


# POV-Macro stabiliteit

PvA Deelstudie “Opbarsten”

POV

MACRO  
STABILITEIT



Auteur: Gijs Hoffmans

Datum: 21 september 2015

Versie: 1



## Inleiding

In het dijkverbeteringsprogramma HWBP (= HoogWater Beschermings Programma) is een POV (= Project Overstijgende Verkenning) opgenomen aangaande het bezwijkmechanisme macrostabiliteit (afgekort POV-M). Hierin wordt de problematiek met inbegrip van de oplossingsrichtingen rondom macrostabiliteit op een landelijk niveau onder de loep genomen.

Eén van de aspecten is het vergroten van kennis over het gedrag van de bodem onder invloed van een hoge stijghoogte. De verwachting is dat hierdoor de benodigde versterkingsmaatregelen nauwkeuriger afgebakend kunnen worden en op termijn zelfs ingeperkt kunnen worden.

Het cluster rekenmethodieken binnen de POV-M kent acht onderzoeksporen, te weten:

- Benutten van de actuele sterkte;
- Sterkte in de opbarstzone;
- Niet stationair (tijdsafhankelijk) waterspanningsverloop;
- Rekenen met ongedraineerd materiaalgedrag (en kennis DOV toepasbaar maken voor alle dijken);
- Eisen en randvoorwaarden bij het rekenen aan complexe versterkingsconstructies in waterkeringen;
- Horizontale vervormingscapaciteit van paalfunderingen;
- EEM-modellering van constructies in dijken;
- Schematiseren van een 3D probleem.

Dit plan bespreekt de potentiële besparing voor het HWBP programma, de probleem- en doelstellingen en de producten voor het onderzoekspoor “Sterkte in de opbarstzone” voor 2015 met een doorkijk naar 2016 en 2017.



## Kostenbesparing

In de derde toetsronde is in Nederland van de totaal 777,5 km primaire keringen 301,8 km afgekeurd op macro-instabiliteit van het binnentalud (STBI) en 151,0 km is afgekeurd op macro-instabiliteit van het buitentalud (STBU). Uiteraard zijn trajecten voor meerdere faalmechanismen afgekeurd, echter met deze combinaties is hier vooralsnog geen rekening gehouden. Verwacht wordt dat door het beter modelleren van de sterkte bij opdrukken (opbarsten of opdrijven) een kostenbesparing kan worden behaald. Hoewel deze besparing lastig is te bepalen, wordt hieronder een eerste (grobe) schatting gemaakt, die zich richt op de macrostabiliteit van het binnentalud, waarbij opdrukken (= opbarsten of opdrijven) dominant is. In een latere fase zal deze schatting beter worden onderbouwd.

De traditionele oplossing voor dijkversterking bestaat uit aanberming en is relatief goedkoop. De kosten hiervan hangen sterk af van de complexiteit van het gebied. Daar waar sprake is van relatief dikke pakketten slappe lagen (dus opdrijven is maatgevend) en een lage stabiliteitsfactor (bijvoorbeeld in Zuid Holland) kan sprake zijn van 3 k€/m. In minder complexe gebieden variëren deze kosten van 1 k€/m tot 2 k€/m.

Op basis van bovengenoemde kentallen zou de versterkingsopgaaf circa 780 M€ bedragen. Echter rekening houdend met het eerder genoemde feit dat dezelfde trajecten voor meerdere faalmechanismen zijn afgekeurd, betekent dit dat de kosten voor versterkingsmaatregelen (voor macrostabiliteit van het binnentalud) de komende jaren op 400 M€ tot 700 M€ kunnen uitkomen (Bron: Kansenscan Business Cases nHWBP 2013).

Voor de potentiële kostenbesparing wordt aangenomen, dat in de afgekeurde trajecten de versterking in grond voor 85% speelt (dus 15% betreft constructieve oplossingen). Ook wordt aangenomen dat opdrukken voor 25% van de in met grond versterkte dijken aan de orde is (dus 25% van de genoemde 85%). Indien een kwart kan worden bespaard, dan kan de benodigde berm lengte vermoedelijk al gauw met enkele meters reduceren.

