

Aanleg warmteleiding Rijswijk- Leiden

Controle opdrijven en opbarsten bij slootkruisingen, FLIP



Aanleg warmteleiding Rijswijk- Leiden

Controle opdrijven en opbarsten bij slootkruisingen, FLIP

Auteur(s)

Piet Meijers

Yaser Jafarian

Aanleg warmteleiding Rijswijk- Leiden

Controle opdrijven en opbarsten bij slootkruisingen

Opdrachtgever	N.V. Nederlandse Gasunie
Contactpersoon	De heer K. Hoiting, De heer S. Stratingh
Referenties	
Trefwoorden	Ploegen, warmte leiding, grondwater, opdrijven, opbarsten, slootkruising

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-5-2024
Projectnummer	11209042-000
Document ID	11209042-000-GEO-0003
Pagina's	26
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Piet Meijers	Henk Kruse
	Yaser Jafarian	

Samenvatting

Door WarmtelinQ wordt tussen Rijswijk en Leiden een warmtenet aangelegd. De warmteleidingen (aanvoer en retour) liggen op korte afstand van elkaar. Het is de bedoeling om de leidingen over een deel van het tracé aan te leggen middels de ploeg-techniek.

Een potentieel risico is het opdrijven van de leidingen en het opbarsten van de bovenste grondlaag, de zogenaamde deklaag. Voor de situatie zonder sloten zijn de resultaten van de berekeningen gerapporteerd in ons rapport 11207943-019-GEO-006 (maart 2023). De leidingen kruisen vele sloten, waar plaatselijk minder gronddekking aanwezig is. In dit rapport wordt uiteen gezet hoe de sloten effect hebben op de mechanismen opdrijven en opbarsten. Er zijn 5 geselecteerde locaties met sloten doorgerekend.

De geselecteerde locaties zijn: VS-03-01 (kaartblad KR83), VS-05-04 (kaartblad K346), VS-07-01 (kaartblad KR49), VS-07-02 (kaartblad KR51) en VS-08-06 (kaartblad KR59).

Bij alle geselecteerde locaties blijkt de weerstand tegen opdrijven in de aanlegfase onvoldoende, zodat aanvullende maatregelen zoals ankers nodig zijn. Voor de bedrijfsfase geldt dit voor 2 van de 5 onderzochte locaties.

Om met voldoende veiligheid opbarsten te voorkomen is bij 4 van de 5 onderzochte locaties bemaling nodig. Dit geldt zowel voor de bedrijfsfase als voor de aanlegfase. Niet onderzocht is wat zonder de aanwezigheid van de leidingen de veiligheid tegen opbarsten is.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Mechanismen	7
3	Uitgangspunten en gegevens	9
3.1	Project gegevens	9
3.2	Locatie	9
3.3	Geselecteerde doorsneden	9
3.4	Verloop stijghoogte in deklaag	10
3.5	Grondgegevens	11
3.6	Afmetingen leidingen	12
3.7	Afmetingen sloten	13
3.8	Gebruikte partiële factoren	13
4	FEM berekeningen	14
4.1	Algemeen	14
4.2	Modellering opdrijven bij sloten	15
4.2.1	Opzet berekening	15
4.2.2	PLAXIS berekening	16
4.3	Modellering opbarsten	16
4.3.1	Opzet berekening	16
4.3.2	PLAXIS berekening	17
5	Resultaten berekeningen	18
5.1	Opdrijven	18
5.1.1	Aanlegfase	18
5.1.2	Bedrijfsfase	19
5.2	Opbarsten	19
6	Conclusies	21
	Referenties	22
A	Bepaling verloop stijghoogte in ondergrond	23
B	Bepaling grootte verticale kracht voor grens stabiliteit, oprijfberekening	24
C	Bepaling grenswaarde stijghoogte, opbarstberekening	25

1 Inleiding

Door WarmtelinQ wordt tussen Rijswijk en Leiden een warmtenet aangelegd. De warmteleidingen (aanvoer en retour) liggen op korte afstand van elkaar. Het is de bedoeling om de leidingen over een deel van het tracé aan te leggen middels de ploeg-techniek.

Een potentieel risico is het opdrijven van de leidingen en het opbarsten van de bovenste grondlaag, de zogenaamde deklaag. Op basis van vereenvoudigde berekeningen kan niet overal aangetoond worden dat opdrijven en opbarsten niet zullen optreden. Daarom is besloten om voor een aantal geselecteerde doorsneden die representatief zijn voor een tracé deel een geavanceerde berekening te maken. Voor de situatie zonder sloten zijn de resultaten van de berekeningen gerapporteerd in ons rapport 11207943-019-GEO-006 (maart 2023).

De leidingen kruisen vele sloten, waar plaatselijk minder gronddekking aanwezig is. In dit rapport wordt een model beschreven waarmee het effect van sloten effect op de mechanismen opdrijven en opbarsten kan worden bepaald. Met dit model zijn vervolgens 5 geselecteerde locaties met sloten doorgerekend.

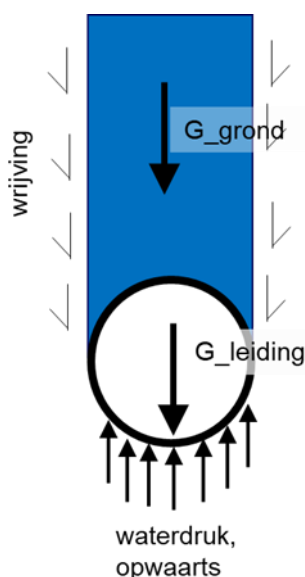
2 Mechanismen

Bij de berekeningen worden twee mechanismen beschouwd: opdrijven en opbarsten. Onder 'opdrijven' wordt verstaan het opdrijven van de leidingen in het holocene slappe grondlagen pakket. Onder 'opbarsten' wordt verstaan dat de deklaag op een watervoerende laag in zijn geheel niet stabiel is.

Onder opdrijven wordt hier verstaan dat de leiding omhoog wil drijven. Bij een ligging onder het grondwater zorgt het opdrijvend vermogen voor een gewichtsreductie van de leiding. Bij een gewicht dat lager is dan dat van water zal de leiding een opwaartse kracht uitoefenen. Bij onvoldoende weerstand zal de leiding dan willen opdrijven. Een lege leiding zoals bij aanleg heeft een laag gewicht. Mogelijk is ook tijdens onderhoudsperioden of calamiteiten de leiding over een gedeelte leeg.

Bij de aanleg van de leidingen door inploegen wordt weliswaar geen grond verwijderd maar wordt grond weggedrukt en wordt een geïsoleerde leiding aangelegd. Het gewicht van de leiding, zeker als deze leeg is, is relatief gering. Hierdoor neemt het risico op opbarsten toe.

Opdrijven moet worden tegengegaan door het gewicht van de grond boven de leiding (Figuur 2-1).

