

Memo

Aan John Peters, Jan Verstraaten

Kopie Petar Lubking

Van Varesh Choenni

Correspondentie adres

Overdiepsekade 2 t.o. – 5165 PV Waspik
Postbus 4 – 5165 ZG Waspik

Factuur adres

Postbus 2, 4043 ZG OPHEUSDEN

T 0183 642300

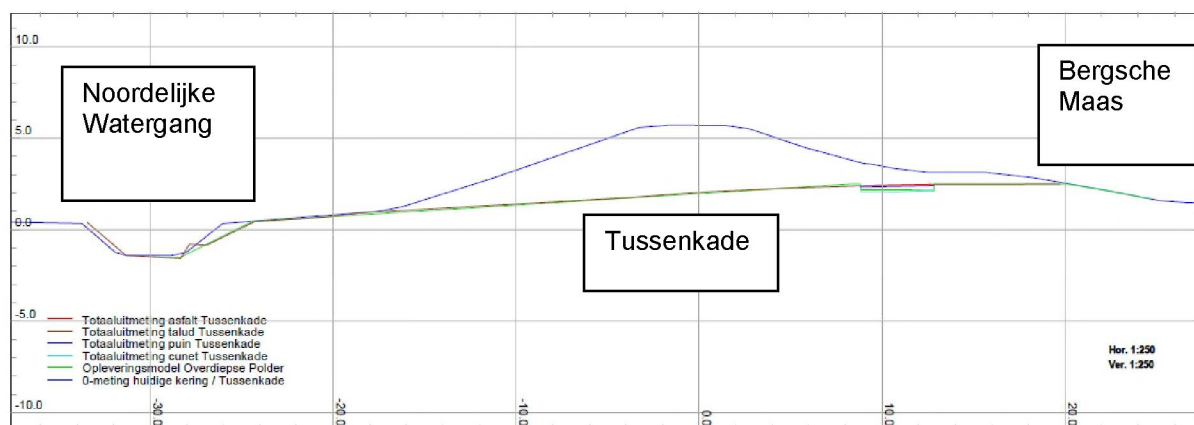
F 0183 642310

Datum : 28 januari 2016

Onderwerp : Instabiliteit taluds Noordelijke Watergang, versie 2.0

Inleiding

Op diverse locaties zijn gedeeltes van de taluds van de Noordelijke Watergang (NW) afgeschoven. In deze memo is een analyse van de situatie uitgevoerd om de oorzaak van de afschuiving te achterhalen. Tevens zijn mogelijke maatregelen en aanbevelingen in dit document opgenomen.



Figuur 1: Kenmerkend dwarsprofiel Tussenkade, ref. [2]

De NW bevindt zich naast de Tussenkade, zie figuur 1. Aan de andere kant van de Tussenkade ligt de Bergsche Maas. Met de blauwe lijn in figuur 1 is de contour van de vroegere waterkering weergegeven, die inmiddels is afgegraven.

In figuur 2 is een foto te zien waar een gedeelte van het talud van de NW is afgeschoven. Het talud is verzakt en is richting het water verschoven. Op meerdere plekken zijn soortgelijke afschuivingen aangetroffen.



Figuur 2: Foto van een afgeschoven talud NW

In hoofdstuk 2 is een analyse van de situatie uitgevoerd om de mogelijke oorzaak van het probleem te achterhalen. De mogelijk te nemen maatregelen worden beschouwd in hoofdstuk 3 en in hoofdstuk 4 worden de conclusie en aanbevelingen besproken.

2. ANALYSE

Het doel van dit hoofdstuk is de oorzaak van de afschuivende taluds achterhalen. Allereerst worden de aangehouden uitgangspunten besproken, daarna volgt een korte uitleg over de gehanteerde onderzoeksmethode. Hierna worden de resultaten uit de analyse besproken, waarna een verklaring voor de afschuivende taluds wordt gegeven.

