

**Datum**

29 juni 2021

Aantal pagina's

1 van 14

Contactpersoon

Alexander van Duinen, Marc Hulst,
Harm Rinkel, Han Knoeff

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8208

E-mail

Han.Knoeff@deltares.nl

Onderwerp

Rode draad overstrooming door macrostabiliteit

Dit document is tot stand gekomen door overleg tussen RWS WVL, HWBP en Deltares. Het gaat om een gezamenlijk document met een gezamenlijke visie op het faalmechanisme macrostabiliteit en de faalpaden die als gevolg van macro-instabiliteit tot overstrooming kunnen leiden. Doel van dit document is het geven van overzicht over de huidige stand van zaken van de kennis en de kennisleemtes ten aanzien van macrostabiliteit. Dit document geeft aanknopingspunten voor de communicatie binnen de genoemde organisaties, maar ook met waterkeringbeheerders, over initiatieven voor onderzoek rondom macrostabiliteit. Met dit document wordt beoogd richting te geven aan de vraag welk onderzoek in welke situatie zinvol is in verband met de impact die het onderzoek kan hebben op het faalpad c.q. de overstroomingskans (rode draad). Bij het opstellen van plannen van aanpak voor Kennis voor Keringen (KvK), de Kennis en Innovatie Agenda (KIA) of het Strategisch onderzoek van Deltares kan op dit document worden aangesloten. Dat moet helpen om te zien waar raakvlakken zijn of om te voorkomen dat zaken dubbel worden gedaan. Door met plannen van aanpak aan te sluiten op dit document kan ook helder worden aangegeven wat de achtergrond van een onderzoeksvoorstel is. Daarnaast kan het document helpen met het afstemmen van de visies en de onderzoeksprogramma's van RWS (Kennis voor Keringen, KvK), HWBP (Kennis en Innovatie Agenda, KIA) en Deltares (Strategisch onderzoek) en het gezamenlijk prioriteren van onderzoeksonderwerpen.

Uiteraard kunnen er ook andere overwegingen zijn om een onderzoek op te starten in relatie tot dijkversterkingsprojecten. Dat kan zijn vanuit een LCC-benadering, duurzaamheid, CO₂-reductie etcetera. Vanuit KIA en het SO-programma van Deltares is hier ook aandacht voor. In dit document wordt echter alleen ingegaan op kennis en kennisleemtes ten aanzien van macrostabiliteit in de context van de overstroomingskansbenadering en de faalpaden-benadering.

In dit document wordt ook niet ingegaan op de relatie tussen NWO's, kabels en leidingen en macrostabiliteit. Langsconstructies voor het reduceren van de overstroomingskans door macro-instabiliteit komen in dit document kort aan de orde. Voor langsconstructies wordt ook een separate Rode draad notitie opgesteld.

Continue worden zowel bij Kennis voor Keringen als HWBP KIA en het SO-programma van Deltares diverse onderzoeksvoorstellen ingediend. Deze voorstellen hebben vaak betrekking op verbetering van een individuele schakel in de keten van gebeurtenissen die leidt tot een overstrooming. Een keten van gebeurtenissen die tot overstrooming leidt wordt ook wel een faalpad genoemd. Om de voorstellen op elkaar af te stemmen en ten behoeve van de prioritering van onderzoeksvoorstellen is het van belang om de onderzoeken in de keten te plaatsen. Het overzicht dat hieruit volgt, geeft ook inzicht in relevante kennisleemten die nog niet in de onderzoeksprogramma's worden opgepakt.

Keten van gebeurtenissen overstroming door macrostabiliteit

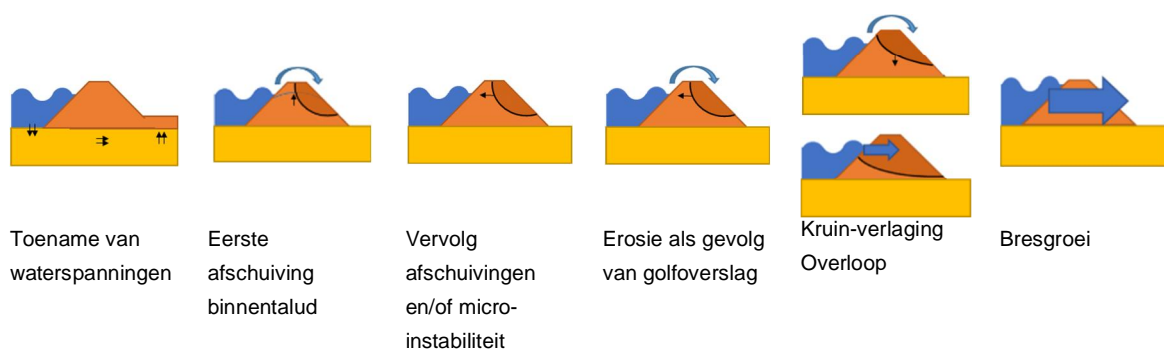
Verschillende faalpaden waarbij macrostabiliteit tot overstroming leidt, kunnen worden geïnitieerd:

1. **Binnenwaartse macrostabiliteit** leidt tot overstroming (STBI)
 - a. Bij opdrijven / opbarsten
 - b. Bij overslag / overloop
2. **Buitenwaartse Macrostabiliteit** leidt tot overstroming (STBU)

Buitenwaartse macrostabiliteit treedt op bij een val van de buitenwaterstand¹ en kan alleen bij een voldoende hoge buitenwaterstand na het optreden van de buitenwaartse afschuiving en wanneer de ontstane schade nog niet is hersteld tot overstroming leiden. Dit is voorstelbaar bij storm gedomineerde systemen maar minder plausibel bij afvoer gedomineerde watersystemen (laatste is overigens nog nergens vastgelegd). In het vervolg wordt alleen op binnenwaartse macrostabiliteit ingegaan.

