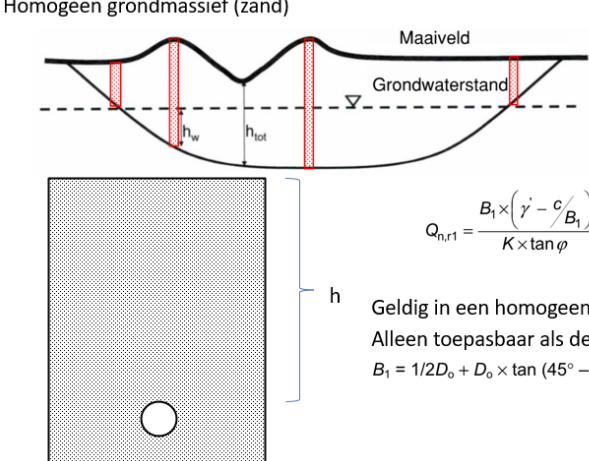


## 1. Inleiding

Bij gewelfwerking bij een horizontaal gestuurde boring wordt onderscheid gemaakt in zandgrond, samendrukbare grond of gelaagde grond. Het is mogelijk om hiermee te rekenen met het programma Sigma. Er zijn wel een aantal belangrijke randvoorwaarden die van toepassing zijn. In dit document wordt een en ander toegelicht. Er wordt uitgegaan van de volgende situaties:

Homogeen grondmassief (zand)

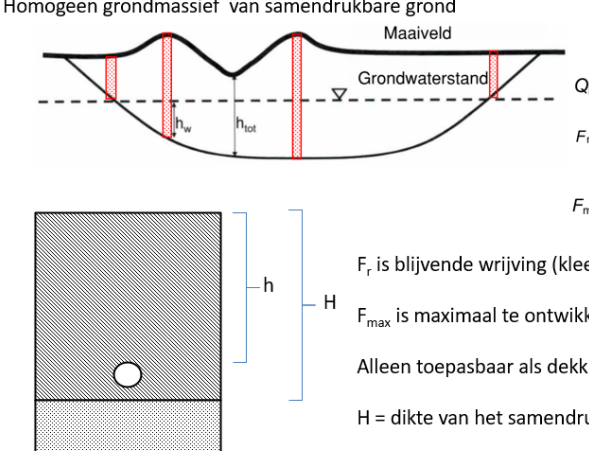


$$Q_{n,r1} = \frac{B_1 \times (\gamma' - c/B_1)}{K \times \tan \varphi} \times \left( 1 - e^{-\frac{-K \cdot h \cdot \tan \varphi}{B_1}} \right) \times D_0$$

h

Geldig in een homogeen grondmassief van zand  
Alleen toepasbaar als dekking  $\geq 8 \times B_1$   
 $B_1 = 1/2 D_0 + D_0 \times \tan(45^\circ - 1/2 \varphi) \geq R$

Homogeen grondmassief van samendrukbare grond



$$Q_{n,r2} = (h \times \gamma - F_r / 2B_1) \times D_0$$

$$F_r = \frac{0,9 F_{\max}}{B_1 \times (3H - 2h) \times \alpha}$$

$$1 + \frac{2C \times H(\delta_d + F_{\max} / 2B_1 \times k_v)}{}$$

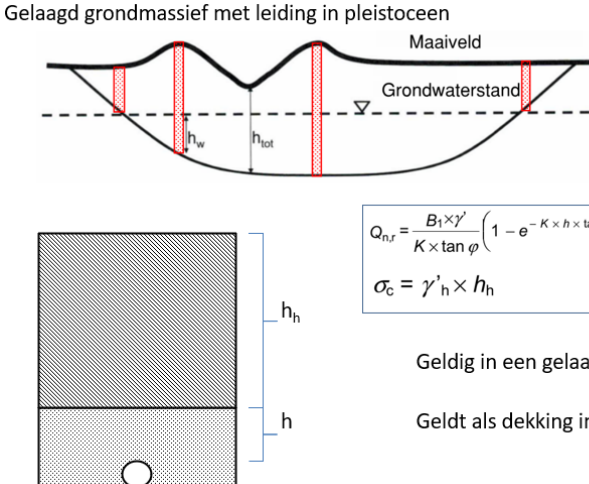
$$F_{\max} = (h \times \gamma - Q_{n,r1} / D_0) 2B_1$$

h

H

$F_r$  is blijvende wrijving (kleef) door gewelfwerking  
 $F_{\max}$  is maximaal te ontwikkelen kleef  
Alleen toepasbaar als dekking  $\geq 8 \times B_1$   
H = dikte van het samendrukbare grondmassief

Gelaagd grondmassief met leiding in pleistoceen



$$Q_{n,r} = \frac{B_1 \times \gamma'}{K \times \tan \varphi} \left( 1 - e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1} \right) D_0 + \sigma_c D_0 e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1}$$

$$\sigma_c = \gamma' h \times h_h$$

h<sub>h</sub>

h

Geldig in een gelaagd grondmassief  
Geldt als dekking in pleistoceen  $h \geq 8 \times B_1$

We zien dus drie mogelijke situaties.

