 13,4	Pa			
Plastische viscositeit boorvloeistof		η_p	= 0,009	Pa·s			
Debiet boorvloeistof		$Q_{m,p}$	= 900	l/min			
Tijdens ruimgang							
Boorstangen koppelen tijden ruimen							
Diameter ruimer/boorgat		$D_{g,r}$	= 914,4	mm			
Soortelijk gewicht boorvloeistof		$\rho_{m,r}$	= 11,5	kN/m ³			
Zwichtspanning boorvloeistof		$\tau_{y,r}$	= 13,4	Pa			
Plastische viscositeit boorvloeistof		η_r	= 0,009	Pa·s			
Debiet boorvloeistof		$Q_{m,r}$	= 2000	l/min			
Tijdens intrekken							
Soortelijk gewicht boorvloeistof		$\rho_{m,i}$	= 11,5	kN/m ³			
Zwichtspanning boorvloeistof		$\tau_{y,i}$	= 13,4	Pa			
Plastische viscositeit boorvloeistof		η_i	= 0,009	Pa·s			
Debiet boorvloeistof		$Q_{m,i}$	= 1400	l/min			
Leiding wordt niet verzwaard t.p.v. rollenbaan							
Leiding wordt niet verzwaard t.p.v. boorgang							
Onzekerheids- en wrijvingsfactoren							
Totaalfactor bij normale boring		f	= 1,4				
Belastingfactor, bovengronds		$f_{k,b}$	= 1,1				
Belastingfactor, ondergronds		$f_{k,o}$	= 1,4				
Onzekerheidsfactor straal, ondergronds		$f_{r,o}$	= 0,9				
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				
Partiële factor grondbelasting		γ	= 1,1				
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]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvingshoek grond [°]
1	16,75	3,97	1,19	Zand	18,00	20,00	32,50
2	58,76	9,58	0,97	Zand	18,00	20,00	32,50
3	60,63	8,15	-0,51	Zand	18,00	20,00	32,50
4	63,80	8,20	-0,51	Zand	18,00	20,00	32,50
5	64,86	9,23	0,51	Zand	18,00	20,00	32,50
6	117,98	2,54	0,63	Zand	18,00	20,00	32,50

Locatie	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II
2	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II
3	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II
4	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II
5	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II
6	0,00	45,00	Grafiek 1/2 x II



* Niet op schaal

2. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 515,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 572,70	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 630,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 315,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 257,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 286,35	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 4.268.958.539,00	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 13.552.249,33	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 15.677,71	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 547,22	mm ³ /mm ¹
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 103.093,59	mm ²
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 0,9845	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	$g = 0,9845 \text{ N/mm}^1$	$g = 0,9845 \text{ N/mm}^1$
Gewicht vulling	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$
Totaal gewicht	$g_{rol} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$	$g_{gat} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$

4. Berekening van de trekkrachten en spanningen bovengronds**4.1 Berekening van de benodigde trekkrachten op rollenbaan/maaiveld**

Trekkracht T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N] (f = 1,4)	T_1 [N] (f = 1)
Starten met trekken	127,81	17.617	12.583
Na intrekken van C	117,98	16.262	11.616
Na intrekken van B	16,75	2.309	1.649

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = f \cdot L \cdot 0,9845 \cdot 0,1$$

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] (f = 1,4)	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	17.617	0,17
Na intrekken van C	16.262	0,16
Na intrekken van B	2.309	0,02

$$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{103.093,59}$$

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

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

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{4.268.958.539}{100.000} = 45.784.580,33 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{45.784.580,33}{13.552.249} = 3,38 \text{ N/mm}^2$$

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	0,17	2,37
Na intrekken van C	0,16	2,35
Na intrekken van B	0,02	2,22

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 3,38 + \sigma_t$$

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

$$\sigma_a \leq \sigma_{kd} \rightarrow 2,37 \leq 10,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

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: $D_{e,omtrek} = 1.979,20 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 0,985 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_{m,i} \cdot D_e^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 630,00^2 \cdot \pi/4 = 3,585 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 2,600 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L_2 / L_b [m]	T_2 [N] ($f = 1,4$)	T_{3a} [N] ($f = 1,4$)	T_2 [N] ($f = 1$)	T_{3a} [N] ($f = 1$)
Na intrekken van C	127,81	8.519	-	6.085	-
Na intrekken van B	117,98	-	96.247	-	68.748
Na intrekken van A	16,75	110.763	-	79.117	-

Rechte delen: $T_2 = f \cdot L_2 \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = f \cdot L_2 \cdot (1.979,20 \cdot 0,00005 + 2,600 \cdot 0,2)$

Gebogen delen: $T_{3a} = f \cdot L_b \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = f \cdot L_b \cdot (1.979,20 \cdot 0,00005 + 2,600 \cdot 0,2)$

5.2 Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ en beddingsconstanten in de bochten k_v

Leidingdeel (Doorsnede)	E_{100} [N/mm ²]	q_n [kN/m ²]	$E_{100,norm}$ [N/mm ²]	ν [-]	ℓ [mm]	m [-]	λ [mm ⁻¹]	k_v [N/mm ³]
B (1)	45,00	56,92	33,95	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387
B (2)	45,00	122,47	49,80	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387
B (3)	45,00	97,81	44,50	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387
B (4)	45,00	98,46	44,65	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387
B (5)	45,00	114,76	48,21	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387
B (6)	45,00	35,37	26,76	0,3163	2.767,7	0,84	0,00114	0,04387

$E_{100,norm} = E_{100} \cdot (q_n/100)^{0,5}$ (Zand/Leem/Grind) of $E_{100,norm} = E_{100} \cdot (q_n/100)^{0,8}$ (Veen/Klei)

$$K = 1 - \sin(\varphi) \quad \nu = \frac{K}{1 + K}$$

$$\ell = \frac{\pi}{\lambda} \quad A = \ell \cdot b \quad b = \beta \cdot r_e = 120^\circ \cdot 315 = 659,73 \text{ mm}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_v}{4 \cdot E \cdot I_b}}$$

$$k_v = \frac{E_{100,norm}}{m \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{A}} \quad (m \text{ volgens tabel C.5 NEN3650-1 C.4.3.3c})$$

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

Leidingdeel (Doorsnede)	R_v [m]	R_h [m]	R_c [m]	q_r [N/mm ²]	Q_r [N/mm ¹]	T_{3b} [N] ($f = 1,4$)	T_{3b} [N] ($f = 1$)
B (1)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097
B (2)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097
B (3)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097
B (4)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097
B (5)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097
B (6)	200,00	670,00	191,64	0,016	10,02	15.536	11.097

$$q_r = e^{(-\pi/4)} \cdot \sin(\pi/4) \cdot \frac{\lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot f_{r,0} \cdot R} = 0,322 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot 975 \cdot 4.268.958.539,00}{630 \cdot 0,9 \cdot R}$$

$$Q_r = q_r \cdot D_o = q_r \cdot 630$$

$$T_{3b} = f \cdot 4 \cdot \frac{q_r}{2} \cdot D_o \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot f_3 = f \cdot 4 \cdot \frac{q_r}{2} \cdot 630 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot 0,2$$

5.4 Trekkraft T_{bocht} tijdens verschillende stadia

Trekkraft T_{bocht} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N] ($f = 1$)	T_2 / T_{3a} [N] ($f = 1$)	$T_{3b,max}$ [N] ($f = 1$)	ΣT_{3b} [N] ($f = 1$)	T_{bocht} [N]
B	1.649	68.748	11.097	11.097	81.495

$$T_{bocht} = T_1 + T_2 + T_{3a} + \Sigma T_{3b}$$

5.5 Berekening van de wrijving door bochtcracht T_{3c}

Trekkraft T_{3c} tijdens verschillende stadia [N]	α [°]	T_{bocht} [N]	T_{3c} [N] ($f = 1,4$)	T_{3c} [N] ($f = 1$)
B	14,50	81.495	11.427	8.162

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

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

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

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

5.6 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Wanneer een totaalfactor van $f=1,4$ wordt toegepast gelden de volgende waarden voor de trekkrachten.

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 [N]	T_{3a} [N]	ΣT_{3b} [N]	ΣT_{3c} [N]	T_{tot} [N]	T_{tot} [ton]
Na intrekken van C	16.262	8.519	-	-	-	24.781	2,48
Na intrekken van B	2.309	-	96.247	15.536	11.427	125.519	12,55
Na intrekken van A	0	110.763	-	15.536	11.427	137.726	13,77

$$T_{\text{tot}} = T_1 + T_2 + T_{3a} + \Sigma T_{3b} + \Sigma T_{3c}$$

5.7 Karakteristieke waarden van de benodigde trekkrachten in fase II

Wanneer geen totaalfactor wordt toegepast ($f = 1$), gelden de volgende karakteristieke waarden voor de trekkrachten.

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 [N]	T_{3a} [N]	ΣT_{3b} [N]	ΣT_{3c} [N]	T_{tot} [N]	T_{tot} [ton]
Na intrekken van C	11.616	6.085	-	-	-	17.701	1,77
Na intrekken van B	1.649	-	68.748	11.097	8.162	89.656	8,97
Na intrekken van A	0	79.117	-	11.097	8.162	98.376	9,84

De maximale karakteristieke waarde voor de benodigde trekkracht bedraagt **98.376 N** ($\approx$ **9,84 ton**).

Volgens het voorschrift van de Drilling Contractors Association (DCA - Europe) wordt een boormachine voorgeschreven met een trekkracht 2 tot 3 keer deze maximale waarde.