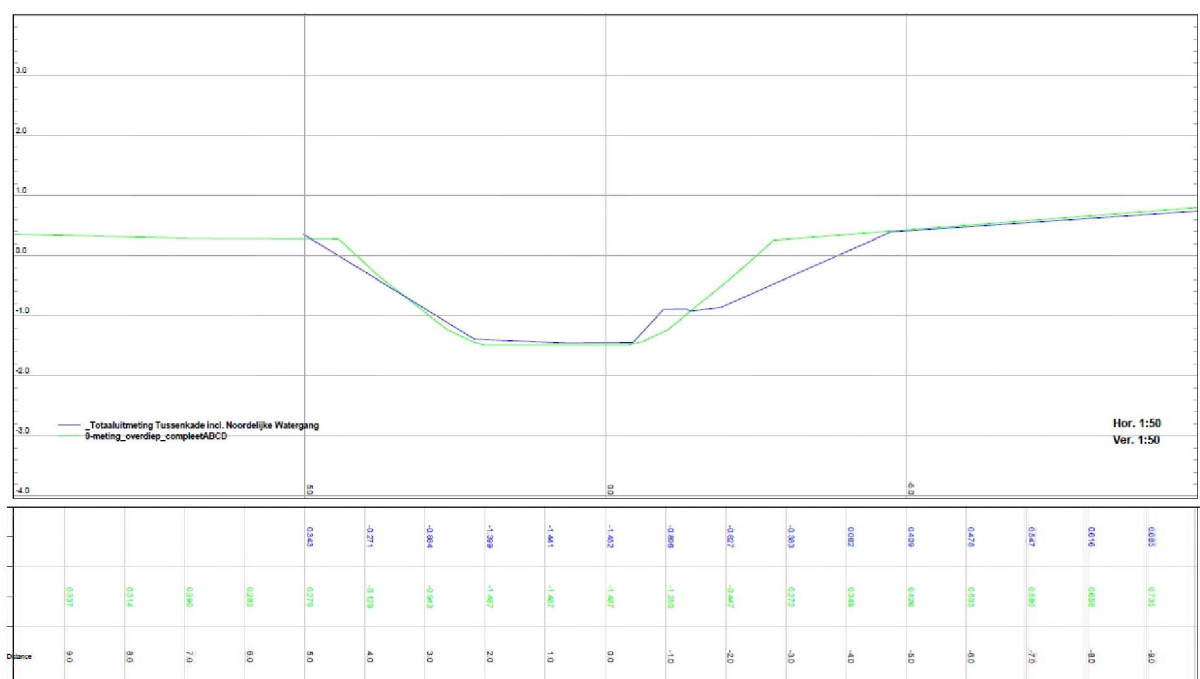
Referentie(s)

De belangrijkste van toepassing zijnde documenten gebruikt in deze memo zijn:

- [1] *Uitvoeringsplan Geotechniek, Rivierverruiming Overdiepse Polder, Combinatie Overdiep, ODP-TA-005, 01-02-2011*
- [2] *Dwarsprofielen opbarstingen Noordelijke Watergang, Combinatie Overdiep, 06-11-2015*
- [3] *Dijkverleggingsplan Overdiepse Polder, Witteveen en Bos, HT277-1, 01-12-2008*
- [4] *Reader Geotechniek voor het HBO, KIVI, 07-2014*

Representatief dwarsprofiel Noordelijke Watergang

Ter hoogte van KP0.501 heeft een afschuiving plaatsgevonden. Dit dwarsprofiel is qua afmetingen en hoogtes ook representatief voor de overige delen van de NW en wordt daarom in deze analyse als representatief beschouwd, zie figuur 3 voor het dwarsprofiel ter hoogte van KP0.501, ref. [2].



Figuur 3: Representatief dwarsprofiel Noordelijke Watergang, KP0.501, ref. [2]

Grondopbouw en -parameters

In het 'Uitvoeringsplan Geotechniek' ref. [1] is geconcludeerd dat de grondopbouw in de Overdiepse Polder redelijk homogeen is. In het plan zijn vier representatieve geotechnische profielen gemaakt (A t/m D). Geotechnisch profiel B is in het plan representatief beschouwd voor verreweg het grootste gebied. Aangezien er geen grondonderzoek bekend is ter plaatse van de NW, is gekozen om geotechnisch profiel B aan te houden in de analyse. Zie tabel 1 voor de aangehouden grondopbouw en -parameters. De parameters zijn afkomstig uit ref. [3].