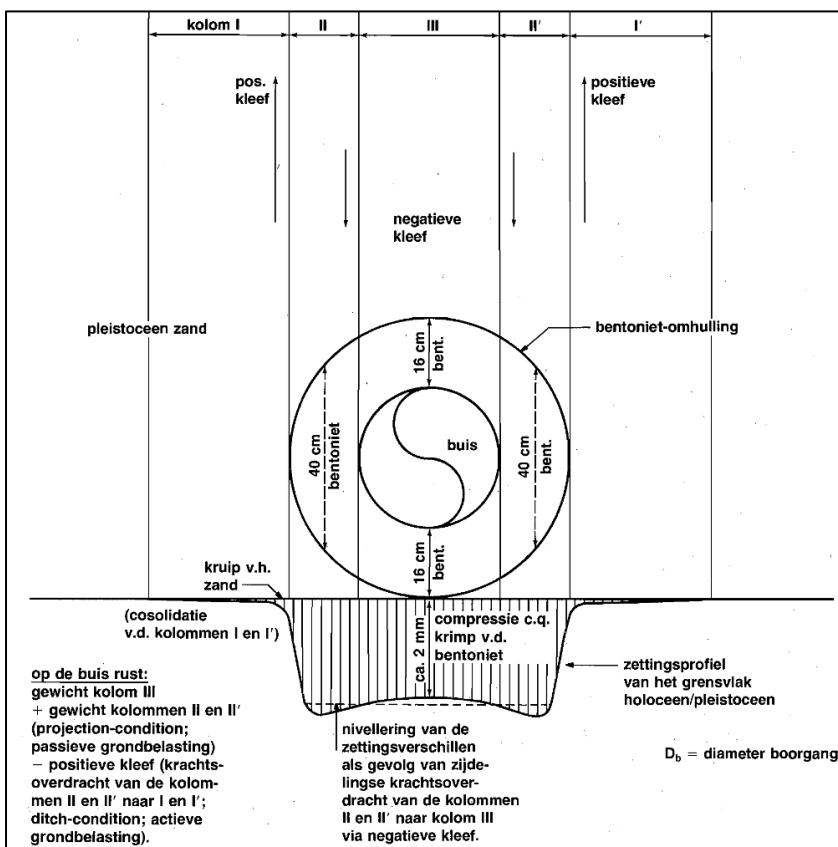
- A. De leiding ligt ter plaatse volledig in zandgrond.
- B. De leiding ligt in samendrukbare grond
- C. De leiding ligt in het pleistoceen (en komt daar via de samendrukbare grond)

In situatie A en situatie C is de gewelfwerking het hoogst. Bij alleen zandgrond is de berekening van de gewelfwerking het eenvoudigst.

Indien met gewelfwerking gerekend mag worden dan scheelt dit aanzienlijk qua optredende spanning. Dit kan positieve gevolgen hebben voor het toe te passen leidingmateriaal (dunnere wanddikte kan mogelijk worden, of er kan volstaan worden met een lagere staalkwaliteit).

In deze memo laten we met behulp van het programma Sigma zien hoe gewelfwerking moet worden berekend.

De berekeningswijze over gewelfwerking is opgezet door de provincie Zuid-Holland en is destijds opgenomen in de Pijpleidingcode.



Fragment uit de NPR 3659

## 2. Basisberekening neutrale grondbelasting in zandgrond

Stel een PE leiding Ø 400 mm SDR 11. Dan zien we:

Materiaalgegevens			
Materiaal soort:	PE		
Kwaliteit:	PE 100 SDR 11		
Lange-duur treksterkte	MRS = 10		N/mm <sup>2</sup>
Materiaalfactor	$\gamma_M = 1,25$		-
Toelaatbare langeduur spanning	$\bar{\sigma}_t = 8,00$		N/mm <sup>2</sup>
Elasticiteitsmodulus korte duur	E = 975		N/mm <sup>2</sup>
Elasticiteitsmodulus lange duur	E' = 350		N/mm <sup>2</sup>
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$\alpha_g = 16,0 \cdot 10^{-5}$		mm/(mm·K)
Alfa Tangentieel / Alfa Axiaal	$\alpha_\sigma = 0,65$		-
Soortelijk gewicht buis	$\rho_L = 9,55$		kN/m <sup>3</sup>
Toelaatbare deflectie	$\delta = 8,00$		%
Leidinggegevens			
Uitwendige middellijn	D <sub>e</sub> = 400,00		mm
Wanddikte	d <sub>n</sub> = 36,4		mm

### Eigenschappen van de leiding

Inwendige middellijn	$D_i = D_e - 2 \cdot d_n$	= 327,20	mm
Gemiddelde middellijn	$D_g = (D_e + D_i)/2$	= 363,60	mm
Uitwendige middellijn+bekleding	$D_o = D_e + 2 \cdot e$	= 400,00	mm
Uitwendige straal	$r_e = D_e / 2$	= 200,00	mm
Inwendige straal	$r_i = D_i / 2$	= 163,60	mm
Gemiddelde straal	$r_g = (r_e + r_i) / 2$	= 181,80	mm
Traagheidsmoment buis	$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi / 64$	= 694.006.811,09	mm <sup>4</sup>
Weerstandsmoment buis	$W_b = I_b / r_e$	= 3.470.034,06	mm <sup>3</sup>
Wandraagheidsmoment	$I_w = d_n^3 / 12$	= 4.019,05	mm <sup>4</sup> /mm <sup>1</sup>
Wandweerstandsmoment	$W_w = d_n^2 / 6$	= 220,83	mm <sup>3</sup> /mm <sup>1</sup>
Oppervlakte leiding	$A = \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2) / 4$	= 41.579,10	mm <sup>2</sup>
Gewicht leiding	$g = \rho_L \cdot A$	= 0,3971	N/mm <sup>1</sup>

### Invoer gronddekking, grondwaterstand en volumieke gewichten enz.

Locatie	Afstand t.o.v. intredepunt [m]	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Wrijvingshoek grond [°]
1	76,06	10,00	2,00	Zand	18,00	20,00	32,50

### Berekening neutrale grondbelasting

Formules:

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

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

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

$$Q_n = q_n \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot 400$$

Berekeningsresultaten:

Locatie	Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	$q_{\text{droog}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{\text{nat}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]
1	10,00	2,00	Zand	39,60	96,00	135,60	54,24

Berekening spanning in de leiding

Formules:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{220,83}$$

Berekeningsresultaten:

Locatie	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_v$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{\text{boven}}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$M_q$ [Nmm]	$\sigma_q$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	54,24	0,00	54,24	1.360,79	<b>6,16</b>

Conclusie: bij 10 m dekking bedraagt de spanning in de buis 6,16 N/mm<sup>2</sup>. Hierbij is geen rekening gehouden met gewelfwerking. De berekende spanning is het gevolg van de neutrale grondbelasting.