5.8 Berekening van de optredende spanningen t.g.v. de trekkrachten in fase II

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]
Na intrekken van C	24.781	0,24
Na intrekken van B	125.519	1,22
Na intrekken van A	137.726	1,34

$$\sigma_t = \frac{T_{\text{tot}}}{A} = \frac{T_{\text{tot}}}{103.093,59}$$

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

Trekkkracht T_{3c} tijdens verschillende stadia [N]	R [m]	M_b [Nmm]	σ_b [N/mm ²]
B	191,64	33.784.484,69	2,49

$$M_b = f_{k,o} \cdot E \cdot \frac{I_b}{f_{r,o} \cdot R} = 1,4 \cdot 975 \cdot \frac{4.268.958.539,00}{0,9 \cdot R}$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{M_b}{13.552.249,33}$$

5.10 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]
Na intrekken van C	24.781	0,24	-	0,24
Na intrekken van B	125.519	1,22	2,49	2,84
Na intrekken van A	137.726	1,34	-	1,34

$$\text{Rechte delen: } \sigma_a = \frac{T_{tot}}{A} = \frac{T_{tot}}{103.093,59} = \sigma_t$$

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

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

$$\sigma_a \leq \sigma_{kd} \rightarrow 2,84 \leq 10,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

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

$$D_g/d_n = 572,70/57,30 = 9,99 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding}$$

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

$$\sigma_p = \frac{315,00^2 + 257,70^2}{315,00^2 - 257,70^2} \cdot 0,26 = 1,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 1,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 1,31 = 0,52 \text{ N/mm}^2$$

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

$$\sigma_p \leq \bar{\sigma}_t \rightarrow 1,31 \leq 8,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

$$\sigma_{pl} \leq \bar{\sigma}_t \rightarrow 0,52 \leq 8,00 \rightarrow \text{Voldoet}$$

6.2 Berekening reroundingfactor f_{rr}

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

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 286,35^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 15.677,71} \right) = 0,93$$

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	q_{droog} [kN/m ²]	q_{nat} [kN/m ²]	q_n [kN/m ²]	Q_n [N/mm ¹]
1	3,97	1,19	Zand	23,54	33,39	56,92	35,86
2	9,58	0,97	Zand	19,21	103,27	122,47	77,16
3	8,15	-0,51	Zand	0,00	179,32	97,81	61,62
4	8,20	-0,51	Zand	0,00	180,51	98,46	62,03
5	9,23	0,51	Zand	10,10	104,66	114,76	72,30
6	2,54	0,63	Zand	12,47	22,90	35,37	22,28

$$q_{\text{droog}} = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d$$

$$q_{\text{nat}} = \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$$

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

$$Q_n = q_n \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot 630$$

6.4 Berekening van de verkeersbelasting Q_v

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Verkeersbelasting	q_v [kN/m ²]	Q_v [N/mm ¹]
1	3,97	Grafiek 1/2 x II	2,66	1,68
2	9,58	Grafiek 1/2 x II	0,89	0,56
3	8,15	Grafiek 1/2 x II	1,10	0,69
4	8,20	Grafiek 1/2 x II	1,09	0,69
5	9,23	Grafiek 1/2 x II	0,93	0,59
6	2,54	Grafiek 1/2 x II	4,68	2,95

$$Q_v = q_v \cdot D_o = q_v \cdot 630$$

7. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ²]
1	35,86	1,68	37,54	1.483,36	2,53
2	77,16	0,56	77,72	3.071,06	5,24
3	61,62	0,69	62,31	2.462,32	4,20
4	62,03	0,69	62,71	2.478,20	4,23
5	72,30	0,59	72,88	2.880,12	4,91
6	22,28	2,95	25,23	997,10	1,70

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 286,35$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,93 \cdot \frac{M_q}{547,22}$$

8. Optredende spanning σ_{qr} tgv. grondreactie in de bochten

Locatie	R [m]	q_r [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]
1	191,64	0,016	0,48
2	191,64	0,016	0,48
3	191,64	0,016	0,48
4	191,64	0,016	0,48
5	191,64	0,016	0,48
6	191,64	0,016	0,48

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot q_r \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w} = 0,083 \cdot q_r \cdot 630 \cdot \frac{315,00}{547,22}$$

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

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

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

10. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N

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

$$S_N = 975 \cdot \frac{15.677,71}{572,7^3} = 0,0814 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{81,38 \text{ kN/m}^2}$$

Minimaal vereiste ringstijfheid = **2 kN/m²**

11. Toetsing op implosie (bedrijfsfase): berekening van de alzijdige overdruk

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

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

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 15.677,71}{572,70^3} = 0,28 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **27,82 m** grondwater boven de leiding

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld H [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld GWS [m]	Grondwater boven de leiding H _n [m]
1	3,97	1,19	2,78
2	9,58	0,97	8,61
3	8,15	-0,51	8,66
4	8,20	-0,51	8,71
5	9,23	0,51	8,72
6	2,54	0,63	1,91

$H_n < p_{o,lang} \rightarrow 8,72 < 27,82 \rightarrow$ Voldoet

12. Berekening van het totaal aan optredende spanningen

12.1 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]
1	2,53	0,48	0,65	1,96
2	5,24	0,48	0,65	3,72
3	4,20	0,48	0,65	3,04
4	4,23	0,48	0,65	3,06
5	4,91	0,48	0,65	3,51
6	1,70	0,48	0,65	1,42

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

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

Toelaatbare spanning: $\sigma_{kl} = \bar{\sigma}_t = 8,00$ N/mm²

$\sigma_{y2} \leq \sigma_{kl} \rightarrow 3,72 \leq 8,00 \rightarrow$ Voldoet

12.2 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]
1	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
2	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
3	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
4	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
5	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71
6	0,52	1,56	2,49	0,65	3,71

Rechte delen: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \sigma_{ax}$

Bochten: $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_A \cdot \sigma_b + \sigma_{ax}$

Toelaatbare spanning: $\sigma_{kl} = \bar{\sigma}_t = 8,00$ N/mm²

$\sigma_x \leq \sigma_{kl} \rightarrow 3,71 \leq 8,00 \rightarrow$ Voldoet

13. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ¹]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1	35,86	1,68	10,02	7,08	1,24
2	77,16	0,56	10,02	14,93	2,61
3	61,62	0,69	10,02	11,95	2,09
4	62,03	0,69	10,02	12,02	2,10
5	72,30	0,59	10,02	13,99	2,44
6	22,28	2,95	10,02	4,58	0,80

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_r) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w}$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71}$$

Toelaatbare deflectie: $\delta_{Y,max} = 8,00\% \cdot D_g = 0,08 \cdot 572,70 = \mathbf{45,82}$ mm

$\delta_Y \leq \delta_{Y,max} \rightarrow 14,93 \leq 45,82 \rightarrow$ Voldoet

14. Berekening van de boorspoeldrukken

Locatie	H [m]	σ_{vert} [kN/m ²]	σ_{hor} [kN/m ²]	σ_o' [kN/m ²]	p_f' [kN/m ²]	$E_{100,\text{norm}}$ [MN/m ²]
1	3,97	42,21	19,53	30,87	47,46	33,95
2	9,58	86,28	39,92	63,10	97,01	49,80
3	8,15	66,69	30,86	48,77	74,98	44,50
4	8,20	67,13	31,06	49,10	75,47	44,65
5	9,23	79,70	36,88	58,29	89,61	48,21
6	2,54	25,92	11,99	18,96	29,14	26,76

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

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

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

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

$$E_{100,\text{norm}} = E_{100} \cdot (q_n/100)^m \quad (\text{Zand/Leem/Grind} \rightarrow m = 0,5; \text{Veen/Klei} \rightarrow m = 0,8)$$

Locatie	G [MN/m ²]	Q [-]	u [N/mm ²]	v [-]	p_{lim} [N/mm ²]	90% p_{lim} [bar] 1
1	12,90	0,0013	0,0278	0,3163	0,51	4,62
2	18,92	0,0018	0,0861	0,3163	0,97	8,74
3	16,90	0,0016	0,0866	0,3163	0,81	7,25
4	16,96	0,0016	0,0871	0,3163	0,81	7,29
5	18,31	0,0017	0,0872	0,3163	0,92	8,26
6	10,17	0,0010	0,0191	0,3163	0,34	3,10

$$G = \frac{E_{100,\text{norm}}}{2 \cdot (1 + v)}$$

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

$$u = \gamma_w \cdot H_n$$

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

$$v = \frac{K}{1 + K}$$

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

14.1 Tijdens pilot

Locatie	$R_{p,\text{max}}$ [m]	$R_{p,\text{min}}$ [m]	Δh_{in} [m]	p_{max} [N/mm ²]	p_{max} [bar] 2	p_{min} [N/mm ²]	p_{min} [bar] 3
1	1,37	0,05	4,05	0,24	2,38	0,05	0,48
2	1,16	0,03	9,88	0,47	4,69	0,12	1,18
3	1,25	0,05	9,93	0,40	3,98	0,12	1,19
4	1,25	0,05	9,98	0,40	4,00	0,12	1,20
5	1,19	0,04	9,99	0,45	4,47	0,12	1,20
6	1,27	0,13	3,18	0,14	1,43	0,05	0,45

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

$$R_o = \frac{D_p}{2} = \frac{311}{2} = 155,5 \text{ mm}$$

$$p_{max} = (p'_f + c \cdot \cot(\varphi)) \cdot \left(\frac{R_o^2}{R_{p,max}} + Q \right)^{\frac{-\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cdot \cot(\varphi) + u$$

$$v_{m,p} = \frac{Q_{m,p}}{A_p} = \frac{900}{1/4 \cdot \pi \cdot (D_p^2 - D_b^2)} = \frac{900}{1/4 \cdot \pi \cdot (311^2 - 127^2)} = 0,237 \text{ m/s}$$

$$p_{min} = \left(\frac{14580 \cdot \eta_p \cdot v_{m,p}}{(D_p - D_b)^2} + \frac{\tau_{y,p}}{(D_p - D_b)} \right) \cdot L + \rho_{m,p} \cdot \Delta h_{in} = \left(\frac{14580 \cdot 0,009 \cdot 0,237}{(311 - 127)^2} + \frac{13,4}{(311 - 127)} \right) \cdot L + 11,5 \cdot \Delta h_{in}$$

$$R_{p,min} = R_o / \sqrt{\frac{p'_f + c \cdot \cot(\varphi)}{p_{min} + u + c \cdot \cot(\varphi)}^{(1 + \sin(\varphi)) \cdot \csc(\varphi)} - Q}$$

14.2 Tijdens ruimgang

Locatie	$R_{p,max}$ [m]	$R_{p,min}$ [m]	Δh_{uit} [m]	p_{max} [N/mm ²]	p_{max} [bar] 4	p_{min} [N/mm ²]	p_{min} [bar] 5
6	1,27	0,10	2,55	0,08	0,78	0,03 ⁽¹⁾	0,29
5	3,50	0,06	9,36	0,45	4,47	0,11 ⁽¹⁾	1,09
4	3,67	0,08	9,35	0,40	4,00	0,11 ⁽¹⁾	1,09
3	3,67	0,08	9,30	0,40	3,98	0,11 ⁽¹⁾	1,08
2	3,42	0,05	9,25	0,47	4,69	0,11 ⁽¹⁾	1,07
1	1,99	0,08	3,42	0,16	1,59	0,04 ⁽¹⁾	0,41

$$R_o = \frac{D_{g,r}}{2} = \frac{914,4}{2} = 457,2 \text{ mm}$$

$$v_{m,r,uit} = \frac{Q_{m,r}}{A_r} = \frac{2000}{1/4 \cdot \pi \cdot (D_{g,r}^2 - D_b^2)} = \frac{2000}{1/4 \cdot \pi \cdot (914,4^2 - 127^2)} = 0,052 \text{ m/s}$$

$$v_{m,r,in} = \frac{Q_{m,r}}{A_p} = \frac{2000}{1/4 \cdot \pi \cdot (D_p^2 - D_b^2)} = \frac{2000}{1/4 \cdot \pi \cdot (311^2 - 127^2)} = 0,527 \text{ m/s}$$

$$p_{min,uit} = \left(\frac{14580 \cdot \eta_r \cdot v_{m,r,uit}}{(D_{g,r} - D_b)^2} + \frac{\tau_{y,r}}{(D_{g,r} - D_b)} \right) \cdot (L_{tot} - L) + \rho_{m,r} \cdot \Delta h_{uit}$$

$$p_{min,uit} = \left(\frac{14580 \cdot 0,009 \cdot 0,052}{(914,4 - 127)^2} + \frac{13,4}{(914,4 - 127)} \right) \cdot (127,81 - L) + 11,5 \cdot \Delta h_{uit} \quad (1)$$

$$p_{min,in} = \left(\frac{14580 \cdot \eta_r \cdot v_{m,r,in}}{(D_p - D_b)^2} + \frac{\tau_{y,r}}{(D_p - D_b)} \right) \cdot L + \rho_{m,r} \cdot \Delta h_{in}$$

$$p_{min,in} = \left(\frac{14580 \cdot 0,009 \cdot 0,527}{(311 - 127)^2} + \frac{13,4}{(311 - 127)} \right) \cdot L + 11,5 \cdot \Delta h_{in} \quad (2)$$