Uit een dijkversterkingsonderzoek voor Waterschap V&V, project EEM en randmeerdijken (zie ook Deltares project HWBP 1203849.065) volgt dat de besparing door 2 m minder berm lengte op 100 euro/m is becijferd (uitgaande van materiaal (klei) grondaankoop landelijk gebied, risico-opslagen en engineering). Hiermee zou de potentiële besparing uitkomen op:  $50 \text{ tot } 100 \text{ €/m} * 301,8 \text{ km} * 25\% * 85\% = \underline{3 \text{ tot } 6 \text{ M€}}$ .

In bovengenoemde analyse is in de geest van de vigerende leidraden gehandeld, i.e. toepassing van  $c'$  en  $\varphi' = 0$  en gerekend met een opdrukveiligheid van 1,20 of lager. Indien dit niet het geval is (meerdere toetsingen zijn uitgevoerd, waarbij uitsluitend  $c'$  en  $\varphi' = 0$  is gebruikt met een opdrukveiligheid van 1,0 of minder), is er mogelijk geen besparing op de versterkingskosten. Daar staat tegenover dat de grote onzekerheid in de modellering van opdrukken voor macrostabiliteit met het voorgestelde onderzoek kan worden verminderd. En er inzicht ontstaat in het effect van het voorgestelde rekenprotocol met  $c'$  en  $\varphi' = 0$  bij opdrukveiligheid 1,20.

Hoewel hier niet uitgewerkt, kan ook bespaard worden op de versterkingskosten in de overige onderzoeksporen binnen de POV Macrostabiliteit. Daarom wordt aanbevolen om hiervoor ook besparingsanalyses te maken. Een eventuele praktijkproef in een vervolgfase

kan mogelijk voor meerdere onderzoeksporen worden gecombineerd. De potentiële besparingen dienen uiteraard te worden afgezet tegen de kans op succes en de kosten van het onderzoek.

Hetzij opgemerkt dat de hierboven gegeven kostenbesparing een eerste grove inschatting is die aanscherping behoeft. In het kader van deze opdracht zal dat worden gedaan middels de consequentieanalyse (zie verder in deze notitie).

## Probleemstelling

De sterkte aan de passieve zijde van de waterkering wordt bij hoogwater door de verhoogde waterdruk in het pleistocene zandpakket nadelig beïnvloed als gevolg van de afname van de effectieve spanningen in de holocene afdeklaag. In extreme omstandigheden kan dit leiden tot het opdrukken (= opdrijven of opbarsten) van de holocene afdeklaag. Afhankelijk van de hoogte en tijdsduur van de buitenwaterstand zal deze invloed over een grotere lengte landinwaarts optreden. Dit heeft een nadelige invloed op de macrostabiliteit. De schuifspanning tussen zand en afdeklaag reduceert tot nul en de sterkte in de afdeklaag neemt af. In de onderstaande foto's is getracht middels een proefsleuf duidelijk te maken wat in een veenlaag met hoge waterdruk in de zandlaag eronder plaatsvindt.



*Bron foto's: beeldbank ARCADIS*

Thans is geen breed gedragen en eenduidige methode beschikbaar voor het schematiseren van de sterkte in de opdrukzone en dus voor het berekenen van de macrostabiliteit (binnenwaarts). Hierdoor ontstaat het risico dat een onjuiste waarde in de schematisering wordt aangehouden of dat de beoordeling van de waterkering (te) sterk gaat leunen op expert judgement. Dit mede omdat de vigerende leidraden (evenals de reeds vervallen leidraden) hierover niet eenduidig zijn.





