

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Mobility & Infrastructure

Aan: Waterschap Limburg
Van: Shaniel Chotkan
Datum: 09 april 2024
Kopie: [Click to enter "CopyTo"](#)
Ons kenmerk: 20240705_BJ1000_W3420-3.7_Kasteel microinstabiliteit en verweking_C01
Classificatie: -
Gecontroleerd door: Albert Wiggers

Onderwerp: Kasteel Well – Analyse en ontwerp t.a.v. microinstabiliteit binnentalud en hydraulic heave grachtbodem

1 Inleiding

Deze notitie maakt onderdeel uit van het voorontwerp Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well, en is een bijlage bij het technisch ontwerp waterkering kasteel (VO) [1].

In het ontwerp voor de gebiedsontwikkeling komt kasteel Well buitendijks te liggen. Het Kasteel Well dient beschermd te worden tegen hoogwater. Hiertoe wordt de huidige omwalling versterkt. Als het gebied rondom het kasteel inundeert zal het water in de binnengracht snel volgen. Dit peil wordt echter op NAP +13,50 beheerst door actief te bemalen. In deze situatie zal er een grote hoeveelheid water door de dijk en door de ondergrond toestromen. De resulterende hydraulische gradiënten kunnen mogelijk resulteren in microinstabiliteit of verweking (heave of opbarsten). Beide mechanismen kunnen uiteindelijk tot falen van de dijk leiden.

In deze notitie is voor een maatgevende locatie de toets op heave en verweking van binnentalud en grachtbodem beschreven.

2 Uitgangspunten en schematisering

Voor de uitgangspunten wordt verwezen naar de Technische Uitgangspunten Notitie (TUN) [1]. Ter ondersteuning zijn enkele uitgangspunten herhaald en specifiekere toegevoegd.

- Een ontwerpwaterstand (WBN) van 15,7 m + NAP.
- Een kruinhoogte (HBN) van 16,19 m + NAP.
- Een peil in de binnengracht gelijk aan 13,5 m + NAP.

De analyse is uitgevoerd voor doorsnede 3 aan de noordzijde van de omwalling, zie ontwerprapport kasteel [1]. In deze doorsnede is de omwalling het smalst. Ter hoogte van deze doorsnede worden enkel niet cohesieve grondsoorten aangetroffen [3]. Hiermee kan het mechanisme opbarsten worden uitgesloten waarmee enkel op heave getoetst dient te worden. Vanwege de lokale geometrie (zie Bijlage 1), is in PLAXFLOW een axisymmetrisch model gehanteerd. Het middelpunt van de Kasteel is daarbij als as van symmetrie gemodelleerd. Door deze as kan geen stroming plaatsvinden (m.b.v. een Closed Boundary). Onderstaand zijn de doorlatendheden van de grondsoorten gegeven. Voor andere materiaalparameters (sterkte, gewicht etc.) wordt verwezen naar [1].

Opgemerkt wordt dat in het model de kleilaag op de buitenbekleding niet is gemodelleerd. Het VO voorziet wel in een kleibekleding maar ter plaatse van de bomen zal deze worden onderbroken. Het niet modelleren

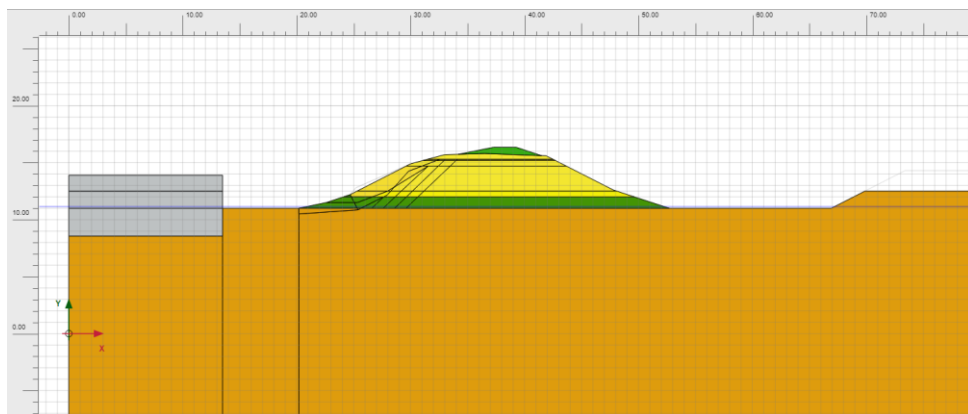
van de kleilaag op het buitentalud resulteert in hogere waterspanningen in de grondwal, en is daarmee een veilig uitgangspunt.

Tabel 2-1: Gehanteerde doorlatendheden in de PLAXFLOW berekeningen.

Grondsoort [-]	Horizontale doorlatendheid k_x [m/dag]	Verticale doorlatendheid k_y [m/dag]	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ [°]
Klei stevig	1	1	14,0	14,0	n.v.t.
Klei zandig	1	1	17,9	18,3	30,8
Zand	50	17	17,0	19,0	28,3
Zand grindig	87,5	30	18,5	20,5	31,5

In de notitie is een ontwerp beschouwd met een zandig talud (paragraaf 2.1) en een talud met een kleibekleding (paragraaf 2.2).

2.1 Zandig talud



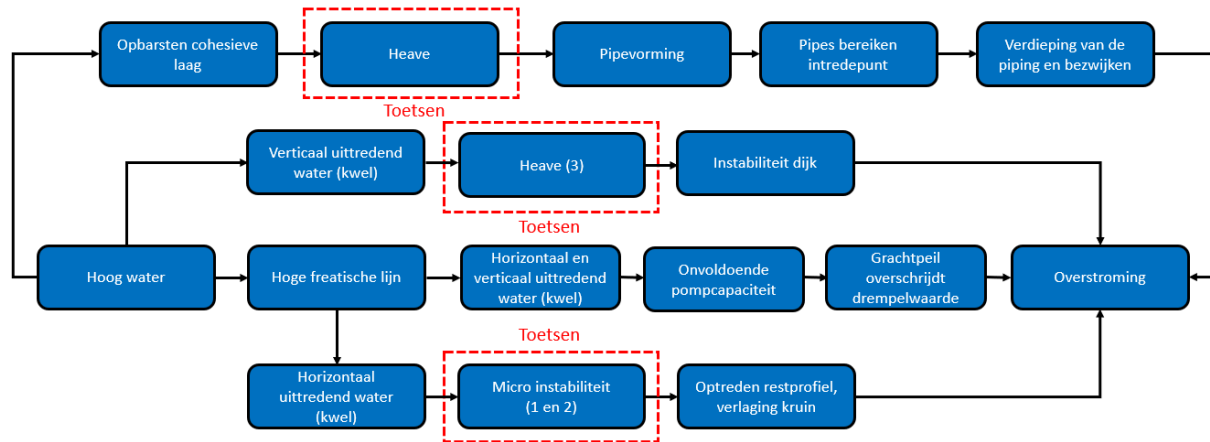
Figuur 2-1: PLAXFLOW doorsnede van het Basismodel (zie Hoofdstuk 0). De linker rand van het model is gemodelleerd als de as van symmetrie (in een axisymmetrisch model).

Bij het toetsen van de microstabiliteit en heave van de waterkeringen is de fenomenologische beschrijving van de mechanismes beschouwd. In Figuur 2-2 is beschreven hoe de mechanismes kunnen resulteren in wateroverlast [9]. Daarbij dient genoemd te worden dat de onderlinge 'knopen' individuele mechanismes betreffen en allemaal moeten optreden alvorens een overstrooming plaatsvindt. In het geval van het Kasteel kan wateroverlast optreden als gevolg van het uitspoelen van zand wat in een kruinverlaging resulteert. Bovendien kan bij te veel kwel ook wateroverlast optreden.