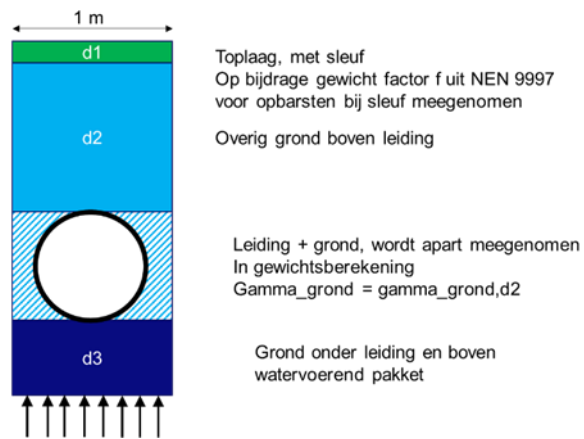


Figuur 2-1 Mechanisme opdrijven

Voor dit mechanisme speelt de waterdruk in het diepe zand alleen indirect een rol middels een verhoogde stijghoogte en stijghoogteverloop in de deklaag. Dit wordt verder besproken in paragraaf 3.2.

Bij opbarsten gaat het niet om het omhoog bewegen van de leiding in de grond, maar om het in zijn totaal omhoog bewegen van de bovenste ondoorlatende grondlaag, de zogenaamde deklaag. Opbarsten ontstaat als de waterdruk vanuit een watervoerende laag tegen de onderkant van de deklaag groter is dan het gewicht van de deklaag. Dit opbarsten kan dus ook zonder de aanwezigheid van de leiding optreden. Als door de aanleg van leidingen

plaatselijk het gewicht afneemt (bij lege leidingen) neemt de kans op opbarsten toe (Figuur 2-2).



Figuur 2-2 Mechanisme opbarsten

3 Uitgangspunten en gegevens

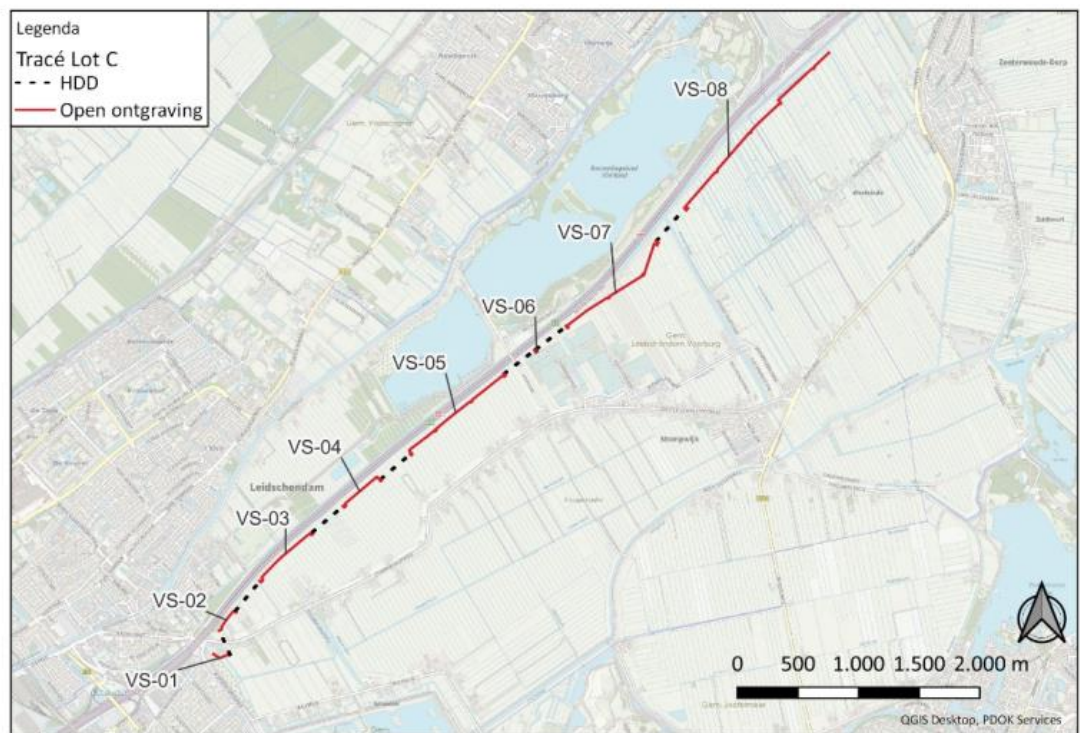
3.1 Project gegevens

Door Antea is het rapport 'Inploegrapport, Opdrijf en opbarstrisico bij inploegen in verschillende scenario's project Lot C Rijswijk Leiden 0470288.100 concept revisie 0D 14 maart [1] gemaakt. Door Antea zijn tevens een lengte profiel [2] en de afmetingen van de te kruisen sloten [3] ter beschikking gesteld .

De aanleg van de leidingen gebeurt middels ploegen. Voor een beschrijving van deze techniek wordt verwezen naar ons eerdere rapport [4].

3.2 Locatie

Het betreft de WarmtelinQ leidingen tussen Rijswijk en Leiden. De leidingen komen hier min of meer parallel aan de A4 te liggen. De ondergrond bestaat hier grotendeels uit slappe grondlagen. Het zuidelijke deel is een ontveende polder met een maaiveld op ongeveer NAP – 4 m. In het diepe zand is er sprake van wateroverspanning zodat hier opbarsten een mogelijk risico is. Het noordelijke deel is een niet ontveende polder. Hier komt de leiding grotendeels in een veenlaag te liggen.



Figuur 3-1 Ligging leiding tracé lot C met codering grondprofielen volgens rapport Antea

3.3 Geselecteerde doorsneden

Voor de analyse zijn 5 locaties geselecteerd. Tabel 3-1 geeft de locaties en de belangrijkste kenmerken.

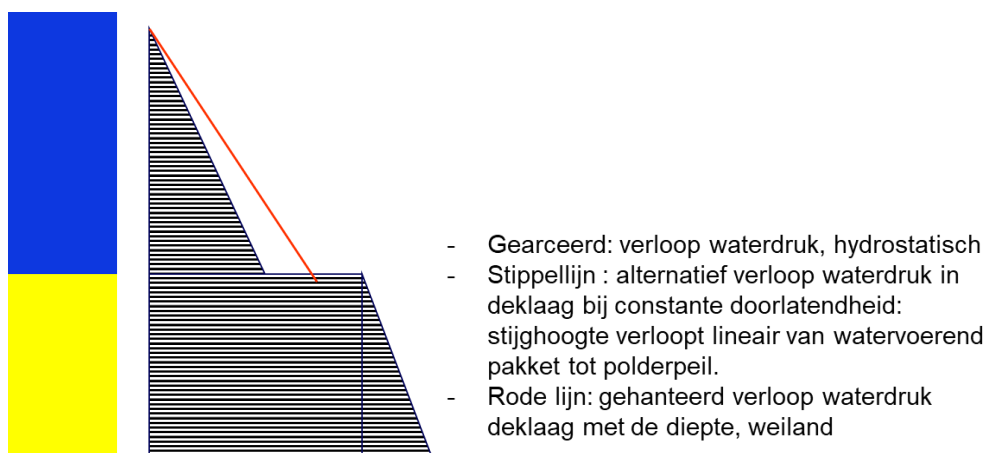
Tabel 3-1 Geselecteerde locaties voor berekeningen

Locatie	Kaart	omschrijving	Maaiveld [m + NAP]	Freatisch niveau [m + NAP]	Stijghoogte zand [m + NAP]	Stijghoogte tussenzandlaag [m + NAP]
VS-03-01	KR83	Toplaag klei	-4,4	-4,5	-3,0	--
VS-05-04	K346	Toplaag veen, tussenzandlaag	-4,4	-4,5	-2,6	-3,9
VS-07-01	KR49	Humeuze klei	-4,2	-4,3	-2,5	--
VS-07-02	KR51	Veen op humeuze klei	-4,5	-4,6	-2,3	--
VS-08-06	KR59	Toplaag veen, tussenzandlaag	-2,0	-2,1	-1,9	-1,9

3.4 Verloop stijghoogte in deklaag

Voor het berekenen of opdrijven van de leiding kan optreden is het verloop van de stijghoogte in de deklaag van belang. Het is nodig om te weten wat de stijghoogte c.q. de waterdruk tegen de onderkant en de bovenkant van de leiding is.

