



Sigma 2012 3.0

Computerprogramma om leidingen conform de
NEN 3650:2012 te berekenen

Deel 1: Belastingen op leidingen



Belastingen op leidingen

1. Algemeen

De belangrijkste belastingen zijn:

- inwendige druk;
- grondbelasting;
- verkeersbelasting;
- indirecte belastingen en buigspanningen ten gevolge van zettingen;
- spanningen ten gevolge van temperatuurverschil.

Daarnaast zijn er spanning verhogende factoren indien er bijvoorbeeld een bocht wordt toegepast. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op deze belastingen.

2. Spanningen ten gevolge van inwendige druk

Wanneer een leiding gebruikt wordt voor het transport van vloeistof of gas én sprake is van het verpompen hiervan, is het nodig om druk op te bouwen. De leiding moet tegen deze druk bestand zijn.

In de NEN 3650-serie wordt onderscheid gemaakt tussen hogedrukleidingen en lagedrukleidingen. De grens ligt bij 1 MPa (10 bar). Is de druk hoger dan 1 MPa (= 10 bar of 1 N/mm^2) dan hebben we het over een hogedrukleiding. Is de druk lager dan is de leiding een lagedrukleiding.

De druk bij drukriolering is vaak gelijk aan 1,6 bar (= 160 kPa). De druk bij een waterleiding varieert in het algemeen van 2,5 tot 4 ato, ofwel van 250 kPa tot 400 kPa. Bij hogedruk gasleidingen kan de druk wel 80 bar zijn. Bij lagedruk gasleidingen is de maximale druk in het algemeen 8 bar.

In het programma: Sigma 2012 is er een conversietool opgenomen. Deze is op te roepen met de rechtermuisknop.



Welke inwendige druk moet in Sigma 2012 worden ingevoerd?

Met Sigma 2012 kan een eenvoudige berekening worden gemaakt. Volgens de NEN 3650-serie geldt dat bij een eenvoudige berekening de ontwerpdruk in de berekening moet worden ingevoerd. In het algemeen kan als ontwerpdruk de druk worden ingevoerd die normaal in het systeem heerst. Piekbelastingen, bijvoorbeeld veroorzaakt door waterslag, hoeven niet in een eenvoudige berekening te worden meegenomen.

De spanning ten gevolge van de inwendige druk kan op twee manieren worden berekend. Is er sprake van een dunwandige leiding (dit is het geval wanneer de verhouding diameter/wanddikte groter dan 20 is) dan kan de ringspanning worden uitgerekend met de Ketelformule:

$$\sigma_p = \frac{p_d * D_g}{2 * d}$$

Bij dikwandige leidingen mag de formule van Lamé gebruikt worden:

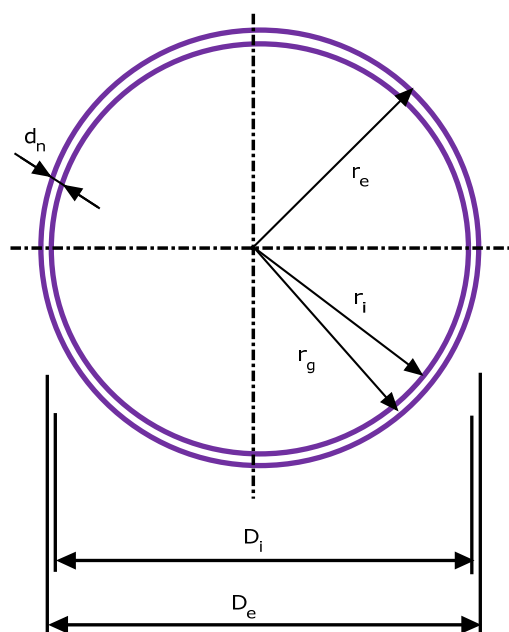
$$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} * p_d$$

Hierin is:

- σ_p = de tangentiële spanning ten gevolge van de inwendige druk in N/mm²
- p_d = de druk in de leiding in N/mm²
- d = de minimale wanddikte van de leiding in mm
- D_g = de gemiddelde middellijn van de leiding in mm
- r_e = de uitwendige straal van de leiding in mm
- r_i = de inwendige straal van de leiding in mm

In het algemeen zijn de uitkomsten van beide formules nagenoeg gelijk. Belangrijk is wel dat de minimale wanddikte bij stalen leidingen soms wel 10% tot 12% minder kan zijn dan de nominale wanddikte. \ In Sigma 2012 wordt bij stalen leidingen om zowel de nominale als de minimale wanddikte gevraagd.

Om de spanning ten gevolge van inwendige druk te kunnen berekenen moeten we dus de eigenschappen van de leiding weten. Deze zijn afhankelijk van de uitwendige middellijn en de wanddikte. Wanneer deze bekend zijn, zijn de overige eigenschappen ook bekend.



Leidingeigenschappen:

De inwendige middellijn $D_i = D_e - 2 \times d_n$

De gemiddelde middellijn $D_g = (D_e + D_i) / 2$

De uitwendige straal $r_e = D_e / 2$

De inwendige straal $r_i = D_i / 2$

De gemiddelde straal $r_g = (r_e + r_i) / 2$

Wanneer de tangentiële spanning σ_p bekend is kan ook de spanning in langsrichting worden uitgerekend. Deze is afgeleid van de tangentiële spanning en is afhankelijk van de constante van Poisson ν van het materiaal. In de NEN 3650-serie is voor de constante van Poisson voor elk materiaal voorgeschreven.

De doorsnede van een leiding.

Bij GVK moet de leverancier van de buizen de constante van Poisson opgeven aangezien deze per buissoort kan verschillen.

De axiale spanning ten gevolge van inwendige druk is dus:

$$\sigma_{pl} = \nu * \sigma_p$$

Hierin is:

σ_{pl} = de axiale spanning ten gevolge van de inwendige druk in N/mm^2

ν = de constante van Poisson

σ_p = de tangentiële spanning ten gevolge van de inwendige druk in N/mm^2

Berekening spanningen ten gevolge van inwendige druk bij een dunwandige leiding

Leidingmateriaal = Staal

Uitwendige middellijn = 168,3 mm

Wanddikte = 4,5 mm

Ontwerpdruk = 8 bar



Hieruit volgt:

1.	Bepaal of de leiding dikwandig of dunwandig is. Dit is afhankelijk van de verhouding uitwendige middellijn / de wanddikte.
----	--

De uitwendige middellijn = 168,3 mm / de wanddikte = 4,5 mm = 37,4.

Duidelijk groter dan 20, dus er is sprake van een dunwandige leiding. De Ketelformule is van toepassing.

2.	Bereken de uitwendig en inwendige straal van de leiding
----	---

De inwendige middellijn $D_i = D_e - 2 \times d_n \rightarrow D_i = 168,3 - 2 \times 4,5 = 159,3$ mm

De gemiddelde middellijn $D_g = (D_e + D_i) / 2 \rightarrow D_g = (168,3 + 159,3) / 2 = 163,8$ mm

3.	Reken de tangentiële spanning uit met behulp van de Ketelformule
----	--

De inwendige druk van 8 bar is gelijk aan 0,8 N/mm². Nu volgt:

$$\sigma_p = \frac{p_d * D_g}{2 * d} = \frac{0,8 * 163,8}{2 * 4,5} = 14,56 \text{ N/mm}^2$$

4.	Nu de spanning in tangentiële richting bekend is kan de spanning in axiale richting worden bepaald
----	--

De constante van Poisson voor staal is 0,3.

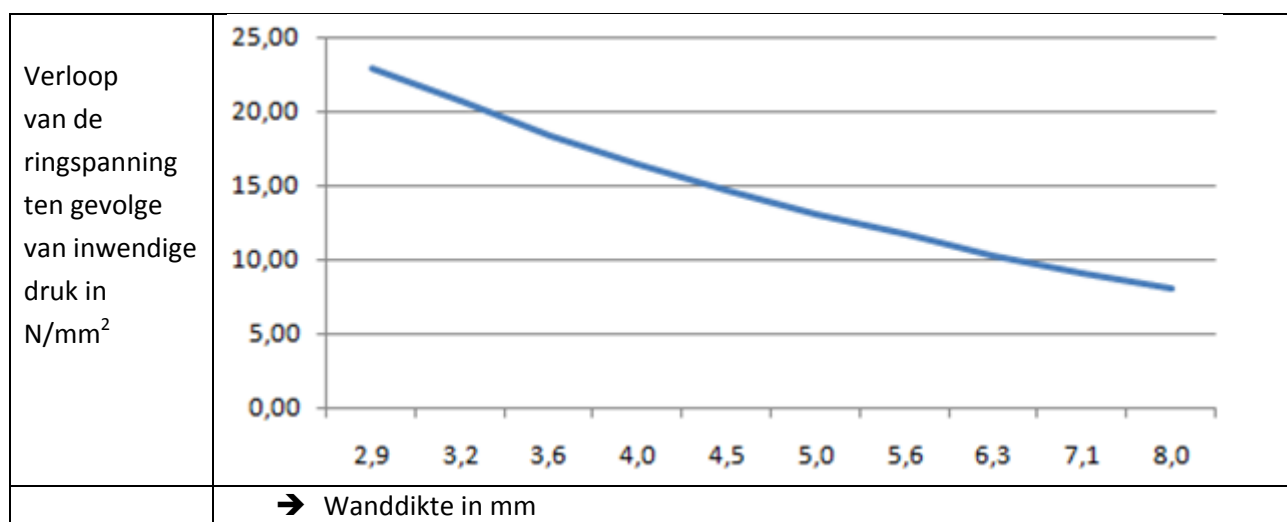
$$\sigma_{pl} = \nu * \sigma_p = 0,3 * 14,56 = 4,37 \text{ N/mm}^2$$

Uitgaande van een 168,3 mm leiding zijn een aantal wanddikten geselecteerd om vervolgens s_p te berekenen. Het zal duidelijk zijn dat bij een dunne buiswand de spanning ten gevolge van inwendige druk hoger is dan bij een dikkere buiswand.



Overzicht van diameters en wanddikten bij stalen leidingen

Overzicht diameters en wanddikten bij stalen leidingen					
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]				
	1,6	2	2,3	2,9	4
60,3	1,6	2	2,3	2,9	4
88,9	2	2,3	2,9	3,2	5,6
114,3	2,6	2,9	3,2	3,6	6,3
168,3	2,9	3,2	4	4,5	7,1
219,1	3,6	4,5	6,3	8	12,5
273	4,5	5	5,6	6,3	10
323,9	4	4,5	5,6	7,1	10
406,4	4	5	6,3	8,8	12,5
508	5	5,6	6,3	8,8	11
610	6,3	7,1	8,8	10	12,5
711	7,1	8,8	10	12,5	14,2
813	8,8	10	12,5	14,2	16
914	10	12,5	14,2	16	17,5
1016	12,5	14,2	16	17,5	20
1220	12,5	14,2	16	17,5	20





Berekening spanningen ten gevolge van inwendige druk bij een dikwandige leiding

Leidingmateriaal = PE

Uitwendige middellijn = 160 mm

Wanddikte = 14,6 mm (SDR 11)

Ontwerpdruk = 8 bar

Hieruit volgt:

1.	Bepaal of de leiding dikwandig of dunwandig is. Dit is afhankelijk van de verhouding uitwendige middellijn / de wanddikte.
----	--

De uitwendige middellijn = 160 mm / de wanddikte = 14,6 mm = 9,96 → Kleiner dan 20, dus er is sprake van een dikwandige leiding. De formule van Lamé moet gebruikt worden.

2.	Bereken de uitwendige en inwendige straal van de leiding
----	--

De uitwendige straal $r_e = D_e / 2 \rightarrow r_e = 160 / 2 = 80$ mm

De inwendige middellijn van de leiding $D_i = D_e - 2 * dn \rightarrow D_i = 160 - 2 * 14,6 = 130,8$ mm

De inwendige straal $r_i = D_i / 2 \rightarrow r_i = 130,8 / 2 = 65,4$ mm

3.	Reken de tangentiële spanning uit met behulp van de formule van Lamé
----	--

De inwendige druk van 8 bar is gelijk aan 0,8 N/mm². Nu volgt:

$$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} * p_d = \frac{80^2 + 65,4^2}{80^2 - 65,4^2} * 0,8 = 4,02 \text{ N/mm}^2$$

4.	Nu de spanning in tangentiële richting bekend is kan de spanning in axiale richting worden bepaald
----	--

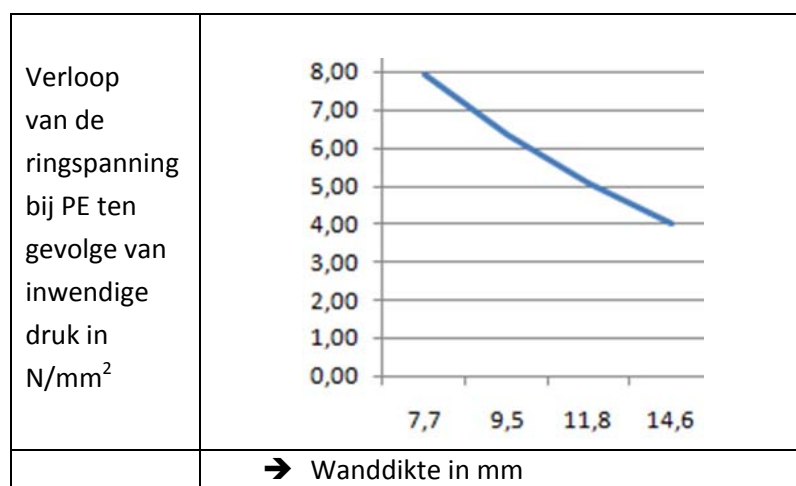
De constante van Poisson voor PE is 0,4.

$$\sigma_{pl} = \nu * \sigma_p = 0,4 * 4,02 = 1,6 \text{ N/mm}^2$$



Overzicht van diameters en wanddikten bij PE-leidingen

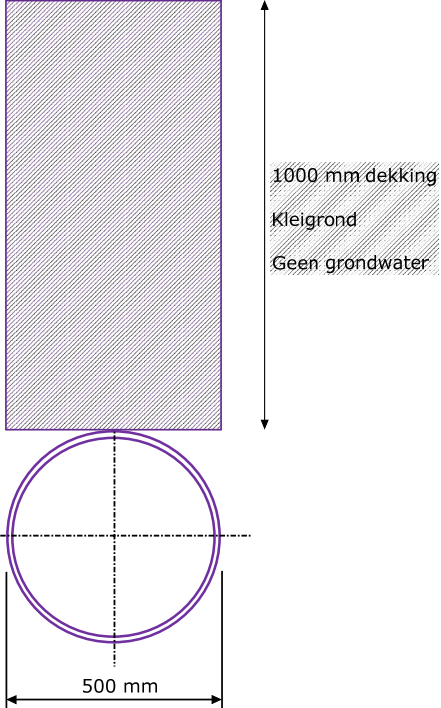
Overzicht diameters en wanddikten bij PE-leidingen									
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]								
	PE 80 SDR 21	PE 80 SDR 17.6	PE 80 SDR 17	PE 80 SDR 13.6	PE 80 SDR 11	PE 100 SDR 17.6	PE 100 SDR 17	PE 100 SDR 13.6	PE 100 SDR 11
25	-	2.3	2	2.4	2.3	-	-	-	2.3
32	-	2.3	2	2.4	3	-	-	2.4	3
40	-	2.3	2.4	3	3.7	-	-	3	3.7
50	-	2.9	3	3.7	4.6	-	-	3.7	4.6
63	-	3.6	3.8	4.7	5.8	3.6	3.8	4.7	5.8
75	3.6	-	4.5	5.6	6.8	4.3	4.5	5.6	6.8
90	4.3	-	5.4	6.7	8.2	5.1	5.4	6.7	8.2
110	5.3	6.3	6.6	8.1	10	6.3	6.6	8.1	10
125	6	-	7.4	9.2	11.4	7.1	7.4	9.2	11.4
140	-	-	8.3	10.3	12.7	-	8.3	10.3	12.7
160	7.7	9.1	9.5	11.8	14.6	9.1	9.5	11.8	14.6
180	-	-	10.7	13.3	16.4	-	10.7	13.3	16.4
200	9.6	11.4	11.9	14.7	18.2	11.4	11.9	14.7	18.2
225	10.8	-	13.4	16.6	20.5	-	13.4	16.6	20.5
250	11.9	14.2	14.8	18.4	22.8	14.2	14.8	18.4	22.8
315	15	17.9	18.7	23.2	28.7	-	18.7	23.2	28.7
355	16.9	-	21.1	26.1	32.3	-	21.1	26.1	32.3
400	19.1	-	23.7	29.4	36.4	-	23.7	29.4	36.4
450	-	-	26.7	33.1	41	-	26.7	33.1	41
500	-	-	29.7	36.8	45.5	-	29.7	36.8	45.5
560	-	-	32.3	41.2	51	-	32.3	41.2	51
630	-	-	37.4	46.3	57.3	-	37.4	46.3	57.3
710	-	-	42.1	52.2	64.5	-	-	52.2	-
800	-	-	47.4	58.8	-	-	-	58.8	-
900	-	-	53.3	66.1	-	-	-	66.1	-
1000	-	-	59.3	-	-	-	-	-	-





3. Spanning ten gevolge van grondbelasting op de leiding

Indien er sprake is van grond op een leiding dan veroorzaakt dit spanningen. De grootte van deze belasting hangt af van de diepteligging van de leiding. Ook speelt de aanlegmethode een rol. Wanneer een leiding met een uitwendige middellijn van 500 mm belast wordt door 1 meter kleigrond dan ziet dit er schematisch als volgt uit:

	Wanneer we het gewicht weten van de grond boven op de buis dan kunnen we de spanning uitrekenen die deze grondkolom veroorzaakt. We berekenen dan de neutrale grondbelasting. In de NEN 3650-serie is een tabel opgenomen met de meest gebruikelijke grondeigenschappen. Bij klei wordt onderscheid gemaakt in slappe klei, matig vaste klei en in vaste klei. Deze tabel is opgenomen in het programma Sigma 2012
--	--

De formule voor het berekenen van e neutrale grondbelasting is als volgt:

$$q_n = \gamma_g * H$$

Hierin is:

q_n = neutrale grondbelasting op de leiding in kN/m^2

γ_g = gewicht van de grond in kN/m^3

H = gronddekking op de buis (van maaiveld tot de kruin van de leiding) in m

Indien we in dit voorbeeld uitgaan van matig slappe klei dan is het droge volumieke gewicht 17 kN/m^3 . Bij een dekking van 1000 mm volgt dan:

$$q_n = 17 \text{ kN/m}^3 * 1 \text{ m} = 17 \text{ kN/m}^2$$

Wanneer we gebruik maken van tabel B1 van de NEN 3650-serie dan berekenen we de neutrale grondbelasting met behulp van een partiële factor van 1,1. Dit is een onzekerheidsfactor.



$$Q_n = \gamma * q_n * D_o$$

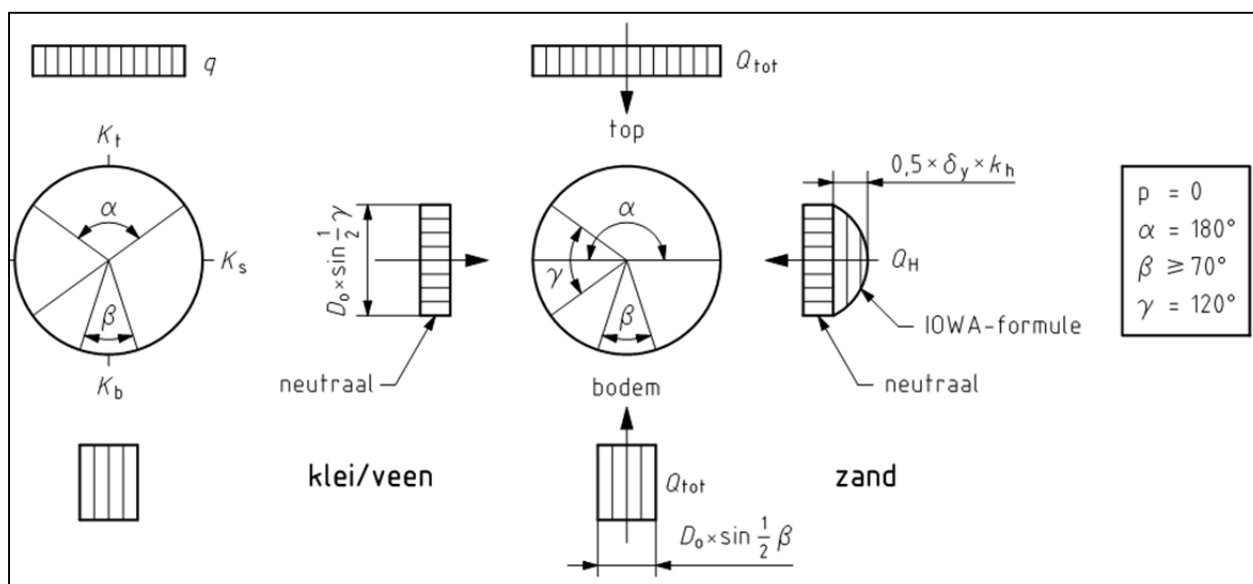
Aangezien q_n al bekend is volgt dan:

$$Q_n = 1.1 * 17 \text{ kN/m}^2 * 0.500 \text{ m} = 9.35 \text{ kN/m}$$

Omdat in Sigma 2012 de spanningen worden uitgerekend in N/mm² is het nodig om Q_n uit te rekenen in N/mm. Omrekenen geeft: $9.35 \text{ kN/m} = 9350 \text{ N/m} = 9.35 \text{ N/mm}$.

Wat is de spanning in de leiding bij een gronddekking van 1 m?

Nu Q_n bekend is kunnen we berekenen welke spanning dit veroorzaakt. In de NEN 3650-serie staat voorgeschreven hoe je deze spanning moet berekenen. Men gaat daarbij uit van belastinghoeken en ondersteuningshoeken. De grootte van de belastinghoeken en ondersteuningshoeken is afhankelijk van de aanlegtechniek. Het maakt namelijk nogal wat uit indien je een leiding ingraaft of boort. In het ene geval is sprake van aanleg in “open sleuf”, in het andere geval van aanleg met gebruik van een persinstallatie.



Belastingsschema direct overgedragen bovenbelasting



Tabel D.1 — Momentcoëfficiënten en deflectiefactoren voor direct overgedragen gronddrukken

α graden	β graden	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y verticaal	α graden	β graden	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y verticaal
0	0	0,318	0,318	-0,182	0,149	90	0	0,306	0,182	-0,168	0,129
	30	0,259	0,317	-0,180	0,146		30	0,246	0,180	-0,166	0,127
	60	0,213	0,312	-0,175	0,138		60	0,201	0,175	-0,161	0,118
	90	0,182	0,305	-0,168	0,129		90	0,169	0,169	-0,154	0,110
	120	0,162	0,299	-0,161	0,122		120	0,150	0,163	-0,147	0,103
	150	0,153	0,295	-0,156	0,117		150	0,140	0,158	-0,142	0,098
	180	0,150	0,294	-0,153	0,116		180	0,137	0,157	-0,140	0,096
30	0	0,317	0,259	-0,180	0,146	120	0	0,299	0,162	-0,161	0,122
	30	0,257	0,257	-0,178	0,143		30	0,240	0,160	-0,159	0,119
	60	0,211	0,252	-0,173	0,135		60	0,194	0,156	-0,154	0,111
	90	0,180	0,246	-0,166	0,127		90	0,163	0,150	-0,147	0,103
	120	0,160	0,240	-0,159	0,119		120	0,143	0,143	-0,143	0,096
	150	0,151	0,236	-0,154	0,115		150	0,139	0,139	-0,135	0,091
	180	0,148	0,235	-0,152	0,113		180	0,138	0,138	-0,133	0,089
60	0	0,312	0,213	-0,175	0,138	150	0	0,295	0,153	-0,156	0,117
	30	0,252	0,211	-0,173	0,135		30	0,236	0,151	-0,154	0,115
	60	0,207	0,207	-0,168	0,122		60	0,190	0,146	-0,149	0,107
	90	0,175	0,201	-0,161	0,118		90	0,158	0,140	-0,142	0,098
	120	0,156	0,194	-0,154	0,111		120	0,139	0,134	-0,135	0,091
	150	0,146	0,190	-0,149	0,107		150	0,129	0,129	-0,129	0,086
	180	0,143	0,189	-0,147	0,105		180	0,126	0,128	-0,128	0,085
						180	0	0,294	0,150	-0,153	0,116
							30	0,235	0,148	-0,152	0,113
							60	0,189	0,143	-0,147	0,105
							70	0,178	0,141	-0,145	0,102
							90	0,157	0,137	-0,140	0,096
							120	0,138	0,131	-0,133	0,089
							150	0,128	0,126	-0,127	0,085
							180	0,125	0,125	-0,126	0,083

Momentcoëfficiënten en deflectiefactoren voor direct overgedragen en gronddrukken (NEN 3650:2003)

In deze tabel zien we 2 kolommen waar we als eerste een keuze uit moeten maken. In de 1^e en 7^e kolom zien we α staan. De hoek α is de belastinghoek op de leiding en varieert van 0° tot 180°. In de 2^e en 8^e kolom zien we β staan. De hoek β is de “ondersteuningshoek” en deze varieert ook van 0° tot 180°.

Vervolgens zijn we kolommen met coëfficiënten. Voor de berekening van spanningen in de buis zijn de kolommen met K_b , K_t en K_s van belang.



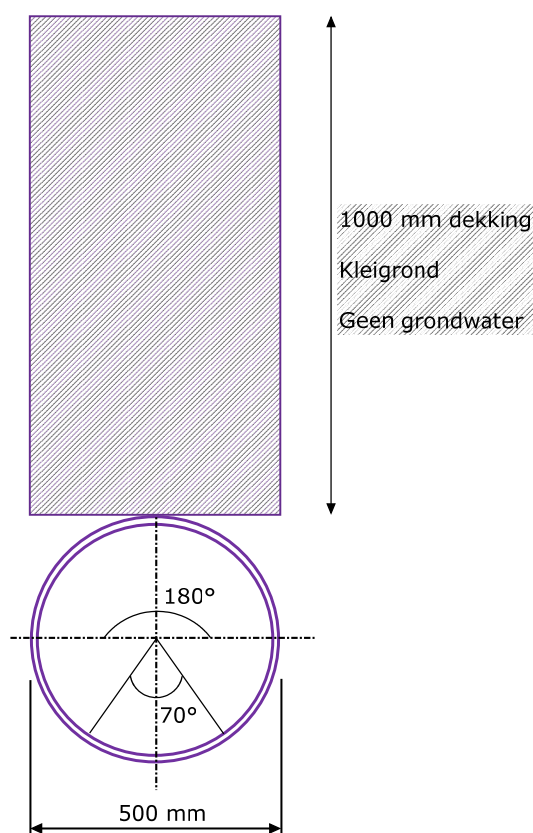
In de NEN 3650-1:2012 staat deze tabel:

α graden	β graden	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y verticaal
180	0	0,294	0,150	- 0,153	0,116
	30	0,235	0,148	- 0,152	0,113
	60	0,189	0,143	- 0,147	0,105
	70	0,178	0,141	- 0,145	0,102
	90	0,157	0,137	- 0,140	0,096
	120	0,138	0,131	- 0,133	0,089
	150	0,128	0,126	- 0,127	0,085
	180	0,125	0,125	- 0,126	0,083

A. De berekening van de spanning in de buis bij de open sleuf methode

Bij de “open sleuf” methode gaan we er in het algemeen van uit dat de belastinghoek 180° is en de ondersteuningshoek 70° bedraagt.

In schema:



We zien hier de leiding met 1 meter dekking.

De leiding heeft een diameter dan 500 mm.

$Q_n = 9.35 \text{ N/mm}$.

De belastinghoek is 180°.

De ondersteuningshoek is 70°.

Volgens tabel D1 van de NEN 3650-serie moeten we rekenen met de volgende momentcoëfficiënten:

$K_b = 0.178$ (momentcoëfficiënt bodem leiding)

$K_t = 0.141$ (momentcoëfficiënt top, dus bovenkant leiding)

$K_s = 0.145$ (momentcoëfficiënt side, dus zijkant leiding).



Het moment op de leiding kunnen we uitrekenen met behulp van de volgende formule:

$$M = k * Q_n * r_g$$

Hierin is:

M = moment in de leiding veroorzaakt door grondbelasting in Nmm

k = momentcoëfficiënt volgens tabel D1 van de NEN 3650-serie

Q_n = berekende neutrale grondbelasting op de leiding in N/mm

r_g = gemiddelde straal van de leiding in mm

Wanneer we uitgaan van een leiding met een wanddikte van 10 mm bedraagt de gemiddelde straal r_g 245 mm.

De momenten op de leiding zijn als volgt:

a. Ter plaatse van de bovenkant van de leiding:

$$M = 0.141 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 323 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (inbuigend moment)}$$

b. Ter plaatse van de zijkanten van de leiding:

$$M = 0.145 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 332,16 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (uitbuigend moment)}$$

c. Ter plaatse van de onderkant van de leiding:

$$M = 0.178 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 407.7 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (inbuigend moment)}$$

We zien dus dat ter plaatse van de onderkant van de leiding het moment het grootst is.

De berekening van de optredende spanningen.

Nu de momenten bekend zijn kunnen we de optredende spanningen in de leiding berekenen. De spanning in de leiding berekenen we met de volgende formule:

$$\sigma_q = \frac{M}{W_w}$$



Hierin is:

σ_q = de spanning in tangentiële richting veroorzaakt door de bovenbelasting Q_n in N/mm^2

M = het moment in Nmm/mm^1 wat bepaald is met behulp van de momentcoëfficiënten k_t , k_s en k_b

W_w = het wandweerstandsmoment van de leiding in mm^3/mm^1

Het wandweerstandsmoment is gelijk aan:

$$W_w = \frac{1}{6} * d_n^2$$

Uitgaande van een wanddikte van 10 mm volgt een wandweerstandsmoment van:

$$W_w = \frac{1}{6} * d_n^2 = \frac{1}{6} * 10^2 = 16.67 \text{ mm}^3/mm$$

Nu het wandweerstandsmoment van de leiding bekend is kunnen we de spanningen uitrekenen.

a. Spanning ter plaatse van de bovenkant van de leiding:

$$\sigma_q \text{ t.p.v. bovenkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{323}{16.67} = 19.38 \text{ N/mm}^2$$

b. Spanning ter plaatse van de zijkant van de leiding:

$$\sigma_q \text{ t.p.v. zijkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{332,16}{16.67} = 19.92 \text{ N/mm}^2$$

Spanning ter plaatse van de onderkant van de leiding:

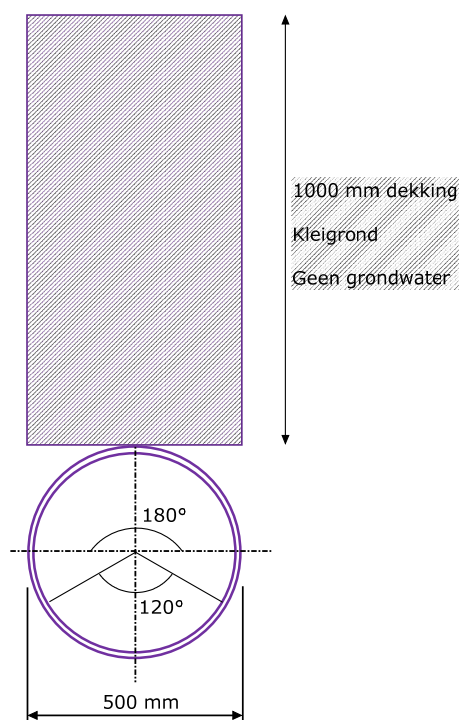
$$\sigma_q \text{ t.p.v. onderkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{407,7}{16.67} = 24,46 \text{ N/mm}^2$$



B. De berekening van de spanning in de buis bij een persing

Indien sprake is van het persen of boren van de leiding dan mag uitgegaan worden van een belastinghoek van 180° en een ondersteuningshoek van 120°. Dit mag omdat de grond niet of nauwelijks geroerd wordt, dit in tegenstelling tot de open sleuf methode.

In schema:



We zien hier de leiding met 1 meter dekking.

De leiding heeft een diameter dan 500 mm.

$Q_n = 9.35 \text{ N/mm}$.

De belastinghoek is ook hier gelijk aan 180°.

De ondersteuningshoek is vergroot van 70° naar 120°

Volgens tabel D1 van de NEN 3650-serie moeten we nu rekenen met de volgende momentcoëfficiënten:

$K_b = 0.138$ (momentcoëfficiënt bodem leiding)

$K_t = 0.131$ (momentcoëfficiënt top, dus bovenkant leiding)

$K_s = 0.133$ (momentcoëfficiënt side, dus zijkant leiding.

De momenten op de leiding zijn als volgt:

a. Ter plaatse van de bovenkant van de leiding:

$$M = 0.131 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 300.8 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (inbuigend moment)}$$

b. Ter plaatse van de zijkanten van de leiding:

$$M = 0.133 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 304.67 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (uitbuigend moment)}$$

c. Ter plaatse van de onderkant van de leiding:

$$M = 0.138 * 9.35 \text{ N/mm} * 245 \text{ mm} = 316.24 \text{ Nmm/mm}^1 \text{ (inbuigend moment)}$$

We zien hier dus ook dat ter plaatse van de onderkant van de leiding het moment het grootst is.



De berekening van de optredende spanningen.

Nu de momenten bekend zijn kunnen we de optredende spanningen in de geperste/geboorde leiding berekenen.

a. Spanning ter plaatse van de bovenkant van de leiding:

$$\sigma_q \text{ t.p.v. bovenkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{300.8}{16.67} = 18.04 \text{ N/mm}^2 \text{ i.p.v. } 19.38 \text{ N/mm}^2$$

b. Spanning ter plaatse van de zijkant van de leiding:

$$\sigma_q \text{ t.p.v. zijkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{304.67}{16.67} = 18.28 \text{ N/mm}^2 \text{ i.p.v. } 19.92 \text{ N/mm}^2$$

c. Spanning ter plaatse van de onderkant van de leiding:

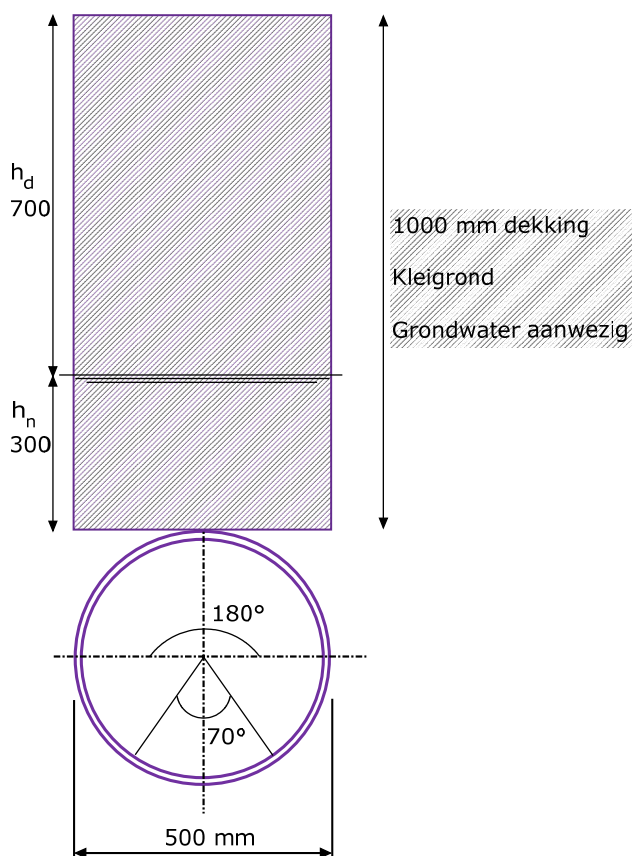
$$\sigma_q \text{ t.p.v. onderkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{316.24}{16.67} = 18.97 \text{ N/mm}^2 \text{ i.p.v. } 24,46 \text{ N/mm}^2$$



Berekening van de grondbelasting op de leiding wanneer grondwater aanwezig is.

Bij de voorbeelden op de vorige bladzijden zijn we uitgegaan van de situatie zonder grondwater. Indien er boven de leiding wel grondwater aanwezig is moeten we hier rekening mee houden.

Voorbeeld:



Bij de invoer van de grondgegevens zijn meer gegevens nodig. Immers in de NEN 3650-serie wordt onderscheid gemaakt tussen het droge volumieke gewicht en het natte volumieke gewicht.

Bij het berekenen van de grondbelasting moet rekening gehouden worden met opwaartse kracht. Dit betekent dat het natte volumieke gewicht wat in rekening moet worden gebracht vermindert moet worden met de opwaartse kracht.

De grondwaterstand die ingevoerd moet worden is de normaal heersende grondwaterstand. Dus niet de grondwaterstand tijdens extreme wateroverlast of droogte.

Zoals uit tabel B1 van de NEN 3650-serie blijkt varieert het natte volumieke gewicht van 10 kN/m³ (bij Veen) tot 21 kN/m³ (vastgepakt zand). De verschillen zijn dus groot.

Tabel B.1 — Grondeigenschappen (orden van grootte)

Grondeigenschap			Zand ^a			Klei			Veen
Omschrijving		Eenheid	Vast	Matig vast	Los	Vast	Matig vast	Slap	Slap
Indicatieve conuswaarde ^b	q_c ^c	MPa	25	15	5	2	1	0,5	0,1
Elasticiteitsmodulus ('Young's modulus')	E_{100} ^c	MPa	75/110	45	15	10	2	1	0,2/0,5
Elasticiteitsmodulus sleufmateriaal	E_1 ^d	MPa	20	10	5	2	1	0,5	0,2
Volumiek gewicht, droog	γ_d	kN/m ³	19/20	18	17	19/20	17	14	10/12
Volumiek gewicht, nat	γ_{nat}	kN/m ³	21/22	20	19	19/20	17	14	10/12
Effectieve hoek van inwendige wrijving	ϕ' ^c	°	35/40	32,5	30	17,5/25	17,5	17,5	15
Effectieve cohesie	c' ^c	kN/m ²	—	—	—	13/15	5	0	1,0/2,5



In Sigma 2012 3.0 is tabel B.1 beschikbaar. Na selectie hiervan ziet de gebruiker deze tabel:

Overzicht grondparameters volgens NEN 3650												
			Zand				Klei			Veen		
			Vast	Matig	Los	Vast	Matig	Slap	Slap			
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	[kN/m³]	20	19	18	17	20	19	17	14	12	10
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	[kN/m³]	22	21	20	19	20	19	17	14	12	10
Inwendige wrijvingshoek grond	φ	[°]	40	35	32.5	30	25	17.5	17.5	17.5	15	15
Effectieve cohesie	c'	[kN/m²]	0	0	0	0	15	13	5	0	2.5	1
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	[kN/m²]	0	0	0	0	200	100	50	25	20	10
E-modulus sleufmateriaal	E_1	[MN/m²]	20	20	10	5	2	2	1	0.5	0.2	0.2
E-modulus ondergrond	E_{100}	[MN/m²]	110	75	45	15	10	10	2	1	0.5	0.2
Samendrukkingsconstante	C'_p	[-]	1500	1000	600	200	30	25	15	7	7.5	5
Relatieve verplaatsing	δ_d	[mm]	1-3	1-3	3-5	5-8	2-4	2-4	4-6	6-10	6-10	10-15

In de voorgaande berekeningen hebben wij gezien dat ter plaatse van de onderkant van de leiding de spanning het grootst is aangezien daar de momentcoëfficiënt k_b het hoogst is.

Bij het berekenen van de spanning in de leiding ten gevolge van grondbelasting in combinatie met grondwaterstand gaan we daarom met k_b verder.

De formule voor het berekenen van de neutrale grondbelasting is als volgt indien er geen grondwaterstand aanwezig is:

$$q_n = \gamma_g * H$$

Wanneer dit wel het geval is wordt deze formule aangepast:

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

Hierin is:

q_n = neutrale grondbelasting op de leiding in kN/m²

γ_d = gewicht van de droge grond in kN/m³

H_d = hoogte "droge grond" op de buis (van maaiveld tot grondwaterstand) in m

γ_n = gewicht van de natte grond in kN/m³

H_n = hoogte "natte grond" op de buis (van grondwaterstand tot kruin van de leiding) in m

γ_w = gewicht van het grondwater in kN/m³

H_w = hoogte kolom grondwater (= gelijk aan grondwaterstand tot kruin van de leiding) in m



Indien we in dit voorbeeld uitgaan van matig slappe klei dan is het droge volumieke gewicht 17 kN/m^3 . Het natte volumieke gewicht bijvoorbeeld 18 kN/m^3 . Bij een dekking van 1000 mm volgt dan:

$$q_n = 17 \text{ kN/m}^3 * 0.70 + 18 \text{ kN/m}^3 * 0.3 - 10 \text{ kN/m}^3 * 0.3 = 14.3 \text{ kN/m}^2$$

De neutrale grondbelasting =

$$Q_n = \gamma * q_n * D_o = 1.1 * 14.3 * 0.500 = 7.87 \text{ kN/m}$$

Nu deze neutrale grondbelasting bekend is kunnen we op de zelfde wijze het moment in de buis uitrekenen en vervolgens de spanning bepalen.

Het moment is:

$$M = k * Q_n * r_g = 0.178 * 7.87 * 245 = 343.21 \text{ Nmm/mm}^1$$

En de spanning in de leiding is:

$$\sigma_q \text{ t.p.v. onderkant leiding} = \frac{M}{W_w} = \frac{343,21}{16.67} = 20,59 \text{ N/mm}^2$$

De provincie Zuid-Holland heeft mede naar aanleiding van deze grote afwijking een berekeningsmethode ontwikkelt waarmee de gereduceerde grondbelasting kan worden vastgesteld. Hierbij is men uitgegaan van gewelfwerking (boogwerking) in de grond.

Het resultaat hiervan zijn twee verschillende manieren van aanpak, afhankelijk of er sprake is van gelaagdheid van de grond (uitgedrukt in zowel holocene als pleistoceen grondpakket).

Wanneer een leiding heel diep in het pleistocene zand wordt geboord gaat men er van uit dat de gronddruk in het holocene pakket niet meegenomen hoeft te worden.

In Sigma 2012 3.0 is deze berekeningsmethode opgenomen.



Berekeningswijze verticale grondbelasting indien sprake is van een homogeen grondmassief

Indien de dikte van het beschouwde grondmassief boven de leiding groter is dan viermaal de breedte van de afschuivende grondkolom boven de leiding dan geldt:

$$Q_{nr} = \frac{B_1 * (\gamma' - c / B_1)}{K * \tan \varphi} * (1 - e^{-K * h * \tan \varphi / B_1}) * D_0$$

Hierin is:

Q_{nr} = de gereduceerde neutrale grondbelasting op de leiding in N/mm

B_1 = de halve diameter van de afschuivende grondkolom in mm

B_1 = $0,5 * D_o + D_o * \tan(45 - 0,5\phi) \geq R$

γ' = het effectieve volumiek gewicht van de grond in N/mm²

c = de cohesie in N/mm²

ϕ = de hoek van inwendige wrijving in graden

K = de coëfficiënt voor horizontale neutrale gronddruk $K = 1 - \sin\phi$

h = de gronddekking op de boorgang in mm

c = de cohesie in N/mm²

ϕ = de hoek van inwendige wrijving in graden

D_o = de uitwendige middellijn, vermeerderd met de dikte van de uitwendige bekleding in mm

R = de straal van de boorgang in mm

In zand geeft bovenstaande formule de in rekening te brengen verticale grondbelasting op de leiding.



In samendrukbare gronden als klei en veen geldt de gevonden belasting alleen voor de situatie direct na het aanbrengen van de leiding. De in eerste instantie ontwikkelde schuifspanningen (positieve kleeft) die de verticale belasting op de leiding reduceren, nemen af ten gevolge van consolidatie van de naastliggende grondkolommen door dezelfde schuifspanningen (negatieve kleeft).

Bij klei en veen hebben we met de volgende formule te maken:

$$Q_{nr} = (h * \gamma' - F_r / 2 * B_1) * D_0$$

Hierin is:

Q_{nr} = de gereduceerde neutrale grondbelasting op de leiding in N/mm

h = de gronddekking op de boorgang in mm

B_1 = de halve diameter van de afschuivende grondkolom in mm

B_1 = $0,5 * D_0 + D_0 * \tan(45 - 0,5\phi) \geq R$

γ' = het effectieve volumiek gewicht van de grond in N/mm²

F_r = de blijvende wrijving (kleeft) ten gevolge van de gewelfwerking in N/mm

$$F_r = \frac{0,9 * F_{\max}}{1 + B_1 * (3 * H - 2 * h) * \alpha / 2 * C * H (\delta_d + F_{\max} / 2 * B_1 * k_v)}$$

$F_{\max}$ = de kleeft die maximaal ontwikkeld kan worden in N/mm

$$= (h * \gamma' - Q_{nr} / D_0) * 2 * B_1$$

H = de dikte van het samendrukbare grondmassief in mm

α = een dimensieloze factor $\alpha = \ln(h/h_{\text{ref}})$ met $h_{\text{ref}} = 1(\text{m})$

C = de samendrukkingconstante

δ_d = de relatieve verplaatsing tussen de grondkolommen bij volledig ontwikkelde kleeft in mm

k_v = beddingsconstante van het betoniet/grondmengsel na opstijving in N/mm³

D_0 = de uitwendige middellijn, vermeerderd met de dikte van de uitwendige bekleding in mm



Berekeningswijze verticale grondbelasting indien sprake is van gelaagd grondmassief

Evenals in een homogeen grondmassief wordt de verticale grondbelasting op de leiding in een gelaagd massief gereduceerd door gewelfwerking. De bepaling van de reductie is echter aanzienlijk complexer door de variatie van het grondgedrag over de hoogte van het grondmassief. Met name in West-Nederland komt een grondprofiel voor dat geschematiseerd kan worden tot een tweelagensysteem. De bovenlaag bestaat uit een samendrukbaar pakket veen/klei (holocene afzettingen met een dikte van 10 m tot 20 m), de onderlaag uit zand (pleistocene afzetting tot grote diepte). Indien er uitgegaan kan worden van het volgende:

- de lagen bezitten voldoende homogene mechanische eigenschappen
- de gewelfwerking in het holocene is te verwaarlozen ten opzichte van die in het pleistoceen
- de leiding ligt dieper dan $8 * B_1$ in het zand
- in het zand is geen cohesie aanwezig ($c=0$)

kan gereduceerde verticale grondbelasting op de leiding worden berekend volgens:

$$Q_{nr} = \frac{B_1 * \gamma'}{K * \tan \varphi} * (1 - e^{-K * h * \tan \varphi / B_1}) * D_0 + \sigma_c + D_0 * e^{-K * h * \tan \varphi / B_1}$$

Hierin is:

Q_{nr} = de gereduceerde neutrale grondbelasting op de leiding in N/mm

B_1 = de halve diameter van de afschuivende grondkolom in mm

B_1 = $0,5 * D_o + D_o * \tan(45 - 0,5\phi) \geq R$

γ' = het effectieve volumiek gewicht van het zand in N/mm²

K = de coëfficiënt voor horizontale neutrale gronddruk $K = 1 - \sin \phi$

h = de gronddekking op de boorgang in mm

ϕ = de hoek van inwendige wrijving in graden

D_o = de uitwendige middellijn, vermeerderd met de dikte van de uitwendige bekleding in mm

σ_c = de verticale korrelspanning in het contactvlak van beide lagen in N/mm²

σ_c = $\gamma'_h * h_h$



γ'_h = het gemiddelde effectieve volumiek gewicht van de holocene laag in N/mm^3

h_h = de dikte van de holocene laag in mm

R = de straal van de boorgang in mm

Opmerking: Bovenstaande formule is in feite gelijklopend aan die voor een homogeen pakket (optie b) met toevoeging van een bovenbelasting die afneemt naarmate de diepte in het zand toeneemt. Voor de ligging van de leiding onder het grensvlak holoceneen/pleistoceen, maar hoger dan $8 * B_1$ in het zand, is de rekenwijze zoals in bovenstaande formule niet geldig.

Als praktische benadering voor de bepaling van Q_{nr} in dit overgangsgebied kan worden aangehouden:

1)	$0 < h < 2 * B_1$	Q_{nr} is constant en is gelijk aan aan Q_{nr} grensvlak
2)	$2 * B_1 \leq h \leq 4 * B_1$	Interpolatie tussen Q_{nr} grensvlak en Q_{nr} pleistoceen voor $h=4*B_1$
3)	$h \geq 4 * B_1$	Q_{nr} pleistoceen als functie van h

Blijkt dat Q_{nr} pleistoceen ($h = 4 * B_1$) groter is dan Q_{nr} grensvlak dan vervalt 1) en geldt 2) voor $0 < h < 4 * B_1$.

De maatgevende verticale grondbelasting zal in het algemeen gevonden worden op het grensvlak holoceneen/pleistoceen en niet op het diepste punt van de leiding.

In Sigma 2012 3.0 is het berekenen van gereduceerde grondbelasting aan het programma toegevoegd.



Grondonderzoek in verband met sterkteberekeningen

Wanneer een sterkteberekening gemaakt moet worden is de eerste vraag die gesteld moet worden de volgende: is er grondonderzoek gedaan en is de grondwaterstand bekend? Goed inzicht van de lokale omstandigheden is essentieel voor het maken van betrouwbare sterkteberekeningen.

Dat wil niet zeggen dat altijd zeer uitgebreid grondonderzoek nodig is. De hoeveelheid grondonderzoek hangt af van de complexiteit van het leidingwerk. Hoe complexer de constructie hoe meer onderzoek nodig is.

Een horizontaal gestuurde boring van een $\varnothing$ 90 mm PE leiding met een lengte van 40 m is heel wat anders dan een boring van een $\varnothing$ 1200 mm stalen leiding met een lengte van 950 m. In de NEN 3650-serie wordt aandacht besteed aan grondonderzoek. In NEN 3650-1:2013 wordt ingegaan op de omvang van het grondonderzoek bij leidingkruisingen en hetgeen minimaal vereist is. Indien sprake is van een leiding die in open sleuf gelegd wordt is het volgende vermeld:

Het uitvoeren van grondonderzoek heeft tot doel het verloop, de samenstelling en de van belang zijnde eigenschappen vast te stellen van de grondlagen die voorkomen in het ontwerptracté. De keuze van het soort onderzoek en de omvang ervan hangen van veel factoren af. De bekendheid met de grondgesteldheid ter plaatse speelt daarbij een grote rol. Daarnaast heeft ook de wijze waarop de leiding wordt aangelegd een grote invloed hierop. De meest optimale aanpak van het grondonderzoek is om eerst een voorstudie uit te voeren om vervolgens op basis van deze voorstudie het definitieve onderzoek vast te stellen.