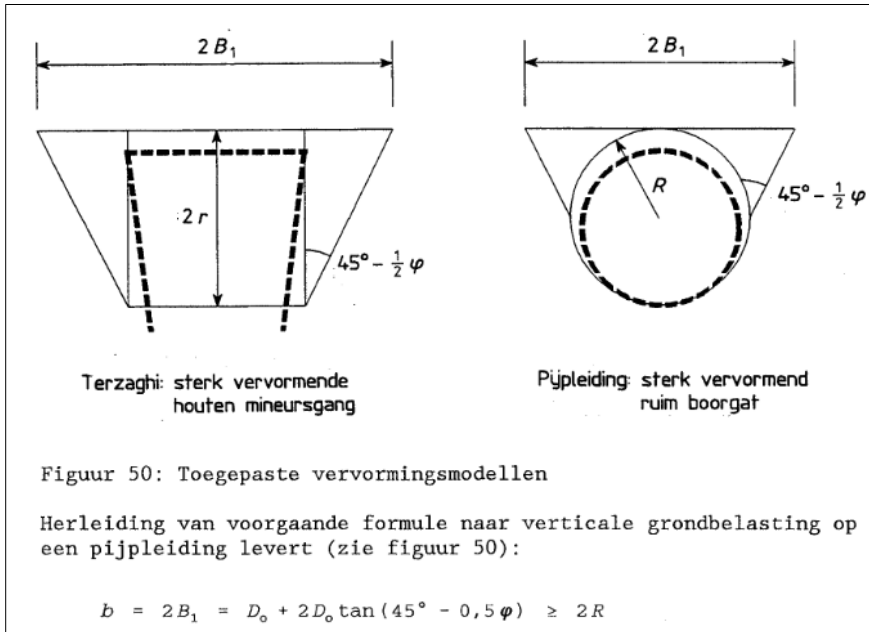
### 3. Indien gereduceerde grondbelasting (leiding ligt volledig in zandgrond)

Bij het berekenen van gereduceerde grondbelasting is de  $B_1$ -factor van belang. Volgens de NEN 3650:2020 mag met gewelfwerking gerekend worden bij een diepte van  $8 \times B_1$ . Vandaar dat  $B_1$  wordt uitgerekend in Sigma.

Door de door opstijving van de bentoniet-grondschil rondom de leiding gevormde relatief dikke (t.o.v. de uitwendige middellijn van de leiding) zeer samendrukbare laag zal gewelfwerking optreden, waardoor de grondbelasting wordt gereduceerd.

De bepaling van deze gereduceerde grondbelasting is uitgewerkt in de NPR 3659:1996 en is gebaseerd op theorieën van Terzaghi, en is afhankelijk van:

- grondsoort
- grondgelaagdheid
- aanwezigheid van ophogingen



Principe sterk vervormd ruim boorgat (NPR 3659:1996)

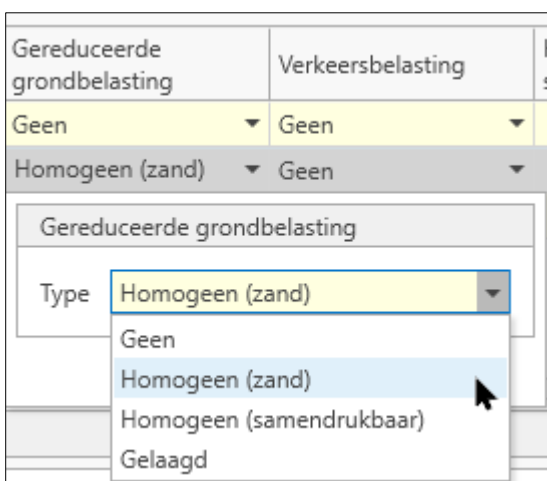
### Berekening grondbelasting met gewelfwerking in zandgrond

Wanneer we in Sigma bij rekenvoorbeeld nr.1 invoeren dat we zandgrond hebben én willen rekenen met gewelfwerking dan voeren we het volgende in:

Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m <sup>2</sup> ]	E-modulus ondergrond [MN/m <sup>2</sup> ]	Gereduceerde grondbelasting
Zand	18,00	20,00	32,50	0,00	45,00	Geen
Zand	18,00	20,00	32,50	0,00	45,00	Homogeen (zand)
Zand	18,00	20,00	32,50	0,00	45,00	Geen

Deel van het invoerscherm (uitgerekt) Sigma 2024

Het enige wat moet worden aangegeven is de gelaagdheid van het grondpakket:



Dus standaard is "Geen" gelaagdheid. Optie 2 is Homogeen (zand). Dit kiezen we in dit voorbeeld.

We zien geen verandering bij de neutrale grondbelasting:

Formules:

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

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

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

$$Q_n = q_n \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot 400$$

Berekeningsresultaten:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	$q_{\text{droog}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{\text{nat}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]
10,00	2,00	Zand	39,60	96,00	135,60	54,24

Vervolgens berekenen we de verticale terreinspanning,  $B_1$ ,  $8B_1$  en de gereduceerde grondbelasting.