14.3 Tijdens intrekken

Locatie	$R_{p,max}$ [m]	$R_{p,min}$ [m]	Δh_{uit} [m]	p_{max} [N/mm ²]	p_{max} [bar] 6	p_{min} [N/mm ²]	p_{min} [bar] 7
6	1,27	0,11	2,55	0,08	0,78	0,03 ⁽¹⁾	0,30
5	3,50	0,07	9,36	0,45	4,47	0,11 ⁽¹⁾	1,11
4	3,67	0,09	9,35	0,40	4,00	0,11 ⁽¹⁾	1,11
3	3,67	0,09	9,30	0,40	3,98	0,11 ⁽¹⁾	1,10
2	3,42	0,06	9,25	0,47	4,69	0,11 ⁽¹⁾	1,10
1	1,99	0,10	3,42	0,16	1,59	0,04 ⁽¹⁾	0,45

$$R_o = \frac{D_{g,r}}{2} = \frac{914,4}{2} = 457,2 \text{ mm}$$

$$v_{m,i,uit} = \frac{Q_{m,i}}{A_i} = \frac{1400}{1/4 \cdot \pi \cdot (D_{g,r}^2 - D_o^2)} = \frac{1400}{1/4 \cdot \pi \cdot (914^2 - 630^2)} = 0,068 \text{ m/s}$$

$$v_{m,i,in} = \frac{Q_{m,i}}{A_i} = \frac{1400}{1/4 \cdot \pi \cdot (D_{g,r}^2 - D_b^2)} = \frac{1400}{1/4 \cdot \pi \cdot (914^2 - 127^2)} = 0,036 \text{ m/s}$$

$$p_{min,uit} = \left(\frac{14580 \cdot \eta_i \cdot v_{m,i,uit}}{(D_{g,r} - D_o)^2} + \frac{\tau_{y,i}}{(D_{g,r} - D_o)} \right) \cdot (L_{tot} - L) + p_{m,i} \cdot \Delta h_{uit}$$

$$p_{min,uit} = \left(\frac{14580 \cdot 0,009 \cdot 0,068}{(914 - 630)^2} + \frac{13,4}{(914 - 630)} \right) \cdot (127,81 - L) + 11,5 \cdot \Delta h_{uit} \quad (1)$$

$$p_{min,in} = \left(\frac{14580 \cdot \eta_i \cdot v_{m,i,in}}{(D_{g,r} - D_b)^2} + \frac{\tau_{y,i}}{(D_{g,r} - D_b)} \right) \cdot L + p_{m,i} \cdot \Delta h_{in}$$

$$p_{min,in} = \left(\frac{14580 \cdot 0,009 \cdot 0,036}{(914,4 - 127)^2} + \frac{13,4}{(914,4 - 127)} \right) \cdot L + 11,5 \cdot \Delta h_{in} \quad (2)$$

15. Toetsing op implosie tijdens intrekken leiding(en)

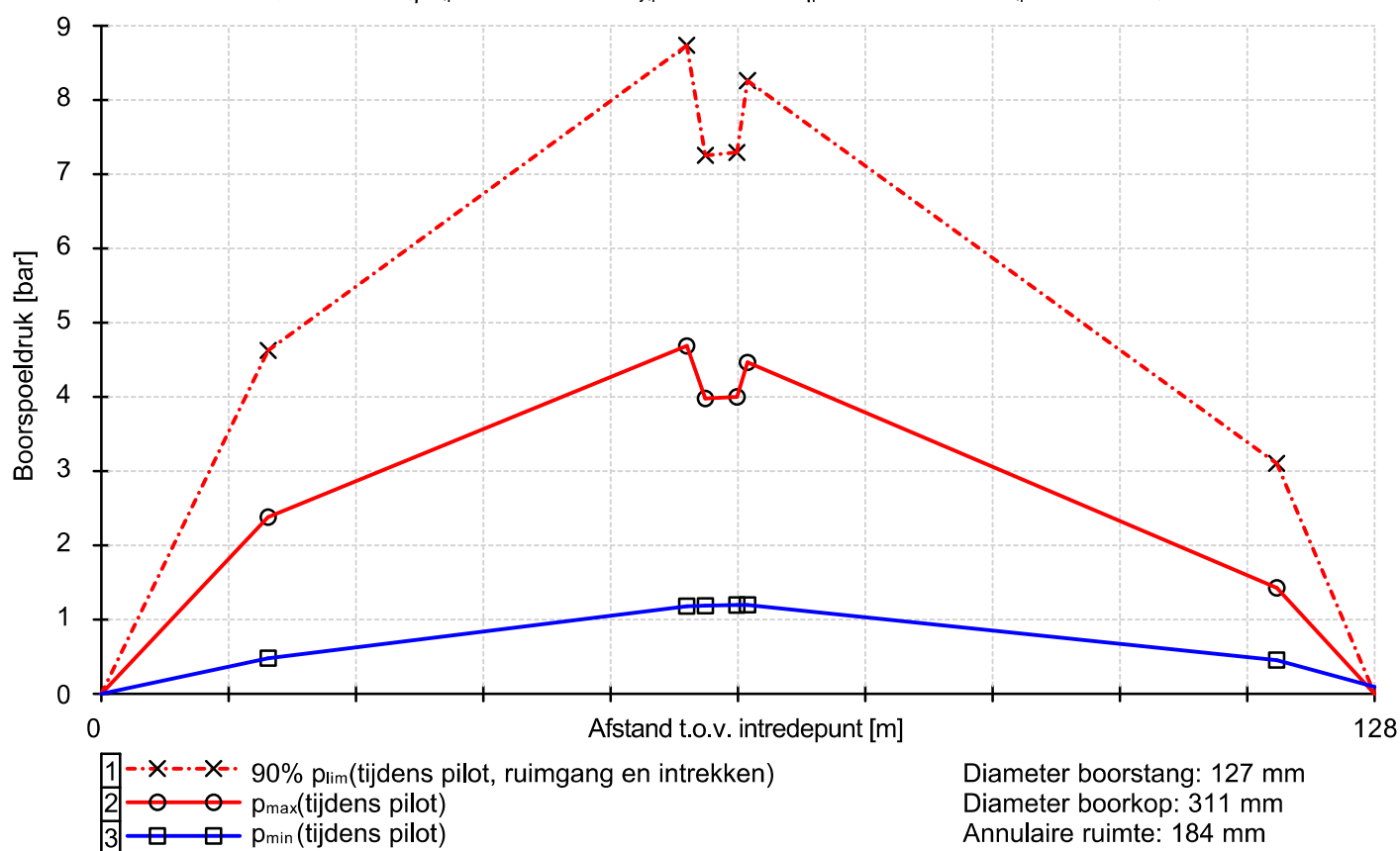
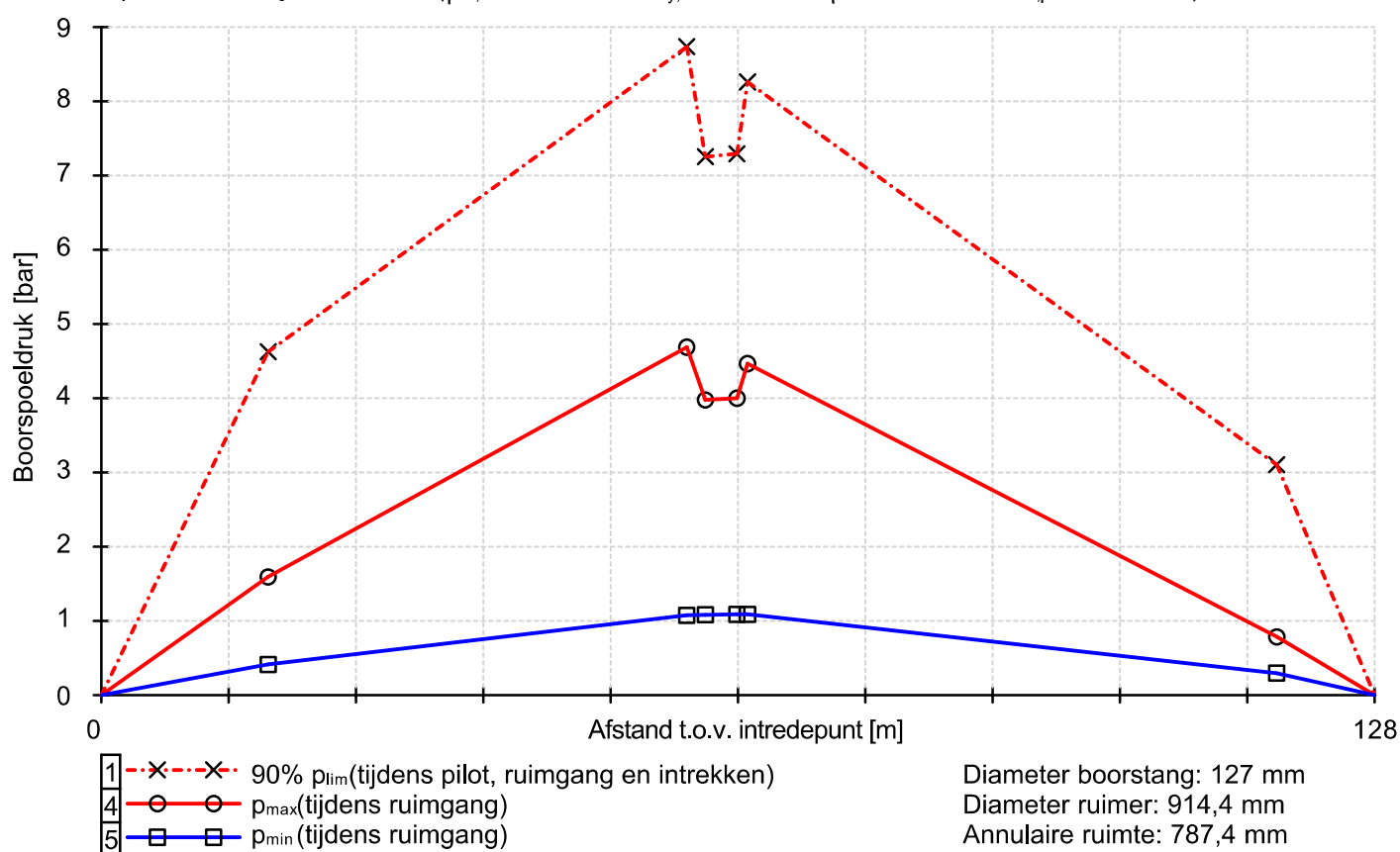
Locatie	p_{min} [N/mm ²]	$p_{o,kort}$ [N/mm ²]
6	0,03	1,55
5	0,11	1,55
4	0,11	1,55
3	0,11	1,55
2	0,11	1,55
1	0,04	1,55