Laag	BK laag [m NAP]	Laagdikte [m]	Grondsoort	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ'_{rep} [°]	c'_{rep} [kPa]
1	0,3	1,8	Klei, zandig	18,3	18,8	26,5	4,2
2	-1,5	0,7	Veen	10,2	11,0	15,2	7,0
3	-2,2	-	Zand, sterk siltig	18,0	20,0	25,0	0,0

Tabel 1: Grondopbouw en -parameters, representatieve waardenWaterstanden en stijghoogtes

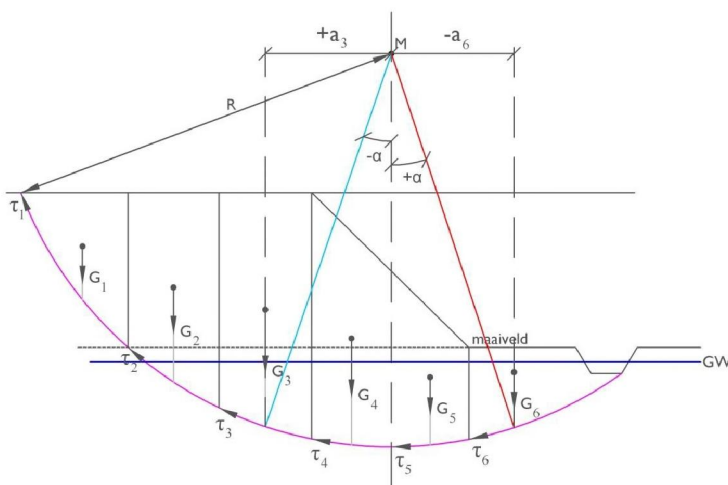
Het waterpeil in de NW is aangenomen op NAP -1,0 m, ref. [1]. De grondwaterstand is aangenomen op NAP -0,5 m, ref. [1]. De gemiddelde stijghoogte in de zandlaag is conform ref. [1] NAP +0,5 m. De waterstand in de Bergsche Maas kan een maximale hoogte van NAP +2,5 m bereiken voordat het de Overdiepse Polder in stroomt. Verwacht wordt dat bij deze maximale waterstand de stijghoogte in de zandlaag zal toenemen tot circa NAP +2,0 m.

Stabiliteitsanalyse

De stabiliteitsanalyse is uitgevoerd met het programma D-Geo Stability v15.1, methode Bishop.

Stabiliteitstheorie, ref. [4]

Methode Bishop is een van de meest gebruikte methodes voor het controleren van taludstabiliteit. De methode gaat uit van een cirkelvormig glijvlak en een afschuivende grondmoot, zie figuur 4. De afschuivende grondmoot wordt verdeeld in lamellen. Voor elke lamel wordt het verticaal- en momentenevenwicht bepaald.

**Figuur 4: Cirkelvormig glijvlak met schuifspanning, ref. [4]**

Het stabiliserend moment ($M_{\text{stabiliserend}}$) dient groter of gelijk te zijn aan het aandrijvend moment ($M_{\text{aandrijvend}}$), dan is het talud stabiel:

$$M_{\text{stabiliserend}} / M_{\text{aandrijvend}} = SF \text{ (veiligheidsfactor)} \geq 1 \quad (1)$$

Het stabiliserend moment ($M_{\text{stabiliserend}}$) en het aandrijvend moment ($M_{\text{aandrijvend}}$), worden als volgt gedefinieerd:

$$M_{\text{stabiliserend}} = R \sum (\tau_i * l_i) \quad (2)$$

$$M_{\text{aandrijvend}} = \sum (G_i * a_i) \quad (3)$$

Hierin is:

- R de straal van de glijcirkel
- i nummer van de lamel
- τ_i de schuifspanning voor lamel "i"
- l_i lengte van het schuifvlak van lamel "i" (rechtlijnig aangehouden)
- G_i het gewicht van de lamel "i"
- a_i de afstand van het middenpunt (M) van de lamel "i" tot de verticaal van de glijcirkel

De maximaal te leveren schuifspanning (τ) welke onderdeel uitmaakt van het stabiliserend moment, kan worden berekend met de volgende vergelijking:

$$\tau = c' + \sigma_v' * \tan(\varphi') \text{ (gedraineerde berekening)} \quad (4)$$

Hierin is:

- c' cohesie, effectief
- σ_v' verticale spanning, effectief
- φ' hoek van inwendige wrijving, effectief

De schuifspanning (τ) neemt dus af naar mate de effectieve spanning (σ_v') kleiner wordt. De effectieve verticale spanning (σ_v') volgt uit de volgende vergelijking:

$$\sigma_v - u = \sigma_v' \quad (5)$$

Hierin is:

- σ_v verticale spanning, totaal
- u waterspanning
- σ_v' verticale spanning, effectief

Uit de vergelijking is af te leiden dat de totale verticale spanning (σ_v) kleiner wordt naar mate de waterspanning (u) (stijghoogte) hoger wordt. Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat de te leveren schuifspanning en stabiliserend moment afnemen naar mate de stijghoogte (waterspanning) in een laag toeneemt.