Formules:

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

$$R = \frac{D_{gl}}{2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ mm}$$

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

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

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

$$Q_{n,r} = q_{n,r} \cdot D_o = q_{n,r} \cdot 400$$

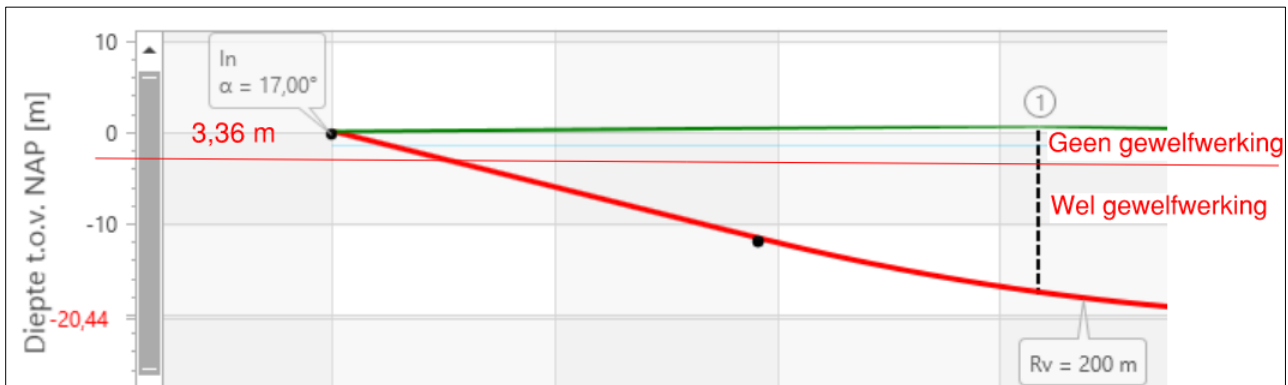
→ De formule van  $q_{n,r1}$  is geldig indien de dikte van het grondpakket boven de leiding groter is dan vier maal de breedte van de afschuivende grondkolom ( $= 8 B_1$ )

Berekeningsresultaten:

Gereduceerde grondbelasting	$B_1$ [m]	$8 \cdot B_1$ [m]	$q_{n,r}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]
Homogeen (zand)	0,42	3,36	19,28 <sup>(1)</sup>	7,71

Dus we zien  $B_1 = 0,42$  m. We mogen pas gewelfwerking toepassen vanaf  $8B_1$ , dus 3,36 m. De gebruiker van het programma moet zelf controleren of de locatie waar de berekening gemaakt wordt voldoet aan dit uitgangspunt. We hebben een dekking van 10 m, dus we voldoen aan dit randvoorwaarde.

Tot 3,36 m moet gerekend worden met neutrale grondbelasting (als we even overgangsgedebied verwaarlozen).



Dekking van waar af met gewelfwerking gerekend mag worden

De gereduceerde grondbelasting is 19,28 kN/m<sup>2</sup>. Deze was 136,6 kN/m<sup>2</sup>. Dus we hebben een aanzienlijk lagere grondbelasting. We zien dan de volgende spanningen in de leiding:

Formules:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 181,80 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_r \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{220,83}$$

Bij (1) wordt niet gerekend met gereduceerde grondbelasting. Bij (2) wel.

Berekeningsresultaten:

Locatie	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_v$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{\text{boven}}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$M_q$ [Nmm]	$\sigma_q$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2	54,24	-	0,00	54,24	1.360,79 <sup>(1)</sup>	<b>6,16</b>
3	54,24	7,71	0,00	7,71	193,46 <sup>(2)</sup>	<b>0,88</b>

De spanning in de leiding wordt dus duidelijk lager. Van 6,16 N/mm<sup>2</sup> naar 0,88 N/mm<sup>2</sup>.

Conclusie: berekenen met gewelfwerking scheelt aanzienlijk qua optredende spanningen.

We zien in deze berekeningen dus dat  $B_1$  een belangrijke factor is. Deze is afhankelijk van de grondsoort. In de NEN 3650 worden diverse tabellen getoond/voorgeschreven waarin parameters vermeld in combinatie met grondsoorten.

Voor  $8B_1$  kunnen we ook zo'n tabel samenstellen. Zo kan op basis van de uitwendige middellijn van de leiding en de grondsoort snel gezien worden met welke diepteligging rekening gehouden moet worden bij het toepassen van de optie gereduceerde grondbelasting.



Overzicht 8B <sub>1</sub> volgens NEN 3650:2020   Adviesbureau Schrijvers b.v.   22-5-2024								
Berekening van 8 x de halve breedte van de afschuivende grondkolom (B <sub>1</sub> ) volgens de NPR 3659:1996 (hoofdstuk 5.2.2.) op basis van inwendige wrijvingshoek.								
Uitwendige middellijn leiding [mm]	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand		Hard zand	
	15°	17,5°	22,5°	27,5°	30°	32,5°	35°	40°
	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]	8B <sub>1</sub> [m]
100,00	1,01	0,99	0,93	0,89	0,86	0,84	0,82	0,77
200,00	2,03	1,97	1,87	1,77	1,72	1,68	1,63	1,55
300,00	3,04	2,96	2,80	2,66	2,59	2,52	2,45	2,32
400,00	4,06	3,95	3,74	3,54	3,45	3,36	3,27	3,09
500,00	5,07	4,93	4,67	4,43	4,31	4,19	4,08	3,87
600,00	6,08	5,92	5,61	5,31	5,17	5,03	4,90	4,64
700,00	7,10	6,91	6,54	6,20	6,03	5,87	5,72	5,41
800,00	8,11	7,89	7,48	7,08	6,90	6,71	6,53	6,18
900,00	9,12	8,88	8,41	7,97	7,76	7,55	7,35	6,96
1000,00	10,14	9,87	9,35	8,85	8,62	8,39	8,16	7,73
1100,00	11,15	10,85	10,28	9,74	9,48	9,23	8,98	8,50
1200,00	12,17	11,84	11,21	10,63	10,34	10,07	9,80	9,28
1300,00	13,18	12,83	12,15	11,51	11,20	10,91	10,61	10,05
1400,00	14,19	13,81	13,08	12,40	12,07	11,74	11,43	10,82