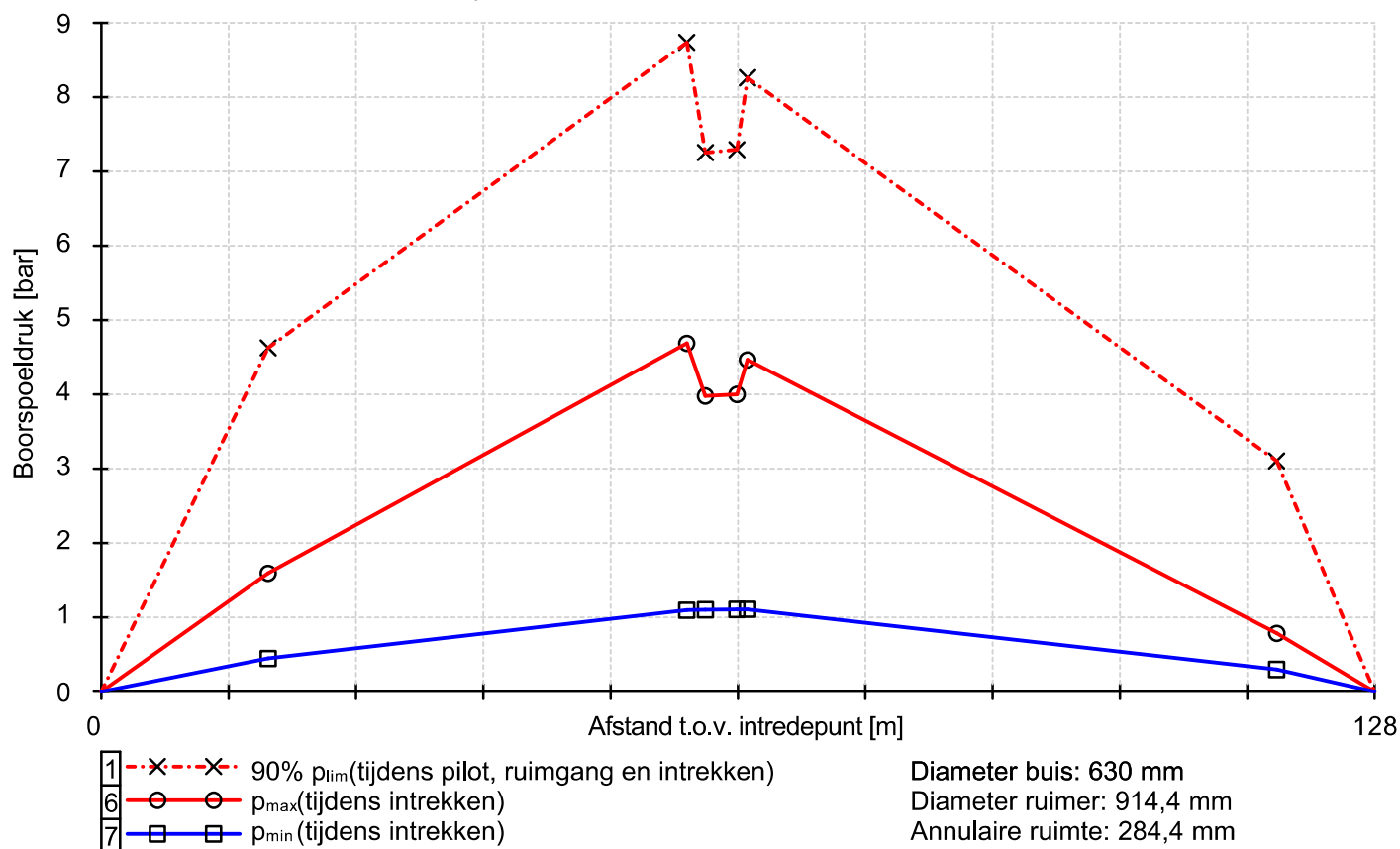
Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$

$$p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E_{tan} \cdot l_w}{D_g^3}$$

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 15.677,71}{572,70^3} = 1,55 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{min} \leq p_{o,kort} \rightarrow 0,11 \leq 1,55 \rightarrow \text{Voldoet}$$

16.1 Boorspoeldrukken tijdens pilot ($\rho_{m,p} = 11,5 \text{ kN/m}^3$ / $\tau_{y,p} = 13,4 \text{ Pa}$ / $\eta_p = 0,009 \text{ Pas}$ / $Q_{m,p} = 900 \text{ l/min}$)16.2 Boorspoeldrukken tijdens ruimen ($\rho_{m,r} = 11,5 \text{ kN/m}^3$ / $\tau_{y,r} = 13,4 \text{ Pa}$ / $\eta_r = 0,009 \text{ Pas}$ / $Q_{m,p} = 2000 \text{ l/min}$)

16.3 Boorspoeldrukken tijdens intrekken ($\rho_{m,i} = 11,5 \text{ kN/m}^3$ / $\tau_{y,i} = 13,4 \text{ Pa}$ / $\eta_i = 0,009 \text{ Pas}$ / $Q_{m,i} = 1400 \text{ l/min}$)

MEMO

Berekening aansluiting HDD

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2025 1.3 ©
Algemene gegevens			
Naam van het project : 2.2 Overgang HDD metrerig 1535 t/m 1650 Projectonderdeel : Persleiding Ø630 PE 100 SDR-11 - 2,6 bar Importatiefactor S : 0,75			
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 11		
Lange-duur treksterkte	MRS	= 10	N/mm ²
Materiaalfactor	γ_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	α_g	= 16,0·10 ⁻⁵	mm/(mm·K)
Alfa Tangentieel / Alfa Axiaal	α_σ	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 8,00	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 630,00	mm
Wanddikte	d _n	= 57,3	mm
Wanddikte bocht	t	= 57,3	mm
Bochtstraal	R	= 630,00	mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)	= Vloeistof		
Ontwerpdruk	p _d	= 0,26	N/mm ²
Volumieke massa medium	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Aanleggegevens			
Belastinghoek (Geperst deel)	α	= 180	°
Belastinghoek (Gelegd deel)	α	= 180	°
Ondersteuningshoek (Geperst deel)	β	= 120	°
Ondersteuningshoek (Gelegd deel)	β	= 70	°
Horizontale steundrukhoek (Geperst deel)	γ	= 120	°
Horizontale steundrukhoek (Gelegd deel)	γ	= 120	°
Uitvoeringszakkingverschil	f _v	= 10	mm
Zettingsverschil	f _z	= 0	mm
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld	H _{werk}	= 2,5	m
			22-05-2025 10:24:38

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvingshoek grond [°]	Gem. vert. bedding- constante [N/mm ³]
Geperst deel	2,30	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0200
Gelegd deel	2,30	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0080

Locatie	Hor. steundruk	Horizontale beddingconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	Schuif- sterkte [kN/m ²]	Verkeersbelasting
Geperst deel	✓	0,014	0,00	0,00	Grafiek ½ x II
Gelegd deel	✓	0,017	0,00	0,00	Grafiek ½ x II

Locatie	Ontlastende invloed t.g.v. wegdek
Geperst deel	Geen ontlastende invloed
Gelegd deel	Geen ontlastende invloed

1. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 515,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 572,70	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 630,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 315,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 257,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 286,35	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 4.268.958.539,00	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 13.552.249,33	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 15.677,71	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 547,22	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:

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

$$h = \frac{260.000}{1.000 \cdot 9,81} = 26,50 \text{ m} \rightarrow h^3 \cdot D_i^5 = 26,50^3 \cdot 0,52^5 = 677,07 \text{ m}^8$$

3. Berekening van de veiligheidszone

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

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{26,50^3 \cdot 0,52^5} = 18,07 \text{ m}$$

Zonder volledige afschuiving geldt:

- Indien er sprake is van een klein gat: $R_L = \frac{1}{2} \cdot R_B = 9,03 \text{ m}$
- Indien er sprake is van een groot gat: $R_L = R_B = 18,07 \text{ m}$
- Met volledige afschuiving geldt: $R_L = 2 \cdot R_B = 36,14 \text{ m}$

- Indien er sprake is van een klein gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 9,03 = 19,03 \text{ m}$$

- Indien er sprake is van een groot gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 18,07 = 28,07 \text{ m}$$

- Met volledige afschuiving geldt:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 36,14 = 46,14 \text{ m}$$

$$\text{Diepte erosiekrater} = D_K = 1,2 \cdot (D_0 + H) = 1,2 \cdot (0,63 + 2,3) = 3,52 \text{ m}$$

4. Berekening van de spanningen σ_p en σ_{pl} t.g.v. inwendige druk
--

$D_g/d_n = 572,70/57,30 = 9,99 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding}$ $\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d$ $\sigma_p = \frac{315,00^2 + 257,70^2}{315,00^2 - 257,70^2} \cdot 0,26 = 1,31 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{p(bi)} = \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R - D_e} \cdot \sigma_p$ $\sigma_{p(bi)} = \frac{2 \cdot 630 - 0,5 \cdot 630}{2 \cdot 630 - 630} \cdot 1,31 = 1,97 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{p(bu)} = \frac{2 \cdot R + 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R + D_e} \cdot \sigma_p$ $\sigma_{p(bu)} = \frac{2 \cdot 630 + 0,5 \cdot 630}{2 \cdot 630 + 630} \cdot 1,31 = 1,09 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{y1} = \sigma_{p(bi)} = 1,97 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 1,97 = 0,79 \text{ N/mm}^2$ $\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$
--

5. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Geperst deel)
--

$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 286,35^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 15.677,71}) = 0,93$
--

6. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Gelegd deel)

$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 286,35^3 \cdot 0,102}{975 \cdot 15.677,71}) = 0,92$
--

7. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Geperst deel)

$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$ $q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 1,5 - 10 \cdot 1,5 = 33,84 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 33,84 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 21,32 \text{ N/mm}^1$

8. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Gelegd deel)
--

$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$ $q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 1,5 - 10 \cdot 1,5 = 33,84 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 33,84 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 21,32 \text{ N/mm}^1$

9. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p (Gelegd deel)
--

$q_p = q_n \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o} \right)$ $q_p = 33,84 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{2,3}{0,63} \right) = 70,90 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 70,90 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 44,67 \text{ N/mm}^1$ $q_o = \frac{Q_p}{D_o}$ $q_o = \frac{44,67}{630} = 0,07 \text{ N/mm}^2$
--

10. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek ½ x II NEN 3650-1:C.17 (Geperst deel)

Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 5,34 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 5,34 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 3,36 \text{ N/mm}^1$
--

11. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek ½ x II NEN 3650-1:C.17 (Gelegd deel)
--

Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 5,34 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 5,34 \cdot 10^{-3} \cdot 630 = 3,36 \text{ N/mm}^1$
--

12. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Geperst deel)

$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_1}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{630 \cdot 0,02}{4 \cdot 975 \cdot 4.268.958.539,00}} = 0,00093 \text{ mm}^{-1}$

13. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Gelegd deel)
--

$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_2}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{630 \cdot 0,008}{4 \cdot 975 \cdot 4.268.958.539,00}} = 0,00074 \text{ mm}^{-1}$
--

14. Bepaling van de relevante berekeningsmethode (k-sprong/z-sprong)

$$k_2/k_1 = 0,4$$

$$a = \frac{\sqrt{k_2/k_1} - k_2/k_1}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,044$$

$$b = \frac{k_2/k_1 - \sqrt[4]{(k_2/k_1)^3}}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,17$$

$$\lambda x = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a+b}\right) = 0,67$$

$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x) = 0,72$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot \sin \lambda x = 0,32$$

$$\alpha = \left(\frac{0,5 \cdot a \cdot A_{\lambda x} + b \cdot B_{\lambda x}}{0,08}\right)^2 = \left(\frac{0,5 \cdot 0,044 \cdot 0,72 + 0,17 \cdot 0,32}{0,08}\right)^2 = 0,77$$

$$\frac{(f_k + 2,0 \cdot f_z) \cdot k_1 \cdot \alpha}{q_0} = \frac{(10 + 2,0 \cdot 0) \cdot 0,02 \cdot 0,77}{0,07} = 2,19$$

$$\text{Toetswaarde} = \frac{\alpha}{2 \cdot b \cdot \sqrt[4]{k_2/k_1} - a \sqrt{k_2/k_1}} = \frac{0,77}{2 \cdot 0,17 \cdot \sqrt[4]{0,4} - 0,044 \sqrt{0,4}} = 3,16$$

2,19 < 3,16 → **k-sprong methode**

15. Systeemberekening: Bepaling van moment |M| en dwarskracht |P| t.p.v. overgang gelegd/geperst

$$F_0 = k_1 + k_2 + 2\sqrt{k_1 \cdot k_2} + 2\sqrt[4]{k_1 \cdot k_2^3} + 2\sqrt[4]{k_1^3 \cdot k_2} = 0,11$$

$$F_1 = k_1 \sqrt{k_2} - k_2 \sqrt{k_1} = 0,00066$$

$$F_2 = k_1 \sqrt[4]{k_2^3} + k_2 \sqrt[4]{k_1^3} = 0,00096$$

$$|M| = \frac{F_1}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{D_e \cdot E \cdot I_b} = 3.199.537,28 \text{ Nmm}$$

$$|P| = \frac{F_2}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt[4]{4 \cdot D_e^3 \cdot E \cdot I_b} = 23.184,53 \text{ N}$$

16. Bepaling plaats en grootte van de maximale momenten*16.1 Geperst deel*

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{|P|}{2 \cdot |M| \cdot \lambda_1 + |P|}\right) = 720,32$$

$$\lambda_1 x_1 = 0,00093 \cdot 720,32 = 0,67$$

$$A_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot (\cos \lambda_1 x_1 + \sin \lambda_1 x_1) = 0,72$$

$$B_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot \sin \lambda_1 x_1 = 0,32$$

$$M_{\max 1} = -|M| \cdot A_{\lambda_1 x_1} - \frac{|P|}{\lambda_1} \cdot B_{\lambda_1 x_1} = 10.198.749,27 \text{ Nmm}$$

16.2 Gelegd deel

$$x_2 = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{|P|}{|P| - 2 \cdot |M| \cdot \lambda_2}\right) = 1.211,92$$

$$\lambda_2 x_2 = 0,00074 \cdot 1.211,92 = 0,90$$

$$A_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot (\cos \lambda_2 x_2 + \sin \lambda_2 x_2) = 0,57$$

$$B_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot \sin \lambda_2 x_2 = 0,32$$

$$M_{\max 2} = -|M| \cdot A_{\lambda_2 x_2} + \frac{|P|}{\lambda_2} \cdot B_{\lambda_2 x_2} = 8.126.821,81 \text{ Nmm}$$

17. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting*17.1 Geperst deel*

$$Q_d = 2 \cdot |M| \cdot \lambda_1^2 + 2 \cdot |P| \cdot \lambda_1$$

$$Q_d = 2 \cdot 3.199.537,28 \cdot 0,00093^2 + 2 \cdot 23.184,53 \cdot 0,00093 = 48,82 \text{ N/mm}^1$$

17.2 Gelegd deel

$$Q_d = |2 \cdot |M| \cdot \lambda_2^2 - 2 \cdot |P| \cdot \lambda_2|$$

$$Q_d = |2 \cdot 3.199.537,28 \cdot 0,00074^2 - 2 \cdot 23.184,53 \cdot 0,00074| = 30,87 \text{ N/mm}^1$$

18. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Geperst deel)*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

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

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

$$B = D_o = 0,63 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 2,30 + 0,63 / 2 = 2,62 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,36$$

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 14,39 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 1.229,09 \text{ kN/m}^2 = 1,23 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 1,23 \cdot 630,00 = 774,33 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

$$Q_n = 21,32 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_v = 3,36 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_d = 48,82 \text{ N/mm}^1 +$$

$$\Sigma = 73,50 \text{ N/mm}^1$$

Conclusie:

Geen aanpassing

van Q_d nodig

19. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Gelegd deel)

Berekening evenwichtsdraagvermogen

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

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

$$B = D_o = 0,63 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 2,30 + 0,63 / 2 = 2,62 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,36$$

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 14,39 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 1.229,09 \text{ kN/m}^2 = 1,23 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 1,23 \cdot 630,00 = 774,33 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Q_n	=	21,32 N/mm ¹	Conclusie:
Q_v	=	3,36 N/mm ¹	Geen aanpassing
Q_d	=	30,87 N/mm ¹ +	van Q_d nodig
Σ	=	55,55 N/mm ¹	

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) + 0,048 \cdot 48,82) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 286,35^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 7,07 \text{ mm} (= 1,23\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 572,70 = 34,36 \text{ mm}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (21,32 + \frac{1}{2} \cdot 3,36) + 0,048 \cdot 30,87) \cdot 286,35^3}{350 \cdot 15.677,71 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 286,35^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 4,75 \text{ mm} (= 0,83\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 572,70 = 34,36 \text{ mm}$$

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
22. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Geperst deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h,n} + Q_{h,IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,138 \cdot (21,32 + 3,36) \cdot 286,35 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (21,32 + 3,36) + \frac{2}{3} \cdot 286,35 \cdot 7,07 \cdot 0,014) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 286,35$ $M_q = 0,00 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,083 \cdot 48,82 \cdot 286,35$ $M_{qd} = 1.160,20 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (0,00 + 1.160,20) / 547,22 = 2,12 \text{ N/mm}^2$		
23. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Gelegd deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h,n} + Q_{h,IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,177 \cdot (21,32 + 3,36) \cdot 286,35 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (21,32 + 3,36) + \frac{2}{3} \cdot 286,35 \cdot 4,75 \cdot 0,017) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 286,35$ $M_q = 396,22 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 30,87 \cdot 286,35$ $M_{qd} = 1.078,56 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (396,22 + 1.078,56) / 547,22 = 2,70 \text{ N/mm}^2$		
24. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Geperst deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max1}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{10.198.749,27}{13.552.249,33} = 0,75 \text{ N/mm}^2$		
25. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Gelegd deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max2}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{8.126.821,81}{13.552.249,33} = 0,60 \text{ N/mm}^2$		
		22-05-2025 10:24:40

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
26. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil		
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,00016 \cdot 975 = \mathbf{1,56 \text{ N/mm}^2}$		
27. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht of T-stuk		
Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht: $r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 286,35 \text{ mm}$ $h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{57,3 \cdot 630}{286,35^2} = 0,44$ $k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,44} = 3,75$ $i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,44^{(2/3)}} = 1,56$ $i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 1,56 = 3,11$ Wel steundruk toegepast, maar geen rerounding		
28. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N		
$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$ $S_N = 975 \cdot \frac{15.677,71}{572,7^3} = 0,0814 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{81,38 \text{ kN/m}^2}$ Minimaal vereiste ringstijfheid = 2 kN/m ²		
29. Toetsing op implosie (bedrijfsfase): berekening van de alzijdige overdruk		
Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$ $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 15.677,71}{572,70^3} = 1,55 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 15.677,71}{572,70^3} = 0,28 \text{ N/mm}^2$ Conclusie: Kans op implosie bij 27,82 m grondwater boven de leiding		
30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,12 + 3,11 \cdot 0,75) = \mathbf{2,90 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_\sigma \cdot i_x \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,79 + 0,65 \cdot 1,56 \cdot 0,75 + 1,56 = \mathbf{3,11 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$		

31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,70 + 3,11 \cdot 0,60) = \mathbf{2,96 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 0,79 + 0,65 \cdot 1,56 \cdot 0,60 + 1,56 = \mathbf{2,95 \text{ N/mm}^2}$$

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

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2025 1.3 ©
Algemene gegevens			
Naam van het project : 2.2 Overgang HDD metrerig 1535 t/m 1650 Projectonderdeel : Persleiding Ø560 PE 100 SDR-17 - 2,6 bar Importantiefactor S : 0,75			
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 17		
Lange-duur treksterkte	MRS	= 10	N/mm ²
Materiaalfactor	γ_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	α_g	= 16,0·10 ⁻⁵	mm/(mm·K)
Alfa Tangentieel / Alfa Axiaal	α_σ	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 8,00	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 560,00	mm
Wanddikte	d _n	= 32,3	mm
Wanddikte bocht	t	= 32,3	mm
Bochtstraal	R	= 560,00	mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)	= Vloeistof		
Ontwerpdruk	p _d	= 0,26	N/mm ²
Volumieke massa medium	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Aanleggegevens			
Belastinghoek (Geperst deel)	α	= 180	°
Belastinghoek (Gelegd deel)	α	= 180	°
Ondersteuningshoek (Geperst deel)	β	= 120	°
Ondersteuningshoek (Gelegd deel)	β	= 70	°
Horizontale steundrukhoek (Geperst deel)	γ	= 120	°
Horizontale steundrukhoek (Gelegd deel)	γ	= 120	°
Uitvoeringszakkingverschil	f _v	= 10	mm
Zettingsverschil	f _z	= 0	mm
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld	H _{werk}	= 2,5	m
			22-05-2025 10:23:54