Opbarsten veenlaag

Theoretisch kan de waterspanning (u) direct onder de veenlaag niet hoger zijn dan de totale verticale spanning (σ_v) op dat niveau, anders barst de veenlaag op. De bodem van de watergang ligt op NAP -1,5 m. De totale verticale spanning onder de veenlaag is in tabel 2 berekend:

Laag	Laag [m NAP]	Laagdikte [m]	Grondsoort /Water	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	σ_v [kN/m ²]
1	-1,0 t/m -1,5	0,5	Water	-	9,81	4,9
2	-1,5 t/m -2,2	0,7	Veen	10,2	11,0	12,6

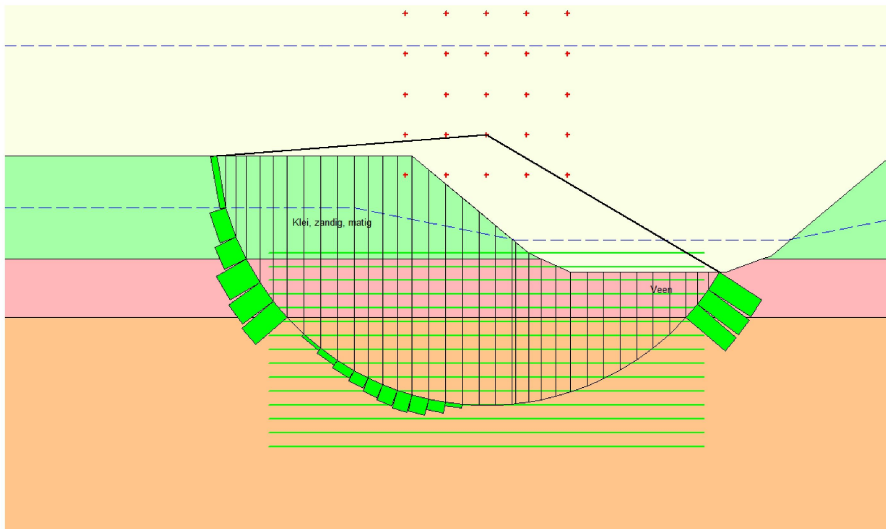
Tabel 2: Berekening totale grond onder veenlaag

De waterspanning direct onder de veenlaag kan in principe dus niet meer zijn dan 12,6 kN/m². Hieruit volgt dat de stijghoogte in de zandlaag theoretisch maximaal NAP -0,92 m hoog kan zijn (grenspotentiaal). Dit is dus lager dan de gemiddelde stijghoogte van NAP +0,5 m conform ref. [1]. In principe zou de veenlaag bij een gemiddelde rivierwaterstand dus moeten opbarsten. D-Geo Stability heeft echter een veiligheid tegen opbarsten ingebouwd, waardoor de waterspanning in het model niet groter kan worden dan de totale verticale spanning. Direct onder de veenlaag zal de waterspanning in de berekening dus ook 12,6 kN/m² zijn (verticaal evenwicht). Daarna neemt de stijghoogte toe met de diepte tot de ingevoerde stijghoogte in de zandlaag. Deze benadering is realistisch, omdat nergens op grote schaal opbarsten van de veenlaag (bodem) heeft plaatsgevonden. De waterspanning is direct onder de veenlaag dus werkelijk kleiner of gelijk aan de totale verticale spanning. De afname van de waterspanning is te verklaren door het ontsnappen van spanningswater door de veenlaag heen in de vorm van kwel. Waarschijnlijk is de doorlatendheid van de zandlaag relatief laag, waardoor zich een verhang kan instellen bij een beperkte uittreding van kwelwater.

De stabiliteitscontrole is uitgevoerd bij verschillende stijghoogtes in de zandlaag. De stijghoogtes zijn oplopend per halve meter gekozen vanaf NAP -1,0 m tot NAP +2,0 m (de maximaal verwachte stijghoogte).