Figuur 2-2 beschrijft ook twee andere faalpaden die gerelateerd zijn aan grondwaterstroming:

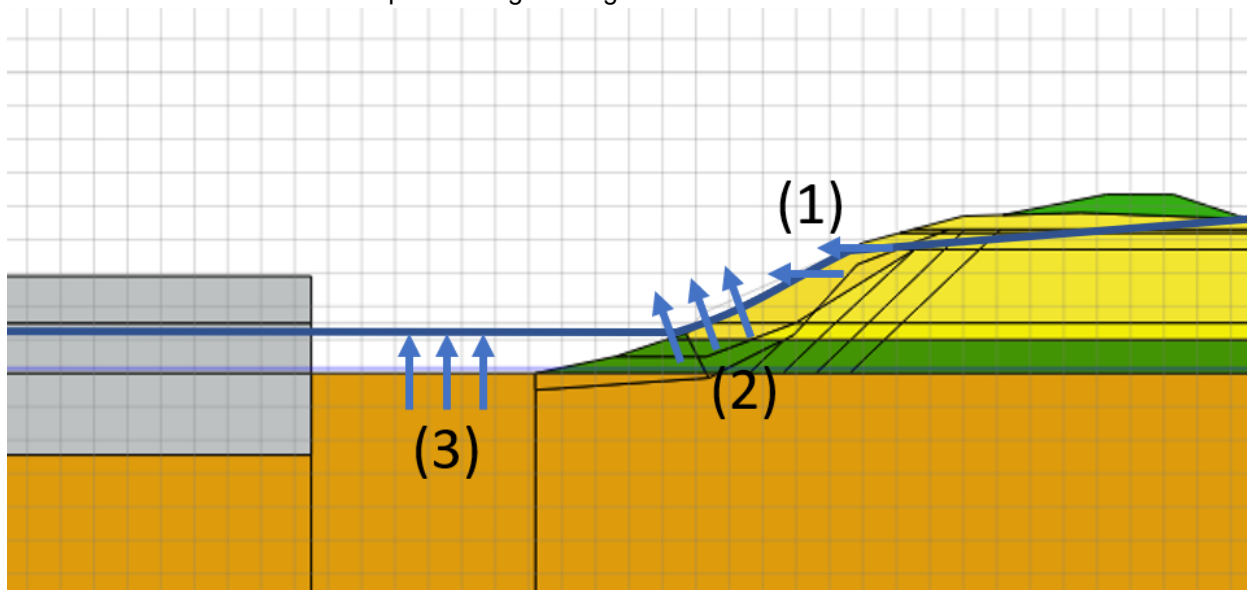
- Kwel leidend tot overstrooming van het kasteel.
- Piping (terugschrijdende erosie door sterke kwelstroming onder een cohesieve laag) leidend tot falen van de dijk en daarmee overstrooming van het kasteel.

Deze beide mechanismen zijn verder uitgewerkt in andere bijlagen bij het Technisch Ontwerp Kasteel.



Figuur 2-2: Fenomenologische beschrijving van faalpaden die gerelateerd zijn aan grondwaterstroming door de dijk en de ondergrond. De nummers komen overeen met de nummers in de doorsnede in Figuur 2-3.

Om de microstabiliteit en heave te kunnen toetsen zijn de enkele locaties in het dwarsprofiel beschouwd (zie Figuur 2-3). De Schematiseringshandleiding Grasbekleding [8] maakt onderscheid tussen microstabiliteit en heave. Microstabiliteit vindt mogelijk plaats in een talud 'boven' de freatische lijn, zie (1) in Figuur 2-3. Heave vindt mogelijk plaats onder de freatische lijn, zie (2) en (3) in Figuur 2-3. Recent is er een publicatie beschikbaar die meer achtergronden geeft bij het mechanisme en waarin beschikbare rekenregels nader zijn uitgewerkt: de Publicatie Heaveschermen [11]. Voor het beoordelen van mechanimse heave is van deze publicatie gebruik gemaakt.



Figuur 2-3: Locaties waar microstabiliteit kunnen optreden (1) en heave (2, 3).

Conform [8] worden microstabiliteit en heave getoetst met Vergelijkingen 1, 2 en 3.

1. Microstabiliteit van talud t.h.v. het grachtpeil.

$$\tan(\phi) \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\phi} \cdot \rho_g \cdot g \cdot \sin \alpha}{\rho_g \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{\rho_w \cdot g}{\cos(\alpha)}} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

2. Micro instabiliteit onderwater talud (zandkorrels onder de freatische lijn).

$$\cos(\alpha) \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{m,\rho} \cdot i_{\perp} \cdot \rho_w}{\rho_g - \rho_w} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

3. Opbarsten en heave onder de grachtbodem (zie Bijlage 2).

De meeste eenvoudige verificatie methode is het controleren of de te verwachten verticale gradiënt kleiner is dan een maximaal toelaatbare gradiënt van 0,5:

$$i_v \leq 0,5 \quad (\text{vergelijking 3})$$

Indien niet wordt voldaan aan deze eis kan door het aanbrengen van een filter een hogere gradiënt worden toegestaan. In dit geval kan de Safety Factor SF ten aanzien van vertikaal evenwicht worden bepaald met de volgende formule. :

$$SF = (\gamma' s + p'_v) / \Delta u_d \quad (\text{vergelijking 4})$$

In de Publicatie Heaveschermen wordt een Safety Factor van 2,0 als ontwerpwaarde aanbevolen.

$$SF \geq 2,0 \quad (\text{vergelijking 5})$$

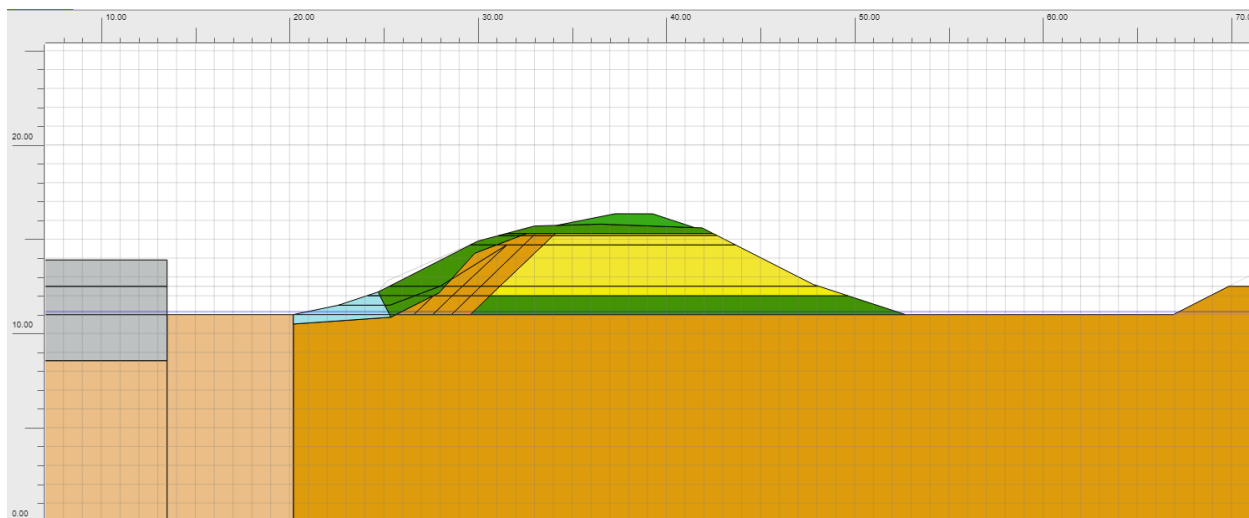
In bovenstaande vergelijkingen zijn de symbolen als volgt gedefinieerd.

$\gamma_n \cdot \gamma_d$	: Product van de schadefactor en modelfactor. Boven water gelijk aan 1,21 en onder water gelijk aan 2,0.
$\gamma_{m,\phi}$	: Materiaalfactor, vanwege CSSM gelijk aan 1,0.
$\gamma_{m,\rho}$	: Materiaalfactor, vanwege CSSM gelijk aan 1,0.
ρ_g	: Volumieke massa natte grond [kg/m ³]
ρ_w	: Volumieke massa water, 1000 kg/m ³
g	: Zwaartekrachtsversnelling; 9,81 m/s ²
α	: Taludhelling [°]
ϕ'	: Hoek van inwendige wrijving [°]
$i_{\perp}$	: Hydraulische gradiënt loodrecht op het maaiveld [-]
SF_{heave}	: Overall veiligheidsfactor hydraulic heave
γ'	: Effectieve volume gewicht van drijfzand gevoelige materiaal [kN/m ³]
p'_v	: Vertikale korrelspanning aan onderzijde van filter [-]
s	: Diepte ten opzichte van onderkant filter waar vertikaal evenwicht wordt beschouwd [m]

Δu_d : Verschil tussen waterdruk bij grondwaterstroming en hydrostatische druk aan op diepte s onder het filter [kPa]

2.2 Talud met kleibekleding

Parallel aan een dijk met een (enkel) zandige ondergrond is ook een ontwerp beschouwd waarin een kleibekleding is toegepast. De geometrie en opbouw van dit ontwerp is weergegeven in Figuur 2-4. In ontwerp is het talud van het maaiveld gewijzigd ten opzichte van het bestaande maaiveld. Ook is de bestaande kleilaag (deels) ontgraven opdat er genoeg drainagemogelijkheid resteert. Bij dit ontwerp is ook rekening gehouden te worden met aanbrengen van een filterconstructie om heave en piping te voorkomen (in blauw weergegeven in de figuur).