Dit verloop is meestal niet goed bekend, omdat meting van de stijghoogte in de cohesieve slecht doorlatende lagen met peilbuizen onzeker is en er vaak op een diepte in de deklaag en de onderliggende zandlaag wordt gemeten. Meting van de stijghoogte in peilbuizen is onzeker, omdat de toestroom van water naar de peilbuizen langzaam gaat en de peilbuizen dus sterk vertraagd op veranderingen reageren. Mogelijk reageren ze mede op instroom en verdamping via de bovenzijde.



Figuur 3-2 Scenario's verloop stijghoogte deklaag met de diepte

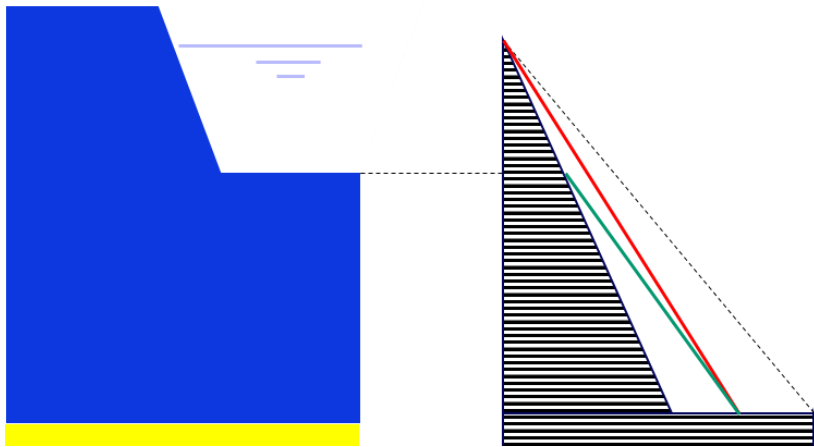
In figuur 3.3 is een sprongsgewijze schematisering van de waterdruk in de deklaag en onderliggende zandlaag weergegeven. Dit verloop zal alleen optreden als het onderste deel van de deklaag (ca 10 cm) een veel lagere doorlatendheid heeft dan het bovenliggende deel van de deklaag.

Een lineair verloop van de bovenzijde van de zandlaag naar het freatisch niveau is eveneens niet aannemelijk, omdat in dat geval de doorlatendheid van de toplaag overal hetzelfde zou moeten zijn. Vaak is de doorlatendheid van de diepere grond lagen lager door de hogere korrelspanning. Er ontstaat dan een verloop met een gebogen lijn, die goed met een rechte

lijn kan worden geschematiseerd (rode lijn in Figuur 3-1). In dit rapport is aangenomen dat de rode lijn zich op de helft van de sprong in waterdruk bevindt tussen de deklaag en de onderliggende zandlaag.

De ligging van de freatische grondwaterstand en de stijghoogte in de zandlagen zijn overgenomen uit de rapportage van Antea [1]. In de berekeningen zijn de GHG waarden gebruikt.

Voor de situatie ter plaatse van de sloot wordt het verloop van de waterdruk in de grond iets aangepast. In het slootwater zelf zal sprake zijn van een hydrostatische waterdruk. Dat betekent dat op de slootbodem de stijghoogte gelijk is aan het slootpeil. Op de grens van de deklaag met het (diepe) zand wordt dezelfde aanname gebruikt als hiervoor beschreven (helft van de sprong ter plaatse van de bovenzijde van de zandlaag). Netto betekent dit dat de stijghoogte vanaf de bodem iets sneller met de diepte toeneemt als in het naastgelegen deel zonde de aanwezigheid van een sloot. Het verschil is echter beperkt.



Figuur 3-3 Verloop waterdruk in de deklaag ter plaatse van een sloot (groene lijn), ter vergelijking zijn ook de andere schematisaties opgenomen (zie voor legenda Figuur 3-2)

3.5 Grondgegevens

De volumegewichten van de verschillende grondlagen zijn overgenomen uit de rapportage van Antea [1]. De sterkte- stijfheidsparameters zijn gebaseerd op tabel 2.b van NEN 9997. Tabel 3-2 geeft de resulterende waarden (representatieve waarden) voor de verschillende grondlagen. Het betreft hier alle geïdentificeerde grondlagen die in de beschouwde profielen voorkomen. Zij komen niet allemaal in alle grondprofielen voor.

Tabel 3-2 Gebruikte grondparameters (representatieve waarden)

Identification	γ_{unsat}	γ_{sat}	E'_{ref}	ν (nu)	c'_{ref}	ϕ' (phi)	ψ (psi)	k_n	k_s	R_{inter}
	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ²		kN/m ²	°	°	kN/m ³	kN/m ³	
basisveen	11	11	500	0,35	2,5	15	0	0	0	1
zand_grof	17	19	4,50E+04	0,35	0,1	32,5	0	0	0	0,5
klei, humeus	12,5	12,5	500	0,35	0,1	15	0	0	0	0,5
interface-sleuf	12	12	1,00E+04	0,2	1	1	0	1,00E+05	1	1
interface-sleuf-very stiff	12	12	1,00E+04	0,2	1000	1	0	1,00E+05	1,00E+05	1
klei	14,5	14,5	1000	0,35	0,1	17,5	0	0	0	0,5
veen	10	10	200	0,35	0,1	15	0	0	0	0,5
zand, sterk siltig (ztd)	14,5	16,5	1,50E+04	0,3	0,1	30	0	0	0	0,5
klei, gerijpt en veen, veraard	13	13	500	0,35	0,1	15	0	0	0	0,5
zand, kleilaagjes (gefundeerde zandtussenlaag)	14,5	16,5	1,50E+04	0,3	0,1	30	0	0	0	0,5
klei, gerijpt	15	15	1000	0,35	0,1	17,5	0	0	0	0,5
zand, siltig (ztl)	14,5	16,5	1,50E+04	0,3	0,1	30	0	0	0	0,5
klei, sterk zandig (ztl)	16,5	16,5	1500	0,35	0,1	22,5	0	0	0	0,5
zand, find, matig siltig (ztl)	14,5	16,5	1,50E+04	0,3	0,1	30	0	0	0	0,5
klei, zwak zandig	14,5	14,5	1500	0,35	0,1	22,5	0	0	0	0,5
zand, kleilenzen (gefundeerde zandtussenlaag)	14,5	16,5	1,50E+04	0,3	0,1	30	0	0	0	0,5
zand, kleilig	14	16	1,50E+04	0,3	0,1	25	0	0	0	0,5
veen veraard	12	12	500	0,35	0,1	15	0	0	0	0,5
veen kleilig	11,5	11,5	500	0,35	0,1	15	0	0	0	0,5

3.6 Afmetingen leidingen

Voor de berekeningen worden de volgende afmetingen gehanteerd:

- Dubbelwandige leidingen, bestaande uit
 - Stalen binnenbuis, buitendiameter 508 mm, wanddikte 6,3 mm
 - PE buitenbuis, buitendiameter 710 mm, wanddikte 7,2 mm
 - Ruimte tussen binnen- en buitenbuis gevuld met PUR
- Twee leidingen (aanvoer en retour), tussenafstand (dagmaat) 2 m.