Voor de faalpaden “binnenwaartse macrostabiliteit” kan de onderstaande generieke keten van gebeurtenissen worden geschetst (zie ook Figuur 1 en Figuur 2). De keten van gebeurtenissen bestaat uit:

- Initiatie door toename van waterspanningen in en onder de kering door hoge buitenwaterstanden. Door overloop en overslag kan water door het binnentalud infiltreren.
- Binnenwaartse macro-instabiliteit. De grootte van de afschuiving kan variëren van een oppervlakkige afschuiving van het binnentalud tot een grote afschuiving, die meteen een deel van het buitentalud aantast, zoals weergegeven in onderstaand schema (Figuur 2). Het wel of niet optreden van opdrijven of opbarsten speelt een belangrijke rol in de omvang van de afschuiving.
- Vervolgprocessen, die achtereenvolgens of (deels) parallel optreden en afhankelijk zijn van verloop hydraulische belastingen:
 - o Vervolg / secundaire afschuivingen
 - o Micro-instabiliteit
 - o Erosie van het dijklichaam (voortschrijdend/terugschrijdend)Die leiden tot kruinverlaging en daardoor tot overloop
- Kruinverlaging door overloop
- Bresgroei en overstroming
- Overstroming



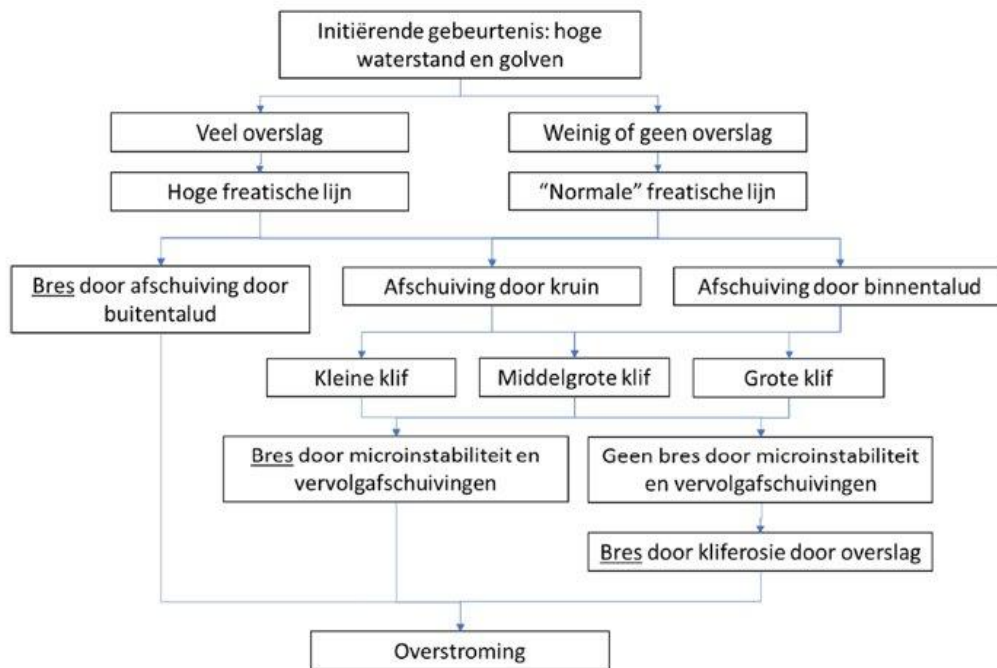
Figuur 1 Keten van gebeurtenissen macrostabiliteit

Ten aanzien van deze keten van gebeurtenissen is het van belang dat voor elke gebeurtenis met de relevante hydraulische belastingen wordt gerekend. Zo is voor de toename van waterspanningen en initiatie van schade door macro-instabiliteit de duur van de hydraulische belasting zeker zo belangrijk als de waterstand. Het is belangrijk dat voor elk faalmechanisme en voor elke gebeurtenis in het faalpad de

¹ Val van de buitenwaterstand kan verschillende scenario's inhouden: o.a. val van hoge buitenwaterstand naar lagere buitenwaterstand of val van gemiddelde buitenwaterstand naar extreem lage buitenwaterstand.

relevante hydraulische belastingen bekend zijn. De combinatie van waterstand en belastingduur dient daarbij uiteraard statistisch gezien correct te zijn.

Na de eerste verschijnselen van een macro instabiliteit is vaak nog tijd om met noodmaatregelen een overstroming te voorkomen. De kans op succesvolle maatregelen is kleiner bij storm gedomineerde watersystemen of in situaties waarin het water al over de dijk stroomt. In beide gevallen is de kering slecht bereikbaar. De reductie van de overstromingskans door noodmaatregelen wordt bij beoordeling en ontwerp niet in rekening gebracht.



Figuur 2 Schema van mogelijke faalpaden geïnitieerd door macrostabiliteit binnenwaarts [Van der Ham & Van der Meer, 2019].

In het kader van de prioritering van onderzoeksvragen voor Kennis voor Keringen is op basis van de keten van gebeurtenissen nagegaan welke fasen (initiatie, of vervolgproces) dominant is voor de overstromingskans. Overstroming als gevolg van verlies van macrostabiliteit is meestal het gevolg van een binnenwaartse afschuiving. De grootte van deze afschuiving in combinatie met de geometrie van de waterkering bepaalt of er direct sprake is van een kruinverlaging of dat er eerst nog sprake moet zijn van vervolgprocessen. De grootte van de afschuiving is afhankelijk van het type dijk (klei- of zanddijk), bodemopbouw en waterspanningen in en onder de dijk en het al dan niet optreden van opbarsten of opdrijven. Met betrekking tot de waterspanningen is de vorm van de hoogwatergolf (de duur van de belasting/hoge waterstand), en de overslag (in verband met ligging freatische lijn) van invloed. Dit alles is samengevat in Tabel 1 per type dijk en watersysteem.