Figuur 2-4: PLAXFLOW model waarin een kleibekleding is toegepast.

De keuzes voor dit ontwerp zijn nader toegelicht in het ontwerprapport Kasteel [1]. Voor dit ontwerp wordt opgemerkt dat de waterspanningen hoog kunnen oplopen vanwege de ondoorlatendheid van de kleilaag (ondanks de gedeeltelijke ontgraving van de klei). Daartoe zijn ook deze beschouwd in de stromingsmodellen.

3 Resultaten

3.1 Microstabiliteit talud boven grachtpeil

Met Vergelijking 1 (zie par. 2.2) is de microstabiliteit in het binnentalud van de dijk getoetst; zie tabel 3-2 voor de resultaten. Opgemerkt wordt dat deze niet afhankelijk is van de hydraulische gradiënt. Uit de toetsing blijkt dat niet overal voldaan wordt aan microstabiliteit. Het onderste deel met een talud 1:2 blijft niet stabiel, het bovenste deel met een talud 1:6 wel. Ter verduidelijking van het minimaal benodigd talud ter voorkoming van microinstabiliteit is een talud 1:5 ook gepresenteerd.

Tabel 3-1: Toetsing van de microstabiliteit van het talud boven water (bij een zandig talud).

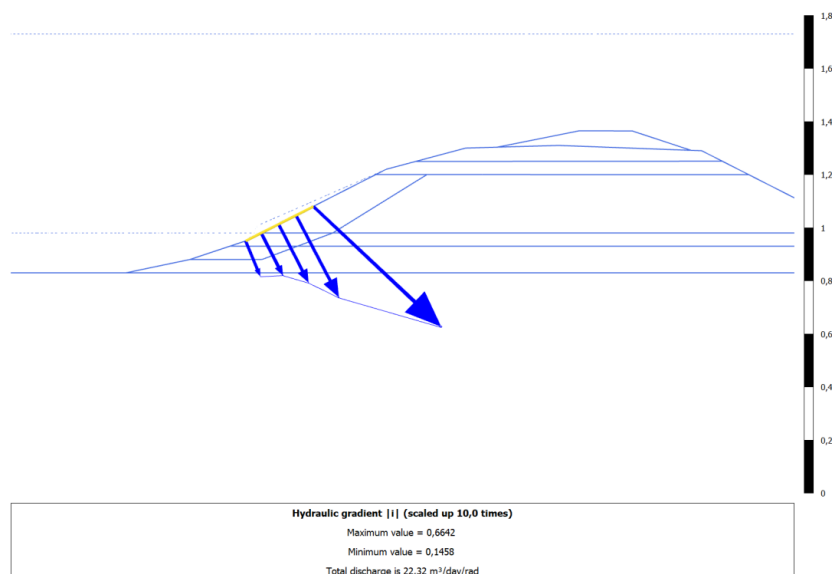
Talud	$\tan(\phi')$	Rechterkant van Vergelijking 1	Oordeel
1:2*	0,54	1,77	Voldoet niet
1:5	0,54	0,53	Voldoet
1:6*	0,54	0,44	Voldoet

* Deze volgt uit de inmetingen van de bestaande geometrie, zie Bijlage 1.

Hierbij wordt vermeld dat het toepassen van een kleibekleding ervoor zorgt dat dit faalmechanisme niet meer van toepassing is.

3.2 Microinstabiliteit onderwatertalud

Met behulp van Vergelijking 2 (zie par. 2.1) is de heave van het talud onder water getoetst. Opgemerkt wordt dat deze wel afhankelijk is van de hydraulische gradiënt. Daartoe is met behulp van Plaxflow de grondwaterstroming beschouwd voor elk scenario. Het talud onder water bestaat uit zand en grind, hier is bij het toetsen onderscheid tussen gemaakt. In Tabel 3-2 zijn de toetsingen getoond. De overige resultaten zijn opgenomen in Bijlage 1. Daarbij is de bestaande geometrie gehanteerd ter bepaling van de taludhoek α .



Figuur 3-1: Uitstroomgradiënten bij het zand. Dit scenario betreft het Basismodel.

Bij het invullen van $i_{\perp}$ in Vergelijking 2 is de absolute hydraulische gradiënt gehanteerd. Eigenlijk dient deze te worden ontbonden naar de component loodrecht op het talud van de sloot. Deze component is echter (nauwelijks) kleiner dan de absolute waarde. Om praktische overwegingen is daarom de absolute gradiënt gehanteerd. Uit de resultaten blijkt dat het zandtalud in geen enkel scenario voldoet en het grindtalud wel (vanwege het verschil in gradiënt).

Tabel 3-2: Toetsingen van onderwatertalud op microinstabiliteit/heave.

Scenario	$\cos(\alpha)$	Rechterkant van Vergelijking 2	Oordeel
Zandig talud	0,89	1,33	Voldoet niet
Kleibekleding	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.

Hierbij wordt vermeld dat het toepassen van een kleibekleding ervoor zorgt dat dit faalmechanisme niet meer van toepassing is en hiermee voldoet aan dit faalmechanisme.

3.3 Heave grachtbodem

Met behulp van Vergelijking 3 is de heave ter hoogte van de grachtbodem getoetst. Daartoe is met behulp van Plaxflow de verticale hydraulische gradiënt over de grachtbodem bepaald, zie Tabel 3-3. De Plaxflow resultaten zijn opgenomen in Bijlage 2. Hoewel het optredende verhang nagenoeg gelijk is aan de gestelde eis, wordt tevens opgemerkt dat in Plaxflow een homogene grachtbodem is gemodelleerd. Mogelijke aanwezige kleilenzen die in *preferential flow* resulteren verhogen de gradiënten. Uitgaande van bovenstaande en de resultaten uit onderstaande tabel kan het optreden van heave niet worden uitgesloten.

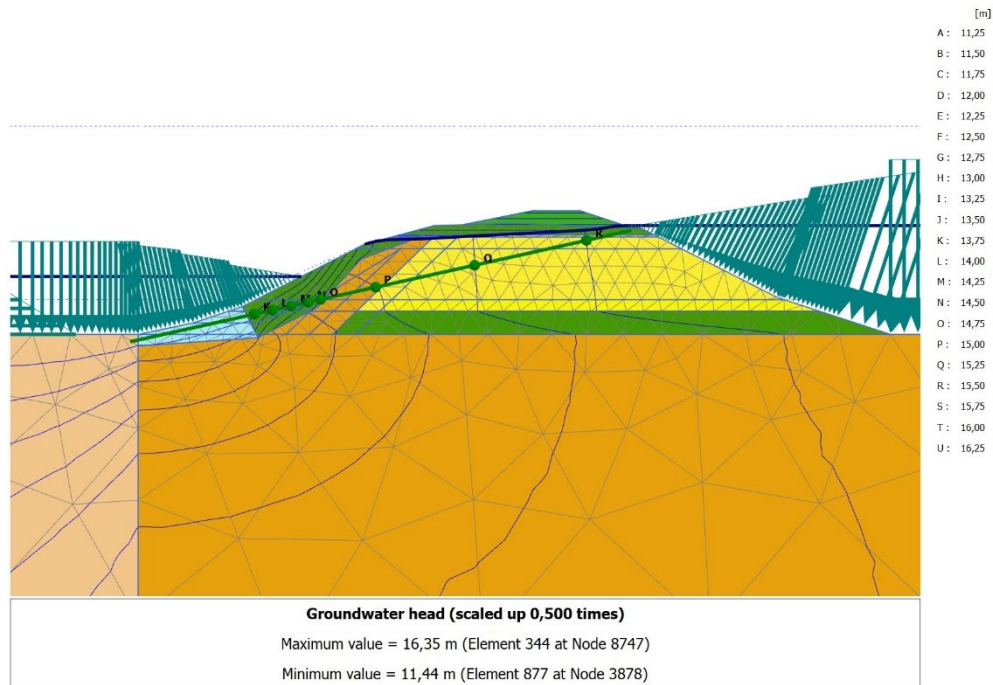
Tabel 3-3: Toetsingen op heave van de grachtbodem.