Voorstudie:

Bestaande geotechnische informatie onderzoeken aan de hand van:

- geologische kaarten;
- resultaten van reeds eerder verricht grondonderzoek (archieven van geotechnische adviesbureaus);
- grondwaterstanden en stijghoogten van grondwater in watervoerende lagen (TNO-NITG, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen).

Een globaal beeld van de ondergrond vaststellen en op basis van de resultaten van de voorstudie het definitieve grondonderzoek vaststellen.



Definitief grondonderzoek

Het grondonderzoek omvat:

- terreinonderzoek;
- laboratoriumonderzoek.

In Nederland wordt het sonderen veel toegepast. Afhankelijk van de met het sonderen aangetroffen grondgesteldheid worden naast het sondeeronderzoek grondboringen uitgevoerd. Daarnaast kan met bijv. peilbuizen de stijghoogte van het grondwater worden vastgesteld.

De uitkomende grond van de mechanische en/of handboringen moet worden geclassificeerd volgens NEN 5104 en worden beschreven in een boorstaat. De sonderingen moeten minimaal worden uitgevoerd conform klasse 2 van NEN 5140. De klasse van de sondering moet op de sondeerstaat worden aangegeven. Sondeer- en boorstaten moeten ten opzichte van NAP worden aangegeven. Ook de hoogte van het maaiveld moet duidelijk worden aangegeven.

De bij de grondboringen gestoken grondmonsters worden in een laboratorium nader onderzocht. Door proeven op deze grondmonsters kunnen diverse eigenschappen van de desbetreffende grondlaag worden vastgesteld.

Met het onderzoek door sonderingen en boringen zijn op een beperkt aantal (tracé)punten gegevens van de grond bekend. Indien meer kennis nodig is over het verloop van de grondlagen tussen de onderzoekspunten, kan gebruik worden gemaakt van geofysische grondonderzoeksmethoden (bijv. geoelektrisch of elektromagnetisch onderzoek of onderzoek met grondradar). Met deze methoden kan in combinatie met sonderingen en boringen een continu beeld van de ondergrond worden verkregen.

Grondonderzoek HDD

Het onderzoek bestaat uit sonderingen en boringen met monsternamen.

Bij HDD-boorprojecten is het noodzakelijk dat de onderzoekslocaties zich buiten het boortracé bevinden om gedurende het boorproces kortsluiting van boorvloeistof met de sondeer- en boorgaten te voorkomen. Minimaal moet een afstand van 5 m tot het boortracé in acht worden genomen.

Alle sondeer- en boorgaten moeten altijd met een zwelklei (of gelijkwaardig) worden afgedicht.

De onderlinge afstand van de onderzoekslocaties behoort per project te worden vastgesteld. In ieder geval moet aan weerszijden van het te kruisen object een sondering worden uitgevoerd. Ook ter plaatse van het in- en uittredepunt verdient het aanbeveling een sondering uit te voeren.

Voor HDD's van grotere lengte en middellijn moet het grondonderzoek over de volle lengte van de boring informatie verschaffen over de diepteligging van het pleistoceen, bij voorkeur gepresenteerd in de vorm van een geologisch lengteprofiel.



Inhomogeniteiten in de grondopbouw over het te boren tracé kunnen de uitvoeringsrisico's vergroten. Als de sondeerresultaten aan weerszijden van het te kruisen object sterk verschillen, moet in overleg met de beheerder van het object aanvullend onderzoek op tussengelegen locaties worden uitgevoerd.

Voor kleine middellijn leidingen en korte boringen kan in overleg met de beheerder van het object het grondonderzoek worden beperkt.

Bij een aantal geotechnische adviesbureaus hebben wij opgevraagd welk grondonderzoek nodig is bij diverse kruisingen.

50 m kruising

- 2 sonderingen met kleef- en waterspanningsmeting tot een diepte van maximaal 30 m

Kruising van 100 m tot 250 m

- 4 sonderingen met kleef- en waterspanningsmeting tot een diepte van maximaal 30 m
- 1 mechanische boring tot een diepte van 15 m
- Plaatsing van een peilbuis
- Steken van 5 ongeroerde monsters
- 2 handboringen tot een diepte van 3 m

500 m kruising

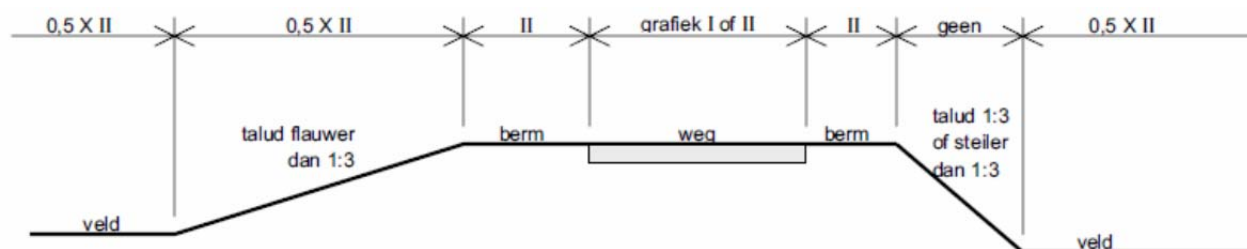
- 7 sonderingen met kleef- en waterspanningsmeting tot een diepte van maximaal 30 m
- 2 mechanische boringen tot een diepte van 15 m
- Plaatsing van een peilbuis
- Steken van 5 ongeroerde monsters
- 2 handboringen tot een diepte van 3 m

Het doel van het grondonderzoek is tweërlei. Ten eerste moeten grondparameters bepaald worden voor het maken van sterkteberekeningen en boorspoeldrukberekeningen. Daarnaast is het grondonderzoek bedoeld voor het slagen van de boring en dient de boormeester over deze gegevens te beschikken.



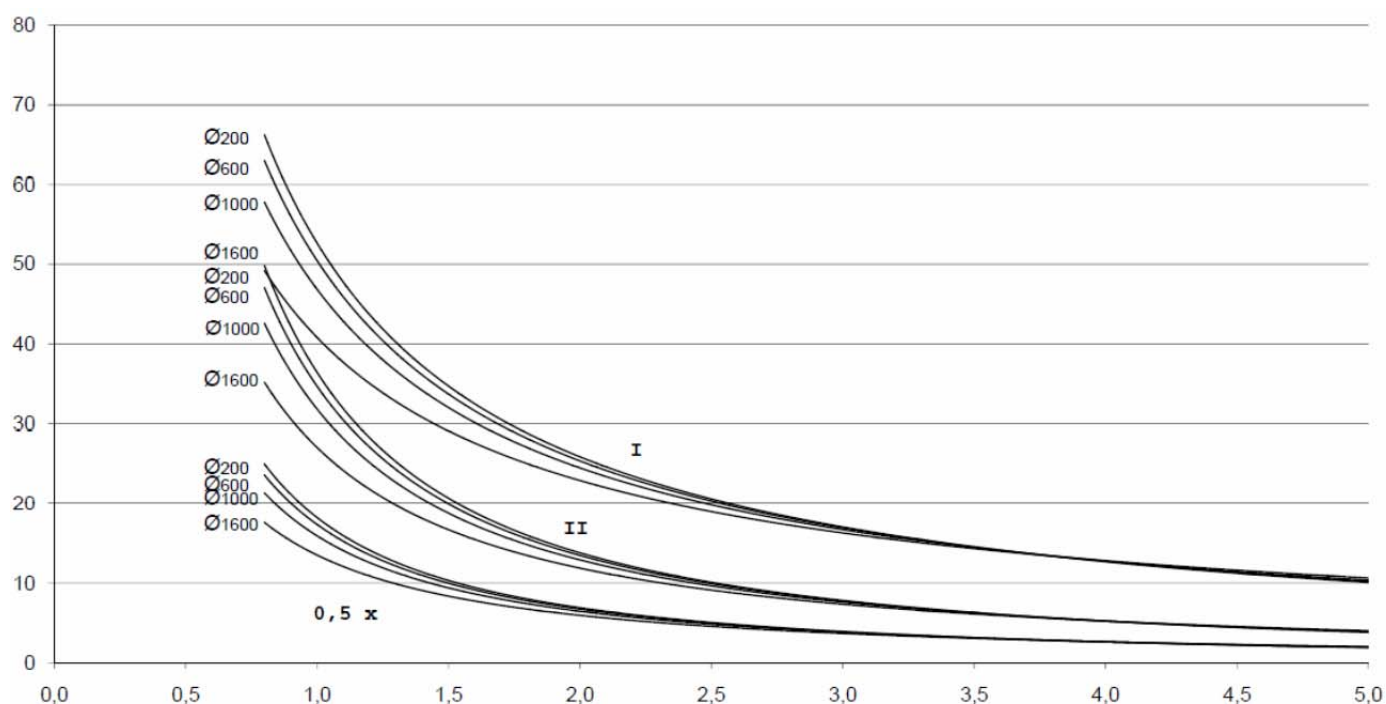
Spanning ten gevolge van verkeersbelasting op de leiding

Naast de grondbelasting op de leiding is het ook van belang om vast te stellen of de leiding belast gaat worden door verkeer. In NEN 3650-1:2003 is het volgende dwarsprofiel van een weglichaam opgenomen:



Figuur C.16 — Overzicht verdeling aslaststelsels

Naarmate de leiding dieper ligt wordt deze minder belast door verkeer. Dit is duidelijk te zien aan onderstaande grafiek:



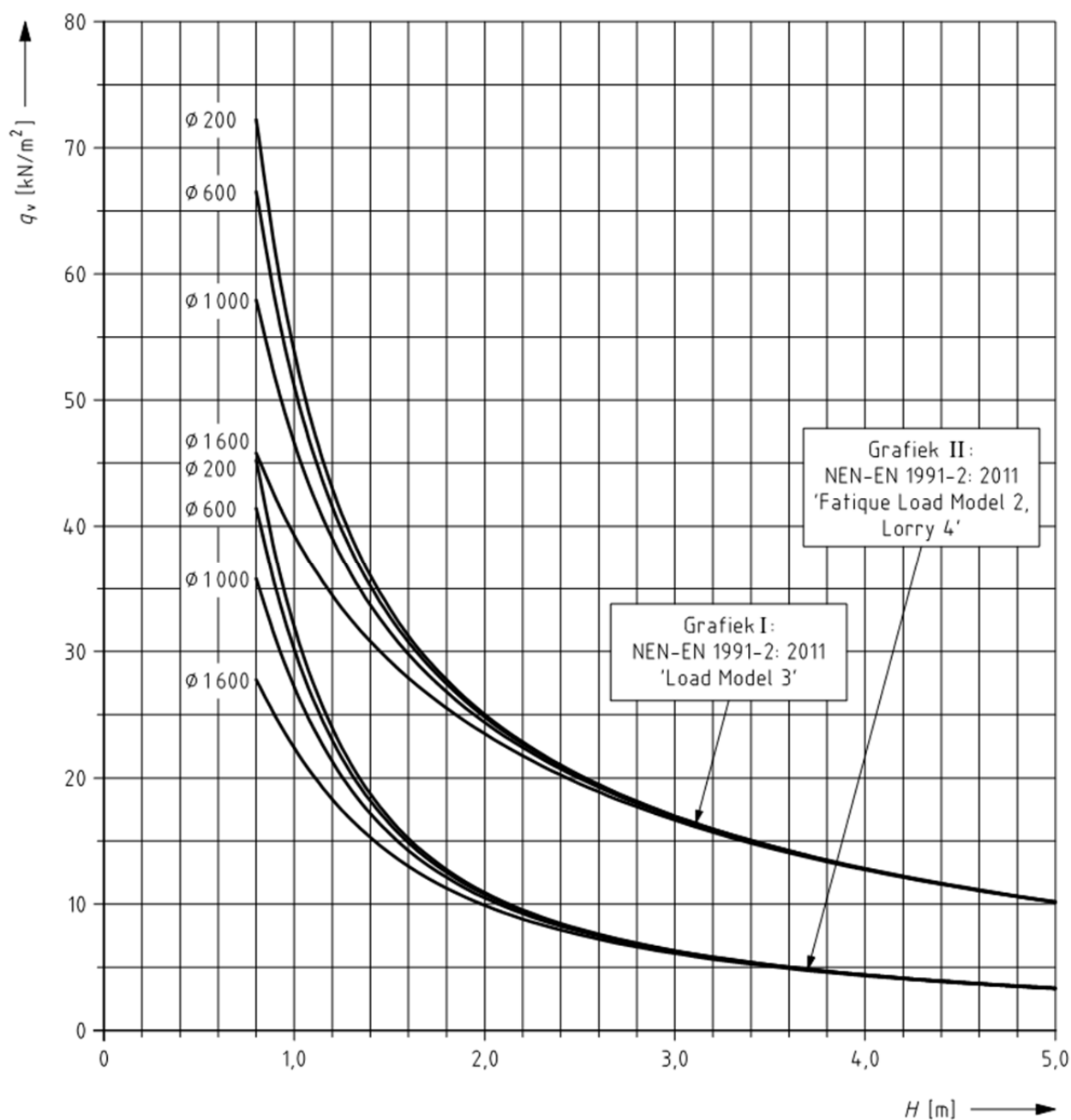
Op de X-as staat de dekking in m.

Op de Y-as staat de verkeersbelasting in kN/m^2 .

Zodra de leiding dieper ligt dan zo'n 2 m vlak de verkeersbelasting uit. De bijdrage van grondbelasting is dan veel groter.



In de NEN 3650-1:2012 staat de volgende grafiek:



De verkeersbelasting wordt uitgerekend aan de hand van 2 verschillende aslastmodellen uit ENV 1991-3:1995:

I = 'Load model3 (special vehicles, Annex A)' en

II = 'Fatigue load model 2 (lorry 4)'



Bij wegekruisingen moet worden gerekend met een aslaststelsel, dat ook bij het ontwerp van de kunstwerken, zoals bruggen en viaducten, in de desbetreffende weg is aangehouden.

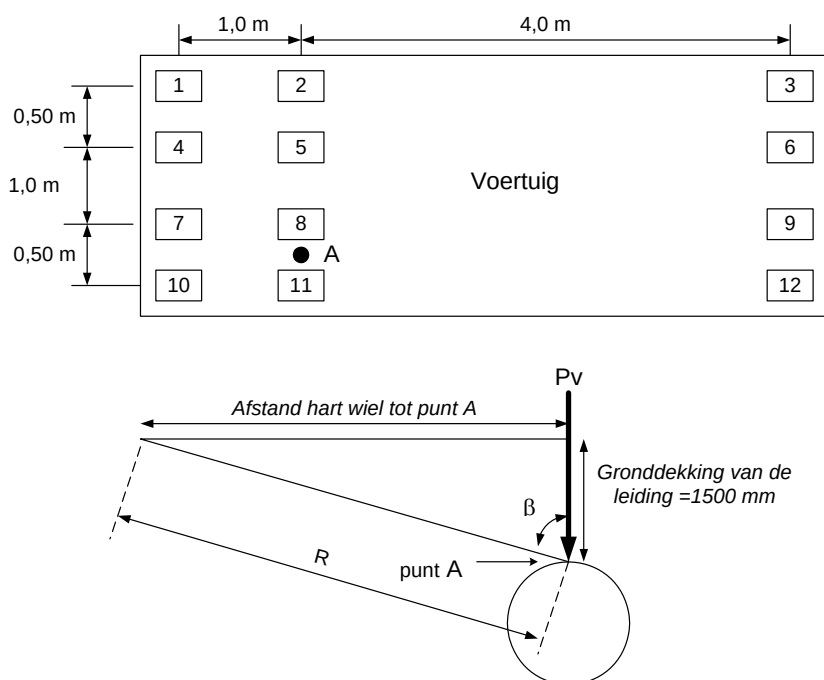
Voor stroomwegen en regionale wegen, in beheer bij de provincie, wordt uitgegaan van belastingsmodel 3 ('Load Model 3') conform NEN-EN 1991-2 (dit betreft speciale transporten). Voor overige wegen wordt uitgegaan van 'Fatigue Load Model 2, Lorry 4', conform NEN-EN 1991-2 (dit laststelsel dekt de 'set of frequent lorries' zoals die volgens NEN-EN 1991-2 op de Europese wegen kunnen voorkomen, met uitzondering van de speciale transporten). In de laststelsels van de 'Fatigue Load Models' volgens NVN-ENV 1991-3 zijn dynamische effecten inbegrepen. De gehanteerde factor hoort bij wegdek met een goede kwaliteit ('pavements of good quality'). Voor ondergrondse buisleidingen behoeven geen stootcoëfficiënten in rekening te worden gebracht. De lasten zijn gereduceerd met 1,2 conform bijlage B van NVN-ENV 1991-3, zijnde de factor voor oppervlak met een goede ruwheid ('surface of good roughness'). In het laststelsel voor speciale transporten is geen dynamische factor verwerkt.

De spreiding van de wiellasten in de ondergrond kan volgens Boussinesq of Braunstorfinger worden berekend. Voor stroomwegen en gebiedontsluitingswegen in beheer bij de provincie geldt derhalve grafiek I. Voor lager geordende wegen geldt grafiek II. In de wegberm wordt eveneens grafiek II aangehouden. Buiten wegen op vlak terrein of flauwe taluds wordt in het algemeen gerekend met een aslaststelsel conform 'Fatigue Load Model 2, Lorry 4' (grafiek II), waarbij de aslasten zijn gehalveerd.

De modellen worden berekend volgens de methoden van Boussinesq en Braunstorfinger. De invloed van het wiel direct boven op de buis wordt berekend volgens de methode Braunstorfinger. De invloed van de andere wielen wordt bepaalt met behulp van formules van Boussinesq.



Voor de berekening van de verkeersbelasting volgens Boussinesq is onderstaand prinsipeschema van toepassing:



$$R = \sqrt{x^2 + y^2} = R = \sqrt{r^2 + H^2}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{R}{H} \right)$$

$$P_v = F * \left\{ \frac{1}{2 * \pi * R^2} * 3 * \cos^3(\beta) \right\}$$

R = straal/afstand wiel tot middellijn buis in m

x, y = coördinaten van de wielen t.o.v. 0-punt A in m

β = hoek wiel en punt t.o.v. buis in °

H = gronddekking in m

r = straal/afstand hart wiel tot punt A in m

P_v = gronddruk t.g.v. aslastmodel in kN/m²

F = wiellast in kN



De bepaling van de verkeersbelasting volgens Braunstorfinger volgt uit de volgende formules:

$$C = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\pi} * \left[\sin^{-1} \left\{ 2 * H \sqrt{\frac{4 * H^2 + L^2 + D^2}{(4 * H^2 + L^2)(4 * H^2 + D^2)}} \right\} - \frac{2 * H * L * D}{\sqrt{4 * H^2 + L^2 + D^2}} * \left(\frac{1}{4 * H^2 + L^2} + \frac{1}{4 * H^2 + D^2} \right) \right]$$

C = lastaandeel, t.b.v. Braunstorfinger berekening [-]

H = gronddekking in m

L = invloedslengte (=1 m) in m

D = uitwendige middellijn (D_o) in m

P_v = gronddruk t.g.v. aslastmodel in kN/m²

F = wiellast in kN

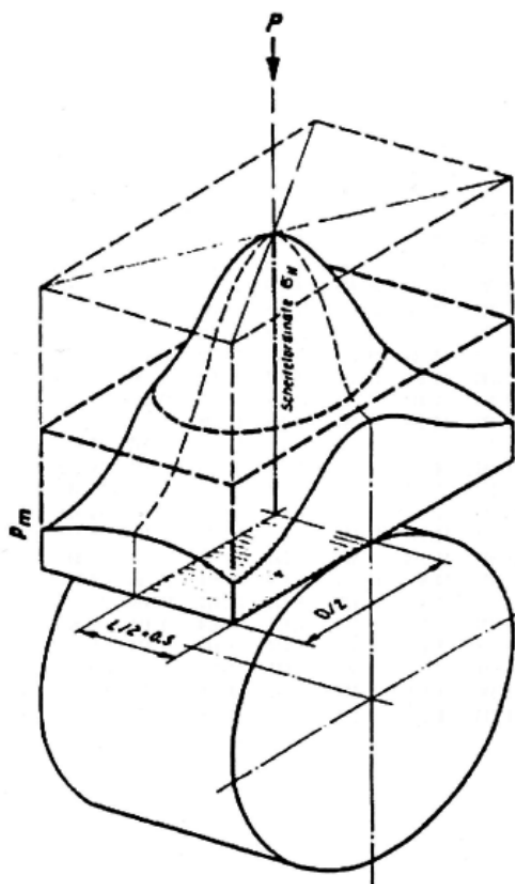
C = lastaandeel, t.b.v. Braunstorfinger berekening [-]

D = uitwendige middellijn (D_o) in m

Voor invloedslengte L wordt 1 meter aangehouden.

$$P_v = F * \frac{4 * C}{L * D}$$

De methode Braunstorfinger gaat uit van verdeling van de belasting over de schedel van de buis per m¹.



Belasting buis volgens Braunschweig

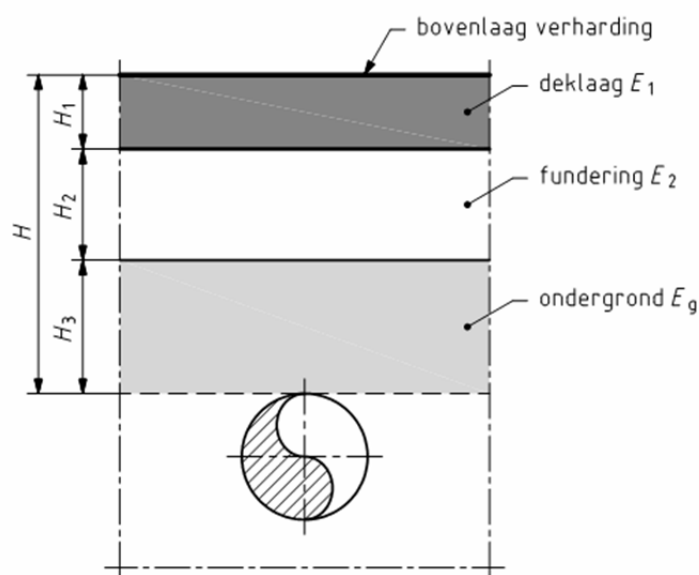
De invloed van het wegdek en de opbouw van de fundering mag meegenomen worden in de berekeningen. In de Pijpleidingcode is dit destijds geïntroduceerd naar aanleiding van een publicatie van Braunschweig.

De gevallen waarbij dit is toegelaten betreffen:

- wegconstructies opgebouwd uit een meerslagensysteem, dat wil zeggen dat op de ondergrond een of meer funderingslagen zijn of worden aangebracht, afgedekt met een toplaag en
- wegconstructies waarbij op de ondergrond een bitumineuze of betonverharding wordt of is aangebracht.



Het volgende schema is van toepassing bij het berekenen van de equivalente dekkingshoogte (H_{eq}):



Algemene formules:

$$H_{n,eq} = 0.9 * H_n * \sqrt[3]{\frac{E_n}{E_g}}$$

$$H_{eq} = \sum H_{n,eq} + H_3 = \sum H_{n,eq} + H - \sum H_n$$

$H_{n,eq}$ = de equivalente dekkingshoogte v.d. om te rekenen laag in mm

H_n = de laagdikte van de om te rekenen laag in mm

E_n = de elasticiteitsmodulus van de om te rekenen laag in kN/m²

E_g = de elasticiteitsmodulus van de ondergrond in kN/m²

H_{eq} = de equivalente dekkingshoogte in mm

H_3 = de laagdikte van de ondergrond in mm

H = de oorspronkelijke dekking in mm

n = deklaag ($n=1$), of funderingslaag ($n=2$) [-]



Voorbeeld: Ontlastende invloed wegdek / drielagenstructuur

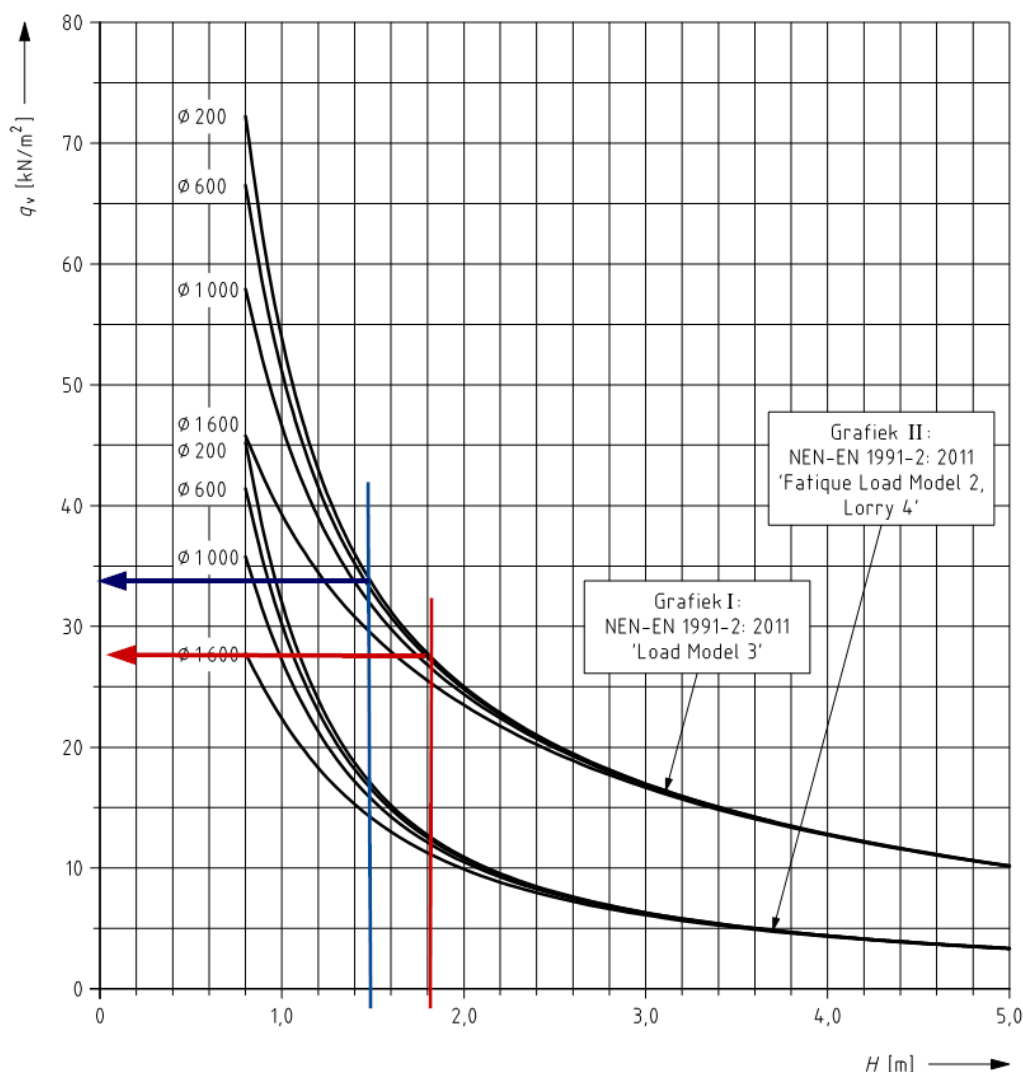
Stel dikte toplaag is (H_1)150 mm en de fundering heeft een dikte van (H_2)200 mm, dan volgt:

$$H_{1,eq} = 0,9 * H_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_g}} = 0,9 * 150 * \sqrt[3]{\frac{500}{100}} = 231mm$$

$$H_{2,eq} = 0,9 * H_2 * \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_g}} = 0,9 * 200 * \sqrt[3]{\frac{1500}{100}} = 444mm$$

$$H_{eq} = H_{1,eq} + H_{2,eq} + H - H_1 - H_2$$

$$H_{eq} = 231 + 444 + 1500 - 150 - 200 = 1825mm$$





Om de invloed van het wegdek mee te kunnen nemen in de berekening is het nodig om de eigenschappen van het wegdek met eventueel bijbehorende fundering te weten. Deze eigenschappen worden uitgedrukt in de elasticiteitsmodulus. Bij een kruising van een snelweg of een autoweg is nagenoeg altijd sprake van asfaltverharding.

Wanneer bijvoorbeeld een drielagensysteem aanwezig is (ondergrond, funderingslaag en deklaag), wordt eerst de funderingslaag omgerekend tot een equivalente gronddekking en vervolgens wordt hetzelfde gedaan met de deklaag. De equivalente dekking (H_{eq}) wordt dan: $H_3 + H_{1eq} + H_{2eq} = H_{eq}$.

In tabel C.9 van NEN 3650-1:2012 zijn richtgetallen opgenomen die in de berekening kunnen worden aangehouden.

Tabel C.9 — Getalswaarden voor diverse deklagen en funderingslagen

Materiaal	E-modulus N/mm ²	Factor α of β	γ_d kg/m ³
Polystyreenschuim	4 resp. 14 ^a	0	15 resp. 40
Ondergrond	100 ^b	—	—
Schuimslakken	150	0,03	—
Lava, macadam, steenslag, kalkstabilisatie, fundering van zacht puin	200	0,134	—
Schuimbeton	300	0,298	400
Asfaltlagen, klinkers, betonpuinfundering	500	0,539	—
Schuimbeton	650	0,680	500
Zandcement, zandasfalt	1 000	0,939	—
Schuimbeton	1 200	1,060	600
Hoogovenslakken	1 500	1,220	—
Schuimbeton	3 700	1,999	1 000
Schuimbeton	11 500	3,377	1 600
^a Voor tussenliggende waarden geldt $E = 4 + 2 (\gamma_d - 15) / 5$ N/mm ² .			
^b Goed verdicht zand.			

De gegeven waarden zijn zo vastgesteld dat de berekende verkeersbelasting ongeveer een zogenaamde 'karakteristieke waarde' betreft (5 % overschrijdingskans).



Verkeersbelasting
Verkeersbelasting **Grafiek I**
Ontlastende invloed t.g.v. wegdek
☐ Geen ontlastende invloed
☒ Tweelagen structuur
☐ Drielagen structuur
Dikte deklaag [mm] **200**
E-modulus deklaag [N/mm²] **500**
E-modulus ondergrond [N/mm²] **100**

Overzicht e-moduli voor diverse deklagen en funderingslagen

Materiaal	Elasticiteitsmodulus [N/mm ²]
polysyreenschuim (min.)	4
polysyreenschuim (max.)	14
ondergrond (goed verdicht zand)	100
schuimslakken	15
lava, macadam, steenslag	200
kalkstabilisatie, fundering van zacht puin	200
schuimbeton	300
asfaltlagen, klinkers, betonpuinfundering	500
schuimbeton	650
zandcement, zandasfalt	1000
schuimbeton	1200
hoogovenslakken	1500
schuimbeton	3700
schuimbeton	11500

Deze tabel verschijnt in het programma Sigma 2012 via de rechtermuisknop. Bij schuimbeton is het soortelijk gewicht van belang.

Grond en verkeersbelasting op de leiding veroorzaken spanningen in het materiaal. Beide belastingen worden “directe” belastingen genoemd. Er is ook nog een “indirecte” belasting waar mee moet worden gerekend. De berekeningswijze en de grootte hiervan is afhankelijk van de uitvoeringsmethode.



Het principe van indirect overgedragen bovenbelasting.

Wanneer een leiding in een sleuf wordt ingegraven en de sleuf vervolgens wordt aangevuld dan is het de vraag of er geen holle ruimte onder de leiding achterblijft.

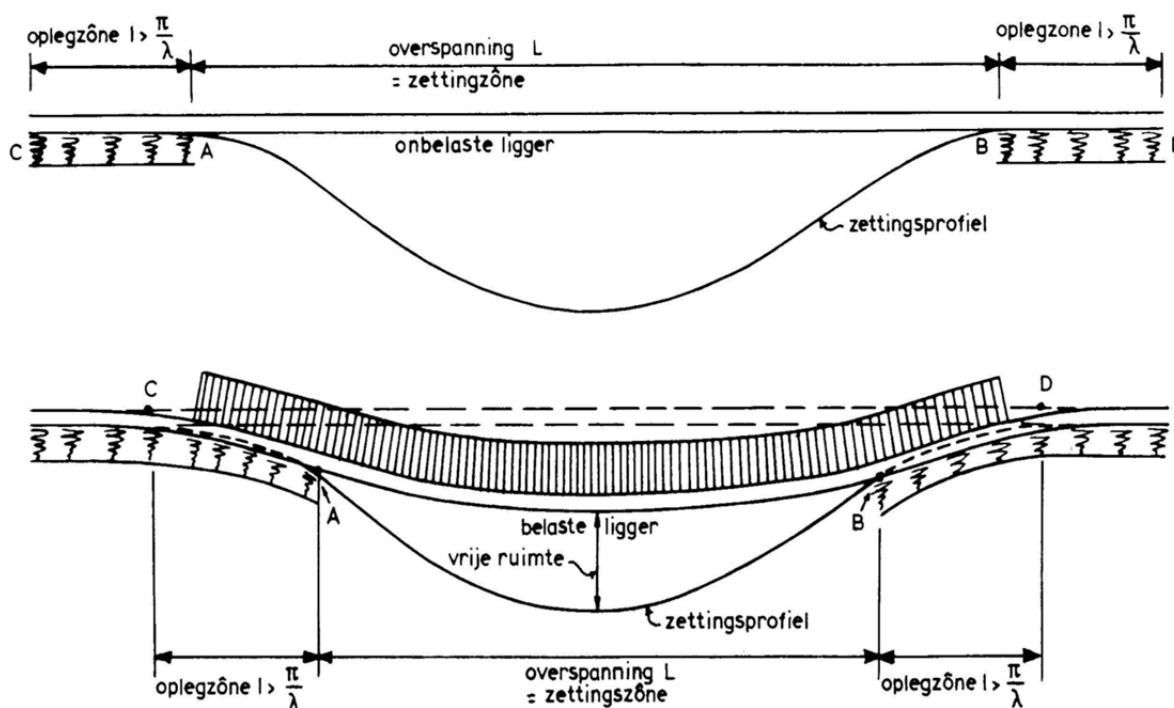


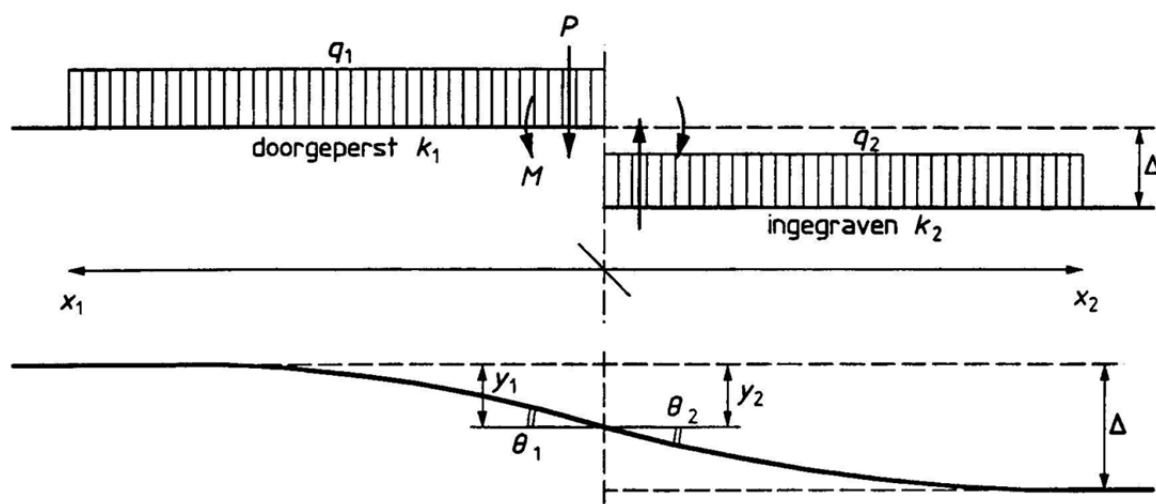
fig. IV. 153 – Op basis van Hetényi geschematiseerde leiding. –

De leiding buigt een bepaalde lengte door. De zettingszone is bij open sleuf berekeningen minimaal gelijk aan 40 m (2 x 20 m). Hier wordt mee gerekend indien er sprake is van een leiding evenwijdig in een waterstaatswerk. Bij een kruising met een waterstaatswerk volgt de lengte uit het zogenaamde inklemmingspercentage. Aangezien in de NEN 3650 is voorgeschreven dat dit inklemmingspercentage 90 % moet zijn volgt automatisch de bijbehorende lengte.

Hoe ver de leiding kan doorbuigen is van meerdere factoren afhankelijk. Zo buigt een stijve leiding heel wat minder door dan een slappe leiding. Ook de grond waar de leiding in gelegd is speelt een rol. Slappe grond geeft een heel andere reactie dan stijve grond.



Wanneer een leiding geperst wordt en daar een leiding op wordt aangesloten dan is ook sprake van een bepaalde doorbuiging. Ook dan moet rekening gehouden worden met indirect overgedragen bovenbelasting.



Of een leiding door gaat buigen is vooral afhankelijk van de buigstijfheid van de leiding.

De buigstijfheid is te berekenen met de formule $E \cdot I_b$, ofwel elasticiteitsmodules materiaal * traagheidsmoment van de leiding. Een dunwandige leiding buigt makkelijker dan een dikwandige leiding. Staal heeft een veel hogere elasticiteitsmodules dan PE.

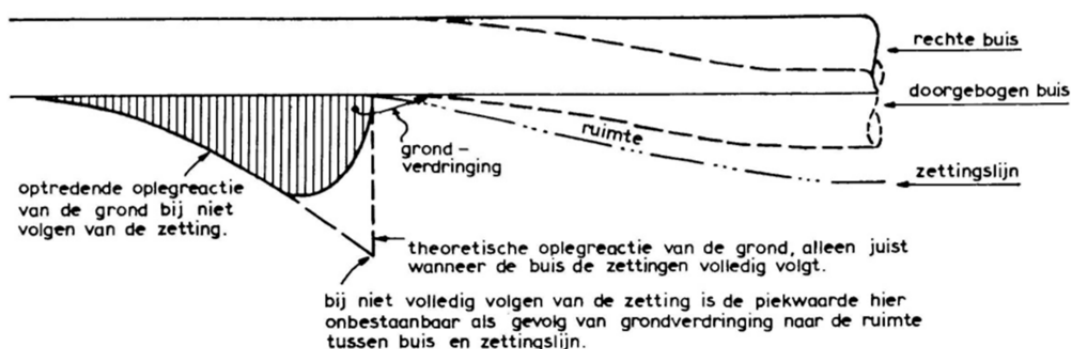


fig. IV. 154 – Oplegreactie bij harde grond of slappe buis; golf snel uitgedempt. –

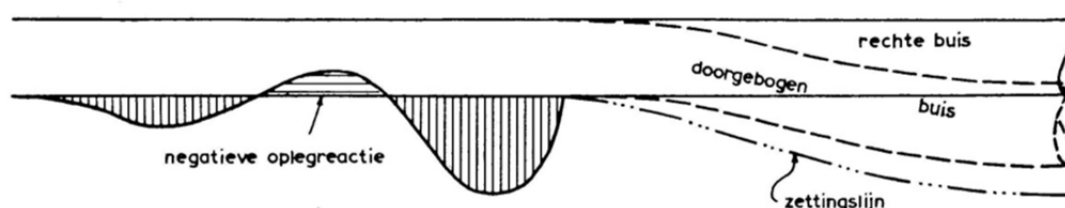


fig. IV. 155 – Oplegreactie bij zachte grond of stijve buis; golf loopt verder door. –



Bij het berekenen van een horizontaal gestuurde boring komen we de beddingsconstante ook tegen want die is verwerkt in de formule van λ . De leiding heeft een eigen buigstijfheid $E * I_b$.

De grond kan een zekere mate van indrukken ondergaan. De combinatie van beiden drukt men uit in λ . Dit staat voor stijfheidsverhouding grond/leiding.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_e * k_v}{4 * E * I_b}}$$

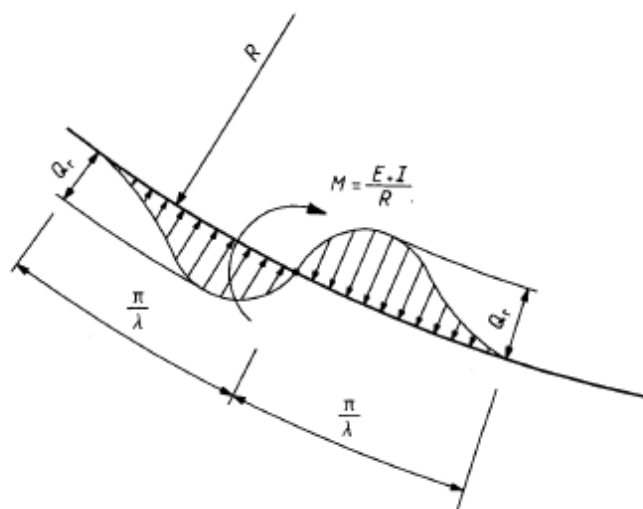
λ = lambda in mm^{-1}

D_e = uitwendige diameter van de leiding in mm

k_v = de verticale beddingsconstante in N/mm^2

E = de elasticiteitsmodulus van de leiding in N/mm^2

I_b = traagheidsmoment van de leiding in mm^4



Bij het berekenen van de reactiekrachten ten gevolge van het doorbuigen van de leiding speelt ook de grondslag een rol. De oplegreactie bij harde grond is groter dan die bij slappe grond. Om deze oplegreactie te berekenen is het nodig om de beddingsconstante in te voeren.

Een beddingsconstante is een maat voor de zakking van een funderingselement ten gevolge van de kracht die op het funderingselement wordt uitgeoefend. De beddingsconstante wordt gebruikt bij het maken van constructieberekeningen.



De beddingsconstante k is bij funderingsstroken gelijk aan:

$$k = \frac{Q}{u} \text{ (eenheid: N/m}^2\text{)}$$

waarin Q gelijk is aan de op de kracht per meter lengte, uitgeoefend op de fundering

en u gelijk is aan de zetting van deze fundering, ten gevolge van deze kracht.

De beddingsconstante k is bij funderingsplaten gelijk aan:

$$k = \frac{p}{u} \text{ (eenheid: N/m}^3\text{)}$$

waarin p gelijk is aan de op de kracht per oppervlakte, uitgeoefend op de fundering

en u gelijk is aan de zetting van deze fundering, ten gevolge van deze kracht.

De ondergrond kan als een veer gezien worden. De kracht van die veer is de beddingsconstante.

De kracht en de indrukking van de ondergrond zijn aan elkaar gerelateerd. De beddingsconstante is een belangrijke eigenschap voor de stijfheid van de ondergrond. Het bepalen van de beddingsconstante kan onder andere door de plaatdrukproef (zie <http://nl.wikipedia.org/wiki/Plaatdrukproef>).

In de sterkteberekeningen wordt veelvuldig met de beddingsconstante gerekend. In de NEN 3650-serie zijn tabellen vermeld die in het programma Sigma 2012 worden getoond (via rechtermuisknop).

Bij berekeningen "Open sleuf" en "Horizontaal gestuurde boormethode" is onderstaande tabel van toepassing:

Overzicht beddingsconstante volgens NEN3650									
Grondsoort	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand			Hard zand	
Beddingsconstante [N/mm ³]	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$		$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$
Uitwendige middellijn [mm]						1 m	3 m		
100	0.007	0.011	0.016	0.024	0.04	0.045	0.11	0.1	0.158
200	0.004	0.006	0.0085	0.013	0.022	0.025	0.058	0.055	0.087
300	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.016	0.018	0.04	0.04	0.063
400	0.002	0.003	0.0045	0.007	0.012	0.015	0.032	0.03	0.0475
450	0.0018	0.0028	0.004	0.006	0.01	0.013	0.029	0.025	0.0395
600	0.0014	0.0022	0.003	0.005	0.008	0.011	0.022	0.02	0.0315
750	0.0011	0.0018	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.018	0.0176	0.0278
900	0.001	0.0016	0.0021	0.0034	0.006	0.008	0.015	0.0161	0.0254
1200	0.0008	0.0012	0.0017	0.0027	0.004	0.007	0.012	0.0137	0.0216



De waarde $k_{v,min}$ wordt gebruikt om de reële grondbelasting uit te rekenen. De $k_{v,gem}$ waarden worden gebruikt om voor de berekening van de buigspanningen als gevolg van zettingen.

De beddingconstante is zowel diameterafhankelijk als grondsoortafhankelijk.

Bij de “Gelegd/geperst-methode” zijn andere waarden voor de beddingconstanten voorgeschreven:

Overzicht beddingsconstante volgens NEN3650 (Verdicht)								
Grondsoort	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand		Hard zand	
Beddingsconstante [N/mm ³]	Geperst	Gelegd	Geperst	Gelegd	Geperst	Gelegd	Geperst	Gelegd
Uitwendige middellijn [mm]	k ₁	k ₂	k ₁	k ₂	k ₁	k ₂	k ₁	k ₂
100	0.007	0.0035	0.0016	0.0008	0.1	0.04	0.25	0.05
200	0.004	0.002	0.0085	0.004	0.055	0.022	0.13	0.025
300	0.0025	0.0013	0.006	0.003	0.04	0.016	0.095	0.02
400	0.002	0.001	0.0045	0.002	0.03	0.012	0.07	0.015
450	0.0018	0.0009	0.004	0.0015	0.025	0.01	0.063	0.012
600	0.0014	0.0007	0.003	0.0015	0.02	0.008	0.05	0.01
750	0.0011	0.0006	0.0025	0.001	0.015	0.006	0.04	0.0085
900	0.001	0.0005	0.002	0.001	0.015	0.006	0.035	0.005
1200	0.0008	0.0004	0.0015	0.0005	0.01	0.004	0.025	0.006

We zien hier k_1 en k_2 vermeld. Voor het geperste deel is k_1 van toepassing. Voor het aansluitende gedeelte het gelegde deel) moet k_2 worden gekozen.

Om de spanningen als gevolg van doorbuigen te berekenen wordt gebruik gemaakt van de “theorie van de elastisch ondersteunde ligger”. Met name Hetényi heeft hier veel over geschreven (Beams on elastic foundation).

De indirecte belastingen zijn vooral afhankelijk van de doorbuiging van de leiding. Deze doorbuiging is afhankelijk van de vrije ruimte onder de leiding en de belasting boven op de leiding. Ook de buigstijfheid van de leiding is belangrijk.



De spanning ten gevolge van temperatuursverschil

Temperatuurverschillen dragen evenals zettingsverschillen bij aan buigvervormingen (bij bochten), en axiale krachten en verplaatsingen. Vervormingen als ovaliseren en plooien zullen bij geringe temperatuurverschillen niet maatgevend zijn. Voor leidingen met een hoge bedrijfstemperatuur kunnen echter bij bochten grote lokale vervormingen optreden alsook in lange rechte leidingsecties grote normaalkrachten, waardoor controle op knik en plooï noodzakelijk wordt.

In het algemeen wordt 10°C aangehouden als een temperatuurverschil tussen aanleg en bedrijfsvoering. De aanleg van kunststofleidingen, met uitzondering van leidingen van polyetheen en polypropreen en met glasvezel versterkte leidingen, moet in verband met koudbroosheid vorstvrij plaatsvinden.

Indien de buizen worden verlijmd of een laminaat wordt gebruikt, moet de minimale verwerkingstemperatuur van de producent in acht worden genomen. Bij lage temperaturen verminderen de flexibiliteit en de breukweerstand van het materiaal. In dat geval moet extra zorg worden besteed aan bewerkingen aan buiseinden en het verlijmen van de verbindingen.



Sigma 2012 3.0

Computerprogramma om leidingen conform de
NEN 3650:2012 te berekenen

DEEL 2



1. Het programma Sigma 2012

Na het opstarten van het programma verschijnt het volgende scherm:



We zien hier vijf keuzes.

1. Berekeningen
2. Leidingmateriaal
3. Grondgegevens
4. Opties
5. Help

Ad. 1: Met Sigma 2012 kunnen diverse berekeningen gemaakt worden:

- Leidingen gelegd in open sleuf (sleuf graven, leiding leggen, sleuf weer aanvullen)
- Leidingen geboord met behulp van de horizontaal gestuurde boormethode.
Bij deze berekeningsmethode kan het nodig zijn om de toelaatbare boorspoeldruk (extra) te berekenen. Ook kan het nodig zijn om de kwelweg te berekenen. Ook deze berekeningen kunnen met Sigma 2012 gemaakt worden.
- Gelegd/geperst berekening (leiding doorpersen en vervolgens daar een leiding op aansluiten)
- Doorpersing (te gebruiken wanneer bijvoorbeeld een mantelbuis geboord wordt)
- Veiligheidszone (om te bepalen of de leiding dicht op het waterstaatswerk ligt)

Ad. 2: Het is mogelijk om een leidingmaterialen in te voeren



In de NEN 3650 serie staat voorgeschreven welke materiaalspecificaties gebruikt moeten worden. Zo is bij PE en PVC bijvoorbeeld voorgeschreven met welke toelaatbare spanningen gerekend moet worden. Wanneer op dit menu geklikt wordt verschijnt het volgende scherm:

Sigma 2012 3.0.9								
Berekening Leidingmateriaal Grondgegevens Opties Help								
Leidingmateriaal								
Opslaan en sluiten Standaard waarden								
Materiaal	Kwaliteit	Lange-duur treksterkte [N/mm ²]	Toel. spanning tangentieel [N/mm ²]	Toel. spanning axiaal [N/mm ²]	Rekgrens van het materiaal bij 20°C [N/mm ²]	Materiaalfactor [-]	Elasticiteitsmodulus [N/mm ²]	Elasticiteitsmodulus lange du
PE	PE 80	8,0				1,25		
PE	PE 100	10,0				1,25		
PP	PP	10,0				2,0		
PVC	PVC-HI	18,0				2,0		
PVC	PVC-U	25,0				2,0		
Staal	EN 10208 L210				210,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L320				320,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L245				245,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L290				290,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L360				360,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L415				415,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L450				450,0		205800,0	
Staal	EN 10208 L485				485,0		205800,0	
Staal	EN 10216 P235GH				225,0		205800,0	
Staal	EN 10217 P265GH				255,0		205800,0	
Staal	EN 10217 16Mo3				270,0		205800,0	
Staal	EN 10216 13 CrMo				290,0		205800,0	
Staal	EN 10028 P355N				355,0		205800,0	
Staal	Din St-35.8				235,0		205800,0	
Staal	Din St-37.4				235,0		205800,0	
Staal	Din St-44.4				275,0		205800,0	
Staal	Din St-52.3				355,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. A				207,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. B				241,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X42				289,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X46				317,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X52				358,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X56				386,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X60				413,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X65				448,0		205800,0	
Staal	API 5L Gr. X70				482,0		205800,0	
Staal	ASTMA A Gr. B				241,0		205800,0	
Staal	ASTMA A Gr. 6				241,0		205800,0	
Staal	ASTMA TP304				205,0		205800,0	
Staal	ASTMA TP304L				170,0		205800,0	
Staal	ASTMA TP316L				170,0		205800,0	
Staal	VDtÜV X2 CrNiMoN				450,0		205800,0	
Nodulair gietijzer	NEN-EN 545				420,0		170000,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-100				40,0		42000,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-150				60,0		54000,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-200				80,0		68000,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-250				100,0		82500,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-300				120,0		98500,0	
Grijs gietijzer	EN-GJL-350				140,0		116500,0	
GVK	Gesneden vezel: P...		52,0					
GVK	Gesneden vezel: Ep...		52,0					
GVK	Geweven vezel: Pol...		52,0					
GVK	Geweven vezel: Ep...		52,0					
Asbestcement	ISO 2785:1986				10,0		25000,0	

We zien hier de volgende materialen vermeld:

- PE (kwaliteiten MRS 80 en MRS 100)
- PP
- PVC
- Staal
- Nodulair Gietijzer
- Grijs gietijzer
- GVK
- Asbest Cement



Bij PVC kan gekozen worden uit PVC HI (slagvast voor gasleidingen) en PVC-U (waterleidingen).