Voor zanddijken geldt in het algemeen dat bij overslag na een afschuiving weinig sterkte overblijft. Zonder overslag kan er nog een aanzienlijke sterkte aanwezig zijn. In het faalpaden onderzoek voor STBI [Van der Ham & Van der Meer, 2019] is geconcludeerd dat bij kleidijken het initieel mechanisme en vervolg mechanismen ongeveer evenveel bijdragen aan de overstromingskans. De exacte bijdrage van vervolgmechanismen aan de overstromingskans is sterk afhankelijk van duur van belasting, breedte van het dijklichaam en mate van erosiebestendigheid (stevige klei of schrale klei).

In onderstaande Tabel 1 is voor diverse watersystemen en dijktypen aangegeven van welk onderzoek (initieel mechanisme of vervolgmechanisme) het meeste rendement voor aanscherping van de veiligheidsopgave wordt verwacht. Uiteraard geeft Tabel 1 een eenvoudige indeling. Hierop zijn per watersysteem en dijktipe nuanceringen mogelijk.

Watersysteem	Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern	Kleidijk of dijk met kleikern
Kust / meren / estuaria (korte duur belasting, hoge golven)	- Initieel mechanisme bij overslag - Vervolgprocessen bij geen overslag (micro-instabiliteit en vervolgafschuivingen)	- Vervolgprocessen (erosie en vervolgafschuivingen)
Bovenrivieren (Lange duur belasting)	- Initieel mechanisme bij overslag - Vervolgprocessen bij geen overslag (micro-instabiliteit en vervolgafschuivingen)	- Initieel mechanisme en vervolgprocessen (erosie en vervolgafschuivingen) bij overslag - Vervolgprocessen bij geen overslag (vervolg-afschuivingen)
Benedenrivieren (Lange duur belasting met korte top)	- Initieel mechanisme bij overslag - Vervolgprocessen bij geen overslag (micro-instabiliteit en vervolgafschuivingen)	- Vervolgprocessen (erosie en vervolgafschuivingen)

Tabel 1 Overzicht van onderzoek (naar initieel mechanisme of naar vervolgmechanisme) waarvan het meeste rendement voor aanscherping van de veiligheidsopgave wordt verwacht.

Overzicht kennis rondom macro-instabiliteit

Om overzicht van beschikbare kennis te geven wordt onderscheid gemaakt tussen de verschillende ontwikkelfasen. Daarbij wordt aangesloten bij de TRL niveau's. De vertaling van de TRL fasen naar kennis en (product) innovatie ontwikkeling voor hoogwaterbescherming is in onderstaande figuur gegeven.

TRL	kennis	product	
1	Concept van technologie is beschreven basisprincipes zijn bekend	Geobserveerd gedrag vastgelegd	theorie
2	Het concept is uitgewerkt Theorie beschreven	Hypothese geformuleerd	
3	Werking concept aangetoond Model beschikbaar	1 ^e bewijs van functioneren vastgelegd	ontwikkel
4	De technologie is gevalideerd Toepasbaarheid model is bekend	Prototype getest op laboratoriumschaal	
5	De technologie is getest Veiligheidsformat uitgewerkt	Valisatie onderzoek uitgevoerd (maakbaarheids-, grote schaalproef)	ontwerp/realisatie
6	De werking is gedemonstreerd Groene versies van tools beschikbaar	Pilot full scale	
7	De technologie is geïntegreerd in Best practices	Full scale toepassing in praktijk	implementatie
8	De technologie presteert naar behoren Geïntegreerd in instrumentarium	Werking naar behoren, praktijkhandreikingen opgesteld	
9	Klaar voor toepassing	Klaar voor toepassing	

Figuur 3 TRL niveaus

Voor de beschrijving van de huidige stand van zaken rondom kennis van macrostabiliteit (initieel mechanisme en vervolgproces) zijn in deze rode draad de TRL niveau's samengevat in de volgende vier stappen:

1. Theorie: de theoretische beschrijvingen van het fysisch proces
2. Model: de vertaling van theorie naar model (toepasbare formule)
3. Ontwerp realisatie: het afregelen/kalibreren van het model voor specifieke toepassingen
4. Implementatie: het ontsluiten van kennis in instrumenten

Nieuwe (generieke) kennis landt uiteindelijk in (basis)instrumenten, waarmee veiligheidsanalyses voor beoordelen en ontwerpen kunnen worden uitgevoerd. Voor macrostabiliteit bestaat het basisinstrumentarium uit de volgende instrumenten:

- Software (CPT tool, D-Soilmodel, D-Flow (op termijn), D-Stability, Riskeer, EEM / MPM²) met bijbehorende handleidingen
- Schematiseringshandreiking en koppeling met WBI-SOS en BRO
- Technische Leidraden met achtergrondinformatie

Op dit moment is de theorieontwikkeling van het fysische proces, rondom vervolgprocessen, niet accuraat genoeg en is het model voor analyse van het initieel mechanisme nog niet voor alle archetypen en relevante omstandigheden toepasbaar. In onderstaande Tabel 2 is de huidige stand van zaken van de aanwezige kennis (zwart) en de stand van zaken van kennisleemten en benodigde ontwikkeling van software (rood) weergegeven.