Scenario	i_v	Maximale waarde	Oordeel
Zandig talud en zandbodem	0,51	0,50	Voldoet nagenoeg
Zandig talud en zandbodem met kleilenzen	(Aanzienlijk) hoger dan 0,51 bij geconcentreerde uitstroom waar kleilenzen afwezig zijn	0,50	Voldoet niet

Wanneer een kleibekleding toegepast wordt, dient rekening te worden gehouden met een filterconstructie. Deze dient stabiel te blijven opdat er geen hydraulische grondbreuk plaatsvindt in de filterlaag. In Bijlage 2 is nader uitgewerkt dat in dit geval een filter van 0,5 m voldoet. Door toepassing van dit filter wordt drijfzandvorming door hydraulische heave ter plaatse van de grachtbodem in de teenzone van de dijk voorkomen. Hierdoor is de kans op vervolgmeechanismen zoals piping en instabiliteit als gevolg van drijfzandvorming voldoende klein.

3.4 Waterspanningen macrostabiliteit

Zoals eerder is vermeld, kunnen de waterspanningen bij het toepassen van een kleibekleding hoog oplopen. Dit kan leiden tot instabiliteit van het binnentalud en opdrukken van de kleibekleding. In Plaxflow zijn de waterspanningen in het dijklichaam berekend (reductie van de stijghoogte is ten opzichte van het 'intredepunt').



Figuur 3-2: Berekende stijghoogten in het geval van een kleibekleding.

Uit de berekening volgt dat de stijghoogte t.h.v. punt Q met 'enkel' 0,5 m gedaald is. Deze waarde verschilt sterk t.o.v. wat wordt aangehouden in het TRWD [6]. Om deze reden is deze waterstand aangehouden in het toetsen van de macrostabiliteit van het ontwerp.

Uit de berekeningen van de macrostabiliteit [4] volgt dat het ontwerp voldoet bij de waterstand zoals getoond in Figuur 3-2. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de macrostabiliteit erg gevoelig is voor deze waterstand. Daarom dient (maximaal) deze waterstand gewaarborgd te worden. Naast de grondverbetering (het gedeeltelijk ontgraven van de natuurlijke kleilaag) wordt een drain in de dijk aangebracht. De toepassing van deze drain is nader toegelicht in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

4 Conclusie en aanbevelingen

In deze notitie is voor een maatgevende locatie van de omwalling rondom kasteel Well de toets op microinstabiliteit en heave van binnentalud en grachtbodem beschreven. Hierbij is zowel een zandig talud als een talud met een kleibekleding beschouwd.

Op basis van een stationair grondwaterstromingsmodel (Plaxflow 2D) is geconstateerd dat de kans op microstabiliteit en verwerking bij de huidige geometrie en uitgangspunten dusdanig is dat vervolgmechanismen leidend tot overstroming niet kunnen worden uitgesloten. Daarom worden verbetermaatregelen voorgesteld. Deze maatregelen omvatten:

- Het aanbrengen van kleibekleding om de weerstand tegen micro-instabiliteit te vergroten.
- Het aanbrengen van een verticaal filter met voldoende gewicht om hydraulische heave en transport van zanddeeltjes van het zand onder het filter tegen te gaan.
- Het aanbrengen van drainage om de waterdruk onder de bekleding te verlagen. Op deze wijze wordt de veiligheid ten aanzien van opdrukken van de kleibekleding op het talud verhoogd en wordt de macrostabiliteit van het binnentalud beter gewaarborgd. Dit is nader beschreven in de bijlage van het hoofdrapport [1] waarin de macrostabiliteit is beschouwd.
- Het vergraven van eventuele natuurlijke kleilagen ter plaatse van het filter waaronder piping zou kunnen optreden. Dit is nader beschreven in de bijlage van het hoofdrapport [1] waarin de piping is beschouwd.

Filterconstructies zijn (onder andere) onder te verdelen in samenstellingen van kunststoffilters met granulaire materialen en filters die uitsluitend bestaan uit granulaire materialen. Voor alle types gelden de volgende eisen:

- De filterconstructie dient zodanig ontworpen te zijn dat fijn zand niet kan uitspoelen terwijl water wel kan doorstromen. Het document Publicatie Filtertechnieken [10] geeft meer informatie over filterconstructies en handvatten voor het ontwerp ervan.
- De filterconstructie dient zodanig ontworpen te zijn dat deze stabiel blijft. Dit geldt voor de zowel de constructie als geheel als voor de componenten waar deze uit bestaat. Voor korrelvormige constructies geldt dat onderlinge korrels stabiel dienen te blijven waardoor de hydraulische gradiënt beperkt dient te worden. Bij toename van het effectieve gewicht van de filterconstructie is een hogere gradiënt toelaatbaar voordat opdrukken of hydraulische heave kan optreden. In de Publicatie Heaveschermen zijn rekenregels opgenomen waarmee op hydraulische heave kan worden getoetst [11].

Bovenstaande eisen dienen vertaald te worden naar vereiste eigenschappen van de filterconstructie. Deze eigenschappen betreffen bijvoorbeeld de dikte, het gewicht en de doorlatendheden/korrelgroottes van de verschillende componenten. Op basis van de analyses in voorliggende notitie is gevonden dat een filter met een dikte van 0,5 m een stabiel ontwerp oplevert. Omdat de check ruim voldoet, zijn praktische overwegingen leidend boven technische overwegingen. Wel is het hierbij belangrijk dat de aansluiting van het filter op de kleibekleding bijzondere aandacht verdient in verband met potentiële opbarstlocaties. In dit stadium is dit nog niet uitgewerkt.

Er zijn ook andere oplossingen waarmee de veiligheid ten aanzien van ondermijning van de dijk door micro-instabiliteit en heave kan worden tegengegaan. De argumenten waarom de principe-oplossing van een filterconstructie is voorgesteld zijn beschreven in het Technisch Ontwerp [1].