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvingshoek grond [°]	Gem. vert. bedding- constante [N/mm ³]
Geperst deel	2,30	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0200
Gelegd deel	2,30	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0080

Locatie	Hor. steundruk	Horizontale beddingconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	Schuif- sterkte [kN/m ²]	Verkeersbelasting
Geperst deel	✓	0,014	0,00	0,00	Grafiek ½ x II
Gelegd deel	✓	0,017	0,00	0,00	Grafiek ½ x II

Locatie	Ontlastende invloed t.g.v. wegdek
Geperst deel	Geen ontlastende invloed
Gelegd deel	Geen ontlastende invloed

1. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 495,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 527,70	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 560,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 280,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 247,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 263,85	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 1.870.887.845,78	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 6.681.742,31	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 2.808,19	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 173,88	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:

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

$$h = \frac{260.000}{1.000 \cdot 9,81} = 26,50 \text{ m} \rightarrow h^3 \cdot D_i^5 = 26,50^3 \cdot 0,50^5 = 555,51 \text{ m}^8$$

3. Berekening van de veiligheidszone

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

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{26,50^3 \cdot 0,50^5} = 17,63 \text{ m}$$

Zonder volledige afschuiving geldt:

- Indien er sprake is van een klein gat: $R_L = \frac{1}{2} \cdot R_B = 8,81 \text{ m}$
- Indien er sprake is van een groot gat: $R_L = R_B = 17,63 \text{ m}$
- Met volledige afschuiving geldt: $R_L = 2 \cdot R_B = 35,25 \text{ m}$

- Indien er sprake is van een klein gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 8,81 = 18,81 \text{ m}$$

- Indien er sprake is van een groot gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 17,63 = 27,63 \text{ m}$$

- Met volledige afschuiving geldt:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 2,50 + 35,25 = 45,25 \text{ m}$$

$$\text{Diepte erosiekrater} = D_K = 1,2 \cdot (D_0 + H) = 1,2 \cdot (0,56 + 2,3) = 3,43 \text{ m}$$

4. Berekening van de spanningen σ_p en σ_{pl} t.g.v. inwendige druk
--

$D_g/d_n = 527,70/32,30 = 16,34 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow$ Dikwandige leiding

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

$$\sigma_p = \frac{280,00^2 + 247,70^2}{280,00^2 - 247,70^2} \cdot 0,26 = 2,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{p(bi)} = \frac{2 \cdot R - 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R - D_e} \cdot \sigma_p$$

$$\sigma_{p(bi)} = \frac{2 \cdot 560 - 0,5 \cdot 560}{2 \cdot 560 - 560} \cdot 2,13 = 3,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{p(bu)} = \frac{2 \cdot R + 0,5 \cdot D_e}{2 \cdot R + D_e} \cdot \sigma_p$$

$$\sigma_{p(bu)} = \frac{2 \cdot 560 + 0,5 \cdot 560}{2 \cdot 560 + 560} \cdot 2,13 = 1,78 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_{p(bi)} = 3,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 3,20 = 1,28 \text{ N/mm}^2$$

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

5. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Geperst deel)
--

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

$$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 263,85^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 2.808,19}) = 0,76$$

6. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Gelegd deel)

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

$$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 263,85^3 \cdot 0,102}{975 \cdot 2.808,19}) = 0,74$$

7. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Geperst deel)

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

$$q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 1,5 - 10 \cdot 1,5 = 33,84 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 33,84 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 18,95 \text{ N/mm}^1$$

8. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Gelegd deel)
--

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

$$q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 1,5 - 10 \cdot 1,5 = 33,84 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_n = q_n \cdot D_o$$

$$Q_n = 33,84 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 18,95 \text{ N/mm}^1$$

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020	Sigma 2025 1.3 ©
9. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p (Gelegd deel)	
$q_p = q_n \cdot \left(1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o} \right)$ $q_p = 33,84 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{2,3}{0,56} \right) = 75,54 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 75,54 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 42,30 \text{ N/mm}^1$ $q_o = \frac{Q_p}{D_o}$ $q_o = \frac{42,30}{560} = 0,08 \text{ N/mm}^2$	
10. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek ½ x II NEN 3650-1:C.17 (Geperst deel)	
Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 5,35 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 5,35 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 2,99 \text{ N/mm}^1$	
11. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek ½ x II NEN 3650-1:C.17 (Gelegd deel)	
Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 5,35 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 5,35 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 2,99 \text{ N/mm}^1$	
12. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Geperst deel)	
$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_1}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{560 \cdot 0,02}{4 \cdot 975 \cdot 1.870.887.845,78}} = 0,0011 \text{ mm}^{-1}$	
13. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Gelegd deel)	
$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_2}{4 \cdot E \cdot I_b}}$ $\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{560 \cdot 0,008}{4 \cdot 975 \cdot 1.870.887.845,78}} = 0,00089 \text{ mm}^{-1}$	
	22-05-2025 10:23:55

14. Bepaling van de relevante berekeningsmethode (k-sprong/z-sprong)

$$k_2/k_1 = 0,4$$

$$a = \frac{\sqrt{k_2/k_1} - k_2/k_1}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,044$$

$$b = \frac{k_2/k_1 - \sqrt[4]{(k_2/k_1)^3}}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,17$$

$$\lambda x = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a+b}\right) = 0,67$$

$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x) = 0,72$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot \sin \lambda x = 0,32$$

$$\alpha = \left(\frac{0,5 \cdot a \cdot A_{\lambda x} + b \cdot B_{\lambda x}}{0,08}\right)^2 = \left(\frac{0,5 \cdot 0,044 \cdot 0,72 + 0,17 \cdot 0,32}{0,08}\right)^2 = 0,77$$

$$\frac{(f_k + 2,0 \cdot f_z) \cdot k_1 \cdot \alpha}{q_0} = \frac{(10 + 2,0 \cdot 0) \cdot 0,02 \cdot 0,77}{0,08} = 2,05$$

$$\text{Toetswaarde} = \frac{\alpha}{2 \cdot b \cdot \sqrt[4]{k_2/k_1} - a \sqrt{k_2/k_1}} = \frac{0,77}{2 \cdot 0,17 \cdot \sqrt[4]{0,4} - 0,044 \sqrt{0,4}} = 3,16$$

2,05 < 3,16 → **k-sprong methode**

15. Systeemberekening: Bepaling van moment |M| en dwarskracht |P| t.p.v. overgang gelegd/geperst

$$F_0 = k_1 + k_2 + 2\sqrt{k_1 \cdot k_2} + 2\sqrt[4]{k_1 \cdot k_2^3} + 2\sqrt[4]{k_1^3 \cdot k_2} = 0,11$$

$$F_1 = k_1 \sqrt{k_2} - k_2 \sqrt{k_1} = 0,00066$$

$$F_2 = k_1 \sqrt[4]{k_2^3} + k_2 \sqrt[4]{k_1^3} = 0,00096$$

$$|M| = \frac{F_1}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{D_e \cdot E \cdot I_b} = 1.996.980,49 \text{ Nmm}$$

$$|P| = \frac{F_2}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt[4]{4 \cdot D_e^3 \cdot E \cdot I_b} = 17.268,92 \text{ N}$$

16. Bepaling plaats en grootte van de maximale momenten*16.1 Geperst deel*

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{|P|}{2 \cdot |M| \cdot \lambda_1 + |P|}\right) = 603,60$$

$$\lambda_1 x_1 = 0,0011 \cdot 603,60 = 0,67$$

$$A_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot (\cos \lambda_1 x_1 + \sin \lambda_1 x_1) = 0,72$$

$$B_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot \sin \lambda_1 x_1 = 0,32$$

$$M_{\max 1} = -|M| \cdot A_{\lambda_1 x_1} - \frac{|P|}{\lambda_1} \cdot B_{\lambda_1 x_1} = 6.365.515,24 \text{ Nmm}$$

16.2 Gelegd deel

$$x_2 = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{|P|}{|P| - 2 \cdot |M| \cdot \lambda_2}\right) = 1.015,53$$

$$\lambda_2 x_2 = 0,00089 \cdot 1.015,53 = 0,90$$

$$A_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot (\cos \lambda_2 x_2 + \sin \lambda_2 x_2) = 0,57$$

$$B_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot \sin \lambda_2 x_2 = 0,32$$

$$M_{\max 2} = -|M| \cdot A_{\lambda_2 x_2} + \frac{|P|}{\lambda_2} \cdot B_{\lambda_2 x_2} = 5.072.328,65 \text{ Nmm}$$

17. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting*17.1 Geperst deel*

$$Q_d = 2 \cdot |M| \cdot \lambda_1^2 + 2 \cdot |P| \cdot \lambda_1$$

$$Q_d = 2 \cdot 1.996.980,49 \cdot 0,0011^2 + 2 \cdot 17.268,92 \cdot 0,0011 = 43,39 \text{ N/mm}^1$$

17.2 Gelegd deel

$$Q_d = |2 \cdot |M| \cdot \lambda_2^2 - 2 \cdot |P| \cdot \lambda_2|$$

$$Q_d = |2 \cdot 1.996.980,49 \cdot 0,00089^2 - 2 \cdot 17.268,92 \cdot 0,00089| = 27,44 \text{ N/mm}^1$$

18. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Geperst deel)*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

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

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

$$B = D_o = 0,56 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 2,30 + 0,56 / 2 = 2,58 \text{ m}$$

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

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

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 14,42 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 1.224,08 \text{ kN/m}^2 = 1,22 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 1,22 \cdot 560,00 = 685,49 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

$$Q_n = 18,95 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_v = 2,99 \text{ N/mm}^1$$

$$Q_d = 43,39 \text{ N/mm}^1 +$$

$$\Sigma = 65,34 \text{ N/mm}^1$$

Conclusie:

Geen aanpassing

van Q_d nodig

19. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Gelegd deel)*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

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

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

$$B = D_o = 0,56 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 2,30 + 0,56 / 2 = 2,58 \text{ m}$$

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

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

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 14,42 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 1.224,08 \text{ kN/m}^2 = 1,22 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 1,22 \cdot 560,00 = 685,49 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Q_n	=	18,95 N/mm ¹	Conclusie:
Q_v	=	2,99 N/mm ¹	Geen aanpassing
Q_d	=	27,44 N/mm ¹ +	van Q_d nodig
Σ	=	49,39 N/mm ¹	