Het gewicht van de lege leiding is 1,02 kN/m. Indien de leiding is gevuld met water is het extra gewicht 1,89 kN/m.

3.7 Afmetingen sloten

De afmetingen van de sloten ter plaatsen van de kruisingen zijn door Antea verstrekt [3]. Tabel 3-3 vat de belangrijkste geometrische parameters samen.

Tabel 3-3 Afmetingen sloten

Locatie	Kaart	Diepte [m]	Bodembreedte [m]	Breedte op maaiveld [m]	gemiddelde breedte [m]t	Talud sloot 1:n
VS-03-01	KR83	1,2	0,5	5,6	3,05	2,1
VS-05-04	K346	1,3	0,5	5,8	3,15	2,0
VS-07-01	KR49	1,2	0,5	6,5	3,5	2,5
VS-07-02	KR51	1,1	0,75	6,2	3,48	2,5
VS-08-06	KR59	0,8	1,0	9,5	5,25	5,3

3.8 Gebruikte partiële factoren

Voor de berekeningen zijn de rekenwaarden bepaald door toepassing van de van toepassing zijn de partiële factoren NEN 9997 en een factor 2 voor lange termijn reductie van stijfheid en sterkte. De gebruikte waarden zijn:

- volumiek gewicht: 1,1
- stijfheid: 2,5
- cohesie: 2,8
- $\tan(\phi)$: 2,2

Tijdens het uitvoeren van de berekeningen bleek dat in een aantal gevallen het toepassen van een partiële factor van 1,1 op het volumegewicht resulteerde in een situatie dat al zonder leiding er sprake was van opbarsten. In die gevallen is de berekening verder uitgevoerd met een partiële factor van 1,0 op het volumegewicht.

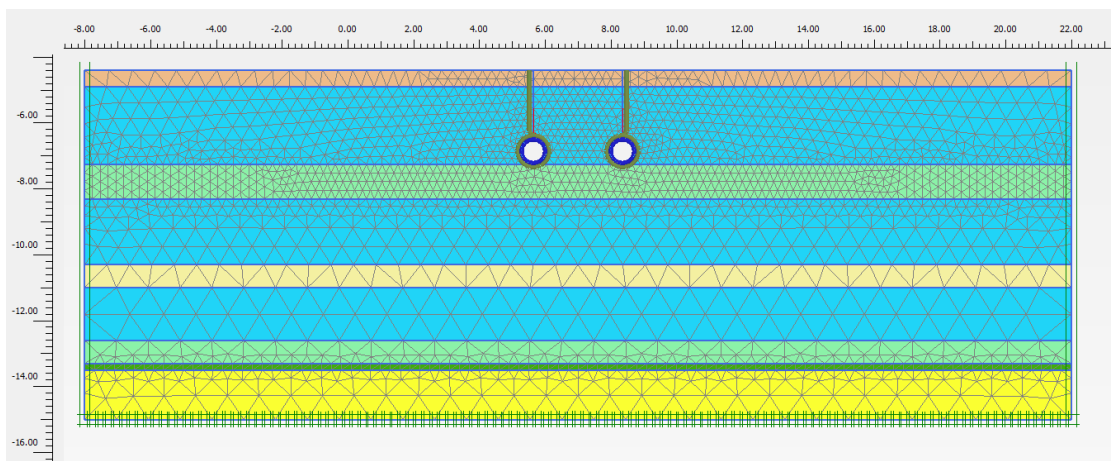
Indien er noodgedwongen wordt uitgegaan van een partiële factor van 1,0 op het volume gewicht wordt uitgegaan van een veiligheid tegen opdrijven van 1,1 voor de situatie met de sloten.

4 FEM berekeningen

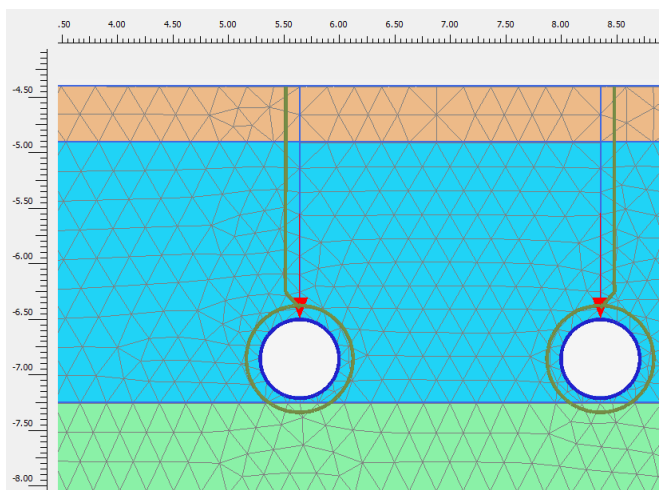
4.1 Algemeen

De berekeningen zijn uitgevoerd met het pakket PLAXIS2D, versie 22.02.00.1078. In de berekening is uitgegaan van de situatie na aanleg en van een initieel lege leiding.

In de berekeningen is de ploegvoor meegenomen als een plaatselijke verzwakking van de grond. Dit is gedaan middels een interface waarvan de sterkte en stijfheid kan worden aangepast. Voor de berekening is uitgegaan van een interface met een hoge normaalstijfheid, een lage schuifstijfheid en een lage schuifsterkte. Voor de hoge normaalstijfheid is gekozen om te voorkomen dat de grond in de richting loodrecht op de ploegvoor (de horizontale richting) zicht te slap gedraagt.



Figuur 4-1 Voorbeeld elementennet in PLAXIS, profiel VS03-01_2.8



Figuur 4-2 Detail rond leiding en bij ploegvoor

De leiding is gemodelleerd middels gebruik van plaat-elementen. Rond de leiding is een interface aanwezig voor de interactie tussen de leiding en de omliggende grond. Voor de interface is gerekend met een factor $R_{inter} = 0,5$ op de eigenschappen van de omliggende grond.

4.2 Modelling oprijven bij sloten

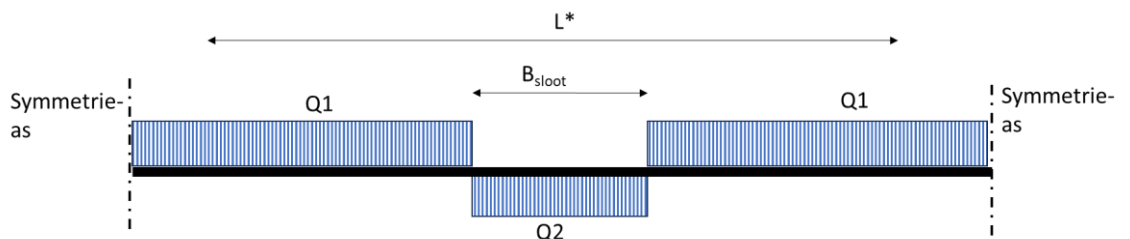
4.2.1 Opzet berekening

Voor het bepalen van de veiligheid tegen oprijven is in de berekeningen per leiding een fictieve verticale kracht aangebracht. Het resultaat van de berekeningen is de grootte van de verticale kracht waarbij de leiding net in evenwicht is. Als hiervoor een neerwaartse kracht nodig is betekent dit dat de leiding niet in evenwicht is (wil oprijven). Als er een opwaartse kracht nodig is betekent dit dat de leiding enige reserve heeft tegen oprijven.