5 Referenties

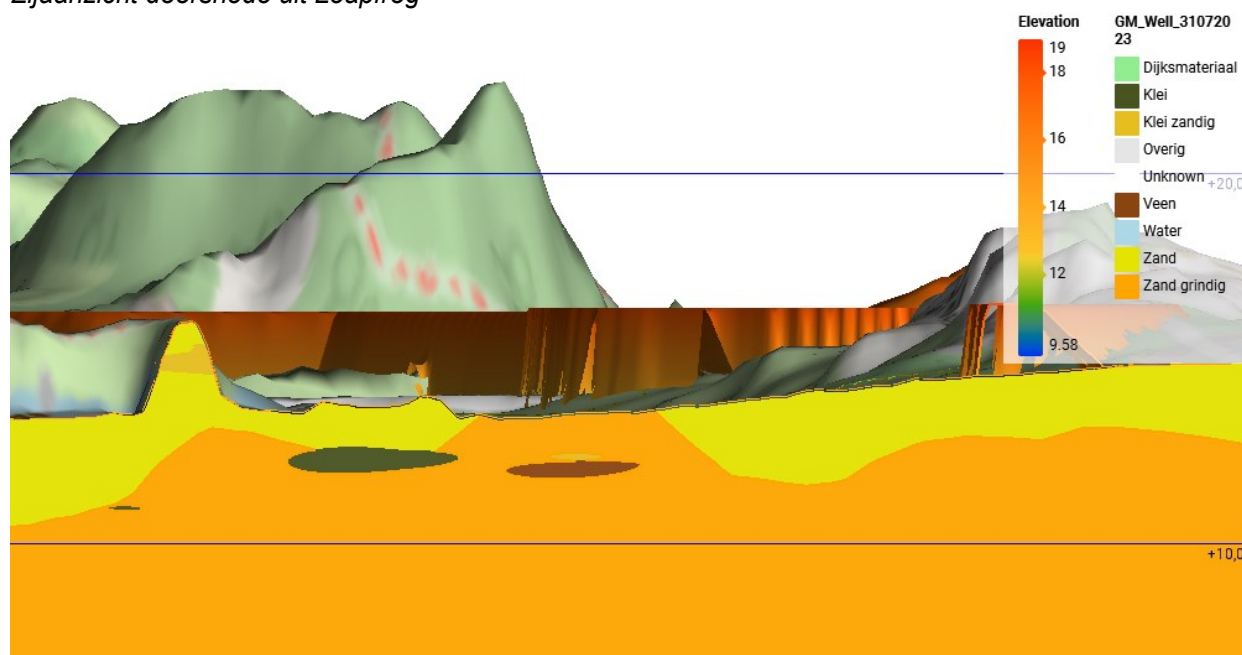
- [1] Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well Technisch Ontwerp Kasteel Well, Royal HaskoningDHV, BJ1000_W3420-3_Technisch ontwerp waterkering kasteel VO
- [2] Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well Technische Uitgangspunten Notitie, Royal HaskoningDHV, BJ1000_W3210-2_TUN Waterkeringen
- [3] Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well Technisch Ontwerp Groene Waterkeringen, Royal HaskoningDHV, BJ1000_W3420_5_Hoofdrapport technisch ontwerp waterkeringen
- [4] Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well Technisch Ontwerp Kasteel Macrostabieleit, Royal Haskoning DHV, BJ1000_W3420-3.6_Kasteel macrostabieleit
- [5] Project Well Nota van Uitgangspunten Waterkeringen Definitief Rapport, HKV Lijn in Water, maart 2023
- [6] Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
- [7] Grondwaterzakboekje (www.grondwaterzakboekje.nl), Bot Raadgevend Ingenieur, 2011
- [8] Schematiseringshandleiding grasbekleding WBI 2017, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, definitief, 28 mei 2021
- [9] Fenomenologische beschrijving Faalmechanismen WBI, Deltares, definitief, 2018
- [10] Publicatie Filtertechnieken HWBP-De Innovatieversneller | Piping, juni 2023
- [11] Publicatie Heaveschermen HWBP-De Innovatieversneller | Piping, jan. 2024 (versie V0.31)