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) + 0,048 \cdot 43,39) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{10,77 \text{ mm}} (= 2,04\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (18,95 + \frac{1}{2} \cdot 2,99) + 0,048 \cdot 27,44) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{6,84 \text{ mm}} (= 1,30\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
22. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Geperst deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h,n} + Q_{h,IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,138 \cdot (18,95 + 2,99) \cdot 263,85 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (18,95 + 2,99) + \frac{2}{3} \cdot 263,85 \cdot 10,77 \cdot 0,014) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 263,85$ $M_q = 0,00 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,083 \cdot 43,39 \cdot 263,85$ $M_{qd} = 950,26 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (0,00 + 950,26) / 173,88 = 5,46 \text{ N/mm}^2$		
23. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Gelegd deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h,n} + Q_{h,IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,177 \cdot (18,95 + 2,99) \cdot 263,85 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (18,95 + 2,99) + \frac{2}{3} \cdot 263,85 \cdot 6,84 \cdot 0,017) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 263,85$ $M_q = 142,49 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 27,44 \cdot 263,85$ $M_{qd} = 883,39 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (142,49 + 883,39) / 173,88 = 5,90 \text{ N/mm}^2$		
24. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Geperst deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max1}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{6.365.515,24}{6.681.742,31} = 0,95 \text{ N/mm}^2$		
25. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Gelegd deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max2}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{5.072.328,65}{6.681.742,31} = 0,76 \text{ N/mm}^2$		
		22-05-2025 10:23:56

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
26. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil		
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,00016 \cdot 975 = \mathbf{1,56 \text{ N/mm}^2}$		
27. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht of T-stuk		
Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht: $r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 263,85 \text{ mm}$ $h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{32,3 \cdot 560}{263,85^2} = 0,26$ $k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,26} = 6,35$ $i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,26^{(2/3)}} = 2,21$ $i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 2,21 = 4,42$ Wel steundruk toegepast, maar geen rerounding		
28. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N		
$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$ $S_N = 975 \cdot \frac{2.808,19}{527,7^3} = 0,0186 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{18,63 \text{ kN/m}^2}$ Minimaal vereiste ringstijfheid = 2 kN/m ²		
29. Toetsing op implosie (bedrijfsfase): berekening van de alzijdige overdruk		
Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$ $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 2.808,19}{527,70^3} = 0,35 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 2.808,19}{527,70^3} = 0,06 \text{ N/mm}^2$ Conclusie: Kans op implosie bij 6,37 m grondwater boven de leiding		
30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (5,46 + 4,42 \cdot 0,95) = \mathbf{6,29 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_\sigma \cdot i_x \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 1,28 + 0,65 \cdot 2,21 \cdot 0,95 + 1,56 = \mathbf{4,21 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$		
		22-05-2025 10:23:56

31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (5,90 + 4,42 \cdot 0,76) = \mathbf{6,02 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

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

$$\sigma_x = 1,28 + 0,65 \cdot 2,21 \cdot 0,76 + 1,56 = \mathbf{3,93 \text{ N/mm}^2}$$

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

MEMO

Berekening overgang AC→PE

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020			Sigma 2025 1.3 ©
Algemene gegevens			
Naam van het project : 2.3 Overgang AC metring 2310 en 2510			
Projectonderdeel : Persleiding Ø560 PE 100 SDR-17 - 2,6 bar			
Importantiefactor S : 0,75			
Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 17		
Lange-duur treksterkte	MRS	= 10	N/mm ²
Materiaalfactor	γ _M	= 1,25	-
Toelaatbare langeduur spanning	σ _t	= 8,00	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus korte duur	E	= 975	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus lange duur	E'	= 350	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α _g	= 16,0·10 ⁻⁵	mm/(mm·K)
Alfa Tangentieel / Alfa Axiaal	α _σ	= 0,65	-
Toelaatbare deflectie	δ	= 8,00	%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 560,00	mm
Wanddikte	d _n	= 32,3	mm
Geen bocht aanwezig			
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p _d	= 0,26	N/mm ²
Volumieke massa medium	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Aanleggegevens			
Belastinghoek (Geperst deel)	α	= 180	°
Belastinghoek (Gelegd deel)	α	= 180	°
Ondersteuningshoek (Geperst deel)	β	= 120	°
Ondersteuningshoek (Gelegd deel)	β	= 70	°
Horizontale steundrukhoek (Geperst deel)	γ	= 120	°
Horizontale steundrukhoek (Gelegd deel)	γ	= 120	°
Uitvoeringszakkingverschil	f _v	= 10	mm
Zettingsverschil	f _z	= 0	mm
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld	H _{werk}	= 3,6	m
			22-05-2025 11:27:46

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvingshoek grond [°]	Gem. vert. bedding- constante [N/mm ³]
Geperst deel	1,70	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0200
Gelegd deel	1,70	0,80	Zand	18,00	20,00	32,50	0,0080

Locatie	Hor. steundruk	Horizontale beddingconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	Schuif- sterkte [kN/m ²]	Verkeersbelasting
Geperst deel	✓	0,014	0,00	0,00	Grafiek ½ x II
Gelegd deel	✓	0,017	0,00	0,00	Grafiek ½ x II

Locatie	Ontlastende invloed t.g.v. wegdek
Geperst deel	Geen ontlastende invloed
Gelegd deel	Geen ontlastende invloed

1. Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 495,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 527,70	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 560,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 280,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 247,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 263,85	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 1.870.887.845,78	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 6.681.742,31	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 2.808,19	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 173,88	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:

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

$$h = \frac{260.000}{1.000 \cdot 9,81} = 26,50 \text{ m} \rightarrow h^3 \cdot D_i^5 = 26,50^3 \cdot 0,50^5 = 555,51 \text{ m}^8$$

3. Berekening van de veiligheidszone

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

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{26,50^3 \cdot 0,50^5} = 17,63 \text{ m}$$

Zonder volledige afschuiving geldt:

- Indien er sprake is van een klein gat: $R_L = \frac{1}{2} \cdot R_B = 8,81 \text{ m}$

- Indien er sprake is van een groot gat: $R_L = R_B = 17,63 \text{ m}$

- Met volledige afschuiving geldt: $R_L = 2 \cdot R_B = 35,25 \text{ m}$

- Indien er sprake is van een klein gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 3,60 + 8,81 = 23,21 \text{ m}$$

- Indien er sprake is van een groot gat:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 3,60 + 17,63 = 32,03 \text{ m}$$

- Met volledige afschuiving geldt:

$$\text{Veiligheidszone} = 4 \cdot H_{\text{werk}} + R_L = 4 \cdot 3,60 + 35,25 = 49,65 \text{ m}$$

$$\text{Diepte erosiekrater} = D_K = 1,2 \cdot (D_0 + H) = 1,2 \cdot (0,56 + 1,7) = 2,71 \text{ m}$$

4. Berekening van de spanningen σ_p en σ_{pl} t.g.v. inwendige druk

$$D_g/d_n = 527,70/32,30 = 16,34 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding}$$

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

$$\sigma_p = \frac{280,00^2 + 247,70^2}{280,00^2 - 247,70^2} \cdot 0,26 = 2,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 2,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{pl} = \nu \cdot \sigma_p = 0,4 \cdot 2,13 = 0,85 \text{ N/mm}^2$$

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

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020	Sigma 2025 1.3 ©
5. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Geperst deel)	
$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 263,85^3 \cdot 0,089}{975 \cdot 2.808,19}) = 0,76$	
6. Berekening reroundingfactor f_{rr} (Gelegd deel)	
$f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot p_d \cdot r_g^3 \cdot k_y}{E \cdot I_w})$ $f_{rr} = 1 / (1 + \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 263,85^3 \cdot 0,102}{975 \cdot 2.808,19}) = 0,74$	
7. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Geperst deel)	
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$ $q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 0,9 - 10 \cdot 0,9 = 26,64 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 26,64 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 14,92 \text{ N/mm}^1$	
8. Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n (Gelegd deel)	
$q_n = \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w$ $q_n = 1,1 \cdot 18 \cdot 0,8 + 1,1 \cdot 20 \cdot 0,9 - 10 \cdot 0,9 = 26,64 \text{ kN/m}^2$ $Q_n = q_n \cdot D_o$ $Q_n = 26,64 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 14,92 \text{ N/mm}^1$	
9. Berekening van de passieve grondbelasting Q_p (Gelegd deel)	
$q_p = q_n \cdot (1 + f_m \cdot \frac{H}{D_o})$ $q_p = 26,64 \cdot (1 + 0,3 \cdot \frac{1,7}{0,56}) = 50,90 \text{ kN/m}^2$ $Q_p = q_p \cdot D_o$ $Q_p = 50,90 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 28,50 \text{ N/mm}^1$ $q_o = \frac{Q_p}{D_o}$ $q_o = \frac{28,50}{560} = 0,05 \text{ N/mm}^2$	
10. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek 1/2 x II NEN 3650-1:C.17 (Geperst deel)	
Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 8,19 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 8,19 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 4,59 \text{ N/mm}^1$	
11. Berekening van de verkeersbelasting Q_v volgens Grafiek 1/2 x II NEN 3650-1:C.17 (Gelegd deel)	
Niet rekenen met ontlastende invloed $q_v = 8,19 \text{ kN/m}^2$ $Q_v = q_v \cdot D_o$ $Q_v = 8,19 \cdot 10^{-3} \cdot 560 = 4,59 \text{ N/mm}^1$	
	22-05-2025 11:27:47

12. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Geperst deel)

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_1}{4 \cdot E \cdot I_b}}$$

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{560 \cdot 0,02}{4 \cdot 975 \cdot 1.870.887.845,78}} = 0,0011 \text{ mm}^{-1}$$

13. Berekening van de stijfheidsverhouding grond/leiding λ (Gelegd deel)

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_2}{4 \cdot E \cdot I_b}}$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{560 \cdot 0,008}{4 \cdot 975 \cdot 1.870.887.845,78}} = 0,00089 \text{ mm}^{-1}$$

14. Bepaling van de relevante berekeningsmethode (k-sprong/z-sprong)

$$k_2/k_1 = 0,4$$

$$a = \frac{\sqrt{k_2/k_1} - k_2/k_1}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,044$$

$$b = \frac{k_2/k_1 - \sqrt[4]{(k_2/k_1)^3}}{1 + k_2/k_1 + 2\sqrt{k_2/k_1} + 2\sqrt[4]{(k_2/k_1)^3} + 2\sqrt[4]{k_2/k_1}} = 0,17$$

$$\lambda x = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a+b}\right) = 0,67$$

$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x) = 0,72$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cdot \sin \lambda x = 0,32$$

$$\alpha = \left(\frac{0,5 \cdot a \cdot A_{\lambda x} + b \cdot B_{\lambda x}}{0,08}\right)^2 = \left(\frac{0,5 \cdot 0,044 \cdot 0,72 + 0,17 \cdot 0,32}{0,08}\right)^2 = 0,77$$

$$\frac{(f_k + 2,0 \cdot f_z) \cdot k_1 \cdot \alpha}{q_o} = \frac{(10 + 2,0 \cdot 0) \cdot 0,02 \cdot 0,77}{0,05} = 3,04$$

$$\text{Toetswaarde} = \frac{\alpha}{2 \cdot b \cdot \sqrt[4]{k_2/k_1} - a \sqrt[4]{k_2/k_1}} = \frac{0,77}{2 \cdot 0,17 \cdot \sqrt[4]{0,4} - 0,044 \sqrt[4]{0,4}} = 3,16$$