Stappen	Initiatie: Toename Waterspanningen en opbarsten	Eerste afschuiving binnentalud	Vervolgproces
1 Theorie- vorming	Grondwaterstromingstheorie (stationair en niet-stationair, verzadigd en onverzadigd) Theorie voor sterkte grond in relatie tot opbarsten	Theoretische beschrijvingen van evenwicht van taluds beschikbaar. Theorie voor beschrijving schuifsterkte van grond beschikbaar Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif. Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen	Theoretische beschrijvingen beschikbaar Praktijkbeschrijvingen Tijdsafhankelijkheid keten van gebeurtenissen (belasting en sterkte) 3D analyse bij overgangsconstructies
2 Model- ontwik- keling	3D en EEM grondwater-stromingsmodellen beschikbaar. Variabelen waterspanningen. Grondgedrag bij opdrijven & opbarsten, gekoppeld model grondwaterstroming & opdrijven / opbarsten. Grondwaterstroming in dijksmateriaal bij overloop / overslag	Theorie is vertaald in glijvlakmodellen (Bishop, Spencer, LiftVan) en materiaalmodellen (CSSM, SHANSEP). Integraal model macrostabiliteit bij overslag (diepe afschuiving / STBI, afschuiving bekleding / GABI, en micro-instabiliteit.	Proof of concept modellen beschikbaar Prototype probabilistische faalpadanalyse Validatie modellen voor dijken zonder constructies Kliferosie na falen grasbekleding

² Material Point Method (MPM)

Stappen	Initiatie: Toename Waterspanningen en opbarsten	Eerste afschuiving binnentalud	Vervolgproces
3 Toe- passing	<p>Empirische algoritmen voor waterspanningen zonder overslag.</p> <p>Integraal model voor schematisering waterspanningen voor piping en macrostabiliteit (D-Flow voor schematisering waterspanningen) Gecombineerde kansverdeling overschrijding waterstand en overschrijding duur</p>	<p>Glijvlakmodellen beschikbaar. Materiaalmodellen beschikbaar voor verzadigde gronden. Concepten voor actuele sterkte (AS) en bewezen sterkte beschikbaar.</p> <p>Probabilistische analyses macrostabiliteit HWBP projecten Sterkte onverzadigde zone Effect klimaatverandering op sterkte Toename sterkte in de tijd. Bepalen en beïnvloeden taatheid grondconstructie. Correlatie tussen grondlagen en parameters Inzicht in variabiliteit / heterogeniteit / onzekerheden onderbelicht Doorontwikkeling bewezen sterkte voor opgetreden- en proefbelastingen.</p>	<p>Eerste verkenningen zijn uitgevoerd</p> <p>Probabilistische faalpadanalyse Correlatie tussen parameters initieel mechanisme en parameters vervolgmechanismen</p>
4 Imple- mentatie praktijk	<p>Software inclusief handleidingen en handreikingen voor reguliere analyses beschikbaar.</p> <p>Recept voor afleiden gecombineerde kansverdeling overschrijding waterstand en overschrijding duur</p>	<p>Software inclusief handleidingen en handreikingen voor reguliere analyses beschikbaar.</p> <p>Technische Leidraden pilot macrostabiliteit Probabilistische analyse in Riskeer Ontwikkeling Embankmentsuite Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn drainage constructies Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability Schematisatie invoer met verschillende informatiebronnen (lokale & regionale data & monitoring) SOS uitbreiden met Landelijke proevenverzameling Handreiking Actuele Sterkte Handreiking grondverbeteringstechnieken (Nauwkeurig) bepalen grensspanning Veiligheidsbenadering uitvoering Evaluatie semi-probabilistisch veiligheidsformat</p>	<p>Ervaring vanuit beheerders en experts om analyseresultaten te beoordelen op waarde.</p>

Tabel 2 Overzicht kennis van macrostabiliteit (zwart bestaande kennis, rood kennisleemte)

Ontwerpen

De kans op falen door macro-instabiliteit kan op verschillende manieren worden verkleind:

1. Aanbrengen van een stabiliteitsberm en/of aanpassen van de geometrie van de kering,
2. materiaaleigenschappen kunnen worden aangepast of materiaal kan worden vervangen door ander materiaal met gunstiger eigenschappen,
3. maatregelen, zoals aanbrengen van drainage, kunnen worden genomen die de grondwaterstroming beïnvloeden,
4. (langs) constructies kunnen worden aangebracht die de stabiliteit van het grondlichaam verhogen of zelfs overnemen.

Ad 1), ad 2) en ad 3) hebben invloed op de kans van optreden van een of meerdere gebeurtenissen in het faalpad. De theorie en de modellen blijven hetzelfde. Kennisleemten hebben vooral betrekking op de toepassing (is het model al geschikt) en de implementatie in de praktijk. Bij het voorbeeld van de drainage onder ad 3) zou een extra knoop aan het faalpad moeten worden toegevoegd, waarbij het gaat om het functioneren van de drainage.

Bij ad 4) ontstaat een extra knoop of extra knopen in het faalpad. De knoop gaat in op de effectiviteit van de constructie. De constructie kan falen of blijven staan. Afhankelijk van het al of niet falen van de constructie gaat het faalpad verder. De knoop die over de effectiviteit van de constructie gaat, kan afhankelijk van het type constructie desgewenst verder worden uitgewerkt. Constructies kunnen op verschillende manieren falen en daardoor zijn verschillende faalpaden mogelijk na het falen van een constructie. Voor het faalproces is de locatie van de langsconstructie relevant. Voor een langsconstructie in de buitenkruinlijn of in de binnenteen zijn verschillende faalpaden nodig. Voor een zelfstandig waterkerende langsconstructie, zoals een onverankerde damwand of diepwand in de buitenkruinlijn, is bijvoorbeeld de vervorming van de constructie een aspect wat moet worden beschouwd in relatie tot het faalpad. Voor een niet-zelfstandig waterkerende langsconstructie is de samenwerking met het dijklichaam relevant; dus welke sterkte kan worden ontleend aan het grondlichaam. Hierbij gaat het om het bezwijken van het grondlichaam en de invloed daarvan op de effectiviteit van de langsconstructie. Ook de samenwerking tussen een langsconstructie en een dijklichaam in situaties met veel overslag is een aandachtspunt. Verder zijn er in zijn algemeenheid nog veel onzekerheden over het veiligheidsformat van langsconstructies en het falen van langsconstructies en onderdelen van langsconstructies. Deze onzekerheden zijn ook van belang bij het opstellen van een faalpad. Ook is het tijdsverloop van het falen van een langsconstructie met de verschillende constructieonderdelen onzeker, bijvoorbeeld het bezwijken van één ankerstang met het al dan niet kunnen herverdelen van belastingen en de daarop volgende gebeurtenissen. Voor veel voorkomende typen constructies kunnen generieke faalpaden worden ontwikkeld. Voor weinig voorkomende en complexe constructies zal dit ook vaak maatwerk moeten zijn. Voor (langs)constructies zouden nog meer zaken te noemen zijn. Vanuit de KvK programmering wordt een aparte faalpadanalyse en rode draad voor langsconstructies opgesteld. Binnen het SO van Deltares is een start gemaakt met een visie document voor langsconstructies. Hier spelen veel onderwerpen.