Bij staal is keuze uit een enorm aantal staalkwaliteiten. Wij hebben er in Sigma 2012 enkele vermeld.

Aangaande Nodulair Gietijzer is er niet veel keuze.



Bij GVK wel. Ten eerste is er een onderscheid in gesneden glasvezel of gewikkelde glasvezel. Ook is er een keuze mogelijk in epoxy of polyester.

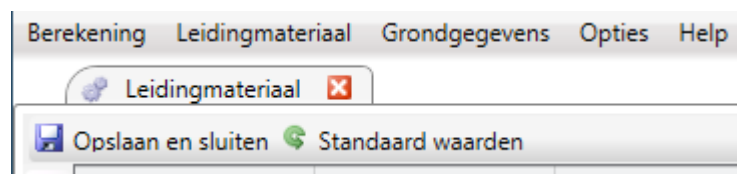


Wanneer we verder naar rechts scrollen dan zien we nog meer leidingmateriaalparameters.

Gebruikers die niet goed thuis zijn met deze materie wordt aangeraden om de standaardwaarden te laten zoals ze zijn opgenomen in het programma.



Mocht er onzekerheid bestaan over de juiste parameters dan kan eenvoudig teruggevallen worden op de originele waarden.



Indien een leidingmateriaal is toegevoegd kan dit uiteraard worden opgeslagen.

Ad. 3 De grondgegevens

In de NEN 3650:2012 staan diverse grondgegevens vermeld. Deze kunnen worden opgeroepen in het programma.

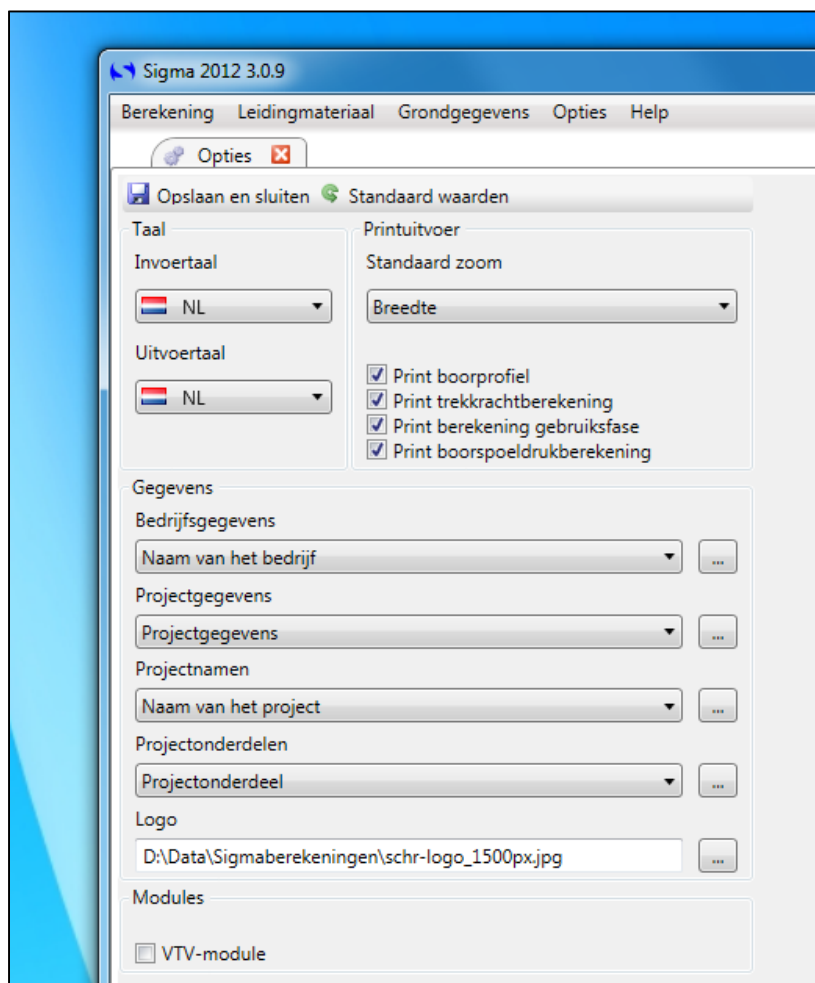
Overzicht grondparameters volgens NEN 3650												
			Zand				Klei				Veen	
			Vast	Matig	Los	Vast	Matig	Slap	Slap			
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	[kN/m³]	20	19	18	17	20	19	17	14	12	10
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	[kN/m³]	22	21	20	19	20	19	17	14	12	10
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	[°]	40	35	32.5	30	25	17.5	17.5	17.5	15	15
Effectieve cohesie	c'	[kN/m²]	0	0	0	0	15	13	5	0	2.5	1
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	[kN/m²]	0	0	0	0	200	100	50	25	20	10
E-modulus sleufmateriaal	E_1	[MN/m²]	20	20	10	5	2	2	1	0.5	0.2	0.2
E-modulus ondergrond	E_{100}	[MN/m²]	110	75	45	15	10	10	2	1	0.5	0.2
Samendrukkingsconstante	C'_p	[-]	1500	1000	600	200	30	25	15	7	7.5	5
Relatieve verplaatsing	δ_d	[mm]	1-3	1-3	3-5	5-8	2-4	2-4	4-6	6-10	6-10	10-15

Ten opzichte van de vorige NEN-normen is deze tabel uitgebreider. Deze grondgegevens zijn o.a. afkomstig van de NEN 6740. Wij hebben tabel 1 van deze NEN norm verwerkt in Sigma 2012.

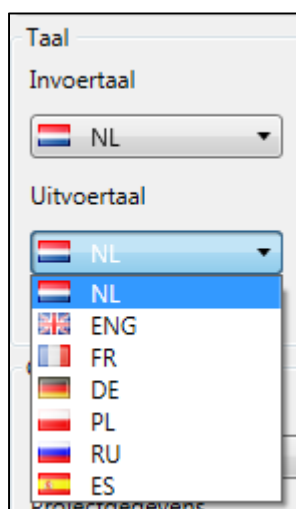
Alle grondgegevens die in deze tabel in Sigma 2012 zijn opgeslagen kunnen eenvoudig in de berekeningen worden ingevoerd. Dit kan met behulp van de rechtermuisknop. De volgorde van de grondgegevens kan gewijzigd worden. Wanneer iemand veel met slappe klei te maken heeft kan deze de die waarden hoger in de tabel verplaatsen. Dit kan met pijltje naar boven (en uiteraard andersom met pijltje naar beneden).



Ad.4 Opties



Berekeningen die klanten met Sigma 2012 worden ook in het buitenland gebruikt. Ten behoeve van klanten in het buitenland is het mogelijk om de berekeningen in meerdere talen te gebruiken. Dit geldt voor zowel de printuitvoer als de schermen.





Bij de gegevens kan de bedrijfsnaam worden vermeld. Ook kunnen zaken aangaande het project worden ingevoerd. Rechtsboven op de printuitvoer kan een logo geprint worden.

Gegevens	
Bedrijfsgegevens	
Naam van het bedrijf	...
Projectgegevens	
Projectgegevens	...
Projectnamen	
Naam van het project	...
Projectonderdelen	
Projectonderdeel	...
Logo	
D:\Data\Sigmaberekeningen\schr-logo_1500px.jpg	...

Bij horizontaal gestuurde boringen varieert het aantal pagina's van circa 6 tot 25 afhankelijk van het boorprofiel en de gekozen varianten.

Het is mogelijk om een berekening op te knippen in delen. Zo kan er voor gekozen worden om alleen de spanningen tijdens het intrekken te berekenen, maar er kan ook voor gekozen worden om de boorspoeldrukberekening afzonderlijk te printen.



2. Berekeningen maken met Sigma 2012

A. Berekening van een veiligheidszone bij een vloeistofleiding

Wanneer we de veiligheidszone van een vloeistofleiding willen berekenen dan krijgen we dit scherm (selecteer “Berekening”, kies vervolgens “Veiligheidszone”) te zien:

We zien dat we eigenlijk maar een paar zaken moeten weten.

Ten eerste moeten we aangeven met welke diameter en wanddikte we te maken hebben. Voor de meeste leidingmaterialen hebben we hiervoor in het programma een tabel beschikbaar.

Stel dat we de veiligheidszone van een PE 100 leiding met een diameter $\varnothing$ 200 mm willen weten. We kunnen dan een PE-tabel oproepen met de rechtermuisknop.



Overzicht diameters en wanddikten bij PE-leidingen									
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]								
	PE 80 SDR 21	PE 80 SDR 17.6	PE 80 SDR 17	PE 80 SDR 13.6	PE 80 SDR 11	PE 100 SDR 17.6	PE 100 SDR 17	PE 100 SDR 13.6	PE 100 SDR 11
25	-	2.3	2	2.4	2.3	-	-	-	2.3
32	-	2.3	2	2.4	3	-	-	2.4	3
40	-	2.3	2.4	3	3.7	-	-	3	3.7
50	-	2.9	3	3.7	4.6	-	-	3.7	4.6
63	-	-	3.8	4.7	5.8	3.6	3.8	4.7	5.8
75	3.6	-	4.5	5.6	6.8	4.3	4.5	5.6	6.8
90	4.3	-	5.4	6.7	8.2	5.1	5.4	6.7	8.2
110	5.3	-	6.6	8.1	10	6.3	6.6	8.1	10
125	6	-	7.4	9.2	11.4	7.1	7.4	9.2	11.4
140	-	-	8.3	10.3	12.7	-	8.3	10.3	12.7
160	7.7	-	9.5	11.8	14.6	9.1	9.5	11.8	14.6
180	-	-	10.7	13.3	16.4	-	10.7	13.3	16.4
200	9.6	-	11.9	14.7	18.2	11.4	11.9	14.7	18.2
225	10.8	-	13.4	16.6	20.5	-	13.4	16.6	20.5
250	11.9	-	14.8	18.4	22.8	14.2	14.8	18.4	22.8
315	15	-	18.7	23.2	28.7	-	18.7	23.2	28.7
355	16.9	-	21.1	26.1	32.3	-	21.1	26.1	32.3
400	19.1	-	23.7	29.4	36.4	-	23.7	29.4	36.4
450	-	-	26.7	33.1	41	-	26.7	33.1	41
500	-	-	29.7	36.8	45.5	-	29.7	36.8	45.5
560	-	-	32.3	41.2	51	-	32.3	41.2	51
630	-	-	37.4	46.3	57.3	-	37.4	46.3	57.3
710	-	-	42.1	52.2	64.5	-	-	52.2	-
800	-	-	47.4	58.8	-	-	-	58.8	-
900	-	-	53.3	66.1	-	-	-	66.1	-
1000	-	-	59.3	-	-	-	-	-	-

We zien dan deze tabel. Wanneer op een bepaalde wanddikte geklikt wordt verschijnt zowel de wanddikte als de uitwendige middellijn in de juiste invoervelden.

160	7.7	-	9.5	11.8	14.6	9.1	9.5	11.8	14.6
180	-	-	10.7	13.3	16.4	-	10.7	13.3	16.4
200	9.6	-	11.9	14.7	18.2	11.4	11.9	14.7	18.2
225	10.8	-	13.4	16.6	20.5	-	13.4	16.6	20.5

Wanneer we gegevens van de leiding hebben ingevuld moet worden opgegeven hoeveel druk in de leiding wordt toegepast en de volumieke massa van de vloeistof.

Bij water is de volumieke massa gelijk aan 1000 kg/m³. Bij olie is dit vaak 800 kg/m³.



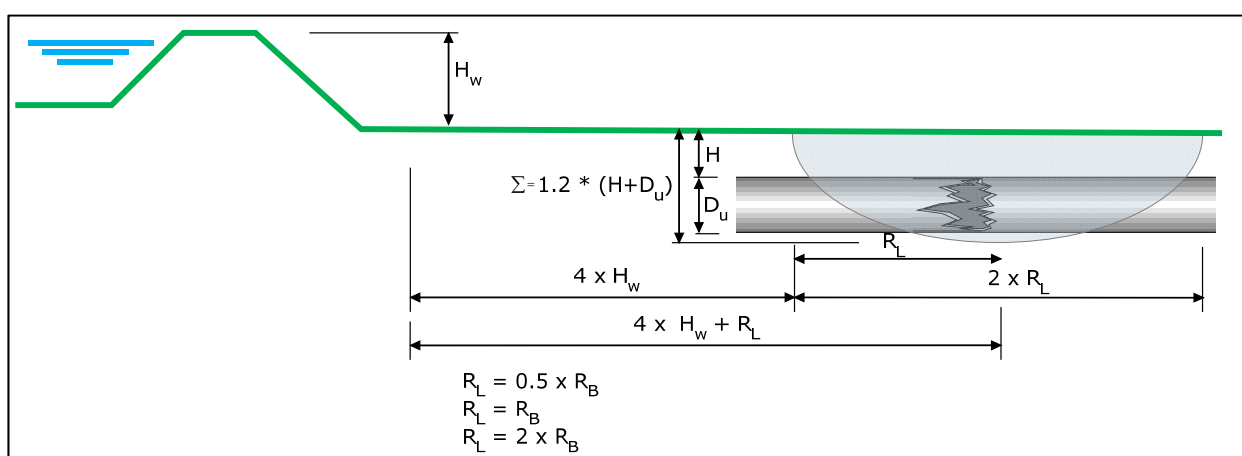
Bij het berekenen van de veiligheidszone is het ook van belang om gegevens van het waterstaatswerk in te voeren.

Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone

Waterstaatswerk ☒ Verheeld ☐ Niet Verheeld

Gebruik pompgegevens ☐ Ja ☒ Nee

We hebben de keuze om aan te geven of het waterstaatswerk, de dijk, de waterkering of de aardenbaan van een autoweg, verheeld is of niet. Indien we voor niet-verheeld kiezen dan wordt gevraagd om het hoogteverschil in te voeren. Onderstaande tekening is dan van toepassing:



Wanneer we “Niet verheeld” aanklikken dan krijgen we het volgende invoerscherm te zien:

Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone

Waterstaatswerk ☐ Verheeld ☒ Niet Verheeld

Hoogteverschil kruin-maaiveld [m]

☐ Aangepaste breedte stabiliteitszone [m]

Gebruik pompgegevens ☐ Ja ☒ Nee

Wanneer we nu op de knop “Berekenen” drukken verschijnt de berekening in een tabblad:



Berekening Leidingmateriaal Grondgegevens Opties Help

VZ:Voorbeeldberekening veili... VZ:Voorbeeldberekening veili...

Adviesbureau
Schrijvers

Berekening van de veiligheidszone conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2012 3.0 ©
Algemene gegevens		
Naam van het project	: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)	
Projectonderdeel	: Voorbeeldberekening veiligheidszone vloeistofleiding	
Gegevens van de leiding		
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)	= Vloeistof	

Links zien we het tabblad van de berekening, rechts zien we de printuitvoer. Deze printuitvoer kan worden opgeslagen als pdf-bestand.



De printuitvoer kan ook passend gemaakt worden in lengte- of breedterichting. Ook kan ingezoomd worden. Dit kan ook door de rechter- en linkermuisknop te gebruiken wanneer op de printuitvoer wordt geklikt.



Berekening van de veiligheidszone conform NEN 3650/3651:2012		Sigma 2012 3.0 ©	
Algemene gegevens			
Naam van het project : Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)			
Projectonderdeel : Voorbeeldberekening veiligheidszone vloeistofleiding			
Gegevens van de leiding			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Ontwerpdruk	p_d	= 0,3	N/mm ²
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Afmetingen van de leiding			
Uitwendige middellijn	D_e	= 200,0	mm
Wanddikte	d_n	= 14,7	mm
Inwendige middellijn	D_i	= 170,6	mm
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone			
Waterstaatswerk: Niet Verheeld			
Hoogteverschil kruin-maaiveld		= 2,5	m
Berekening van de factor $H^3 \cdot D_i^5$			
$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$ $H = \frac{300.000}{1.000 \cdot 9,81} = 30,58 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 30,58^3 \cdot 0,17^5 = 4,13 \text{ m}^8$			
Berekening van de halve breedte van de erosiekrater R_B			
$R_B = 2 \cdot \sqrt[8]{H^3 \cdot D_i^5}$ $R_B = 2 \cdot \sqrt[8]{30,58^3 \cdot 0,17^5} = 2,39 \text{ m}$			
Berekening van de halve lengte van de erosiekrater R_L			
Indien er sprake is van een klein gat: $R_{L1} = 0,5 \cdot R_B = 1,19 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een groot gat: $R_{L2} = R_B = 2,39 \text{ m}$			
Indien er sprake is van niet-trekvast verbindingen: $R_{L3} = 2 \cdot R_B = 4,78 \text{ m}$			
Berekening van de veiligheidszone			
Indien er sprake is van een evenwijdige ligging met een waterkering:			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_B = 4 \cdot 2,50 + 2,39 = 12,39 \text{ m}$			
Indien er sprake is van een kruising met een waterkering:			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L1} = 4 \cdot 2,50 + 1,19 = 11,19 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L2} = 4 \cdot 2,50 + 2,39 = 12,39 \text{ m}$			
Veiligheidszone = $4 \cdot H_{\text{werk}} + R_{L3} = 4 \cdot 2,50 + 4,78 = 14,78 \text{ m}$			

We zien hier de berekeningsresultaten. Ligt de waterleiding evenwijdig aan het waterstaatswerk dan is de veiligheidszone gelijk aan 12,44 m. Bij evenwijdige ligging varieert de veiligheidszone van 11,19 m tot 14,78 m.



De inwendige druk en de volumieke massa worden gebruikt om de factor $H^3 \cdot D_i^5$ te berekenen. Wanneer deze kleiner is dan 40 dan wordt R_B anders (conservatiever) uitgerekend. Dit zien we als we kiezen voor een leiding met een diameter van bijvoorbeeld 450 mm. We zien dan het volgende:

The screenshot shows the 'Berekenen Geavanceerd' (Calculate Advanced) window of the Sigma 2012 software. It is divided into three main sections: 'Projectgegevens' (Project data), 'Leiding- en materiaalgegevens' (Pipe and material data), and 'Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone' (Waterworks data for safety zone calculation). In the 'Projectgegevens' section, the project name is 'Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)' and the project part is 'Voorbeeldberekening veiligheidszone vloeistofleiding'. In the 'Leiding- en materiaalgegevens' section, the outer diameter is 450,0 mm and the wall thickness is 41,0 mm. The medium is set to 'Vloeistof' (Liquid) with a design pressure of 0,3 N/mm² and a volumetric mass of 1000 kg/m³. In the 'Gegevens waterstaatswerk...' section, 'Waterstaatswerk' is set to 'Niet Verheeld' (Not raised), the height difference is 2,5 m, and 'Aangepaste breedte stabiliteitszone' is 10,0 m. The 'Gebruik pompgegevens' (Use pump data) option is set to 'Nee' (No).

Maken we de berekening opnieuw dan verschijnt naast de eerste printuitvoer nog een printuitvoer.

De resultaten van de gewijzigde invoer worden dus direct zichtbaar. Het effect van een grotere leiding zien we bij de factor $H^3 \cdot D_i^5$. Deze is een stuk groter.

$$H = \frac{p_d}{\rho \cdot g}$$
$$H = \frac{300.000}{1.000 \cdot 9,81} = 30,58 \text{ m} \rightarrow H^3 \cdot D_i^5 = 30,58^3 \cdot 0,37^5 = 193,02 \text{ m}^8$$

In plaats van $4,13 \text{ m}^8$ hebben we nu $193,02 \text{ m}^8$. Als gevolg daarvan krijgen we ook een andere formule voor de berekening van R_B . Deze is namelijk ook ongunstiger.

$$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{H^3 \cdot D_i^5}$$
$$R_B = 8 \cdot \sqrt[8]{30,58^3 \cdot 0,37^5} = 15,45 \text{ m}$$

De erosiekrater haaks op de leiding is nu dus 15,45 m in plaats van 2,39 m (vorige berekening).

Automatisch is de veiligheidszone nu ook een stuk groter. De formule van R_B is conservatief. In werkelijkheid zal de erosiekrater niet zo groot zijn.



In Sigma 2012 kan R_B nauwkeuriger worden berekend. Dit kan door op het invoerscherm de keuze "Gebruik pompgegevens" te selecteren. We zien dan gelijk dat we meer gegevens moeten invoeren.

We zien nu dat om het maximale debiet wordt gevraagd, ook is het nodig om de maximale opvoerhoogte op te geven. Stel dat sprake is van een debiet van 800 m³/uur en een opvoerhoogte van 35 m dan volgt:

$$\begin{aligned}
 Q &= 0,578 \cdot Q_m = 0,578 \cdot 800,00/3.600 = 0,13 \text{ m}^3/\text{s} \\
 h &= 0,67 \cdot H_m = 0,67 \cdot 35 = 23,45 \text{ mvk} \\
 P &= \rho \cdot g \cdot Q \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,13 \cdot 23,45 = 27.650,36 \text{ W} \\
 \mu &= 0,0002 \cdot h^2 - 0,02 \cdot h + 1 = 0,0002 \cdot 23,45^2 - 0,02 \cdot 23,45 + 1 = 0,64 \\
 R_B &= 7,8 \cdot D_i \cdot \left(\frac{P}{\rho \cdot g^{1,5} \cdot \mu \cdot D_i^{3,5}} \right)^{0,243} \\
 R_B &= 7,8 \cdot 0,3680 \cdot \left(\frac{27.650,36}{1000 \cdot 9,81^{1,5} \cdot 0,64 \cdot 0,3680^{3,5}} \right)^{0,243} = 7,41 \text{ m}
 \end{aligned}$$

R_B is nu 7,41 m in plaats van 15,45 m. Uiteraard is de veiligheidszone daardoor ook kleiner.



B. De berekening van de veiligheidszone van een gasleiding.

Wanneer we bij "Soort medium" gas aanklikken in plaats van vloeistof dan kan de veiligheidszone van een gasleiding worden uitgerekend.

Projectgegevens Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012) Projectonderdeel: Voorbeeldberekening veiligheidszone gasleiding	
Leiding- en materiaalgegevens Uitwendige middellijn [mm]: 450,0 Wanddikte [mm]: 41,0	Grondmechanische gegevens Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: 1,25
Medium Medium: ☐ Vloeistof ☒ Gas ☐ Drukloos Ontwerpdruk [N/mm²]: 0,3	Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone Waterstaatswerk: ☐ Verheeld ☒ Niet Verheeld Hoogteverschil kruin-maaiveld [m]: 2,5 ☐ Aangepaste breedte stabiliteitszone [m]: 10,0

We zien dat een aantal zaken zijn veranderd. Ten eerste moeten we de dekking van de leiding ten opzichte van het maaiveld aangeven. In dit voorbeeld hebben we een dekking van 1,25 m.

Grondmechanische gegevens Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: 1,25

Bij "medium" is het invoerveld "Volumieke massa" verdwenen.

Om de grootte van de erosiekrater worden andere formules gebruikt. Het draait hierbij om de uitstroomsnelheid van het gas (voorgeschreven in de NEN 3650-serie) en de diepteligging van de leiding. De gatgrootte is vaak een fractie van die van vloeistofleidingen.

$$\Phi = \frac{(1,4 \sqrt{p_a} \cdot v_1 \cdot D_i^2)^3}{(1,6 \cdot D_i + H)^2}$$

$$\Phi = \frac{(1,4 \sqrt{3,00} \cdot 12 \cdot 0,37^2)^3}{(1,6 \cdot 0,37 + 1,25)^2} = 13,36$$

De uitstroomsnelheid varieert met de druk. In dit voorbeeld is de uitstroomsnelheid gelijk aan 12 m/s.

$G_B = 0,7 \cdot \sqrt[3]{\Phi}$ $G_B = 0,7 \cdot \sqrt[3]{13,36} = 1,08 \text{ m}$
--

Bij dezelfde diameter en dezelfde druk (maakt vergelijking makkelijk) volgt een G_B van 1.08 m. Dus aanzienlijk minder groot dan een vloeistofleiding.



C. Berekening van een doorpersing

Bij het maken van een doorpersing door een weg is het van belang om gegevens van het materiaal te weten en we moeten weten hoe diep we de leiding moeten boren/persen. De wegbeheerder moet aangeven welke dekking aangehouden moeten worden.



Tekening en foto afkomstig van de www.jdelangevroomshoopbv.nl/raketboringen.html



Een andere manier om onder een weg door te boren is met behulp van een gesloten frontboring. Deze methode wordt toegepast wanneer er sprake is van boren onder de grondwaterstand.



C1. Voorbeeldberekening doorpersing mantelbuis

Kruising met provinciale weg

Verkeersklasse: Grafiek I (zwaarste verkeer)

Mantelbuis: drukloos.

Materiaal: staal.

Diameter: circa 600 mm.

Grondsoort: zand

Gronddekking: 1,50 m.

Geen grondwater aanwezig.

Wanneer gekozen wordt voor “Berekening”, “Nieuw” en daarna op “Doorpersing” verschijnt het volgende scherm:

Sigma 2012 3.0.9

Berekening Leidingmateriaal Grondgegevens Opties Help

DP: Voorbeeldberekening doorp...

Opslaan als... Berekenen Geavanceerd

Projectgegevens

Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)

Projectonderdeel: Voorbeeldberekening doorpersing stalen buis

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal: Staal

Kwaliteit: EN 10208 L245

Uitwendige middellijn [mm]: 200,0

Wanddikte [mm]: 14,7

☐ Rekenen met minimale wanddikte

Minimale wanddikte [mm]: 14,7

Dikte bekleding [mm]: 0,0

Verkeersbelasting

Verkeersbelasting: Grafiek I

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek:

- ☒ Geen ontlastende invloed
- ☐ Tweelagen structuur
- ☐ Drielagen structuur

Importantiefactor

1.0 ☒ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75

Opleghoeken

Horizontale steundruk: ☐ Ja ☒ Nee

Horizontale steundrukhoek [°]: 120

Medium

Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos

Ontwerpdruk [N/mm²]: 0,3

Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: 1000

Temperatuurverschil [°C]: 10,0

Grondmechanische gegevens

Grondwater: ☒ Ja ☐ Nee

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: 1,25

G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]: 0,8

Grondsoort: Klei

Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]: 17,0

Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]: 17,0

Inwendige wrijvingshoek grond [°]: 17,5

Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd: ☐ Ja ☒ Nee

Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone

Waterstaatswerk: ☒ Verheeld ☐ Niet Verheeld

Gebruik pompgegevens: ☐ Ja ☒ Nee

Ten opzichte van het scherm wat getoond werd bij de berekeningen van de veiligheidszone is in de menubalk een extra keuze verschenen, namelijk:

DP: Voorbeeldberekening doorp...

Opslaan als... Berekenen Geavanceerd

Projectgegevens

Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)

Projectonderdeel: Voorbeeldberekening doorpersing stalen buis

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal: Staal

Kwaliteit: EN 10208 L245

Importantiefactor

1.0 ☒ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75

Opleghoeken



Indien gekozen wordt voor “Geavanceerd” dan verschijnt een uitgebreider scherm, namelijk:

The screenshot shows the 'Sigma 2012 3.0.9' software window. The 'Geavanceerd' tab is selected. The 'Projectgegevens' section includes 'Naam van het project' (Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)) and 'Projectonderdeel' (Voorbeeldberekening doorpersing stalen buis). The 'Leiding- en materiaalgegevens' section includes 'Materiaal' (Staal), 'Kwaliteit' (EN 10208 L245), and various dimensions and material properties. The 'Verkeersbelasting' section includes 'Verkeersbelasting' (Grafiek I) and 'Ontlastende invloed t.g.v. wegdek' (Geen ontlastende invloed). The 'Importantiefactor' section includes a radio button for '1.0'. The 'Opleghoeken' section includes 'Horizontale steundruk' (Ja) and 'Horizontale steundrukhoek' (120). The 'Medium' section includes 'Medium' (Vloeistof) and 'Ontwerpdruk' (0,3). The 'Grondmechanische gegevens' section includes 'Grondwater' (Ja), 'Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld' (1,25), 'G.W.S. t.o.v. maaiveld' (0,8), 'Grondsoort' (Klei), 'Volumiek gewicht droge grond' (17,0), 'Volumiek gewicht natte grond' (17,0), 'Inwendige wrijvingshoek grond' (17,5), 'Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd' (Ja), and 'Aangepaste neutrale gronddruk' (0,0). The 'Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone' section includes 'Waterstaatswerk' (Verheeld) and 'Gebruik pompgegevens' (Nee).

We zien hier meer mogelijkheden dan bij het “Standaardscherm”. Er kunnen onder andere extra belastingen ingevoerd.

Ook zien we 7 blokken. Namelijk:

1. Leiding- en materiaalgegevens
2. Verkeersbelasting
3. Schadefactor
4. Opleghoeken
5. Medium
6. Grondmechanische gegevens
7. Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone

Korte beschrijving van deze blokken:

1. Leiding- en materiaalgegevens
Welk materiaal passen we toe en wat zijn de leidinggegevens.
2. Verkeersbelasting
Aangezien het een kruising met een weg is, is het berekenen van de invloed hiervan noodzakelijk
3. Schadefactor
Is afhankelijk van de omgeving van de persing. Bij wegen is de schadefactor 1,0. Bij rivierwaterkeringen 0,75 (wordt later in het cursusboek nog uitgelegd)



4. Horizontale steundruk
Afhankelijk van het type leiding én de grondslag mag eventueel horizontale steundruk in rekening worden gebracht.
5. Medium
Vloeistof, gas of drukloos.
6. Grondmechanische gegevens
Gronddekking, grondwaterstand, gegevens van de grondsoorten, allemaal nodig om de spanningen in de leiding te berekenen.
7. Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone
Van belang om vast te stellen tot hoe ver de te persen leiding moet voldoen aan de NEM 3650 serie.

Laten we eens beginnen met het standaardscherm en als materiaal "Staal" kiezen. We zien dan een pulldownmenu met staalkwaliteiten verschijnen.

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal: Staal

Kwaliteit: EN 10208 L245

Uitwendige middellijn [mm]:

Wanddikte [mm]:

☐ Rekenen met minimale wanddikte

Minimale wanddikte [mm]:

Dikte bekleding [mm]:

Rekgrens van het materiaal bij 20°C:

Elasticiteitsmodulus [N/mm²]:

Alfa Tangentiël [-]:

Alfa Axiaal [-]:

Lineaire uitzettingscoëfficiënt [(mm/mm)/°C]:

Constante van Poisson [-]:

Toelaatbare deflectie [%]:

Verkeersbelasting

Verkeersbelasting:

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek:

☒ Geen ontlastende

☐ Tweelagen structuur

☐ Drielagen structuur

☐ Extra (verkeers)belasting [kN]:

Standaard is EN 10208 L245 getoond. De rekgrens van dit materiaal is 245 N/mm². De volgorde van de staalkwaliteiten is gelijk aan die van het overzicht "Leidingmateriaal".

Nu we de staalkwaliteit gekozen hebben kunnen de gegevens van de leiding zelf uit een tabel halen. Klik met de muis op het invoerveld van de uitwendige diameter. Klik vervolgens op de rechtermuisknop en we zien in een keer welke diameters en wanddikten gebruikelijk zijn.



Overzicht diameters en wanddikten bij stalen leidingen					
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]				
	1.6	2	2.3	2.9	4
60.3	1.6	2	2.3	2.9	4
88.9	2	2.3	2.9	3.2	5.6
114.3	2.6	2.9	3.2	3.6	6.3
168.3	2.9	3.2	4	4.5	7.1
219.1	3.6	4.5	6.3	8	12.5
273	4.5	5	5.6	6.3	10
323.9	4	4.5	5.6	7.1	10
406.4	4	5	6.3	8.8	12.5
508	5	5.6	6.3	8.8	11
610	6.3	7.1	8.8	10	12.5
711	7.1	8.8	10	12.5	14.2
813	8.8	10	12.5	14.2	16
914	10	12.5	14.2	16	17.5
1016	12.5	14.2	16	17.5	20
1220	12.5	14.2	16	17.5	20

Door op een van de wanddikten te klikken verschijnen vanzelf de wanddikte en de uitwendige diameter in de juiste invoervelden.

Kies 7,1 mm in de rij van 610 mm:

Overzicht diameters en wanddikten bij stalen leidingen					
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]				
	1.6	2	2.3	2.9	4
60.3	1.6	2	2.3	2.9	4
88.9	2	2.3	2.9	3.2	5.6
114.3	2.6	2.9	3.2	3.6	6.3
168.3	2.9	3.2	4	4.5	7.1
219.1	3.6	4.5	6.3	8	12.5
273	4.5	5	5.6	6.3	10
323.9	4	4.5	5.6	7.1	10
406.4	4	5	6.3	8.8	12.5
508	5	5.6	6.3	8.8	11
610	6.3	7.1	8.8	10	12.5
711	7.1	8.8	10	12.5	14.2
813	8.8	10	12.5	14.2	16
914	10	12.5	14.2	16	17.5
1016	12.5	14.2	16	17.5	20
1220	12.5	14.2	16	17.5	20

In het invoerscherm verschijnt zowel de diameter als de wanddikte:

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal: Staal

Kwaliteit: EN 10208 L245

Uitwendige middellijn [mm]: 610,0

Wanddikte [mm]: 7,1

☐ Rekenen met minimale wanddikte

Minimale wanddikte [mm]: 7,1

De schadefactor laten we op 1 staan (uitleg komt bij de open sleuf berekening).

Bij medium kiezen we voor "Drukloos".

We hebben geen grondwater dus bij het blok "Grondmechanische gegevens" klikken we op "Nee". Als grondsoort selecteren we zandgrond.

Adviesbureau Schrijvers b.v. : inleiding Sigma 2012 versie 3.0



Verkeersbelasting staat op grafiek I, dit laten we zo.

Wanneer we alles hebben aangepast ziet het invoerscherm er als volgt uit:

Leiding- en materiaalgegevens
Materiaal: **Staal**
Kwaliteit: **EN 10208 L245**
Uitwendige middellijn [mm]: **610,0**
Wanddikte [mm]: **7,1**
☐ Rekenen met minimale wanddikte
Minimale wanddikte [mm]: **7,1**
Dikte bekleding [mm]: **0,0**

Importatiefactor
☒ 1.0 ☐ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75
Opleghoeken
Horizontale steundruk: ☐ Ja ☒ Nee
Horizontale steundrukhoek [°]: **120**
Medium
Medium ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos

Grondmechanische gegevens
Grondwater: ☐ Ja ☒ Nee
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: **1,5**
Grondsoort: **Zand**
Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]: **17,0**
Inwendige wrijvingshoek grond [°]: **17,5**
Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd: ☐ Ja ☒ Nee
Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone
Waterstaatswerk: ☒ Verheeld ☐ Niet Verheeld

Verkeersbelasting
Verkeersbelasting: **Grafiek I**
Ontlastende invloed t.g.v. wegdek:
☒ Geen ontlastende invloed
☐ Tweelagen structuur
☐ Drielagen structuur

We moeten alleen nog de grondeigenschappen invullen. Het volumiek gewicht en de inwendige wrijvingshoek halen we uit de tabel van de grondgegevens. Door op het vraagteken te klikken komt de tabel met grondgegevens tevoorschijn.

Grondmechanische gegevens
Grondwater: ☐ Ja ☒ Nee
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: **1,5**
Grondsoort: **Zand**
Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]: **17,0**
Inwendige wrijvingshoek grond [°]: **17,5**
Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd: ☐ Ja ☒ Nee

Overzicht grondparameters volgens NEN 3650											
			Zand				Klei				Veen
			Vast		Matig	Los	Vast		Matig	Slap	Slap
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	[kN/m³]	20	19	18	17	20	19	17	14	10
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	[kN/m³]	22	21	20	19	20	19	17	14	10
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	[°]	40	35	32.5	30	25	17.5	17.5	17.5	15
Effectieve cohesie	c'	[kN/m²]	0	0	0	0	15	13	5	0	2.5
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	[kN/m²]	0	0	0	0	200	100	50	25	20
E-modulus sleufmateriaal	E_1	[MN/m²]	20	20	10	5	2	2	1	0.5	0.2
E-modulus ondergrond	E_{100}	[MN/m²]	110	75	45	15	10	10	2	1	0.5
Samendrukkingsconstante	C_p	[-]	1500	1000	600	200	30	25	15	7	7.5
Relatieve verplaatsing	δ_d	[mm]	1-3	1-3	3-5	5-8	2-4	2-4	4-6	6-10	10-15



Bij zand zien we drie soorten staan. Losgepakt zand, matig vast gepakt zand en vastgepakt zand. Naarmate het zand harder wordt, worden de waarden hoger.

Indien op het vraagteken wordt geklikt verschijnt er nog een optie, namelijk "Vul grondgegevens in". Tevens verschijnt het overzicht van de grondgegevens.

We zien hier dus grondgegevens die vermeld zijn in de NEN 3650:2012 en gegevens die vermeld zijn in de NEN 6740.

Na selectie van een grondsoort worden de benodigde parameters ingevuld.

Stel de keuze is matig zand:

Na selectie verschijnt.....

We hebben nu het volgende invoerscherm:



Projectgegevens

Naam van het project:

Projectonderdeel:

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal:

Kwaliteit:

Uitwendige middellijn [mm]:

Wanddikte [mm]:

☐ Rekenen met minimale wanddikte

Minimale wanddikte [mm]:

Dikte bekleding [mm]:

Verkeersbelasting

Verkeersbelasting:

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek:

- ☒ Geen ontlastende invloed
- ☐ Tweelagen structuur
- ☐ Drielagen structuur

Importatiefactor

☒ 1.0 ☐ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75

Opleghoeken

Horizontale steundruk: ☐ Ja ☒ Nee

Horizontale steundrukhoek [°]:

Medium

Medium: ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos

Grondmechanische gegevens

Grondwater: ☐ Ja ☒ Nee

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]:

Grondsoort:

Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]:

Inwendige wrijvingshoek grond [°]:

Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd: ☐ Ja ☒ Nee

Gegevens waterstaatswerk i.v.m. berekening veiligheidszone

Waterstaatswerk: ☒ Verheeld ☐ Niet Verheeld

En wanneer we op “Berekenen” drukken krijgen we de berekeningsresultaten te zien.



Sigma 2012 3.0

Computerprogramma om leidingen conform de
NEN 3650:2012 te berekenen

DEEL 3



1. Berekening van een horizontaal gestuurde boring

Een van de meest gebruikte onderdelen van het programma Sigma hebben wij gemerkt. Drie zaken kunnen worden uitgerekend met Sigma 2012:

- Sterkteberekening van de in te trekken leiding(en)
- Berekenen van de toelaatbare en minimaal benodigde boorspoeldrukken
- Berekening van de kwelweg

Wij behandelen eerst de sterkteberekening.

1.1 Sterkteberekening van de in te trekken leidingen.

Wanneer het invoerscherm wordt gekozen verschijnt het volgende:

The screenshot shows the 'Berekening' (Calculation) window of the Sigma 2012 software. The window has a menu bar with 'Berekening', 'Leidingmateriaal', 'Grondgegevens', 'Opties', and 'Help'. Below the menu bar is a toolbar with 'Opslaan als...' (Save as...) and 'Berekenen' (Calculate). The main area is divided into several sections:

- Projectgegevens** (Project data):
 - Naam van het project (Project name): Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)
 - Projectonderdeel (Project part): Berekening 1: horizontaal gestuurde boring
- Gegevens** (Data) tab is selected, with a sub-tab 'Boorprofiel' (Drilling profile).
- Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)** (Pipe and material data (Medium pipe)):
 - Materiaal (Material): PE
 - Kwaliteit (Quality): PE 100
 - Uitwendige middellijn [mm] (Outer diameter [mm]): 200,0
 - Wanddikte [mm] (Wall thickness [mm]): 18,2
 - Dikte bekleding [mm] (Coating thickness [mm]): 0,0
- Medium (Mediumleiding)** (Medium (Medium pipe)):
 - Medium: ☒ Vloeistof (Liquid) ☐ Gas ☐ Drukloos (Pressureless)
 - Ontwerpdruk [N/mm²] (Design pressure [N/mm²]): 0,3
 - Volumieke massa vloeistof [kg/m³] (Volume mass liquid [kg/m³]): 1000
 - Temperatuurverschil [°C] (Temperature difference [°C]): 10,0
- Boorspoeling en overige gegevens** (Drilling fluid and other data):
 - Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm] (Diameter larger than drilling fluid pressure [mm]): 300
 - Diameter boorstang [mm] (Drill rod diameter [mm]): 53
 - Zwichtspanning boorvloeistof [Pa] (Drilling fluid weight pressure [Pa]): 15,0
 - Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³] (Specific weight drilling fluid [kN/m³]): 11,5
 - Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%] (Percentage circumference in contact with bentonite [%]): 100
 - Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm] (Weight filling/extra weight on roller track [N/mm]): 0,0
 - Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm] (Weight filling/extra weight at drilling point [N/mm]): 0,0
- Mediumbuis/mantelbuis** (Medium pipe/cover pipe):
 - ☒ Enkele buis (Single pipe) ☐ Mantelbuis + mediumbuis (Cover pipe + medium pipe)
- Bovengronds** (Above ground):
 - ☒ Maaiveld (Ground level) ☐ Rollenbaan (Roller track)
- Ondergronds** (Below ground):
 - ☒ Normaal (Normal) ☐ Bundel (Bundle) ☐ Moeilijke situatie/grind (Difficult situation/grind)



We zien een invoerscherm met twee tabbladen.

Op het eerste tabblad moeten de gegevens als leidingmateriaal en procescondities worden ingevoerd. Ook wordt gevraagd om gegevens van de boorspoeling, het wel of niet gebruiken van een rollenbaan en de boorcondities. We zien hier de verschillende keuzes. Dit is de standaard-invoer van het programma.



Wanneer we kiezen voor de “geavanceerde” versie dan zien we het volgende scherm:

The screenshot shows the 'Sigma 2012 3.0.9' software window with the 'Berekening' (Calculation) menu open. The 'Geavanceerd' (Advanced) tab is selected. The interface is divided into several sections for inputting data:

- Projectgegevens** (Project Data):
 - Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)
 - Projectonderdeel: Berekening 1: horizontaal gestuurde boring
- Gegevens** (Data):
 - Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)** (Piping and material data (Medium piping)):
 - Materiaal: PE
 - Kwaliteit: PE 100
 - Uitwendige middellijn [mm]: 200,0
 - Wanddikte [mm]: 18,2
 - Dikte bekleding [mm]: 0,0
 - Lange-duur treksterkte [N/mm²]: 10,0
 - Materiaalfactor [-]: 1,25
 - Elasticiteitsmodulus lange duur [N/mm²]: 350,0
 - Elasticiteitsmodulus korte duur [N/mm²]: 975,0
 - Alfa Tangentiële [-]: 0,65
 - Alfa Axiaal [-]: 0,65
 - Lineaire uitzettingscoëfficiënt [(mm/mm)·K⁻¹]: 0,00016
 - Constante van Poisson [-]: 0,4
 - Minimaal vereiste ringstijfheid [kN/m²]: 0,5
 - Soortelijk gewicht buis [kN/m³]: 9,55
 - Toelaatbare deflectie [%]: 8,00
 - Medium (Mediumleiding)** (Medium (Medium piping)):
 - Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos
 - Ontwerpdruk [N/mm²]: 0,3
 - Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: 1000
 - Temperatuurverschil [°C]: 10,0
 - Boorspoeling en overige gegevens** (Drilling fluid and other data):
 - Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]: 300
 - Diameter boorstang [mm]: 53
 - Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]: 15,0
 - Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]: 11,5
 - Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]: 100
 - Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]: 0,0
 - Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]: 0,0
 - Mediumbuis/mantelbuis** (Medium pipe/cover pipe):
 - ☒ Enkele buis ☐ Mantelbuis + mediumbuis
 - Bovengronds** (Above ground):
 - ☒ Maaiveld ☐ Rollenbaan
 - Ondergronds** (Below ground):
 - ☒ Normaal ☐ Bundel ☐ Moeilijke situatie/grind
 - Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren** (Variable uncertainty and friction factors):
 - Totaalfactor bij normale boring: 1,4
 - Belastingfactor ondergronds: 1,4
 - Belastingfactor bovengronds: 1,1
 - Wrijvingscoëff. zonder rollenbaan: 0,3
 - Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm²]: 0,00005
 - Wrijving tussen leiding/boorgangwand: 0,2

Bij de leiding- en materiaalgegevens kunnen alle parameters worden gewijzigd. Daarnaast zien we dat de onzekerheids- en wrijvingsfactoren gewijzigd kunnen worden. In het algemeen is het niet nodig (en wenselijk) om dergelijke factoren te wijzigen.



Wanneer sprake is van een boring van een mantelbuis met daar in een mediumbuis dan moeten we dit aangeven via de keuze:

Zodra we dit doen verschijnt het volgende scherm (standaard):

Gegevens | Boorprofiel

Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)

- Materiaal: PE
- Kwaliteit: PE 100
- Uitwendige middellijn [mm]: 200,0
- Wanddikte [mm]: 18,2
- Dikte bekleding [mm]: 0,0

Medium (Mediumleiding)

- Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos
- Ontwerpdruk [N/mm²]: 0,3
- Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: 1000
- Temperatuurverschil [°C]: 10,0

Leiding- en materiaalgegevens (Mantelbuis)

- Materiaal: Staal
- Kwaliteit: EN 10208 L245
- Uitwendige middellijn [mm]: 273,0
- Wanddikte [mm]: 5,6
- Dikte bekleding [mm]: 0,0

Medium (Mantelbuis)

- Medium: ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos

Mediumbuis/mantelbuis

- ☐ Enkele buis
- ☒ Mantelbuis + mediumbuis

Bovengronds

- ☒ Maaiveld
- ☐ Rollenbaan

Ondergronds

- ☒ Normaal
- ☐ Bundel
- ☐ Moeilijke situatie/grind

Thinsulators

Thinsulators: ☐ Ja ☒ Nee

Boorspoeling en overige gegevens

- Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]: 300
- Diameter boorstang [mm]: 53
- Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]: 15,0
- Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]: 11,5
- Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]: 100
- Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]: 0,0
- Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]: 0,0

We zien dat gegevens van zowel de mediumbuis als de mantelbuis worden gevraagd.

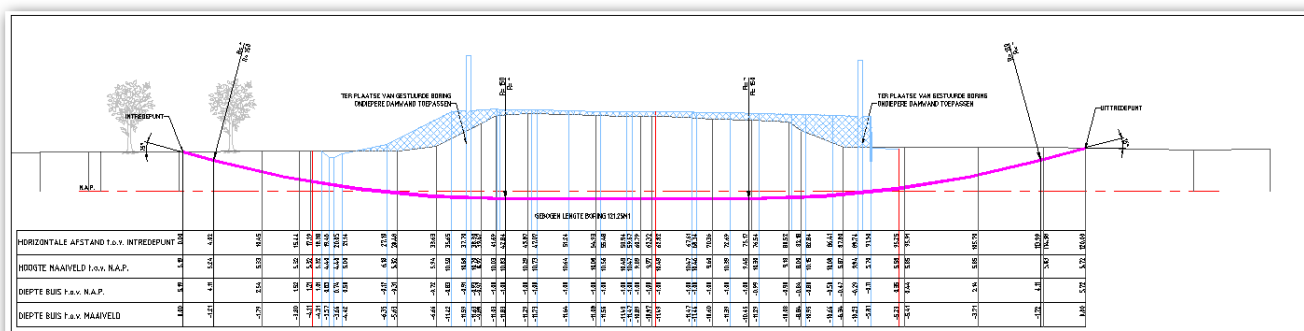


☒ Bovengronds ☒ Maaiveld ☐ Rollenbaan	Om de trekkrachten te berekenen op de leiding moeten we invoeren of we een rollenbaan (of haspel) gebruiken of niet. Indien we "Maaiveld" aanvinken dan brengen we een (standaard) wrijvingscoëfficiënt in rekening van 0,3. Anders brengen we 0,1 in rekening.
☒ Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren Totaalfactor bij normale boring: 1,4_ Belastingfactor ondergronds: 1,4_ Belastingfactor bovengronds: 1,1_ Wrijvingscoëff. zonder rollenbaan: 0,3_ Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm ²]: 0,00005 Wrijving tussen leiding/boorgangwand: 0,2_	Deze coëfficiënten zien we wanneer we op geavanceerd klikken en kunnen dan eventueel nog gewijzigd worden.

Voor het ondergronds intrekken van de leiding gaat de NEN 3650 serie uit van drie situaties.

☒ Ondergronds ☒ Normaal ☐ Bundel ☐ Moeilijke situatie/grind	1. Normale omstandigheden → recht toe recht aan boring zonder bijzondere bochten of grondslag 2. Bundels → 2 of meer buizen al of niet verschillend qua diameter 3. Moeilijke omstandigheden / lastige grondslag → Meestal boring die veel ervaring vraagt van boormeester
---	--

Het tweede tabblad gaat met name over het tracé van de te boren leiding / bundel.



Feitelijk bestaat elke horizontaal gestuurde boring uit minimaal dezelfde kenmerken.