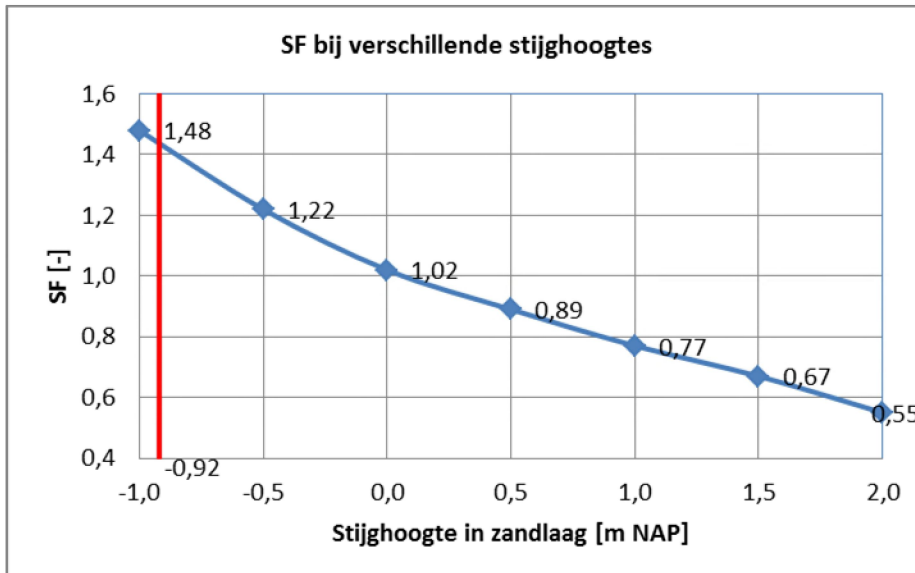
Resultaten

In figuur 5 is in het groen de door de grond te leveren schuifspanning (τ) te zien bij een stijghoogte in het zand van NAP +2,0 m. Zoals kan worden gezien wordt er haast geen schuifspanning geleverd in de zandlaag. Dit kan worden verklaard door de hoge stijghoogte, zie verg. (4).



Figuur 5: Kritische glijcirkel bij stijghoogte NAP +2 m

In de grafiek van figuur 6 is de SF (veiligheidsfactor) te zien bij de verschillende stijghoogtes, met de rode lijn is de grenspotentiaal (NAP -0,92 m) aangegeven. Te zien is dat de SF afneemt bij een hoger gekozen stijghoogte. Dit fenomeen is te verklaren doordat de effectieve verticale spanning (σ_v') en dus de sterkte afnemen ten gevolge van een hogere stijghoogte. Hoe hoger de stijghoogte hoe lager de sterkte van de grond.



Figuur 6: Grafiek SF bij verschillende stijghoogtes (representatieve sterkteparameters)

De SF dient groter of gelijk te zijn aan 1,0, dan biedt het weerstand-biedende deel voldoende kracht om afschuiving van het talud te voorkomen. In de grafiek is te zien dat bij een stijghoogte van NAP 0,0 m een SF van 1,02 hoort, hier vindt dus net geen afschuiving plaats. Te zien is dat bij een stijghoogte van NAP +0,5 m een SF van 0,89 hoort. Tevens is te zien dat bij de maximaal te verwachten stijghoogte van NAP +2,0 m de SF slechts 0,55 bedraagt.

Verklaring talud instabiliteit

Uit de resultaten blijkt dat bij de gemiddelde stijghoogte in de zandlaag van NAP +0,5 m een SF hoort van 0,89. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de taluds instabiel zijn en dus zullen afschuiven. Dit is zeer waarschijnlijk de reden voor de ontstane afschuivingen.

De grenspotentiaal speelt een belangrijke rol in de taludstabiliteit. Theoretisch kan de stijghoogte onder de veenlaag niet hoger worden dan NAP -0,92 m. Het is echter de vraag wat de werkelijke stijghoogte in de zandlaag is, en hoe de stijghoogte verloopt onder de taluds van de watergang en onder het poldermaaiveld.

Uit de stabiliteitsanalyse blijkt dat de stabiliteit van de taluds in grote mate afhangt van de stijghoogte in de zandlaag.

In figuur 7 is in het groen de door de grond te leveren schuifspanning te zien bij een stijghoogte in het zand van NAP +2,0 m. Daaruit blijkt dat er haast geen schuifspanning wordt geleverd in de zandlaag. Dit kan worden verklaard door de hoge stijghoogte, zie verg. (4). Dit verklaart de lage SF.

De maatregel 'verflauwen van taluds' is niet effectief, er wordt te weinig schuifspanning opgebouwd in de zandlaag vanwege de hoge waterspanning.