3,04 < 3,16 → **k-sprong methode**

15. Systeemberekening: Bepaling van moment |M| en dwarskracht |P| t.p.v. overgang gelegd/geperst

$$F_0 = k_1 + k_2 + 2\sqrt{k_1 \cdot k_2} + 2\sqrt[4]{k_1 \cdot k_2^3} + 2\sqrt[4]{k_1^3 \cdot k_2} = 0,11$$

$$F_1 = k_1 \cdot \sqrt{k_2} - k_2 \cdot \sqrt{k_1} = 0,00066$$

$$F_2 = k_1 \cdot \sqrt[4]{k_2^3} + k_2 \cdot \sqrt[4]{k_1^3} = 0,00096$$

$$|M| = \frac{F_1}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{D_e \cdot E \cdot I_b} = 1.996.980,49 \text{ Nmm}$$

$$|P| = \frac{F_2}{F_0} \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt[4]{4 \cdot D_e^3 \cdot E \cdot I_b} = 17.268,92 \text{ N}$$

16. Bepaling plaats en grootte van de maximale momenten*16.1 Geperst deel*

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{|P|}{2 \cdot |M| \cdot \lambda_1 + |P|} \right) = 603,60$$

$$\lambda_1 x_1 = 0,0011 \cdot 603,60 = 0,67$$

$$A_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot (\cos \lambda_1 x_1 + \sin \lambda_1 x_1) = 0,72$$

$$B_{\lambda_1 x_1} = e^{-\lambda_1 x_1} \cdot \sin \lambda_1 x_1 = 0,32$$

$$M_{\max 1} = -|M| \cdot A_{\lambda_1 x_1} - \frac{|P|}{\lambda_1} \cdot B_{\lambda_1 x_1} = 6.365.515,24 \text{ Nmm}$$

16.2 Gelegd deel

$$x_2 = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{|P|}{|P| - 2 \cdot |M| \cdot \lambda_2} \right) = 1.015,53$$

$$\lambda_2 x_2 = 0,00089 \cdot 1.015,53 = 0,90$$

$$A_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot (\cos \lambda_2 x_2 + \sin \lambda_2 x_2) = 0,57$$

$$B_{\lambda_2 x_2} = e^{-\lambda_2 x_2} \cdot \sin \lambda_2 x_2 = 0,32$$

$$M_{\max 2} = -|M| \cdot A_{\lambda_2 x_2} + \frac{|P|}{\lambda_2} \cdot B_{\lambda_2 x_2} = 5.072.328,65 \text{ Nmm}$$

17. Berekening van de indirect overgedragen bovenbelasting*17.1 Geperst deel*

$$Q_d = 2 \cdot |M| \cdot \lambda_1^2 + 2 \cdot |P| \cdot \lambda_1$$

$$Q_d = 2 \cdot 1.996.980,49 \cdot 0,0011^2 + 2 \cdot 17.268,92 \cdot 0,0011 = 43,39 \text{ N/mm}^1$$

17.2 Gelegd deel

$$Q_d = |2 \cdot |M| \cdot \lambda_2^2 - 2 \cdot |P| \cdot \lambda_2|$$

$$Q_d = |2 \cdot 1.996.980,49 \cdot 0,00089^2 - 2 \cdot 17.268,92 \cdot 0,00089| = 27,44 \text{ N/mm}^1$$

18. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Geperst deel)*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

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

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

$$B = D_o = 0,56 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 1,70 + 0,56 / 2 = 1,98 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,35$$

$$\gamma'_{\text{gem}} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 15,15 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 974,44 \text{ kN/m}^2 = 0,97 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weD_o} = P_{we} \cdot D_o = 0,97 \cdot 560,00 = 545,69 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

$$Q_n = 14,92 \text{ N/mm}^1$$

Conclusie:

$$Q_v = 4,59 \text{ N/mm}^1$$

Geen aanpassing

$$Q_d = 43,39 \text{ N/mm}^1 +$$

van Q_d nodig

$$\Sigma = 62,90 \text{ N/mm}^1$$

19. Berekening evenwichtsdraagvermogen en controle met bovenbelastingen (Gelegd deel)*Berekening evenwichtsdraagvermogen*

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

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

$$B = D_o = 0,56 \text{ m}$$

$$B/L = 0,1$$

$$Z = h + D_o / 2 = 1,70 + 0,56 / 2 = 1,98 \text{ m}$$

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

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - \sin(\varphi))^2 \cdot \tan^{-1}(Z/B) = 1,35$$

$$\gamma'_{gem} = (q_n + (\gamma \cdot \gamma_n - \gamma_w) \cdot D_o / 2) / Z = 15,15 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{we} = 974,44 \text{ kN/m}^2 = 0,97 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{weDo} = P_{we} \cdot D_o = 0,97 \cdot 560,00 = 545,69 \text{ N/mm}^1$$

Controle bovenbelastingen met evenwichtsdraagvermogen

Q_n	=	14,92 N/mm ¹	Conclusie:
Q_v	=	4,59 N/mm ¹	Geen aanpassing
Q_d	=	27,44 N/mm ¹ +	van Q_d nodig
Σ	=	46,95 N/mm ¹	

20. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Geperst deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) + 0,048 \cdot 43,39) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,014 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{10,25 \text{ mm}} (= 1,94\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

21. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie (Gelegd deel)

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot Q_{n,h} + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = D \cdot \frac{(0,089 \cdot Q - 0,095 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + \frac{1}{2} \cdot Q_v) + 0,048 \cdot Q_d) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w + 0,061 \cdot k_h \cdot r_g^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = 1 \cdot \frac{(0,089 \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) - 0,095 \cdot (1 - \sin(32,5^\circ)) \cdot (14,92 + \frac{1}{2} \cdot 4,59) + 0,048 \cdot 27,44) \cdot 263,85^3}{350 \cdot 2.808,19 + 0,061 \cdot 0,017 \cdot 263,85^4}$$

$$\delta_{Y,IOWA} = \mathbf{6,40 \text{ mm}} (= 1,21\%)$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8,00\% \cdot \text{importantiefactor } S \cdot D_g = 0,08 \cdot 0,75 \cdot 527,70 = \mathbf{31,66 \text{ mm}}$$

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
22. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Geperst deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h;n} + Q_{h;IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,138 \cdot (14,92 + 4,59) \cdot 263,85 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (14,92 + 4,59) + \frac{2}{3} \cdot 263,85 \cdot 10,25 \cdot 0,014) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 263,85$ $M_q = 0,00 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,083 \cdot 43,39 \cdot 263,85$ $M_{qd} = 950,26 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (0,00 + 950,26) / 173,88 = 5,46 \text{ N/mm}^2$		
23. Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen (Gelegd deel)		
<i>Moment t.g.v. Q_n en Q_v</i> $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot (Q_{h;n} + Q_{h;IOWA}) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g - K_b \cdot ((1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + \frac{2}{3} \cdot r_g \cdot \delta_{Y,IOWA} \cdot k_h) \cdot \sin(1/2 \cdot \gamma) \cdot r_g$ $M_q = 0,177 \cdot (14,92 + 4,59) \cdot 263,85 - 0,143 \cdot ((1 - \sin(32,5)) \cdot (14,92 + 4,59) + \frac{2}{3} \cdot 263,85 \cdot 6,40 \cdot 0,017) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot 263,85$ $M_q = 101,26 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Moment t.g.v. Q_d</i> $M_{qd} = K_{b,ind} \cdot Q_d \cdot r_g$ $M_{qd} = 0,122 \cdot 27,44 \cdot 263,85$ $M_{qd} = 883,39 \text{ Nmm/mm}^1$ <i>Spanning t.g.v. M_q en M_{qd}</i> $\sigma_q = f_{rr} \cdot (M_q + M_{qd}) / W_w$ $\sigma_q = 1,00 \cdot (101,26 + 883,39) / 173,88 = 5,66 \text{ N/mm}^2$		
24. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Geperst deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max1}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{6.365.515,24}{6.681.742,31} = 0,95 \text{ N/mm}^2$		
25. Berekening van de spanning σ_{bx} t.g.v. uitvoeringszakkingverschil f_v en zettingsverschil f_z (Gelegd deel)		
$\sigma_{bx} = \frac{M_{max2}}{W_b}$ $\sigma_{bx} = \frac{5.072.328,65}{6.681.742,31} = 0,76 \text{ N/mm}^2$		
		22-05-2025 11:27:48

Sterkteberekening van een gelegd/geperste leiding conform NEN 3650/3651:2020		Sigma 2025 1.3 ©
26. Berekening van de spanning σ_{ax} t.g.v. temperatuurverschil		
$\sigma_{ax} = \Delta t \cdot \alpha_g \cdot E$ $\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,00016 \cdot 975 = \mathbf{1,56 \text{ N/mm}^2}$		
27. Berekening van de spanningsverhogingsfactoren van de bocht of T-stuk		
Aangezien er geen bocht of T-stuk wordt toegepast volgt: $i_x = 1, i_y = 0, i_{xp} = 1, i_{yp} = 0$		
28. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N		
$S_N = E \cdot \frac{I_w}{D_g^3}$ $S_N = 975 \cdot \frac{2.808,19}{527,7^3} = 0,0186 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{18,63 \text{ kN/m}^2}$ Minimaal vereiste ringstijfheid = 2 kN/m²		
29. Toetsing op implosie (bedrijfsfase): berekening van de alzijdige overdruk		
Veiligheidsfactor γ voor langdurige onderdruk: $\gamma = 3$ Veiligheidsfactor γ voor kortdurende onderdruk: $\gamma = 1,5$ $p_o = \frac{1}{\gamma \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{24 \cdot E \cdot I_w}{D_g^3}$ $p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 2.808,19}{527,70^3} = 0,35 \text{ N/mm}^2$ $p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 2.808,19}{527,70^3} = 0,06 \text{ N/mm}^2$ Conclusie: Kans op implosie bij 6,37 m grondwater boven de leiding		
30. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Geperst deel)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,46 = \mathbf{3,55 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,85 + 0,65 \cdot 0,95 + 1,56 = \mathbf{3,03 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$		
31. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (Gelegd deel)		
Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_q$ $\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 5,66 = \mathbf{3,68 \text{ N/mm}^2}$ Optredende spanningen in langsrichting van de leiding $\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$ $\sigma_x = 0,85 + 0,65 \cdot 0,76 + 1,56 = \mathbf{2,91 \text{ N/mm}^2}$ Toelaatbare spanning = $\bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 0,75 = \mathbf{6,00 \text{ N/mm}^2}$		