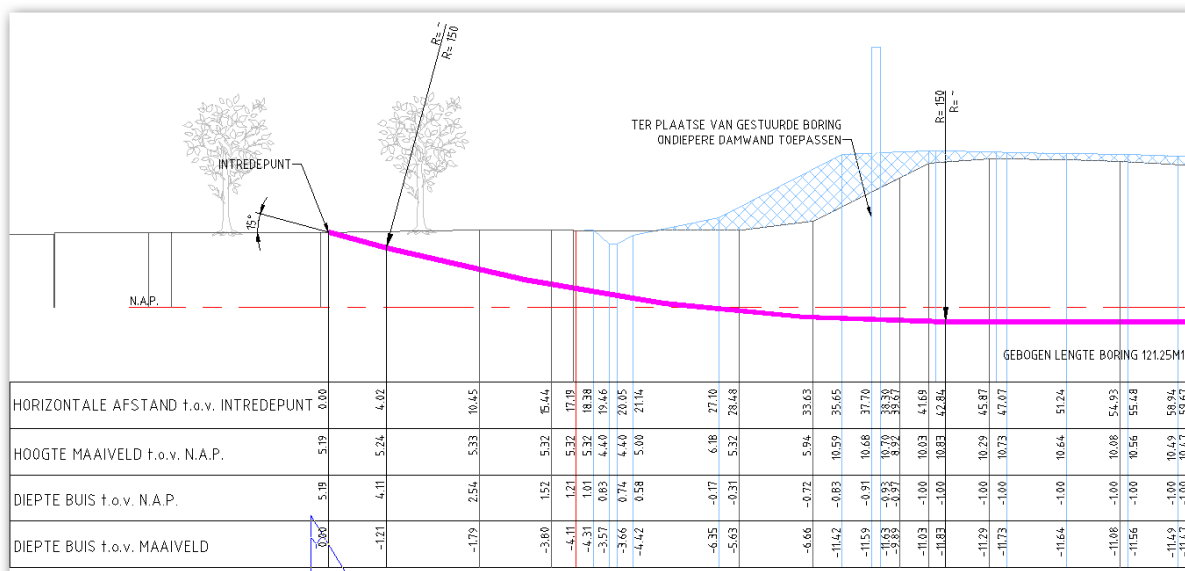
Er is een beginpunt en een eindpunt. De start en het eind van de boring ligt vaak vast wegens lokale omstandigheden. Dit kan het aansluitende tracé zijn, of lokaal aanwezige bebouwing.

De wegbeheerder of de waterkeringbeheerder eist een bepaalde dekking.

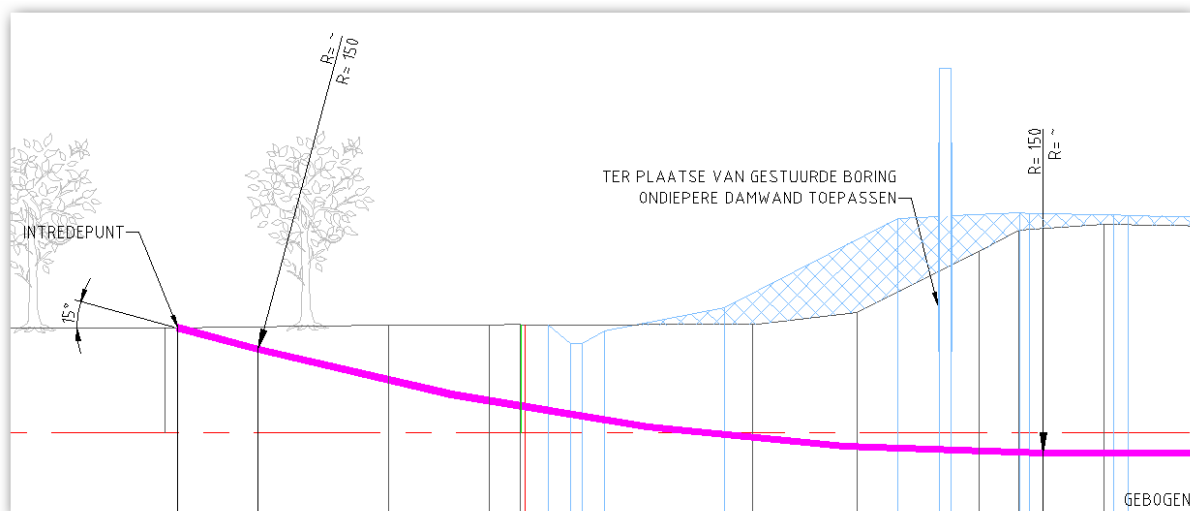


We hebben dan ook altijd te maken met een intredepunt (waar de boormachine staat) en een uitredepunt (waar de boormeester moet zien uit te komen). De helling waarmee een boorstelling kan boren is machine-afhankelijk.

Wanneer we de linkerhelft van dit boorprofiel vergroten zien we het volgende:



En wanneer we inzoomen op de boring zelf krijgen we:



We zien hier de intredehoek van 15 graden en een kromtestraal van 150 m.



In Sigma 2012 staat het boorprofiel op tabblad 2.

Sigma 2012 3.0.9

Berekening Leidingmateriaal Grondgegevens Opties Help

HDD: Berekening 1: horizontaal...

Opslaan als... Berekenen Geavanceerd

Projectgegevens

Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)

Projectonderdeel: Berekening 1: horizontaal gestuurde boring

Gegevens **Boorprofiel**

Boorprofiel

		Langs de buis		Horizontaal		Langs de buis		Horizontaal	
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	25,0	Lengte 1e rechte deel L_1 [m]	7,0	6,34	Lengte na 1e deel [m]	7,0	6,34		
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	25,0	Lengte neergaande bocht L_2 [m]	24,0	23,24	Lengte na 2e deel [m]	31,0	29,58		
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	55,0	Lengte 2e rechte deel L_3 [m]	38,0	38,0	Lengte na 3e deel [m]	69,0	67,58		
Straal neergaande bocht R_1 [m]	55,0	Lengte opgaande bocht L_4 [m]	24,0	23,24	Lengte na 4e deel [m]	93,0	90,82		
Straal opgaande bocht R_2 [m]	55,0	Lengte 3e rechte deel L_5 [m]	7,0	6,34	Totale lengte [m]	100,0	97,16		

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. v. beddie conste [N/mm²]
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
Neergaande bo...	31,0	29,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
2e rechte deel	50,0	48,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	

Profielsschets



Wanneer we het tabblad vergroten krijgen we het volgende te zien:

Boorprofiel

		Langs de buis	Horizontaal		Langs de buis	Horizontaal
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	25,0	Lengte 1e rechte deel L ₁ [m]	7,0	6,34	Lengte na 1e deel [m]	7,0
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	25,0	Lengte neergaande bocht L ₂ [m]	24,0	23,24	Lengte na 2e deel [m]	31,0
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	55,0	Lengte 2e rechte deel L ₃ [m]	38,0	38,0	Lengte na 3e deel [m]	69,0
Straal neergaande bocht R ₁ [m]	55,0	Lengte opgaande bocht L ₄ [m]	24,0	23,24	Lengte na 4e deel [m]	93,0
Straal opgaande bocht R ₂ [m]	55,0	Lengte 3e rechte deel L ₅ [m]	7,0	6,34	Totale lengte [m]	100,0

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. v. beddij constan [N/mm²]
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
Neergaande bo...	31,0	29,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
2e rechte deel	50,0	48,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	

Profielsschets

De invoer van zowel het boorprofiel als de dekkingen en dergelijke wordt gelijk in het scherm getoond.

Wanneer we de intredehoek bij de boorstelling aanpassen van 25 graden naar 20 graden:

Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]

Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]

Straal maaiveld/rollenbaan [m]

Straal neergaande bocht R₁ [m]

Straal opgaande bocht R₂ [m]

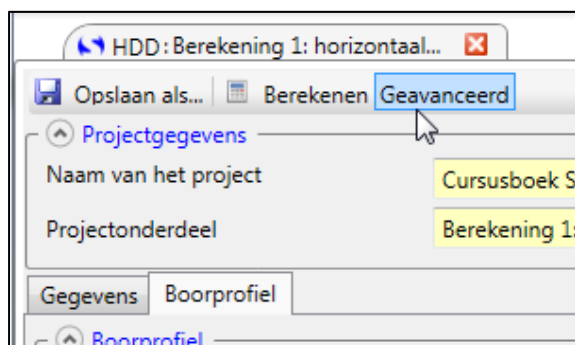
Dan verschijnt het volgende scherm:

We zien gelijk de consequenties van de aanpassing. De boring begint steiler en wanneer we de dekking niet aanpassen hebben we nu te maken met een andere maaiveld. Er is dus een relatie tussen het boorprofiel en de dekkingen.



In Sigma 2012 is de invoer van het boorprofiel in vergelijking met Sigma 2010 verder uitgebreid.

De meest recente versie is uitgebreid met de mogelijkheid om gereduceerde grondbelasting te berekenen en dit is mogelijk door op “Geavanceerd” te klikken.



We zien dan onderstaand scherm:

Gegevens **Boorprofiel**

Boorprofiel

		Langs de buis		Horizontaal		Langs de buis		Horizontaal	
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	25,0	Lengte 1e rechte deel L1 [m]	7,0	6,34	Lengte na 1e deel [m]	7,0	6,34		
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	25,0	Lengte neergaande bocht L2 [m]	24,00	23,24	Lengte na 2e deel [m]	31,00	29,58		
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	55,0	Lengte 2e rechte deel L3 [m]	38,0	38,0	Lengte na 3e deel [m]	69,00	67,58		
Straal neergaande bocht R1 [m]	55,0	Lengte opgaande bocht L4 [m]	24,0	23,24	Lengte na 4e deel [m]	93,00	90,82		
Straal opgaande bocht R2 [m]	55,0	Lengte 3e rechte deel L5 [m]	7,0	6,34	Totale lengte [m]	100,00	97,16		

Opleghoeken
 Belastinghoek [°] 180
 Ondersteuningshoek [°] 120

Partiële factor
 Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd ☐ Ja ☒ Nee

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm³]	Gereduceerde grondbelasting
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen
Neergaande bocht	31,0	29,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen
2e rechte deel	50,0	48,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen

Profiel

1e rechte deel 2e rechte deel 3e rechte deel

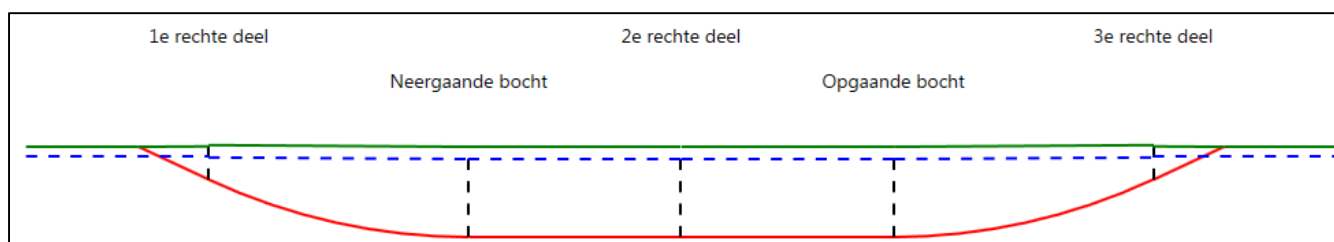
Neergaande bocht Opgaande bocht

In het midden zien we een scrollbar. Wanneer we hier mee schuiven zien we dat meer invoer mogelijk is.

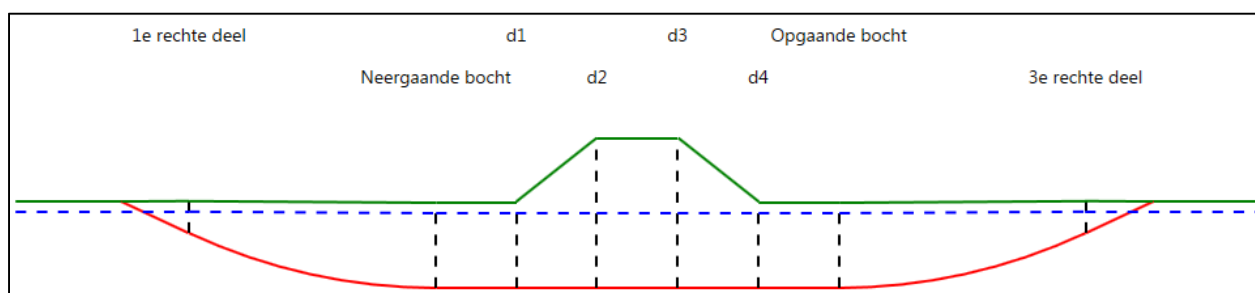
Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm³]	Gereduceerde grondbelasting	Extra (verkeers) belasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting	Horizontale steundruk
7,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek ½ x II	☐
7,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek II	☐
7,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek I	☐
7,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek II	☐
7,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek ½ x II	☐



Dit tracé ziet er in dwarsprofiel als volgt uit:

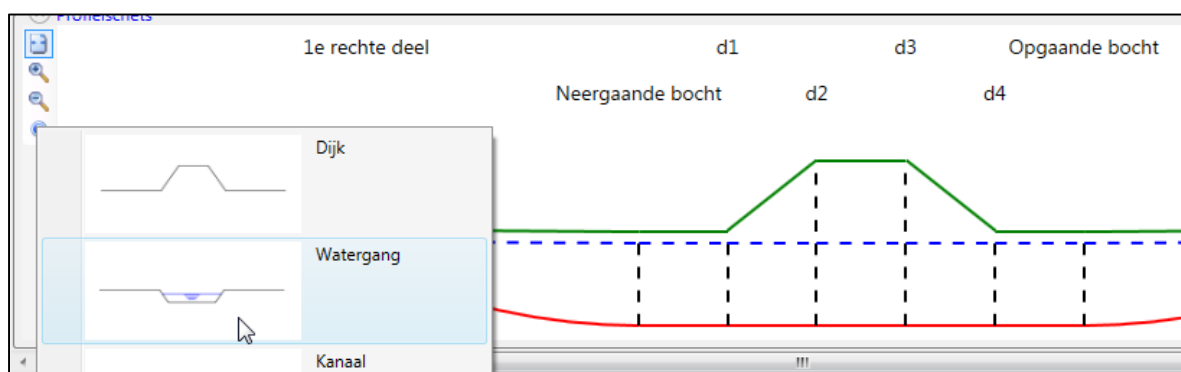


Er kan ook sprake zijn van de kruising met een dijk. In dat geval moet zo'n dijkprofiel, maar dit kan ook een weglichaam zijn, makkelijk worden ingevoerd via de knop aan de linkzijde van dit scherm.

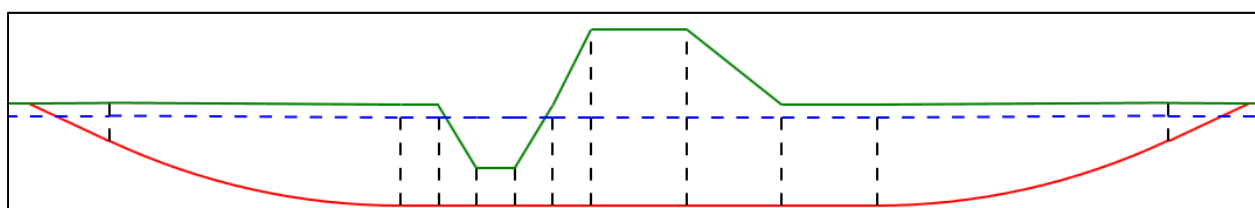


De dijk is in het midden ingetekend.

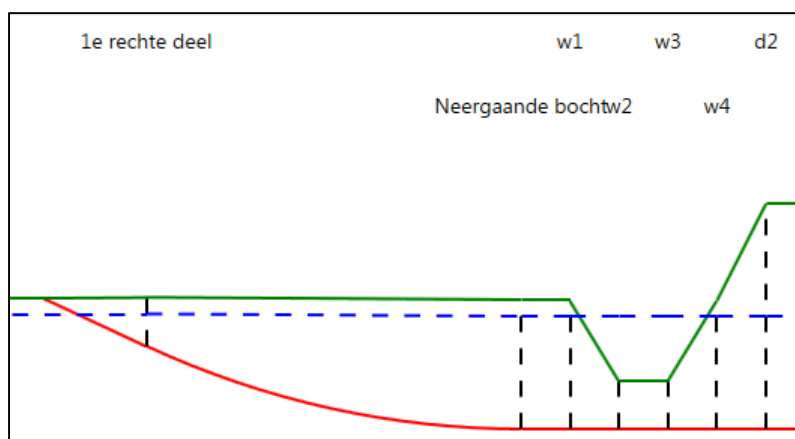
Vaak ligt er langs een dijk aan een of twee zijden een watergang. Dit kan ook worden ingetekend.



Klik op het vraagteken aan de linkerzijde, kies vervolgens “Watergang” en deze wordt ingetekend.



Wanneer we inzoomen zien we dit:



De watergang is ingetekend maar er moet wel even naar o.a. de waterdiepte kijken.

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	✓	1,0
Neergaande bo...	31,0	29,58	8,0	✓	1,0
w1	34,04	32,62	8,0	✓	1,0
w2	37,08	35,66	3,0	✓	-4,0
w3	40,12	38,7	3,0	✓	-4,0
w4	43,16	41,74	8,0	✓	1,0
d2	46,2	44,78	14,0	✓	7,0
d3	53,8	52,38	14,0	✓	7,0
d4	61,4	59,98	8,0	✓	1,0
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	✓	1,0
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	✓	1,0

In het middelste scherm zien we een aantal gegevens over de breedte en de diepte.

De afstanden (zowel langs de boorlijn als horizontaal), de gronddekking en de grondwaterstand.

Door gebruik te maken van een minteken wordt aangegeven dat het water boven het maaiveld staat.



Met de horizontaal gestuurde boormethode worden dagelijks kanalen gekruist. Zo'n kanaal kan snel worden "ontworpen". Eerst verwijderen we de watrgang en de dijk van de vorige pagina.

1. Selecteer de regel die verwijderd moet worden.
2. Klik op het kruisje aan de linkerzijde.
3. De gehele regel verdwijnt.

Let op! Deze actie is niet omkeerbaar. Dus verwijderd is definitief verwijderd. Sla eventueel het ontwerp eerst op door op de diskette te klikken.

Er blijven altijd 5 doorsneden in het profiel. Dus we zien dit:

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	☒	1,0
Neergaande bo...	31,0	29,58	8,0	☒	1,0
d4	61,4	59,98	8,0	☒	1,0
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	☒	1,0
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	☒	1,0

De naam "d4" kan gewijzigd worden (vrije invoer).

Ook kan het punt verplaatst worden.

Dit kan bij zowel de kolom "Afstand" als de kolom "Horizontale afstand t.o.v. intredepunt". Wordt de ene kolom ingevoerd dan verandert de afstand ook in de andere kolom.



Berekeningsvoorbeeld 1: Boring van één buis Ø 200 mm

Uitgangspunt: het startscherm van Sigma.

HDD: Voorbeeldberekening borin... x

Opslaan als... Berekenen Geavanceerd

Projectgegevens

Naam van het project: Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)

Projectonderdeel: Voorbeeldberekening boring PE 200 mm SDR 11

Gegevens **Boorprofiel**

Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)

Materiaal: PE

Kwaliteit: PE 100

Uitwendige middellijn [mm]: 200,0

Wanddikte [mm]: 18,2

Dikte bekleding [mm]: 0,0

Medium (Mediumleiding)

Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos

Ontwerpdruk [N/mm²]: 0,3

Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: 1000

Temperatuurverschil [°C]: 10,0

Mediumbuis/mantelbuis

☒ Enkele buis ☐ Mantelbuis + mediumbuis

Bovengronds

☒ Maaiveld ☐ Rollenbaan

Ondergronds

☒ Normaal ☐ Bundel ☐ Moeilijke situatie/grind

Boorspoeling en overige gegevens

Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]: 300

Diameter boorstang [mm]: 53

Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]: 15,0

Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]: 11,5

Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]: 100

Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]: 0,0

Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]: 0,0

Aspecten aangaande de boorspoeling worden later besproken.

Materiaalgegevens		
Materiaal soort:	PE	
Kwaliteit:	PE 100 SDR 11	
Lange-duur treksterkte	MRS = 10	N/mm ²
Materiaalfactor	$\gamma_M = 1,25$	-
Toelaatbare langeduur spanning	$\sigma_t = 8,00$	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus korte duur	E = 975	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus lange duur	E' = 350	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$\alpha_g = 16,0 \cdot 10^{-5}$	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiëel / Alfa Axiaal	$\alpha_\sigma = 0,65$	-
Soortelijk gewicht buis	$\rho_L = 9,55$	kN/m ³
Toelaatbare deflectie	$\delta = 8$	%

Materiaalgegevens zijn vermeld in de NEN 3650:2012



Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D_e	= 200,00	mm
Wanddikte	d_n	= 18,2	mm
Procesgegevens			
Soort leiding (Vloeistof / Gas / Drukloos)		= Vloeistof	
Volumieke massa vloeistof	ρ	= 1000	kg/m ³
Temperatuurverschil	Δt	= 10	°
Ontwerpdruk	p_d	= 0,3	N/mm ²

De wanddikte is afhankelijk van de te berekenen leiding.

Qua procescondities hebben we het over vloeistofleidingen, gasleidingen of drukloze leidingen.

Uitvoeringsaspecten, tracé boring, in- en uittredehoeken, onzekerheids- en wrijvingsfactoren			
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet		= 100	%
Soortelijk gewicht boorvloeistof	ρ_m	= 11,5	kN/m ³
Zwichtspanning boorvloeistof	τ_y	= 15	Pa
Leiding wordt niet verzwakt t.p.v. rollenbaan			
Leiding wordt niet verzwakt t.p.v. boorgang			
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk	D_g	= 300	mm
Diameter boorstang	D_b	= 53	mm
Totale lengte	L	= 100,00	m
Lengte 1e rechte deel	L_1	= 7,00	m
Lengte neergaande bocht	L_2	= 24,00	m
Lengte 2e rechte deel	L_3	= 38,00	m
Lengte opgaande bocht	L_4	= 24,00	m
Lengte 3e rechte deel	L_5	= 7,00	m
Straal maaiveld/rollenbaan	R_r	= 55,00	m
Straal neergaande bocht	R_1	= 55,00	m
Straal opgaande bocht	R_2	= 55,00	m
Intrede-hoek (bij boorstelling)	α_1	= 25,00 / 46,63	° / %
Uittrede-hoek (bij rollenbaan)	α_2	= 25,00 / 46,63	° / %
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 120	°
Horizontale steundrukhoek	γ	= 120	°
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1	
Totaalfactor bij normale boring	f	= 1,4	
Belastingfactor	$f_{k,b}$	= 1,1	
Belastingfactor	$f_{k,o}$	= 1,4	
Wrijvingscoëff. zonder rollenbaan	f_1	= 0,3	
Wrijving tussen leiding/boorvloeistof	f_2	= 0,00005	N/mm ²
Wrijving tussen leiding/boorgangwand	f_3	= 0,2	

Bij een horizontaal gestuurde boring worden de spanningen die optreden tijdens het intrekken berekend. Ook is het nodig om de maximale en toelaatbare boorspoeldrukken te berekenen.



Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting							
Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
1e rechte deel	7	3,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
Neergaande bocht	31	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
2e rechte deel	50	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
Opgaande bocht	69	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
3e rechte deel	93	3,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Geen	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Geen	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
2e rechte deel	Geen	-	10,00	2,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Geen	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
3e rechte deel	Geen	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II

Bij elke doorsnede zijn gegevens over de dekking, de grondwaterstand, de grond en het verkeer nodig. Het aantal punten is onbeperkt qua invoer.



Wanneer we kijken naar de berekeningsresultaten vanaf blz. 4 zien we het volgende:

2. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 163,60	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 181,80	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 200,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 100,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 81,80	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 90,90	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 43.375.425,69	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 433.754,26	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 502,38	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 55,21	mm ³ /mm ¹
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 10.394,78	mm ²
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 0,0993	N/mm ¹

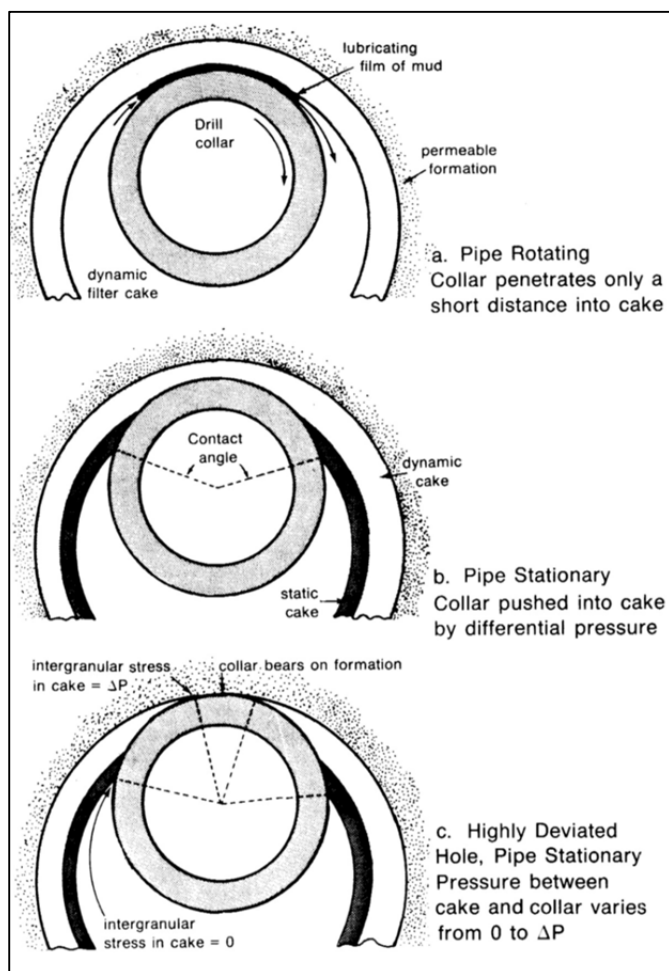
Er zal aan de buis moeten worden getrokken. Van belang is om vast te stellen hoeveel die buis weegt. Het gewicht van de leiding is gelijk aan het soortelijk gewicht s.g. * de buisoppervlakte A.

3. Berekening van het gewicht van de leiding tijdens het intrekken van de leiding			
	Leiding op rollenbaan/maaiveld		Leiding in boorgat
Gewicht mediumleiding	g	= 0,0993 N/mm ¹	g = 0,0993 N/mm ¹
Gewicht vulling	g_{vul}	= N.v.t. +	g_{vul} = N.v.t. +
Totaal gewicht	g_{rol}	= 0,0993 N/mm ¹	g_{gat} = 0,0993 N/mm ¹

Het kan nuttig zijn om de buis te vullen met water. Dit hangt af van het gewicht van de leiding in relatie met de boorvloeistof. Wanneer er sprake is van een zware buis met lichte boorvloeistof, zal de buis over de hele boorgang op de bodem van het gat rusten. Tijdens het trekken geeft dit wrijving.

Andersom zal bij een lichte buis met zware boorvloeistof het omgekeerde gelden: de buis drijft op tegen de boorwandgang en dit veroorzaakt een grotere trekkracht. Een aannemer kan ervoor kiezen om de boorbuis te ballasten door deze geheel of gedeeltelijk te vullen. Bij grote diameters verkiest men vaak voor de oplossing om de buis bovengronds niet te vullen en ondergronds in het boorgat wel. Dit vanwege de gewenste hanteerbaarheid bovengronds tijdens het intrekken in combinatie met het ophijsen. Men vult de leiding via een binnenbuis zodra de buis in het boorgat verdwijnt.

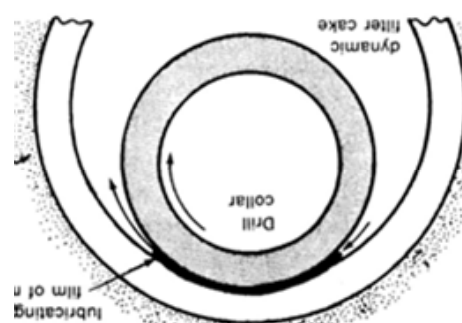
Een andere oplossing is de buis te voorzien van een geheel of gedeeltelijk gevulde binnenbuis. Waarom kiest men er voor om een leiding te vullen?



Tijdens het intrekken van de leiding kan deze tegen de bovenkant van het boorgat te liggen.

Bij hard trekken (krap ontwerp, grote stijfheid van de buis) trek de boorstelling de buis de grond in. Dit geeft extra wrijving.

Door de opwaartse kracht drijft een lichte buis op en raakt de buis de bovenkant van het gat. Is de buis zwaar dan rust deze op de onderkant van het gat.



Bij het trekken veroorzaakt ook dit wrijving.

Tijdens het intrekken van de leiding kan deze opdrijven. Hoe groter de leiding opdrijft hoe hoger de trekkrachten worden.



Ad. 4 Berekening van de trekkrachten en spanningen bovengrond

Bovengronds ligt de leiding op een rollenbaan of op het maaiveld. Trekken aan dit deel van de leiding betekent overwinnen van wrijving. De formule die gebruikt wordt om de trekkracht bovengronds te berekenen is:

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = 1,4 \cdot L \cdot 0,0993 \cdot 0,3$$

T_1 = bovengrondse trekkracht

f = rekenfactor ter grootte van 1,4 (dit is een constante sinds NEN 3650:2012)

L = lengte van de leiding bovengronds in mm

g_{rol} = gewicht van de leiding in N

f_1 = onzekerheidsfactor die variërend van 0,1 tot 0,3

Het gewicht van de leiding is uit te rekenen wanneer het soortelijk gewicht van het leidingmateriaal bekend is. Bij staal is dit gewicht gelijk aan 78,5 kN/m³. Bij PE is dit gewicht gelijk aan 9,55 kN/m³. Door het soortelijk gewicht te vermenigvuldigen met het oppervlak van de leiding weten we het gewicht per mm¹ of per m¹.

$$g_{leiding} = s \cdot g_{materiaal} \cdot A_{leiding}$$

$g_{leiding}$ = gewicht van de leiding in kN/m

$s \cdot g_{materiaal}$ = soortelijk gewicht van het leidingmateriaal in kN/m³

$A_{leiding}$ = oppervlakte van de leiding in m²

ofwel in eenheden:

$$g_{leiding} = \frac{kN}{m^3} \cdot m^2 = \frac{kN}{m^1}$$

Oppervlak van de leiding is in de printuitvoer aangegeven in mm².

Omrekenen naar m² betekent vermenigvuldigen met 10⁻⁶. Dit geeft de volgende formule:

$$g_{leiding} = s \cdot g_{materiaal} \cdot A_{leiding} \cdot 10^{-6}$$

Gelet op dit rekenvoorbeeld volgt dan 9,55 * 10.394,78 * 10⁻⁶ = 0,0993 N/mm¹



4.1 Berekening van de benodigde trekkrachten op rollenbaan/maaiveld

Trekkracht T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N]
Starten met trekken	100,00	4.169
Na 1 ^e deel intrekken	93,00	3.877
Na 2 ^e deel intrekken	69,00	2.877
Na 3 ^e deel intrekken	31,00	1.292
Na 4 ^e deel intrekken	7,00	292

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = 1,4 \cdot L \cdot 0,0993 \cdot 0,3$$

De grootste trekkracht treedt op bij de start van de trekoperatie en is gelijk aan 4.169 N, ofwel 4,169 kN. Dit is gelijk aan 0,4169 ton.

Nu de trekkracht T berekend is kunnen we de optredende spanningen uitrekenen.

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

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	4.169	0,40
Na 1 ^e deel intrekken	3.877	0,37
Na 2 ^e deel intrekken	2.877	0,28
Na 3 ^e deel intrekken	1.292	0,12
Na 4 ^e deel intrekken	292	0,03

$$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{10.394,78}$$

De optredende trekkracht is gelijk aan de Trekkracht / Oppervlakte leiding.

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

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

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{43.375.426}{55.000} = 845.820,80 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{845.820,80}{433.754} = \mathbf{1,95 \text{ N/mm}^2}$$

Behalve het trekken aan de leiding speelt ook de kromming van de boring een belangrijke rol. Het optredende moment ten gevolge van de kromming is uit te rekenen via een eenvoudige formule:



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

M_b = optredend moment in Nmm

$f_{k,b}$ = rekenfactor van 1,1

E = elasticiteitsmodulus van de leiding in N/mm²

I_b = traagheidsmoment van de buis mm⁴

R_r = straal van de leiding op rollenbaan/ maaiveld in mm

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{43.375.426}{55.000} = 845.820,80 \text{ Nmm}$$

De elasticiteitsmodulus van PE 100 bedraagt 975 N/mm². Bij staal is de elasticiteitsmodulus circa 210.000 N/mm². Dus staal is veel stijver.

De kromtestraal op de rollenbaan is onderdeel van deze formule. Hoe krapper de kromming hoe hoger het buigend moment. In dit voorbeeld is de kromtestraal gelijk aan 55 m. Dit is dus 55.000 mm.

Wanneer het moment bekend is, volgt de spanning ten gevolge hiervan.

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

σ_b = optredende spanning ten gevolge van de kromming in N/mm²

M_b = optredend moment in Nmm

W_b = Weerstandsmoment van de leiding in mm³

$$\sigma_b = \frac{845.820,80}{433.754} = 1,95 \text{ N/mm}^2$$



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	0,40	1,67
Na 1 ^e deel intrekken	0,37	1,64
Na 2 ^e deel intrekken	0,28	1,54
Na 3 ^e deel intrekken	0,12	1,39
Na 4 ^e deel intrekken	0,03	1,30

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 1,95 + \sigma_t$$

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

De spanning ten gevolge van de trekkracht en de spanning ten gevolge van de kromming wordt bij elkaar opgeteld volgens de formule:

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 1,95 + \sigma_t$$

- σ_a = totaal optredende spanning op rollenbaan/ maaiveld in N/mm²
- α_{σ} = α -factor (verhoudingsgetal buigtreksterkte/treksterkte)
- σ_b = optredende spanning ten gevolge van de kromming op rollenbaan/ maaiveld in N/mm²
- σ_t = optredende spanning ten gevolge van de benodigde trekkracht op rollenbaan/maaiveld in N/mm²

De toelaatbare materiaalspanningen zoals vermeld in de NEN-normen gelden voor zuivere trek. Voor spanningen door buigtrek (S_{bt}) mogen hogere toelaatbare waarden worden gehanteerd. De verhouding tussen de toelaatbare waarden wordt de α -factor genoemd:

$$\alpha = \frac{\text{toelaatbare zuivere trekspanning}}{\text{toelaatbare buig trekspanning}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{bt}}$$

- α = α -factor
- σ_t = toelaatbare zuivere trekspanning in N/mm²
- σ_{bt} = toelaatbare buigtrekspanning in N/mm²

Voor PE geldt dat in axiale en tangentiële richting de toelaatbare waarde van de spanningen door buigtrek een factor 1,53 hoger is dan de toelaatbare waarde van de spanningen door zuivere trek. Als gevolg hiervan geldt: $\alpha_{\sigma} = 0,65$. In de NEN staan α -factoren voor de overige materialen vermeld. Indien er sprake is van staal dan geldt: $\alpha_{\sigma} = 1,0$.



De berekende optredende spanningen moeten worden vergeleken met de toelaatbare spanning.
Bij PE mag de optredende spanning met de toelaatbare korteduurspanningen worden vergeleken.

Materiaal / kwaliteit	Toelaatbare korteduurspanning in N/mm ²	Toelaatbare langeduurspanning in N/mm ²
PE 80	8.0	6.3 (= 8 / 1.25)
PE 100	10.0	8.0 (= 10 / 1.25)

In alle gevallen wordt voldaan aan de toelaatbare spanning.

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	0,40	1,67
Na 1 ^e deel intrekken	0,37	1,64
Na 2 ^e deel intrekken	0,28	1,54
Na 3 ^e deel intrekken	0,12	1,39
Na 4 ^e deel intrekken	0,03	1,30

$$\sigma_a = \alpha_\sigma \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 1,95 + \sigma_t$$

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

De hoogste spanning is $1,67 \text{ N/mm}^2$. Dit is aanzienlijk lager dan de toelaatbare korte duur spanning van 10 N/mm^2 .



Ad 5 Fase II Berekening van de optredende spanningen tijdens het intrekken van de leiding in het boorgat

De berekening van de optredende spanningen tijdens het intrekken van de leiding in het boorgat is gecompliceerder. Goed beschouwd bestaat dit onderdeel uit 4 formules.

1. Berekening optredende wrijving/trekkkracht tussen de leiding en de boorvloeistof.
2. Berekening optredende wrijving/trekkkracht tussen de leiding en boorwandgang. Met één van de zijden wordt de leiding langs de boorwandgang getrokken.
3. Berekening optredende wrijving/trekkkracht ter plaatse van de bochten. Er moet een kracht worden overgebracht om de buis door de bochten te krijgen.

5.1 Berekening van de vereiste trekkkracht 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: $D_{e,omtrek} = 628,32 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 0,0993 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 200,00^2 \cdot \pi/4 = 0,361 \text{ N/mm}^1$

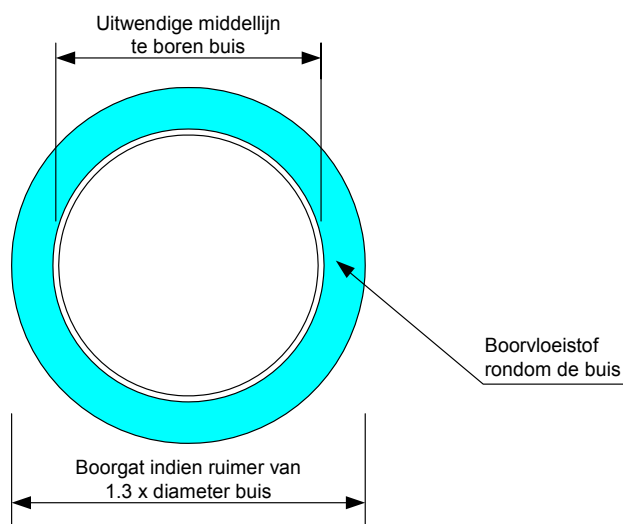
Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 0,262 \text{ N/mm}^1$

Trekkkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	7,00	821	-
2 ^e deel intrekken	31,00	-	3.638
3 ^e deel intrekken	69,00	8.097	-
4 ^e deel intrekken	93,00	-	10.913
Geheel ingetrokken	100,00	11.735	-

Rechte delen: $T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2)$

Gebogen delen: $T_{3a} = f \cdot L_B \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2)$

Tijdens het intrekken van de leiding in het boorgat treedt er wrijving op tussen de leiding en de boorvloeistof. Het volgende is van toepassing bij een 'optimaal' boorprofiel.





De gehele omtrek van de buis zal wrijving ondervinden wanneer deze door de boorvloeistof wordt heengetrokken. Er is dus sprake van 100% van de omtrek. Ten gevolge van deze wrijving ontstaat trekkracht T_2 (rechte delen) en T_{3a} (bochten).

Naast de wrijving met de boorvloeistof treedt er ook wrijving op als gevolg van het opdrijven van de buis tegen de bovenkant, de zijkant of de onderkant van de boorgang. Een boorproces is geen continu proces. Er zal altijd een pauze zijn omdat men boorstangen moet loskoppelen, verwijderen of aankoppelen. In die tijd is kan de gehele leiding in het gat opdrijven.

Bij het vervolgen van de trekoperatie moet wrijving overwonnen worden. Het gewicht van de leiding (plus eventuele vulling) is bekend. In dit voorbeeld is dit $0,0993 \text{ N/mm}^1$

Het soortelijk gewicht van de boorvloeistof varieert van $10,7 \text{ kN/m}^3$ tot circa $12,5 \text{ kN/m}^3$.

De leiding komt in de boorvloeistof te liggen en ondergaat een opwaartse kracht die gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof (wet van Archimedes).

De trekkrachten zijn als volgt te berekenen.

$$\text{Rechte delen: } T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2)$$

$$\text{Gebogen delen: } T_{3a} = f \cdot L_B \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2)$$

T_2 en T_{3a} = de trekkracht in recht gedeelte van boorgang in N

f = rekenfactor 1,4

L = de leidinglengte in recht gedeelte van de boorgang in mm

$D_{e,omtr}$ = de uitwendige middellijn van de leiding in mm

f_2 = de wrijving tussen de leiding en de boorvloeistof in $\text{N/mm}^2 = 0,00005$

g_{eff} = som van de opwaartse en neerwaartse kracht in N/mm^2

f_3 = wrijvingscoëfficiënt voor wrijving tussen leiding en boorwandgang = 0,2

De omtrek van een buis is gelijk aan $\pi \cdot$ uitwendige middellijn: $\pi \cdot 200 \text{ mm} = 628,32 \text{ mm}$.



Het is van belang om vast te stellen of de leiding opdrijft in het boorgat.

$$g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4$$

De opwaartse kracht is afhankelijk van het soortelijk gewicht van de boorvloeistof.

Omdat we eerder hebben uitgerekend wat de in te trekken leiding weegt kunnen we g_{eff} berekenen.

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 0,0993 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 200,00^2 \cdot \pi/4 = 0,361 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 0,262 \text{ N/mm}^1$

De opwaartse kracht is $0,361 \text{ N/mm}^2$. De neerwaartse kracht is $0,0993 \text{ N/mm}^2$.

Dit betekent dat de leiding opdrijft en een kracht uitoefent van $0,361 - 0,0993 = 0,262 \text{ N/mm}^2$.

Hierdoor zien we de volgende trekkrachten:

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	7,00	821	-
2 ^e deel intrekken	31,00	-	3.638
3 ^e deel intrekken	69,00	8.097	-
4 ^e deel intrekken	93,00	-	10.913
Geheel ingetrokken	100,00	11.735	-

De trekkracht bij boormachines wordt vaak uitgedrukt in ton. Buizenlegbedrijven hanteren het volgende onderscheid:

- mini rig / maximaal 4 ton trekkracht (tot 40 kN)
- midi rig / 4 tot 30 ton trekkracht (tussen 40 kN en 300 kN)
- maxi rig / meer dan 30 ton trekkracht (>300 kN)

1 ton trekkracht = 1000 kg = 10.000 N = 10 kN.

30 ton trekkracht = 30 * 1000 kg = 30 * 10.000 N = 300.000 N = 300 kN.



In de NEN 3650:2012 staat het volgende vermeld over de waarden van 1,4 en 0,2

OPMERKING 1 Bij de bepaling van de bovengrenswaarde van de benodigde trekkracht ten behoeve van in te zetten materieel kan het in sommige situaties nuttig zijn een hogere totaalfactor van f_1 , f_2 , f_3 toe te passen, bijv. 2,0 in plaats van 1,4. Dit geldt met name voor gebieden waar lokale, moeilijk te detecteren grindnesten in de ondergrond voorkomen.

Ingeval een niet-gekoppelde bundel leidingen zal worden ingetrokken, kan voor de bundel een geringere omtrek in rekening worden gebracht dan de som van de afzonderlijke buizen. Voor n buizen zou een reductiefactor van $1/n \times 0,3$ in rekening kunnen worden gebracht. Voor een leidingbundel wordt bovendien aanbevolen om de onzekerheidsfactor van f_1 , f_2 en f_3 te verhogen met 30 % tot 1,8.

OPMERKING 2 Door de aanwezigheid van bentonietspoeling rondom de leiding wordt de wrijving tussen wand van de boorgang en leiding sterk gereduceerd. Om een indruk te krijgen van deze reductie zijn in het verleden directe schuifproeven uitgevoerd waarbij zowel zand als een zand-bentonietmengsel over een stuk leiding met epoxybekleding werd afgeschoven. De resultaten waren als volgt:

zand : $\delta =$ wrijvingshoek = 22°

zand met 10 % bentoniet: $\delta = 12^\circ$

$$f_3 = \tan \delta = \tan 12^\circ = 0,2$$

Voor hard zand wordt toepassing van dezelfde waarde van f_3 geadviseerd. De reden hiervoor is tweeledig. In de eerste plaats vindt door het boren rondom het boorgat een reductie van de spanningen plaats; in de tweede plaats neemt de wrijvingshoek δ in zand bij een toenemende waarde van de hoek van inwendige wrijving nauwelijks toe.

In klei is de waarde van f_3 kleiner dan of gelijk aan de waarde van zand.

Toepassing van $f_3 = 0,2$ bij klei is dus aan de veilige kant.

Heeft het vullen met water zin? Stel dat de buis geheel gevuld wordt tijdens de trekoperatie.

De inwendige diameter is 163,6 mm.

Dit betekent een oppervlakte van $0,25 \cdot \pi \cdot Di^2 = 21,021,15 \text{ mm}^2$.

Soortelijk gewicht water = $10 \text{ kN/m}^3 = 10.000 \text{ N/m}^3 = 10.000 \cdot 10^{-9} \text{ N/mm}^3$. Hieruit volgt een van $21.021,15 \cdot 10.000 \cdot 10^{-9} = 0,21 \text{ N/mm}^1$ (afgerond) Invoer van deze waarde in de berekening is eenvoudig.

Boorspoeling en overige gegevens	
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]	300_
Diameter boorstang [mm]	53_
Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]	15,0
Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]	11,5_
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]	100
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]	0,0_
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]	0,21_



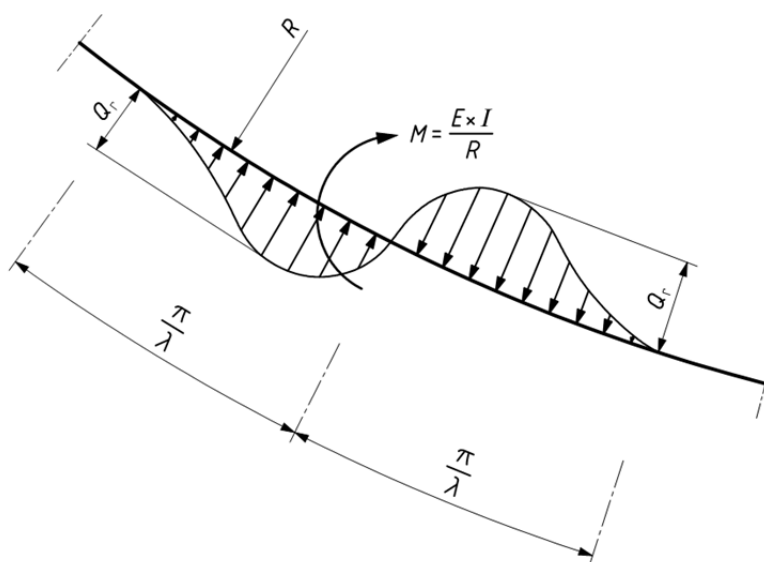
Wanneer we nu de herberekening maken zien we het volgende:

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{\text{gat}} = 0,309 \text{ N/mm}^1$ ← **Aangepast**
 Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{\text{opw}} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 200,00^2 \cdot \pi/4 = 0,361 \text{ N/mm}^1$
 Gelet hierop is $g_{\text{eff}} = |g_{\text{gat}} - g_{\text{opw}}| = 0,0520 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	7,00	410	-
2 ^e deel intrekken	31,00	-	1.815
3 ^e deel intrekken	69,00	4.040	-
4 ^e deel intrekken	93,00	-	5.445
Geheel ingetrokken	100,00	5.855	-

De hoogste trekkracht is nu 5.855 N. Ten opzichte van de niet gevulde situatie betekent dit een aanzienlijke verlaging.

Tijdens het intrekken van de buisleiding wordt de elastische bocht van de leiding gerealiseerd door een koppel aan de uiteinden van de bocht. Dit koppel moet door de grond worden geleverd. Met behulp van de theorie van Hetényi kan het verloop van de grondreactie worden vastgesteld. Door de grondreactie aan de uiteinden van de bocht treedt er een extra wrijvingskracht op.



De berekening van T_2 en T_{3a} geldt voor het gehele tracé. Er is extra trekkracht nodig om de buis door de neergaande en de opgaande bocht te trekken.



Uitgaande van een gemiddelde waarde van de krachten op de leiding kan de extra trekkracht voor één bocht als volgt worden berekend:

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

5.3.1 Neergaande bocht

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{200,00 \cdot 0,0060}{4 \cdot 975 \cdot 43.375.425,69}} = 0,0016 \text{ mm}^{-1}$$

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot \lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot 0,9 \cdot R}$$

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot 0,0016^2 \cdot 975 \cdot 43.375.425,69}{200,00 \cdot 0,9 \cdot 55.000} = 0,0037 \text{ N/mm}^2$$

$$T_{3b} = f \cdot 4 \cdot \frac{Q_{r1}}{2} \cdot D_o \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot f_3$$

$$T_{3b} = 1,4 \cdot 4 \cdot \frac{0,0037}{2} \cdot 200,00 \cdot \frac{\pi}{0,0016} \cdot 0,2 = \mathbf{789,87 \text{ N}}$$

- T_{3b} = de trekkracht voor een bocht in de boorgang in N
 f = rekenfactor 1,1
 Q_{r1} = de maximale grondreactie nabij uiteinde bocht in N/mm^2
 D_o = de uitwendige middellijn, vermeerderd met de dikte van de uitwendige bekleding in m
 λ = stijfheidverhouding leiding/grond = lambda mm^{-1}

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

- f_3 = wrijvingscoëfficiënt voor wrijving tussen leiding en boorwandgang = 0,2
 Q_r = de maximale grondreactie nabij uiteinde bocht in N/mm^2

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot \lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot 0,9 \cdot R}$$

- k_v = de verticale beddingconstante in N/mm^3
 $E I_b$ = de buigstijfheid van de leiding in N/mm^2
 D_o = de uitwendige middellijn, vermeerderd met de dikte van de uitwendige bekleding in m
 R = de bochtstraal in mm



De leiding wordt met behulp van een ruimer geboord en heeft een eigen buigstijfheid $E \cdot I_b$. De grond kan een zekere mate van indrukken ondergaan. De combinatie van beide drukt men uit in lambda λ .

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

- λ = lambda (stijfheidsverhouding grond/leiding in mm^{-1})
 D_o = uitwendige middellijn van de leiding in mm
 $k_{v,gem}$ = verticale beddingconstante van de grond in N/mm^3
 E = de elasticiteitsmodulus van de leiding in N/mm^2
 I_b = traagheidsmoment van de leiding in mm^4

De eenheid van lambda is mm^{-1} .

De beddingsconstante kan worden opgeroepen met de rechtermuisknop. Deze waarde is diameterafhankelijk en verschilt per grondsoort.