Bijlage 1: Resultaten PLAXFLOW berekening

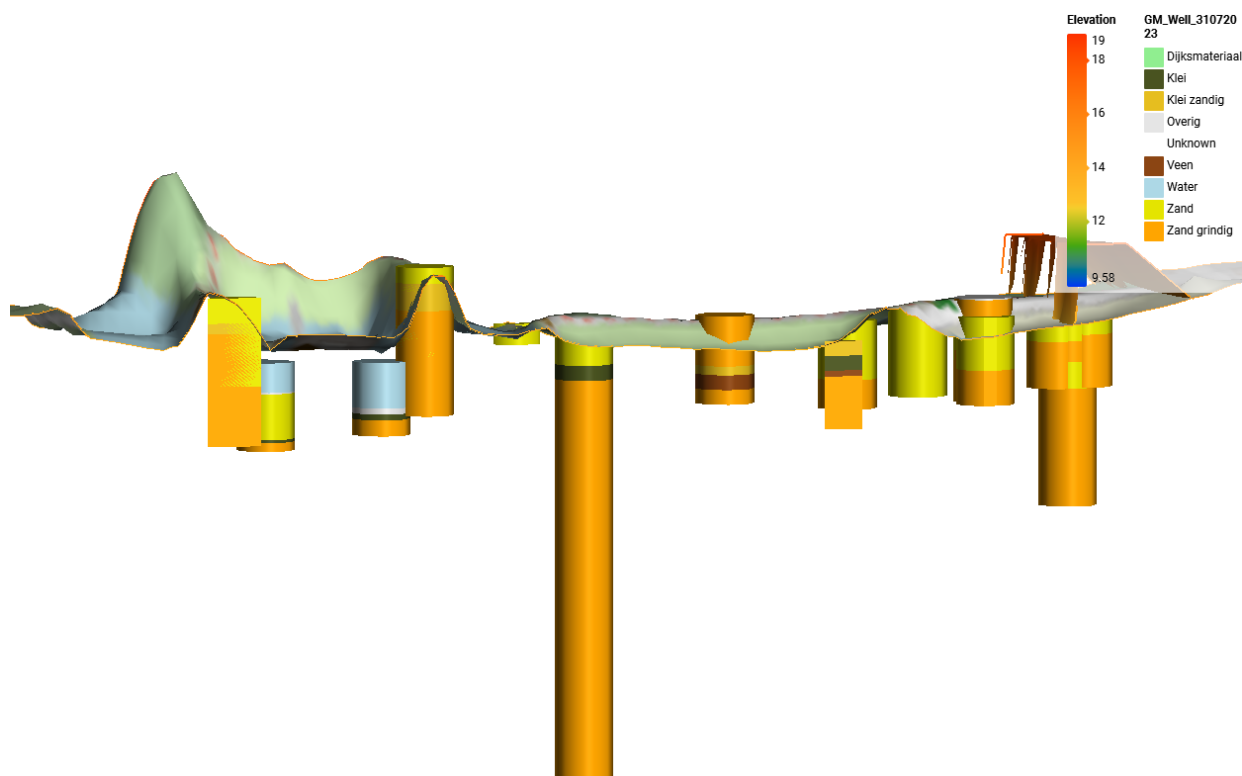
Locatie van de doorsnede



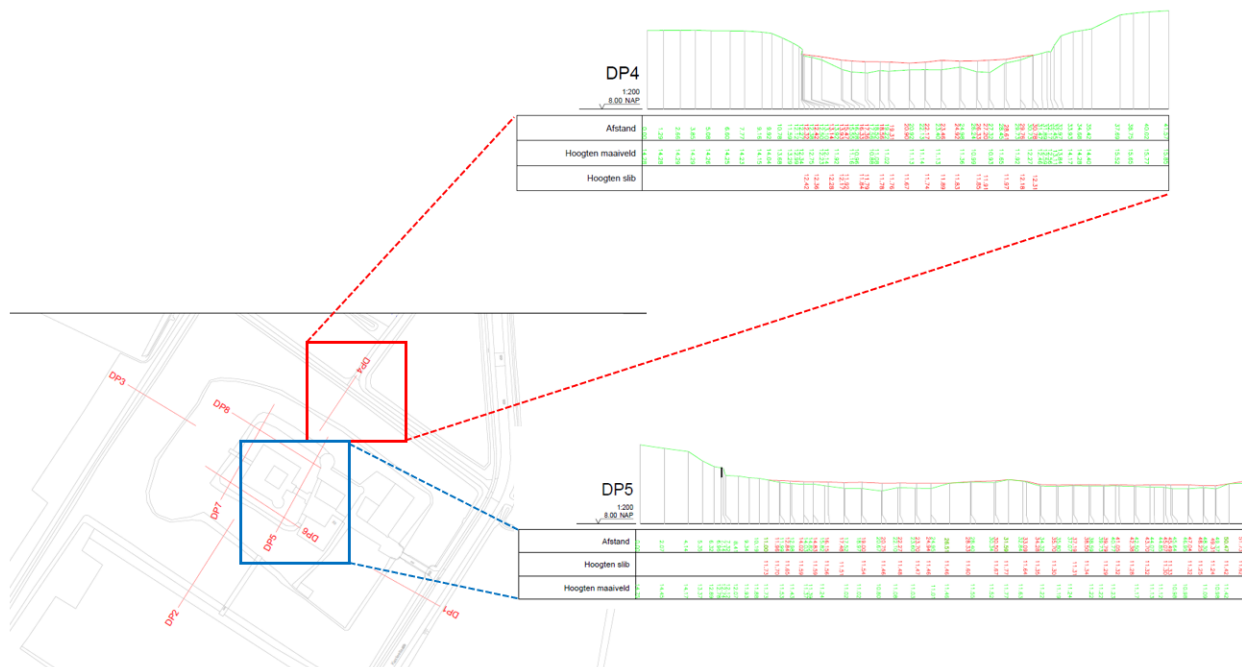
Zijaanzicht doorsnede uit Leapfrog



Grondonderzoek ter hoogte van de doorsnede



Inmetingen hoogtes

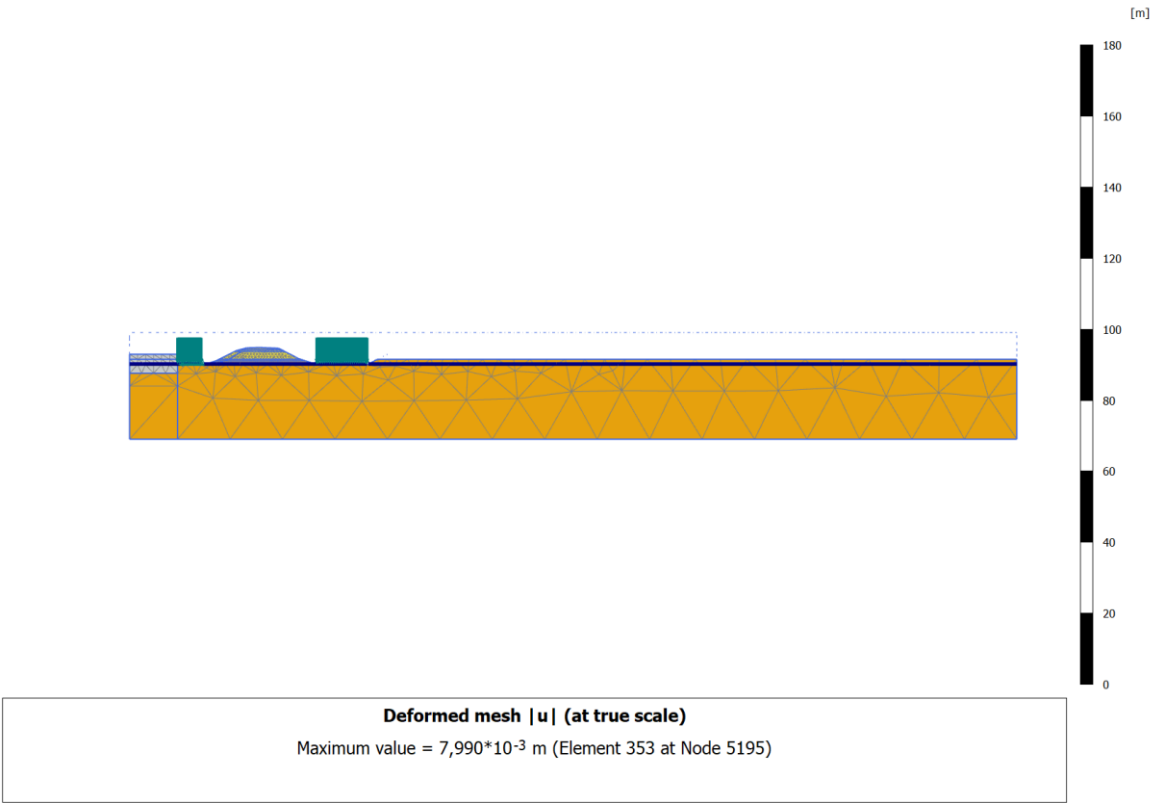


Stromingsbeeld

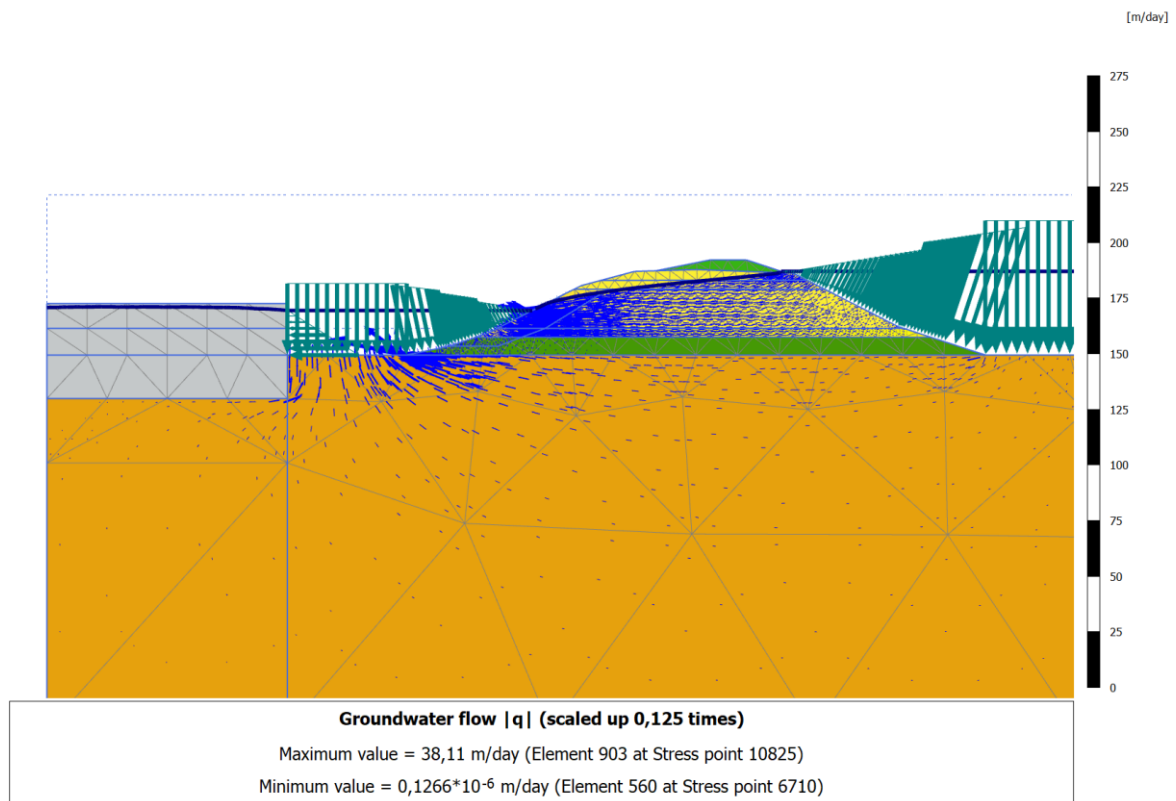
Rekenschema PLAXFLOW

ID	Calculation t...	Loading type...	Pore pressur...	Time interval	Estimated en...	Ignore undr...	Reset displa...	Updated me...	Max steps (D)	First step	Last step	2M _{sf} - R...
Initial phase [InitialPhase]				0,000 day	0,000 day	☒			1000	0	0	1,000
Nistep [Phase_1]				0,000 day	0,000 day	☐	☒		1000	1	5	1,000
Aanleg dijkophoging [Phase_4]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	6	10	1,000
WBN Hoogwater NAP + 15,6 m [Phase_3]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	91	107	1,000
WBN Hoogwater NAP + 15,6 m ind. kleilaag onder [Phase_7]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	11	13	1,000
WBN Hoogwater NAP + 15,6 m beide kleilagen [Phase_2]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	108	160	1,000
Phase_2 zonder Closed Boundary [Phase_6]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	14	16	1,000
WBN Hoogwater NAP + 15,6 m ind. kleilaag boven [Phase_5]				0,000 day	0,000 day	☐			1000	17	34	1,000