Door bij het ontwerpen van dijken te dimensioneren op de taatheid van een dijk kan op het dijkdoorbraakproces worden gestuurd. Bij een taaie dijk is het gedrag veel voorspelbaarder en hoeven in beginsel geen slachtoffers te vallen, omdat bezwijken zich tijdig aankondigt. Een taaie dijk kan worden gerealiseerd door het vergroten van de afmetingen van de dijk, door het aanpassen van de materiaaleigenschappen van de dijk of door het toepassen van constructieve elementen of een combinatie hiervan.

Rode draden

Wanneer het kennisoverzicht in Tabel 2 naast Tabel 1 met dominante gebeurtenissen wordt gehouden, ontstaat een beeld van de locatie- of situatie-specifieke kennisleemtes die relevant zijn voor de overstromingskans. Hieruit kunnen de rode draden voor onderzoek naar het mechanisme Macrostabieleit worden getrokken (zie Tabel 3).

Situatie	Belangrijke aspecten faalpad	Kennisleemtes
Basis (alle situaties)	Alle	<ul style="list-style-type: none"> - Gecombineerde kansverdeling overschrijding waterstand en overschrijding duur - Integraal model voor schematisering waterspanningen voor piping en macrostabieleit (D-Flow voor schematiseren waterspanningen) - Bepalen (en beïnvloeden) materiaaleigenschappen (taaiheid) grondconstructie - Handreiking grondverbeterings-technieken - Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn drainage-constructies - Effect klimaatverandering op sterkte - SOS uitbreiden met Landelijke proevenverzameling - Schematisatie invoer met verschillende informatiebronnen (lokale & regionale data & monitoring) - Handreiking Actuele Sterkte - Correlatie tussen grondlagen en parameters - Inzicht in variabiliteit / heterogeniteit / onzekerheden - Doorontwikkeling bewezen sterkte voor opgetreden- en proefbelastingen - 3D analyse bij overgangs-constructies - Evaluatie semi-probabilistisch veiligheidsformat
Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern, bij geen overslag	Vervolgprocessen (micro-instabiliteit en vervolgafschuivingen)	<ul style="list-style-type: none"> - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen - Probabilistische faalpadanalyse - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies
Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern, bij overslag	Initieel mechanisme	<ul style="list-style-type: none"> - Grondwaterstroming in dijksmateriaal bij overloop / overslag - Grondgedrag bij opdrijven & opbarsten, gekoppeld model grondwaterstroming & opdrijven / opbarsten - Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability - Integraal model macrostabieleit bij overslag (diepe afschuiving / STBI, afschuiving bekleding / GABI, en micro-instabiliteit - (Nauwkeurig) bepalen grensspanning - Toename sterkte in de tijd
Kleidijk of dijk met kleikern, bij geen overslag	Vervolgprocessen (vervolgafschuivingen)	<ul style="list-style-type: none"> - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen - Probabilistische faalpadanalyse - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies
Kleidijk of dijk met kleikern, bij overslag	Initieel mechanisme (in bovenrivieren-gebied) en vervolgprocessen (erosie en vervolgafschuivingen)	<ul style="list-style-type: none"> - Grondwaterstroming in dijksmateriaal bij overloop / overslag - Grondgedrag bij opdrijven & opbarsten, gekoppeld model grondwaterstroming & opdrijven / opbarsten - Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability - Sterkte onverzadigde zone - (Nauwkeurig) bepalen grensspanning - Toename sterkte in de tijd - Correlatie tussen parameters initieel mechanisme en parameters vervolgmechanismen - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen - POV DGG - Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie - Vernageling in primaire keringen - Kliferosie na falen grasbekleding - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies

Tabel 3 Locatie- of situatie-specifieke kennisleemtes macrostabieleit

Gelet op de lopende ontwikkelingen in onderzoek en projecten kan een voorlopige prioritering in de belangrijke aspecten geschetst worden (zie Tabel 4).

Situatie	Belangrijke aspecten faalpad	Rode lijn	Lopende en geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten kennisontwikkeling urgent	Kennisontwikkeling lange termijn
Basis (alle situaties)	Alle	Basis op orde (leidraden en software) en scherpere bepaling kans met probabilistiek	<p><u>Implementatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Technische Leidraden pilot macrostabiliteit - Probabilistische analyse in Riskeer - Ontwikkeling Embankmentsuite - Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn drainage constructies <p><u>Toepassing:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Integraal model voor schematisering waterspanningen voor piping en macrostabiliteit (D-Flow voor schematisering waterspanningen) - Probabilistische analyses macrostabiliteit HWBP projecten - Reststerkte WoS (probabilistische analyses) 	<p><u>Implementatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Handreiking Actuele Sterkte <p><u>Toepassing:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Gecombineerde kansverdeling overschrijding waterstand en overschrijding duur 	<p><u>Implementatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Schematisatie invoer met verschillende informatiebronnen (lokale & regionale data & monitoring) - SOS uitbreiden met Landelijke proevenverzameling - Handreiking grondverbeteringstechnieken - Evaluatie semi-probabilistisch veiligheidsformat <p><u>Toepassing:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Effect klimaatverandering op sterkte - Bepalen en beïnvloeden taaheid grondconstructie - Correlatie tussen grondlagen en parameters - Inzicht in variabiliteit / heterogeniteit / onzekerheden - Doorontwikkeling bewezen sterkte voor opgetreden- en proefbelastingen <p><u>Theorievorming:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 3D analyse bij overgangs-constructies
Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern, bij geen overslag	Vervolgprocessen (micro-instabiliteit en vervolgafschuivingen)	Scherpere bepaling kans door benutten faalpaden (probabilistisch)	<p><u>Toepassing:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Probabilistische faalpadanalyse 	<p><u>Theorievorming:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen 	<p><u>Modelontwikkeling:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies
Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern, bij overslag	Initieel mechanisme	Scherpere bepaling kans door betere beschrijving fysica initieel mechanisme	<p><u>Implementatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability <p><u>Modelontwikkeling:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - IJsseldijken Reevediep - Grondgedrag bij opdrijven & opbarsten, gekoppeld model grondwaterstroming & opdrijven / opbarsten - Integraal model macrostabiliteit bij overslag (diepe afschuiving / STBI, afschuiving bekleding / GABI, en micro-instabiliteit) 	<p><u>Toepassing:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Toename sterkte in de tijd <p><u>Modelontwikkeling:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Grondwaterstroming in dijksmateriaal bij overloop / overslag 	<p><u>Implementatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - (Nauwkeurig) bepalen grensspanning

Situatie	Belangrijke aspecten faalpad	Rode lijn	Lopende en geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten kennisontwikkeling urgent	Kennisontwikkeling lange termijn
Kleidijk of dijk met kleikern, bij geen overslag	Vervolgprocessen (vervolgafschuivingen)	Scherpere bepaling kans door benutten faalpaden (probabilistisch)	<u>Toepassing:</u> - Probabilistische faalpadanalyse	<u>Theorievorming:</u> - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen	<u>Modelontwikkeling:</u> - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies
Kleidijk of dijk met kleikern, bij overslag	Initieel mechanisme (in bovenrivierengebied) en vervolgprocessen (erosie en vervolgafschuivingen)	Scherpere bepaling kans door betere beschrijving fysica	<u>Implementatie:</u> - Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability <u>Toepassing:</u> - Sterkte onverzadigde zone - POV DGG - Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie - Vernageling in primaire keringen <u>Modelontwikkeling:</u> - IJsseldijken Reevediep - Grondgedrag bij opdrijven & opbarsten, gekoppeld model grondwaterstroming & opdrijven / opbarsten - Kliferosie na falen grasbekleding	<u>Toepassing:</u> - Toename sterkte in de tijd <u>Modelontwikkeling:</u> - Grondwaterstroming in dijksmateriaal bij overloop / overslag <u>Theorievorming:</u> - Verloop afschuiving: wanneer, hoe snel, hoogte klif - Tijdsafhankelijkheid (keten) hydraulische, geohydrologische en geotechnische processen	<u>Implementatie:</u> - (Nauwkeurig) bepalen grensspanning <u>Toepassing:</u> - Correlatie tussen parameters initieel mechanisme en parameters vervolgmechanismen <u>Modelontwikkeling:</u> - Validatie modellen vervolgprocessen voor dijken zonder constructies

Tabel 4 Voorlopige prioritering kennisleemtes macrostabiliteit. De lopende en geagendeerde kennisontwikkelingen zijn toegelicht in Bijlage 1.

Bijlage 1 Reeds bekende onderzoeksvoorstellen

Vanuit verschillende invalshoeken worden onderzoeksvoorstellen ingediend. Onderstaand worden de nu bekende onderzoeksvoorstellen kort toegelicht. Vervolgens worden deze geplaatst in een overzichtstabel, welke de bovengenoemde onderscheidende criteria bevat.

1. Onderzoek opdrijven/opbarsten kleideklaag achterland
Een eerste verkennende POVM studie op basis van eindige-elementen suggereert dat afschuiven bij opdrijven zowel kan optreden in combinatie met samendrukken van de deklaag (als een veer) als in combinatie met uitknikken en scheuren. In beide gevallen ligt de equivalente reststerkte van de deklaag tussen de bovengrens (volledige sterktebijdrage) en de ondergrens (nul). Vervolgonderzoek is nodig (zowel numeriek als experimenteel) om de mechanismen beter te begrijpen en om uiteindelijk te kunnen onderbouwen welke aanpassing van de beslisregel eventueel mogelijk/ noodzakelijk is. De modellering van onzekerheden is hierbij ook van belang. Betreft theorievorming initieel mechanisme. Status: lopend onderzoek POV Macrostabieleit, recent MSc onderzoek TU Delft (Yida Tao) en KIA voorstel vanuit WDOD.
2. Onderzoek sterkte van de (initieel) onverzadigde zone
Bij stabiliteitsanalyses voor dijken in het bovenrivierengebied (maar ook elders in NL) is de initieel onverzadigde toestand van de deklaag en het dijksmateriaal een zeer complicerende factor bij het bepalen van de schuifsterkte parameters. De grond in de onverzadigde zone varieert in de tijd door variaties in het vochtgehalte. Het onderzoek richt zich op kennisontwikkeling om te komen tot een werkwijze voor het uitvoeren en interpreteren van sonderingen en laboratoriumproeven. Doel van het project is het benutten van de sterkte van initieel onverzadigde grond waardoor veiligheids- en ontwerpogave kan worden verkleind. Momenteel is het niet goed mogelijk om de sterkte van grond in de onverzadigde zone en capillaire zone (boven de grondwaterstand) vast te stellen. Door POVM en BOI is een literatuurstudie uitgevoerd en is in 2020 de sterkte op twee meetlocaties gemonitord. Voor validatie van de (aangepaste) hypothese en vertaling naar een praktijkhandreiking is in 2021 een extra meetlocatie nodig. Betreft verbreden toepasbaarheid initieel mechanisme. Bij WDOD zijn plannen om met dit onderzoek aan de slag te gaan voor het dijkversterkingsproject Zwolle – OIst en hiervoor een KIA voorstel in te dienen bij het HWBP. Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021 (extra meetlocatie start 2021).
3. Macrostabieleit probabilistisch analyse in Riskeer
Riskeer wordt uitgebreid met de mogelijkheid om probabilistisch te rekenen. Vooralnog is dat in combinatie met D-Stability. In D-Stability worden de conditionele faalkansen berekend. In Riskeer wordt op basis van de conditionele faalkansen en de statistiek van de waterstanden en overslag de totale faalkans (per jaar) berekend. Betreft implementatie initieel mechanisme. Status: lopende activiteit BOI.
4. Materiaalmodel voor schuifsterkte van zware zandige siltige klei implementeren in D-Stability
Het schuifsterktegedrag van zware zandige siltige klei wordt niet goed beschreven door het SHANSEP schuifsterktemodel. Daarom wordt een alternatief schuifsterktemodel geïmplementeerd in D-Stability. De ambitie is om dit nieuwe schuifsterktemodel ook aan te sluiten voor probabilistische analyses. Betreft uitbreiden model initieel mechanisme. Status: lopende activiteit BOI.
5. Onderzoek naar verbetering schematisering waterspanningen
Bij het uitvoeren van stabiliteitsanalyses kunnen de waterspanningen worden geschematiseerd met hulp van de Waternet Creator. Het onderzoek richt zich op de vraag of waterspanningen betrouwbaarder kunnen worden geschematiseerd om scherpere overstromingskansen te berekenen. In eerste instantie wordt gekeken naar 1) de optie om de Waternet Creator te

verbeteren en uit te breiden met infiltratie door overslag/overloop en naar 2) de optie om waterspanningen te schematiseren met D-Flow en aan te sluiten bij de ontwikkeling hiervan die ten behoeve van piping is ingezet. In vergelijking met piping zijn voor macrostabiliteit ook relevant: grondwaterstroming in de onverzadigde zone, inclusief infiltratie door overslag/overloop. Kennis is in principe aanwezig. Aandachtspunt zijn onzekerheden in opbouw dijk en ondergrond, parameters en invloed structuurvorming. Betreft verbeteren model initieel mechanisme. Status: lopende activiteit BOI.

6. Technische Leidraden pilot macrostabiliteit
De ambitie is om alle leidraden en technische rapporten van TAW en ENW te actualiseren en in een digitale omgeving beschikbaar te stellen. Voor macrostabiliteit is een pilot in uitvoering. POV Macrostabiliteit publicaties worden ook in deze actie betrokken. Betreft implementatie initieel en vervolgprocessen. Status: lopende activiteit BOI.
7. Probabilistische analyses macrostabiliteit HWBP projecten
Voor verschillende dijkversterkingsprojecten worden probabilistische analyses voor macrostabiliteit uitgevoerd. Probabilistische analyses leveren vaak (niet altijd) scherpere resultaten op dan semi-probabilistische analyses. Dit heeft al in verscheidene projecten geleid tot een aanpassing van de opgave. Betreft implementatie initieel mechanisme. Status: lopende activiteit bij verschillende waterschappen.
8. POV DGG
Doel is het ontwikkelen van instrumenten en processen om gebiedseigen grond toe te passen bij dijkversterkingen, zowel uit het oogpunt van doelmatigheid als duurzaamheid. De POV legt de opgedane ervaringen vanuit de referentieprojecten vast en verwerkt deze tot generieke instrumenten, procedures, rapportages en handreikingen. Zo kunnen de verworven kennis, inzichten en oplossingen weer worden benut bij toekomstige dijkversterkingen. Het gaat dan om instrumenten voor ontwerp en beheer, en aanvullend veld- en labonderzoek Dit gebeurt zoveel mogelijk bij lopende HWBP projecten.
Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.
9. Reststerkte WoS
Gebruiksvriendelijk maken van een probabilistische toepassing van de erosie van de dijk na afschuiven buitenbekleding. Betreft vervolgproces en verbreden toepasbaarheid. Status: lopend HWBP project
10. Kliferosie
Onderzoek naar de beschrijving van klif-erosie na falen grasbekleding binnentalud. Het betreft onderzoek naar de te hanteren theorie, omdat nu gebruikte theorie is afgeleid voor andersoortige dammen (reservoirs). Betreft theorievorming vervolgprocessen. Status onderzoeksvorstel ingediend bij KvK.
11. Samenhang afschuifmechanismen STBI-GABI
Binnen GABI (gras afschuiving binnentalud) is het onderdeel afschuiving grasbekleding onder invloed van zwaartekracht (Edelman-Joustra criterium). Dit onderdeel heeft veel gelijkenis met macro-stabiliteit. Daarom is er, binnen RWS-WVL, een onderzoeksgroep gestart om te bekijken of dit onderdeel wellicht onder STBI geschoven kan worden. De onderzoeksgroep bestaat uit Myron van Damme en Marc Hulst (beiden RWS-WVL) en betreffende Deltares-collega's (Alexander van Duinen en André van Hoven).
Status: in initiatiefase.
12. Opstellen van Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn drainage constructies
In de POV-publicatie drainagetechnieken is in 2019 de kennis en stand van zaken met betrekking tot drainagetechnieken is vastgelegd. Binnen dit project wordt deze publicatie aangevuld met

ervaringen en praktijkkennis, resulterend in een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor drainageconstructies. Met deze OBR krijgen beheerders een instrument in handen waarmee drainages kunnen worden ontworpen en beoordeeld waardoor deze techniek makkelijker kan worden toegepast als maatregel tegen piping, macro- en/of micro-instabiliteit. Hierdoor kunnen de beheerder goed overwogen deze technieken gebruiken bij de dijkversterkingen wat leidt tot een goedkopere realisatie.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.