Maatregel 2: Bodemverzwaring toepassen

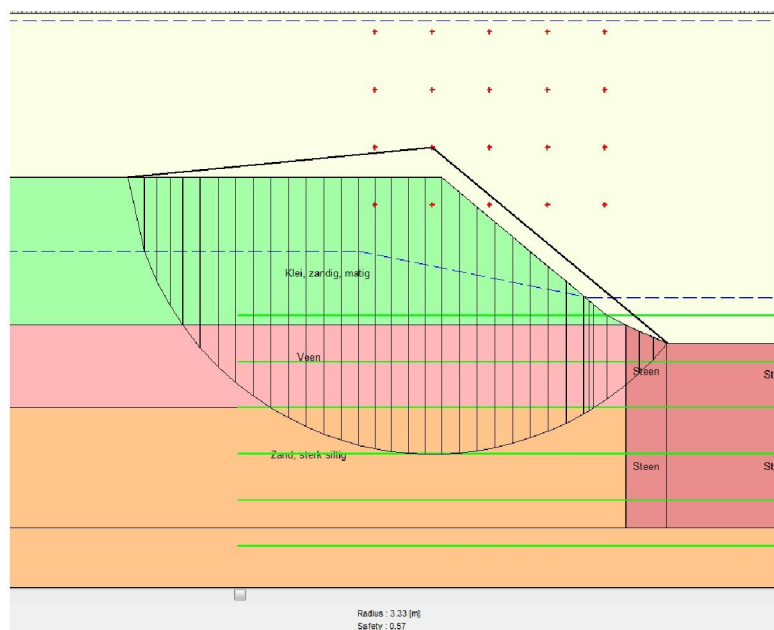
Als mogelijke oplossing kan ook worden gedacht aan een bodemverzwaring. De eerste twee meter (tot NAP -3,5 m) van de bodem worden dan ontgraven, daarna wordt een laag ondoorlatend geotextiel aangebracht. Op deze laag worden vervolgens stenen (of ander zwaar materiaal) gestort. Uitvoeringstechnisch is dit een uitdagende oplossing, er moet bijvoorbeeld bemaling toegepast worden om het (grond)waterpeil te verlagen, want geotextiel dient droog te worden aangebracht. Daarnaast dient nog bedacht te worden hoe de uiteindes van het geotextiel verwerkt zullen worden in de constructie. Het verwachte effect van de bodemverzwaring is dat de te leveren schuifspanning (τ) toeneemt, waardoor een afschuiving tegen kan worden gegaan. Dit is onderzocht met D-Geo Stability.

Voor de stortstenen zijn de volgende parameters aangehouden:

Grondsoort	γ_{dry} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ'_d [°]	c'_d [kPa]
Steen	20	20	40	0

Tabel 4: Parameters steen

Uit de analyse blijkt dat de kritische glijcirkel niet meer volledig onder de bodem door loopt. De verzwaring heeft dus wel degelijk effect. Ondanks de bodemverzwaring kan er niet genoeg veiligheid tegen afschuiven worden behaald, zie figuur 8. Het talud is dus nog steeds instabiel. Deze maatregel zou alleen in combinatie met taludverflauwing werken.



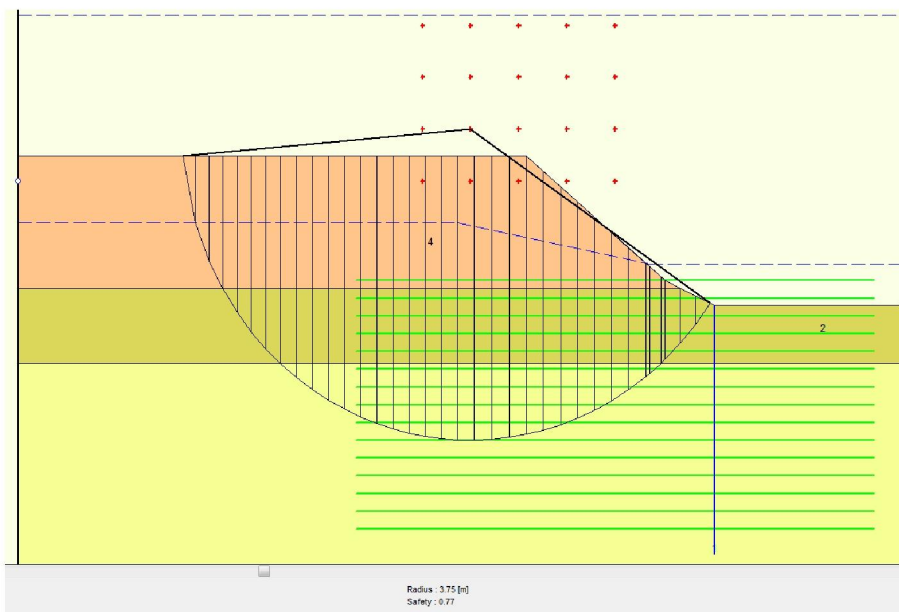
Figuur 8: Kritische glijcirkel oplossing 2 (SF: 0,57)