Overzicht beddingsconstante volgens NEN3650									
Grondsoort	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand			Hard zand	
Beddingsconstante [N/mm^3]	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$	$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$		$k_{v,min}$	$k_{v,gem}$
Uitwendige middellijn [mm]						1 m	3 m		
100	0.007	0.011	0.016	0.024	0.04	0.045	0.11	0.1	0.158
200	0.004	0.006	0.0085	0.013	0.022	0.025	0.058	0.055	0.087
300	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.016	0.018	0.04	0.04	0.063
400	0.002	0.003	0.0045	0.007	0.012	0.015	0.032	0.03	0.0475
450	0.0018	0.0028	0.004	0.006	0.01	0.013	0.029	0.025	0.0395
600	0.0014	0.0022	0.003	0.005	0.008	0.011	0.022	0.02	0.0315
750	0.0011	0.0018	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.018	0.0176	0.0278
900	0.001	0.0016	0.0021	0.0034	0.006	0.008	0.015	0.0161	0.0254
1200	0.0008	0.0012	0.0017	0.0027	0.004	0.007	0.012	0.0137	0.0216



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

Trekkracht T_{bocht} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_{3a} [N]	$T_{3b,\text{neer}}$ [N]	$T_{3b,\text{op}}$ [N]	T_{bocht} [N]
Neergaande bocht	2.877	3.638	790	-	7.304
Opgaande bocht	292	10.913	790	790	12.785

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

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

Trekkracht T_{3c} tijdens verschillende stadia [N]	α [°]	T_{bocht} [N]	T_{3c} [N]
Neergaande bocht	12,50	7.304	885
Opgaande bocht	12,50	12.785	1.550

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

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

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

$$\rightarrow T_{3c} = f \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot f_3 = 1,4 \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot 0,2$$

Tijdens het trekken aan de leiding zal in een bocht een naar het middelpunt van de boog gerichte kracht optreden. Dit veroorzaakt een reactiekracht op de leiding vanuit de grond. De grootte van deze op de buis uitgeoefende kracht (g_t) is afhankelijk van de trekkracht in de leiding en de bochtstraal.

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

T_{3c} = de trekkracht (rekenwaarde) door de bochtkracht, in N

f = rekenfactor 1,1

L_B = de koorde van de bocht, in mm = $2 \times R \times 2\pi \times \alpha/360$

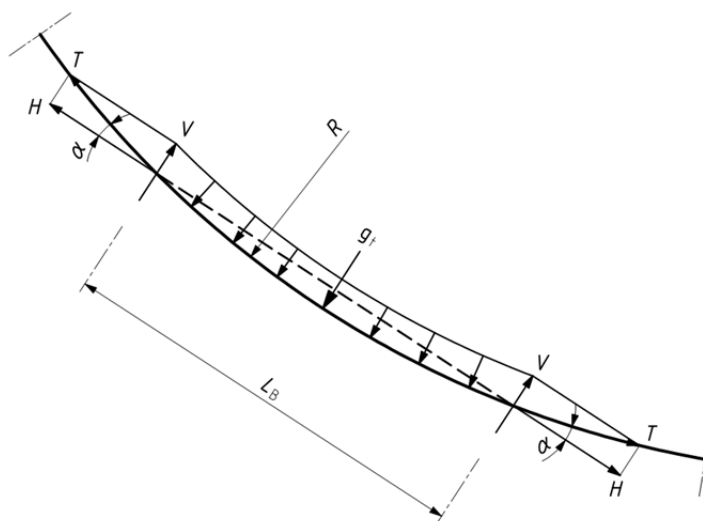
α = de halve bochthoek, in graden

g_t = de bochtkracht, in N/mm

T = de totale trekkracht in de leiding in N



Bij deze berekening hoort de volgende tekening:



De bochtcracht g_t wordt als volgt uitgerekend:

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

T_{bocht} bestaat uit een optelling van een aantal opgetreden krachten:

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

5.5 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,\text{neer}}$ [N]	$T_{3c,\text{neer}}$ [N]	$T_{3b,\text{op}}$ [N]	$T_{3c,\text{op}}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	3.877	821	-	-	-	-	4.699
2 ^e deel intrekken	2.877	3.638	790	885	-	-	8.190
3 ^e deel intrekken	1.292	8.097	790	885	-	-	11.065
4 ^e deel intrekken	292	10.913	790	885	790	1.550	15.220
Geheel intrekken	0	11.735	790	885	790	1.550	15.749

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

Nu T_2 , T_{3a} , T_{3b} en T_{3c} bekend zijn wordt het tijd om deze bij elkaar op te tellen.

De grootste trekkracht is $15.749 \text{ N} = 15,75 \text{ kN} = 1,575 \text{ ton}$.



5.6 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]
1 ^e deel intrekken	4.699	0,45
2 ^e deel intrekken	8.190	0,79
3 ^e deel intrekken	11.065	1,06
4 ^e deel intrekken	15.220	1,46
Geheel intrekken	15.749	1,52

$$\sigma_t = \frac{T_{\text{tot}}}{A} = \frac{T_{\text{tot}}}{10.394,78}$$

De optredende spanningen als gevolg van het intrekken van de leiding in fase II is uit te rekenen door de trekkracht te delen door het oppervlakte van de buis.

$$\sigma_t = \frac{T_{\text{tot}}}{A} = \frac{T_{\text{tot}}}{10.394,78}$$

σ_t = optredende spanning ten gevolge van het intrekken van de leiding in N/mm²

T_{tot} = totaal aan optredende trekkrachten in fase II in N

A = oppervlakte van de leiding in mm²



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

5.7.1 Neergaande bocht

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

$$M_b = 1,4 \cdot 975 \cdot \frac{43.375.425,69}{0,9 \cdot 55.000} = 1.196.110,22 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{1.196.110,22}{433.754,26} = \mathbf{2,76 \text{ N/mm}^2}$$

5.7.2 Opgaande bocht

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

$$M_b = 1,4 \cdot 975 \cdot \frac{43.375.425,69}{0,9 \cdot 55.000} = 1.196.110,22 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{1.196.110,22}{433.754,26} = \mathbf{2,76 \text{ N/mm}^2}$$

De kromming van de buis in het boorgat levert een spanning op die gelijk is aan het buigend moment / het weerstandsmoment van de buis. Bij het berekenen van de buigspanning wordt gerekend met een $0,9 \cdot$ de kromtestraal. Omdat we in dit voorbeeld twee identieke bochten hebben zijn de spanningen even groot.

De kromtestraal is 55 m, ofwel 55.000 mm.

Indien er sprake is van een gecombineerde kromtestraal dan kan de volgende formule aangehouden worden (volgens de NEN 3650:2012):

$$R = \sqrt{\frac{R_h^2 \times R_v^2}{R_h^2 + R_v^2}}$$

R_v = Verticale kromtestraal

R_h = Horizontale kromtestraal



5.8 Totalisatie van de spanningen in het boorgat tijdens de trekoperatie

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	4.699	0,45	-	0,45
Na 1 ^e deel intrekken	8.190	0,79	2,76	2,58
Na 2 ^e deel intrekken	11.065	1,06	-	1,06
Na 3 ^e deel intrekken	15.220	1,46	2,76	3,26
Na 4 ^e deel intrekken	15.749	1,52	-	1,52

Rechte delen: $\sigma_a = \frac{T_{tot}}{A} = \frac{T_{tot}}{10.394,78} = \sigma_t$

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

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

Bij de totalisatie van de spanningen tijdens de trekoperatie wordt onderscheid gemaakt tussen de rechte delen en de gekromde delen.

Voor de rechte delen geldt:

$$\sigma_a = \frac{T_{tot}}{A} = \frac{T_{tot}}{10.394,78} = \sigma_t$$

Voor de gebogen delen geldt:

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

σ_a = optredende spanning in recht/ gebogen deel in N/mm²

T_{tot} = totaal aan optredende trekkrachten in fase II in N

A = oppervlakte van de leiding in mm²

σ_b = optredende spanning ten gevolge van kromming in leiding in N/mm²

σ_t = optredende spanning t.g.v. het intrekken van de leiding in N/mm²

α_{σ} = α -factor (bij PE 0,65. Bij staal 1,0)

Uit dit overzicht blijkt dat de maatgevende spanningen ter plaatse van de opgaande bocht optreden. In alle gevallen wordt voldaan aan de toelaatbare spanning.



6. Fase III Berekening van optredende spanningen tijdens de gebruiksfase

De leiding ligt op zijn plaats en wordt in gebruik genomen. Het is van belang om vast te stellen welke spanningen optreden ten gevolge van:

1. Inwendige druk
2. Grondbelasting
3. Verkeersbelasting
4. Grondreactie aan het uiteinde van de neergaande en opgaande bocht
5. Temperatuurverschil

Ad 6.1 Berekening van de spanning ten gevolge van de inwendige druk

De formule voor de berekening van de spanning σ_p ten gevolge van de inwendige druk bij niet-stalen leidingen is afhankelijk van de verhouding van de buisdiameter en de wanddikte.

Indien sprake is van dunwandige buisleidingen (verhouding $D_{gem} / d > 20$) mag de ringspanning σ_p door inwendige druk worden bepaald volgens:

$$\sigma_p = \frac{p_d * D_{gem}}{2 * d} \quad D_{gem} = D_e - d$$

σ_p = optredende tangentiële spanning t.g.v. de inwendige druk in N/mm²

P_d = de inwendige druk in N/mm²

D_{gem} = de gemiddelde diameter van de leiding in mm

d = de wanddikte van de leiding in mm

D_e = de uitwendige diameter van de leiding in mm

Voor dikwandige buisleidingen ($D_{gem}/d \leq 20$) moet de ringspanning σ_p door inwendige druk worden bepaald volgens:

$$\sigma_p = \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} * P_d$$

σ_p = optredende tangentiële spanning ten gevolge van de inwendige druk in N/mm²

r_e = de uitwendige straal van de leiding in mm

r_i = de inwendige straal van de leiding in mm

P_d = de inwendige druk in N/mm²



Stalen leidingen vallen in de categorie 'dunwandige leidingen'. Dit betekent dat de Ketelformule kan worden gebruikt.

Sinds NEN 3650:2012 wordt de spanning die optreedt als gevolg van inwendige druk niet meer opgeteld bij de overige spanningen. De spanning σ_p wordt vergeleken met de toelaatbare spanning:

$$\begin{aligned} D_g/d_n &= 181,80/18,20 = 9,99 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow \text{Dikwandige leiding} \\ \sigma_p &= \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \cdot p_d \\ \sigma_p &= \frac{100,00^2 + 81,80^2}{100,00^2 - 81,80^2} \cdot 0,3 = 1,51 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{y1} &= \sigma_p = 1,51 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Toelaatbare spanning} &= \bar{\sigma}_t = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

Ad. 6.2 Rerounding

Ten gevolge van de inwendige druk wil de leiding gaan "reronden". Van binnenuit verzet de buis zich tegen het indrukken van buitenaf.

Bij tangentiële buigspanningen, ten gevolge van de direct aan de ondergrond overgedragen bovenbelasting, mag de reducerende invloed hierop van de inwendige druk in rekening worden gebracht. Die invloed is het zgn. reroundingseffect f_{rr} .

f_{rr} is een reductiefactor, dus hoe kleiner hij wordt, des te kleiner het gereduceerde tangentiële moment.

De k_y , p en r_{gem} staan in de noemer van de formule voor de f_{rr} . Grote waarden hiervan veroorzaken een grote noemer, dus een kleine reductiefactor, hetgeen inhoudt een grote invloed op het reroundingseffect.

Een kleine EI (slappe buis) veroorzaakt eveneens een grote noemer en dus ook een kleine f_{rr} . Ook dan is de reductie op het moment groot. Hoe slapper de buis is, des te meer rerounding er optreedt, maar ook des te meer deflectie.

Slappe buis --> veel deflectie --> veel rerounding --> lage f_{rr}

Stijve buis --> weinig of geen deflectie --> weinig of geen rerounding --> hoge f_{rr}



De reroundingfactor is als volgt te berekenen:

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

f_{rr}	=	reroundingfactor
p_d	=	de inwendige druk in N/mm ²
r_g^3	=	gemiddelde straal in mm
k_y	=	deflectiefactor (Nen 3650 Katern 5 Bijlage D tabel D.1)
E	=	de elasticiteitsmodulus voor korte duur
I_w	=	het wandtraagheidsmoment

De k_y -waarde volgt uit de opleghoek van de leiding in de grond. Bij horizontaal gestuurde boringen wordt bij een enkele buis een opleghoek van 120° aangehouden en kan deze formule als volgt worden omgewerkt.

$$f_{rr} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2 * p_d * r_g^3 * 0,089}{E * I_w}\right)\right)}$$

Bij PE varieert de reroundingfactor van circa 0,80 tot 0,95. Bij staal varieert de grootte van de reroundingfactor van circa 0,98 tot 1,0. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door het verschil in elasticiteitsmodulus.

PE 80 → 825 N/mm²

PE 100 → 975 N/mm²

Staal → 205.800 N/mm²

Wanneer er sprake is van een drukloze leiding is de reroundingfactor gelijk aan 1.

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 * 0,3 * 90,9^3 * 0,089}{975 * 502,38}\right) = 0,92$$



Ad 6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting

De belangrijkste belasting op de leiding is de grondbelasting. Voor het berekenen van deze grondbelasting op de leiding zijn er in feite 3 verschillende methoden:

- neutrale grondbelasting (maximale belasting)
- homogeen grondmassief (gereduceerde grondbelasting)
- gelaagd grondmassief (holoceen + pleistoceen, gereduceerde grondbelasting)

In de NPR 3659 staat uitvoerig vermeld hoe de gereduceerde grondbelasting uit te rekenen is. Deze berekeningsmethode was ook al opgenomen in de Pijpleidingcode. In de praktijk zal het er op neerkomen dat een gespecialiseerd grondmechanisch bureau deze gereduceerde grondbelasting zal berekenen. De neutrale grondbelasting (Q_n) is het gewicht van de verticale kolom grond boven de buis (verticale korrelspanning op buiskruinniveau). Neutrale grondbelasting treedt op indien er geen relatieve verplaatsing (uitvoeringszakking) tussen leiding en grond is. De neutrale grondlast wordt direct via de buiswand op de ondergrond overgedragen.

In Sigma 2012 hebben staan de grondparameters en de berekeningsresultaten in één tabel.

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n							
Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	q_{droog} [kN/m ²]	q_{nat} [kN/m ²]	q_{totaal} [kN/m ²]	Q_n [N/mm ¹]
1e rechte deel	3,00	1,00	Klei	18,70	37,40	56,10	7,22
Neergaande bocht	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	15,92
2e rechte deel	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	15,92
Opgaande bocht	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	15,92
3e rechte deel	3,00	1,00	Klei	18,70	37,40	56,10	7,22

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

De formule voor het berekenen van de neutrale grondbelasting is:

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

Het is van belang om de normaal heersende grondwaterstand mee te nemen in de berekening. Dit maakt namelijk nogal wat uit qua grondbelasting. Uit dit overzicht blijkt hoe de verschillende gewichten in combinatie met de grondsoorten kunnen worden ingevoerd en vervolgens worden omgerekend naar neutrale grondbelastingen.



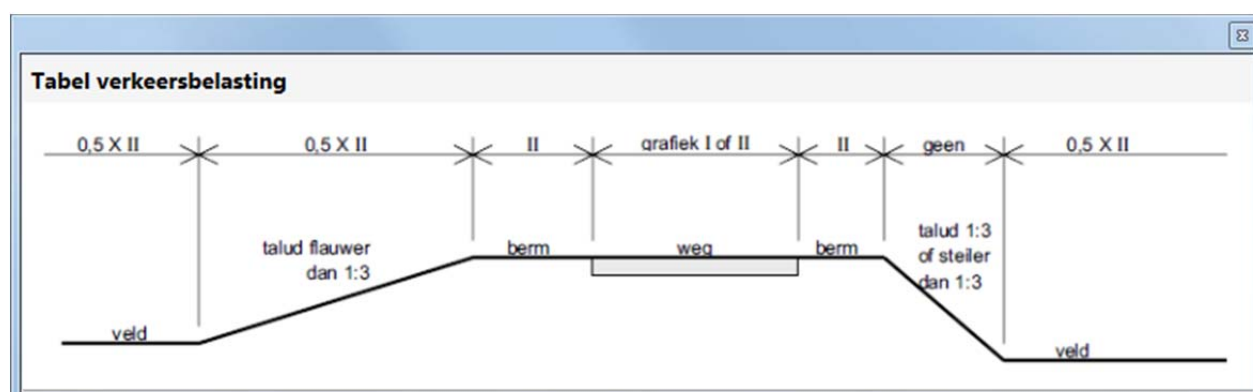
Wanneer een leiding diep geboord gaat worden mag met gereduceerde grondbelasting worden gerekend. Met het programma Sigma 2012 3.0 kan met gereduceerde grondbelasting worden gerekend. Dit scheelt aanzienlijk qua grondbelastingen. In dit cursusboek is deze berekeningsmethode uitgewerkt.

6.4 Berekening van de verkeersbelasting Q_v

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Verkeers- belasting	q_v [kN/m ²]	Q_v [N/mm ¹]
1e rechte deel	3,00	Grafiek ½ x II	3,80	0,76
Neergaande bocht	8,00	Grafiek II	2,25	0,45
2e rechte deel	8,00	Grafiek I	5,82	1,16
Opgaande bocht	8,00	Grafiek II	2,25	0,45
3e rechte deel	3,00	Grafiek ½ x II	3,80	0,76

$$Q_v = q_v \cdot D_o = q_v \cdot 200$$

Bij de berekening van de invloed van verkeer wordt uitgegaan van het volgende uitgangspunt:

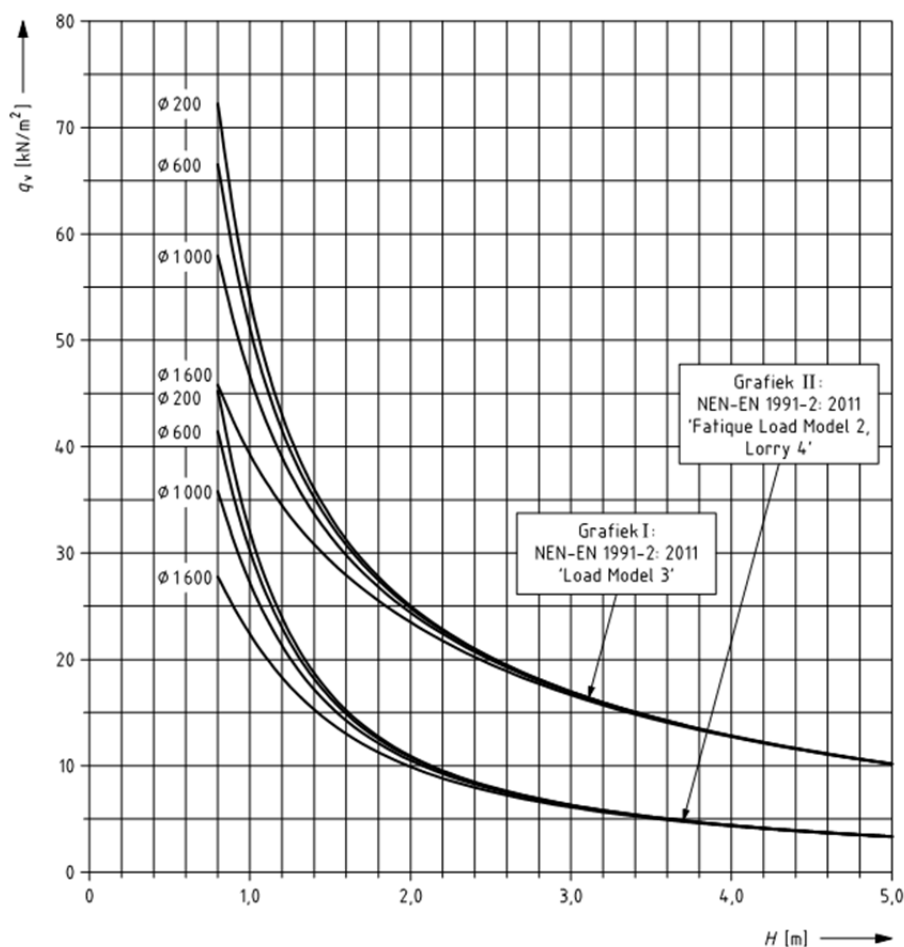


De berekening van de verkeersbelasting heeft bij de bestuurbare horizontale boormethode veel minder impact dan bij de aanlegtechnieken waarbij de leiding ondieper komt te liggen. Het is duidelijk dat de neutrale grondbelasting vele malen groter is dan de verkeersbelasting.

Grafiek I = Rijkswegen en provinciale wegen

Grafiek II = Stadsweegen

Grafiek ½ x II = Onderhoudswegen / maaiveld waar verkeer kan rijden



Verkeersbelasting

Nu de neutrale grondbelasting en de verkeersbelasting bekend zijn op de diverse locaties, kunnen deze worden opgeteld en vervolgens worden omgerekend naar momenten en spanningen:

6.5 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 ¹]
1e rechte deel	7,22	0,76	7,98	100,09	1,68
Neergaande bocht	15,92	0,45	16,37	205,34	3,44
2e rechte deel	15,92	1,16	17,08	214,29	3,59
Opgaande bocht	15,92	0,45	16,37	205,34	3,44
3e rechte deel	7,22	0,76	7,98	100,09	1,68

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,92 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

Grond- en verkeersbelastingen zijn direct overgedragen bovenbelastingen. Dit betekent dat voor momentcoëfficiënt k de waarde 0,138 wordt aangehouden.



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

6.6.1 Neergaande bocht

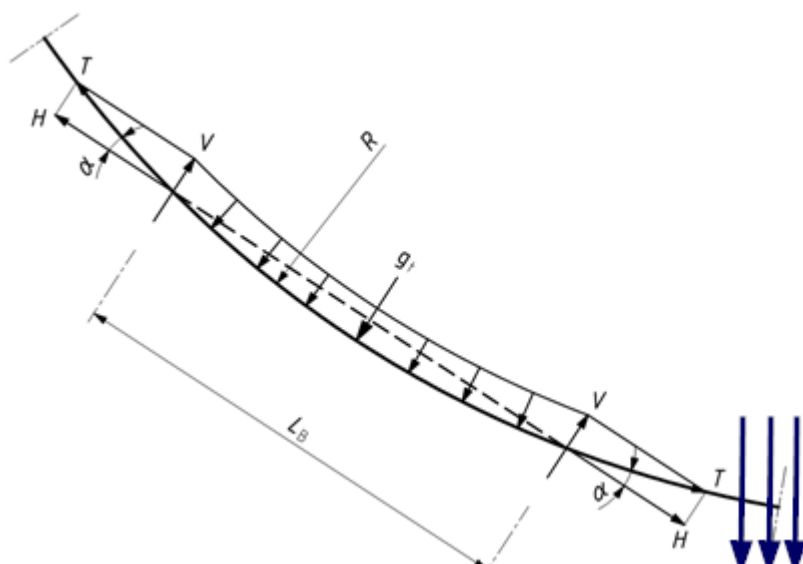
$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r1} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,11 \text{ N/mm}^2}$$

6.6.2 Opgaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r2} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,11 \text{ N/mm}^2}$$



Ten gevolge van de kromming van de leiding ondervindt de leiding nabij de oplegging aan het eind van de neergaande, respectievelijk opgaande bocht een spanning die gelijk is aan:

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r1} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

Aangezien het hier een indirect overgedragen bovenbelasting betreft, is $k_{b,ind}$ gelijk aan 0,083.



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

$$\sigma_{ax} = \Delta_t \cdot \alpha_g \cdot E$$

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

Wanneer het te transporteren medium warmer is dan de omgevingstemperatuur dan ontstaan hierdoor spanningen in de leiding vanwege temperatuurverschil.

In dat geval wordt de hierdoor in rekening te brengen spanning als volgt uitgerekend:

$$\sigma_{ax} = \Delta_t \cdot \alpha_g \cdot E$$



Totalisatie van spanningen, toetsen en implosie-controle

Nu de spanning ten gevolge van temperatuurverschil is bepaald zijn we aan het eind gekomen van het berekenen van de verschillende spanningen. Vervolgens moeten de behaalde resultaten vergeleken worden met de toelaatbare spanningen c.q. waarden.

7. Toetsing op minimale ringstijfheid S_N

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

$$S_N = 975 \cdot \frac{502,38}{181,8^3} = 0,08 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{81,52 \text{ kN/m}^2}$$

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

Bij dunwandige kunststofleidingen is volgens de NEN toetsing op de minimale ringstijfheid noodzakelijk. Doel is het voorkomen van een te grote buisdeflectie door rectangularisatie. De minimale ringstijfheid waaraan een buis moet voldoen is afhankelijk van het buismateriaal. In het algemeen zijn er geen problemen te verwachten met de toetsing van de minimale ringstijfheid bij gestuurde boringen.

8. Toetsing op implosie: berekening van de alzijdige overdruk

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

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

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

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 502,38}{181,80^3} = 1,55 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 502,38}{181,80^3} = 0,28 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij **27,87 m** grondwater boven de leiding

Kunststofleidingen moeten op implosie worden beschouwd (radiale elastische instabiliteit) indien er sprake kan zijn van inwendige onderdruk of uitwendige alzijdige overdruk. Zeker bij dunwandige buizen is het risico op implosie groot.

De implosie-controle is voor zowel de korte als lange termijn nodig. De korte termijn controle is nodig om te beoordelen of de leiding niet gaat imploderen wegens te hoge boorspoeldrukken.



De lange termijn controle heeft betrekking op de mogelijke implosie als gevolg van grondwater. Wanneer we kiezen voor SDR 17 in plaats van SDR 11 dan zien we hele andere uitkomsten.

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

$$p_{o,kort} = \frac{1}{1,5 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 975,00 \cdot 140,43}{188,10^3} = 0,39 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{o,lang} = \frac{1}{3 \cdot (1 - 0,4^2)} \cdot \frac{24 \cdot 350,00 \cdot 140,43}{188,10^3} = 0,07 \text{ N/mm}^2$$

Conclusie: Kans op implosie bij 7,03 m grondwater boven de leiding

Het implosie-risico is fors toegenomen. Tijdens het boren van de leiding mag men niet meer toepassen dan 0,39 N/mm², dit is gelijk aan 3,9 bar. In de eindsituatie is er gevaar voor implosie wanneer er meer dan 7,03 m grondwater aanwezig is.

9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	1,68	-	0,65	1,09
Neergaande bocht	3,44	0,11	0,65	2,31
2e rechte deel	3,59	-	0,65	2,33
Opgaande bocht	3,44	0,11	0,65	2,31
3e rechte deel	1,68	-	0,65	1,09

Rechte delen: In omtreksrichting is de volgende formule van toepassing:

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

Voor de neergaande en opgaande bocht is de volgende formule van toepassing:

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

σ_y = optredende spanning in omtreksrichting gedurende de gebruiksfase in N/mm²

α_σ = α -factor in tangentiële richting

σ_q = de spanning ten gevolge van bovenbelastingen in N/mm²

σ_{qr} = de spanning ten gevolge van de grondreactie in bochten in N/mm²

Uit het overzicht blijkt dat de hoogste spanning 2,33 N/mm² bedraagt. De toelaatbare spanning is 8 N/mm². De gekozen leiding voldoet in omtreksrichting aan de normen.



9.2 Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

Locatie	σ_{ax} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_x [N/mm ²]
1e rechte deel	1,56	-	-	1,56
Neergaande bocht	1,56	2,76	0,65	3,35
2e rechte deel	1,56	-	-	1,56
Opgaande bocht	1,56	2,76	0,65	3,35
3e rechte deel	1,56	-	-	1,56

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

Bochten: $\sigma_x = \sigma_{ax} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_b$

Toelaatbare spanning: $\sigma_{ld} = \sigma_t = \mathbf{8,00}$ N/mm²

In langsrichting zien we dat de spanningen ten gevolge van het temperatuurverschil en de buiging (de krommingen) worden opgeteld. De hoogste spanning bedraagt 3,35 N/mm². In langsrichting is de toelaatbare spanning, evenals in omtrekriching, gelijk aan 8,0 N/mm².

10. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_y [mm]	δ_y/D_g [%]
1e rechte deel	7,22	0,76	-	1,06	0,58
Neergaande bocht	15,92	0,45	0,0037	2,17	1,19
2e rechte deel	15,92	1,16	-	2,26	1,24
Opgaande bocht	15,92	0,45	0,0037	2,17	1,19
3e rechte deel	7,22	0,76	-	1,06	0,58

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

$$\delta_y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

Toelaatbare deflectie = 8% · $D_g = 0,08 \cdot 181,80 = \mathbf{14,54}$ mm

Bij het berekenen van niet-stalen leidingen worden twee eisen gesteld.

1. De optredende spanningen mogen de toelaatbare spanningen niet overschrijden.
2. De deflectie (vervorming) mag niet te hoog zijn.

De direct aan de ondergrond overgedragen bovenbelasting veroorzaakt een vervorming (deflectie) van de buis, die groter is naarmate de buis slapper is. De buis wordt ovaal (ovaliseert). De stijfheid van de buis is afhankelijk van de diameter en de stijfheid van de buiswand (EI_w), dus van het materiaal en de wanddikte. Een betonbuis heeft vrijwel geen vervorming, een kunststofbuis des te meer.

De elasticiteitsmodulus is een zogenaamde stijfheidsfactor van een materiaal in N/mm². De E-waarden van kunststoffen zijn verkregen uit korte duur proeven. Vanwege materiaalveroudering moet bij het bepalen van de deflectie rekening gehouden worden met een (veel) geringere E-waarde.



De laatste jaren is de formule voor het berekenen van de deflectie nogal eens veranderd. In de Pijpleidingcode was het lange tijd gebruikelijk om met gehalveerde E-waarden te werken. HDPE had bijvoorbeeld een E-waarde van 700 N/mm^2 , dit resulteerde het invoeren van 350 N/mm^2 als E-lange duur.

Halverwege de 80-er jaren mocht de deflectie niet meer bedragen dan 5% van de uitwendige diameter. Er werd toen nog zonder horizontale steundruk gerekend. Later werd slechts als eis gesteld dat de deflectie niet meer dan 6% mocht bedragen. Dergelijke lage percentages komen niet meer voor. Het kan dus voorkomen dat een leiding qua sterkte wel voldoet, maar niet qua deflectie. In principe mag zo'n leiding niet worden toegepast.

Sinds het verschijnen van de NEN 3650:2012 is de deflectie vastgesteld op een maximum van x% van de gemiddelde diameter van de leiding. Tot deze wijziging was in dit rekenvoorbeeld 16 mm toelaatbaar (8% van 200 mm). Nu is dus 14,54 mm toelaatbaar (8% van de gemiddelde diameter).

In alle gevallen wordt voldaan aan de deflectie-eisen.

Conclusie: de leiding voldoet aan de NEN 3650:2012



Berekeningsvoorbeeld 2: Bundel van drie gelijke buizen Ø 200 mm

Indien een bundel wordt geboord dan moeten een aantal zaken worden aangepast qua invoer.

Bij gelijke diameters is een berekening van de buis nodig. De spanningen worden namelijk berekend per buis. Aan elke buis wordt getrokken, dus elke buis krijgt een trekkracht voor zijn kiezen.

In Sigma geven we aan dat we met een bundel te maken hebben.

^ Ondergronds

☐ Normaal

☒ Bundel

☐ Moeilijke situatie/grind

Op dat moment wordt bij de onzekerheidsfactoren in Sigma automatisch de onzekerheidsfactor aangepast:

^ Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren

Totaalfactor bij boring met bundels	1,8
Belastingfactor ondergronds	1,4
Belastingfactor bovengronds	1,1
Wrijvingscoëff. zonder rollenbaan	0,3
Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm²]	0,00005
Wrijving tussen leiding/boorgangwand	0,2

Deze wordt verhoogd van 1,4 naar 1,8.

Op het tweede tabblad worden de opleghoeken automatisch aangepast:

^ Opleghoeken

Belastinghoek [°] 30 ▼

Ondersteuningshoek [°] 30 ▼

Bij een enkele buis zijn de opleghoek 180° en 120°. Nu zijn deze dus verkleind naar 30° en 30°.

Indien de gebruiker van Sigma deze aanpassingen niet wil zal hij/zij deze waarden handmatig moeten aanpassen.



De verschillen qua spanningen bij bundels in vergelijking met een enkele buis.

Totaalfactor bij boring met bundels	f	= 1,8	
Belastingfactor	$f_{k,b}$	= 1,1	
Belastingfactor	$f_{k,o}$	= 1,4	
Wrijvingscoëff. zonder rollenbaan	f_1	= 0,3	
Wrijving tussen leiding/boorvloeistof	f_2	= 0,00005	N/mm ²
Wrijving tussen leiding/boorgangwand	f_3	= 0,2	

De totaalfactor f is aangepast van 1,4 naar 1,8. De consequentie hiervan zien we gelijk bij 4.1

Trekkracht T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N]
Starten met trekken	100,00	5.361
Na 1 ^e deel intrekken	93,00	4.985
Na 2 ^e deel intrekken	69,00	3.699
Na 3 ^e deel intrekken	31,00	1.662
Na 4 ^e deel intrekken	7,00	375

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rd} \cdot f_1 = 1,8 \cdot L \cdot 0,0993 \cdot 0,3$$

En als T_1 groter wordt, hebben we gelijk te maken met een hogere spanning.

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]	Optredende spanning bij een totaalfactor van 1,8
Starten met trekken	3.626	0,52	
Na 1 ^e deel intrekken	3.373	0,48	
Na 2 ^e deel intrekken	2.502	0,36	
Na 3 ^e deel intrekken	1.124	0,16	
Na 4 ^e deel intrekken	254	0,04	
Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]	Optredende spanning bij een totaalfactor van 1,4
Starten met trekken	2.821	0,40	
Na 1 ^e deel intrekken	2.623	0,37	
Na 2 ^e deel intrekken	1.946	0,28	
Na 3 ^e deel intrekken	874	0,12	
Na 4 ^e deel intrekken	197	0,03	



Ook ondergronds worden de trekkrachten nu groter door de hogere totaalfactor.

$$\begin{aligned} \text{Rechte delen: } T_2 &= f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,8 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2) \\ \text{Gebogen delen: } T_{3a} &= f \cdot L_B \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,8 \cdot L \cdot (628,32 \cdot 0,00005 + 0,262 \cdot 0,2) \end{aligned}$$

$$T_{3b} = 1,8 \cdot 4 \cdot \frac{0,0037}{2} \cdot 200,00 \cdot \frac{\pi}{0,0016} \cdot 0,2 = \mathbf{1.015,55 \text{ N}}$$

En ook bij T_{3c} zien we een hogere uitkomst.

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

Deze verzwaring zorgt dus voor een hogere trekkracht op de buis.

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,neer}$ [N]	$T_{3c,neer}$ [N]	$T_{3b,op}$ [N]	$T_{3c,op}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	4.985	1.056	-	-	-	-	6.041
2 ^e deel intrekken	3.699	4.677	1.016	1.464	-	-	10.855
3 ^e deel intrekken	1.662	10.410	1.016	1.464	-	-	14.551
4 ^e deel intrekken	375	14.031	1.016	1.464	1.016	2.562	20.463
Geheel intrekken	0	15.087	1.016	1.464	1.016	2.562	21.144

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	6.041	0,58	-	0,58
Na 1 ^e deel intrekken	10.855	1,04	2,76	2,84
Na 2 ^e deel intrekken	14.551	1,40	-	1,40
Na 3 ^e deel intrekken	20.463	1,97	2,76	3,76
Na 4 ^e deel intrekken	21.144	2,03	-	2,03



De gebruiksfase bij bundels.

Ook in de gebruiksfase is de opleghoek van belang. Dit zien we wanneer we inzoomen op de berekening van de spanningen ten gevolge van de grond- en verkeersbelasting.

Op blz. 1 van de berekening zien we met welke belastinghoek en ondersteuningshoek we rekenen:

Belastinghoek	α	= 30	°
Ondersteuningshoek	β	= 30	°

Dit betekent dat alle bovenbelasting over 1/12^e deel van de buis in rekening wordt gebracht en de buis deze belasting over 1/12^e deel door geeft naar de bodem. Ter vergelijking, bij een enkele buis is de belastinghoek gelijk aan 180° en de ondersteuningshoek is daarbij 120°.

6.5 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 ¹]
1e rechte deel	7,22	0,76	7,98	186,40	2,98
Neergaande bocht	15,92	0,45	16,37	382,41	6,12
2e rechte deel	15,92	1,16	17,08	399,08	6,39
Opgaande bocht	15,92	0,45	16,37	382,41	6,12
3e rechte deel	7,22	0,76	7,98	186,40	2,98

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,257 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,88 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

Bij de situatie met 30° / 30° is sprake van een momentencoëfficiënt K_b van 0,257. Indien sprake is van een enkele buis is K_b gelijk aan 0,138. Dit scheelt dus behoorlijk. Hoeveel dit scheelt zien we hier:

6.5 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 ¹]
1e rechte deel	7,22	0,76	7,98	100,09	1,68
Neergaande bocht	15,92	0,45	16,37	205,34	3,44
2e rechte deel	15,92	1,16	17,08	214,29	3,59
Opgaande bocht	15,92	0,45	16,37	205,34	3,44
3e rechte deel	7,22	0,76	7,98	100,09	1,68

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,92 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

Bij 30°/30° is de hoogste spanning 6,39 N/mm². Bij 180°/120° is de hoogste spanning 3,59 N/mm².



Ook bij het berekenen van de spanningen ten gevolge van de grondreactie in de bochten is sprake van hogere spanningen:

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

6.6.1 Neergaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r1} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,179 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,24 \text{ N/mm}^2}$$

6.6.2 Opgaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r2} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,179 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,24 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen bij 30°/30°: $K_{b,ind} = 0,179$

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

6.6.1 Neergaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r1} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,11 \text{ N/mm}^2}$$

6.6.2 Opgaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r2} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0037 \cdot 200,00 \cdot \frac{100,00}{55,21} = \mathbf{0,11 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen bij 180°/120°: $K_{b,ind} = 0,083$

In het totaaloverzicht zien wij uiteraard de hogere spanningen van de afzonderlijke belastingen:

9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	2,98	-	0,65	1,94
Neergaande bocht	6,12	0,24	0,65	4,13
2e rechte deel	6,39	-	0,65	4,15
Opgaande bocht	6,12	0,24	0,65	4,13
3e rechte deel	2,98	-	0,65	1,94

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

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

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

Conclusie: leiding voldoet indien sprake is van een bundel.



Berekeningsvoorbeeld 3: Horizontale steundruk bij bundels

In de NEN 3651:2012 staat het volgende vermeld bij bundels:

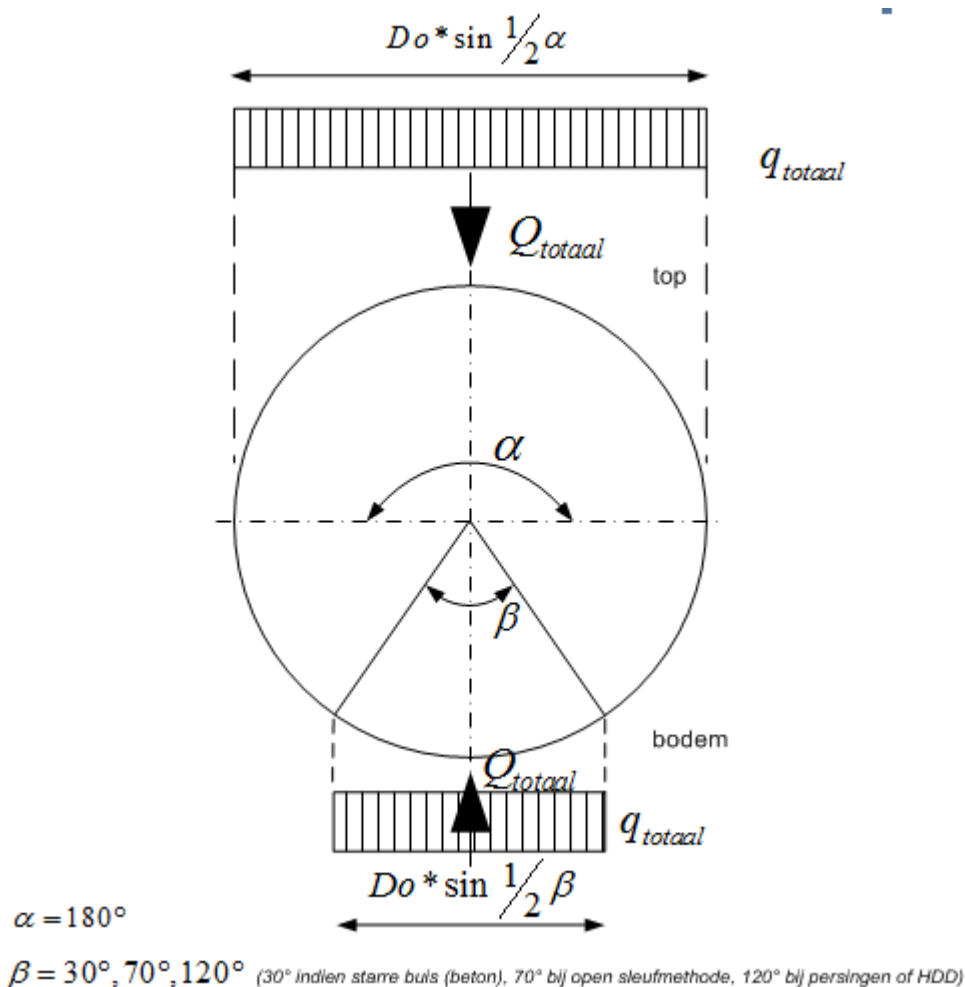
8.6.3.4 Leidingbundel

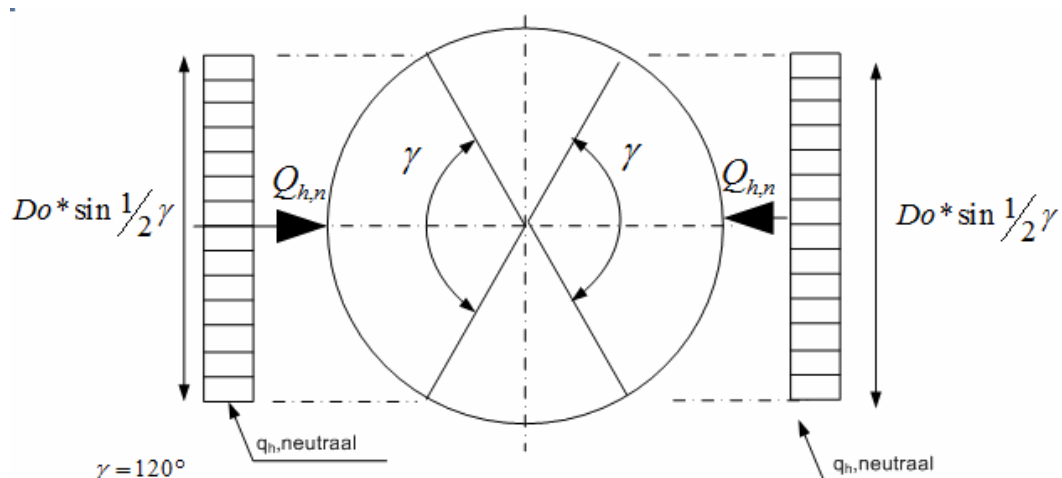
Voor de sterktebeoordeling van een individuele leiding in een leidingbundel mag voor de overdracht van de neutrale grondbelasting tussen twee leidingen worden uitgegaan van een contacthoek van maximaal 30°.

Tevens mag ervan worden uitgegaan dat er dan een neutrale horizontale steundruk aanwezig is. Toepassing van de IOWA-formule (zie D.4 uit NEN 3650-1) is niet aan de orde. Indien een gereduceerde neutrale grondbelasting wordt gehanteerd mag er niet meer dan actieve horizontale steundruk worden verondersteld (zie ook 8.6.3.2).

Wanneer we opmerkingen over de IOWA-formule uit dit tekstgedeelte weglaten (is immers niet aan de orde) dan zien we dit: *Voor de sterktebeoordeling van een individuele leiding in een leidingbundel mag voor de overdracht van de neutrale grondbelasting tussen twee leidingen worden uitgegaan van een contacthoek van maximaal 30°. Tevens mag ervan worden uitgegaan dat er dan een neutrale horizontale steundruk aanwezig is. Indien een gereduceerde neutrale grondbelasting wordt gehanteerd mag er niet meer dan actieve horizontale steundruk worden verondersteld.*

Schematisch zien we het volgende qua bovenbelasting:





De steundruk grijpt aan over 120°.

In Sigma 2012 3.0 kan het in rekening brengen van horizontale steundruk per doorsnede worden aangevinkt.

Doorsneden											
	Locatie	Uitwendige wicht te grond [N/m³]	Inwendige wrijvings- hoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/ m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddings- constante [N/mm³]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting	Extra (verkeers) belasting	Horizontale steundruk
X	1e rechte deel	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek 1/2 x II	☐	☐
↑	Neergaande bo...	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek II	☐	☐
↓	2e rechte deel	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek I	☐	☐
↻	Opgaande bocht	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek II	☐	☒
	3e rechte deel	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek 1/2 x II	☐	☐



Wanneer we de middelste (dus bij 2^e rechte deel) aanvinken zien we de volgende berekeningsresultaten.

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting							
Locatie	Afstand t.o.v. inleidepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
1e rechte deel	7	3,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
Neergaande bocht	31	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
2e rechte deel	50	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
Opgaande bocht	69	8,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50
3e rechte deel	93	3,00	1,00	Klei	17,00	17,00	17,50

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Hor. steun- druk	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm ²]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Geen	-	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Geen	-	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
2e rechte deel	Geen	✓	-	10,00	2,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Geen	-	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
3e rechte deel	Geen	-	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II

Op blz. 2 laten we gelijk zien dat gerekend wordt met horizontale steundruk bij deze bundel.

Vervolgens zien we bij 6.5 het volgende:

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Hor. steun- druk	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
1e rechte deel	-	7,22	0,76	7,98	186,40 ⁽¹⁾	2,98
Neergaande bocht	-	15,92	0,45	16,37	382,41 ⁽¹⁾	6,12
2e rechte deel	✓	15,92	1,16	17,08	264,60 ⁽²⁾	4,24
Opgaande bocht	-	15,92	0,45	16,37	382,41 ⁽¹⁾	6,12
3e rechte deel	-	7,22	0,76	7,98	186,40 ⁽¹⁾	2,98

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,257 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90 \quad (1)$$

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

$$M_q = 0,257 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90 - 0,143 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,88 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$



We zien dus een vinkje bij horizontale steundruk. Maar we zien ook dat bij M_q met “(1)” en “(2)” wordt aangegeven dat we verschillende formules gebruiken voor het berekenen van het moment in de buiswand.

Formule 1:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g$$

Formule 2:

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

Formule 1 is dus uitgebreid met het effect van horizontale steundruk.

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

Hierdoor zal het moment altijd lager zijn dan bij formule 1.

De spanning is dan automatisch ook lager, nu namelijk $4,24 \text{ N/mm}^2$ in plaats van $6,39 \text{ N/mm}^2$.

Conclusie: Spanning wordt lager bij toepassing van horizontale steundruk. Bij PE-bundels mag hier mee worden gerekend. Bij een stalen leiding is dit niet altijd 100% het geval. Dit wordt toegelicht bij een ander berekeningsvoorbeeld.



Berekeningsvoorbeeld 4: Gereduceerde grondbelasting / boring met enkele buis

Wanneer een horizontaal gestuurde boring diep wordt geboord dan mag gereduceerde grondbelasting in rekening gebracht worden. In Sigma 2012 3.0 is deze rekenmethode ingebouwd en wordt deze mogelijkheid zichtbaar in de geavanceerde modus.

The screenshot shows the 'Doorsneden' (Cross-sections) window in Sigma 2012 3.0. It contains a table with columns for various soil parameters and a dropdown menu for 'Gereduceerde grondbelasting' (Reduced ground load). The table has four rows of data, all for 'Klei' (Clay) at a depth of 1.0 m. The 'Gereduceerde grondbelasting' column is set to 'Geen' (None) for all rows. A blue arrow points from the 'Gereduceerde grondbelasting' column header to a dropdown menu that is open, showing the same 'Geen' option.

Locatie	W.S. t.o.v. aaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ²]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting	Extra (verkeers) belasting	Horizontale steundruk
1e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	-	Grafiek 1/2 x II	-	-
Neergaande bo...	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	-	Grafiek II	-	-
2e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	-	Grafiek I	-	-
Opgaande bocht	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	-	Grafiek II	-	-
3e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen	-	Grafiek 1/2 x II	-	-

Gereduceerde grondbelasting

Geen

Geen

Geen

Geen

Geen

Rekenen met gereduceerd grondbelasting geeft de mogelijkheid om de spanningen t.g.v. de grondbelasting aanzienlijk te reduceren. Op de volgende pagina's gaan we daarom uitgebreid op dit aspect in.



Achtergrondinformatie over gereduceerde grondbelasting.

Voor de berekening van de kruinbelasting in de bedrijfsfase mag er, als conservatieve aanname, van worden uitgegaan dat de boorgang verdwijnt en er neutrale grondbelasting op de leiding komt te rusten. De neutrale grondbelasting kan dan als maximale verticale grondbelasting op een met de HDD-techniek aangelegde leiding worden aangehouden. Tevens mag er dan van worden uitgegaan dat er een neutrale horizontale steundruk aanwezig is. Hoe we dit moeten berekenen hebben we besproken in de voorgaande voorbeelden.

Door gewelfwerking kan echter de neutrale grondbelasting, vooral in zand, aanzienlijk worden gereduceerd. Indien een gereduceerde neutrale grondbelasting wordt gehanteerd, mag er in het grensvlak leidingboorgang nog steeds neutrale horizontale steundruk worden verondersteld.

De bentonietgrondschild om de leiding zal na de aanleg van de leiding opstijven. Deze schild fungeert als een zeer samendrukbare laag, die aanleiding zal geven tot gewelfwerking en reductie van voornoemde belasting. Indien ervan wordt uitgegaan dat zich in het grondmassief boven de leiding verticale schuifvlakken met bijbehorende wrijving ontwikkelen, kan de hierna genoemde berekeningswijze voor de verticale grondbelasting worden gehanteerd. De berekeningswijze is gebaseerd op de theorieën van Terzaghi en geldt voor een homogeen grondmassief.

Indien de dikte van het beschouwde grondmassief boven de leiding groter is dan viermaal de breedte van de afschuivende grondkolom boven de leiding ($= 8B_1$), geldt

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

$Q_{n,r1}$ = gereduceerde neutrale grondbelasting op de leiding, in N/mm

B_1 = de halve breedte van de afschuivende grondkolom, in mm,

$B_1 = 1/2D_o + D_o \times \tan (45^\circ - 1/2\phi) \geq R$;

R = de straal van de boorgang, in mm;

K = coëfficiënt voor horizontale neutrale gronddruk, $K = 1 - \sin \phi$;

H = gronddekking op de boorgang, in mm;

C = cohesie, in N/mm

γ' = het effectieve volumieke gewicht van de grond, in N/mm

ϕ = hoek van inwendige wrijving, in graden;

D_o = uitwendige middellijn van de leiding, in mm.