Voor de situatie zonder sloten zijn deze krachten al bepaald en beschreven in ons rapport 11207943-019-GEO-006 (maart 2023). De aanwezigheid van een sloot betekent dat er plaatselijk minder gronddekking aanwezig is.

Voor de modellering van het oprijven bij sloten zijn daarom twee situaties beschouwd: De situatie zonder sloten en de situatie met een oneindig brede sloot. Beide situaties geven een waarde voor de fictieve kracht op de leiding. Door beide resultaten te combineren kan hiermee het evenwicht van de leiding bij een slootkruising worden bepaald dan wel de benodigde extra verticale kracht om oprijven te voorkomen.

De te volgen berekeningsprocedure wordt beschreven aan de hand van Figuur 4-3. Uit de berekening van de situatie zonder sloot volgt een grenswaarde voor de fictieve kracht Q_1 . Deze kracht is geldig voor het gedeelte zonder sloten. Uit de berekening van de situatie met oneindig brede sloot volgt een grenswaarde voor de fictieve kracht Q_2 . Deze kracht is geldig voor het gedeelte ter plaatse van de sloot.



Figuur 4-3 Controle oprijven leiding bij slootkruisingen

Het verticaal evenwicht volgt nu uit:

$$F_{netto} = Q_1 \cdot (L^* - B_{sloot}) + Q_2 \cdot B_{sloot}$$

Hierin is:

- F_{netto} de netto fictieve kracht, indien deze positief is (omhoog werkt) is de leiding stabiel tegen oprijven, in deze kracht negatief is, is dat de extra neerwaartse kracht die door ankers o.i.d. moet worden geleverd
- L^* lengte waarover de sloot invloed heeft
- B_{sloot} gemiddelde breedte sloot

De afstand tussen de sloten is 40 à 60 m. Bij deze afstand kan voor L^* de afstand tussen de sloten worden gekozen. Voor de gemiddelde slootbreedte wordt het gemiddelde van de breedte op maaiveld en de bodembreedte gebruikt.

4.2.2 PLAXIS berekening

In de PLAXIS berekeningen is een fasering aangehouden. Voor de oprijfberekeningen geeft dit de volgende stappen:

1. Initiële situatie, geen leiding, geen overdrukken
2. Aanpassen stijghoogte in de top laag
3. Activeren leiding (leeg)
4. Fase 4 is afhankelijk van resultaat fase 3
 - a. Indien bij fase 3 de leiding stabiel is: Opleggen van verticale opwaartse belasting tot moment bezwijken
 - b. Indien bij fase 3 de leiding al instabiel is:
 - i. fase 3 herhalen met een tegelijk opgelegde verticale belasting neerwaarts,
 - ii. Verticale belasting fase 4b vervolgens laten afnemen tot moment bezwijken

Als in fase 3 de leiding stabiel is, is deze veilig tegen opdrijven. Er is dan echter nog geen inzicht in de aanwezige marge tegen opdrijven. Om dat te bepalen wordt in fase 4 een opwaartse kracht op de leiding aangebracht totdat er sprake is van opdrijven. Deze kracht is een maat voor de aanwezige veiligheid, hoe groter de kracht is die opgelegd kan worden hoe groter de veiligheid tegen opdrijven.

Als in fase 3 de leiding instabiel is, is deze in de huidige configuratie onvoldoende veilig tegen opdrijven. Een maatregel is dan om de leiding zwaarder te maken of anderszins extra verticale belasting te mobiliseren. Om na te gaan welke extra verticale belasting nodig is, wordt een neerwaartse verticale belasting opgelegd. Uit praktische overwegingen wordt in eerste instantie een te hoge belasting opgelegd (fase 4b) die vervolgens afneemt (fase 4c). Uit de berekening volgt dan op welk moment (bij welke verticale kracht) er sprake is van instabiliteit.

4.3 Modelleren opbarsten

4.3.1 Opzet berekening

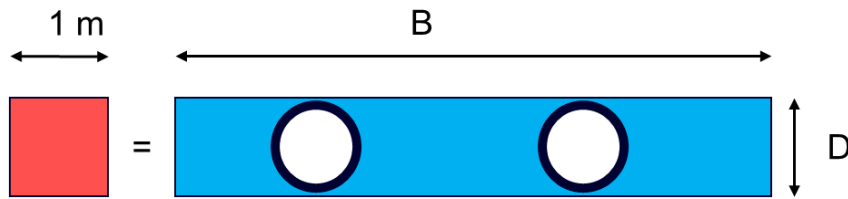
Het resultaat van de berekening voor het mechanisme opbarsten is het bepalen van de stijghoogte in het zand (diepe zand en, indien aanwezig, de tussenzandlaag) waarbij er niet sprake is van opbarsten. Voor dit mechanisme kan niet, zoals bij de controle op opdrijven, de situatie worden gesplitst in een deel ter plaatse van het weiland en een deel ter plaatse van de sloot, omdat onder beide delen dezelfde stijghoogte aanwezig is.

Er wordt berekening in de langsrichting uitgevoerd. De leiding wordt daarbij gemodelleerd als een laag met parameters die het gecombineerde effect van de grond en de leiding weergeven op die diepte weergeven. Die gecombineerde parameters zijn het volume gewicht en de stijfheid. Figuur 4-4 geeft het principe weer. Het rode blok aan de linkerzijde is de geschematiseerde laag met de leiding. De eigenschappen van deze laag zijn de gemiddelde eigenschappen van het rechter blauwe blok.

Het volume gewicht van het rode blok is het volume gewicht van het blauwe blok, gedeeld door de breedte B. De stijfheid (E-modulus) van het rode blok volgt uit de buigstijfheid van de twee leidingen volgens:

$$E \cdot (1/12) \cdot B \cdot D^3 = 2 \cdot EI_{leiding}$$

De stijfheid van de grond is klein ten opzichte van de stijfheid van de leiding en wordt daarom verwaarloosd.

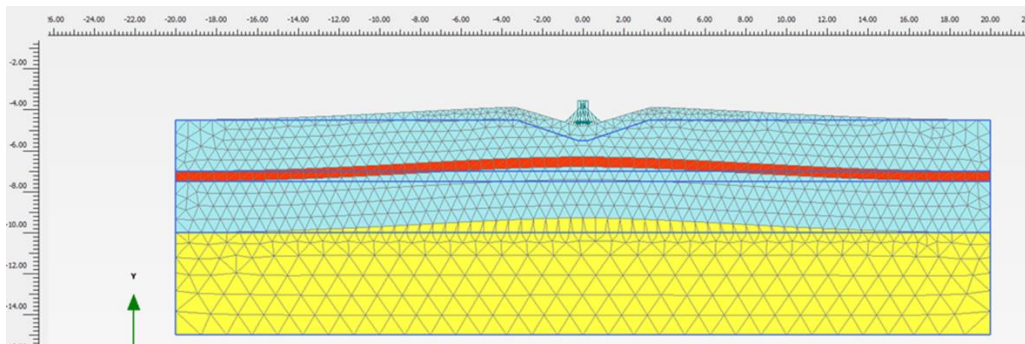


Figuur 4-4 Schematisering grondlaag met leidingen

Voor de breedte B wordt conservatief $B = 4$ m gekozen.