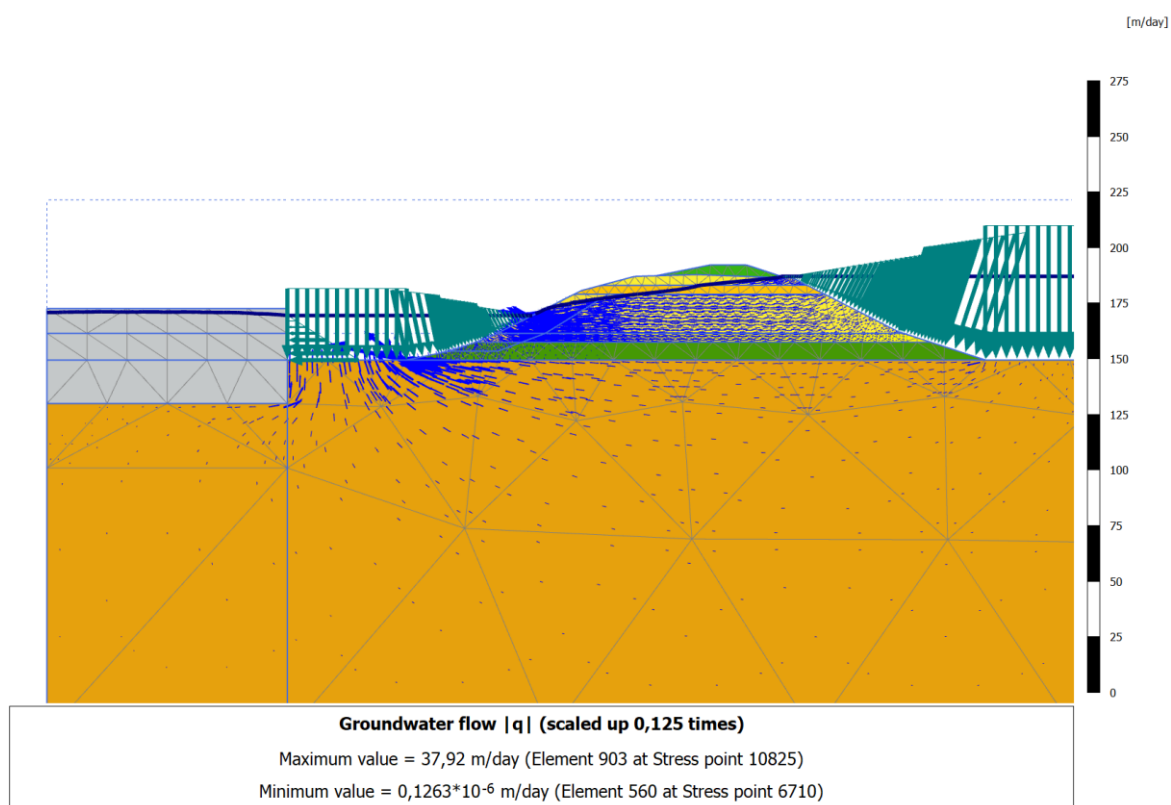
Modelgrenzen



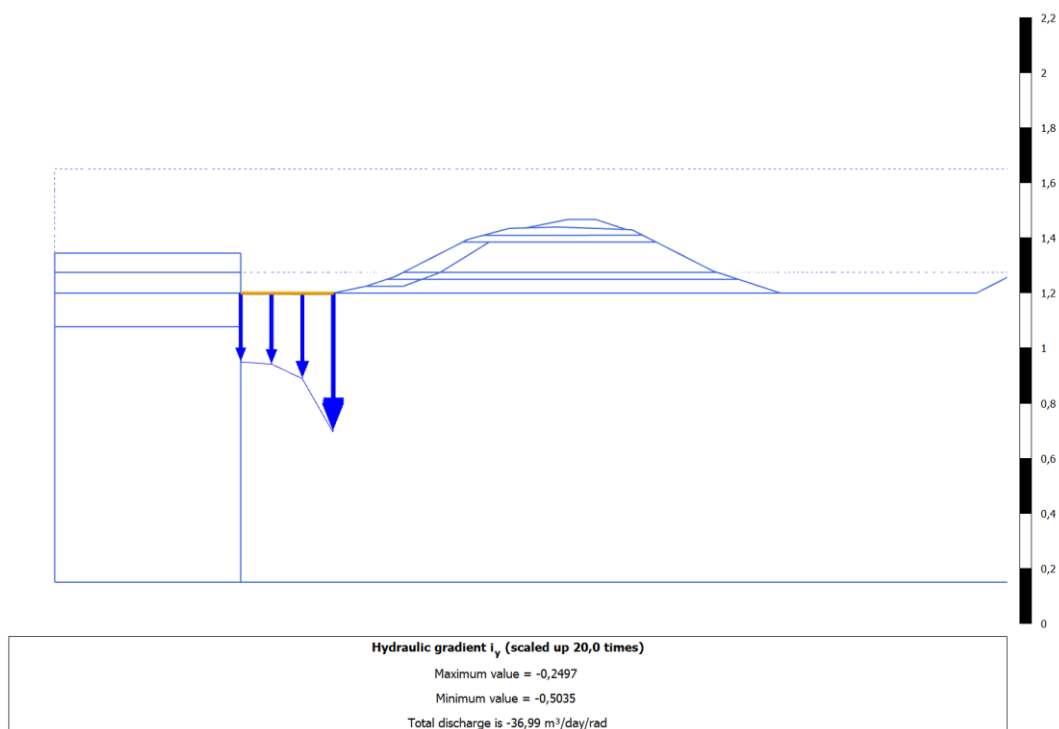
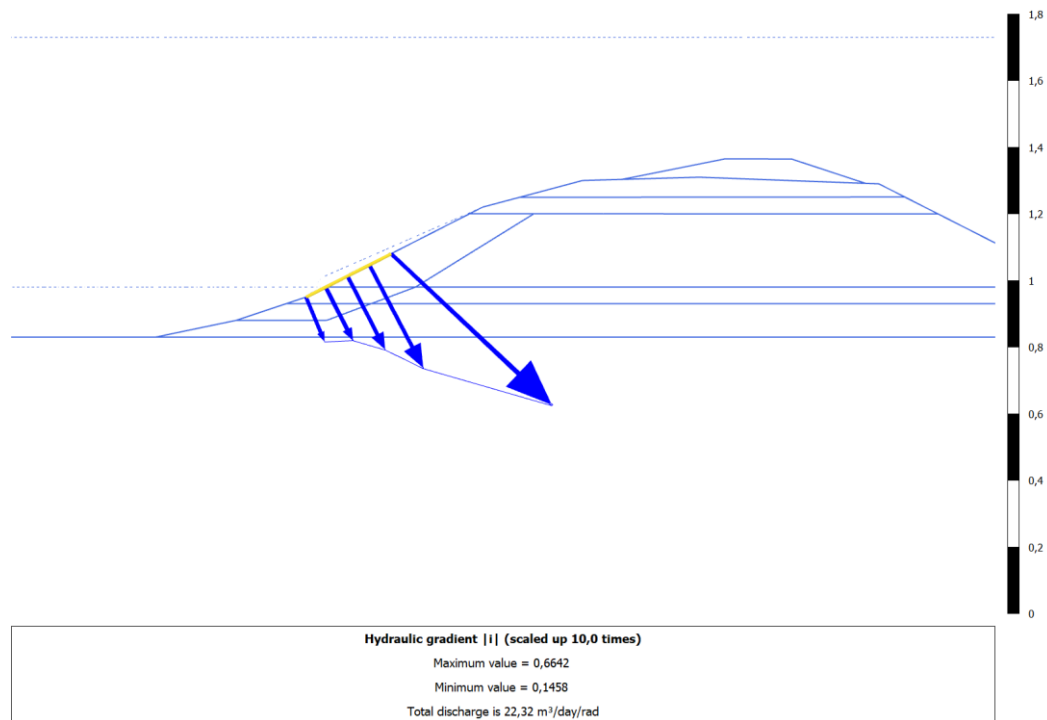
WBN Hoogwater NAP + 15,6 m incl. kleilaag onder [Phase_7]



WBN Hoogwater NAP + 15,6 m beide kleilagen [Phase_2]

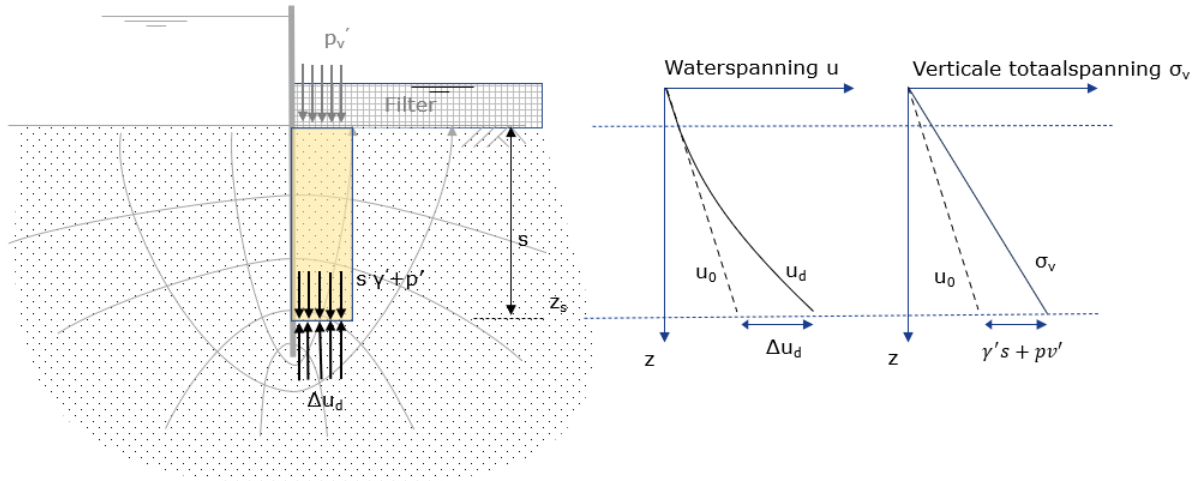


Zandig talud



Bijlage 2: Theorie hydraulic heave in grachtbodem met filter

Onderstaan is de theorie toegelicht waarmee de dikte van het filter is bepaald. Het filter dient ter voorkoming van hydraulic heave (hydraulische grondbreuk).