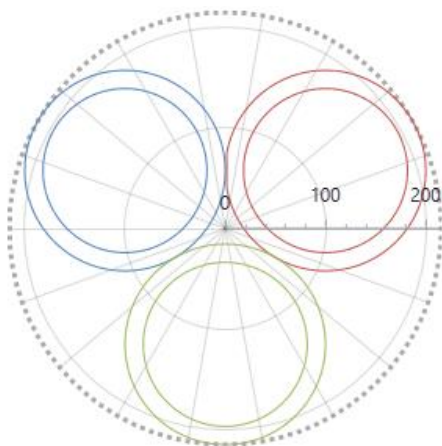
Overzicht van de factor 8B<sub>1</sub> bij verschillende diameters en grondsoorten

Stel leiding 600 mm in combinatie met normaal zand: gewelfwerking vanaf 5,17 m.

Indien sprake is van slappe klei/veen dan zien we gewelfwerking vanaf 6,08 m.

Wanneer sprake is van een bundel in plaats van een enkele buis dan wordt geadviseerd om de diameter van het boorgat aan te houden.

Bij een bundel van 3 x Ø 200 mm krijgen we een omhullende straal van 430 mm.

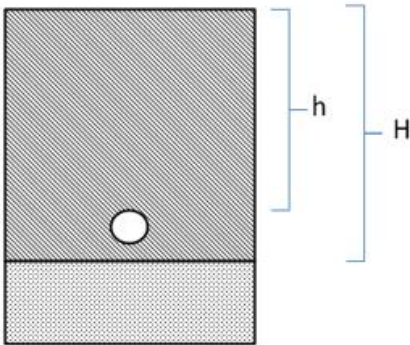


Wanneer een ruimer wordt gebruikt van 1,3 x deze bundeldiameter dan is sprake van een boorgat van 560 mm. We zien dan een 8B<sub>1</sub> variërend van ongeveer 6,08 m (slappe klei/veen) tot 4,64 m (hard zand).



#### 4. Gereduceerde grondbelasting bij samendrukbare grond

Stel dat sprake is van volledige ligging in samendrukbare grond. We hebben het hier in het algemeen over het holocene grondpakket (klei, veen, zand, klei, veen enz.). De leiding ligt dus in het holocene pakket boven het pleistoceen.



Hierin is:

$h$  = dekking van de leiding ten opzichte van het maaiveld

$H$  = dikte van het holocene grondpakket

Wanneer dit holocene pakket 15 m dik is en de leiding op 10 m diepte geboord dan krijgen we de volgende berekening:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondparameters	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	Effectieve cohesie [kN/m <sup>2</sup> ]
10,00	1,00	Klei	Klei	17,00	17,00	17,50	5,00
10,00	1,00	Klei	Klei	17,00	17,00	17,50	5,00
10,00	1,00	Klei	Klei	17,00	17,00	17,50	5,00

E-modulus ondergrond [MN/m <sup>2</sup> ]	Gereduceerde grondbelasting
2,00	Homogeen (samendrukbaar)
2,00	Homogeen (samendrukbaar)
2,00	Homogeen (samendrukbaar)

Wanneer we het pull down menu open klappen kunnen de vereiste parameters invoeren.:

Gereduceerde grondbelasting	Verkeersbelasting
Homogeen (samendrukbaar)	Geen
Gereduceerde grondbelasting	
Type	Homogeen (samendrukbaar)
Dikte samendrukbaar grondmassief [m]	15,00
Samendrukkingsconstante [-]	15,00
Relatieve verplaatsing [mm]	5,00
<input type="button" value="Tabel grondgegevens"/>	
<input type="button" value="Sluiten"/>	

De samendrukkingsconstante en de relatieve verplaatsing van de grondkolom en kunnen we uit de tabel met de grondgegevens halen.



Hoofdnaam			Klei											
Bijmengsel			Schoon				Zwak zandig						Sterk zandig	
Consistentie			Slap	Matig	Vast		Slap	Matig	Vast					
Volumiek gewicht droge grond	$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	14	17	19	20	15	18	20	21	18	20		
Volumiek gewicht natte grond	$\gamma_n$	[kN/m <sup>3</sup> ]	14	17	19	20	15	18	20	21	18	20		
Inwendige wrijvingshoek grond	$\Phi$	[°]	17.5	17.5	17.5	25	22.5	22.5	22.5	27.5	27.5	32.5		
Effectieve cohesie	$c'$	[kN/m <sup>2</sup> ]	0	5	13	15	0	5	13	15	0	1		
Ongedraineerde schuifsterkte	$c_u$	[kN/m <sup>2</sup> ]	25	50	100	200	40	80	120	170	0	10		
E-modulus ondergrond	$E_{100}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	1	2	4	10	1.5	2	5	10	2	5		
Samendrukkingsconstante	$C'_p$	[-]	7	15	25	30	10	20	30	50	25	140		
Relatieve verplaatsing	$\delta_d$	[mm]	6-10	4-6	2-4	6-10	4-6	2-4	3-6					

Fragment van de tabel Grondgegevens

### Berekening neutrale grondbelasting

Formules:

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

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

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

$$Q_n = q_n \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot 400$$

Berekeningsresultaten:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	$q_{\text{droog}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{\text{nat}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]
10,00	1,00	Klei	18,70	78,30	97,00	38,80

### Berekening gemiddeld gewicht van de grondkolom boven de leiding

Formule:

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

Berekeningsresultaten:

h [m]	GWS [m]	$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]
10,00	1,00	9,70

Vervolgens worden  $B_1$ ,  $8B_1$ ,  $H$ ,  $F_{\text{max}}$ ,  $F_r$ ,  $q_{n,r}$  en  $Q_{n,r}$  berekend.