13. Vernageling in primaire keringen

Met vernageling kan de macrostabiliteit worden verhoogd. Met een kleinschalige praktijktoepassing wordt ontwerp en uitvoeringservaring opgebouwd en de resterende witte vlekken van deze techniek aangepakt. De kennis die we binnen dit onderzoek op doen levert niet alleen meer inzicht voor vernageling maar helpt ook bij het algemene inzicht in het gedrag van dijken en interactie met constructies.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.

14. Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie (start 2021)

Indien de grenzen van toepasbaarheid van lokaal gewonnen materiaal verantwoord verruimd mogen worden, dan komen er grotere grondstromen met gebiedseigen grond beschikbaar voor dijkverbetering. Dit betekent tevens een duurzamere aanpak: vermindering van transportbewegingen, een lager brandstofverbruik, lagere emissies van broeikasgassen, vermindering van de emissie van stikstof en met minder overlast voor de lokale omwonenden. Er is kennis nodig over de erosiebestendigheid, sterkte bij (on)gestructureerdheid, het (lange termijn) gedrag van afwijkende klei in zeedijken, alsmede het erosiegedrag bij flauwe taluds (1:7). Deze kennis kan vertaald worden in een haalbaar dijkontwerp op basis van deze afwijkende eigenschappen van klei, met een goede uitvoerbaarheid en een juist beheer en onderhoud. Het eindproduct is een groene versie van een protocol voor het verantwoord gebruik van afwijkende kleien met betrekking tot ontwerp, uitvoering en beheer, alsmede een uitbreiding van het toepassingsgebied van het huidige erosiemodel. Het wordt mogelijk om hier ook flauwe taluds (range 1:4 tot 1:7) mee te ontwerpen.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.

15. IJsseldijken Reevediep (verwacht initiatief)

De IJsseldijken die voor de monding van het Reevediep liggen vormen in 2022 een unieke kans voor het doen van destructieve proeven op een echte waterkering. Er zijn een viertal ideeën geïnventariseerd die kansrijk worden geacht. Een van deze ideeën heeft betrekking op de kennisleemten rondom opdrijven en opbarsten (zie onderwerp 1 van deze lijst). Deze ideeën worden uitgewerkt waarna in Q2 besloten wordt om de proeven op te nemen in het innovatieportfolio van het HWBP.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.

16. Probabilistische faalpadanalyse (verwacht initiatief)

Doel van het voorstel is het binnen 1,5 jaar beschikbaar stellen van een begrijpelijke, laagdrempelige en transparante methode voor Probabilistische Faalpad Analyse (PFA). Met deze methode kunnen ontwerpteam scherpere ontwerpverificaties uitvoeren en ontwerpkeuzes afwegen voor efficiënte inzet van tijd en geld.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.

17. De Innovatieversneller (start 2021)

Het doel van dit voorstel is om de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het HWBP te stimuleren en versnellen. In het voorstel worden 3 componenten onderscheiden:

- Projectinnovatiesupport. Dit onderdeel richt zich op support leveren aan beheerders en innovators in innovatie- en uitvoeringsprojecten, specifiek gericht op kennis naar de praktijk/toepassing brengen binnen een eigen project. Beantwoorden van (kleine) kennis- en toepassingsvragen valt onder de te leveren support (er is een projectvraag).
- Innovatiemakelaars van het HWBP. Vanuit integraliteit en overzicht stimuleren en versnellen van het toepassen van innovaties door beheerders in HWBP projecten. Innovatiemakelaars zijn benaderbaar en hebben positie in netwerk om rol te kunnen vervullen.
- Innovatieversnelling op specifieke onderwerpen. Dit onderdeel richt zich op een aantal (ongeveer 3 per jaar) inhoudelijke onderwerpen die, om daadwerkelijk opgeschaald te kunnen worden naar andere projecten, nog een concrete en specifieke inhoudelijke slag en/of optimalisatie nodig hebben (van TRL7 naar TRL 9). Voor 2021 staan een aantal losse eindjes vanuit de POV-Macrostabieliteit geagendeerd.

18. Embankmentsuite (verwacht initiatief)

Voor een efficiënt en betrouwbaar ontwerpproces is er behoefte aan een geotechnische suite, de zogenaamde Embankment Suite, waar voor meerdere mechanismen (stabieliteit, grondwaterstroming, zettingen, piping). In de POV Macrostabieliteit is hiervoor een visie ontwikkeld.

Daarnaast zien we vanuit de praktijk dat aannemers en ingenieursbureaus actief zijn met het automatiseren van ontwerp- en beoordelingsprocessen. De betrouwbaarheid van rekenresultaten wordt vergroot wanneer deze worden gekoppeld aan geaccepteerde software uit de Embankment Suite. Wanneer losse componenten vanuit een suite worden ontwikkeld, kunnen deze worden hergebruikt en kan hierop worden doorontwikkeld.

De Embankment Suite is ook van belang voor beoordelen. Aansluiting bij het BOI is essentieel en gezamenlijke ontwikkeling wordt nagestreefd.

Status: project uit het HWBP innovatieportfolio 2021.