In zand geeft bovenstaande formule de in rekening te brengen verticale grondbelasting op de leiding. In samendrukbare gronden als klei en veen geldt de gevonden belasting alleen voor de situatie direct na het aanbrengen van de leiding. De in eerste instantie ontwikkelde schuifspanningen (positieve kleeft) die de verticale belasting op de leiding reduceren, nemen af door consolidatie van de naastliggende grondkolommen door dezelfde schuifspanningen (negatieve kleeft).



Voor klei en veen gelden:

$$Q_{n,r2} = (h \times \gamma - F_r / 2B_1) \times D_o$$

En...

$$F_r = \frac{0,9F_{\max}}{1 + \frac{B_1 \times (3H - 2h) \times \alpha}{2C \times H(\delta_d + F_{\max} / 2B_1 \times k_v)}}$$

En...

$$F_{\max} = (h \times \gamma - Q_{n,r1} / D_o) 2B_1$$

En...

$$\alpha = \ln (h/h_{\text{ref}})$$

F_r	=	de blijvende wrijving (kleef) door de gewelfwerking, in N/mm
$F_{\max}$	=	de kleef die maximaal kan worden ontwikkeld, in N/mm
H	=	de dikte van het samendrukbare grondmassief, in mm
α	=	dimensieloze factor
C	=	de samendrukkingsconstante
k_v	=	de beddingconstante van het bentoniet-grondmengsel na opstijving, in N/mm
δ_d	=	de relatieve verplaatsing tussen de grondkolommen bij volledig ontwikkelde kleef, in mm
0,9	=	modelfactor



Indien sprake is van een gelaagd grondmassief dan wordt de grondbelasting door gewelfwerking gereduceerd. De bepaling van de reductie is echter aanzienlijk complexer, door de variatie van het grondgedrag over de hoogte van het grondmassief.

In het geval van een afwisseling van samendrukbare en niet-samendrukbare grondlagen, moet afhankelijk van de diepteligging van de leiding een schematiseringskeuze worden gemaakt. Bij een ligging van een leiding in een niet-samendrukbare grondlaag onder samendrukbare grondlagen, gecombineerd met de situatie dat zich onder de leiding geen samendrukbare grondlaag bevindt over een diepte van ten minste 5D, kan de grond worden geschematiseerd volgens een tweelagensysteem. De bovenlaag bestaat dan uit een samendrukbaar pakket, de onderlaag uit een niet-samendrukbare laag.

Ervan uitgaande dat:

- de lagen voldoende homogene mechanische eigenschappen bezitten;
- de gewelfwerking in het klei/veen te verwaarlozen is ten opzichte van die in het zand;
- de leiding dieper dan $8B_1$ in het zand ligt;
- in het zand geen cohesie aanwezig is ($c = 0$),

kan de gereduceerde verticale grondbelasting op de leiding worden berekend volgens:

$$Q_{n,r} = \frac{B_1 \times \gamma'}{K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-K \times h \times \tan \phi / B_1} \right) D_0 + \sigma_c D_0 e^{-K \times h \times \tan \phi / B_1}$$

En...

$$\sigma_c = \gamma'_h \times h_h$$

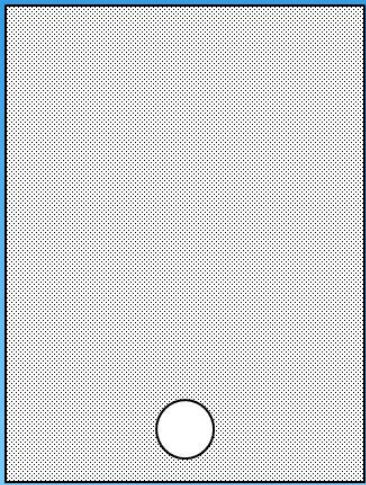
Hierin is:

- | | | |
|-------------|---|--|
| γ' | = | het effectieve volumieke gewicht van het zand, in N/mm |
| h | = | de gronddekking op de boorgang van het zand, in mm |
| ϕ | = | hoek van inwendige wrijving van het zand, in graden |
| σ_c | = | de verticale korrelspanning in het contactvlak van beide lagen, in N/mm ² |
| γ'_h | = | het gemiddelde effectieve volumieke gewicht van de holocene laag, in N/mm ³ |
| h_h | = | de dikte van de klei/veenlaag, in mm |

Bovenstaande formule is in feite gelijklopend aan die voor een homogeen pakket met toevoeging van een bovenbelasting (het samendrukbare klei/veenpakket) die afneemt naarmate de diepte in het zand toeneemt.



Ter verduidelijking de drie mogelijke situaties:

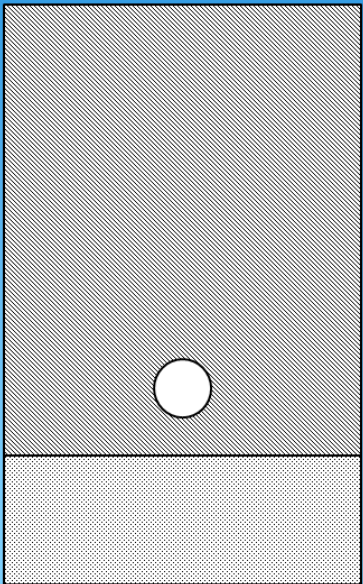


h

$$Q_{n,r1} = \frac{B_1 \times \left(\gamma' - \frac{c}{B_1} \right)}{K \times \tan \varphi} \times \left(1 - e^{-\frac{-K \cdot h \cdot \tan \varphi}{B_1}} \right) \times D_0$$

$$B_1 = 1/2 D_0 + D_0 \times \tan (45^\circ - 1/2 \varphi) \geq R;$$

- ✓ Geldig in een homogeen grondmassief van zand
- ✓ Alleen toepasbaar als dekking $\geq 8 \times B_1$



h

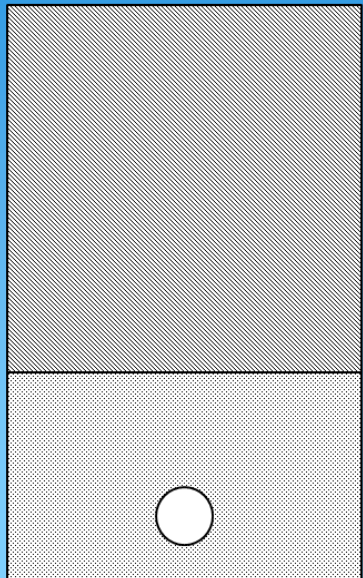
H

$$Q_{n,r2} = (h \times \gamma' - F_r / 2B_1) \times D_0$$

$$F_r = \frac{0,9 F_{\max}}{1 + \frac{B_1 \times (3H - 2h) \times \alpha}{2C \times H (\delta_d + F_{\max} / 2B_1 \times k_v)}}$$

$$F_{\max} = (h \times \gamma' - Q_{n,r1} / D_0) \times 2B_1;$$

- ✓ Geldig in een homogeen grondmassief van samendrukbare grond
- ✓ $F_{\max}$ is te ontwikkelen kleeft
- ✓ Alleen toepasbaar als dekking $\geq 8 \times B_1$
- ✓ H = dikte samendrukbare rondmassief



h_h

h

$$Q_{n,r} = \frac{B_1 \times \gamma'}{K \times \tan \varphi} \left(1 - e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1} \right) D_0 + \sigma_c D_0 e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1}$$

$$\sigma_c = \gamma'_h \times h_h$$

- ✓ Geldig in een gelaagd grondmassief
- ✓ Geldt als dekking in pleistoceen $h \geq 8 \times B_1$



Berekeningsvoorbeeld met homogeen grondmassief. Alleen zandgrond.

$$Q_{n,r1} = \frac{B_1 \times \left(\gamma' - \frac{c}{B_1} \right)}{K \times \tan \phi} \times \left(1 - e^{-\frac{-K \cdot h \cdot \tan \phi}{B_1}} \right) \times D_0$$

$$B_1 = 1/2 D_0 + D_0 \times \tan (45^\circ - 1/2 \phi) \geq R;$$

- ✓ Geldig in een homogeen grondmassief van zand
- ✓ Alleen toepasbaar als dekking $\geq 8 \times B_1$

In Sigma selecteren we dit als volgt:

Locatie	W.S. t.o.v. aaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm²]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting	Ex (v) be
1e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Homogeen zand		Grafiek 1/2 x II	
Neergaande bo...	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
2e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
Opgaande bocht	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
3e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				

We moeten dan wel de rest van de grondgegevens (links hiervan) ook op zandgrond zetten.

Boorprofiel

Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	Lengte 1e rechte deel L1 [m]	Langs de buis	Horizontaal	Lengte na 1e c
25,0	7,0	6,34		
Uittrrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	Lengte neergaande bocht L2 [m]	24,0	23,24	Lengte na 2e c
25,0				
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	Lengte 2e rechte deel L3 [m]	38,0	38,0	Lengte na 3e c
55,0				
Straal neergaande bocht R1 [m]	Lengte opgaande bocht L4 [m]	24,0	23,24	Lengte na 4e c
55,0				
Straal opgaande bocht R2 [m]	Lengte 3e rechte deel L5 [m]	7,0	6,34	Totale lengte
55,0				

Doorsneden

Locatie	W.S. t.o.v. aaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. v beddis conste [N/mm²]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting	Ex (v) be
1e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Geen		Grafiek 1/2 x II	
Neergaande bo...	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
2e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
Opgaande bocht	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				
3e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006				



Dat kan dus in een keer met de rechtermuisknop. Selecteer “Zand Matig”

Ook moeten we de beddingsconstante aanpassen.

Overzicht beddingsconstante volgens NEN3650									
Grondsoort	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand			Hard zand	
Beddingsconstante [N/mm ³]	k _{v,min}	k _{v,gem}	k _{v,min}	k _{v,gem}	k _{v,min}	k _{v,gem}		k _{v,min}	k _{v,gem}
Uitwendige middellijn [mm]						1 m	3 m		
100	0.007	0.011	0.016	0.024	0.04	0.045	0.11	0.1	0.158
200	0.004	0.006	0.0085	0.013	0.022	0.025	0.058	0.055	0.087
300	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.016	0.018	0.04	0.04	0.063
400	0.002	0.003	0.0045	0.007	0.012	0.015	0.032	0.03	0.0475
450	0.0018	0.0028	0.004	0.006	0.01	0.013	0.029	0.025	0.0395
600	0.0014	0.0022	0.003	0.005	0.008	0.011	0.022	0.02	0.0315
750	0.0011	0.0018	0.0025	0.004	0.006	0.009	0.018	0.0176	0.0278
900	0.001	0.0016	0.0021	0.0034	0.006	0.008	0.015	0.0161	0.0254
1200	0.0008	0.0012	0.0017	0.0027	0.004	0.007	0.012	0.0137	0.0216

Omdat we een diameter van 200 mm hebben EN de boring dieper dan 3 meter is selecteren we 0,058.

Vervolgens kopiëren we deze invoer 4 keer naar beneden.

Doorsneden									
Locatie	W.S. t.o.v. aaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	
1e rechte deel	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	
Neergaande bo...	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	
2e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	
Opgaande bocht	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	
3e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	

Nu zien we dit:

Doorsneden									
Locatie	W.S. t.o.v. aaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	
1e rechte deel	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	
Neergaande bo...	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	
2e rechte deel	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	
Opgaande bocht	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	
3e rechte deel	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	



Nu geven we aan dat we bij elk punt willen rekenen met gereduceerde grondbelasting.

Locatie	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	Gereduceerde grondbelasting
1e rechte deel	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	Homogeen zand ▾
Neergaande bo...	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	Homogeen zand ▾
2e rechte deel	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	Homogeen zand ▾
Opgaande bocht	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	Homogeen zand ▾
3e rechte deel	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,058	Homogeen zand ▾

Klik vervolgens op berekenen. We zien dan de volgende resultaten:

Op blz. 2 zien we vermeld dat we rekenen met gereduceerde grondbelasting.

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
1e rechte deel	7	3,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Neergaande bocht	31	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
2e rechte deel	50	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Opgaande bocht	69	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
3e rechte deel	93	3,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Homogeen (zand)	0,0580	0,00	45,00	Grafiek II
2e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Homogeen (zand)	0,0580	0,00	45,00	Grafiek II
3e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II

Locatie	Gereduceerde grondbelasting
1e rechte deel	Homogeen (zand)
Neergaande bocht	Homogeen (zand)
2e rechte deel	Homogeen (zand)
Opgaande bocht	Homogeen (zand)
3e rechte deel	Homogeen (zand)



Bij het berekenen van de neutrale grondbelasting (6.3) zien we nu het volgende:

Als eerste wordt (rekening houdende met de grondwaterstand) het effectieve volumieke gewicht van het zand van de grondkolom op de buis uitgerekend.

Locatie	h [m]	GWS [m]	γ' [kN/m ³]
1e rechte deel	3,00	1,00	14,60
Neergaande bocht	8,00	1,00	12,98
2e rechte deel	8,00	1,00	12,98
Opgaande bocht	8,00	1,00	12,98
3e rechte deel	3,00	1,00	14,60

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

Vervolgens rekenen we $8 \cdot B_1$, Q_n en $Q_{n,r}$ uit.

$8 \cdot B_1$ is van belang om uit te rekenen of gereduceerde grondbelasting mag worden gebruikt. Vandaar dat wij deze waarde vermelden.

De neutrale grondbelasting op de buis is Q_n is de waarde die wij in voorgaande rekenvoorbeelden ook uitgerekend hebben. $Q_{n,r}$ is de gereduceerde waarde.

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
1e rechte deel	Homogeen (zand)	1,20	8,76	1,48 ⁽¹⁾
Neergaande bocht	Homogeen (zand)	1,20	20,76	1,32 ⁽¹⁾
2e rechte deel	Homogeen (zand)	1,20	20,76	1,32 ⁽¹⁾
Opgaande bocht	Homogeen (zand)	1,20	20,76	1,32 ⁽¹⁾
3e rechte deel	Homogeen (zand)	1,20	8,76	1,48 ⁽¹⁾

We zien dus dat de gereduceerde waarde fors minder is dan de oorspronkelijke waarde.

De volgende formules zijn gebruikt om deze waarden te berekenen.

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

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

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

Indien gereduceerde grondbelasting volgens berekeningswijze homogeen grondmassief, zand ($h \geq 8 \cdot B_1$):

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



Met deze gereduceerde grondbelasting kunnen we de spanningen in de buis berekenen.

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
1e rechte deel	8,76	1,48	0,76	2,24	28,11 ⁽²⁾	0,47
Neergaande bocht	20,76	1,32	0,45	1,77	22,20 ⁽²⁾	0,37
2e rechte deel	20,76	1,32	1,16	2,48	31,15 ⁽²⁾	0,52
Opgaande bocht	20,76	1,32	0,45	1,77	22,20 ⁽²⁾	0,37
3e rechte deel	8,76	1,48	0,76	2,24	28,11 ⁽²⁾	0,47

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 90,90 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,92 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

We gebruiken dus formule nr. 2 om het moment te berekenen. Nadat we dit gedaan hebben zien we veel lagere spanningen in de buis als gevolg van de lagere grondbelastingen.

Wanneer we nu naar het totaaloverzicht kijken qua spanningen zien we dit:

9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	0,47	-	0,65	0,31
Neergaande bocht	0,37	0,34	0,65	0,46
2e rechte deel	0,52	-	0,65	0,34
Opgaande bocht	0,37	0,34	0,65	0,46
3e rechte deel	0,47	-	0,65	0,31

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

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

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



Ook bij de berekening van de deflectie (vervorming) mag de gereduceerde grondbelasting worden gebruikt.

10. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1e rechte deel	8,76	1,48	0,76	-	0,61⁽²⁾	0,27
Neergaande bocht	20,76	1,32	0,45	0,011	0,49⁽²⁾	0,21
2e rechte deel	20,76	1,32	1,16	-	0,68⁽²⁾	0,30
Opgaande bocht	20,76	1,32	0,45	0,011	0,49⁽²⁾	0,21
3e rechte deel	8,76	1,48	0,76	-	0,61⁽²⁾	0,27

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8\% \cdot D_g = 0,08 \cdot 181,80 = \mathbf{14,54 \text{ mm}}$$

Formule 1: zonder gereduceerde grondbelasting

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

Formule 2: met gereduceerde grondbelasting

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

In Sigma 2012 3.0 wordt dus getoond wanneer we welke formule gebruiken.



Stel dat bij het eerste punt en het vijfde punt geen gereduceerde grondbelasting toegepast wordt dan zien we het volgende:

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
1e rechte deel	8,76	-	0,76	9,52	119,41 ⁽¹⁾	2,00
Neergaande bocht	20,76	1,32	0,45	1,77	22,20 ⁽²⁾	0,37
2e rechte deel	20,76	1,32	1,16	2,48	31,15 ⁽²⁾	0,52
Opgaande bocht	20,76	1,32	0,45	1,77	22,20 ⁽²⁾	0,37
3e rechte deel	8,76	-	0,76	9,52	119,41 ⁽¹⁾	2,00

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 90,90 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,92 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

10. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1e rechte deel	8,76	-	0,76	-	2,06⁽¹⁾	1,13
Neergaande bocht	20,76	1,32	0,45	0,011	0,49⁽²⁾	0,21
2e rechte deel	20,76	1,32	1,16	-	0,68⁽²⁾	0,30
Opgaande bocht	20,76	1,32	0,45	0,011	0,49⁽²⁾	0,21
3e rechte deel	8,76	-	0,76	-	2,06⁽¹⁾	1,13

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

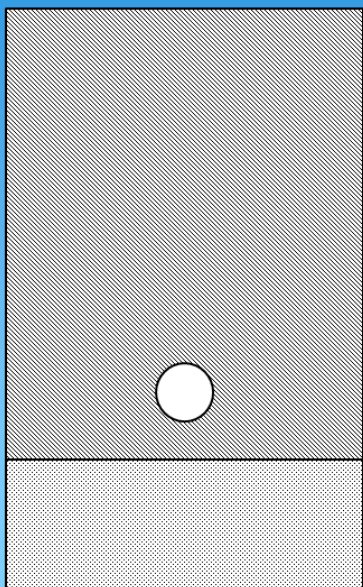
$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot Q - 0,083 \cdot Q_{n,r} + 0,048 \cdot Q_r) \cdot r_g^3}{E' \cdot I_w} \quad (2)$$

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

$$\text{Toelaatbare deflectie} = 8\% \cdot D_g = 0,08 \cdot 181,80 = \mathbf{14,54 \text{ mm}}$$



Berekeningsvoorbeeld met homogeen grondmassief bij samendrukbare grond.



$$Q_{n,r2} = (h \times \gamma - F_r / 2B_1) \times D_o$$

$$F_r = \frac{0,9F_{max}}{1 + \frac{B_1 \times (3H - 2h) \times \alpha}{2C \times H(\delta_d + F_{max} / 2B_1 \times k_v)}}$$

$$F_{max} = (h \times \gamma - Q_{n,r1} / D_o) 2B_1$$

- ✓ Geldig in een homogeen grondmassief van samendrukbare grond
- ✓ F_{max} is te ontwikkelen kleeft
- ✓ Alleen toepasbaar als dekking $\geq 8 \times B_1$
- ✓ H = dikte samendrukbare grondmassief

Wanneer sprake is van klei/veen en een geringe hoeveelheid zand dan is sprake van samendrukbare grond. In de omgeving van Schipluiden begint de harde zandlaag (pleistoceen) op circa 24 m –maaiveld. De grond daarboven is samendrukbaar. Dat wil zeggen dat deze na belasting daarvan samen gedrukt zal worden.

Wanneer we deze optie in Sigma 2012 3.0 gaan invoeren zien we het volgende qua invoer.

modulus ondergrond [N/m ²]	Gem. vert. beddings- constante [N/mm ³]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting
45,0	0,058	Homogeen sam...	☐	Grafiek 1/2 x II
45,0	0,058			
45,0	0,058			
45,0	0,058			
45,0	0,058			

☐ Geen gereduceerde grondbelasting
☐ Homogeen grondmassief (zand)
☒ Homogeen grondmassief (samendrukbaar)
☐ Gelaagd grondmassief

Dikte samendrukbaar grondmassief [m] 15,0

Samendrukkingconstante [-] 15

Relatieve verplaatsing [mm] 6

We moeten dus een aantal zaken invoeren over de lokale situatie, namelijk de dikte van het samendukbare pakket, de samendrukkingsconstante en de relatieve verplaatsing.



In de NEN 3650:2012 staan richtgetallen voor de samendrukkingsconstante en de relatieve verplaatsing.

Deze zijn verwerkt in Sigma 2012 3.0.

Overzicht grondparameters volgens NEN 3650											
			Zand				Klei			Veen	
			Vast	Matig	Los	Vast	Matig	Slap	Slap		
Volumiek gewicht droge grond	γ_d	[kN/m ³]	20	19	18	17	20	19	17	14	10
Volumiek gewicht natte grond	γ_n	[kN/m ³]	22	21	20	19	20	19	17	14	10
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ	[°]	40	35	32.5	30	25	17.5	17.5	15	15
Effectieve cohesie	c'	[kN/m ²]	0	0	0	0	15	13	5	0	2.5
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u	[kN/m ²]	0	0	0	0	200	100	50	25	10
E-modulus sleufmateriaal	E_1	[MN/m ²]	20	20	10	5	2	2	1	0.5	0.2
E-modulus ondergrond	E_{100}	[MN/m ²]	110	75	45	15	10	10	2	1	0.5
Samendrukkingsconstante	C_p	[-]	1500	1000	600	200	30	25	15	7	7.5
Relatieve verplaatsing	δ_d	[mm]	1-3	1-3	3-5	5-8	2-4	2-4	4-6	6-10	10-15

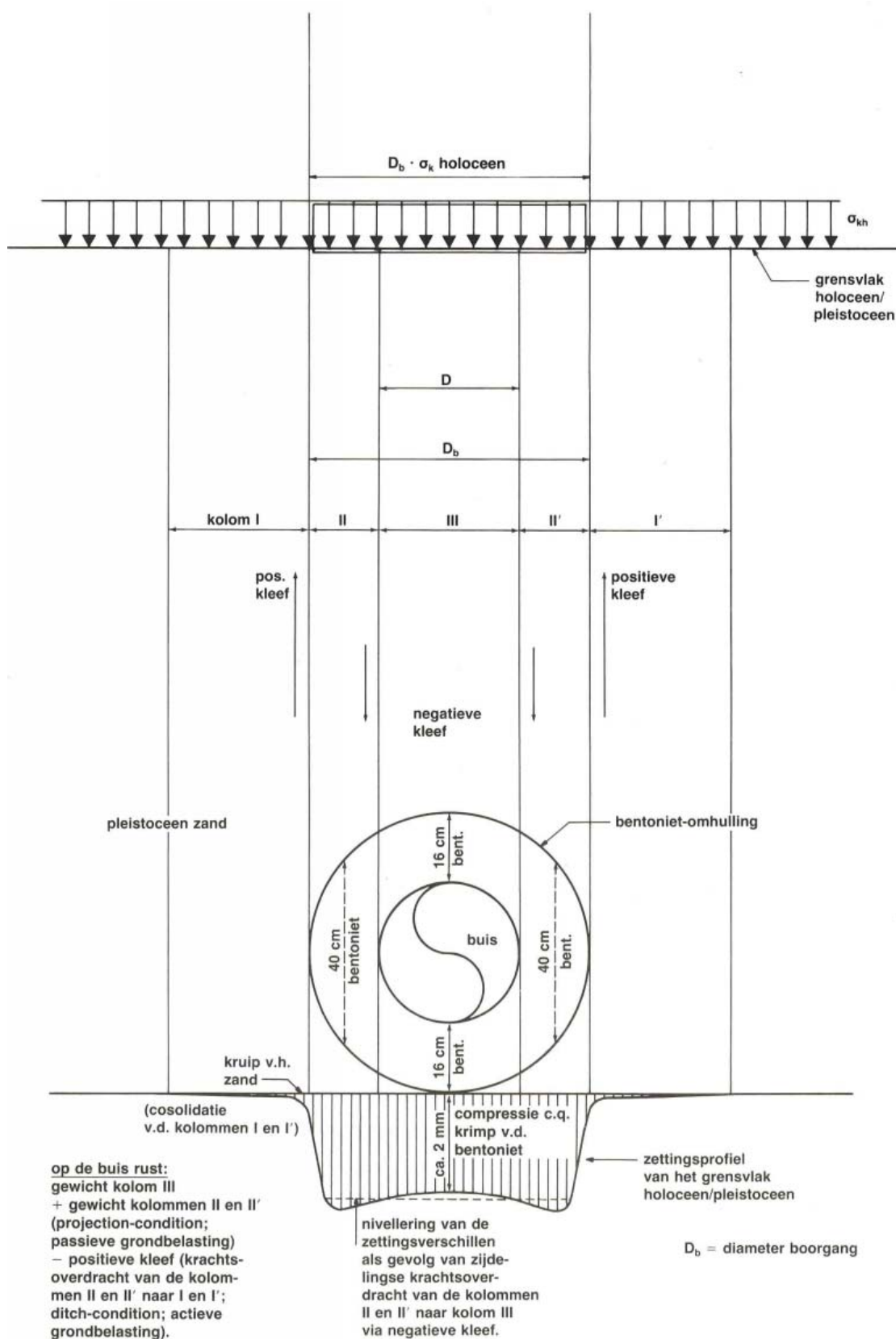
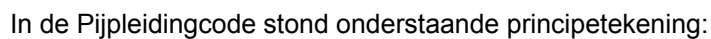
We zien hier de tabel met zowel samendrukkingsconstante als relatieve verplaatsing.

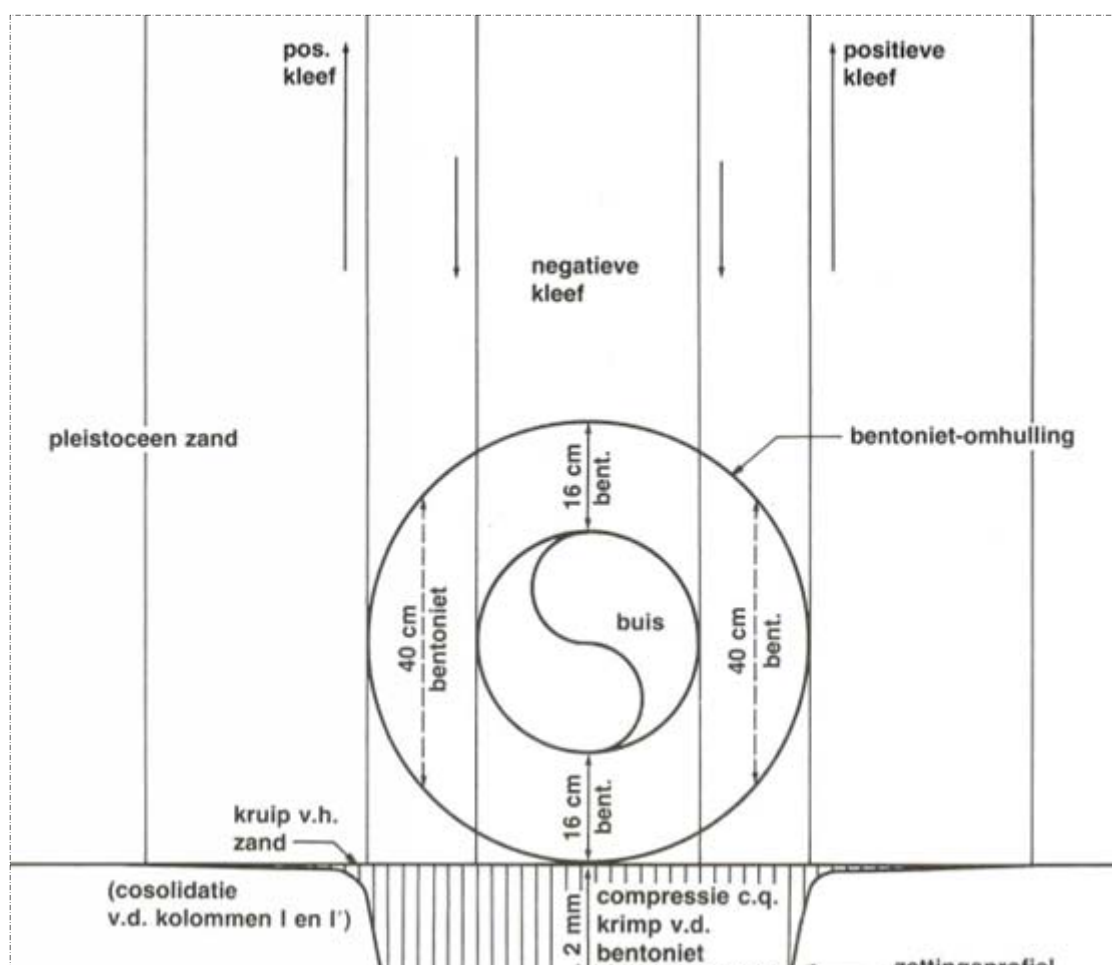
Wanneer we matig slappe klei selecteren (en deze invoerregel kopiëren naar de onderstaande regels) zien we dit:

Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting
17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006	Homogeen sam...	☐	Grafiek 1/2 x II
17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006	☐ Geen gereduceerde grondbelasting ☐ Homogeen grondmassief (zand) ☒ Homogeen grondmassief (samendrukbaar) ☐ Gelaagd grondmassief Dikte samendrukbaar grondmassief [m] 15,0 Samendrukkingconstante [-] 15 Relatieve verplaatsing [mm] 6		
17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			
17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			
17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			

2e rechte deel

De dekking van de leiding varieert van 3 m tot 8 m. Het samendrukbaar grondmassief heeft een dekking van 15 m. Dit betekent dus dat zowel boven als onder de boring de grond samendrukbaar is.





Wanneer we inzoomen zien de een kolom grond boven de buis waar negatieve kleef plaats zal vinden en ter weerszijden daarvan positieve kleef. Door de krimp van de bentoniet verplaatsen de grondkolommen onderling. Bij een boring in zandgrond is deze verplaatsing een stuk minder dan bij klei of veen.

Kijken we naar de printuitvoer van Sigma bij deze berekening dan zien we het volgende:

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Dekking samendrukbaar grondmassief [m]	Samendrukkings- constante [-]	Relatieve verplaatsing [mm]
1e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	15,00	15,00	6,00
Neergaande bocht	Homogeen (samendrukbaar)	15,00	15,00	6,00
2e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	15,00	15,00	6,00



6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	h [m]	GWS [m]	γ' [kN/m ³]
1e rechte deel	3,00	1,00	12,03
Neergaande bocht	8,00	1,00	9,95
2e rechte deel	8,00	1,00	9,95
Opgaande bocht	8,00	1,00	9,95
3e rechte deel	3,00	1,00	12,03

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

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	H [m]	$F_{\max}$ [N/mm ¹]	F_r [N/mm ¹]	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
1e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	14,74	0,54	7,22	6,96 ⁽¹⁾
Neergaande bocht	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	32,49	1,41	15,92	15,23 ⁽¹⁾
2e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	32,49	1,41	15,92	15,23 ⁽¹⁾
Opgaande bocht	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	32,49	1,41	15,92	15,23 ⁽¹⁾
3e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	14,74	0,54	7,22	6,96 ⁽¹⁾

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

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

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

Indien gereduceerde grondbelasting volgens berekeningswijze homogeen grondmassief, samendrukbaar ($h \geq 8 \cdot B_1$):

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

$$F_{\max} = (h \cdot \gamma' - \frac{Q_{n,r1}}{D_o}) \cdot 2 \cdot B_1$$

$$F_r = \frac{0,9 \cdot F_{\max}}{1 + \frac{B_1 \cdot (3 \cdot H - 2 \cdot h) \cdot \ln(h)}{2 \cdot C \cdot H \cdot (\delta_d + (F_{\max} / 2 \cdot B_1) \cdot k_v)}}$$

$$Q_{n,r2} = (h \cdot \gamma' - \frac{F_r}{2 \cdot B_1}) \cdot D_o \quad (1)$$

Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
7,22	6,96 ⁽¹⁾
15,92	15,23 ⁽¹⁾
15,92	15,23 ⁽¹⁾
15,92	15,23 ⁽¹⁾
7,22	6,96 ⁽¹⁾

We zien dus relatief weinig verschil tussen de neutrale grondbelasting en de gereduceerde grondbelasting.

Bij zandgrond (vorige voorbeeld) zagen we zeer grote verschillen:

Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
8,76	1,48 ⁽¹⁾
20,76	1,32 ⁽¹⁾
20,76	1,32 ⁽¹⁾
20,76	1,32 ⁽¹⁾
8,76	1,48 ⁽¹⁾



Wanneer we de dekking verhogen naar bijvoorbeeld 10 m diep respectievelijk 13 m diep dan zien we de volgende resultaten:

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n			
Locatie	h [m]	GWS [m]	γ' [kN/m ³]
1e rechte deel	10,00	1,00	9,70
Neergaande bocht	13,00	1,00	9,47
2e rechte deel	13,00	1,00	9,47
Opgaande bocht	13,00	1,00	9,47
3e rechte deel	10,00	1,00	9,70

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

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	H [m]	$F_{\max}$ [N/mm ¹]	F_r [N/mm ¹]	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
1e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	39,60	1,94	19,40	18,45 ⁽¹⁾
Neergaande bocht	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	50,25	3,10	24,62	23,10 ⁽¹⁾
2e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	50,25	3,10	24,62	23,10 ⁽¹⁾
Opgaande bocht	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	50,25	3,10	24,62	23,10 ⁽¹⁾
3e rechte deel	Homogeen (samendrukbaar)	1,63	15,00	39,60	1,94	19,40	18,45 ⁽¹⁾

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

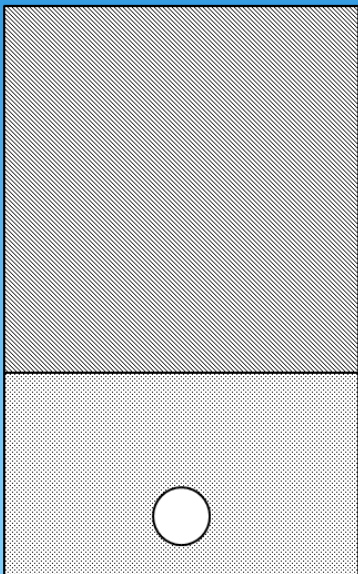
$$K = 1 - \sin(\varphi)$$

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

Ook bij deze dekking zien we dus dat de “winst” relatief gering is door te rekenen met gereduceerde grondbelasting.



Berekeningsvoorbeeld met gelaagd grondmassief.



$$Q_{n,f} = \frac{B_1 \times \gamma'}{K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-K \times h \times \tan \phi / B_1} \right) D_0 + \sigma_c D_0 e^{-K \times h \times \tan \phi / B_1}$$

$$\sigma_c = \gamma' h \times h_h$$

h_h

h

- ✓ Geldig in een gelaagd grondmassief
- ✓ Geldt als dekking in pleistoceen $h \geq 8 \times B_1$

Bij een gelaagd grondmassief komt de leiding vanuit de klei/veen en gaat deze verder in het zand.

Kijken we naar ons rekenvoorbeeld (ter vergelijking van de resultaten) en leggen we de grens van h_h en h op 6 meter ten opzichte van het maaiveld dan zien we de volgende berekeningsresultaten.

Invoer in Sigma 2012 3.0:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm³]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting
3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006	Geen	☐	Grafiek ½ x II
8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006	Gelaagd	☐	Grafiek II
8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			
8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			
3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	5,0	2,0	0,006			

1e rechte deel

2e rechte deel

☐ Geen gereduceerde grondbelasting
☐ Homogeen grondmassief (zand)
☐ Homogeen grondmassief (samendrukbaar)
☒ Gelaagd grondmassief

Dekking pleistoceen [m]

Gewicht nat, pleistoceen [kN/m³]

vert. lingsconstante [m³]	Gereduceerde grondbelasting	Aangepaste neutrale gronddruk	Verkeersbelasting
0,006	Geen	☐	Grafiek ½ x II
0,006	Gelaagd	☐	Grafiek II
0,006			
0,006			
0,006			

☐ Geen gereduceerde grondbelasting
☐ Homogeen grondmassief (zand)
☐ Homogeen grondmassief (samendrukbaar)
☒ Gelaagd grondmassief

Dekking pleistoceen [m]

Gewicht nat, pleistoceen [kN/m³]

We zien dus dat gevraagd wordt om de diepteligging in het pleistoceen en het gewicht van de grond.

Meer invoer is niet nodig.



Bekijken we het berekeningsresultaat dan zien we het volgende:

Op blz. 2 zien we....

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Dekking holocene grondmassief [m]	Dekking pleistoceen grondmassief [m]	Gewicht nat, pleistoceen [kN/m³]
1e rechte deel	Geen	-	-	-
Neergaande bocht	Gelaagd	5,00	3,00	20,00
2e rechte deel	Gelaagd	5,00	3,00	20,00
Opgaande bocht	Gelaagd	5,00	3,00	20,00
3e rechte deel	Geen	-	-	-

Bij 6.3 zien we vervolgens:

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n							
Locatie	h [m]	GWS [m]	h_h [m]	h_p [m]	γ' [kN/m³]	γ'_h [kN/m³]	γ'_p [kN/m³]
1e rechte deel	3,00	1,00	-	-	12,03	-	-
Neergaande bocht	8,00	1,00	5,00	3,00	9,95	8,72	12,00
2e rechte deel	8,00	1,00	5,00	3,00	9,95	8,72	12,00
Opgaande bocht	8,00	1,00	5,00	3,00	9,95	8,72	12,00
3e rechte deel	3,00	1,00	-	-	12,03	-	-

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

$$\gamma'_p = \gamma \cdot \gamma_{n,p} - \gamma_w$$

$$\gamma'_h = \frac{\gamma' \cdot h - \gamma'_p \cdot h_p}{h_h}$$

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	Q_n [N/mm¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm¹]
1e rechte deel	Geen	-	7,22	-
Neergaande bocht	Gelaagd	1,63	15,92	2,48 ⁽¹⁾
2e rechte deel	Gelaagd	1,63	15,92	2,48 ⁽¹⁾
Opgaande bocht	Gelaagd	1,63	15,92	2,48 ⁽¹⁾
3e rechte deel	Geen	-	7,22	-

$$B_1 = \frac{1}{2} \cdot D_0 + D_0 \cdot \tan(45^\circ - \frac{1}{2} \cdot \varphi) \geq R$$

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

$$Q_n = (\gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_0 = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_0$$

Indien gereduceerde grondbelasting volgens berekeningswijze gelaagd grondmassief ($h_p \geq 8 \cdot B_1$):

$$\sigma_c = \gamma'_h \cdot h_h$$

$$Q_{n,r} = \frac{B_1 \cdot \gamma'_p}{K \cdot \tan(\varphi)} \cdot (1 - e^{\frac{-K \cdot h_p \cdot \tan \varphi}{B_1}}) \cdot D_0 + \sigma_c \cdot D_0 \cdot e^{\frac{-K \cdot h_p \cdot \tan \varphi}{B_1}} \quad (1)$$



Wanneer we inzoomen zien we:

Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
7,22	-
15,92	2,48 ⁽¹⁾
15,92	2,48 ⁽¹⁾
15,92	2,48 ⁽¹⁾
7,22	-

De maatgevende grondbelastingen bevinden zich dus niet meer in het zand maar in de aansluitende delen waar de boring in de samendrukbare grond ligt.

Kijken we naar de optredende spanningen die we als gevolg van de bovenbelasting in rekening moeten brengen dan zien we:

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
1e rechte deel	7,22	-	0,76	7,98	100,09 ⁽¹⁾	1,68
Neergaande bocht	15,92	2,48	0,45	2,93	36,70 ⁽²⁾	0,61
2e rechte deel	15,92	2,48	1,16	3,64	45,65 ⁽²⁾	0,76
Opgaande bocht	15,92	2,48	0,45	2,93	36,70 ⁽²⁾	0,61
3e rechte deel	7,22	-	0,76	7,98	100,09 ⁽¹⁾	1,68

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 90,90 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 90,90 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,92 \cdot \frac{M_q}{55,21}$$

Bij de doorsneden die niet in het zand liggen is de spanning 1,68 N/mm². Dit is hoger dan de gedeelten waar de leiding wel in het zand ligt.

Overzicht spanningen en toetsing met de toelaatbare spanning:

9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	1,68	-	0,65	1,09
Neergaande bocht	0,61	0,11	0,65	0,47
2e rechte deel	0,76	-	0,65	0,50
Opgaande bocht	0,61	0,11	0,65	0,47
3e rechte deel	1,68	-	0,65	1,09

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

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

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



Overzicht optredende deflectie:

10. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie						
Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1e rechte deel	7,22	-	0,76	-	1,06⁽¹⁾	0,58
Neergaande bocht	15,92	2,48	0,45	0,0037	0,56⁽²⁾	0,21
2e rechte deel	15,92	2,48	1,16	-	0,69⁽²⁾	0,26
Opgaande bocht	15,92	2,48	0,45	0,0037	0,56⁽²⁾	0,21
3e rechte deel	7,22	-	0,76	-	1,06⁽¹⁾	0,58

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi) \cdot (Q_{n,r} + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 90,90^3}{350 \cdot 502,38}$$

Toelaatbare deflectie = 8% · D_g = 0,08 · 181,80 = **14,54 mm**



Het verfijnen van de grondparameters door gebruik te maken van sonderingen.

Projectgegevens

Naam van het project:

Projectonderdeel:

Gegevens **Boorprofiel**

Boorprofiel

		Langs de buis		Horizontaal		Langs de buis		Horizontaal	
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	25,0	Lengte 1e rechte deel L1 [m]	7,0	6,34	Lengte na 1e deel [m]	7,0	6,34		
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	25,0	Lengte neergaande bocht L2 [m]	24,0	23,24	Lengte na 2e deel [m]	31,0	29,58		
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	55,0	Lengte 2e rechte deel L3 [m]	38,0	38,0	Lengte na 3e deel [m]	69,0	67,58		
Straal neergaande bocht R1 [m]	55,0	Lengte opgaande bocht L4 [m]	24,0	23,24	Lengte na 4e deel [m]	93,0	90,82		
Straal opgaande bocht R2 [m]	55,0	Lengte 3e rechte deel L5 [m]	7,0	6,34	Totale lengte [m]	100,0	97,16		

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]
1e rechte deel	7,0	6,34	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
Neergaande bocht	31,0	29,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
2e rechte deel	50,0	48,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
Opgaande bocht	69,0	67,58	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
3e rechte deel	93,0	90,82	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1

Profiel

Het standaardscherm wanneer Sigma wordt opgestart.

We hebben uitgebreid besproken welke varianten er allemaal zijn om de boring te berekenen. Bij deze berekeningen is duidelijk geworden dat de invoer van de juiste grondparameters belangrijk is.

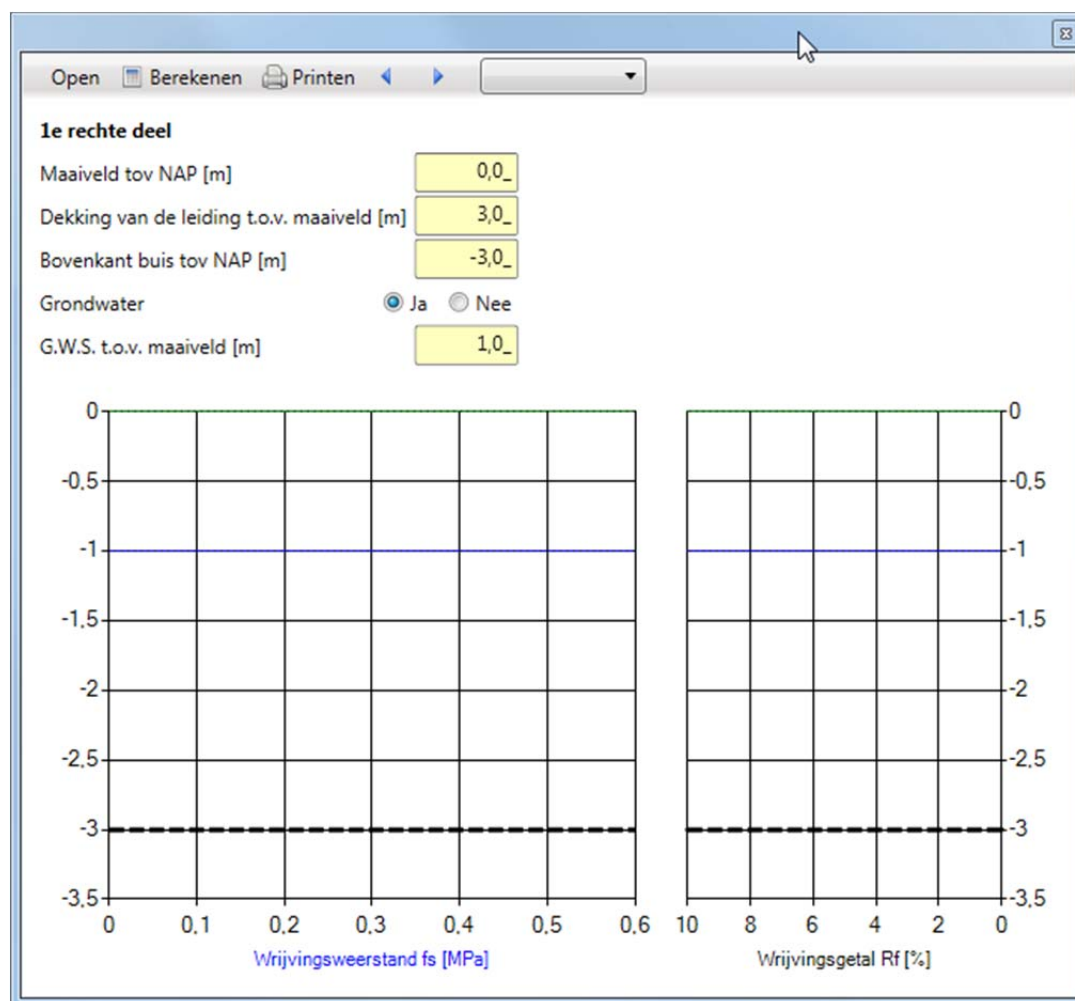
In Sigma 2012 3.0 kan gebruik gemaakt worden van sonderingen.

G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]
1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1
1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	1

- Tabel grondgegevens
- Uit sondering
- Vul grondgegevens in



Wanneer “Uit sondering” wordt gekozen zien we het volgende scherm verschijnen:



Gegevens van punt 1 van het boorprofiel zijn al ingevuld. De dekking is 3 m en de grondwaterstand is 1 m ten opzichte van het maaiveld.

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]
3,0	☒	1,0
8,0	☒	1,0
8,0	☒	1,0
8,0	☒	1,0
3,0	☒	1,0

Wijzig we een dekking in het sonderingscherm dan zien we dat deze waarde wordt overgenomen in Sigma.

De ligging van de buis is met een gestippelde lijn aangegeven in sondeerscherm.



Open Berekenen Printen

1e rechte deel

Maaiveld tov NAP [m] 0,0_

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m] 3,0_

Bovenkant buis tov NAP [m] -3,0_

Grondwater ☒ Ja ☐ Nee

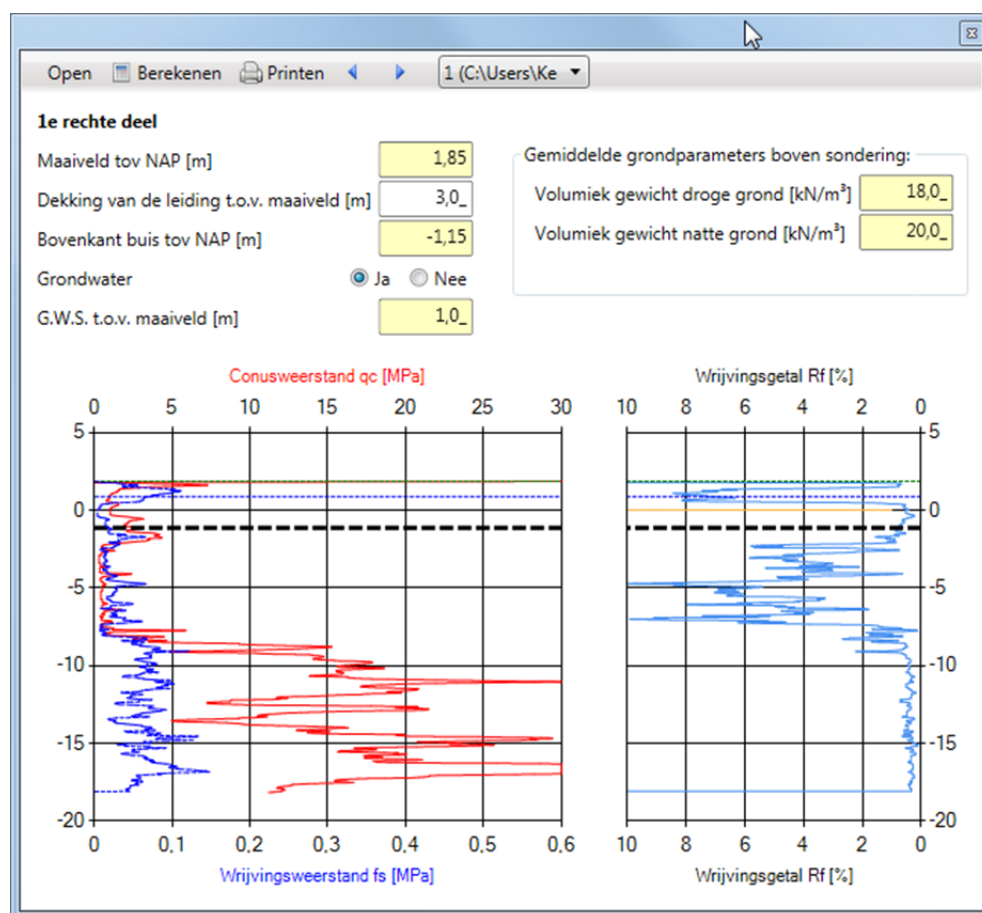
G.W.S. t.o.v. maaiveld [m] 1,0_

Selecteer de doorsnede

Met pijltje naar links en rechts kunnen de verschillende raaien geselecteerd worden.

De gegevens van de desbetreffende locatie verschijnen in het omkaderde deel.

Doorsnede 1:



We zien de volgende gegevens verschijnen:

Het maaiveld ligt op N.A.P. + 1,85 m. Omdat aangegeven is dat de dekking van de leiding 3 m ten opzichte van het maaiveld is, is uitgerekend dat de bovenkant van de buis op N.A.P. -1,15 m ligt.

Bij deze sondering blijkt voorgeboord te zijn. Daarom wordt aanvullend om de grondparameters van dit gedeelte gevraagd.