Formules:

$$R = \frac{D_{g,i}}{2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ mm}$$

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

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

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

$$F_{\max} = (h \cdot \gamma' - q_{n,r1}) \cdot 2 \cdot B_1$$

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

$$q_{n,r2} = h \cdot \gamma' - \frac{F_r}{2 \cdot B_1}$$

$$Q_{n,r} = q_{n,r} \cdot D_o = q_{n,r} \cdot 400$$

Berekeningsresultaten:

$B_1$ [m]	$8 \cdot B_1$ [m]	H [m]	$F_{\max}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$F_r$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$q_{n,r}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]
0,49	3,95	15,00	95,70	34,61	61,92 <sup>(1)</sup>	24,77

Berekende grondrukken (niet gereduceerd en wel gereduceerd)

$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$q_{n,r}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]
97,00	38,80	61,92	24,77

Conclusie: We zien dus dat er sprake is van reductie van 97 kN/m<sup>2</sup> naar 61,92 kN/m<sup>2</sup>. De reductie is aanmerkelijk lager dan bij zandgrond.

Momenten en spanningen t.g.v. bovenbelastingen

Formules:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 181,80 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{220,83}$$

Berekeningsresultaten:

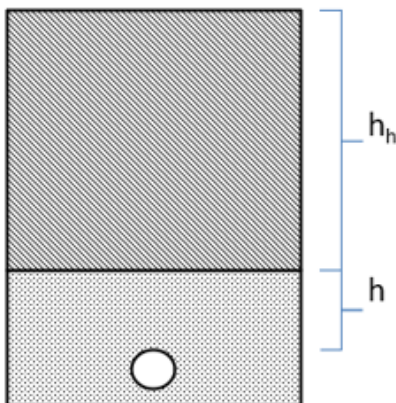
$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_v$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{\text{boven}}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$M_q$ [Nmm]	$\sigma_q$ [N/mm <sup>2</sup> ]
38,80	24,77	0,00	24,77	621,40 <sup>(2)</sup>	<b>2,81</b>

Wanneer  $Q_{n,r}$  circa 1/3<sup>e</sup> lager is dan  $Q_n$  is de spanning dus ook 1/3<sup>e</sup> lager.

Het kan dus de moeite waard zijn om hier mee te gaan rekenen. Kan wel pas vanaf  $8B_1$ , dus vanaf 3,95 m dekking. Opgemerkt moet wel worden dat bij PE SDR 11 zo'n leiding zonder gewelfwerking in het algemeen ook zal voldoen en het niet nodig is zo uitgebreid te gaan rekenen.

## 5. Berekenen van Gereduceerde grondbelasting bij gelaagde grond

In een groot deel van Nederland hebben we te maken met de combinatie holoceen/pleistoceen. Ofwel samendrukbaar grondpakket / niet samendrukbaar grondpakket. Dan is voor het berekenen van de gereduceerde grondbelasting het volgende van toepassing:



$$Q_{n,r} = \frac{B_1 \times \gamma'}{K \times \tan \varphi} \left( 1 - e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1} \right) D_0 + \sigma_c D_0 e^{-K \times h \times \tan \varphi / B_1}$$

$$\sigma_c = \gamma'_h \times h_h$$

Geldig in een gelaagd grondmassief

Geldt als dekking in pleistoceen  $h \geq 8 \times B_1$

Dus als de leiding meer dan  $8B_1$  in het pleistocene zand ligt dan geldt daar (aanzienlijke) reductie van de grondbelasting. Volgens de NPR 3659 mag met een overgangsgebied gerekend worden tussen grensvlak holoceen/pleistoceen tot aan de leiding, maar de maatgevende grondbelasting bevindt zich in het algemeen bij de dekking van  $8B_1$ . De tabel van  $8B_1$  die opgenomen is in deze memo kan als indicatie gebruikt worden voor het bepalen van deze locatie.

Uitgangspunten volgens de NPR 3659:

- de leiding ligt dieper dan  $8B_1$  in het zand;
- in het zand is geen cohesie aanwezig;
- de gewelfwerking in het 10 m tot 20 m diepe Holoceen wordt verwaarloosd ten opzichte van die in het Pleistoceen in verband met de hogere wrijving en stijfheid in laatstgenoemde pakket;
- de zetting  $z = 0$  ter plaatse van het contactvlak tussen het Holocene en het Pleistocene pakket.

Rekenvoorbeeld: dekking in Pleistoceen = 10 m. Dekking in Holoceen = 15 m.

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Wrijvingshoek grond [°]
25,00	1,00	Zand	17,00	17,85	30,00

Berekening neutrale grondbelasting

Formules:

$$\begin{aligned}
 q_{\text{droog}} &= \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d \\
 q_{\text{nat}} &= \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w \\
 q_n &= \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w \\
 Q_n &= q_n \cdot D_o = (1,1 \cdot \gamma_d \cdot H_d + 1,1 \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w) \cdot 400
 \end{aligned}$$

Berekeningsresultaten:

$$\begin{aligned}
 q_n &= \gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w \\
 q_n &= 1,1 \cdot 17 \cdot 1 + 1,1 \cdot 17,85 \cdot 24 - 10 \cdot 24 = 249,94 \text{ kN/m}^2 \\
 Q_n &= q_n \cdot D_o \\
 Q_n &= 249,94 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 99,98 \text{ N/mm}^1
 \end{aligned}$$