4.3.2 PLAXIS berekening

In Figuur 4-5 is voor een vereenvoudigde geometrie het principe van de PLAXIS berekening weergegeven. De rode laag representeert de grondlaag waarin de leidingen liggen. Gemodelleerd wordt een deel van het midden tussen de sloten tot het volgende midden tussen de sloten. Hierbij wordt dus gebruik gemaakt van de symmetrie in de geometrie.



Figuur 4-5 Principe geometrie in PLAXIS, de rode laag simuleert de leidingen

De randvoorwaarde voor de leiding is dat deze ter plaatse van de symmetrie-assen wel verticaal kan bewegen maar niet kan roteren.

In de PLAXIS berekening is de volgende fasering aangehouden:

1. Initiële situatie, geen leiding, geen overdrukken
2. Aanpassen stijghoogte in de toplaag
3. Activeren leiding (leeg), indien uit de oprijfberekening volgt dat een extra neerwaartse kracht nodig is wordt deze hierin meegenomen
4. Aanpassen stijghoogte in het watervoerend pakket
5. Fase 5 is afhankelijk van resultaat fase 4
 - a. Indien bij fase 4 opbarsten plaatsvindt: aanpassen (verlagen) van de stijghoogte in het watervoerend pakket
 - b. Indien bij fase 4 geen opbarsten plaatsvindt: aanpassen (verhogen) van de stijghoogte in het watervoerend pakket totdat opbarsten plaatsvindt

Het doel van deze berekening is het controleren van het mechanisme opbarsten. Het is niet gewenst dat het mechanisme opdrijven het berekeningsresultaat beïnvloed. Daarom wordt in de berekening al rekening wordt gehouden met de benodigde maatregelen om opdrijven te voorkomen.

5 Resultaten berekeningen

5.1 Opdrijven

5.1.1 Aanlegfase

Tijdens de berekening bleek dat in een aantal situaties de ondergrond bij gebruik van de partiële factoren niet stabiel is. In die gevallen is gekozen voor een berekening waarbij de partiële factor voor het volume gewicht op 1,0 is gesteld.

Een hieruit afgeleide opwaartse kracht kan niet als ontwerpwaarde voor de berekening van bijvoorbeeld ankerkrachten worden gebruikt omdat daarin geen partiële factor voor het volume gewicht van de grond is meegenomen. Daarom wordt voor de relevante locaties een andere benadering voor het bepalen van de opwaartse kracht gevolgd. Uitgangspunt daarbij is dat in de betreffende situaties de netto korrelspanning in de ondergrond nihil is. Daarmee kan de weerstand van de grond tegen opdrijven worden verwaarloosd. De gradiënt van de stijghoogte de ondergrond wordt wel meegenomen. Verder wordt uitgegaan van een veiligheid tegen opdrijven van 1,1. De grootte van Q volgt dan uit het verticaal evenwicht (NB: in de huidige tekenafsprak is een opwaarts gerichte kracht positief)

$$Q + 1,1 \cdot F_{opw} - G_{leiding} = 0$$

Met:

$$F_{opw} = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot dp/dz$$

en

- F_{opw} opwaartse kracht op leiding (kN/m)
- G eigen gewicht leiding (hier $G = 1,02$ kN/m)
- dp/dz gradiënt in waterspanning met de diepte
- D buitendiameter leiding (hier $D = 0,71$ m)

De berekening van Q1 en Q2 is weergegeven in Tabel 5-1. Voor locatie VS-05-04 hoeft alleen voor Q2 deze benadering te worden gevolgd.

Tabel 5-1 Berekening Q1 en Q2 voor situaties waar geen partiele factor op volume gewicht gebruikt kan worden bij een lege leiding

locatie	component	dp/dz [kPa/m]	F_{opw} [kN/m]	Q [kN/m]
VS-05-04	Q2	11.429	4.52	-3.96
VS-07-02	Q1	12.018	4.76	-4.21
	Q2	12.447	4.93	-4.40
VS-08-06	Q1	10.256	4.06	-3.45
	Q2	10.313	4.08	-3.47

De resultaten van de berekening voor opdrijven van de leiding zijn samengevat in Tabel 5-2. De waarden voor Q1 (situatie zonder sloot) zijn overgenomen vanuit onze eerdere berekeningen, beschreven in ons rapport 11207943-019-GEO-006 (maart 2023).

Tabel 5-2 Resultaten berekening opdrijven, aanlegfase

locatie	B _{sloot} [m]	L [m]	Ontwerp benadering 1)	Q2 [kN/m]	Q1 [kN/m]	F _{netto} [kN/sectie]	F _d [kN/m]
VS-03-01	3,05	39	1	-2,90	-1,086	-47,9	-1.23
VS-05-04	3,15	40	1	-3,96	-1,66	-73,3	-1.83
VS-07-01	3,5	39	1	-3,19	-1,07	-49,1	-1.26
VS-07-02	3,48	39	2	-4,01 2)	-3,39	-134,2 2)	-3.44
	3,48	39	1	-4,40 3)	-4,21 3)	-164,9	-4.23
VS-08-06	5,25	38	2	-2,90 2)	-1,45	-62,6 2)	-1.65
	5,25	38	1	-3,47 3)	-3,45 3)	-131,2	-3.45

1): 1: de standaard partiële factoren zijn gebruikt; 2: de partiële factor voor het volume gewicht is op 1,0 gesteld

2): exclusief correctie voor verhoogd volume gewicht toplaag

3): onbepaald in PLAXIS, zie Tabel 5-1 voor de berekening van de vermelde waarde

De getallen in kolom 'F_{netto}' zijn de totale krachten per slootkruising en per leiding. Een negatieve waarde betekent dat er een ankerkracht nodig is, bij een positieve waarde is er geen ankerkracht nodig. In dat geval geeft het genoemde getal de nog beschikbare marge aan. F_d geeft de opwaartse kracht per meter in de betreffende sectie met lengte L.

5.1.2 Bedrijfsfase

In de bedrijfsfase is de leiding gevuld met water. Dit geeft een extra verticale belasting van 1,89 kN/m. Deze belasting kan in mindering worden gebracht op de benodigde ankerkracht. In Tabel 5-3 zijn de resultaten met de aldus gecorrigeerde waarden gegeven.

Tabel 5-3 Resultaten berekening opdrijven, bedrijfsfase

locatie	B _{sloot} [m]	L [m]	Ontwerp benadering 1)	Q2 [kN/m]	Q1 [kN/m]	F _{netto} [kN/sectie]	F _{netto} [kN/m]
VS-03-01	3,05	39	1	-1.01	0.80	25.8	
VS-05-04	3,15	40	1	-2,07	0.23	2,1	
VS-07-01	3,5	39	1	-1.30	0.82	24.6	
VS-07-02	3,48	39	2	-2.13 2)	-1.50	-60.5 2)	
	3,48	39	1	-2,51 3)	-2,32 3)	-91,1	-2.33
VS-08-06	5,25	38	2	-1.01 2)	0.44	9.2 2)	
	5,25	38	1	-1,58 3)	-1,56 3)	-59,4	-1.56

1): 1: de standaard partiële factoren zijn gebruikt; 2: de partiële factor voor het volume gewicht is op 1,0 gesteld

2): exclusief correctie voor verhoogd volume gewicht toplaag

3): onbepaald in PLAXIS, zie Tabel 5-1 voor de berekening van de waarde exclusief gewicht water in leiding

Van de beschouwde locaties is dus alleen bij VS-07-02 en VS-08-06 nog een ankerkracht nodig. F_d geeft de opwaartse kracht per meter in de betreffende sectie met lengte L.