Maatregel 3: Damwand aanbrengen

Een damwand aanbrengen is in het algemeen een effectieve oplossing om een talud stabiel te krijgen. De damwand dient dan door de kritische glijcirkel heen geplaatst te worden, zodat deze wordt onderbroken. De damwand kan aan de onder- of bovenkant van het talud worden aangebracht.

Maatregel 3a: Damwand aanbrengen onderkant talud

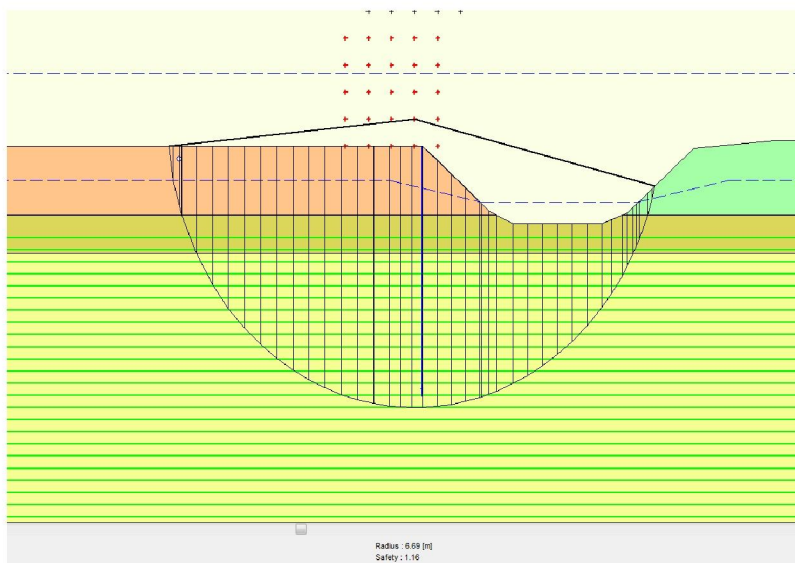
Allereerst is de optie bekeken waar de damwand aan de onderkant van het talud is geplaatst (NAP -1,5 m tot NAP -4,5 m), zie figuur 9. Net als bij de oplossing met de bodemverzwaring wordt de kritische glijcirkel verplaatst. De kritische glijcirkel heeft ondanks het toepassen van een damwand niet genoeg veiligheid tegen afschuiven (SF: 0,77).



Figuur 9: Kritische glijcirkel maatregel 3a (SF: 0,77)

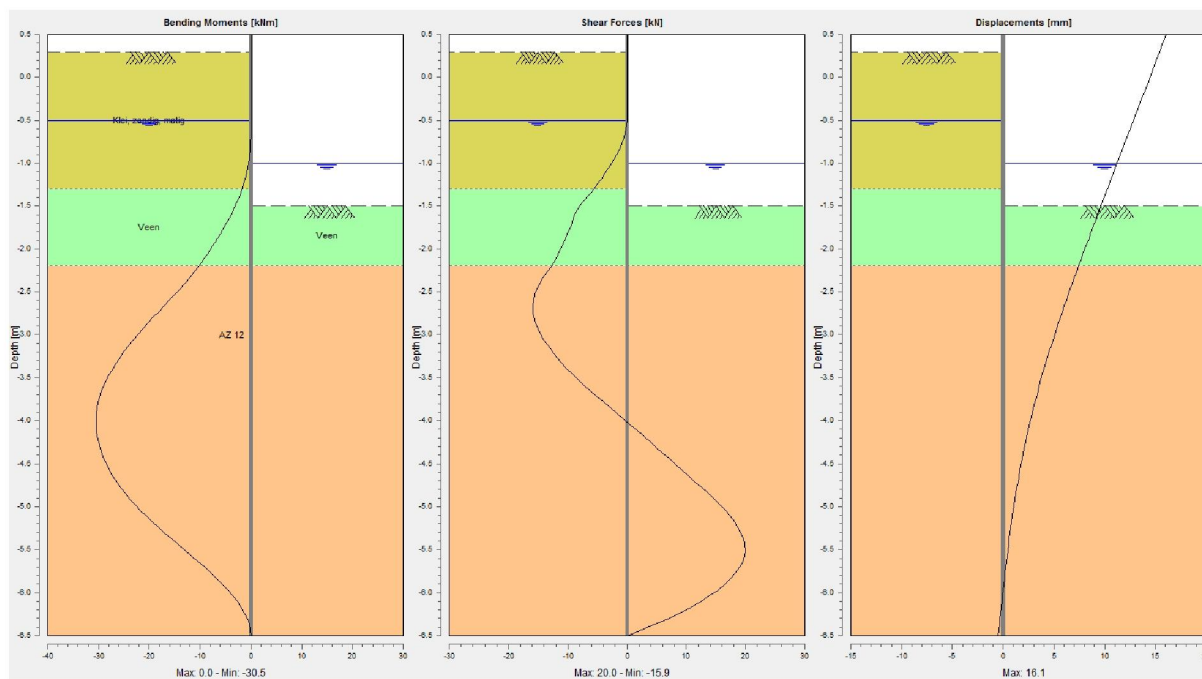
Maatregel 3b: Damwand aanbrengen bovenkant talud