Berekening gereduceerde grondbelasting

Formules:

$$\begin{aligned}
 \gamma' &= \frac{\gamma \cdot \gamma_d \cdot H_d + \gamma \cdot \gamma_n \cdot H_n - \gamma_w \cdot H_w}{h} \\
 \gamma'_p &= \gamma \cdot \gamma_{n,p} - \gamma_w \\
 \gamma'_h &= \frac{\gamma' \cdot h - \gamma'_p \cdot h_p}{h_h} \\
 R &= \frac{D_{g,i}}{2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ mm} \\
 B_1 &= 1/2 \cdot D_o + D_o \cdot \tan(45^\circ - 1/2 \cdot \varphi) \geq R \\
 K &= 1 - \sin(\varphi) \\
 \sigma_c &= \gamma'_h \cdot h_h \\
 q_{n,r3} &= \frac{B_1 \cdot \gamma'_p}{K \cdot \tan(\varphi)} \cdot (1 - e^{-\frac{K \cdot h_p \cdot \tan \varphi}{B_1}}) + \sigma_c \cdot e^{-\frac{K \cdot h_p \cdot \tan \varphi}{B_1}} \\
 Q_{n,r} &= q_{n,r} \cdot D_o = q_{n,r} \cdot 400
 \end{aligned}$$

Berekeningsresultaten:

h [m]	GWS [m]	h <sub>h</sub> [m]	h <sub>p</sub> [m]	γ' [kN/m <sup>3</sup> ]	γ' <sub>h</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	γ' <sub>p</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]
25,00	1,00	15,00	10,00	10,00	8,66	12,00

B <sub>1</sub> [m]	8·B <sub>1</sub> [m]	q <sub>n,r</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>n,r</sub> [N/mm <sup>1</sup> ]
0,43	3,45	18,05 <sup>(1)</sup>	7,22

Overzicht berekende gereduceerde neutrale gronddruk

$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$q_{n,r}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]
249,94	99,98	18,05	7,22

We zien dus een aanzienlijke reductie van  $q_{n,r}$  en  $Q_{n,r}$

Optredende momenten en spanningen

Formules:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80 \quad (1)$$

$$M_q = K_b \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_{n,r} + Q_v) \cdot 181,80 \quad (2)$$

$$\sigma_q = f_{rr} \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{220,83}$$

Berekeningsresultaten:

$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{n,r}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_v$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$Q_{boven}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$M_q$ [Nmm]	$\sigma_q$ [N/mm <sup>2</sup> ]
99,98	7,22	0,00	7,22	181,16 <sup>(2)</sup>	<b>0,82</b>

Conclusie: de dekking van de leiding bedraagt 25 m waarvan 10 m in het Pleistoceen. De spanning is verwaarloosbaar.

De maatgevende doorsnede van deze boring bevindt zich op de locatie 8B<sub>1</sub>. Daar heeft de leiding een dekking van 3,45 m. Samen met de 15 m dekking in het Holoceen bedraagt de dekking 18,45. Berekenen we daar de spanning in de buis dan zien we:

Gewicht boven grondwaterstand = 17 kN/m<sup>3</sup> (1 m)

Gewicht klei/veen in Holoceen = 17 kN/m<sup>3</sup> (14 m)

Gewicht in Pleistoceen = 20 kN/m<sup>3</sup> (3,45 m)

Dus gewicht in gedeelte onder de grondwaterstand bedraagt  $(17 \times 14 + 20 \times 3,45) / 17,45 = 17,6 \text{ kN/m}^3$ .

Wanneer we dit gewicht invoeren krijgen we:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	Volumiek gewicht droge grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Volumiek gewicht natte grond [kN/m <sup>3</sup> ]	Wrijvingshoek grond [°]
18,45	1,00	Zand	17,00	17,60	27,50

Neutrale grondbelasting:

Dekking t.o.v. maaiveld [m]	G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	Grondsoort	$q_{droog}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{nat}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_n$ [N/mm <sup>1</sup> ]
18,45	1,00	Zand	18,70	163,33	182,03	72,81

## Optredende momenten en spanningen

Formules:

$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,138 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80$$

$$\sigma_q = f_r \cdot \frac{M_q}{W_w} = 1,00 \cdot \frac{M_q}{220,83}$$

Berekeningsresultaten:


$Q_{\text{boven}}$ [N/mm <sup>1</sup> ]	$M_q$ [Nmm]	$\sigma_q$ [N/mm <sup>2</sup> ]
72,81	1.826,76 <sup>(1)</sup>	<b>8,27</b>

Conclusie: Spanning is veel hoger dan op het diepste deel van de boring. De locatie van  $8B_1$  is maatgevend.

Wanneer sprake is van een bundelboring dan wordt de momentcoëfficiënt  $k_b$  veel hoger dan bij een enkele buis.

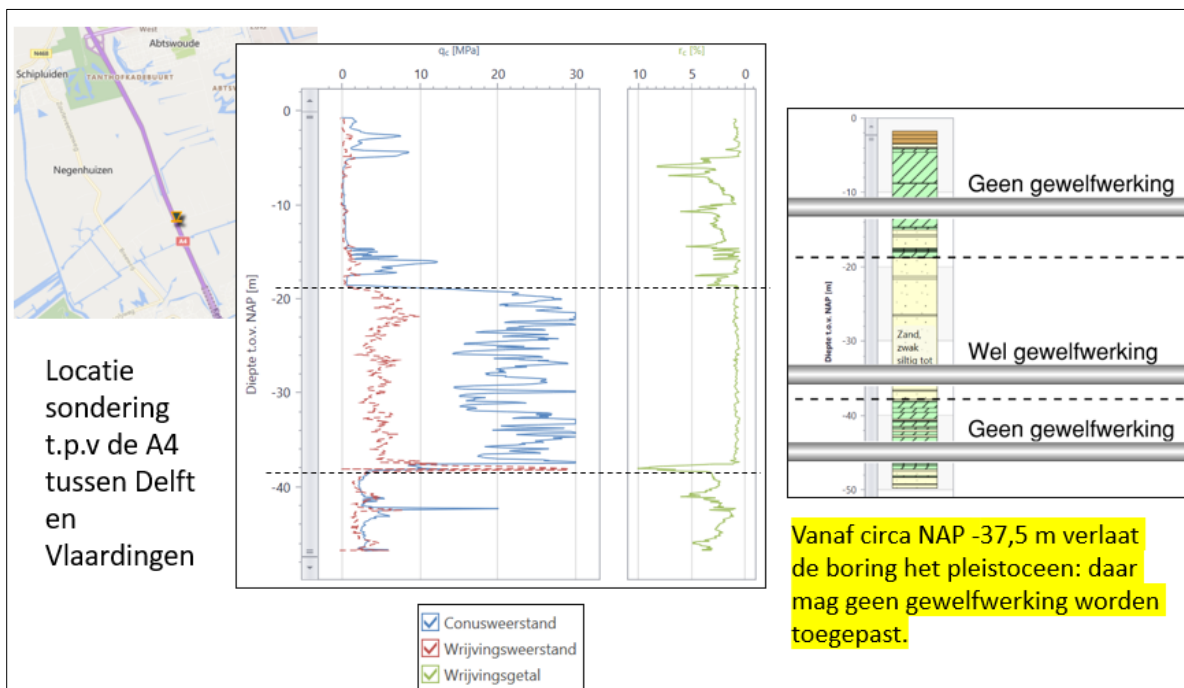
$$M_q = K_b \cdot (Q_n + Q_v) \cdot r_g = 0,257 \cdot (Q_n + Q_v) \cdot 181,80$$

De spanning wordt dan dus een factor  $(0,257/0,138)$  hoger en wordt dan  $15,41 \text{ N/mm}^2$ .

 Dus bij bundels moet zeker op deze overgang gecontroleerd worden.

## Berekening van gewelfwerking bij wanneer niet aan de randvoorwaarden wordt voldaan

Bij het opzetten van de berekeningswijze van de gewelfwerking is uitgegaan van het Holoceen en het Pleistoceen. Wanneer de leiding lokaal lager geboord wordt dan het pleistoceen dan moet voor dat gedeelte een aanvullende berekening gemaakt worden.



Voorbeeld van een situatie waar niet met volledige gewelfwerking gerekend mag worden



Stel dat sprake is van 5 m klei onder het pleistoceen met een gewicht van  $18 \text{ kN/m}^3$ . Dan is de toename gelijk aan  $(1,1 \times 18 \times 5 - 10 \times 5) = 49 \text{ kN/m}^2$

De gereduceerde grondbelasting  $q_{n,r}$  in het voorbeeld van de boring in het pleistoceen bedroeg  $18,05 \text{ kN/m}^2$ .

Daar komt dus nog  $49 \text{ kN/m}^2$  bij, ofwel samen  $67,05 \text{ kN/m}^2$ . Dat is dus duidelijk minder dan de berekening van de grondbelasting bij de dekking van  $8B_1$  (want die  $q_n$  bedroeg  $182,03 \text{ kN/m}^2$ ).

## 6. Resumé

Het rekenen met gewelfwerking scheelt aanzienlijk qua grondbelasting op de leiding(en). Dat mag echter pas vanaf  $8B_1$ . Dus niet vanaf maaiveldniveau.

In deze memo hebben we het verschil laten zien en is een tabel samengesteld op basis van grondsoorten.

Overzicht $8B_1$ volgens NEN 3650:2020   Adviesbureau Schrijvers b.v.   22-5-2024								
Berekening van 8 x de halve breedte van de afschuivende grondkolom ( $B_1$ ) volgens de NPR 3659:1996 (hoofdstuk 5.2.2.) op basis van inwendige wrijvingshoek.								
Uitwendige middellijn	Slappe klei/veen		Stijve klei		Normaal zand		Hard zand	
	15°	17,5°	22,5°	27,5°	30°	32,5°	35°	40°
leiding [mm]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]	$8B_1$ [m]
100,00	1,01	0,99	0,93	0,89	0,86	0,84	0,82	0,77
200,00	2,03	1,97	1,87	1,77	1,72	1,68	1,63	1,55
300,00	3,04	2,96	2,80	2,66	2,59	2,52	2,45	2,32
400,00	4,06	3,95	3,74	3,54	3,45	3,36	3,27	3,09
500,00	5,07	4,93	4,67	4,43	4,31	4,19	4,08	3,87
600,00	6,08	5,92	5,61	5,31	5,17	5,03	4,90	4,64
700,00	7,10	6,91	6,54	6,20	6,03	5,87	5,72	5,41
800,00	8,11	7,89	7,48	7,08	6,90	6,71	6,53	6,18
900,00	9,12	8,88	8,41	7,97	7,76	7,55	7,35	6,96
1000,00	10,14	9,87	9,35	8,85	8,62	8,39	8,16	7,73
1100,00	11,15	10,85	10,28	9,74	9,48	9,23	8,98	8,50
1200,00	12,17	11,84	11,21	10,63	10,34	10,07	9,80	9,28
1300,00	13,18	12,83	12,15	11,51	11,20	10,91	10,61	10,05
1400,00	14,19	13,81	13,08	12,40	12,07	11,74	11,43	10,82

Deze tabel kan ook als handvat gebruikt worden bij het bepalen van het noodzakelijke grondonderzoek. De diepte van het grondonderzoek moet tot minimaal 5 m onder de boring worden uitgevoerd. Dus bij de locaties  $8B_1$  moet dus 5 m worden opgeteld om de vereiste sondeerdiepte daar ter plekke te bepalen.