LET OP: Wanneer de N.A.P. hoogte van de te berekenen doorsnede bekend is, die vaak afwijkt van de sondering, dan moet de lokale N.A.P.-hoogte worden ingevoerd.



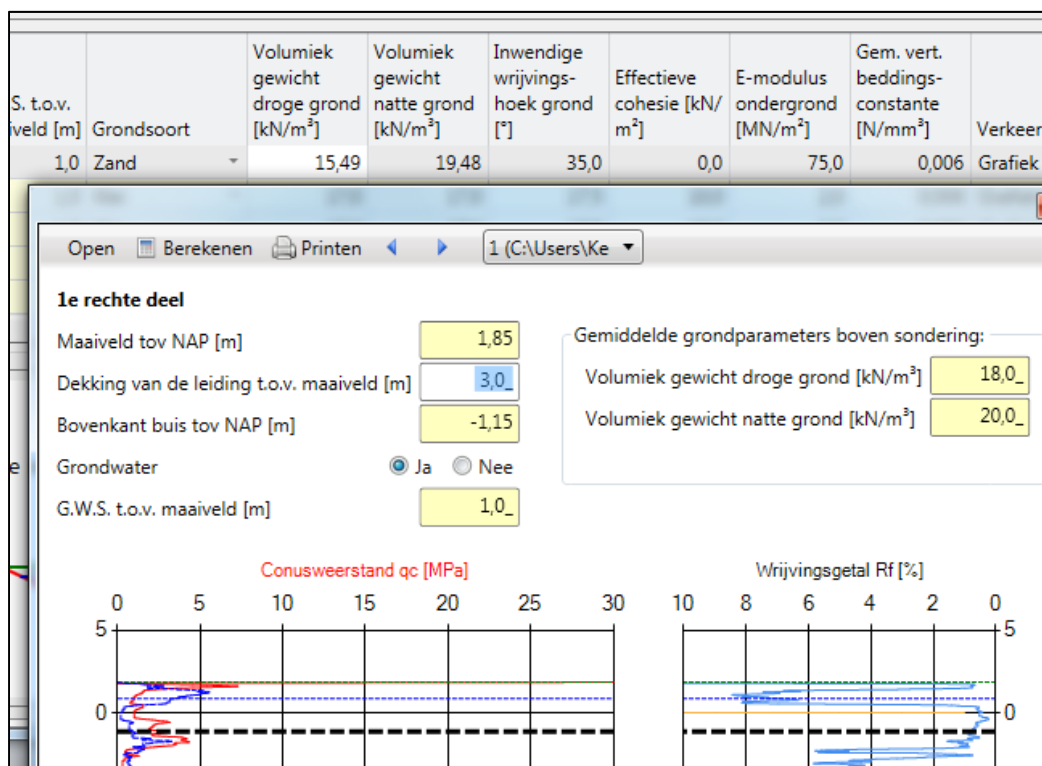
Locatie	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	Verkeersb...
1e rechte deel	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek 1/2
Neergaande bo...									
2e rechte deel									
Opgaande bocht									
3e rechte deel									

Open
Berekenen
Printen
1 (C:\Users\Ke

1e rechte deel
Maaiveld tov NAP [m] 1,85
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m] 3,0
Bovenkant buis tov NAP [m] -1,15
Grondwater ☒ Ja ☐ Nee
G.W.S. t.o.v. maaiveld [m] 1,0

Gemiddelde grondparameters boven sondering:
Volumiek gewicht droge grond [kN/m³] 18,0
Volumiek gewicht natte grond [kN/m³] 20,0

Wanneer we nu op **Berekenen** drukken zien we dat de grondparameters wijzigen.





De volgende grondparameters zijn gewijzigd:

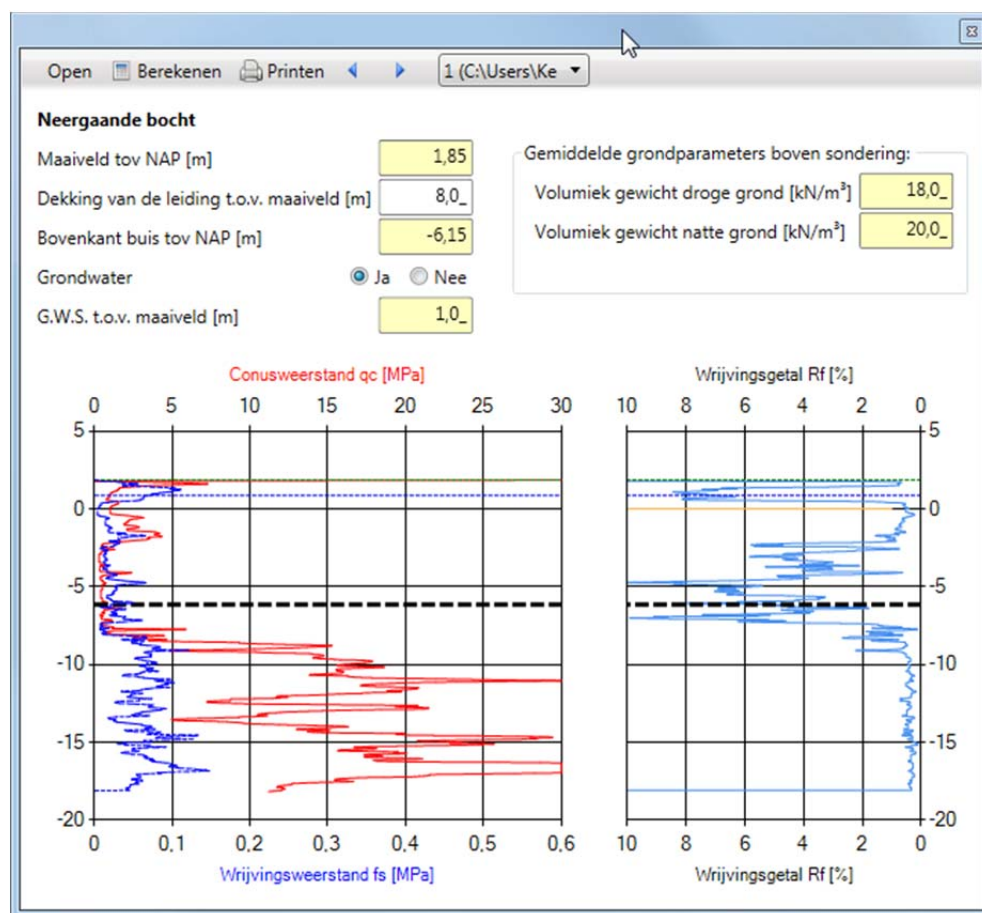
Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]
15,49	19,48	35,0	0,0	75,0

De beddingsconstante is niet gewijzigd. Deze waarde is namelijk niet te berekenen met behulp van de sondering.

Werkwijze die het meest logisch is:

- Bereken voor elk punt de grondparameters.
- Kijk vervolgens naar de beschrijving van de grondsoort (zand, klei of veen)
- Pas daarna de beddingsconstanten aan.

Doorsnede 2:



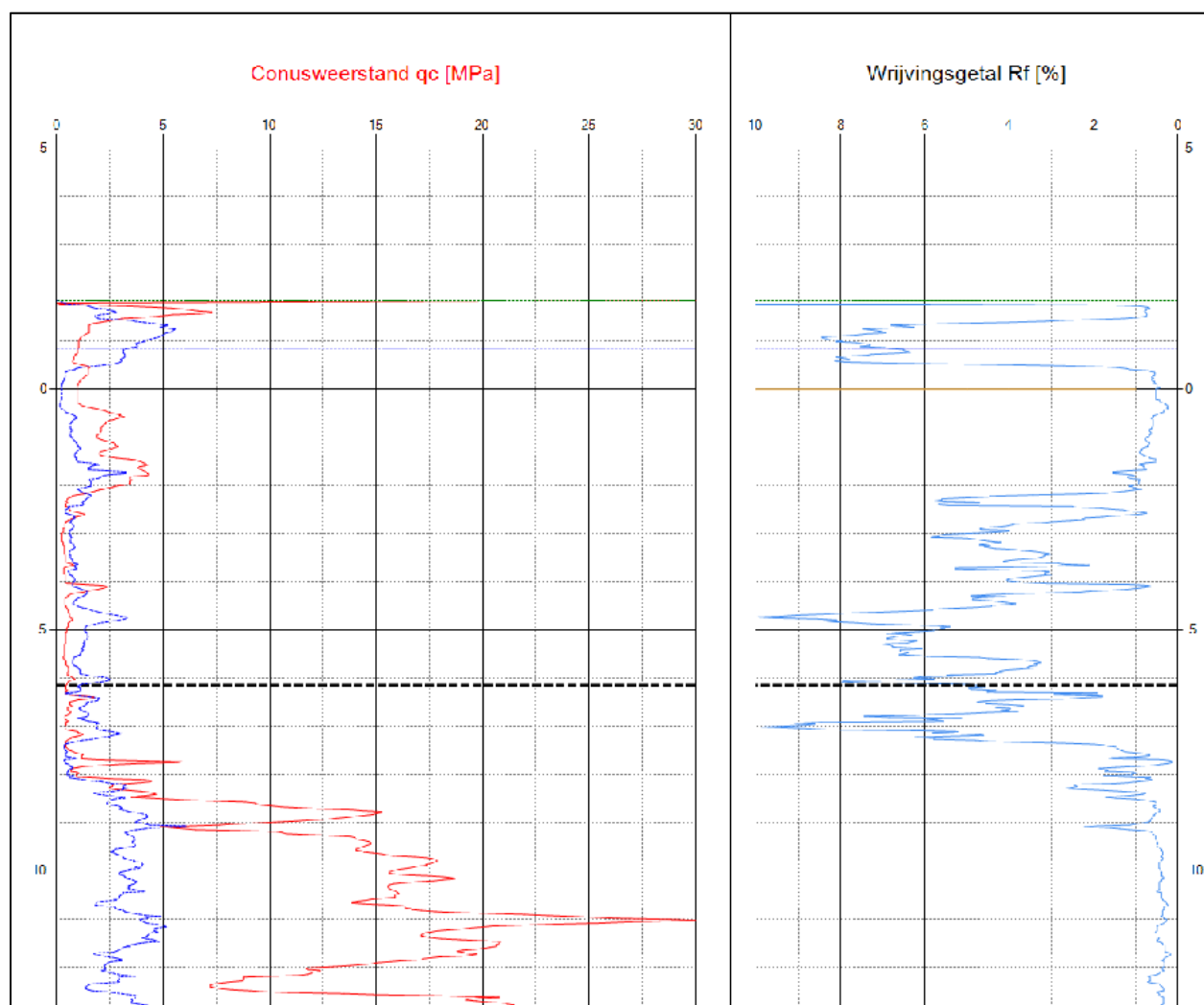


Na het doorlopen van alle doorsneden zien we het volgende overzicht.

Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvings- hoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/ m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]
Zand	15,49	19,48	35,0	0,0	75,0
Klei	15,49	17,17	17,5	0,0	1,0
Klei	15,49	17,17	17,5	0,0	1,0
Klei	15,49	17,17	17,5	0,0	1,0
Zand	15,49	19,48	35,0	0,0	75,0

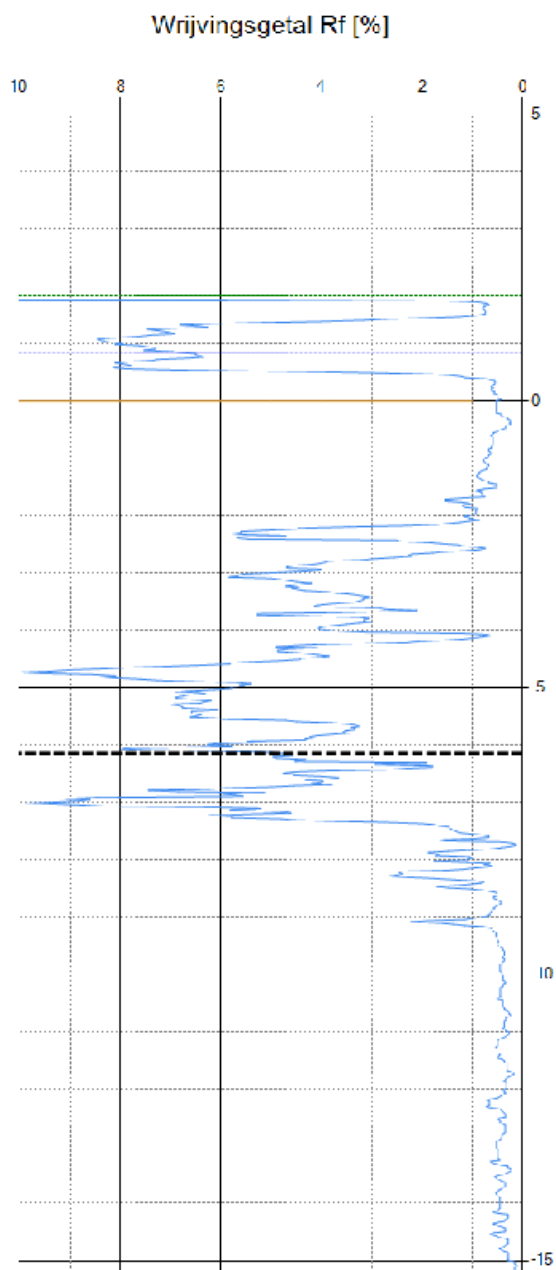
Conclusie: parameters verschillen nogal met de diepte.

De sondering kan per punt worden afgedrukt/opgeslagen.





De grondeigenschappen worden in Sigma 2012 3.0 uitgerekend op basis van het wrijvingsgetal, dus de rechterzijde van de sondering:



De gebruikers van Sigma 2012 zijn zelf verantwoordelijk voor de juiste inschatting van de grondparameters. De sonderings-tool is een hulpmiddel.



Berekening van een horizontaal gestuurde boring indien staal wordt gebruikt in plaats van PE.

Bij stalen leidingen variëren de in- en uittredehoeken van 8° tot 12°. Omdat staal minder buigzaam is dan PE zijn ook ruimere kromtestralen nodig.

In de NEN 3650-1:2012 zijn vanwege de haalbaarheid van de boring eisen gesteld aan de minimale kromtestralen. Zie E.1.4.

De kromtestraal is een belangrijke parameter in het ontwerp van stalen leidingen die met de HDD-techniek worden aangelegd. Door de buigstijfheid van een stalen leiding oefent de leiding tijdens het intrekken ter plaatse van de bochten een kracht uit op de boorgatwand. Bij een relatief kleine bochtstraal en een hoge buigstijfheid is de uitgeoefende kracht relatief groot. Dit kan, afhankelijk van de stijfheid en de sterkte van de grond, leiden tot indringing van de kop van de leiding in de boorgatwand. Deze indringing mag niet te groot zijn, opdat de leiding niet buiten het geruimde boorgat komt te liggen, vastloopt of schade aan de intrekconfiguratie ontstaat.

Voor stalen leidingen kunnen de volgende ontwerpformules, die zijn gebaseerd op het beperken van de grondreactiekracht, worden gehanteerd voor de aan te houden kromtestraal voor het boorgat:

voor $DN \leq 400$ mm geldt:	$R \geq 1\,000 \times D_e$
voor $DN > 400$ mm geldt:	$R \geq C \sqrt{D_e \times d_n}$

Hierin is:

- R = de kromtestraal in bochten van de boorgang, in m
- D_e = de uitwendige buismiddellijn, in m
- d_n = de nominale wanddikte, in m
- C = een dimensieloze constante, afhankelijk van de grondsoort

Voor de constante C kunnen de waarden uit tabel E.1 worden aangehouden.

Tabel E.1 — Grondsoortafhankelijke constante bij bepaling ontwerpboogstraal (stalen) HDD's

Grondeigenschap			Zand			Klei		Klei (slap) en veen
Omschrijving		Eenheid	Vast gepakt	Matig vast gepakt	Los gepakt	Stijf	Matig stijf	
Indicatieve conuswaarde ^a	q_c ^b	MPa	25	15	5	2	1	0,5
Constante	C	-	8 500	9 400	10 200	10 500	11 500	125 00

^a De q_c -waarden dienen als ingang in tabel E.1 en mogen niet worden gebruikt in berekeningen.

^b q_c en E_{100} zijn genormeerd op een effectieve verticale spanning van 100 kPa.



De omschrijving van de grondsoort moet worden ontleend aan het grondmechanisch onderzoek en rapport. In het geval van gelaagde grondopbouw is de hoogste C-waarde van een grondlaag met een significante laagdikte maatgevend. In het geval van een grondopbouw met een afwisseling van grondlagen met relatief geringe laagdikten kan een gewogen interpolatie worden uitgevoerd om de ontwerpwaarde voor C te bepalen:

$$C_d = \sum \left[C_n \times \frac{d_n}{d_{\text{totaal}}} \right]$$

Hierin is:

- C_d = de ontwerpwaarde voor de gehele bochtlengthe [-]
 n = subscript voor grondlaag n
 C_n = C-waarde voor grondlaag n
 d_n = de laagdikte van grondlaag n in m
 d_{totaal} = de totale laagdikte van alle grondlagen in de bocht in m

Rekenvoorbeeld 1: Staal 406,4 mm met variabele wanddikte

Overzicht diameters en wanddikten bij stalen leidingen					
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]				
	1.6	2	2.3	2.9	4
60.3	1.6	2	2.3	2.9	4
88.9	2	2.3	2.9	3.2	5.6
114.3	2.6	2.9	3.2	3.6	6.3
168.3	2.9	3.2	4	4.5	7.1
219.1	3.6	4.5	6.3	8	12.5
273	4.5	5	5.6	6.3	10
323.9	4	4.5	5.6	7.1	10
406.4	4	5	6.3	8.8	12.5
508	5	5.6	6.3	8.8	11
610	6.3	7.1	8.8	10	12.5
711	7.1	8.8	10	12.5	14.2
813	8.8	10	12.5	14.2	16
914	10	12.5	14.2	16	17.5
1016	12.5	14.2	16	17.5	20
1220	12.5	14.2	16	17.5	20



Stel dat wanddikte varieert van 4 mm, 6,3 mm, 8,8 mm en 12,5 mm dan zien we dit overzicht:

Tabel E.1 NEN 3650-2012			Vast zand	Matig vast zand	Los gepakt zand	Stijve klei	Matig stijve klei	Slappe klei en veen	
Constante C -->			8500	9400	10200	10500	11500	12500	
Uitwendige diam.=	406,4 mm =		0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	Gemiddelde straal R
Wanddikte =	4 mm =		0,004 m	0,004 m	0,004 m	0,004 m	0,004 m	0,004 m	
R moet groter zijn dan :			342,71 m	379,00 m	411,25 m	423,35 m	463,67 m	503,98 m	420,66 m
Uitwendige diam.=	406,4 mm =		0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	
Wanddikte =	6,3 mm =		0,0063 m	0,0063 m	0,0063 m	0,0063 m	0,0063 m	0,0063 m	
R moet groter zijn dan :			430,10 m	475,64 m	516,12 m	531,30 m	581,90 m	632,50 m	527,92 m
Uitwendige diam.=	406,4 mm =		0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	
Wanddikte =	8,8 mm =		0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	
R moet groter zijn dan :			508,32 m	562,14 m	609,98 m	627,92 m	687,73 m	747,53 m	623,94 m
Uitwendige diam.=	406,4 mm =		0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	0,4064 m	
Wanddikte =	12,5 mm =		0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	
R moet groter zijn dan :			605,83 m	669,98 m	727,00 m	748,38 m	819,65 m	890,93 m	743,63 m

Wanneer we een buis met een uitwendige middellijn van 813 mm selecteren en wat wanddikten invoeren zien we dit:

Tabel E.1 NEN 3650-2012			Vast zand	Matig vast zand	Los gepakt zand	Stijve klei	Matig stijve klei	Slappe klei en veen	
Constante C -->			8500	9400	10200	10500	11500	12500	
Uitwendige diam.=	813 mm =		0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	Gemiddelde straal R
Wanddikte =	8,8 mm =		0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	0,0088 m	
R moet groter zijn dan :			718,96 m	795,09 m	862,75 m	888,13 m	972,71 m	1057,30 m	882,49 m
Uitwendige diam.=	813 mm =		0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	
Wanddikte =	12,5 mm =		0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	0,0125 m	
R moet groter zijn dan :			856,88 m	947,61 m	1028,25 m	1058,50 m	1159,31 m	1260,12 m	1051,78 m
Uitwendige diam.=	813 mm =		0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	
Wanddikte =	14,2 mm =		0,0142 m	0,0142 m	0,0142 m	0,0142 m	0,0142 m	0,0142 m	
R moet groter zijn dan :			913,29 m	1009,99 m	1095,95 m	1128,18 m	1235,63 m	1343,07 m	1121,02 m
Uitwendige diam.=	813 mm =		0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	0,813 m	
Wanddikte =	16 mm =		0,016 m	0,016 m	0,016 m	0,016 m	0,016 m	0,016 m	
R moet groter zijn dan :			969,45 m	1072,09 m	1163,34 m	1197,55 m	1311,61 m	1425,66 m	1189,95 m



Berekening Staal 813 mm x 12,54 mm. Kruising met een weg op een diepte van 15 m.

Tabblad 1:

Projectgegevens

Naam van het project: **Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)**

Projectonderdeel: **Voorbeeldberekening Staal 813 x 12,5 mm**

Gegevens **Boorprofiel**

Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)

Materiaal: **Staal**

Kwaliteit: **EN 10208 L290**

Uitwendige middellijn [mm]: **813,0**

Wanddikte [mm]: **12,5**

Dikte bekleding [mm]: **5,0**

Medium (Mediumleiding)

Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos

Ontwerpdruk [N/mm²]: **0,3**

Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: **1000**

Temperatuurverschil [°C]: **10,0**

Mediumbuis/mantelbuis

☒ Enkele buis ☐ Mantelbuis + mediembuis

Bovengronds

☐ Maaiveld ☒ Rollenbaan

Ondergronds

☒ Normaal ☐ Bundel ☐ Moeilijke situatie/grind

Boorspoeling en overige gegevens

Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]: **1200**

Diameter boorstang [mm]: **114**

Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]: **15,0**

Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]: **11,5**

Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]: **100**

Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]: **0,0**

Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]: **0,0**

Tabblad 2:

Boorprofiel

	Langs de buis	Horizontaal	Langs de buis	Horizontaal
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	8,0			
Lengte 1e rechte deel L1 [m]	60,0	59,42	Lengte na 1e deel [m]	60,00
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	8,0			
Lengte neergaande bocht L2 [m]	132,65	132,21	Lengte na 2e deel [m]	192,65
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	800,0			
Lengte 2e rechte deel L3 [m]	200,0	200,0	Lengte na 3e deel [m]	392,65
Straal neergaande bocht R1 [m]	950,0			
Lengte opgaande bocht L4 [m]	132,65	132,21	Lengte na 4e deel [m]	525,30
Straal opgaande bocht R2 [m]	950,0			
Lengte 3e rechte deel L5 [m]	60,0	59,42	Totale lengte [m]	585,30
				583,26

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Gem. vert. beddingsconstante [N/mm ³]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	60,0	59,42	8,0	☒	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,018	Grafiek 1/2 x II
Neergaande bocht	192,65	191,63	15,0	☒	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,018	Grafiek II
2e rechte deel	292,65	291,63	15,0	☒	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,018	Grafiek I
Opgaande bocht	392,65	391,63	15,0	☒	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,018	Grafiek II
3e rechte deel	525,3	523,84	8,0	☒	1,0	Zand	18,0	20,0	32,5	0,0	45,0	0,018	Grafiek 1/2 x II

Profiel

1e rechte deel Neergaande bocht 2e rechte deel Opgaande bocht 3e rechte deel



De grondgegevens zijn bij dit voorbeeld gelijk gehouden. De berekening wordt eerst uitgevoerd zonder verfijningen zoals gewelfwerking en horizontale steundruk.

Materiaalgegevens			
Materiaalsoort:	Staal		
Kwaliteit:	EN 10208 L290		
Rekgrens van het materiaal bij 20°C	Re	= 290	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus	E	= 205800	N/mm ²
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	α_g	= $1,2 \cdot 10^{-5}$	mm/(mm·K)
Alfa Tangentiëel / Alfa Axiaal	α_σ	= 1	-
Soortelijk gewicht buis	ρ_L	= 78,5	kN/m ³
Toelaatbare deflectie	δ	= 15	%

De rekgrens van het materiaal is 290 N/mm².

Het soortelijk gewicht van staal is 7850 kg/m³, dit is 78,5 kN/m³.

De toelaatbare deflectie voor staal in de gebruiksfase is 15%. Dit percentage kan worden aangepast, bijvoorbeeld wegens eisen aangaande cementeren.

Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D _e	= 813,00	mm
Wanddikte	d _n	= 12,5	mm
Dikte bekleding	e	= 5	mm

Meestal krijgt de stalen leiding een bekleding van PP of PE. De dikte hiervan kan worden meegenomen in de berekening.

Het boorprofiel:

Totale lengte	L	= 585,30	m
Lengte 1e rechte deel	L ₁	= 60,00	m
Lengte neergaande bocht	L ₂	= 132,65	m
Lengte 2e rechte deel	L ₃	= 200,00	m
Lengte opgaande bocht	L ₄	= 132,65	m
Lengte 3e rechte deel	L ₅	= 60,00	m
Straal maaiveld/rollenbaan	R _r	= 800,00	m
Straal neergaande bocht	R ₁	= 950,00	m
Straal opgaande bocht	R ₂	= 950,00	m
Intrede-hoek (bij boorstelling)	α_1	= 8,00 / 14,05	° / %
Uittrede-hoek (bij rollenbaan)	α_2	= 8,00 / 14,05	° / %
Belastinghoek	α	= 180	°
Ondersteuningshoek	β	= 120	°
Horizontale steundrukhoek	γ	= 120	°
Geen grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	γ	= 1,1	

Voor de rollenbaan wordt uitgegaan van 800 m. Boorbedrijven hanteren vaak een krappere kromtestraal. Er zijn bedrijven die met een vuistregel van 80% van de diameter werken.

Aangezien het hier het boren van een enkel buis betreft mogen we voor de ondersteuningshoek 120° aanhouden. De belastinghoek is 180°, dus de volledige bovenkant van de buis.



Totaalfactor bij normale boring	f	= 1,4	
Belastingfactor	$f_{k,b}$	= 1,1	
Belastingfactor	$f_{k,o}$	= 1,4	
Wrijvingscoëff. met rollenbaan	f_1	= 0,1	
Wrijving tussen leiding/boorvloeistof	f_2	= 0,00005	N/mm ²
Wrijving tussen leiding/boorgangwand	f_3	= 0,2	

De wrijvingsfactoren en belastingfactoren zijn standaardwaarden.

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting							
Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
1e rechte deel	60,00	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Neergaande bocht	192,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
2e rechte deel	292,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Opgaande bocht	392,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
3e rechte deel	525,30	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm ³]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Geen	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Geen	0,0180	0,00	45,00	Grafiek II
2e rechte deel	Geen	-	0,00	45,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Geen	0,0180	0,00	45,00	Grafiek II
3e rechte deel	Geen	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II

Voor de 1^e berekening gaan we even uit van standaardwaarden van normaal zand.

Overzicht grondparameters volgens NEN 3650											
		Zand				Klei			Veen		
		Vast		Matig	Los	Vast	Matig	Slap	Slap		
Volumiek gewicht droge grond	γ_d [kN/m ³]	20	19	18	17	20	19	17	14	12	10
Volumiek gewicht natte grond	γ_n [kN/m ³]	22	21	20	19	20	19	17	14	12	10
Inwendige wrijvingshoek grond	ϕ [°]	40	35	32,5	30	25	17,5	17,5	17,5	15	15
Effectieve cohesie	c' [kN/m ²]	0	0	0	0	15	13	5	0	2,5	1
Ongedraineerde schuifsterkte	c_u [kN/m ²]	0	0	0	0	200	100	50	25	20	10
E-modulus sleufmateriaal	E_1 [MN/m ²]	20	20	10	5	2	2	1	0,5	0,2	0,2
E-modulus ondergrond	E_{100} [MN/m ²]	110	75	45	15	10	10	2	1	0,5	0,2
Samendrukkingsconstante	C_p [-]	1500	1000	600	200	30	25	15	7	7,5	5
Relatieve verplaatsing	δ_d [mm]	1-3	1-3	3-5	5-8	2-4	2-4	4-6	6-10	6-10	10-15



Berekeningsresultaten berekening(1): boring Staal

2. Eigenschappen van de leiding			
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 788,00	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 800,50	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 823,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 406,50	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 394,00	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 400,25	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 2.518.603.433,52	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 6.195.826,40	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 162,76	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 26,04	mm ³ /mm ¹
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 31.435,56	mm ²
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 2,4677	N/mm ¹

De uitwendige middellijn inclusief de dikte van de bekleding is 813 mm + 2 x 5 mm = 823 mm.
Op basis van het soortelijk gewicht is het gewicht van de leiding uitgerekend op 2,4677 N/mm¹.

Er kan voor gekozen worden om de leiding geheel of gedeeltelijk te vullen. Dit is nuttig om de trekkrachten zo veel mogelijk te reduceren. Afhankelijk van de boorlengte en de diameter kan gekozen worden om zowel bovengronds als ondergronds te vullen of om alleen ondergronds te vullen.

3. Berekening van het gewicht van de leiding tijdens het intrekken van de leiding				
	Leiding op rollenbaan/maaiveld		Leiding in boorgat	
Gewicht mediumleiding	g	= 2,4677 N/mm ¹	g	= 2,4677 N/mm ¹
Gewicht vulling	g _{vul}	= N.v.t. +	g _{vul}	= N.v.t. +
Totaal gewicht	g _{rol}	= 2,4677 N/mm ¹	g _{gat}	= 2,4677 N/mm ¹



4.1 Berekening van de benodigde trekkrachten op rollenbaan/maaiveld

Trekkracht T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N]
Starten met trekken	585,30	202.208
Na 1 ^e deel intrekken	525,30	181.479
Na 2 ^e deel intrekken	392,65	135.651
Na 3 ^e deel intrekken	192,65	66.556
Na 4 ^e deel intrekken	60,00	20.729

$$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = 1,4 \cdot L \cdot 2,4677 \cdot 0,1$$

Bij de start van het intrekken is de trekkracht het hoogst. Bij 202.208 N is sprake van een trekkracht op de buis van 202,2 kN ofwel 20,2 ton.

Deze trekkrachten veroorzaken een spanning op de buis van:

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	202.208	6,43
Na 1 ^e deel intrekken	181.479	5,77
Na 2 ^e deel intrekken	135.651	4,32
Na 3 ^e deel intrekken	66.556	2,12
Na 4 ^e deel intrekken	20.729	0,66

$$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{31.435,56}$$

Deze spanning wordt dus uitgerekend door de optredende trekkracht te delen door de oppervlakte van de stalen buis. De hoogste spanning is 6,43 N/mm².

De buigspanningen bij stalen leidingen zijn vaak veel hoger dan de spanningen door intrekken.

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

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

$$M_b = 1,1 \cdot 205.800 \cdot \frac{2.518.603.434}{800.000} = 712.701.806,60 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{712.701.806,60}{6.195.826} = \mathbf{115,03 \text{ N/mm}^2}$$

De kromtestraal is gelijk aan 800 m, ofwel 800.000 mm.



Wanneer we de spanningen ten gevolge van het intrekken en gelijktijdig buigen optellen dan zien we het volgende:

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	6,43	121,46
Na 1 ^e deel intrekken	5,77	120,80
Na 2 ^e deel intrekken	4,32	119,34
Na 3 ^e deel intrekken	2,12	117,15
Na 4 ^e deel intrekken	0,66	115,69

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 1 \cdot 115,03 + \sigma_t$$

$$\text{Toelaatbare spanning: } \sigma_{kd} = 0,8 \cdot R_e = 0,8 \cdot 290 = \mathbf{232,00 \text{ N/mm}^2}$$

De maximaal optredende spanning is 121,46 N/mm². Dit is ruim minder dan de toelaatbare spanning. Deze is bij vereenvoudigde/gestyleerde berekeningen gelijk aan 0,8 x de rekgrens van het materiaal, dus 0,8 x 290 N/mm² = 232 N/mm².

De huidige NEN 3650:2012 is een vervolg op de Pijpleidingcode 1972. In 1992 heeft men in artikel V.4.A.1.c.7 vermeld dat de toelaatbare spanning gelijk is aan $1,2 \times \frac{2}{3} \times \sigma_{vl} = 0,8 \times \sigma_{vl}$.

Conclusie: leiding voldoet tijdens het intrekken op de rollenbaan.



Berekening van de situatie tijdens het ondergronds intrekken.

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: $D_{e,omtrek} = 2.585,53 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 2,468 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 823,00^2 \cdot \pi/4 = 5,970 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 3,502 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	60,00	69.697	-
2 ^e deel intrekken	192,65	-	223.785
3 ^e deel intrekken	392,65	456.107	-
4 ^e deel intrekken	525,30	-	610.195
Geheel ingetrokken	585,30	679.892	-

Rechte delen: $T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (2.585,53 \cdot 0,00005 + 3,502 \cdot 0,2)$

Gebogen delen: $T_{3a} = f \cdot L_B \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (2.585,53 \cdot 0,00005 + 3,502 \cdot 0,2)$

Voor de rechte delen is onderstaande formule van toepassing:

$$T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,omtr} \cdot f_2 + g_{eff} \cdot f_3)$$

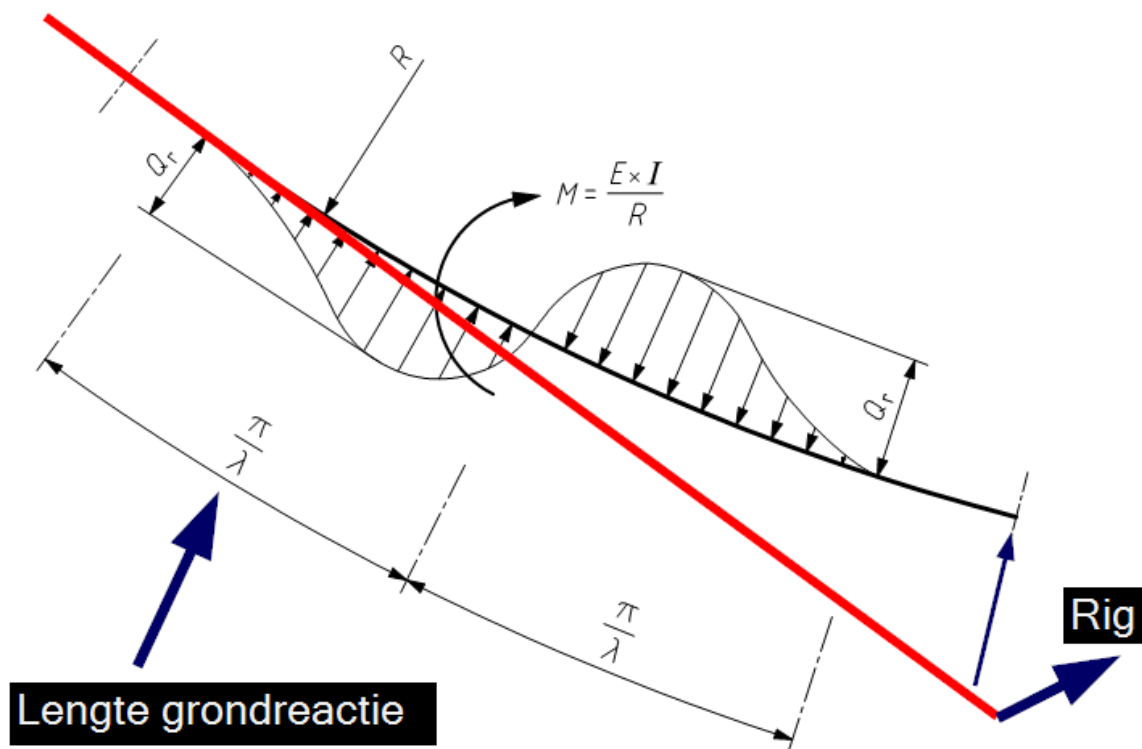
De factor f_2 is de wrijvingscoëfficiënt tussen de leiding en de boorvloeistof. Deze is standaard 0,0005. In het algemeen is deze waarde als een constante te beschouwen.

De factor f_3 is de wrijvingscoëfficiënt tussen de bovenkant/onderkant van de buis en de wand van het boorgat. Of een leiding geheel of gedeeltelijk opdrijft zorgt voor hoge of lagere uitkomsten.

Bij horizontaal gestuurde boringen is g_{eff} feitelijk de enige factor die aangepast c.q. verfijnd kan worden



Om de rechte leiding door de bochten heen te trekken zijn ook de nodige trekkrachten nodig. De leiding moet gebogen worden en dat betekent dat er een grondreactie plaats zal moeten vinden. Anders buigt de leiding niet. Je moet je ergens tegen af kunnen zetten.



De boorstelling (Rig) trekt aan de buis. Om de buis gebogen te krijgen is afzetten tegen de grond nodig. De trekkracht die hiervoor nodig is, is T_{3b} .

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

5.3.1 Neergaande bocht

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

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{823,00 \cdot 0,0180}{4 \cdot 205.800 \cdot 2.518.603.433,52}} = 0,0003 \text{ mm}^{-1}$$

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot \lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot 0,9 \cdot R}$$

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot 0,0003^2 \cdot 205.800 \cdot 2.518.603.433,52}{823,00 \cdot 0,9 \cdot 950.000} = 0,0200 \text{ N/mm}^2$$

$$T_{3b} = f \cdot 4 \cdot \frac{Q_{r1}}{2} \cdot D_o \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot f_3$$

$$T_{3b} = 1,4 \cdot 4 \cdot \frac{0,0200}{2} \cdot 823,00 \cdot \frac{\pi}{0,0003} \cdot 0,2 = 99.846,91 \text{ N}$$



Wanneer we naar deze formules kijken kunnen we het volgende opmerken.

De stijfheidsverhouding buis/grond kunnen we uitdrukken in lambda.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{D_o \cdot k_{v,gem}}{4 \cdot E \cdot I_b}} \quad \lambda = \sqrt[4]{\frac{823,00 \cdot 0,0180}{4 \cdot 205.800 \cdot 2.518.603.433,52}} = 0,0003 \text{ mm}^{-1}$$

We zien in deze formule de volgende gegevens van de buis: diameter, de elasticiteitsmodulus en het traagheidsmoment in langsrichting.

De grondeigenschappen worden uitgedrukt in de beddingseigenschappen. Hoe slapper de grond, hoe lager de beddingsconstante.

De lengte $\pi/\lambda = \pi / 0,0003 = 10.466 \text{ mm} = \text{ruim } 10 \text{ m}$.

De Q-belasting die wij maximaal in rekening moeten brengen kunnen we als volgt uitrekenen:

$$Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot \lambda^2 \cdot E \cdot I_b}{D_o \cdot 0,9 \cdot R} \quad Q_{r1} = \frac{0,322 \cdot 0,0003^2 \cdot 205.800 \cdot 2.518.603.433,52}{823,00 \cdot 0,9 \cdot 950.000} = 0,0200 \text{ N/mm}^2$$

In deze formule zien we ook de lambda, de buigstijfheid van de buis ($E \times I_b$), de buisdiameter en de kromtestraal van de bocht. De kromming wordt met 10% gereduceerd. Zie hiervoor onderstaande fragment uit de NEN 3651:2012

8.6.3 Sterkteberekening

8.6.3.1 Aanlegfase

Het trekken van de leiding door de boorgang vanaf de rollenbaan moet zo geschieden dat tijdens deze operatie in de leiding geen plastische vervorming optreedt met een veiligheidsfactor (totaalfactor) van 1,1.

In de aanlegfase wordt de leiding belast door:

- de trekkracht;
- het eigen gewicht van de leiding minus de opwaartse druk plus het gewicht van eventuele (water)vulling;
- het buigend moment door de kromming van de leiding (zowel op de rollenbaan als tussen de rollenbaan en de boorgang als in de boorgang);
- reactiekrachten op de rollenbaan;
- reactiekrachten door de te volgen kromming van de boorgang;
- wrijvingskrachten;
- uitwendige overdruk; onderzocht moet worden of de leiding tijdens de intrekoperatie de (verhoogde) druk van de boorvloeistof kan weerstaan (implosietoetsing).

De te hanteren kromming van de boorgang in de berekening moet 10 % hoger worden gesteld dan de ontwerpkrumming in verband met besturingstoleranties.



Berekening T_{3b}:

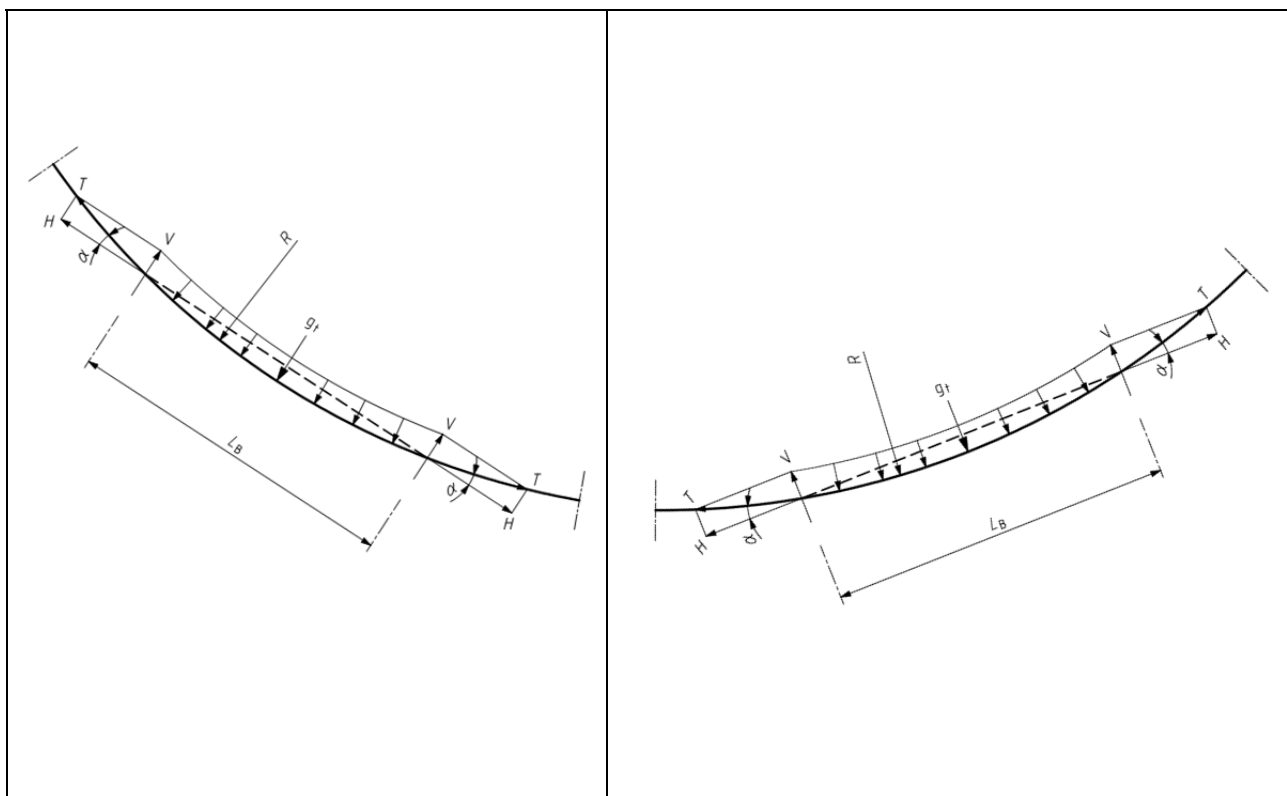
$$T_{3b} = f \cdot 4 \cdot \frac{Q_{r1}}{2} \cdot D_o \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot f_3$$

Ingevuld geeft:

$$T_{3b} = 1,4 \cdot 4 \cdot \frac{0,0200}{2} \cdot 823,00 \cdot \frac{\pi}{0,0003} \cdot 0,2 = \mathbf{99.846,91 \text{ N}}$$

T_{3b} is gelijk aan 99.846,91 N, ofwel 99,85 kN. Dit is 9,98 ton. Dus een forse bijdrage qua trekkracht.

Berekening van de trekkracht T_{3c}: de bochtkracht.



Zowel bij de neergaande als de opgaande bocht moet een kracht uitgeoefend worden om de leiding door de bocht te trekken. In de formules om deze krachten te berekenen is de intredehoek respectievelijk uittredehoek verwerkt.

$$\begin{aligned} T_{3c} &= f \cdot L_B \cdot g_t \cdot f_3 \\ L_B &= 2 \cdot R \cdot 2\pi \cdot \frac{\alpha}{360} \\ g_t &= \frac{2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha)}{L_B} \\ \rightarrow T_{3c} &= f \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot f_3 = 1,4 \cdot 2 \cdot T_{\text{bocht}} \cdot \sin(\alpha) \cdot 0,2 \end{aligned}$$



We zien de volgende opbouw van T_{3c} :

Trekkracht T_{bocht} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_{3a} [N]	$T_{3b,neer}$ [N]	$T_{3b,op}$ [N]	T_{bocht} [N]
Neergaande bocht	135.651	223.785	99.847	-	459.283
Opgaande bocht	20.729	610.195	99.847	99.847	830.617

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

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

Trekkracht T_{3c} tijdens verschillende stadia [N]	α [°]	T_{bocht} [N]	T_{3c} [N]
Neergaande bocht	4,00	459.283	17.941
Opgaande bocht	4,00	830.617	32.447

Voor de neergaande bocht worden de volgende afzonderlijke trekkrachten opgeteld:

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

Voor de opgaande bocht, wanneer gelijktijdig aan de neergaande bocht getrokken moet worden zien we de volgende formule:

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

Nu de afzonderlijke trekkrachten zijn berekend kunnen we deze totaliseren:

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

5.5 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,neer}$ [N]	$T_{3c,neer}$ [N]	$T_{3b,op}$ [N]	$T_{3c,op}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	181.479	69.697	-	-	-	-	251.176
2 ^e deel intrekken	135.651	223.785	99.847	17.941	-	-	477.224
3 ^e deel intrekken	66.556	456.107	99.847	17.941	-	-	640.451
4 ^e deel intrekken	20.729	610.195	99.847	17.941	99.847	32.447	881.006
Geheel intrekken	0	679.892	99.847	17.941	99.847	32.447	929.974

We zien hier dat sprake is van een trekkracht van maximaal 929.974 N, ofwel 929,97 kN = 92,9 ton.

Dit geeft de volgende spanningen:

Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]
1 ^e deel intrekken	251.176	7,99
2 ^e deel intrekken	477.224	15,18
3 ^e deel intrekken	640.451	20,37
4 ^e deel intrekken	881.006	28,03
Geheel intrekken	929.974	29,58



De spanningen ten gevolge van de kromtestralen.

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

5.7.1 Neergaande bocht

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

$$M_b = 1,4 \cdot 205.800 \cdot \frac{2.518.603.433,52}{0,9 \cdot 950.000} = 848.725.171,07 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{848.725.171,07}{6.195.826,40} = \mathbf{136,98 \text{ N/mm}^2}$$

5.7.2 Opgaande bocht

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

$$M_b = 1,4 \cdot 205.800 \cdot \frac{2.518.603.433,52}{0,9 \cdot 950.000} = 848.725.171,07 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{848.725.171,07}{6.195.826,40} = \mathbf{136,98 \text{ N/mm}^2}$$

Bij het berekenen van deze spanningen is uitgegaan van 10% stuuronauwkeurigheid.

Aangezien we twee identieke bochten hebben is de buigspanning σ_b gelijk aan $136,98 \text{ N/mm}^2$.

We kunnen nu alle berekende spanningen totaliseren.

$$\text{Rechte delen: } \sigma_a = \frac{T_{\text{tot}}}{A} = \frac{T_{\text{tot}}}{31.435,56} = \sigma_t$$

$$\text{Gebogen delen: } \sigma_a = \alpha_\sigma \cdot \sigma_b + \sigma_t = 1 \cdot \sigma_b + \sigma_t$$

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm^2]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm^2]	σ_b [N/mm^2]	σ_a [N/mm^2]
Starten met trekken	251.176	7,99	-	7,99
Na 1 ^e deel intrekken	477.224	15,18	136,98	152,16
Na 2 ^e deel intrekken	640.451	20,37	-	20,37
Na 3 ^e deel intrekken	881.006	28,03	136,98	165,01
Na 4 ^e deel intrekken	929.974	29,58	-	29,58

Toelaatbare spanning: $\sigma_{kd} = 0,8 \cdot R_e = 0,8 \cdot 290 = \mathbf{232,00 \text{ N/mm}^2}$

Conclusie: leiding voldoet in fase II.



De berekening van de optredende spanningen in de bedrijfsfase.

A. Toetsing op inwendige druk (P-berekening)

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

$$D_g/d_n = 800,50/12,50 = 64,04 \rightarrow D_g/d_n > 20 \rightarrow \text{Dunwandige leiding}$$

$$\sigma_p = \frac{p_d \cdot D_g}{2 \cdot d_n}$$

$$\sigma_p = \frac{0,3 \cdot 800,5}{2 \cdot 12,5} = 9,61 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 9,61 \text{ N/mm}^2$$

Toelaatbare spanning: $0,72 \cdot R_e = 0,72 \cdot 290,00 = \mathbf{208,80 \text{ N/mm}^2}$

Bij dunwandige leidingen berekenen we de spanning t.g.v. inwendige druk met de Ketelformule.

Conclusie: leiding voldoet qua inwendige druk.

B. Berekenen zonder inwendige druk (P = 0 berekening)

Hoewel de inwendige druk niet verder wordt meegenomen in de berekening mogen we wel de reroundingfactor bepalen om vervolgens daarmee de optredende spanningen te reduceren.