Appendix Figuur 1: Evenwichtsbeschouwing effectieve spanningen uit Publicatie Heaveschermen (DIV, 2023, versie 0.3) en concept EC7 (2020).

Er treedt drijfzand (hydraulic heave) op wanneer de waterdruk in evenwicht gelijk is aan de totaalspanning waardoor er dus geen korrelspanning is. Dit is het geval wanneer geldt $u_d = \sigma_v$ of, anders geschreven, wanneer geldt: $u_d - u_0 = \sigma_v - u_0$. Met toepassing van parameters die eigenschappen van filter, grond en grondwaterstroming beschrijven kan dit nog verder worden omschreven tot:

$$\Delta u_d = \gamma' s + p_v' \quad (\text{formule 2-1})$$

Waarin:

$$\sigma_v - u_0 = \gamma' s + p_v' \quad (\text{formule 2-2})$$

$$\text{en } \Delta u_d = u_d - u_0 \quad (\text{formule 2-3})$$

De Safety Factor ten aanzien van vertikaal evenwicht SF op een diepte s kan dan worden geschreven als:

$$SF = (\gamma' s + p_v') / \Delta u_d \quad (\text{formule 2-4})$$

$$SF = \frac{(\gamma' s + p_v')}{\gamma_w i v s} \quad (\text{formule 2-5})$$

In de Publicatie Heaveschermen wordt een Safety Factor van 2,0 als ontwerpwaarde aanbevolen.

$$SF \geq 2,0 \quad (\text{formule 2-6})$$

In bovenstaande formules gelden de volgende vergelijkingen:

σ_v	Verticale totaalspanning onderzijde op niveau z_s , op diepte s onder het filter [kPa]
u_d	Waterdruk op niveau z_s bij aanwezigheid van stroming [kPa]
u_0	Waterdruk op niveau z_s bij afwezigheid van stroming (bij grachtpeil) [kPa]
Δu_d	Verskil tussen waterdruk bij grondwaterstroming en hydrostatische druk op niveau z_s [kPa]

γ'	Effectief volumegewicht van grond onder filter [kN/m ³]
γ_w	Volumegewicht van water [kN/m ³]
i_v	Gemiddelde verikale gradiënt van grondwaterstroming over diepte s [-]
s	Diepte in zandlaag onder het filter [m]
p'_v	Effectief gewicht van filter bovenop zandlaag [kPa]

Uit de formule 2-5 blijkt dat SF sterk afhankelijk is van de verticale stromingsgradiënt i_v . Deze kan rechtstreeks worden bepaald met Plaxflow. Indien er geen filter aanwezig is ter plaatse van de grachtbodem dan zal de verticale gradiënt lager moeten zijn dan 0,5 om een minimale veiligheidsfactor van 2,0 te halen. Indien de gradiënt hoger is dan 0,5 dan zal een filter moeten worden aangebracht om te voldoen aan de minimale veiligheid van 2,0. Hoe hoger het effectieve gewicht van het filter (p'_v) des te hogere stromingsgradiënten zijn toelaatbaar. Het effect van het filter neemt af met de diepte (het relatieve aandeel op het totaal korrelgewicht neemt af).

Bij een opgelegde gradiënt kan andersom bepaald worden tot welke diepte een bepaalde SF kan worden gegarandeerd. De formule 2-5 is hiervoor omgeschreven naar::

$$s = p'_v (SF i_v \gamma_w - \gamma')$$

Onderstaand is een voorbeeldberekening gemaakt waarmee wordt bepaald tot welk diepte een stromingsgradiënt groter dan 0,5 toelaatbaar is.

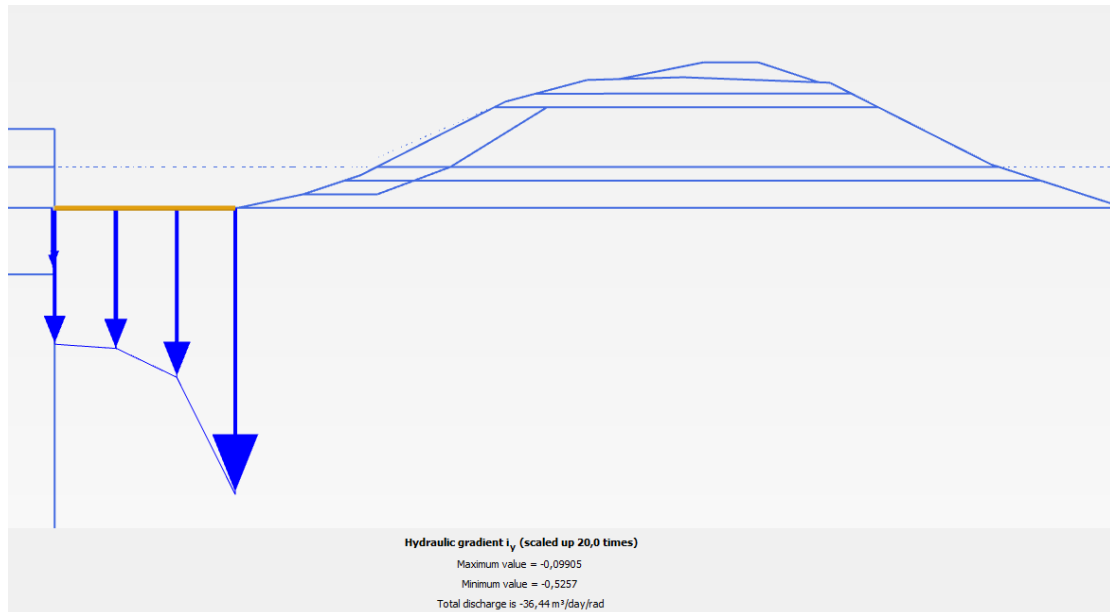
Stel filter heeft dikte 0,5 m en een volumiek gewicht van 20 kN/m³, dan geldt: $p'_v = 5$ kPa

Zand onder filter: $\gamma' = 10$ kN/m³ en $\gamma_w = 10$ kN/m³

Dan $s = 5 / ((2 \times i \times 10) - 10)$. Bij $i = 0,6 \rightarrow s = 5/2 = 2,5$ m. Dit betekent dat er tot op een diepte van 2,5 m onder het filter geen hydraulische heave kan optreden. Onder deze diepte moet de gradiënt dan kleiner zijn dan 0,5. Bij $p'_v = 10$ kPa en $i = 0,7$ (1m dik filter) volgt $s = 10/4 = 2,5$ m. Dus bij $i = 0,7$ en een 1,0 m dik filter geldt ook dat er op 2,5m onder het filter geen heave optreden. Onder deze diepte moet de gradiënt dan kleiner zijn dan 0,5.

Toepassing op PLAXFLOW berekeningen

Onderstaand is de hydraulische gradiënt aan het maaiveld getoond. Deze bedraagt 0,52. Voor het ontwerp wordt deze afgerond naar 0,55.



Appendix Figuur 2

Bij een filter met een dikte van 0,5 m gebruiken en een $\gamma' = \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$, wordt hierna genoemde waarde verkregen: $p_v' = 5 \text{ kPa}$.

Dan betekent voor de afstand: $s = p_v' / (SF \cdot i \cdot \gamma_w - \gamma') = 5 / (2 \cdot 0.55 \cdot 10 - 10) = 5 \text{ m}$.

Dit impliceert dat 5 m onder (onderkant van) filter de gradiënt kleiner dient te zijn dan 0,5. Uit Plaxflow volgt onderstaand gradiëntverloop. De gevonden waarde van 0,08 ligt ruim onder de 0,5. Het ontwerp van het filter voldoet daarmee.