5.2 Opbarsten

Bij een paar berekeningen voor opbarsten bleek dat, bij de gebruikte sterkte parameters, de sloottaluds instabiel werden. Daardoor kon de berekening niet verder worden uitgevoerd.

Voor het doel van de berekeningen is dit een ongewenst bezwijkmechanisme. Daarom zijn, indien nodig, de sterkte parameters voor de toplagen verhoogd om dit mechanisme te voorkomen. De volume massa's zijn niet aangepast. Omdat voor het te beschouwen mechanisme met name de volume massa's van belang zijn wordt dit een acceptabele aanpassing geacht.

Tabel 5-4 Resultaten berekening opbarsten, aanlegfase

locatie	Beschouwde laag	Stijghoogte [m + NAP]	Ontwerp benadering 1)	Grenswaarde stijghoogte [m + NAP]		Voldoet?	Vereiste verlaging [m]
				Zonder Sloot	Inclusief slootkruising		
VS-03-01	Diep zand	-3,0	1	-3.02	-3.37	Nee	0,37
VS-05-04	Diep zand	-2,6	1	-2.41	-3.12	Nee	0,5
	Tussen zandlaag	-3,9	1	-4.15	-4.60	Ja	--
VS-07-01	Diep zand	-2,5	1	-3.05	-3.30	Nee	0,80
VS-07-02	Diep zand	-2,3	1	n.a.	-4.07	Nee	1,77
VS-08-06	Diep zand	-1,9	1	n.a.	-0.20	Ja	--
	Tussen zandlaag	-1,9	1	n.a.	-1.94	Ja	--

1): 1: de standaard partiële factoren zijn gebruikt; 2: de partiële factor voor het volume gewicht is op 1,0 gesteld

Te zien is dat bij een slootkruising de toelaatbare stijghoogte enigszins afneemt. De grootte van de afname verschilt per locatie. De situatie voldoet als de toelaatbare stijghoogte hoger is dan de aanwezige stijghoogte. In de laatste kolom is het resultaat van die toetsing voor de situatie met een slootkruising aangegeven.

Bij de bedrijfsfase is de leiding gevuld. Het extra gewicht is 1,89 kN/m. Volgens de gebruikte methode om de equivalente parameters voor deze laag bij een sloot kruising te bepalen betekent dit een gemiddelde extra verticale belasting van $1.89 \text{ [kN/m]} / 2 \text{ [m]} = 0,95 \text{ kPa}$. Dit kan worden vertaald als een toename van de toelaatbare stijghoogte van 0,095 m. Hiermee kan de vereiste verlaging worden vermindert.

6 Conclusies

Door WarmtelinQ wordt tussen Rijswijk en Leiden een warmtenet aangelegd. De warmteleidingen (aanvoer en retour) liggen op korte afstand van elkaar. Het is de bedoeling om de leidingen over een deel van het tracé aan te leggen middels de ploeg-techniek.

Een potentieel risico is het opdrijven van de leidingen en het opbarsten van de bovenste grondlaag, de zogenaamde deklaag. Voor de situatie zonder sloten zijn de resultaten van de berekeningen gerapporteerd in ons rapport 11207943-019-GEO-006 (maart 2023). De leidingen kruisen vele sloten, waar plaatselijk minder gronddekking aanwezig is. In dit rapport wordt uiteen gezet hoe de sloten effect hebben op de mechanismen opdrijven en opbarsten. Er zijn 5 geselecteerde locaties met sloten doorgerekend.

De geselecteerde locaties zijn: VS-03-01 (kaartblad KR83), VS-05-04 (kaartblad K346), VS-07-01 (kaartblad KR49), VS-07-02 (kaartblad KR51) en VS-08-06 (kaartblad KR59).

Bij alle geselecteerde locaties blijkt de weerstand tegen opdrijven in de aanlegfase onvoldoende, zodat aanvullende maatregelen zoals ankers nodig zijn. Voor de bedrijfsfase geldt dit voor 2 van de 5 onderzochte locaties.

Om met voldoende veiligheid opbarsten te voorkomen is bij 4 van de 5 onderzochte locaties bemaling nodig. Dit geldt zowel voor de bedrijfsfase als voor de aanlegfase. Niet onderzocht is wat zonder de aanwezigheid van de leidingen de veiligheid tegen opbarsten is.

Referenties

[1]. Antea. Inploegrapport, Opdrijf en opbarstrisico bij inploegen in verschillende scenario's project Lot C Rijswijk Leiden 0470288.100 concept revisie 0D 14 maart 2023

[2].Antea. Geotechnisch lengte profiel ter beschikking gesteld Lot C 0470288 Antea, jan. 2023.

[3] Antea. 0486019.100 - Maaiveldhoogtes te ploegen gedeeltes.xlsx. Verstreckt via e-mail 2023-09-12

[4] Deltares. Aanleg van warmteleidingen, Controle opdrijven en opbarsten leidingen. Rapport 11207943-019-GEO-006, maart 2023

A Bepaling verloop stijghoogte in ondergrond

	NAP top of basal sand (m)	NAP top of intermediate sand (m)	NAP surface (m)	NAP phreatic (m)	NAP head of basal sand layer (m)	NAP head intermediate Sand (m)	
	-13.5	-	-4.4	-4.5	-3	-	
Ground model	P sand		105 kPa	depth of basal sand layer (m)	9.1		VS0301
	P phreatic		90 kPa	depth of int. sand layer (m)	-		
	P mean-1		97.5 kPa	y ref	-4.5 m		
	P inc-1		10.833 kPa/m	p ref	0 kPa		
Ditch model	NAP ditch base		-5.6 m				
	P mean 2 (ditch base)		11.46 kPa	y ref	-5.6 m		
	P inc-2		10.891 kPa/m	p ref	-11 kPa		
	P inc-2 - Plaxis		10.949 kPa/m				
	-13.5	-7.8	-4.4	-4.5	-2.6	-3.9	
Ground model	P sand		39 kPa	depth of basal sand layer (m)	9.1		VS0504
	P phreatic		33 kPa	depth of int. sand layer (m)	3.4		
	P mean-1		36 kPa	y ref	-4.5 m		
	P inc-1		10.909 kPa/m	p ref	0 kPa		
Ditch model	NAP ditch base		-5.7 m				
	P mean 2 (ditch base)		12.55 kPa	y ref	-5.7 m		
	P inc-2		11.169 kPa/m	p ref	-12 kPa		
	P inc-2 - Plaxis		11.429 kPa/m				
	-13.2	-	-4.2	-4.3	-2.5	-	
Ground model	P sand		107 kPa	depth of basal sand layer (m)	9		VS0701
	P phreatic		89 kPa	depth of int. sand layer (m)	-		
	P mean-1		98 kPa	y ref	-4.3 m		
	P inc-1		11.011 kPa/m	p ref	0 kPa		
Ditch model	NAP ditch base		-5.4 m				
	P mean 2 (ditch base)		11.56 kPa	y ref	-5.4 m		
	P inc-2		11.083 kPa/m	p ref	-11 kPa		
	P inc-2 - Plaxis		11.154 kPa/m				
	-10.3	-	-4.5	-4.6	-2.3	-	
Ground model	P sand		80 kPa	depth of basal sand layer (m)	5.8		VS0702
	P phreatic		57 kPa	depth of int. sand layer (m)	-		
	P mean-1		68.5 kPa	y ref	-4.6 m		
	P inc-1		12.018 kPa/m	p ref	0 kPa		
Ditch model	NAP ditch base		-5.6 m				
	P mean 2 (ditch base)		11.01 kPa	y ref	-5.6 m		
	P inc-2		12.232 kPa/m	p ref	-10 kPa		
	P inc-2 - Plaxis		12.447 kPa/m				
	-14	-6	-2	-2.1	-1.9	-1.9	
Ground model	P sand		41 kPa	depth of basal sand layer (m)	12		VS0806
	P phreatic		39 kPa	depth of int. sand layer (m)	4		
	P mean-1		40 kPa	y ref	-2.1 m		
	P inc-1		10.256 kPa/m	p ref	0 kPa		
Ditch model	NAP ditch base		-2.8 m				
	P mean 2 (ditch base)		7.09 kPa	y ref	-2.8 m		
	P inc-2		10.284 kPa/m	p ref	-7 kPa		
	P inc-2 - Plaxis		10.313 kPa/m				