Zoals beschreven kan de damwand ook aan de bovenkant van het talud worden aangebracht. Uit de analyse bleek dat de damwand tot NAP -5,5 m geplaatst dient te worden, om voldoende veilig te zijn tegen afschuiven (SF: 1,16), zie figuur 10.



Figuur 10: Kritische glijcirkel oplossing 3b (SF: 1,16)

Met het programma D-Sheet Piling v15,1 is een indicatieve berekening gemaakt voor de stabiliteit van de damwand. Bij deze indicatieve berekening is geen rekening gehouden met bovenbelasting. Damwandprofiel AZ 12 is gebruikt in de analyse. Uit de berekening kwam dat de damwand tot NAP -6,5 m geplaatst dient te worden om voldoende veilige constructie te verkrijgen, zie figuur 11.



Figuur 11: Resultaten damwand-berekening oplossing 3b

Een damwanddiepte tot NAP -5,5 m is dus benodigd om het talud stabiel te houden, maar om de damwand niet te laten bezwijken is een damwanddiepte tot NAP -6,5 m benodigd.

4. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

De stabiliteit van de taluds van de NW is in grote mate afhankelijk van de waterspanning in de onderliggende zandlaag. Stabiliteitsanalyses wijzen uit dat de bodem van de watergang theoretisch al opbarst bij een gemiddelde rivierwaterstand. Omdat de effectieve spanning onder het talud zeer laag is, zijn de taluds rekenkundig vrijwel niet stabiel te rekenen. Bij het onderzoeken van de mogelijke maatregelen bleek dat er daarom maar één oplossing voldoende veiligheid tegen bezwijken van het talud kan bieden, maatregel 3b. Bij deze oplossing dienen over de gehele lengte van de NW aan beide kanten vanaf de bovenkant van de taluds damwanden AZ 12 tot NAP -6,5 m te worden aangebracht. Dit is een erg kostbare oplossing.

Aangezien de bodem (nog) nergens op grote schaal is opgebarsten, is de aanname dat de waterspanning direct onder de veenlaag niet hoger zal zijn dan de totale verticale spanning realistisch. Om het risico op opbarsten beter in kaart te brengen is het raadzaam om peilbuizen in de zandlaag te plaatsen, zodat de stijghoogte in het zandpakket bepaald kan worden. Met de metingen kan ook een inschatting worden gemaakt van de maximaal optredende waterspanning tijdens hoogwater op de Bergsche Maas. Daarnaast wordt geadviseerd om de bodemopbouw beter in beeld brengen door middel van grondonderzoek. Mochten de metingen uitwijzen dat opbarsten van de bodem realistisch is, dienen er toch aanvullende maatregelen genomen te worden, bijvoorbeeld in de vorm van bodemverzwaring.

Met de beschikbare informatie is op dit moment de enige afdoende oplossing damwanden aan beide kanten over de gehele lengte van de NW aanbrengen vanaf bovenkant talud tot NAP - 6,5 m. Er wordt aangeraden grondonderzoek uit te voeren zodat er een nauwkeurigere analyse uitgevoerd kan worden en minder kostbare oplossingen bedacht kunnen worden.