6.2 Berekening reroundingfactor f_{rr}

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

$$f_{rr} = 1 / \left(1 + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 400,25^3 \cdot 0,089}{205800 \cdot 162,76} \right) = 0,91$$

Grondbelasting op de buis:

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	q_{droog} [kN/m ²]	q_{nat} [kN/m ²]	q_{totaal} [kN/m ²]	Q_n [N/mm ¹]
1e rechte deel	8,00	1,00	Zand	19,80	154,00	173,80	85,43
Neergaande bocht	15,00	1,00	Zand	19,80	308,00	327,80	154,56
2e rechte deel	15,00	1,00	Zand	19,80	308,00	327,80	154,56
Opgaande bocht	15,00	1,00	Zand	19,80	308,00	327,80	154,56
3e rechte deel	8,00	1,00	Zand	19,80	154,00	173,80	85,43

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



Verkeersbelasting op de buis (vaak niet relevant):

6.4 Berekening van de verkeersbelasting Q_v

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Verkeers- belasting	q_v [kN/m ²]	Q_v [N/mm ¹]
1e rechte deel	8,00	Grafiek ½ x II	1,12	0,92
Neergaande bocht	15,00	Grafiek II	0,92	0,76
2e rechte deel	15,00	Grafiek I	2,19	1,81
Opgaande bocht	15,00	Grafiek II	0,92	0,76
3e rechte deel	8,00	Grafiek ½ x II	1,12	0,92

$$Q_v = q_v \cdot D_o = q_v \cdot 823,0$$

Grond- en verkeersbelasting geeft de volgende spanningen:

6.5 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 ¹]
1e rechte deel	85,43	0,92	86,35	4.769,58	166,17
Neergaande bocht	154,56	0,76	155,32	8.578,88	298,88
2e rechte deel	154,56	1,81	156,37	8.636,77	300,89
Opgaande bocht	154,56	0,76	155,32	8.578,88	298,88
3e rechte deel	85,43	0,92	86,35	4.769,58	166,17

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 400,25$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,91 \cdot \frac{M_q}{26,04}$$

We zien forse spanningen. Vermoedelijk moeten we verfijnder gaan rekenen.



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

6.6.1 Neergaande bocht

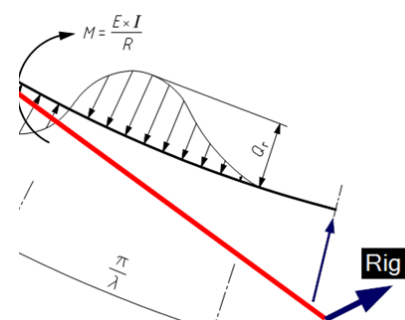
$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r1} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0200 \cdot 823,00 \cdot \frac{406,50}{26,04} = \mathbf{21,38 \text{ N/mm}^2}$$

6.6.2 Opgaande bocht

$$\sigma_{qr} = K_{b,ind} \cdot Q_{r2} \cdot D_o \cdot \frac{r_u}{W_w}$$

$$\sigma_{qr} = 0,083 \cdot 0,0200 \cdot 823,00 \cdot \frac{406,50}{26,04} = \mathbf{21,38 \text{ N/mm}^2}$$



Deze spanningen zijn het gevolg van de grondreactie.

Wanneer sprake is van warm medium / koude omgeving enz. dan is het gebruikelijk om met temperatuurverschil te rekenen. Standaard wordt hiervoor 10° aangehouden.

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

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

$$\sigma_{ax} = 10 \cdot 0,0000116 \cdot 205800 = \mathbf{23,87 \text{ N/mm}^2}$$

Met het berekenen van de spanning ten gevolge van temperatuurverschil hebben we alle spanningen bepaald en kunnen we deze bij elkaar optellen.

Spanning in omtreksrichting:

7.1 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]
1e rechte deel	166,17	-	1	166,17
Neergaande bocht	298,88	21,38	1	320,26
2e rechte deel	300,89	-	1	300,89
Opgaande bocht	298,88	21,38	1	320,26
3e rechte deel	166,17	-	1	166,17

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

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

Toelaatbare spanning: $\sigma_{ld} = 0,8 \cdot R_e = 0,8 \cdot 290 = \mathbf{232,00 \text{ N/mm}^2}$

Conclusie: Het zal duidelijk zijn dat de toelaatbare spanning overschreden is.



Spanningen in langsrichting:

7.2 Optredende spanningen in langsrichting van de leiding				
Locatie	σ_{ax} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_x [N/mm ²]
1e rechte deel	23,87	-	-	23,87
Neergaande bocht	23,87	136,98	1	160,86
2e rechte deel	23,87	-	-	23,87
Opgaande bocht	23,87	136,98	1	160,86
3e rechte deel	23,87	-	-	23,87
Rechte delen: $\sigma_x = \sigma_{ax}$				
Bochten: $\sigma_x = \sigma_{ax} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_b$				
Toelaatbare spanning: $\sigma_{ld} = 0,8 \cdot Re = 0,8 \cdot 290 = \mathbf{232,00}$ N/mm ²				

Conclusie: De optredende spanningen zijn lager dan de toelaatbare spanning van 232,0 N/mm².

Extra spanningstoets bij stalen leidingen:

Bij stalen leidingen moet ook op de toelaatbare ideale spanning worden getoetst. Dit is de combinatiespanning van omtreksrichting en langsrichting.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{y2}^2 + \sigma_x^2 - \sigma_{y2} \cdot \sigma_x}$$

7.3 Overzicht van de ideale spanningen in de leiding

Locatie	σ_{y2} [N/mm ²]	σ_x [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
1e rechte deel	166,17	23,87	155,61
Neergaande bocht	320,26	160,86	277,35
2e rechte deel	300,89	23,87	289,70
Opgaande bocht	320,26	160,86	277,35
3e rechte deel	166,17	23,87	155,61

De toelaatbare ideale spanning is gelijk aan de rekgrens van het materiaal, dus 290 N/mm². Dit betekent dat (net) voldaan wordt aan deze voorwaarde.



Ook bij stalen leidingen moet de deflectie gecontroleerd worden:

8. Berekening van de optredende en toelaatbare deflectie

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_r [N/mm ²]	δ_Y [mm]	δ_Y/D_g [%]
1e rechte deel	85,43	0,92	-	8,36	1,04
Neergaande bocht	154,56	0,76	0,020	15,04	1,88
2e rechte deel	154,56	1,81	-	15,14	1,89
Opgaande bocht	154,56	0,76	0,020	15,04	1,88
3e rechte deel	85,43	0,92	-	8,36	1,04

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

$$\delta_Y = \frac{(0,089 \cdot (Q_n + Q_v) - 0,083 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot (Q_n + Q_v) + 0,048 \cdot Q_r) \cdot 400,25^3}{205.800 \cdot 162,76}$$

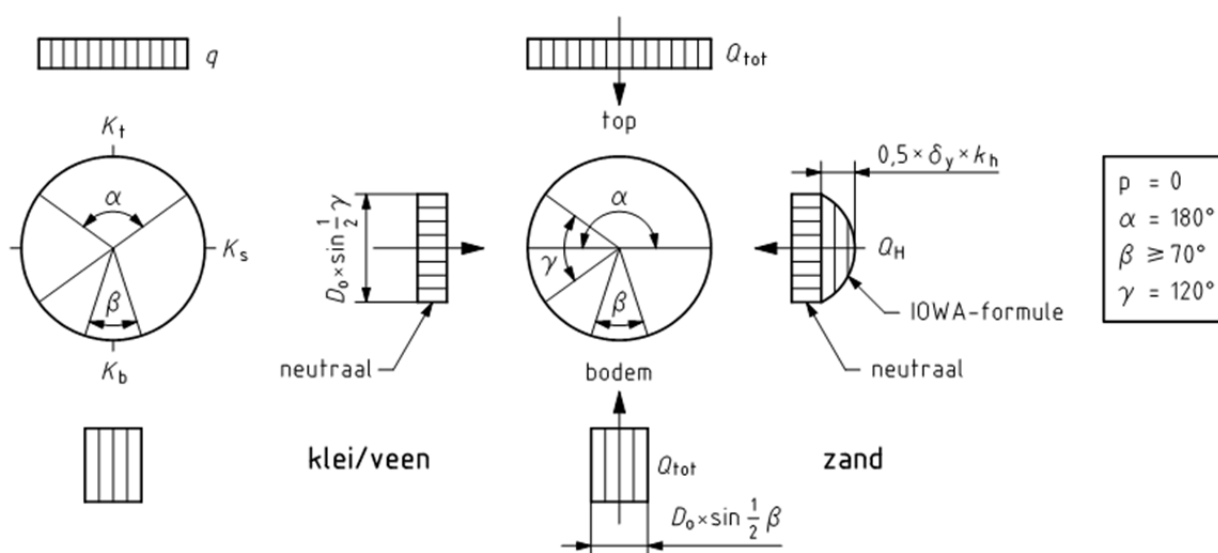
$$\text{Toelaatbare deflectie} = 15\% \cdot D_g = 0,15 \cdot 800,50 = \mathbf{120,08 \text{ mm}}$$

Conclusie: de optredende deflectie is maximaal 15,14 mm. Toelaatbaar is 120 mm. Dus er wordt voldaan aan de deflectie-eis.

Algemene conclusie: Leiding voldoet niet wegens te hoge spanningen in omtreksrichting. We moeten de invoer verfijnen.

1^e verfijning: mag horizontale steundruk toegepast worden?

Onderstaand belastingschema is van toepassing:



Figuur D.2 — Belastingsschema direct overgedragen bovenbelasting

Bron: NEN 3650-1:2012



C.4.2.5.2.3 Zandgrond, leiding onder druk met $f_{rr} < \delta_{y2}/\delta_{y1}$

In zandgrond mag bij een leiding onder druk en optreden van het 'rerounding'-effect alléén onder het freatisch vlak ten hoogste actieve horizontale steundruk in rekening worden gebracht.

Indien in drukloze toestand $\delta_y/2 < \delta_E$ is, mag bij de leiding onder druk neutrale horizontale steundruk in rekening worden gebracht, zowel boven als onder het freatisch vlak.

C.4.2.5.2.4 Klei- en veengrond

In klei- en veengrond mag, bij een leiding in drukloze toestand, ten hoogste neutrale horizontale steundruk in rekening worden gebracht.

Bij een leiding onder inwendige druk mag geen horizontale steundruk in rekening worden gebracht, behoudens het hiervoor gestelde bij $f_{rr} \geq \delta_{y2}/\delta_{y1}$.

Bovenstaande randvoorwaarden hebben wij in een Excelbestand verwerkt. De belastingen die we hebben uitgerekend met Sigma 2012 3.0 hebben we in dit bestand overgenomen met als resultaat:

p_d	0,3 N/mm ²	Q_n	154,56 N/mm
r_g	400,25 mm	Q_v	1,81 N/mm
k_y	0,089	φ	32,5 °
E	205800 N/mm ²	δ_{y2}	15,15 mm
l_w	162,76 mm ³	δ_{y1}	26,64 mm
f_{rr}	0,91	δ_{y2}/δ_{y1}	0,57
		$\delta_{y1}/2$	13,32

$f_{rr} < \delta_{y2}/\delta_{y1}$ **voldoet niet**

δ_E **18 mm**

$\delta_y/2 < \delta_E$ **voldoet**

Tabel C.1 — Indicatieve getalswaarden van δ_E

Middellijn mm	Elastische horizontale indrukking δ_E in mm bij H in m gronddekking in zand	
	$H = 0,8$	$H = 2,5$
100	2	11
300	6	13
600	9	16
1200	16	22

Conclusie: horizontale steundruk is niet toegestaan.

Gelet op de ligging van de leiding in een homogeen grondpakket gaan we rekenen gewelfwerking.



Herberekening stalen leiding met gebruikmaking van gewelfwerking.

Grondmechanische gegevens en verkeersbelasting							
Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	Wrijvings- hoek grond [°]
1e rechte deel	60,00	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Neergaande bocht	192,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
2e rechte deel	292,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
Opgaande bocht	392,65	15,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50
3e rechte deel	525,30	8,00	1,00	Zand	18,00	20,00	32,50

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm ²]	Effectieve cohesie [kN/m ²]	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Homogeen (zand)	0,0180	0,00	45,00	Grafiek II
2e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Homogeen (zand)	0,0180	0,00	45,00	Grafiek II
3e rechte deel	Homogeen (zand)	-	0,00	45,00	Grafiek ½ x II

Kijken we nu naar de grondbelasting dan zien we de volgende resultaten:

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	h [m]	GWS [m]	γ' [kN/m ³]
1e rechte deel	8,00	1,00	12,98
Neergaande bocht	15,00	1,00	12,52
2e rechte deel	15,00	1,00	12,52
Opgaande bocht	15,00	1,00	12,52
3e rechte deel	8,00	1,00	12,98

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

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	$8 \cdot B_1$ [m]	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]
1e rechte deel	Homogeen (zand)	4,80	85,43	21,31 ⁽¹⁾
Neergaande bocht	Homogeen (zand)	4,80	154,56	20,96 ⁽¹⁾
2e rechte deel	Homogeen (zand)	4,80	154,56	20,96 ⁽¹⁾
Opgaande bocht	Homogeen (zand)	4,80	154,56	20,96 ⁽¹⁾
3e rechte deel	Homogeen (zand)	4,80	85,43	21,31 ⁽¹⁾

$$B_1 = \frac{1}{2} \cdot D_0 + D_0 \cdot \tan(45^\circ - \frac{1}{2} \cdot \varphi) \geq R$$

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

$$Q_n = (\gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_0 = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot D_0$$

Indien gereduceerde grondbelasting volgens berekeningswijze homogeen grondmassief, zand ($h \geq 8 \cdot B_1$):

$$Q_{n,r1} = \frac{B_1 \cdot (\gamma' - c/B_1)}{K \cdot \tan(\varphi)} \cdot (1 - e^{\frac{-K \cdot h \cdot \tan \varphi}{B_1}}) \cdot D_0 \quad (1)$$



Conclusie: de grondbelasting wordt aanzienlijk teruggebracht.

Als gevolg daarvan worden de optredende spanningen fors lager.

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Locatie	Q_n [N/mm ¹]	$Q_{n,r}$ [N/mm ¹]	Q_v [N/mm ¹]	Q_{boven} [N/mm ¹]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm ¹]
1e rechte deel	85,43	21,31	0,92	22,23	1.228,02 ⁽²⁾	42,78
Neergaande bocht	154,56	20,96	0,76	21,72	1.199,59 ⁽²⁾	41,79
2e rechte deel	154,56	20,96	1,81	22,77	1.257,48 ⁽²⁾	43,81
Opgaande bocht	154,56	20,96	0,76	21,72	1.199,59 ⁽²⁾	41,79
3e rechte deel	85,43	21,31	0,92	22,23	1.228,02 ⁽²⁾	42,78

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 400,25 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 400,25 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 0,91 \cdot \frac{M_q}{26,04}$$

Dit zien we ook terug in bij de totalisatie van de spanningen:

7.1 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]
1e rechte deel	42,78	-	1	42,78
Neergaande bocht	41,79	21,38	1	63,17
2e rechte deel	43,81	-	1	43,81
Opgaande bocht	41,79	21,38	1	63,17
3e rechte deel	42,78	-	1	42,78

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

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

Toelaatbare spanning: $\sigma_{td} = 0,8 \cdot R_e = 0,8 \cdot 290 = \mathbf{232,00 \text{ N/mm}^2}$

Waardoor de ideële spanning ook lager wordt.

7.3 Overzicht van de ideële spanningen in de leiding

Locatie	σ_{y2} [N/mm ²]	σ_x [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]
1e rechte deel	42,78	23,87	37,13
Neergaande bocht	63,17	160,86	140,37
2e rechte deel	43,81	23,87	37,99
Opgaande bocht	63,17	160,86	140,37
3e rechte deel	42,78	23,87	37,13

Conclusie: leiding voldoet.



Nu deze leiding voldoet wordt het tijd om kritischer te kijken naar de trekkrachten die optreden tijdens het ondergronds intrekken.

5.5 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,\text{neer}}$ [N]	$T_{3c,\text{neer}}$ [N]	$T_{3b,\text{op}}$ [N]	$T_{3c,\text{op}}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	181.479	69.697	-	-	-	-	251.176
2 ^e deel intrekken	135.651	223.785	99.847	17.941	-	-	477.224
3 ^e deel intrekken	66.556	456.107	99.847	17.941	-	-	640.451
4 ^e deel intrekken	20.729	610.195	99.847	17.941	99.847	32.447	881.006
Geheel intrekken	0	679.892	99.847	17.941	99.847	32.447	929.974

We zien hier dat sprake is van een trekkracht van maximaal 929.974 N, ofwel 929,97 kN = 92,9 ton.

Op basis van de toelaatbare spanning is het mogelijk om deze leiding zonder moeite in te trekken.

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	251.176	7,99	-	7,99
Na 1 ^e deel intrekken	477.224	15,18	136,98	152,16
Na 2 ^e deel intrekken	640.451	20,37	-	20,37
Na 3 ^e deel intrekken	881.006	28,03	136,98	165,01
Na 4 ^e deel intrekken	929.974	29,58	-	29,58

De hoogste spanning is namelijk 165,01 N/mm² en dit is lager dan de toelaatbare spanning van 232 N/mm².

De trekkracht die de buis te verwerken krijgt bedraagt echter circa 93 ton. Dit betekent dat er een aardig grote boormachine nodig is.

We keren terug naar dit scherm:

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: $D_{e,\text{omtrek}} = 2.585,53 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{\text{gat}} = 2,468 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{\text{opw}} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 823,00^2 \cdot \pi/4 = 5,970 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{\text{eff}} = |g_{\text{gat}} - g_{\text{opw}}| = 3,502 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	60,00	69.697	-
2 ^e deel intrekken	192,65	-	223.785
3 ^e deel intrekken	392,65	456.107	-
4 ^e deel intrekken	525,30	-	610.195
Geheel ingetrokken	585,30	679.892	-

Rechte delen: $T_2 = f \cdot L \cdot (D_{e,\text{omtr}} \cdot f_2 + g_{\text{eff}} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (2.585,53 \cdot 0,00005 + 3,502 \cdot 0,2)$

Gebogen delen: $T_{3a} = f \cdot L_B \cdot (D_{e,\text{omtr}} \cdot f_2 + g_{\text{eff}} \cdot f_3) = 1,4 \cdot L \cdot (2.585,53 \cdot 0,00005 + 3,502 \cdot 0,2)$



We zien dat de leiding als gevolg van de boorspoeling op gaat drijven.

Opwaarts hebben we te maken met $g_{opw} = 5,97 \text{ N/mm}^1$.

De leiding zelf weegt $2,468 \text{ N/mm}^1$.

Dit betekent dat g_{eff} gelijk is aan $5,97 \text{ N/m}^1 - 2,468 \text{ N/mm}^1 = 3,5 \text{ N/mm}^1$.

In Sigma 2012 kan worden aangegeven dat de leiding gevuld wordt en zo ja, met hoeveel.

Boorspoeling en overige gegevens		Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren	
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]	1200	Totaalfactor bij normale boring	1,4_
Diameter boorstang [mm]	114	Belastingfactor ondergronds	1,4_
Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]	15,0	Belastingfactor bovengronds	1,1_
Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m ³]	11,5_	Wrijvingscoëff. met rollenbaan	0,1_
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]	100	Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm ²]	0,00005
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]	0,0_	Wrijving tussen leiding/boorgangwand	0,2_
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]	0,0_		

100% vulling

Klikken we op 100% vulling dan wordt de hele buis, ondergrond, gevuld.

We gaan het effect hiervan bekijken:

Boorspoeling en overige gegevens		Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren	
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]	1200	Totaalfactor bij normale boring	1,4_
Diameter boorstang [mm]	114	Belastingfactor ondergronds	1,4_
Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]	15,0	Belastingfactor bovengronds	1,1_
Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m ³]	11,5_	Wrijvingscoëff. met rollenbaan	0,1_
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]	100	Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm ²]	0,00005
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]	0,0_	Wrijving tussen leiding/boorgangwand	0,2_
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]	4,877		

De vulling weegt totaal $4,877 \text{ N/mm}^1$.

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

	Leiding op rollenbaan/ maaiveld	Leiding in boorgat
Gewicht mediumleiding	$g = 2,4677 \text{ N/mm}^1$	$g = 2,4677 \text{ N/mm}^1$
Gewicht vulling	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$	$g_{vul} = 4,877 \text{ N/mm}^1 +$
Totaal gewicht	$g_{rol} = 2,4677 \text{ N/mm}^1$	$g_{gat} = 7,3447 \text{ N/mm}^1$

Aangezien de opwaartse kracht zorgt voor $5,97 \text{ N/mm}^1$ en we neerwaarts nu $7,34 \text{ N/mm}^1$ hebben zal de leiding tijdens het intrekken naar de bodem van het boorgat zinken.



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: $D_{e,omtrek} = 2.585,53 \text{ mm}^1$

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 7,345 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 823,00^2 \cdot \pi/4 = 5,970 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 1,375 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	60,00	33.955	-
2 ^e deel intrekken	192,65	-	109.025
3 ^e deel intrekken	392,65	222.209	-
4 ^e deel intrekken	525,30	-	297.279
Geheel ingetrokken	585,30	331.234	-

Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 7,345 \text{ N/mm}^1$

Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 823,00^2 \cdot \pi/4 = 5,970 \text{ N/mm}^1$

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 1,375 \text{ N/mm}^1$

Ten opzichte van de lege leiding zien we het volgende:

Lege leiding:		100 % gevulde leiding:	
T_2 [N]	T_{3a} [N]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
69.697	-	33.955	-
-	223.785	-	109.025
456.107	-	222.209	-
-	610.195	-	297.279
679.892	-	331.234	-

Het volledig vullen scheelt maximaal $679,89 \text{ kN} - 331,23 \text{ kN} = 348,66 \text{ kN}$, ofwel 34,8 ton.

Of de aannemer 100% wil vullen is zijn keuze. Hij kan ook besluiten om de leiding voor de helft te vullen.

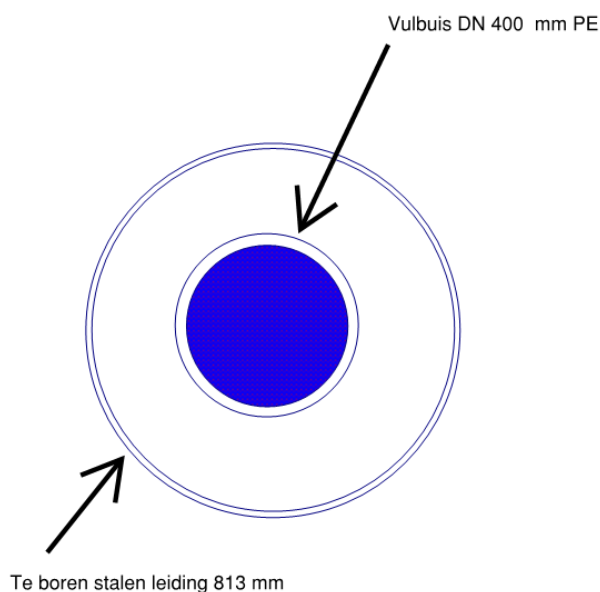
Vaak wordt in dat geval voor een binnenbuis gekozen die meegevoerd wordt in de in te trekken buis.



Intrekoperatie met een gevulde binnenbuis.

Overzicht diameters en wanddikten bij PE-leidingen									
Uitwendige middellijn [mm]	Wanddikte [mm]								
	PE 80 SDR 21	PE 80 SDR 17.6	PE 80 SDR 17	PE 80 SDR 13.6	PE 80 SDR 11	PE 100 SDR 17.6	PE 100 SDR 17	PE 100 SDR 13.6	PE 100 SDR 11
25	-	2.3	2	2.4	2.3	-	-	-	2.3
32	-	2.3	2	2.4	3	-	-	2.4	3
40	-	2.3	2.4	3	3.7	-	-	3	3.7
50	-	2.9	3	3.7	4.6	-	-	3.7	4.6
63	-	3.6	3.8	4.7	5.8	3.6	3.8	4.7	5.8
75	3.6	-	4.5	5.6	6.8	4.3	4.5	5.6	6.8
90	4.3	-	5.4	6.7	8.2	5.1	5.4	6.7	8.2
110	5.3	6.3	6.6	8.1	10	6.3	6.6	8.1	10
125	6	-	7.4	9.2	11.4	7.1	7.4	9.2	11.4
140	-	-	8.3	10.3	12.7	-	8.3	10.3	12.7
160	7.7	9.1	9.5	11.8	14.6	9.1	9.5	11.8	14.6
180	-	-	10.7	13.3	16.4	-	10.7	13.3	16.4
200	9.6	11.4	11.9	14.7	18.2	11.4	11.9	14.7	18.2
225	10.8	-	13.4	16.6	20.5	-	13.4	16.6	20.5
250	11.9	14.2	14.8	18.4	22.8	14.2	14.8	18.4	22.8
315	15	17.9	18.7	23.2	28.7	-	18.7	23.2	28.7
355	16.9	-	21.1	26.1	32.3	-	21.1	26.1	32.3
400	19.1	-	23.7	29.4	36.4	-	23.7	29.4	36.4
450	-	-	26.7	33.1	41	-	26.7	33.1	41
500	-	-	29.7	36.8	45.5	-	29.7	36.8	45.5
560	-	-	32.3	41.2	51	-	32.3	41.2	51
630	-	-	37.4	46.3	57.3	-	37.4	46.3	57.3
710	-	-	42.1	52.2	64.5	-	-	52.2	-
800	-	-	47.4	58.8	-	-	-	58.8	-
900	-	-	53.3	66.1	-	-	-	66.1	-
1000	-	-	59.3	-	-	-	-	-	-

Wanneer we voor de vulbuis uitgaan van 400 mm met een wanddikte van 23,7 mm (SDR 17) kunnen we Sigma gebruiken om even snel de gewichten uit te rekenen. Start hiervoor een nieuwe horizontaal gestuurde boring. Selecteer deze buis en kies vervolgens voor 100% vullen.



Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)		Mediumbuis
Materiaal	PE	☒ Enkele buis
Kwaliteit	PE 100	☐ Mantelbuis
Uitwendige middellijn [mm]	400,0_	Bovengrond
Wanddikte [mm]	23,7_	☒ Maaiveld
Dikte bekleding [mm]	0,0_	☐ Rollenbaan
Medium (Mediumleiding)		Ondergrond
Medium	☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos	☒ Normaal
Ontwerpdruk [N/mm ²]	0,3_	☐ Bundel
Volumieke massa vloeistof [kg/m ³]	1000	☐ Moeilijke situatie
Temperatuurverschil [°C]	10,0_	
Boorspoeling en overige gegevens		
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]	300_	
Diameter boorstang [mm]	53_	
Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]	15,0	
Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m ³]	11,5_	
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]	100	
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]	0,0_	
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]	0,976	

Druk op "Berekenen" en we zien:

Leiding in boorgat

$$\begin{aligned}
 g &= 0,2676 \text{ N/mm}^1 \\
 g_{\text{vul}} &= 0,976 \text{ N/mm}^1 + \\
 g_{\text{gat}} &= 1,2436 \text{ N/mm}^1
 \end{aligned}$$

Deze combinatie weegt dus 1,24 N/mm¹

Nu we dit gewicht hebben berekend kunnen we dit invullen bij de eerder gemaakte berekening.



Boorspoeling en overige gegevens		Variabele onzekerheids- en wrijvingsfactoren	
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]	1200	Totaalfactor bij normale boring	1,4_
Diameter boorstang [mm]	114	Belastingfactor ondergronds	1,4_
Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]	15,0	Belastingfactor bovengronds	1,1_
Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]	11,5_	Wrijvingscoëff. met rollenbaan	0,1_
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]	100	Wrijving tussen leiding/boorvloeistof [N/mm²]	0,00005
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]	0,0_	Wrijving tussen leiding/boorgangwand	0,2_
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]	1,244		

En wanneer we nu kijken naar het totale gewicht van de leidingen zien we:

3. Berekening van het gewicht van de leiding tijdens het intrekken van de leiding			
	Leiding op rollenbaan/maaiveld		Leiding in boorgat
Gewicht mediumleiding	g	= 2,4677 N/mm ¹	g = 2,4677 N/mm ¹
Gewicht vulling	g _{vul}	= N.v.t. +	g _{vul} = 1,244 N/mm ¹ +
Totaal gewicht	g _{rol}	= 2,4677 N/mm ¹	g _{gat} = 3,7117 N/mm ¹

Bij punt 5.1 zien we vervolgens:

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: $D_{e,omtrek} = 2.585,53 \text{ mm}^1$			
Gewicht van de leiding (+vulling) in het boorgat $g_{gat} = 3,712 \text{ N/mm}^1$			
Gelet op het gewicht van de boorvloeistof: $g_{opw} = \rho_m \cdot D_o^2 \cdot \pi/4 = 11,5 \cdot 823,00^2 \cdot \pi/4 = 5,970 \text{ N/mm}^1$			
Gelet hierop is $g_{eff} = g_{gat} - g_{opw} = 2,258 \text{ N/mm}^1$			
Trekracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	60,00	48.798	-
2 ^e deel intrekken	192,65	-	156.681
3 ^e deel intrekken	392,65	319.339	-
4 ^e deel intrekken	525,30	-	427.222
Geheel ingetrokken	585,30	476.020	-

En bij 5.5 zien we:

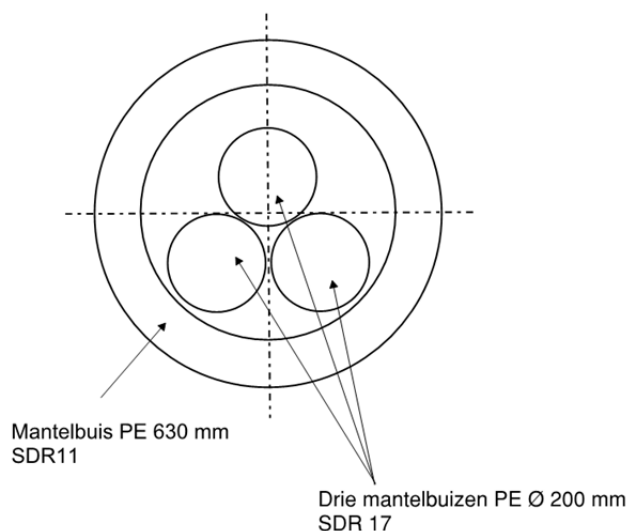
Trekracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,neer}$ [N]	$T_{3c,neer}$ [N]	$T_{3b,op}$ [N]	$T_{3c,op}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	181.479	48.798	-	-	-	-	230.277
2 ^e deel intrekken	135.651	156.681	99.847	15.320	-	-	407.499
3 ^e deel intrekken	66.556	319.339	99.847	15.320	-	-	501.062
4 ^e deel intrekken	20.729	427.222	99.847	15.320	99.847	25.299	688.264
Geheel intrekken	0	476.020	99.847	15.320	99.847	25.299	716.333

Trekracht is verminderd naar 71,6 ton (716 kN).



Het boren van een of meerdere leidingen in een mantelbuis.

Om bepaalde redenen kan het nodig zijn om de horizontaal gestuurde boring uit te voeren als combinatieboring. Deze zou er zo uit kunnen zien (principeschets)



In dat geval rekenen we dit in Sigma als volgt uit.

Gegevens		Boorprofiel	
Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding) Materiaal: 2 PE Kwaliteit: PE 100 Uitwendige middellijn [mm]: 200,0_ Wanddikte [mm]: 11,9_ Dikte bekleding [mm]: 0,0_ Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos Ontwerpdruk [N/mm ²]: 5 0,3_ Volumieke massa vloeistof [kg/m ³]: 1000 Temperatuurverschil [°C]: 10,0_ 		Leiding- en materiaalgegevens (Mantelbuis) Materiaal: 3 PE Kwaliteit: PE 100 Uitwendige middellijn [mm]: 630,0_ Wanddikte [mm]: 57,3_ Dikte bekleding [mm]: 0,0_ Medium: ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos 	
		Medium (Mantelbuis) Medium: ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos 	
		Mediumbuis/mantelbuis ☐ Enkele buis 1 ☒ Mantelbuis + mediumbuis Bovengronds ☒ Maaiveld ☐ Rollenbaan Ondergronds ☒ Normaal ☐ Bundel ☐ Moeilijke situatie/grind Thinsulators Thinsulators 4 ☐ Ja ☒ Nee	

Vul stapsgewijze de diverse gegevens in.

1: Geef aan dat sprake is van een buis in buis systeem.

2 en 3: Geef aan welke diameters en materialen nodig zijn.

4: Geef aan of er rekening gehouden moet worden met afstandhouders

5 en 6: Geef de procescondities aan.



Opstart - Berekenen - Gegevens

Projectgegevens

Naam van het project: **Cursusboek Sigma 2012 3.0 (NEN 3650:2012)**

Projectonderdeel: **Voorbeeldberekening bundelboring 630 mm PE**

Gegevens Boorprofiel

Leiding- en materiaalgegevens (Mediumleiding)

Materiaal: **PE**

Kwaliteit: **PE 100**

Uitwendige middellijn [mm]: **200,0**

Wanddikte [mm]: **11,9**

Dikte bekleding [mm]: **0,0**

Medium (Mediumleiding)

Medium: ☒ Vloeistof ☐ Gas ☐ Drukloos

Ontwerpdruk [N/mm²]: **0,3**

Volumieke massa vloeistof [kg/m³]: **1000**

Temperatuurverschil [°C]: **10,0**

Leiding- en materiaalgegevens (Mantelbuis)

Materiaal: **PE**

Kwaliteit: **PE 100**

Uitwendige middellijn [mm]: **630,0**

Wanddikte [mm]: **57,3**

Dikte bekleding [mm]: **0,0**

Medium (Mantelbuis)

Medium: ☐ Vloeistof ☐ Gas ☒ Drukloos

Mediumbuis/mantelbuis

☐ Enkele buis

☒ Mantelbuis + mediumbuis

Bovengronds

☐ Maaiveld

☒ Rollenbaan

Ondergronds

☒ Normaal

☐ Bundel

☐ Moeilijke situatie/grind

Thinsulators

Thinsulators ☐ Ja ☒ Nee

Boorspoeling en overige gegevens

Diameter ruimer ivm boorspoeldruk [mm]: **800**

Diameter boorstang [mm]: **90**

Zwichtspanning boorvloeistof [Pa]: **15,0**

Soortelijk gewicht boorvloeistof [kN/m³]: **11,5**

Percentage omtrek in aanraking met bentoniet [%]: **100**

Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan [N/mm]: **0,0**

Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang [N/mm]: **0,0**

Scherf 1: Invoer van de bundel met de in te trekken buis.



Gegevens **Boorprofiel**

Boorprofiel

		Langs de buis	Horizontaal		Langs de buis	Horizontaal
Intrede-hoek (bij boorstelling) [°]	17,0	Lengte 1e rechte deel L1 [m]	11,0	10,52	Lengte na 1e deel [m]	11,00
Uittrede-hoek (bij rollenbaan) [°]	17,0	Lengte neergaande bocht L2 [m]	29,67	29,24	Lengte na 2e deel [m]	40,67
Straal maaiveld/rollenbaan [m]	50,0	Lengte 2e rechte deel L3 [m]	100,0	100,0	Lengte na 3e deel [m]	140,67
Straal neergaande bocht R1 [m]	100,0	Lengte opgaande bocht L4 [m]	29,67	29,24	Lengte na 4e deel [m]	170,34
Straal opgaande bocht R2 [m]	100,0	Lengte 3e rechte deel L5 [m]	11,0	10,52	Totale lengte [m]	181,34

Doorsneden

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Horizontale afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus [MN/m²]
1e rechte deel	11,0	10,52	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	
Neergaande bocht	40,67	39,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	
2e rechte deel	90,67	89,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	
Opgaande bocht	140,67	139,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	
3e rechte deel	170,34	169,0	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	

Profielsschets

Scherf 2: Invoer hoeken, bochten en dekkingen enz.

Belangrijk is om vooraf te bepalen of de buizen op de kant ingeschoven worden of na afloop van het boren van de mantelbuis worden ingetrokken.

In dit voorbeeld gaan we er van uit dat de drie leidingen mee ingetrokken worden. In verband hiermee moeten we weten wat de drie buizen wegen. Wanneer we op "Berekenen" drukken dan zien we dat de 200 mm PE buis 0,0672 N/mm¹ weegt.

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

	Leiding op rollenbaan/maaveld	Leiding in boorgat
Gewicht mediumleiding	$g_{med} = 0,0672 \text{ N/mm}^1$	$g_{med} = 0,0672 \text{ N/mm}^1$
Gewicht mantelbuis	$g_{man} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$	$g_{man} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$
Gewicht vulling	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$	$g_{vul} = \text{N.v.t.} +$
Totaal gewicht	$g_{rol} = 1,0517 \text{ N/mm}^1$	$g_{gat} = 1,0517 \text{ N/mm}^1$

Dit gewicht vermenigvuldigen we met twee en voeren in het programma in.

Uitvoeringsaspecten, tracé boring, in- en uittredehoeken, onzekerheids- en wrijvingsfactoren			
Percentage omtrek in aanraking met bentoniet		= 100	%
Soortelijk gewicht boorvloeistof	ρ_m	= 11,5	kN/m ³
Zwichtspanning boorvloeistof	τ_y	= 15	Pa
Gewicht vulling/extra gewicht op rollenbaan	$g_{vul,r}$	= 0,135	N/mm ¹
Gewicht vulling/extra gewicht tpv boorgang	$g_{vul,b}$	= 0,135	N/mm ¹
Diameter ruimer ivm boorspoeldruk	D_g	= 800	mm
Diameter boorstang	D_b	= 90	mm



En bij punt 3 zien we nu:

3. Berekening van het gewicht van de leiding tijdens het intrekken van de leiding		
	Leiding op rollenbaan/ maaiveld	Leiding in boorgat
Gewicht mediumleiding	$g_{med} = 0,0672 \text{ N/mm}^1$	$g_{med} = 0,0672 \text{ N/mm}^1$
Gewicht mantelbuis	$g_{man} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$	$g_{man} = 0,9845 \text{ N/mm}^1$
Gewicht vulling	$g_{vul} = 0,135 \text{ N/mm}^1 +$	$g_{vul} = 0,135 \text{ N/mm}^1 +$
Totaal gewicht	$g_{rol} = 1,1867 \text{ N/mm}^1$	$g_{gat} = 1,1867 \text{ N/mm}^1$

Zowel tijdens het intrekken via de rollenbaan als ondergronds gaan we met dit gewicht rekenen.

Uitleg over de berekeningsresultaten:

2. Eigenschappen van de leiding				
		Mediumleiding	Mantelbuis	
Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 176,20	= 515,40	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 188,10	= 572,70	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 200,00	= 630,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 100,00	= 315,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 88,10	= 257,70	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 94,05	= 286,35	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$	= 31.225.396,96	= 4.268.958.539,00	mm ⁴
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 312.253,97	= 13.552.249,33	mm ³
Wandtraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 140,43	= 15.677,71	mm ⁴ /mm ¹
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 23,60	= 547,22	mm ³ /mm ¹
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 7.032,11	= 103.093,59	mm ²
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 0,0672	= 0,9845	N/mm ¹

We berekenen dus de eigenschappen van zowel de mantelbuis als de mediumleiding.

Trekkraft op de rollenbaan:

4.1 Berekening van de benodigde trekkraften op rollenbaan/ maaiveld		
Trekkraft T_1 tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_1 [N]
Starten met trekken	181,34	30.127
Na 1 ^e deel intrekken	170,34	28.300
Na 2 ^e deel intrekken	140,67	23.371
Na 3 ^e deel intrekken	40,67	6.757
Na 4 ^e deel intrekken	11,00	1.828
$T_1 = f \cdot L \cdot g_{rol} \cdot f_1 = 1,4 \cdot L \cdot 1,1867 \cdot 0,1$		
4.2 Berekening van de optredende spanningen t.g.v. de trekkraften op rollenbaan/ maaiveld		
Spanningen σ_t tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_1 [N]	σ_t [N/mm ²]
Starten met trekken	30.127	0,29
Na 1 ^e deel intrekken	28.300	0,27
Na 2 ^e deel intrekken	23.371	0,23
Na 3 ^e deel intrekken	6.757	0,07
Na 4 ^e deel intrekken	1.828	0,02
$\sigma_t = \frac{T_1}{A} = \frac{T_1}{103.093,59}$		



Zowel de mantelbuis als de in de mantelbuis gelegen leidingen worden gebogen om het intrekken mogelijk te maken.

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

4.3.1 Mediumleiding

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

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{31.225.397}{50.000} = 669.784,76 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{669.784,76}{312.254} = 2,15 \text{ N/mm}^2$$

4.3.2 Mantelbuis

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

$$M_b = 1,1 \cdot 975 \cdot \frac{4.268.958.539}{50.000} = 91.569.160,66 \text{ Nmm}$$

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

$$\sigma_b = \frac{91.569.160,66}{13.552.249} = 6,76 \text{ N/mm}^2$$

Spanningen in de mantelbuis:

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	0,29	4,68
Na 1 ^e deel intrekken	0,27	4,67
Na 2 ^e deel intrekken	0,23	4,62
Na 3 ^e deel intrekken	0,07	4,46
Na 4 ^e deel intrekken	0,02	4,41

$$\sigma_a = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b + \sigma_t = 0,65 \cdot 6,76 + \sigma_t$$

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

Mantelbuis voldoet ruim.

De mediumbuis wordt niet alleen getoetst. Deze wordt immers alleen gebogen.



Fase II: Ondergronds intrekken.

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 $g_{gat} = 1,187 \text{ N/mm}^1$

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

Gelet hierop is $g_{eff} = |g_{gat} - g_{opw}| = 2,398 \text{ N/mm}^1$

Trekkracht T_2 en T_{3a} tijdens verschillende stadia [N]	L [m]	T_2 [N]	T_{3a} [N]
1 ^e deel intrekken	11,00	8.910	-
2 ^e deel intrekken	40,67	-	32.944
3 ^e deel intrekken	140,67	113.946	-
4 ^e deel intrekken	170,34	-	137.979
Geheel ingetrokken	181,34	146.889	-

Hoeveel trekkracht wordt op de mantelbuis uitgeoefend?

5.5 Totalisatie van de trekkrachten in fase II

Trekkracht T_{tot} tijdens verschillende stadia [N]	T_1 [N]	T_2 / T_{3a} [N]	$T_{3b,neer}$ [N]	$T_{3c,neer}$ [N]	$T_{3b,op}$ [N]	$T_{3c,op}$ [N]	T_{tot} [N]
1 ^e deel intrekken	28.300	8.910	-	-	-	-	37.210
2 ^e deel intrekken	23.371	32.944	18.084	6.158	-	-	80.557
3 ^e deel intrekken	6.757	113.946	18.084	6.158	-	-	144.945
4 ^e deel intrekken	1.828	137.979	18.084	6.158	18.084	14.566	196.700
Geheel intrekken	0	146.889	18.084	6.158	18.084	14.566	203.782

We zien dat de trekkracht gelijk is aan 203,78 kN ofwel 20,38 ton.

Wat wordt de maximale spanning tijdens intrekken (incl. buigen)?

5.8 Totalisatie van de spanningen in het boorgat tijdens de trekoperatie

Spanningen σ_a tijdens verschillende stadia [N/mm ²]	T_{tot} [N]	σ_t [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]
Starten met trekken	37.210	0,36	-	0,36
Na 1 ^e deel intrekken	80.557	0,78	4,78	3,89
Na 2 ^e deel intrekken	144.945	1,41	-	1,41
Na 3 ^e deel intrekken	196.700	1,91	4,78	5,01
Na 4 ^e deel intrekken	203.782	1,98	-	1,98

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

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

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

Conclusie: leiding voldoet ruim.



Fase III: Gebruiksfase

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

6.1.1 Mediumleiding

$D_g/d_n = 188,10/11,90 = 15,81 \rightarrow D_g/d_n \leq 20 \rightarrow$ Dikwandige leiding

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

$$\sigma_p = \frac{100,00^2 + 88,10^2}{100,00^2 - 88,10^2} \cdot 0,3 = 2,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y1} = \sigma_p = 2,38 \text{ N/mm}^2$$

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

6.1.2 Mantelbuis

Leiding is drukloos:

$$\sigma_p = 0,00 \text{ N/mm}^2$$

6.2.2 Mantelbuis

Leiding is drukloos:

$$f_{rr} = 1,00$$

De mantelbuis is in de gebruiksfase drukloos. De in te trekken leiding heeft wel met inwendige druk te maken.

6.3 Berekening van de neutrale grondbelasting Q_n

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grond- soort	q_{droog} [kN/m ²]	q_{nat} [kN/m ²]	q_{totaal} [kN/m ²]	Q_n [N/mm ¹]
1e rechte deel	3,00	1,00	Klei	18,70	37,40	56,10	22,74
Neergaande bocht	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	50,15
2e rechte deel	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	50,15
Opgaande bocht	8,00	1,00	Klei	18,70	130,90	149,60	50,15
3e rechte deel	3,00	1,00	Klei	18,70	37,40	56,10	22,74

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

6.4 Berekening van de verkeersbelasting Q_v

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Verkeers- belasting	q_v [kN/m ²]	Q_v [N/mm ¹]
1e rechte deel	3,00	Grafiek 1/2 x II	3,78	2,38
Neergaande bocht	8,00	Grafiek II	2,25	1,42
2e rechte deel	8,00	Grafiek I	5,81	3,66
Opgaande bocht	8,00	Grafiek II	2,25	1,42
3e rechte deel	3,00	Grafiek 1/2 x II	3,78	2,38

$$Q_v = q_v \cdot D_o = q_v \cdot 630,0$$

Berekenen van de grond- en verkeersbelasting op de PE Ø 630 mm leiding.



En de grond- en verkeersbelasting zorgen voor spanningen:

6.5 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 ¹]
1e rechte deel	22,74	2,38	25,12	992,70	1,81
Neergaande bocht	50,15	1,42	51,56	2.037,59	3,72
2e rechte deel	50,15	3,66	53,81	2.126,41	3,89
Opgaande bocht	50,15	1,42	51,56	2.037,59	3,72
3e rechte deel	22,74	2,38	25,12	992,70	1,81

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

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{547,22}$$

Uiteindelijk zien we het volgende overzicht:

9. Berekening van het totaal aan optredende spanningen in de mantelbuis

9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_{σ} [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	1,81	-	0,65	1,18
Neergaande bocht	3,72	0,34	0,65	2,64
2e rechte deel	3,89	-	0,65	2,53
Opgaande bocht	3,72	0,34	0,65	2,64
3e rechte deel	1,81	-	0,65	1,18

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

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

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

9.2 Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

Locatie	σ_{ax} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	α_{σ} [-]	σ_x [N/mm ²]
1e rechte deel	0,00	-	-	0,00
Neergaande bocht	0,00	4,78	0,65	3,11
2e rechte deel	0,00	-	-	0,00
Opgaande bocht	0,00	4,78	0,65	3,11
3e rechte deel	0,00	-	-	0,00

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

Bochten: $\sigma_x = \sigma_{ax} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_b$

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

Conclusie: Mantelbuis voldoet zowel tijdens intrekken als de gebruikssituatie.



Optredende spanningen in de mediumbuis:

11. Berekening van het totaal aan optredende spanningen in de mediumleiding

11.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

Locatie	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	0,00
Neergaande bocht	0,00
2e rechte deel	0,00
Opgaande bocht	0,00
3e rechte deel	0,00

$$\sigma_{y2} = \sigma_p$$

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

11.2 Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

Locatie	σ_{ax} [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_x [N/mm ²]
1e rechte deel	1,56	-	-	1,56
Neergaande bocht	1,56	1,52	0,65	2,55
2e rechte deel	1,56	-	-	1,56
Opgaande bocht	1,56	1,52	0,65	2,55
3e rechte deel	1,56	-	-	1,56

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

Bochten: $\sigma_x = \sigma_{ax} + \alpha_\sigma \cdot \sigma_b$

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

De spanningen in de mediumbuis worden in dit voorbeeld in langsrichting alleen veroorzaakt door uitzetting en buiging. Mediumbuis voldoet.



Hoewel nu niet nodig is het toegestaan bij mantelbuizen te rekenen met horizontale steundruk.

Uiterst rechts kunnen we dit aanvinken:

Locatie	Horizontale and t.o.v. edepunt	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	Grondwater	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m³]	Inwendige wrijvings- hoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/ m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Gem. vert. beddings- constante [N/mm²]	Verkeersbelasting	Horizontale steundruk
1e rechte deel	10,52	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek ½ x II	☒
Neergaande bo...	39,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek II	☒
2e rechte deel	89,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek I	☒
Opgaande bocht	139,76	8,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek II	☒
3e rechte deel	169,0	3,0	☒	1,0	Klei	17,0	17,0	17,5	10,0	2,0	0,006	Grafiek ½ x II	☒

Op blz. 2 zien we overal een vinkje staan.

Locatie	Gereduceerde grondbelasting	Hor. steun- druk	Gemiddelde verticale beddingsconstante [N/mm²]	Effectieve cohesie [kN/m²]	E-modulus ondergrond [MN/m²]	Verkeersbelasting
1e rechte deel	Geen	☒	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II
Neergaande bocht	Geen	☒	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
2e rechte deel	Geen	☒	-	10,00	2,00	Grafiek I
Opgaande bocht	Geen	☒	0,0060	10,00	2,00	Grafiek II
3e rechte deel	Geen	☒	-	10,00	2,00	Grafiek ½ x II

Bij 6.5 zien we de vinkjes terugkomen.

6.5 Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen						
Locatie	Hor. steun- druk	Q_n [N/mm²]	Q_v [N/mm²]	Q_{boven} [N/mm²]	M_q [Nmm]	σ_q [N/mm²]
1e rechte deel	☒	22,74	2,38	25,12	369,73 ⁽¹⁾	0,68
Neergaande bocht	☒	50,15	1,42	51,56	758,90 ⁽¹⁾	1,39
2e rechte deel	☒	50,15	3,66	53,81	791,98 ⁽¹⁾	1,45
Opgaande bocht	☒	50,15	1,42	51,56	758,90 ⁽¹⁾	1,39
3e rechte deel	☒	22,74	2,38	25,12	369,73 ⁽¹⁾	0,68

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

$M_q = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 286,35 - 0,143 \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot \sin(1/2 \cdot 120) \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 286,35$

$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{547,22}$

In dit geval wordt overal met horizontale steundruk toegepast en wordt gebruik gemaakt van formule(1) om de spanningen uit te rekenen.



9.1 Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding				
Locatie	σ_q [N/mm ²]	σ_{qr} [N/mm ²]	α_σ [-]	σ_{y2} [N/mm ²]
1e rechte deel	0,68	-	0,65	0,44
Neergaande bocht	1,39	0,34	0,65	1,12
2e rechte deel	1,45	-	0,65	0,94
Opgaande bocht	1,39	0,34	0,65	1,12
3e rechte deel	0,68	-	0,65	0,44

Rechte delen: $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_q$
 Bochten: $\sigma_{y2} = \alpha_\sigma \cdot (\sigma_q + \sigma_{qr})$
 Toelaatbare spanning: $\sigma_{ld} = \bar{\sigma}_t = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$

De conclusie is dat de optredende spanningen minder zijn dan de situatie zonder horizontale steundruk.

Zonder horizontale steundruk	Met horizontale steundruk
σ_{y2} [N/mm ²]	σ_{y2} [N/mm ²]
1,18	0,44
2,64	1,12
2,53	0,94
2,64	1,12
1,18	0,44

Het is niet nodig om te rekenen met gereduceerde grondbelasting.