## Doelstellingen

Bij opdrukken kan zich het geval voordoen, dat het gehele afdekkende pakket gaat drijven (opdrijven). Bij opdrukken kan ook de laag door overdruk kapot gaan (opbarsten). Opbarsten kan optreden bij relatief geringe dikte van het slappe lagenpakket. Het doel van het totale onderzoek is om vast te stellen wanneer de mechanismen opdrijven en opbarsten optreden en om een juiste rekenprocedure vast te stellen voor de sterkte in de opdrukzone en die geaccepteerd en geïmplementeerd te krijgen voor de adviespraktijk.

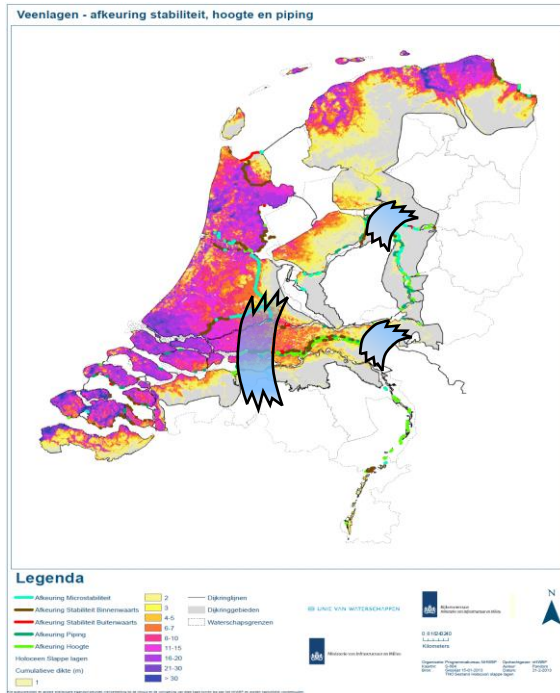
Dit doel wordt onder meer met het uitvoeren van een literatuurstudie en het opstellen van een conceptueel model voor opdrukken (opbarsten en opdrijven) gerealiseerd.

Gezien de hoofddoelstelling van het HWBP (kortweg slimmer, goedkoper en sneller) is het in deze fase belangrijk, dat de consequenties van een betere modellering voor opdrukken in kaart worden gebracht. Het resultaat zal inzicht geven in de gevoeligheid van het veiligheidsoordeel voor schematiseringskeuzes voor de meeste dijktrajecten langs het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn/Lek en de grootste dijkkring langs de Waal. Hierop kunnen de kosten voor de geplande dijkverbeteringen worden afgestemd. Evenzo is het mogelijk om 'nut en noodzaak' van vervolgonderzoek naar de werkelijke sterkte van grond onder opdrukcondities in te schatten. Het onderzoek richt zich tot het rechtvaardigen van het uitgeven van 2 ME dat verband houdt met de mogelijke besparingen in Nederland.

Indien uit het voorgaande onderzoek blijkt dat nader onderzoek wenselijk is, dan wordt voor het vervolgonderzoek voornamelijk gedacht aan het uitvoeren van een grootschalige praktijkproef of centrifugeproef, toetsen van de metingen in de praktijk en verbeteren van het conceptuele model. In het vervolgonderzoek zal ook aandacht moeten uitgaan hoe opdrukken gemodelleerd moet worden met EEM (zie verder in dit PvA)

In de figuur hier rechts zijn op basis van gebiedskennis en de resultaten van de LRT3 gebieden met een “blauw plakkertje” gemarkeerd, waar de deklaag gevoelig is voor opdrijven. De veiligheid tegen opdrukken ligt daar tussen 1,0 en 1,2.

De riviergedeelten tussen de markeringen (dijkringen: 43, 44, 49 en 50) zijn gevoelig voor opbarsten (opdrukveiligheid < 1,0). Een uitzondering hierop vormen dijkkring 52 met relatief veel hoog achterland en dijkkring 51 met veel verholten keringen.



Momenteel is het nieuwe WTI in ontwikkeling, waarin ongedraineerd rekenen wordt geïmplementeerd. Om deze implementatie beter vorm te geven en in een nieuwe toetsronde macrostabiliteit beter te modelleren is het nodig, nu al afstemming te zoeken met het WTI. Door middel van samenwerking tussen WTI en POV macrostabiliteit, kan gehoor worden gegeven aan de roep om dijken ‘beter’ te toetsen en minder dijken ‘onterecht’ af te keuren. Daarnaast kan op basis van een ‘praktijkdijk’ het WTI worden getest en kunnen eventuele optimalisaties nog in de ontwikkeling worden meegenomen. Het streven is om gaandeweg het onderzoek steeds meer duidelijkheid te verkrijgen of het uitvoeren van een praktijkproef zinvol is.

## Producten

### Inleiding

In 2015-2016 worden de volgende producten gerealiseerd:

- Literatuurstudie;
- Conceptuele fysische beschrijving van opdrukken (opbarsten of opdrijven) in relatie tot stabiliteitsverlies;
- Consequentieanalyse voor de referentieprojecten waar opdrukken (opbarsten of opdrijven) speelt (met DAM);
- Plan van aanpak voor vervolg.

Bovengenoemde producten worden in de navolgende paragrafen gedetailleerder omschreven. In het plan van aanpak voor vervolg wordt een doorkijk naar 2016 en 2017 gegeven.

### Literatuurstudie

De literatuurstudie kent een bepaalde volgordelijkheid. Eerst wordt de vraagstelling nader afgebakend, bijvoorbeeld waar zou stabiliteitsverlies van grond optreden in relatie tot opdrukken van de deklaag? Welke praktijkervaringen zijn er binnen het vakgebied waterkeringen en daarbuiten?

Daarna worden de informatiebronnen (rapporten/publicaties/abstracts) gezocht, die een bijdrage aan de vraagstelling leveren. Deze bronnen hebben betrekking op het falen van grond. Falen van grondconstructies en grond gerelateerde constructies (bouwputten, funderingen, grondwerk) vormen een belangrijke schadepost, in zowel de utiliteits- en woningbouw als de grond-, weg- en waterbouw. Verschillende experts binnen Deltares en ARCADIS hebben ervaringen met bovengenoemde schades opgedaan. Zij zullen feedback geven en sleutelwoorden aanreiken voor het selectief zoeken in de Literatuur.

Vervolgens worden, indien nodig, criteria geformuleerd, waarmee schadegevallen gefilterd kunnen worden. Dit kan een herhalend proces zijn, aangezien de hoeveelheid (te veel of te weinig) of de relevantie van de resultaten aanleiding kunnen zijn om de informatiebronnen aan te passen.

Ten slotte worden de relevante informatiebronnen bestudeerd. Dit betreft op het eerste gezicht toepasbaar lijkende titelbeschrijvingen met bijvoorbeeld abstracts en het verkrijgen van de betreffende documenten.

Het eindproduct/rapport geeft een overzicht van (Nederlandse en buitenlandse) casussen waarbij in bijvoorbeeld bouwputten opbarsten/opdrijven heeft plaatsgevonden. De studie beschrijft beknopt het falen en geeft de relatie met opbarsten/opdrijven bij dijken.

### Conceptuele fysische beschrijving

Wanneer het water in de rivier stijgt, stroomt het grondwater onder de dijk naar het achterland en verhoogt de waterspanningen onder de slecht doorlatende laag. In het

beneden-rivierengebied bestaat de (min of meer) waterdichte laag meestal uit een veenlaag/kleilaag en in het bovenrivierengebied uit een kleilaag. Indien de opwaartse kracht groter is dan de neerwaartse kracht, dan zal de slecht doorlatende laag opdrijven. Deze stelling kan gemakkelijk met de Wet van Archimedes of met de welbekende rekenregel van Terzaghi voor opdrukken worden nagegaan (opwaartse drukgradiënt (= belasting) is gelijk aan de neerwaartse drukgradiënt (= sterkte)).

In het vigerende TRWG (= Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies) wordt nog geen onderscheid gemaakt tussen opdrijven en opbarsten, terwijl in het concept TRMD (= concept Technische Rapport Macrostabiliteit bij Dijken) tussen deze twee mechanismen voor de deklaag een arbitraire dikte van 4 m wordt aangehouden. Indien de deklaag dunner is dan 4 m en indien de optredende drukgradiënt de kritische waarde (= neerwaartse gradiënt door het ondergedompeld gewicht) overschrijdt, dan treedt opbarsten op, anders opdrijven. Bij opbarsten wordt aangenomen dat er (verticale) scheuren zijn, waarbij het kwelwater verticaal naar het maaiveld toestroomt. Bij opdrijven wordt de kwel als gevolg van de lage doorlatendheid verwaarloosd.

Thans is voor opdrijven het LiftVan model vigerend en staat dus niet ter discussie. Bij macrostabiliteit heeft het glijvlak in de prototype situatie ongeveer een breedte (evenwijdig aan de dijk) van 50 m tot 100 m. Indien in dat glijvlak een opbarstkanaal zit, is de afname van de schuifweerstand zeer waarschijnlijk te verwaarlozen. Indien de deklaag volledig verbrokken is, dan zal deze laag geen bijdrage leveren aan de schuifweerstand. Dit zijn twee uiterste varianten. De kernvraag is nu: "Hoe is de krachtsoverdracht bij een aantal opbarstkanalen op een rij?". Ook is onduidelijk wat de potentiaal in de zandlaag is. Blijft de potentiaal na opbarsten hoog, indien de maximale stijghoogte groter is dan het gewicht van het slappe lagen pakket (veiligheid tegen opdrukken = 1)?

In het TRMD wordt geen rekening gehouden met enerzijds de gestructureerdheid van grond en anderzijds erosie van zand in verticale scheurtjes. Recent onderzoek naar de erosiegevoeligheid van grasbekledingen heeft aangetoond, dat de 1 meter dikke kleilaag op de zandige kern (b.v. Boonweg in Friesland) geheel gestructureerd is (zie ook het Technisch Rapport Klei voor Dijken). Deze deklaag heeft een relatief hoge doorlatendheid; gelijksoortig met zand, omdat door temperatuurswisselingen en biologische activiteiten van o.a. wormpjes, torretjes en muizen en chemische bodemvormende mechanismen (verticale) scheuren ontstaan.

Begin jaren tachtig heeft Sellmeijer (1981) experimenteel onderzoek verricht naar de kritische drukgradiënt in verticale drains, i.e., vergelijkbaar met verticale scheuren. In deze proeven neemt de verticale filtersnelheid toe, terwijl het toelaatbare verhang in grootte afneemt. Hij toonde aan, dat de kritische drukgradiënt, waarbij zandtransport optreedt, ongeveer gelijk is aan 1/3. Deze waarde komt goed overeen met besproken waarden in de Literatuur, zie bijvoorbeeld het ICOLD-bulletin (2013).

Het US Corps of Engineers past voor het faalmechanisme piping een "vertical exit gradient" toe. Hiervoor hanteren de Amerikanen een toelaatbare grens van 1/2. Zeer recent heeft Deltares (Bezuijen et al. 2015) aangetoond, dat bij verticale scheuren de toelaatbare drukgradiënt in het Pleistoceen kleiner is dan 1. Omdat de relatie tussen stromend grondwater en het transport van zandkorrels niet altijd wordt doorgrond/begrepen, wordt in

deze studie het 'begin van bewegen' van zandkorrels in het invloedsgebied van opbarstkanaaltjes nader omschreven.

Het eindproduct van deze studie beschrijft bovengenoemde processen (gestructureerdheid van grond en het begin van bewegen van zandkorrels in verticale scheuren) in relatie tot het verlies van de binnenwaartse macrostabiliteit (aantal opbarstkanalen op een rij). Evenzo dient de arbitrair gekozen waarde van 4 m onderbouwd te worden. Al schetsend zal voor een drietal situaties de sterkteafname (die voor macrostabiliteit van belang is) worden benaderd (een opbarstkanaal, een rij opbarstkanalen en een tussenvariant). Omdat deze studie qua omvang moeilijk is in te schatten is mogelijkserwijs een vervolgstudie wenselijk.

## Consequentieanalyse

Om een consequentieanalyse uit te voeren op het gebied van macrostabiliteit, dienen op een eenvoudige, snelle en gestructureerde wijze berekeningen te worden uitgevoerd. Op voorhand is dit op twee manieren mogelijk, namelijk met de batch module van D-GeoStability en met DAM (= Dijksterkte Analyse Module).

D-GeoStability kan in batch rekenen, zodat met één druk op de knop doorsneden opnieuw worden doorgerekend. Variaties in grondeigenschappen kunnen automatisch worden doorgevoerd met eenvoudige scripts, die voor elk project afzonderlijk geschreven worden. Deze methode kan voor elke situatie op maat worden uitgevoerd en heeft als voordeel dat bestaande schematisaties één op één worden overgenomen.

Het rekenmodel DAM voert automatisch de analyses voor het bepalen van dijksterkte uit en is generiek opgezet. Dat wil zeggen dat gemakkelijk andere rekenmodules of andere softwareapplicaties op het systeem kunnen worden aangesloten. Op dit moment kan gebruik worden gemaakt van verschillende gevalideerde rekenmodellen (zie

<http://oss.deltares.nl/web/dam/rekenmodellen>). Voorwaarde bij het gebruik van DAM is dat bestaande berekeningen eerst geschikt moeten worden gemaakt voor gebruik. Zo moet de geometrie (kruin, teen, sloot, etc.) gedefinieerd worden en moeten waterspanningen opgegeven worden.

Voorgesteld wordt om de relevante dijktrajecten in DAM te modelleren c.q. schematiseren, omdat Deltares al eerder ervaring heeft opgedaan met verschil tussen gedraineerd en ongedraineerd materiaalgedrag en verschil tussen stationair en niet-stationair rekenen. Bovendien zijn meerdere consequentieanalyses voor de POV Macrostabiliteit nodig (zoals hierboven vermeld), die met DAM zullen worden bepaald. Ander argument is dat alle sommen van waterschap Rijn en IJssel (dijkkringen 47 tot en met 51) reeds in DAM beschikbaar zijn.

Met DAM kunnen op relatief eenvoudige wijze, veel dwarsprofielen met verschillende schematisaties en/of rekenmodellen worden doorgerekend. Op deze wijze zal de veiligheid tegen afschuiving en de benodigde berm lengte voor een groot aantal dwarsdoorsneden in beeld worden gebracht. De resultaten hiervan worden onder andere gekoppeld aan:

- Toetsoordeel en de daarop gebaseerde programmering van het HWBP;

- Technisch Rapport Macrostabiliteit; sleutelparameters zijn daarbij het gekozen berekeningsmodel (Bishop, UpliftVan en Spencer-Van der Meij) en de wijze waarop de schuif-sterkte in de opdrukzone wordt gereduceerd;
- Wettelijke toetsinstrumentarium (WTI-2017).

Door in een bestaande situatie (reeds gemodelleerde dwarsdoorsnede), die slecht scoort op macrostabiliteit bij opdrukken geotechnische analyses uit te voeren, kan een relatie worden gelegd tussen enerzijds het toetsoordeel en de noodzakelijk geachte verbeteringen en anderzijds wijzigingen in rekenregels en ontbrekende kennis over de noodzaak van verbeteringen.

Vooralsnog wordt gedacht om de volgende schematisaties te analyseren:

- De werkwijze bij opdrukken, volgens de 'intentie' van de vigerende leidraden, waarbij de methode Bishop wordt toegepast, de sterkte in de opdrukzone tot nul wordt gereduceerd ( $c'$  en  $\varphi' = 0$ ) bij een veiligheid tegen opdrukken  $\leq 1,20$ ;
- De werkwijze, waarbij alleen de sterkte in de opdrukzone tot nul wordt gereduceerd, bij een opdrukveiligheid van 1,0. Voor een opdrukveiligheid tussen 1,0 en 1,2 wordt gerekend met ongereduceerde sterkte (In de praktijk blijkt sprake te zijn van een verschil in inzicht waardoor ook een opdruk criterium van 1,0 wordt gehanteerd, waarbij de sterkte wordt gereduceerd tot nul);
- Een werkwijze conform het concept TRMD, waarbij de sterkte in de opdrukzone tot nul wordt gereduceerd bij een veiligheid tegen opdrukken  $< 1,0$ . Voor  $N_{opdr.} < 1,2$  kan de waarde voor  $c'$  en  $\tan \varphi'$  (of de ongedraineerde schuifsterkte) worden vermenigvuldigd met de factor  $5 * (N_{opdr.} - 1,0)$ . De  $c'$  en  $\varphi'$  (of de ongedraineerde schuifsterkte) varieert dus van 0% (bij  $N_{opdr.} = 1,0$ ) tot 100% (bij  $N_{opdr.} = 1,2$ ), van de oorspronkelijke waarde;
- Volgens de vigerende leidraden wordt bij opdrukken alleen het Bishop model gehanteerd. In deze studie wordt voorgesteld om naast het Bishop model ook het model van Spencer-Van der Meij te hanteren en als controle LiftVan berekeningen uit te voeren;
- Voor alle doorsnedes wordt verkend wat de invloed is van ongedraineerd materiaalgedrag, waarbij de Su-ratio wordt ingeschat op basis van de eerste ervaringen uit de nieuwe proevenverzamelingen van WSRL en HHD.

De analyses worden uitgevoerd voor verschillende dikten van het pakket slecht doorlatende lagen.

De resultaten worden in een uitgebreide rapportage vastgelegd. De sporen zijn: consequenties wel/geen  $c'$  en  $\varphi' = 0$ , gevolgen toepassing Spencer-Van der Meij, gevolgen grenspotentialiaal bij opbarsten ( $N_{opdr.} = 1$ ), effect laagdikte, effect ongedraineerd rekenen en synthese van de resultaten en koppeling met WTI2017. De inhoudsopgave zal er globaal als volgt uit zien: 1) Inleiding, 2) Projectbeschrijving, 3) Analyse dijkdoorsnedes ( $c'$  en  $\varphi' = 0$ , Bishop versus SVM en ongedraineerd versus gedraineerd), 4) Weging van de resultaten, 5) Conclusies en 6) Aanbevelingen (o.a. voor veldproef opdrijven/opbarsten).

## Plan van aanpak (voor vervolg 2016 en 2017)

Als uit het voorgaande onderzoek blijkt dat nader onderzoek wenselijk is, wordt voor het vervolgonderzoek gedacht aan de volgende activiteiten:

1. Verbeteren conceptueel model;
2. Kijkproeven voor het kwalitatief toetsen van het model (het verkennen en begrijpen van het mechanisme);
3. Fysieke modelproeven (bestaande uit 1:1 proef of middels proeven in de geo-centrifuge of grote bak);
4. Toetsen aan metingen in de praktijk;
5. Aanpassing conceptueel model (zie ook punt 1);
6. Acceptatieproces via ENW/klankbordgroep van de POV-M (Werkgroep evaluatie Dijkversterking);
7. Implementatie van het rekenmodel in de adviespraktijk.

Bovenstaande activiteiten worden hieronder nader beschreven.

### Ad 1. Verbeteren conceptuele model

Op basis van de voortgang en de voorlopige conclusies worden ten aanzien van het conceptuele model aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.

### Ad 2. Kijkproeven

Ervan uitgaande dat vervolgonderzoek wenselijk is, wordt in de periode 2016-2017 in eerste instantie aandacht besteed aan het verkennen en begrijpen van het mechanisme opbarsten middels het uitvoeren van kijkproeven (treedt opbarsten op of opdrijven?). Wanneer treedt opbarsten op (laagdikte, waterspanning, grondsoort, heterogeniteit, discontinuïteiten)? Hoe ziet dit eruit? Het inrichten van de kijkproeven is mede afhankelijk van de resultaten van de ontwikkeling van het conceptuele model. Op basis van de kijkproeven kan het conceptuele model worden verbeterd.

### Ad 3. Fysieke modelproeven

Vervolgens worden meer geavanceerde, kwantitatieve modelproeven uitgevoerd. Vooralsnog wordt gedacht aan het uitvoeren van enkele centrifugeproeven. Hierbij zijn de omstandigheden (zoals laagdikte, waterspanning, etc.) nauwkeurig in te stellen en te variëren, zodat er een één-op-één-relatie ontstaat met de schematisering in het rekenmodel.

Naast het uitvoeren van deze fysieke modelproeven wordt ook voorgesteld de sterkte in de opbarstzone met lab- en terreinproeven te bepalen. Wellicht is het nodig om vooraf opbarstkanaaltjes in de proefopstelling (onder 1G) te creëren. Schaling van de laagdikte is dan uiteraard 1:1. Hier kan onder andere met sonderingen voor en na opbarsten de eventuele sterktevermindering worden bepaald.

Hoewel het uitvoeren van fysieke modelproeven kostbaar is, is het wenselijk, omdat thans weinig bekend is over de reducerende sterkte van de ondergrond tijdens of na het opbarsten. Daarnaast kan worden gesteld dat door het uitvoeren van proeven de onzekerheid in de modellering wordt verkleind. Een proef kan mogelijk voor meerdere onderzoekssporen



binnen de POV macrostabiliteit worden gecombineerd. Hierbij wordt gedacht aan 'Niet stationair (tijdsafhankelijk) waterspanningsverloop'.

Ad 4. Toetsen aan metingen in de praktijk;

De proefresultaten bieden de mogelijkheid om het conceptuele model kwantitatief te toetsen en te valideren. Het resultaat is dat de processen in het veld beter voorspelbaar zijn. Met de toepassing van het rekenmodel in de praktijk wordt de cirkel van de innovatiecyclus gesloten.

Ad 5. Aanpassen conceptueel model

Op basis van de waarnemingen/metingen (zie stappen 2, 3 en 4) kunnen de uitgangspunten van het conceptueel model (zie ook stap 1) worden bijgesteld/aangepast. Vernieuwde inzichten ten aanzien van het stabiliteitsverlies bij opbarsten zouden moeten leiden tot een verbetering van het conceptuele model. Deze stap moet worden beschouwd als een evaluatie moment. Wat hebben we tot nu toe geleerd?

Omdat de bodem tijdens hoogwater vervormd, is het nuttig om verkennende berekeningen met EEM of met MPM te maken. Wat is de relatie tussen vervorming en opbarsten/opdrijven?

Ad 6. Acceptatieproces via ENW

Relevante ontwikkelingen qua modellering zullen in samenspraak met de opdrachtgever en de Werkgroep Evaluatie Dijkversterking aan ENW voor advies worden voorgelegd.

Ad 7. Implementatie van het rekenmodel in de adviespraktijk.

Wanneer ENW haar goedkeuring heeft verleend, dient de nieuwe methode van omgaan met opbarsten te worden geïmplementeerd in de adviespraktijk. Er zal een implementatieproces moeten worden doorlopen. Er is namelijk sprake van een nieuw onderdeel binnen een bestaande techniek.



## Referenties

HWBP 1203849.065

ICOLD

Kansenscan Business Cases nHWBP 2013

Technisch Rapport Macro stabiliteit (TRMD)

Technisch Rapport Klei op dijken

Pilot DAM Waterschap Rijn en IJssel (10 maart 2014)