B Bepaling grootte verticale kracht voor grens stabiliteit, opdrijfberekening

	Ditch models				Ground models			
VS0301	Design approach 1 (Ditch model)				Design approach 1 (Ground model)			
	phase 3	converged			phase 3	converged		
	Phase 1	SumMstage	0.1719		Phase 1	SumMstage	0.6883	
	Phase 4	F=	-4 kN/m		Phase 4	F=	-5 kN/m	
	Phase 5	F=0	SumMstage	0.2741	Phase 5	F=0	SumMstage	0.7828
	Phase 6	F= Q2 =	-2.9036	kN/m	Phase 6	F= Q1 =	-1.086	kN/m
VS0504	Design approach 1 (Ditch model)				Design approach 2 (Ground model)			
	phase 3	not converged	SumMstage	0.7679	phase 3	converged		
	Design approach 2 (Ditch model)				Phase 1	SumMstage	1	
	phase 3	converged			Phase 4	F=	10 kN/m	
	Phase 1	SumMstage	0.2358		Phase 5	F=0	SumMstage	0.2683
	Phase 4	F=	-5 kN/m		Phase 6	F= Q1 =	2.683	kN/m
	Phase 5	F=0	SumMstage	0.414	Phase 4	F=	5 kN/m	
	Phase 6	F= Q2 =	-2.93	kN/m	Phase 5	F=0	SumMstage	0.4241
	Design approach 1 (Ditch model)				Phase 6	F= Q1 =	2.1205	kN/m
	Design approach 2 (Ditch model)				Design approach 1 (Ground model)			
VS0701	Design approach 1 (Ditch model)				Design approach 1 (Ground model)			
	phase 3	converged			phase 3	converged		
	Phase 1	SumMstage	0.08677		Phase 1	SumMstage	0.6931	
	Phase 4	F=	-3.5 kN/m		Phase 4	F=	-5 kN/m	
	Phase 5	F=0	SumMstage	0.08869	Phase 5	F=0	SumMstage	0.7863
	Phase 6	F= Q2 =	-3.189585	kN/m	Phase 6	F= Q1 =	-1.0685	kN/m
VS0702	Design approach 1 (Ditch model)				Design approach 2 (Ground model)			
	phase 3	not converged	SumMstage	0.1854	phase 3	converged		
	Design approach 2 (Ditch model)				Phase 1	SumMstage	0.09889	
	phase 3	not converged	SumMstage	0.6116	Phase 4	F=	-4.4 kN/m	
	Design approach 2 (Ditch model)			unit weight of Veen	Phase 5	F=0	SumMstage	0.2307
	phase 3	converged		kleiig = 12.5 kN/m3	Phase 6	F= Q1 =	-3.38492	kN/m
	Phase 1	SumMstage	0.035					
	Phase 4	F=	-4.1 kN/m					
	Phase 5	F=0	SumMstage	0.02				
	Phase 6	F= Q2 =	-4.018	kN/m				
VS0806	Design approach 1 (Ditch model)				Design approach 2 (Ground model)			
	phase 3	not converged	SumMstage	0	phase 3	converged		
	Design approach 2 (Ditch model)				Phase 1	SumMstage	0.5918	
	phase 3	not converged	SumMstage	0	Phase 4	F=	-5 kN/m	
	Design approach 2 (Ditch model)			unit weight of Veen =	Phase 5	F=0	SumMstage	0.7105
	phase 3	converged		10.4 kN/m3	Phase 6	F= Q1 =	-1.4475	kN/m
	Phase 1	SumMstage	0.1772					
	Phase 4	F=	-4 kN/m					
	Phase 5	F=0	SumMstage	0.276				
	Phase 6	F= Q2 =	-2.896	kN/m				

C Bepaling grenswaarde stijghoogte, opbarstberekening

Sections	Ditch model										Ground model
	Sand layer	Design approach	Head phreatic (mNAP)	Head sand (mNAP)	Head applied (mNAP)	SumMstage	Design Head (mNAP) from SumMstage	Refined/trial in Plaxis	Comment	Design Head (mNAP)	
VS0301	Basal sand layer	1	-4.50	-3.00	-3.00	0.75	-3.37	-3.37	Due to instability of the ditch's slopes in the Nulstep phase, soil cohesion was increased from 0.1 kPa to 5 kPa for "klei, gerijpt en veen, veraard" and "klei, humeus".	-3.02	
VS0504	Basal sand layer	1	-4.50	-2.60	-2.60	0.55	-3.46	-3.12	1 - Due to instability of the ditch's slopes in the Nulstep phase, soil cohesion was increased from 0.1 kPa to 10 kPa for "klei, gerijpt en veen, veraard" and "klei, humeus"; "klei, gerijpt". 2- Max. unloading steps was changed from 5 to 15 in the Nulstep phase.	-2.41	
	Intermediate sand layer									-4.15	
VS0701	Basal sand layer	1	-4.30	-2.50	-2.50	0.72	-3.01	-3.30	Due to instability of the ditch's slopes in the Nulstep phase, soil cohesion was increased from 0.1 kPa to 5 kPa for "klei, humeus".	-3.05	
VS0702	Basal sand layer	1	-4.60	-2.30	-2.30	0.23	-4.07	-4.07	Due to instability of the ditch's slopes in the Nulstep phase, soil cohesion was increased from 0.1 kPa to 5 kPa for "veen kleilig" and "veen veraard".	N.A.	
VS0806	Basal sand layer	1	-2.10	-1.90	-1.90	1.00	-	-0.20	Due to instability of the ditch's slopes in the Nulstep phase, soil cohesion was increased from 0.1 kPa to 5 kPa for "klei, gerijpt en veen, veraard" and "veen".	N.A.	
	Intermediate sand layer									-1.94	

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl