



HWBP Innovatieproject
Praktijkonderzoek Opbarsten bij
dijken

Plan van Aanpak

Colofon

Waterschap Drents Overijsselse Delta

Datum: 10-11-2021
 Auteur: IPM-team HWBP innovatieproject Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken
 Kenmerk: [PR PROJECT HWBP/Z/21/040589](#)
 Versie: 1.0

Autorisatietabel / versiegeschiedenis

Versie	Datum	Autorisatie	Naam	Rol(len)	Handtekening
0.1 (interne review)	08-10 tot 15-10 2021	Opsteller	IPM-team	PM, TM, MPB, OM	
		Controle		MPB	
		Vrijgave	****	PM	
0.2 (review BGT HWBP)	18-10 tot 03-11-2021	Opsteller	IPM-team	PM, TM, MPB, CM, OM	
		Controle		MPB	
		Vrijgave	****	Projectmanager	
1.0 (DB)	10-11-2021	Opsteller	IPM-team	PM, TM, MPB, CM, OM	
		Controle	****	Projectmanager	
		Vrijgave		Namens het DB	
2.0 (PD HWBP)		Opsteller	IPM-team	PM, TM, MPB, CM, OM	
		Controle	****	Projectmanager	
		Vrijgave		Namens HWBP	

Samenvatting

Probleem-/vraagstelling

Zowel nationaal als binnen WDOD wordt de versterkingsopgave voor een belangrijk deel bepaald door de faalmechanismen piping en macrostabiliteit. Voor beide mechanismen is het opdrijven en opbarsten van de deklaag een belangrijke gebeurtenis in het faalpad dat leidt tot overstroming. Bij macrostabiliteit bepaalt het opdrijven en opbarsten van de deklaag de vorm van de afschuiving en daarmee de vervolgprocessen. Piping kan zonder opbarsten helemaal niet optreden. Opdrijven en opbarsten is door de POV-Macrostabiliteit (POVM) als prioriteit benoemd. Om een goed beeld te krijgen van de overstromingskans na optreden van opdrijven of opbarsten van dunne dekklagen is inzicht in de vervolgprocessen nodig. Dit zijn de processen die zich na het optreden van een afschuiving nog moeten voordoen om te komen tot inundatie.

Met betrekking tot opbarsten/opdrijven van dunne dekklagen worden in de ingenieurspraktijk conservatieve aannames gedaan: bij piping en stabiliteitsberekeningen wordt de sterkte van de deklaag niet meegenomen. Dat wil zeggen dat aangenomen wordt dat als de deklaag opdrijft, deze ook opbarst. Met deze proef wordt de hypothese getoetst dat bij dekklagen vanaf ca. 3 m de kans op opbarsten, en daarmee op overstroming door piping, verwaarloosbaar is. De werkhypothese bij macrostabiliteit is dat bij dekklagen dunner dan ca. 4 m bij opdrijven/opbarsten nog sterkte van de deklaag in rekening kan worden gebracht. Beide hypothesen leiden tot een significante reductie van de overstromingskans.

Doel

Met het onderzoek wordt meer inzicht verkregen in de gebeurtenissen die na opdrijven van de deklaag tot overstroming leiden. Een rekenmodel wordt ontwikkeld waarmee de sterkte van de deklaag bij opdrijven in rekening kan worden gebracht en de werkhypothesen kunnen worden onderbouwd. Het rekenmodel wordt vertaald in handvatten voor de analyse van overstromingskansen van macrostabiliteit en piping, welke landen in handreikingen voor toepassing in de praktijk.

Business Case

De POVM heeft in een consequentieanalyse vastgesteld dat het faalmechanisme macrostabiliteit bij opbarsten van het achterland relevant is voor 243 km primaire dijken in Nederland. Met de huidige rekenregels wordt op circa 90 km een te grote overstromingskans uitgerekend. De verwachting is dat dit met het onderzoek kan worden teruggebracht naar 65 km. Daarmee zou naar schatting orde 150 M€ bespaard worden.

Voor piping is geen business case opgesteld. Echter het ligt in de lijn der verwachting dat het uitsluiten van opbarsten bij dikkere dekklagen leidt tot een significante vermindering in de pipingopgave. Juist bij dikkere dekklagen zijn pipingmaatregelen duur. Verwacht wordt dat het uitsluiten van opbarsten bij dekklagen dikker dan 4 m leidt tot een reductie van 50 tot 100 km versterking en een besparing op programmaniveau van 500 – 1.000 M€.

Recent is er meer aandacht gekomen voor de rol die vervolgprocessen spelen in het bezwijkproces van waterkeringen. Verwacht wordt dat met relatief weinig inspanning meer inzicht in de werking van vervolgprocessen kan worden verkregen. Er is op het gebied van vervolgprocessen geen business case opgesteld. Met een grove schatting dat de faalkans, op basis van verbeterde inzicht in de werking van vervolgprocessen, met 10% kan worden geoptimaliseerd is de opbrengst in de orde van 70 M€.

Aanpak

Vanuit beheersing van overstromingsrisico's is een integrale aanpak van opbarsten bij piping en macrostabiliteit dat leidt tot overstroming gewenst. Bij de huidige waterveiligheidsnormen staat daarbij het verhaal van de kering en het faalpad centraal (overstromingskansbenadering). Daarbij wordt niet alleen naar de initiële mechanismen gekeken maar worden ook de vervolgmechanismen beschouwd. Het oude bestel was gebaseerd op het uitsluiten van overstromingen bij maatgevende hydraulische belastingen. Daarbij stonden de losse faalmechanismen centraal en werd vooral gekeken naar initieel bezwijken.

In dit project staat dat verhaal van de kering centraal. Het verhaal beschrijft het pad van gebeurtenissen die opeenvolgend op moeten treden om tot een daadwerkelijke overstroming te komen. Het verhaal wordt in iedere fase van het project verder uitgewerkt en gebruikt om de activiteiten voor de volgende fase scherper te definiëren.

Voor afronding van het Reevediep, ten zuiden van Kampen, wordt in 2023 een primaire waterkering verwijderd. Dit biedt mogelijkheden om grootschalige proeven op deze kering uit te voeren, waarbij de dijk mag bezwijken. Met een proefopstelling worden opbarsten/opdrijven geforceerd waarna de dijk afschuift. Het afgeschoven dijklichaam wordt vervolgens belast (bijv. met golfoverslag) om inzicht te krijgen in de werking van vervolprocessen. Omdat de veldproef een unieke eenmalige proef is, zal er een serie modelproeven plaatsvinden voorafgaand aan de veldproef. In de modelproeven kan, onder geconditioneerde omstandigheden, worden gevarieerd met geometrie van dijklichaam en ondergrond en grondeigenschappen. Door de combinatie van de veldproef met de modelproeven en numerieke simulaties van de proeven kunnen de resultaten van de veldproef, die voor een unieke situatie zijn bepaald, worden vertaald naar een generieke toepassing van de proefresultaten.

Het onderzoek geeft inzicht in het gehele faalpad tot bezwijken en geeft handelingsperspectief, o.a. via verbetering van rekenmethoden, voor het realistischer inschatten van de kans op opbarsten en de kansen op een afschuiving en piping na opdrijven/opbarsten. In de voorbereiding van de grootschalige veldproef worden go/no go momenten ingebouwd. Daarbij wordt de planning van veldproeven afgestemd op de uitvoeringswerkzaamheden bij het Reevediep (IJsseldelta fase 2). Bij verzoeken om ook gebruik te kunnen maken van de proeflocatie zal de balans worden gezocht tussen de meerwaarde van aanvullende proeven door derden en de beheersbaarheid van de voorgestelde proef.

Resultaat

Voor het ontwikkelen van handvatten voor het meenemen van opdrijven en opbarsten bij macrostabiliteit en piping worden de volgende onderdelen doorlopen en opgeleverd:

1. Literatuuronderzoek en formulering hypothese. De hypothese betreft een conceptueel model waarin wordt beschreven welke parameters relevant zijn en hoe deze met elkaar samenhangen.
2. Onderzoek met numerieke modellen om de hypothese te onderbouwen inclusief gevoeligheidsanalyse van parameters.
3. Validatie numeriek model met schaalproeven om betrouwbaarheid en toepassingsgebied te onderbouwen.
4. Praktijkproef om het model te testen in een relevante omgeving.
5. Opstellen handreikingen voor toepassing in de praktijk.

Dit plan van aanpak sluit aan op de rode draden die door RWS-WVL, pd-HWBP en Deltares zijn opgesteld en waarin de prioritaire onderzoeksvragen zijn beschreven. Het onderzoek sluit daarmee aan bij landelijke onderzoeksprogramma's waardoor afstemming met deze programma's en aansluiting met instrumentontwikkeling wordt gegarandeerd.

Inhoud

Bijlagen.....	7
1 Inleiding	8
1.1 Introductie onderzoeksvraag	8
1.2 Doelen en resultaten	10
1.3 Leeswijzer.....	10
2 Achtergrond van het voorgestelde onderzoek.....	12
2.1 Verhaal van de kering.....	12
2.1.1 Faalpad.....	12
2.1.2 Component: Opbarsten	13
2.1.3 Component: Gevolgen opbarsten voor macrostabiliteit en piping.....	15
2.1.4 Component: vervolgprocessen.....	17
2.2 Relatie met POVM.....	18
2.3 Relatie met Rode Draden	20
3 Business case.....	21
3.1 Onderbouwing verwacht rendement	21
3.1.1 Opbarsten in relatie tot Macrostabiliteit	21
3.1.2 Opbarsten in relatie tot piping.....	21
3.1.3 Vervolgprocessen	21
3.2 Opgave WDODelta.....	22
4 Aanpak, werkwijze en afbakening	23
4.1 Inleiding; Aanpak op hoofdlijnen.....	23
4.2 Samenvatting uit te voeren activiteiten.....	24
4.3 Fase 1, Literatuurstudie en voorbereiding.....	26
4.4 Fase 2, Numeriek onderzoek	27
4.4 Fase 3, Modelonderzoek	28
4.5 Fase 4, Veldproeven	32
4.6 Fase 5, Utilisatie; inpassing in veiligheidsfilosofie.....	36
4.7 Afbakening onderzoek.....	37
4.8 Aftapmomenten en impact op uitvoeringsprojecten WDOD.....	37
4.9 Versterkingsprojecten buiten beheergebied WDOD	38
4.10 Concrete producten, resultaten en mijlpalen.....	40
5 Locatie veldproef	42
5.1 Proeflocatie Kampen	43
5.2 Ondergrond van de locatie	43
5.3 Omgevingsaspecten van de locatie	43
5.4 Planningsaspecten van de locatie	44
5.4 Stakeholders met betrekking tot de proeflocatie Kampen.....	44
5.5 Werkproces t.a.v. locatie	44
6 Omgeving en stakeholders.....	46
6.1 Strategisch Omgevingsmanagement	46

6.2	Participatie en communicatie in het project.....	46
6.3	Stakeholders.....	46
6.3.1	Andere waterschappen.....	46
6.3.2	Kennisinstituten en universiteiten.....	46
6.3.3	Ingenieursbureaus/aannemers.....	47
7	Organisatie.....	48
7.1	Interne opdrachtstructuur.....	48
7.2	Kernteam WDODelta.....	48
7.3	Kernteam Deltares.....	48
7.4	Klankbordgroep.....	48
7.4	HWBP begeleidingsteam.....	48
7.5	Organogram.....	48
7.6	Administratie.....	48
8	Kwaliteitsborging en kennisdoorwerking.....	53
8.1	Kwaliteitsborging.....	53
8.1.1	Deltares.....	53
8.1.2	Klankbordgroep.....	53
8.1.3	ENW.....	54
8.2	Kennisdoorwerking.....	54
8.2.1	Kennisdeling met betrokken partijen.....	55
8.2.2	Kennisborging binnen WDOD.....	56
8.2.3	Kennisoverdracht en Databeheer.....	56
9	Marktbenadering en samenwerken met de markt.....	57
9.1	Participatie Subsidiekaders HWBP.....	57
9.2	Marktbenadering onderzoeken.....	57
10	Vergunningen en veiligheid.....	59
10.1	Vergunningen.....	59
10.2	Veiligheidsprocedures.....	60
10.2.1	Veiligheidsprocedures tijdens uitvoeren proeven.....	60
10.2.2	Beveiliging van het terrein.....	60
11	Projectbeheersing.....	61
11.1	Kwaliteitsmanagement.....	61
11.2	Scopemanagement.....	61
11.3	Risicomanagement.....	61
11.4	Planningsmanagement.....	63
11.4.1	Go/no-go momenten.....	63
11.4.2	Probabilistische planning.....	64
11.5	Financieel.....	65
11.6	Voortgangsbewaking.....	65
12	Referenties.....	67

Bijlagen

Bijlage 1: Risicodossier

Bijlage 2: Planning

- A - Deterministische planning
- B - Probabilistische planning na beheersing
- C - Rapportage Probabilistische planning

Bijlage 3: SSK-raming

- A - SSK-raming Innovatieproject Opbarsten (HWBP) V1.2
- B - Totaalkosten Innovatieproject Opbarsten incl. onderbouwing en indexering Proef
- B1 - Inschrijfbedrag Van Kessel
- B2 - Inschrijfstaat Sterk
- C - Kostennota SSK-raming Innovatieproject Opbarsten
- D - Capaciteitsraming

Bijlage 4: Marktbenadering

- A - Marktbenadering concept Raamovereenkomst
- B - Marktbenadering Innovatie Opbarsten
- C - Stroomschema uitzonderingen Deltares

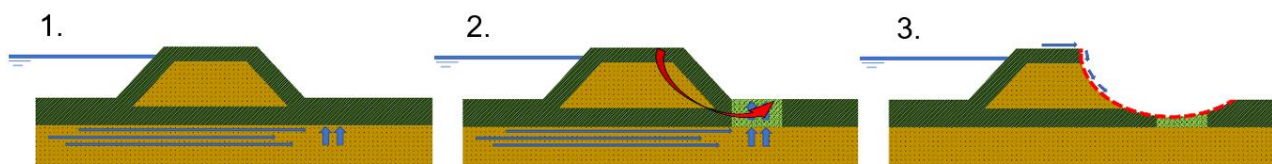
Bijlage 5: Context en voorgeschiedenis

1 Inleiding

1.1 Introductie onderzoeksvraag

In Nederland staan we voor een grote opgave. Tot 2050 moeten meer dan 1500 km waterkeringen worden versterkt. 180 km van deze keringen liggen in het beheergebied van Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOD). Zowel nationaal als binnen WDOD wordt de versterkingsopgave voor een belangrijk deel bepaald door opdrukken van de deklaag aan de binnentoe van de dijk. Opdrukken van de deklaag vindt plaats indien de waterspanning onder de deklaag toeneemt tot deze gelijk wordt aan het gewicht van de deklaag. In de beoordeling van de stabiliteit van waterkeringen wordt aangenomen dat bij opdrukken van de deklaag ook opbarsten optreedt, met gevolgen voor het faalmechanisme piping en macrostabiliteit van het binnentalud. Voor beide mechanismen is het opdrijven en opbarsten van de deklaag een belangrijk aspect. Bij macrostabiliteit bepaalt het opdrijven en opbarsten de vorm van de afschuiving en daarmee de vervolgprocessen. Het mechanisme piping kan zonder opbarsten helemaal niet optreden. Voor beide mechanismen bepaalt de sterkte van de deklaag in grote mate de versterkingsmaatregel. Uit de uitgevoerde kosten- batenanalyses, zie hoofdstuk 3, volgt dat verbeterde rekenregels rondom het opdrukken en opbarsten van dunne deklaagen aanzienlijke kostenbesparingen in de uitvoering van dijkversterkingen met zich mee zal brengen.

Vanuit beheersing van overstromingsrisico's zijn niet zozeer de afzonderlijke processen van belang als wel de keten van processen die leidt tot overstroming. Het onderzoek richt zich dan ook op een integrale aanpak van de gevolgen van opbarsten met betrekking tot piping of macrostabiliteit en de daaropvolgende vervolgprocessen die leiden tot overstroming. Het is belangrijk het gedrag van opbarsten op een realistische manier in te schatten, onafhankelijk of dat voor **macrostabiliteit** of voor **piping** is, en om ook **vervolgprocessen** na het initiële mechanisme mee te nemen in de analyse ten behoeve van beoordeling of ontwerp.



Figuur 1-1 Schets van de verschillende processen, 1) opdrukken van de deklaag 2) afschuiven binnentalud als gevolg van macro(in)stabiliteit of verzakking kruin door piping 3) optreden vervolgprocessen tot inundatie

Over het mechanisme opbarsten is nog weinig bekend. In de praktijk worden conservatieve aannames gedaan. In de rode draden van macrostabiliteit en van piping is dit daarom een belangrijk onderwerp. Bij beide faalmechanismen wordt de sterkte van de deklaag niet meegenomen. Dit leidt ertoe dat bij piping wordt aangenomen dat de deklaag altijd opbarst wanneer de waterspanningen in het watervoerend pakket voldoende zijn om deze op te tillen. Onze werkhypothese is dat bij dikkere deklaagen, vanaf ca. 3 à 4 m, de kans op opbarsten en daarmee op een overstroming door piping, verwaarloosbaar klein is. Voor de analyse van macrostabiliteit is in de huidige situatie op basis van expert judgement een knikpunt gedefinieerd. Bij een deklaag dunner dan 4 m wordt er bij een geringe opdrijfveiligheid van uitgegaan dat opbarsten optreedt en wordt geen schuifsterkte van de deklaag in rekening gebracht. Een deklaag dikker dan 4 m barst niet op. De werkhypothese is hier dat bij dunnere deklaagen ca. 50% van de sterkte van de deklaag in rekening kan worden gebracht, wat leidt tot een significante reductie van de overstromingskans. Een exact beeld van de overstromingskans kan pas worden verkregen als ook de vervolgprocessen, die nodig zijn om na het optreden van het initiële mechanisme te komen tot inundatie, bekend zijn. Momenteel is nog weinig bekend over vervolgprocessen. Vooral bij macrostabiliteit wordt verwacht dat het meenemen van vervolgmechanismen leidt tot een forse reductie van de overstromingskans.

In de POV-Macrostablieit (POVM) is een literatuur- en numeriek onderzoek uitgevoerd naar macrostablieit bij opdrijven. Om tot een gedragen nieuwe rekenregel te komen zijn een veiligheidsfilosofie inclusief kalibratie d.m.v. modelproeven en een praktijkproef nodig. In de POV Piping is een beslisboom uitgewerkt waar beleidsmatig en vooruitlopend op kennisontwikkeling vanaf een gekozen deklaagdikte kan worden gekozen om een dijkversterking uit te stellen. Het onderzoek dat is uitgevoerd of nodig is voor opbarsten bij macrostablieit kan met een kleine uitbreiding ook worden gebruikt om de kennisvragen ten aanzien van opbarsten bij piping te beantwoorden. Met betrekking tot vervolgprocessen is nog weinig bekend.

In dit plan van aanpak speelt validatie van theoretische rekenmodellen met meetdata een belangrijke rol. Voor een goede validatie van de bepaling van het overstromingsrisico met behulp van rekenmodellen dient meetdata van het hele faalpad, inclusief vervolgprocessen tot aan bezwijken, beschikbaar te zijn. In dit onderzoek wordt hiervoor gebruik gemaakt van de combinatie van modelonderzoek en een veldproef. In het modelonderzoek kunnen relatief eenvoudig meerdere bezwijkproeven worden uitgevoerd waarbij kan worden gevarieerd met belangrijke parameters, zoals laagdikte, sterkte deklaag, helling binnentalud etc. Tevens worden de modelproeven onder volledig geconditioneerde omstandigheden uitgevoerd. Een veldproef, waarin het dijklichaam ook daadwerkelijk tot bezwijken wordt gebracht, is de meest realistische weergave van de condities waaronder een dijklichaam faalt. Door een unieke veldproef, waarbij het dijklichaam onder gecontroleerde omstandigheden tot bezwijken wordt gebracht, te combineren met modelonderzoek ontstaat een compleet beeld van alle relevante aspecten.

Door de hoogwatermaatregelen bij het Reevediep, ten zuiden van Kampen, ontstaat de unieke situatie dat er medio 2023 een traject van de huidige primaire waterkering moet verdwijnen. Dit biedt mogelijkheden om grootschalige proeven op dit traject uit te voeren, waarbij de dijk mag bezwijken. Het voornemen, zoals dat in dit plan voor het innovatieproject Opbarsten wordt beschreven, is om binnen dit project enkele proefnemingen met elkaar te combineren. Eerst zal op een bescheiden schaal het ontstaan van opbarstkanalen ten behoeve van piping worden onderzocht. Vervolgens zal de macrostablieitsproef plaatsvinden door infiltratie van water in de onderliggende zandlaag waarmee opdrukken van de deklaag en vervolgens opbarsten kan worden geïntroduceerd. In de macrostablieitsproef wordt getracht de dijk tot bezwijken te belasten. Op de afgeschoven dijk worden tenslotte proeven uitgevoerd in het kader van vervolgprocessen.

Een soortgelijke proef is in 2001 uitgevoerd bij Bergambacht. Hier is een belasting aangebracht door water te infiltreren onder een dikke deklaag, daarnaast is het achterland in fases afgegraven. Op de titelpagina en in Figuur 1-2 is de situatie weergegeven na het afschuiven van de dijk.



Figuur 1-2: Overzicht praktijkproef bij Bergambacht na afschuiven (2001)

1.2 Doelen en resultaten

Het plan van aanpak beoogt een integrale aanpak van het onderzoek naar opbarsten in relatie tot beoordelen en ontwerpen van waterkeringen. De integrale aanpak is uitgewerkt aan de hand van het faalpad uit [Figuur 2-1](#). Het gebruik van faalpaden en de bijbehorende integrale aanpak is een relatief nieuwe ontwikkeling in het denken over waterveiligheid en specifiek de rol van waterkeringen hierin. In het recente verleden was het meer gebruikelijk om de afzonderlijke faalmechanismen te beschouwen.

Het hoofddoel van het innovatieproject is te komen tot een verbetering van de beoordelings-, en ontwerpmethodiek van waterkeringen in relatie tot het opbarsten van een deklaag.

Deze verbetering wordt bewerkstelligd door het genereren van experimentele data, het valideren van de bestaande rekenregels en rekenmethodieken en vervolgens, op basis van de validatie, verbeteren van de beoordelings-, en ontwerpmethodieken. Specifiek voor de drie belangrijkste gebeurtenissen/faalpaden geldt:

- Het doel met betrekking tot piping is het aanscherpen van de rekenregels voor het al dan niet opbarsten van dunne deklagen als noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van piping. Hiermee kan een verscherping van de pipinganalyses voor beoordeling en versterking worden gerealiseerd. Resultaat: Instrumentarium voor piping, werkwijze om opbarsten mee te nemen in beoordeling en ontwerp.
- Het doel met betrekking tot macrostabiliteit is het opstellen van een werkwijze voor het beoordelen en ontwerpen van dijken met betrekking tot binnenwaartse macrostabiliteit waarbij opbarsten/opdrijven van relatief dunne deklagen een rol speelt. De op te leveren werkwijze dient te zijn ingebed in het raamwerk van de veiligheidsfilosofie die voor Nederlandse waterkeringen vigerend is. Resultaat: Instrumenten voor macrostabiliteit, werkwijze voor beoordelen en ontwerp macrostabiliteit bij dunne deklagen.
- Het doel met betrekking tot vervolgprocessen is handvatten te genereren om een geavanceerde beoordeling, Toets op Maat, van primaire waterkeringen te kunnen uitvoeren. Op basis van eerder onderzoek is de verwachting dat erosie van het restprofiel door overslag en overloop het dominante vervolgmechanisme is. Het in rekening brengen van erosie na afschuiving van het binnentalud staat echter nog in de kinderschoenen, dus dit is een eerste stap in een ontwikkeling. Resultaat: Inzicht in vervolgprocessen, handvatten voor meenemen vervolgprocessen.

De problematiek die binnen dit onderzoek wordt onderzocht speelt binnen vele dijkversterkingsprojecten. Het toepassen van de ontwikkelde kennis bij die versterkingsprojecten is daarom een belangrijk nevendoeel. De aanpak en organisatie van het innovatieproject is daarop ingericht.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport beschrijft een plan van aanpak voor het onderzoek naar de gevolgen van opbarsten van dunne deklagen voor het waterkerend vermogen van dijken. Hoofdstuk 1 geeft een korte introductie in de onderzoeksvragen en onderzoekdoelen. Hoofdstuk 2 beschrijft de achtergronden van het onderzoek. In hoofdstuk 3 wordt de business case toegelicht. Hoofdstuk 4 beschrijft de voorgestelde aanpak van het onderzoek. In het onderzoek speelt de veldproef een belangrijke rol, de proeflocatie is

beschreven in hoofdstuk 5. Een beschrijving van de stakeholders en hoe die bij het project worden betrokken is te vinden in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 beschrijft de wijze waarop het voorgestelde onderzoek zal worden georganiseerd. Hoofdstuk 8 gaat in op kwaliteitsborging en vastlegging en disseminatie van ontwikkelde kennis. Hoofdstuk 9 beschrijft de marktbenadering. De benodigde vergunningen en veiligheidsaspecten zijn beschreven in hoofdstuk 10. Tot slot is de wijze waarop het project zal worden beheerst, zowel in tijd als in geld, beschreven in hoofdstuk 11.

2 Achtergrond van het voorgestelde onderzoek

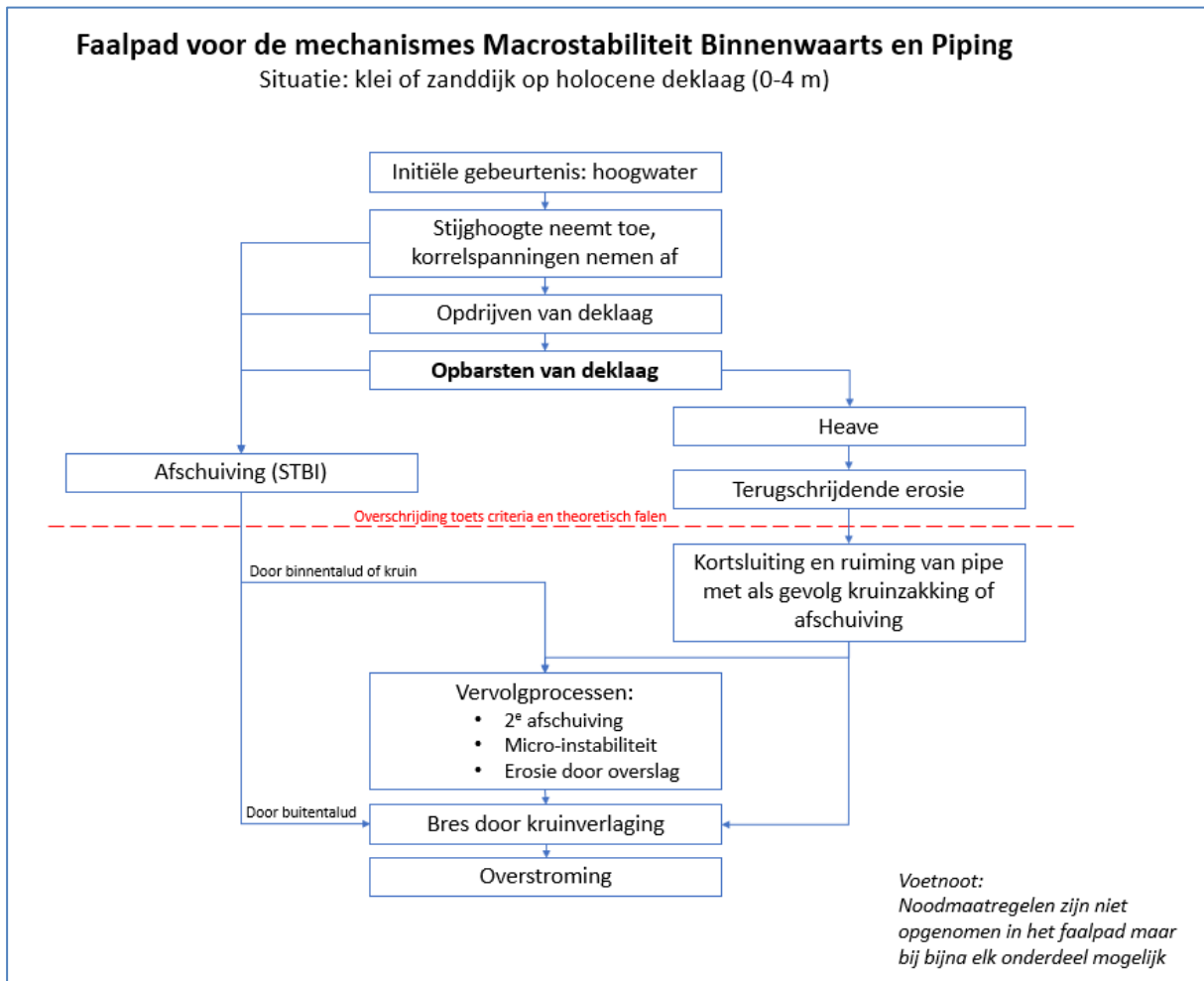
2.1 Verhaal van de kering

Het verhaal van de kering is geen geschiedenisverhaal over het ontstaan van de waterkering, maar een aanpak om te komen tot een inschatting van de overstromingskans, gebaseerd op zogenaamde 'faalpaden' en gebeurtenissenbomen. Het verhaal van de kering beschrijft de wijze waarop een overstroming optreedt. Uit het verhaal kunnen faalpaden worden afgeleid. Een faalpad beschrijft een opeenvolging van gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Bij de faalpaden aanpak geldt dat alle gebeurtenissen in het faalpad moeten optreden om een overstroming te veroorzaken. De opeenvolging van gebeurtenissen (knopen) kan worden weergegeven in een gebeurtenissenboom.

Het verhaal van de kering biedt aanknopingspunten om het resultaat van de beoordeling beter aan te laten sluiten bij overstromingskansbenadering (een integrale veiligheidsanalyse). Bij het verhaal van de kering gaat het concreet om het onderbouwen van de overstromingskans. Daarbij bepalen de maatgevende mechanismen de overstromingskans en is het niet nodig de kans op bezwijken van alle onderdelen nauwkeurig te bepalen. De navolgende paragrafen gaan nader in op het faalpad dat als uitgangspunt dient voor dit innovatieproject en de bepalende mechanismen daarbij.

2.1.1 Faalpad

Het verhaal van de kering beschrijft de wijze waarop een overstroming optreedt. Uit het verhaal kunnen faalpaden worden afgeleid. Een faalpad beschrijft de keten van gebeurtenissen die na optreden van een initieel mechanisme leidt tot overstroming. In Figuur 2-1 zijn de faalpaden gegeven van piping en macrostabiliteit bij opdrijven.



Figuur 2-1: Faalpaden van macrostabiliteit en piping, inclusief de relatie tussen de faalpaden.

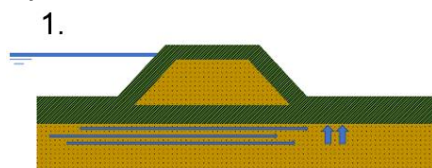
Het faalpad, zoals weergegeven in [Figuur 2-1](#), vormt de basis voor het voorgestelde onderzoek. In het faalpad zijn de drie componenten zichtbaar:

- Opbarsten van de deklaag.
- Gevolgen opbarsten voor mechanismen macrostabiliteit (sterkteverlies) of piping.
- Vervolgprocessen, een verzamelnaam voor verschillende processen die na een initieel mechanisme kunnen optreden.

In het faalpad zijn verschillende (deel)mechanismen zichtbaar. Niet alle mechanismen zijn even relevant voor de overstromingskans. Het onderzoek zal zich richten op de mechanismen opbarsten, eerste afschuiving, vervolgproces (vervolgafschuivingen en erosie restprofiel).

2.1.2 Component: Opbarsten

Bij toenemende waterdruk in de zandlaag onder de deklaag zal de deklaag worden opgedrukt. Naast het krachterevenwicht bestaande uit gewicht van de deklaag en de waterdruk in de zandlaag zal de sterkte van de laag een rol spelen bij het opbarsten van de deklaag. Eerder uitgevoerde analyses in het kader van de POVM laten zien dat de horizontale kracht, die door het binnentalud op de deklaag wordt



uitgevoerd essentieel is voor het laten uitknikken van de deklaag. Zonder dit uitknikken werd in de numerieke analyses opbarsten van de deklaag niet of nauwelijks gevonden.

In de huidige analyses voor beoordeling en ontwerp wordt, zowel voor het faalmechanisme macrostabiliteit als piping het mogelijk optreden van opbarsten alleen getoetst aan de hand van het krachterevenwicht. Dat wil zeggen dat er conservatief vanuit wordt gegaan dat als een dunne deklaag (theoretisch) opdrijft ook altijd opbarst. Door ook de sterkte van de deklaag en geometrische aspecten die leiden tot uitknikken van de deklaag in beschouwing te nemen kan de mogelijkheid van opbarsten nauwkeuriger worden bepaald.

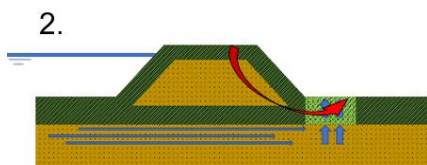
Opgemerkt wordt dat hier een verschil ontstaat in de combinatie opbarsten met piping enerzijds en de combinatie opbarsten en macrostabiliteit anderzijds. Bij macrostabiliteit is opdrijven aan de teen van de dijk van belang. Hier is een invloed van het talud te verwachten. Het talud zal naar verwachting steunen op de deklaag en daarmee een horizontale kracht in de deklaag brengen. Naar mate de stabiliteit afneemt zal de horizontale druk uit het talud en daarmee de kans op uitknikken groter worden. Dit is afwijkend van het opbarsten in combinatie met het mechanisme piping. Piping kan ook optreden als het opbarsten van de deklaag zich verder van dijk voordoet. Op een locatie verder van het dijklichaam zal de horizontale druk die het dijktaalud in de deklaag brengt niet merkbaar meer zijn. Met andere woorden bij opbarsten van de deklaag in relatie tot macrostabiliteit speelt de geometrie van het dijklichaam een belangrijke rol. Bij opbarsten in relatie tot piping is de geometrie van het dijklichaam veel minder van belang.

Het fenomeen opbarsten zelf is niet vaak zichtbaar omdat er toestroom is van water, hierdoor wordt het aan het zicht onttrokken. In onderstaande foto serie is het opbarsten wel zichtbaar. Tijdens het bouwrijp maken van een stuk land is dit toevalligerwijs vastgelegd. Zichtbaar is dat er kleine scheuren ontstaan die zich ontwikkelen tot grote scheuren. Hierna stroomt er water toe en zijn de scheuren minder goed of niet meer zichtbaar.



Figuur 2-2: Beeldmateriaal van het fenomeen opbarsten (bron: Arcadis beeldbank), zichtbaar is dat scheuren groter worden en dat de grond omhoog beweegt, water stroomt door de scheur.

2.1.3 Component: Gevolgen opbarsten voor macrostabiliteit en piping



Bij de analyse van de binnenwaartse stabiliteit van dijken wordt onderscheid gemaakt in het opdrijven van een relatief dik slappe lagen pakket en relatief dunne deklaag. Dikke lagen werden verondersteld intact te blijven en tijdens het opdrijven te verschuiven of horizontaal te worden samengedrukt. Dunne lagen daarentegen werden verondersteld op te barsten.

Pragmatisch is er voor gekozen om voor de overgang tussen een dunne deklaag en dikke lagenpakket een dikte van 4 m aan te houden. Regionaal gezien komt dit grofweg overeen met het onderscheid tussen het bovenrivierengebied, waar relatief dunne deklagen voorkomen en het benedenrivierengebied, waar deklaagdiktes van 8 tot 12 m voorkomen.

Voor de situatie met een dikke deklaag is afgelopen decennia veel aandacht geweest voor het opstellen van rekenmodellen en beoordeling- en ontwerpprocedures. Er zijn verschillende veld- en modelproeven uitgevoerd en een specifiek stabiliteitsmodel voor de situatie bij opdrijven ontwikkeld. Voor de situatie met dunne deklagen is vanuit onderzoek en ontwikkeling minder aandacht geweest.

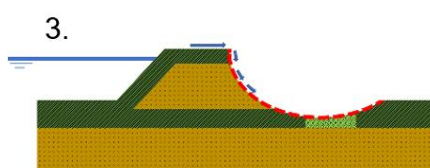
In de stabiliteitsanalyse waarin opbarsten van een dunne deklaag speelt wordt, conform de leidraden, geen sterkte aan deze deklaag toegekend. Het recent uitgevoerde POVM-onderzoek ([1], [2]) laat zien dat dit een conservatief uitgangspunt is waarvoor optimalisatie mogelijk is. Zoals toegelicht in hoofdstuk 3 zal voor de situatie met een dunne deklaag duidelijke winst opleveren. Deze winst uit zich in een minder conservatieve beoordeling van de stabiliteit wat zowel de financiële impact van het mechanisme op de dijkversterking als de maatschappelijke impact ten goede komt. Hier wordt wel de kanttekening bij geplaatst dat naast de optimalisatie die met betrekking tot opbarsten uit de numerieke berekeningen mogelijk lijkt, horizontaal vervormen van de deklaag als een belangrijk mechanisme naar voren. Dit mechanisme wordt nu niet in beschouwing genomen in de stabiliteitsanalyses van waterkeringen. Om deze resultaten van numerieke analyses verder te brengen en op te nemen in de beoordelings-, en ontwerpmethodieken is validatie van de numerieke resultaten essentieel. Dit plan van aanpak voorziet in deze validatie.

Voor piping geldt dat recent veel onderzoek is uitgevoerd naar het fenomeen (POV Piping). Hierbij heeft de aandacht vooral gelegen op het erosieproces en zandtransport. Dit onderzoek heeft geleid tot een aanzienlijke ontwikkeling met betrekking tot de predictie modellen voor dit faalmechanisme. Met betrekking tot opbarsten geldt dat alleen getoetst wordt op krachterevenwicht, oftewel opdrijven van de intacte deklaag. Aanname is dat als de deklaag opdrijft, deze ook opbarst, waardoor het pipingproces kan starten. Mogelijk is dit voor zeer dunne deklagen terecht, maar verwacht mag worden dat naarmate de deklaag dikker wordt voor het daadwerkelijk optreden van opbarsten andere aspecten dan alleen krachterevenwicht een rol speelt. Hierbij wordt opgemerkt dat bij aanwezigheid van deklagen geldt dat indien deze niet opbarst, piping ook niet kan optreden.

In de huidige methodieken wordt bij de macrostabiliteitsanalyse aangehouden dat lagen met een dikte dunner dan 4 m bij opdrijven altijd zullen opbarsten en daarmee geen schuifsterkte meer hebben. In de pipinganalyse wordt alleen naar het verticale krachterevenwicht gekeken. Indien er geen evenwicht is wordt ervan uitgegaan dat piping optreedt, ook als de betreffende laagdikte groter is dan 4 m. Met dit project kan deze tegenstrijdigheid niet alleen worden opgelost, maar kan ook beter worden vastgesteld wanneer piping onder maatgevende omstandigheden verwacht mag worden. Als er een indicatie gegeven kan worden wanneer opbarsten te verwachten is, maar ook een indicatie wanneer opbarsten zeker niet optreedt kan, ten opzichte van de huidige adviespraktijk een aanzienlijk winst worden gerealiseerd.

Verwacht wordt dat het lengte van de opdrijvende zone, dit is de afstand loodrecht op de dijk waarover de deklaag opdrijft, van invloed is op de stabiliteitsanalyse. Bij een korte opdrijfzone zal uitknikken, opbarsten en eventueel horizontaal samendrukken van de toplaag minder snel plaats vinden dan bij lange opdrijfzones. De lengte van de opdrijfzone wordt bepaald door het verloop van de stijghoogte in de onderliggende zandlaag en het verloop van de dikte en volumiek gewicht van de deklaag naar het achterland toe. In de huidige adviespraktijk wordt geen rekening gehouden met de opdrijflengte. Het voorgestelde onderzoek zal zowel in de numerieke fase als bij de modelproeven de invloed van de opdrijflengte nader analyseren. In de veldproef zal de opdrijflengte worden bepaald door de aanwezige geometrie en eigenschappen van de zandlaag. Op basis van de numerieke berekeningen en ervaringen uit de modelproeven zal een voorspelling worden gemaakt die aan de hand van de veldmeetdata kan worden getoetst.

2.1.4 Component: vervolgprocessen



Eén van de extra elementen die met het faalpad uit [Figuur 2-1](#) in beeld worden gebracht is het feit dat ná het overschrijden van de huidige faaldefinities voor macrostabiliteit of piping over het algemeen nog een aantal stappen noodzakelijk is voordat daadwerkelijk sprake is van overstroming. In het geval dat een binnentalud is bezweken door afschuiving die door de kruin of het binnentalud gaat, zijn er vervolgprocessen, zoals microstabiliteit, secundaire afschuiving of erosie bij overslag/overloop, die eerst op moeten treden voordat de resterende kruinbreedte is verdwenen. Na de bezwijkproef (macrostabiliteit) zullen vervolgprocessen onderzocht worden middels aanvullende proeven.

In de rapporten *Faalpadenanalyse macrostabiliteit binnenwaarts* [17] en *Dijkerosie door overloop en overslag in waterkeringen, Faalpaden en modelbeschrijving* [18] is de stand van de kennis ten aanzien van de erosie van het binnentalud ná het optreden van een initieel bezwijkmechanisme opgemaakt. Door een afschuiving ontstaat een steile klif in het binnentalud of kruin, waarbij de dijk kern bloot komt te liggen. Door overslag of overloop zal deze klif gaan terugschrijven richting rivier. Dit is in de internationale literatuur aangeduid met head cut erosion. Als dit ver genoeg doorzet zal dit leiden tot kruinverlaging. In 1953 is dit vervolgmechanisme vaak waargenomen, zie [Figuur 2-3](#). In de bovengenoemde rapporten, [17], [18], is voor vier verschillende cases de kans van optreden van een bres voor het complete faalpad bepaald. Hieruit bleek dat het meenemen van de vervolgmechanismen leidde tot een factor 10 tot 100 lagere faalkans. Verder bleek erosie bij overslag als vervolgproces maatgevend te zijn boven andere vervolgprocessen als micro-instabiliteit en secundaire glijvlakken. Tenslotte was de constatering dat kennis op dit gebied beperkt is, ook internationaal. Omdat erosie bij overloop of overslag maatgevend is ten opzichte van de andere vervolgprocessen, zal bij het veldonderzoek naar vervolgprocessen voornamelijk naar erosie worden gekeken. De insteek is wel om andere vervolgprocessen, met name vervolgafschuivingen mee te nemen in de modelproeven, met name door de centrifugeproeven voor macrostabiliteit langer door te zetten, om zo eventueel optredende vervolgprocessen te kunnen simuleren. Als vastgesteld kan worden dat bepaalde deelprocessen niet of met een zeer kleine kans optreden dan is dat winst ten opzichte van de huidige stand van de kennis.



Figuur 2-3: Beschadigde dijk (polder Vierbannen, Duiveland) als gevolg van erosie ten tijde van de watersnoodramp in 1953.

Het doen van erosieproeven op kleine schaal of in de geocentrifuge, alsmede het doen van proeven op kunstmatige, geprepareerde klei is voor het bestuderen van erosieverschijnselen in klei niet voor de hand liggend. De erosie van klei en kleibekleding op dijken wordt beïnvloed doordat deze klei in de loop der tijd verweert, gestructureerd raakt, door bodemprocessen wordt beïnvloed, et cetera. Het

erosieproces kan in werkelijkheid anders zijn dan in het laboratorium wordt nagebootst. Het is om die reden ook nog niet goed mogelijk om het erosieproces en de erosieparameters met monsters en proeven in detail goed vast te stellen. Bovendien is de variatie in eigenschappen van in de praktijk aanwezige grond in dijken aanzienlijk. Wel kan in de geocentrifuge worden vastgesteld of er secundaire afschuifvlakken optreden. Ook kan met de centrifugeproeven een indruk ontstaan van het restprofiel. Het restprofiel is van belang om vast te stellen in welke mate (lengte en breedte) de dijk kern (zand) bloot komt te liggen en zou kunnen eroderen indien erosie zou ontstaan. Daarnaast kan het vaststellen van het restprofiel bijdragen aan het verder ontwikkelen van het ontwerpen van stabiliteitsverhogende langsconstructies. Hierbij wordt opgemerkt dat dergelijke constructies buiten de afbakening van dit onderzoek vallen.

Omdat er sprake is van 1) beperkte kennis van de processen, 2) beperkte kennis van de relevante grondeigenschappen en 3) de moeilijkheid om dit op kleine schaal na te bootsen, is de behoefte groot om deze vervolprocessen middels grootschalige proeven op dijken na te kunnen bootsen. In dit plan van aanpak is de uitvoering van een grootschalige bezwijkproef naar afschuiven van het binnentalud na opbarsten/opdrijven opgenomen. De uitvoering van de praktijkproef geeft een unieke mogelijkheid om deze proef te vervolgen door na te gaan welke vervolgerosie optreedt als dit bezweken profiel wordt blootgesteld aan overloop of overslag.

Het experimentele gedeelte van het onderzoek rondom vervolprocessen bestaat uit:

- Het doorzetten van de proeven in de geocentrifuge, die voor opbarsten zullen worden uitgevoerd, om het restprofiel en het optreden van secundaire glijvlakken vast te stellen.
- Erosieproeven als onderdeel van de praktijkproef op de afgeschoven dijk.

2.2 Relatie met POVM

Zoals eerder benoemd, in de POV-Macrostabieliteit is een voorstudie verricht naar opbarsten van dunne deklagen en de consequenties van dit opbarsten. Deze voorstudie is mede de aanleiding geweest voor het schrijven van het voorliggende plan van aanpak, waarin de resultaten van de voorstudie zijn

verwerkt. Om een indruk te geven van de uitkomsten van de voorstudie is hieronder een korte samenvatting van de vier belangrijkste rapporten opgenomen.

Consequentie analyse (2016), [1]

De consequentieanalyse betreft een analyse op 234 dwarsprofielen in het bovenrivierengebied. Hierin zijn verschillende scenario's voor het gedrag van opdrijven/opbarsten met elkaar vergeleken en de resultaten op kosten gezet. Tussen de verschillende scenario's zit een verschil van enkele tientallen strekkende kilometers dijk die worden afgekeurd, wat leidt tot een verschil van maximaal ongeveer 150 M€ aan versterkingskosten. De resultaten van dit rapport zijn opgenomen in paragraaf 3.1. Opgemerkt wordt dat dit rapport alleen betrekking heeft op opbarsten in relatie tot macrostabiliteit.

Oplegnotitie t.b.v. vervolgonderzoek (Juli 2019), [20]

Dit rapport beschrijft het numeriek modelleren van de grondwaterstroming bij aanwezigheid van een opbarstkanaal of scheur, waarmee een significant drukverlies in het zandpakket wordt aangetoond. Door dit drukverlies kan de breedte van de opbarstzone kleiner worden dan de breedte van een afschuiving. Er is echter ook aangetoond dat het gat weer verstopt zodra daarin een zandsuspensie omhoog komt (het begin van piping). Daarmee gaat het gunstige effect van drukverlies weer verloren. Het rapport omvat eveneens een analyse van deklaagdikte bij 494 waargenomen zandmeevoerende wellen. Het optreden van een zandmeevoerende wel is namelijk een sterke aanwijzing dat (lokaal) opbarsten is opgetreden. Het blijkt dat de deklaagdikte in slechts 10% van de gevallen groter was dan de rekenwaarde van 4 m. Dit zou kunnen betekenen dat 4 m een onveilige rekenwaarde is voor opbarsten op lokale schaal. Kanttekening daarbij is dat zowel in de database als in het bodemmodel onnauwkeurigheden zitten die van invloed kunnen zijn op deze 10%.

Numerieke simulatie opbarsten (2019), [21]

Dit betreft eindige-elementen analyses waarin het gedrag gedurende het opdrijven van de afdeklaag is bestudeerd voor een eenvoudig voorbeeld. Voor het eerst is het gelukt om het opbarsten van de deklaag te simuleren, inclusief interactie met grondwaterstroming. Analyse van de resultaten geeft een aanwijzing dat een volledige sterkereductie bij opbarsten van een deklaag in de stabiliteitsanalyse in een glijvlakberekening te conservatief is, maar dat het volledig intact veronderstellen van de deklaag te optimistisch is. De variantenstudie is te beperkt om op basis hiervan al een voorstel te doen voor aanscherping van de rekenregels. Daarom wordt aanbevolen om de modelstudie verder uit te breiden. Naast het uitbreiden van de studie wordt eveneens aanbevolen validatie van de numerieke analyses uit te voeren. Een dergelijke validatie kan worden uitgevoerd door een vergelijking te maken tussen numerieke simulaties en experimentele data.

Numerieke variatiestudie en raamwerk voor controle (2020), [22]

Dit betreft een uitbreiding van de in 2019 uitgevoerde en hierboven beschreven numerieke simulaties van het opbarsten/samendrukken van de deklaag. De uitbreiding betreft het toepassen van variatie in deklaagsterkte (cohesie), deklaagdikte, deklaagstijfheid (elasticiteitsmodulus), doorlatendheid (permeabiliteit) van het zand en ten slotte de aanwezigheid en ligging van een sloot. Uit de variatiestudie is afgeleid wat de dominante parameters zijn, die in de aangepaste beslisregel moeten worden opgenomen.

De resultaten van de numerieke simulaties suggereren dat opbarsten/uitknikken in situaties met een geringe oprijfveiligheid slechts in een (zeer) beperkt aantal gevallen het dominante faalmechanisme kan worden. In de berekeningen wordt gevonden dat uitknikken van de deklaag als gevolg van de horizontale drukkracht uit het talud en de verticale druk van het grondwater onder de deklaag van belang zijn bij het optreden van opbarsten. Belangrijke kanttekening is wel dat aan de gehanteerde schematisering nog te veel vereenvoudigingen en beperkingen kleven om zonder verdere validatie dit al te kunnen toepassen voor aanpassing van de huidige beslisregel. Dit dient te worden ondervangen door middel van validatie aan experimentele data. De resultaten van de numerieke simulaties suggereren verder dat afschuiven van het binnentalud als gevolg van het horizontaal indrukken van de deklaag een belangrijk mechanisme is. In de vigerende leidraden wordt het faalmechanisme afschuiven door horizontale indrukking van de deklaag niet beschreven en daarom niet in de beoordeling en ontwerp van dijken meegenomen.

Eindconclusie voor dit onderzoek is dat de huidige beslisregel voor het uitsluiten van opbarsten op grond van de numerieke resultaten significant aangescherpt lijkt te kunnen worden, echter dat afschuiven als gevolg van horizontale indrukking van het slappe lagenpakket in beschouwing zou moeten worden genomen. Om aan de hand van deze uitkomsten te komen tot verbeterde werkwijze voor het beoordelen en ontwerpen van dijken met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit bij opbarsten van de deklaag is een validatie van de numerieke uitkomsten aan experimentele data nodig.

2.3 Relatie met Rode Draden

Het onderzoek naar het opbarsten van een dunne deklaag en de invloed daarvan op het waterkerend vermogen van een dijk staat niet los van andere ontwikkelingen. In bijlage 5 is een voorgeschiedenis van onderzoek naar dijken opgenomen en laat zien hoe het voorliggend onderzoek op een logische wijze volgt uit het eerder uitgevoerd onderzoek. Naast het vooronderzoek binnen de POVM, kent dit project nog meer verbanden.

Aan het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen worden in Nederland hoge eisen gesteld. De methodiek die gevolgd dient te worden bij het beoordelen van de stabiliteit van waterkeringen dan wel het ontwerp van nieuwe waterkeringen is vastgelegd in de verschillende leidraden. De leidraden worden regelmatig aangepast aan nieuwe inzichten in het gedrag van waterkeringen. Onderzoeksprogramma's zoals Kennis voor Keringen van Rijkswaterstaat of project overstijgende verkenningen (POV) hebben hier een herkenbare rol in gespeeld.

Door RWS WVL, HWBP en Deltares zijn documenten opgesteld waarin een gezamenlijke visie op de verschillende faalmechanismen is beschreven. Voor het hier beschreven onderzoek is specifiek van belang: *rode draad overstroming door macrostabiliteit* [10], *rode draad overstroming door piping* [11] en *rode draadoverstroming door dijkerosie* [12]. Aan de hand van de faalpaden voor beiden mechanismen is lopend onderzoek ingedeeld en zijn witte vlekken vastgesteld en geprioriteerd. Met dit document wordt onder andere 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 overstromingskans. Een verdere toelichting op de Rode Draden notitie is gegeven in bijlage 5. Het hier voorgestelde onderzoek geeft invulling aan enkele van de kennisleemtes die zijn geconstateerd in de rode draden notities.

3 Business case

3.1 Onderbouwing verwacht rendement

Dit hoofdstuk gaat in op het te verwachten rendement van het onderzoek beschreven in dit plan van aanpak. In de onderbouwing van het rendement van het onderzoek is gebruik gemaakt van bestaande gegevens die betrekking hebben op de afzonderlijke faalmechanismen. Het gevolg is dat de onderbouwing van het rendement is opgesplitst naar rendement ten aanzien van de beoordeling op piping, van de beoordeling op macrostabiliteit en van het meenemen van vervolprocessen.

3.1.1 Opbarsten in relatie tot Macrostabiliteit

Om een indruk te krijgen van de potentiële opbrengst van het verbeteren van beoordelings-, en ontwerpmethoden voor dijken met een dunne opdrijvende of opbarstende deklaag is in het POV-Macrostabiliteit onderzoek een consequentieanalyse uitgevoerd [1]. Uit de consequentieanalyse bleek dat het faalmechanisme macrostabiliteit bij opbarsten van het achterland relevant is voor 243 km dijk lengte in Nederland. Op basis van de huidige rekenregels, met betrekking tot dit faalmechanisme, zou circa 90 km hiervan niet voldoen aan de veiligheidseisen. Het benodigde budget voor de bijbehorende dijkversterking wordt geschat op 585 M€. In de consequentieanalyse is ook een schatting gemaakt van de potentiële opbrengst van het onderzoek. Afhankelijk van het ingeschatte succes van zo'n onderzoek wordt gevonden dat de 90 km van de voor dit mechanisme afgekeurde dijk lengte kan worden gereduceerd tot 65 km. Dit is een reductie van 25 km met een geraamde besparing tot M€ 150. Gedurende het onderzoek zal er een werkwijzer/handvatten worden opgesteld en worden bijgewerkt. Hierin zullen ook de consequenties worden bijgewerkt van de tussentijdse concept resultaten en concept conclusies.

3.1.2 Opbarsten in relatie tot piping

Voor het mechanisme macrostabiliteit bij opbarsten bij dunne deklaag heeft het verwachte rendement een nauwkeuriger onderbouwing dan het verwachte rendement met betrekking tot piping. Voor opbarsten in relatie tot piping is geen uitgebreide kosten- batenanalyse beschikbaar. In plaats daarvan wordt een grovere schatting van het rendement gemaakt. Indien, aan de hand van de onderzoeksresultaten, kan worden aangetoond dat opbarsten bij dikke lagen niet optreedt en dat daarom piping niet kan optreden is een aanzienlijke kostenbesparing mogelijk. Met name voor dikkere lagen zijn de piping maatregelen duur. Verwacht wordt dat, indien kan worden uitgesloten dat opbarsten van lagen dikker dan 4 m kan optreden, er een reductie van 50 tot 100 km dijkversterking kan worden bereikt. De besparing die dat met zich meebrengt op programmaniveau ligt op 500 – 1000 M€.

3.1.3 Vervolprocessen

Zoals is toegelicht in paragraaf 2.1.4 bestaat de restcapaciteit vooral uit de weerstand tegen erosie na afschuiven binnentalud. Op dit moment wordt voor zanddijken geen sterkte gerekend, ook niet bij minimale overslag. Tegelijkertijd is het beeld dat de kans op vervolmechanismen zoals secundaire afschuivingen, microstabiliteit als er geen overslag optreedt vrijwel nihil is. Dit is tamelijk binair of 0 % of 100 % restcapaciteit. Een kleine aanscherping kan al snel tot een 10 % kleinere faalkans leiden met als gevolg dat dit in de beoordeling tot een iets lagere aanvaardbare kruinhoogte leidt en vervolgens dat dit tot 1 % minder afgekeurde dijken leidt. Als we dit op piping en macrostabiliteit betrekken dan is de opgave voor het HWBP in de orde van 1000 km dijk. Eén procent minder versterking zou 10 km dijk betekenen, wat met een kilometerprijs van 7 M€ een besparing betekent van 70 M€. Benadrukt wordt dat dit een indicatieve schatting is.

Naast de optimalisatie van beoordelen en ontwerpen van waterkeringen kunnen de onderzoeksresultaten worden gebruikt in het aanscherpen van noodmaatregelen.

3.2 Opgave WDODelta

Waterschap Drents Overijsselse Delta heeft in de komende 25 jaar een enorme opgave ten aanzien van de primaire keringen die zij beheert. In totaal dient 180 km primaire keringen te worden versterkt met een verwachte omvang van kosten die orde grootte 1.000 M€ betreft. Het thema opbarsten en aanverwante mechanismen, is relevant in de versterkingsprojecten binnen het beheergebied omdat er vaak sprake is van dunne deklagen (<4m). De IJssel- Vechtdelta is namelijk een relatief jong afzettingsgebied. Binnen het beheergebied van WDODelta betreft het ongeveer 80 kilometer waar opbarsten een dominante rol speelt in de totale faalkans bij het beoordelen en ontwerp van de primaire kering. Als we, ter illustratie, uitgaan van de kengetallen van de landelijke businesscase, zoals die nader is gespecificeerd in paragraaf 3.1, kan voor ongeveer 1/3 van deze 80 kilometer een reductie worden bereikt. Deze reductie is dan ongeveer 1/3 van de landelijke potentiële besparing, ongeveer 50 miljoen euro voor het beheergebied van WDODelta. Merk op dat dit enkel een verwachte reductie als gevolg van het onderzoek met betrekking tot macrostabiliteit betreft, zie ook paragraaf 3.1.

Gezien de genoemde omvang van de toekomstige en huidige HWBP-versterkingsprojecten, hecht WDOD groot belang aan innovaties. Dit om op een verantwoorde manier de projecten te kunnen uitvoeren, geheel in lijn met het devies van HWBP 'sober en doelmatig'. Tevens is het de ambitie van WDOD - en zet zij ook daartoe de nodige middelen in - om een kennis gedreven waterschap te zijn.

Uitgaande van de genoemde projectomvang, visie, maatschappelijk opdracht en ambitie, heeft WDOD het navolgend plan van aanpak uitgewerkt en wil zij graag een trekkende rol nemen op dit thema. Dit plan is tot stand gekomen in samenwerking met Deltares en nauwe afstemming met de programmadirectie van het HWBP.

4 Aanpak, werkwijze en afbakening

4.1 Inleiding; Aanpak op hoofdlijnen

Dit hoofdstuk beschrijft het inhoudelijk deel van het plan van aanpak. Hierin zijn de activiteiten opgenomen die moeten worden uitgevoerd om te komen tot de onderzoeksdoelen die zijn gedefinieerd in paragraaf 0. Het hoofddoel van het innovatieproject is te komen tot een verbetering van de beoordelings-, en ontwerpmethodiek van waterkeringen in relatie tot het opbarsten van een dunne deklaag.

In de dagelijkse ingenieurspraktijk van het beoordelen van bestaande waterkeringen en het ontwerpen van dijkversterkingen is het gebruik van **numerieke modellen** onontbeerlijk. Een belangrijk deel van het onderzoek bestaat dan ook uit het genereren van **experimentele data** aan de hand waarvan numerieke methoden kunnen worden gevalideerd en op onderbouwde wijze verder kunnen worden ontwikkeld. In het onderzoek zullen numerieke analyses en experimenteel onderzoek in samenhang worden uitgevoerd. Dit houdt in dat voordat proeven worden uitgevoerd, eerst numerieke analyses worden uitgevoerd om de numerieke grenzen van de state-of-the-art op te zoeken en vervolgens een voorspelling van de uitkomst van het experimentele onderzoek op te stellen. Na afloop van het experimentele onderzoek zullen de resultaten uit de proeven worden vergeleken met de vooraf opgestelde voorspelling en zullen de proeven, aan de hand van de resultaten worden nagerekend. Door tussen de uitvoering van de verschillende proeven door tijd te nemen voor **numerieke analyses** kan de opzet van de daaropvolgende proeven worden verbeterd en geoptimaliseerd. Op basis van de voorspellingen vooraf en de analyses na afloop van de proeven kunnen rekenmethodieken, werkwijze, voor de dagelijkse praktijk worden opgesteld.

Het experimentele werk zal bestaan uit een combinatie van **modelonderzoek** en een **veldproef**. Deze combinatie geeft meerwaarde aan het onderzoek. In het modelonderzoek wordt een proef onder geconditioneerde, vrijwel volledig bekende, omstandigheden uitgevoerd. Hierdoor ontstaat een minimum in onzekerheid in de validatie van de resultaten en de vergelijking met numerieke analyses. Ook kan in modelonderzoek relatief eenvoudig een serie proeven worden uitgevoerd waarin de belangrijkste parameters kunnen worden gevarieerd, waaronder bijvoorbeeld ook de dikte van de deklaag. Het nadeel van modelonderzoek is dat het veelal een eenvoudige geometrie en grondopbouw betreft, waarmee het model een versimpeling van de werkelijkheid betreft. Een veldproef kent wel alle complexiteiten die in de werkelijkheid aanwezig is. Echter veldproeven, waarin een waterkering tot bezwijken wordt gebracht zijn uniek. Door nu modelonderzoek te combineren met een veldproef bestaat de mogelijkheid om rekenmodellen te valideren waarbij rekening wordt gehouden met verschillende varianten, waar het gaat om grondopbouw, taludhelling etc. en tevens inzichtelijk wordt gemaakt hoe goed de modellen presteren in praktijksituaties.

In de voorgaande alinea's wordt gesproken over numerieke analyses. Benadrukt wordt dat hiermee niet alleen zeer geavanceerde eindig elementen modellen worden bedoeld, maar ook minder geavanceerde analytische modellen of benaderingsformules. Verwacht wordt dat om het proces van opbarsten wiskundig goed te beschrijven, het gebruik van geavanceerde modellen onvermijdelijk is. Echter, in de vertaling van de onderzoeksresultaten naar de dagelijkse praktijk zal met name gekeken worden naar de modellen die in dagelijkse adviespraktijk worden gebruikt en hoe deze modellen kunnen worden ingezet in aansluiting op de onderzoeksresultaten. In de toepassing voor piping en macrostabiliteit zijn reeds geavanceerde modellen beschikbaar. Voor de evaluatie van vervolprocessen is dit minder het geval.

In dit onderzoek zal alleen **bestaande software** worden gebruikt. Indien uit het onderzoek blijkt dat aanpassingen van bestaande software of ontwikkeling van nieuwe software nodig is dient dit in een nieuw te definiëren project te worden opgepakt en uitgewerkt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan opname in het kennis voor keringen programma.

Zoals in de inleiding toegelicht beoogt dit plan van aanpak een integrale aanpak van de evaluatie van de consequenties van opbarsten van de deklaag voor het waterkerend vermogen van dijken. In de inleiding is tevens aangegeven dat het gebruik van een integrale aanpak een relatief recente ontwikkeling is in de wijze waarop waterkeringen worden beoordeeld. Voor die tijd was het gebruikelijk om de verschillende faalmechanismen afzonderlijk te beschouwen. Voor een optimaal onderzoekresultaat is het essentieel om aan te sluiten bij de meest recente onderzoekresultaten die voor de afzonderlijke faalmechanismen zijn bereikt. Het gevolg is dat hoewel het proevenprogramma gezamenlijk zal worden gedefinieerd, er accentverschillen zijn. De uitwerking van de proeven voor het vaststellen van de invloed van opbarsten op piping zal dan ook vanuit een wat andere achtergrond door andere onderzoekers worden uitgevoerd dan de opbarsten in relatie tot macrostabiliteit. Hetzelfde geldt ook voor het onderzoek naar vervolgprocessen.

Zoals hiervoor beschreven zullen in het onderzoek naar opbarsten in relatie tot piping en opbarsten in relatie tot macrostabiliteit en vervolgprocessen verschillende accenten worden gelegd. Hierna worden, per fase, de verschillende accenten verder toegelicht.

4.2 Samenvatting uit te voeren activiteiten

Bovenstaande aanpak op hoofdlijnen is verder uitgewerkt in een vijftal fasen. Deze vijftal fasen worden in de navolgende paragrafen verder inhoudelijk beschreven. Benadrukt wordt dat de fasen niet noodzakelijkerwijs na elkaar worden uitgevoerd. De fasen omvatten een clustering van activiteiten die een logisch verband houden met elkaar. Zo zijn alle activiteiten met betrekking tot het modelonderzoek, fase 3, samengevoegd, en ook de activiteiten met betrekking tot veldproef, fase 4, zijn samengevoegd. Hoewel het merendeel van de activiteiten van fase 4 na fase 3 zijn gepland, zal bijvoorbeeld de uitvoering van de test-infiltratieput, ook onderdeel van fase 4, in een vroege fase worden uitgevoerd zodat de resultaten beschikbaar zijn voor de bijbehorende go – no go moment. De inhoud daarvan komt allemaal samen in onderstaande activiteitentabel, zie Tabel 4-1. In deze activiteitentabel zijn de activiteiten aangegeven die worden uitgevoerd om te komen tot het doel zoals beschreven in paragraaf 0. In principe leidt elke activiteit tot een product, veelal in de vorm van een rapport. Gedurende de uitvoering van het project is het mogelijk om producten samen te voegen of juist te splitsen. De planning is weergegeven in bijlage 2.

Aan de hand van de geplande activiteiten zijn twee Go – No go momenten gedefinieerd. In deze Go – No go momenten wordt nagegaan in hoeverre op basis van de tussenresultaten binnen de geplande tijd en gepland budget de einddoelen nog haalbaar zijn. Een nadere toelichting op de Go – No go momenten is gegeven in paragraaf 11.2.

Tabel 4-1, Activiteitentabel

fase	Opdrijven en opbarsten bij Piping	Opdrijven en opbarsten bij Macrostabiliteit	Vervolgprocessen
1	<ul style="list-style-type: none"> a) Identificeren situaties (omstandigheden & parameters) die bepalen of de deklaag scheurt waarbij geen sprake is van piping (literatuur & database wellen) b) Uitbreiden conceptueel model voor opdrijven en opbarsten. c) Aanpassen narratief opbarsten, welke gegevens zijn in de praktijk benodigd voor analyse d) Workshop experts incl rapportage a-d. 	<ul style="list-style-type: none"> e) opstellen gedetailleerd onderzoeksplan op basis van de POVM vooronderzoek 	<ul style="list-style-type: none"> f) Beschrijven faalpad voor het erosieproces bij zanddijken met kleiafdekking. g) Inventariseren beschikbare modellen voor faalpadanalyse
2	<ul style="list-style-type: none"> a) Verificatie toepasbaarheid numeriek model uit POVM 	<ul style="list-style-type: none"> f) Onderzoek impact voor veiligheidsformat (zijn kalibratie relaties 	<ul style="list-style-type: none"> j) Vaststellen (predictie) model voor vervolgprocessen: erosie van zanddijken met

Plan van aanpak HWBP innovatieproject Opbarsten

fase	Opdrijven en opbarsten bij Piping	Opdrijven en opbarsten bij Macrostabieleit	Vervolgprocessen
	<p>(verwacht wordt dat het huidige model geschikt is)</p> <p>b) Bevestigen werking conceptueel model met numerieke berekeningen</p> <p>c) Bepalen toepassingsgebied door middel van gevoeligheidsanalyses</p> <p>d) Opstellen veiligheidsformat</p> <p>e) Opstellen praktische werkwijze</p>	<p>macrostabieleit nog geldig?) en consequenties voor schematisering (bijv. waterspanning)</p> <p>g) Opstellen praktische werkwijze bij opdrijven en opbarsten</p>	<p>k) kleiafdekking en vervolgafschuivingen</p> <p>Expert workshop voor vaststellen (m.b.v. predictiemodel) van benodigde schaalproeven voor kwalitatieve validatie van erosie model .</p>
	<p>h) Opstellen integraal plan van aanpak voor validatie van het numerieke model met schaalproeven (centrifuge) gegeven 2a)-g).</p> <p>i) Bepalen welke activiteiten voor uitvoering praktijkproef moeten worden opgestart ook t.b.v. Go-No Go na fase 3 (zie 4 a) t/m d)).</p>		
Go – No Go moment 1			
3	<p>a) Opstellen predicties van de centrifuge proeven met numerieke berekeningen</p> <p>b) Opstellen draaiboek proeven</p> <p>c) Uitvoeren centrifugeproeven</p> <p>d) Factual report proeven</p> <p>e) Postdicties proeven</p> <p>f) Analyserapport incl. concept versie handvatten voor bepalen overstromingskans bij opbarsten (update praktische werkwijze uit stap 2)</p> <p>g) Consequenties resultaten modelproeven voor veldproef</p>		<p>h) Aanvullen narratief met relevante/dominante parameters en mechanismen van faalpad</p>
4	<p>a) Terreinonderzoek (boringen, sonderingen en peilbuismetingen)</p> <p>b) Laboratoriumonderzoek (paramaters bepalen)</p> <p>c) Opstellen geotechnisch uitgangspunten rapport</p> <p>d) Infiltratiemetingen op de testlocatie (testput) om te bepalen of er voldoende water in de zandlaag geïnfilteerd kan worden om opdrijven te realiseren (uitvoering mogelijk parallel aan fase 3).</p> <p>e) Voorontwerp Veldproef</p>		<p>f) Onderzoek naar opbouw kering</p>
Go – No Go moment 2			
	<p>g) Integraal ontwerp veldproeven piping, macrostabieleit, en vervolgprocessen (locatie, volgorde, scenario's voor macrostabieleitproef...)</p>		
	<p>h) Opstellen predictie van de veldproef met numerieke berekeningen</p> <p>i) Opstellen draaiboek, monitoringsplan</p> <p>j) Uitvoeren proef door infiltratie (en eventueel afgraven deklaag)</p> <p>k) Factual report</p> <p>l) Postdictie</p> <p>m) Analyserapport (technische achtergrondrapportage)</p>	<p>n) Opstellen predictie van de veldproef met numerieke berekeningen</p> <p>o) Opstellen draaiboek, monitoringsplan</p> <p>p) Uitvoeren proef macro-instabiliteit</p> <p>q) Factual report</p> <p>r) Postdictie</p> <p>s) Analyserapport (technische achtergrondrapportage)</p>	<p>t) Opstellen predictie van de veldproef</p> <p>u) Opstellen draaiboek, monitoringsplan</p> <p>v) Uitvoeren proef met overslagsimulator</p> <p>w) Factual report</p> <p>x) Postdictie</p> <p>y) Analyserapport (technische achtergrondrapportage)</p>
5	<p>a) Opstellen beslisregels</p> <p>b) Uitwerken handvatten voor bepalen overstromingskans bij opbarsten.</p> <p>c) Consequentie analyse voor overstromingskans door piping</p> <p>d) Consequenties voor kennisagenda/rode draad piping</p> <p>e) Uitwerking afweegkader voor versterkingsmaatregelen en/of noodmaatregelen.</p>	<p>f) Uitwerking handvat / werkwijzer omgaan met opbarsten en macrostabieleit voor overstromingskansanalyses</p> <p>g) Consequentie analyse voor overstromingskans door macro-instabiliteit</p> <p>h) Consequenties voor kennisagenda/rode draad macrostabieleit</p>	<p>i) Factsheet meenemen vervolgprocessen voor overstromingskansanalyse</p> <p>j) Consequenties voor kennisagenda/rode draden (dijkerosie, macrostabieleit)</p>
	k) Overkoepelend einddocument, integrale analyse, animatie (?)		

In de navolgende paragrafen worden de verschillende activiteiten nader toegelicht. Hierbij worden nummers genoemd die refereren aan de nummering uit Tabel 4-1. Benadrukt wordt dat niet alle activiteiten leiden tot een rapportage, zoals het uitvoeren van de proef, 4j, 4p en 4v. Ook kunnen verschillende activiteiten in één document worden gerapporteerd.

4.3 Fase 1, Literatuurstudie en voorbereiding

Opbarsten m.b.t. piping

In de literatuurstudie, activiteit **1a** uit Tabel 4-1, wordt nadruk gelegd op de vraag hoe het opbarstkanaal precies ontstaat en welke factoren daarop van invloed zijn. Te denken valt aan dikte van de afdekkende laag, de eigenschappen van de laag zoals doorlatendheid en sterkte, de invloed van eventuele gelaagdheid van de afdekkende laag, de aanwezigheid van sloten en de aanwezigheid van het dijklichaam. Aan de hand van de resultaten van de literatuurstudie kan het conceptueel model worden aangepast en daarbij de gegevens die in de praktijk nodig zijn voor de piping analyse, dit zijn de activiteiten **1b** en **1c**.

Er zal ook een analyse worden uitgevoerd door Arcadis met een nieuwe methode om opdrijven, opbollen en opbarsten te berekenen. Deze methode is relatief recent naar voren gekomen in een [afstudeeronderzoek](#) van Yida Tao. Het doel van de opdracht is om deze methode toe te passen, zodat er naast de uitkomst van de conventionele toets op opbarsten (gewicht deklaag gedeeld door opwaartse druk) ook een meer geavanceerde predictie is van de praktijkproef, namelijk:

1. De uitkomst is te gebruiken om het welslagen van een opbarstproef te voorspellen;
2. De uitkomsten is te gebruiken om de berekeningen die met DIANA gemaakt zijn te vergelijken.

Het resultaat van deze predictie kan ook benut worden om de waarnemingen tijdens de praktijkproef te duiden.

Na het definiëren van de onderzoekshypothese zal deze worden getoetst aan:

- 1) De ervaringsdatabase van opgetreden wellen, aangevuld met enkele recente cases
- 2) Een workshop, activiteit **1d**, met interne en externe deskundigen. In de workshop kan ook input worden opgehaald voor de volgende stap.

Opbarsten m.b.t. macrostabiliteit

Voor opbarsten met betrekking tot macrostabiliteit is in het kader POV-Macrostabiliteit reeds een uitgebreide voorstudie, inclusief uitgebreide numerieke analyses, literatuurstudie etc., uitgevoerd. Op basis van deze voorstudie kan het onderzoek met betrekking tot macrostabiliteit worden ingevuld. Om te komen tot een praktisch toepasbaar resultaat zal, op basis van de nu beschikbare kennis, een werkwijze voor beoordelen van bestaande dijken en ontwerp van dijkversterkingen worden opgesteld (**1e**). Het vervolgonderzoek zal deze werkwijze verder invullen en onderbouwen.

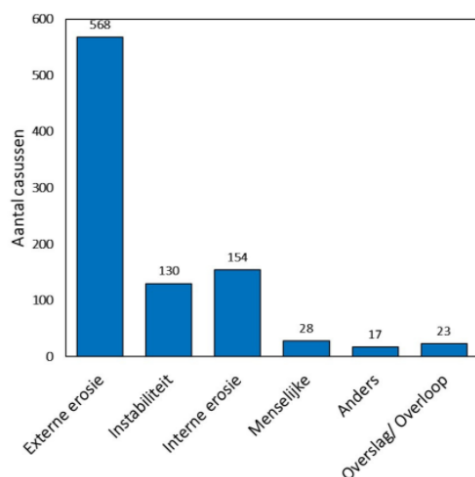
In de eerste stap van het project wordt een concept werkwijzer opgesteld. Deze werkwijzer zal bestaan uit een stappenplan, gebaseerd op de nu beschikbare informatie uit het POVM onderzoek, aan de hand waarvan de stabiliteit van waterkeringen bij opbarsten van de deklaag kan worden vastgesteld. Hierin wordt aangegeven welke rekenstappen en welke schematisaties kunnen worden toegepast, maar tevens volgt hieruit welke witte vlekken en te valideren aannamen nader uitgewerkt moeten worden. Dit leidt tot een gedetailleerd onderzoeksplan, **1e**, en wordt gezien als een werkdocument dat gebruikt kan worden om met ENW en klankbordgroep vanaf het begin tot een gezamenlijk beeld bij de aanpak van het onderzoek en de resultaten te komen.

In de aanpak wordt verondersteld dat het numeriek model, dat in het kader van de POVM studie naar opdrijven en opbarsten gebruikt is, kan worden toegepast om predicties te leveren voor modelproeven en de grootschalige veldproef. Al in het stadium van het opstellen van de werkwijzer wordt hier gebruik van gemaakt. In volgende stappen wordt dit verder aangescherpt op basis van de nieuwste informatie. Bij iedere stap wordt aangegeven hoe opbarsten, opdrijven en sterktereductie in stabiliteitsberekeningen moeten worden toegepast in de beoordeling en het ontwerp van dijkversterking, wordt dit numeriek gesimuleerd, wordt beschreven hoe de volgende stap (naar verwachting) bijdraagt aan aanscherping en welke onderdelen daarvoor nodig zijn. Tijdens de

uitvoering van het project zal ook de inhoudelijke voortgang en de impact op het eindresultaat worden gemonitord. De wijze waarop dit plaats zal gaan vinden, zal nog in nader overleg moeten worden vastgesteld.

Vervolgprocessen

In de literatuurstudie met betrekking tot vervolgprocessen zijn twee aandachtspunten van belang. Het eerste aandachtspunt is de internationale ervaring met erosie bij overslag, dat als het dominante vervolgproces wordt beschouwd. Er is onder meer een database met faalgevallen bij de TUDelft beschikbaar, de *International Levee Performance Database*, zie [Figuur 4-1](#). Ook bij Rijkswaterstaat zijn eerder dergelijke internationale inventarisaties uitgevoerd. Daarnaast kunnen recent opgetreden cases worden toegevoegd. Aan de hand van deze ervaringen kan het faalpad worden uitgeschreven, activiteit **1f**.



Figuur 4-1: Het aantal (internationale) casussen van de verschillende faalmechanismen, die bekend zijn bij de International Levee Performance Database.

Het tweede aandachtspunt zijn de verschillende wijzen waarop het erosieproces kan worden beschreven. Voor klei, zand en gras zijn verschillende modellen ontwikkeld. Voor een combinatie van een zandkern met een klei-afdekking volstaan deze modellen niet en moet worden gekeken of er alternatieven zijn die bijvoorbeeld ondermijning en afbreken/afbrokkeling van de kleilaag kunnen beschrijven, activiteit **1g**.

Het doel van deze stap is te komen tot een predictie van wat verwacht mag worden aan erosie bij overslag van een zanddijk met kleiafdekking, overeenkomstig de dijkopbouw op de proeflocatie. Aan de hand van de eerste stap wordt ook uitgewerkt waar de volgende stap uit zal kunnen bestaan (predictie modelproeven). Dit willen we toetsen in een workshop waarin meerdere experts worden gevraagd. Daar zal ook het voorstel voor de modelproeven worden besproken.

4.4 Fase 2, Numeriek onderzoek

Voor het mechanisme opdrijven van het achterland en de reactie van de afdekkende lagen daarop is in het voorbereidend POVM onderzoek een schematisering van opdrijven gevolgd door opbarsten gemaakt. Dit is geheel gericht op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. In deze analyses levert het dijktalud een horizontale druk op de deklaag. De combinatie van de horizontale druk en de opdrijfpotentiaal leidt ertoe dat de deklaag kan uitknikken en vervolgens opbarst.

Voor opbarsten in combinatie met piping speelt de invloed van het talud niet of minder. Er is gesproken met de Deltares experts of het model dat is ingezet voor opbarsten in combinatie met macrostabiliteit

kan worden toegepast om het ontstaan van opbarstkanalen te onderzoeken. Dit lijkt mogelijk, maar er zijn wel op voorhand enkele aandachtspunten te benoemen.

Het ontstaan van een lens tussen de deklaag en het watervoerend pakket, bij opdrijven, kan al worden gemodelleerd. Waar bij macrostabiliteit de invloed van de dijk in combinatie met de lens voor het opbarsten van belang is, wordt voor piping juist gekeken naar situaties zonder dijk. Immers de wel kan zich op grotere afstand van het dijklichaam voordoen, waar de invloed van het dijklichaam op de spanningen in de deklaag niet meer van belang is. Voor macrostabiliteit is opbarsten dicht bij de dijk van belang. Hier speelt de invloed van het dijktaalud op de spanningen in de ondergrond een rol. Bij het ontstaan van een opbarstkanaal spelen imperfecties, zwakke plekken in ofwel de geometrie of door contractie van stroming als de stroming 'doodloopt' op een kleilens, een belangrijke rol. Het op relevante wijze modelleren van deze imperfecties zal in deze stap nader worden uitgewerkt.

Voor dit aspect zal daarom eerst worden nagegaan in hoeverre de numerieke modellering voor opbarsten in relatie tot stabiliteit, zoals die in de POVM is opgesteld, ook kan worden toegepast. En indien dit kan in welk toepassingsgebied dit kan plaatsvinden, activiteit **2a**, **2b** en **2c**. Deze activiteiten zullen uit een serie numerieke berekeningen bestaan waarmee een gevoeligheidsanalyse kan worden uitgevoerd. De gevoeligheidsanalyse zal worden uitgebreid tot een beschouwing omtrent het veiligheidsformat, **2d** en het opstellen van een praktische werkwijze hoe piping na opbarsten van een dunne deklaag kan worden gesimuleerd, **2e**. Door middel van het veiligheidsformat wordt aangegeven hoe met onzekerheden en natuurlijke variatie moet worden omgegaan in relatie tot de bij dijken gehanteerde veiligheidsfilosofie en de verdere afronding in **5a**, **5b**, **5f** en **5g**.

Na adresseren van de bovenstaande punten kan voor de situatie met en zonder directe aanwezigheid van het dijktaalud een numerieke voorstudie worden uitgevoerd naar opbarsten van deklagen. Deze voorstudie, activiteit **2f** en **2g** uit Tabel 4-1, zal leiden tot ontwerp en predicties van het modelonderzoek en vervolgens de veldproef. Hierin zullen de fasen 2, 3 en 4 met elkaar verweven zijn, waarbij numerieke analyses worden uitgevoerd ter voorbereiding van model-, en veldonderzoek en vervolgens na afloop van de afzonderlijke proeven de resultaten worden nagerekend met nieuwe numerieke analyses.

Het kennisniveau over vervolgprocessen en de rol van vervolgprocessen in het falen van waterkeringen is minder ontwikkeld dan het kennisniveau omtrent de initiërende faalmechanismen. In het onderzoek zal eerst een predictiemodel worden vastgesteld, **2j** en een expert workshop worden belegd om deze verder te bespreken, **2k**.

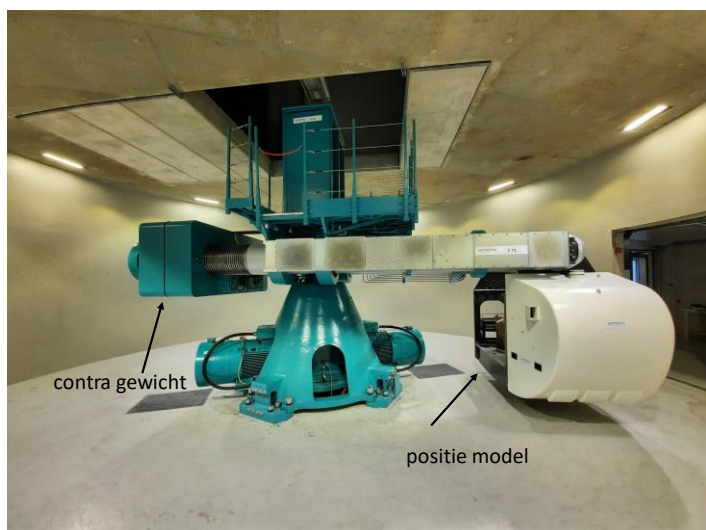
De resultaten van het onderzoek naar opbarsten bij piping en macrostabiliteit komen samen in een integraal plan van aanpak voor de validatie van het numerieke model door middel van schaalproeven (modelonderzoek), **2h**. Dit plan van aanpak zal tezamen met een voorstel voor vervolg, **2i**, worden besproken in het eerste go – no go moment.

4.4 Fase 3, Modelonderzoek

Voor het valideren van de numerieke modellen en de aannamen omtrent schematisatie die daarin gedaan zijn, is experimentele data nodig. De veldproef gaat deze data leveren, echter deze data zijn specifiek relevant voor de geometrie, dijkopbouw en opbouw van de ondergrond ter plaatse van de proeflocatie. Om ook de invloed van geometrie en dijk -, en grondopbouw (inclusief de dikte van de deklaag) te kunnen valideren is een variatiestudie nodig. Deze variatiestudie wordt uitgevoerd door middel van modelonderzoek.

Het modelonderzoek zal stapsgewijs worden opgebouwd. Eerst zal worden gekeken naar opbarsten zonder invloed van het dijktaalud. Dit is de situatie die relevant is voor opbarsten met betrekking tot piping waarbij het opbarsten op enige afstand van het dijklichaam optreedt. Daarna zullen modellen worden beproefd waarbij ook een dijktaalud is opgenomen en de horizontale kracht vanuit de dijk op

de deklaag een rol speelt bij het optreden van opbarsten. Bij het uitvoeren van modelonderzoek is van belang dat het grondgedrag overeenkomt met het gedrag in het veld. Omdat grondgedrag, zowel sterkte als stijfheid, spanningsafhankelijk is, dienen de spanningen in het model overeen te komen met de spanningen in het veld. Dit kan door gebruik te maken van de GeoCentrifuge, zie [Figuur 4-2](#). In de GeoCentrifuge kunnen schaalmodellen worden beproefd waarbij, als gevolg van de centrifugaal kracht, de spanningen in het model overeenkomen met de spanningen in het veld.

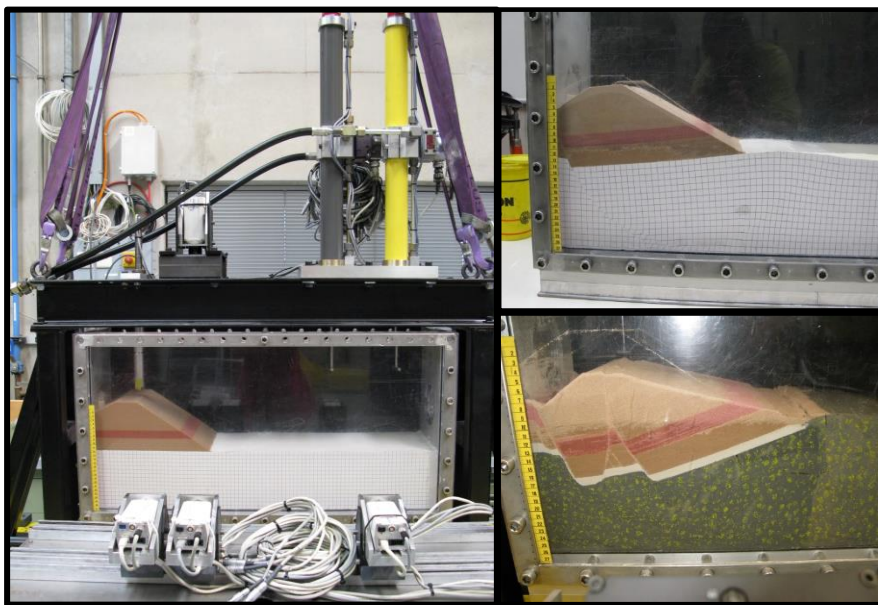


Figuur 4-2, Deltares GeoCentrifuge

Ter illustratie van de mogelijkheden van de GeoCentrifuge geven [Figuur 4-3](#), [Figuur 4-4](#) en [Figuur 4-5](#) een indruk van eerder uitgevoerd onderzoek naar de stabiliteit van dijklichamen. In dat eerder uitgevoerd onderzoek speelde opdrijven of opbarsten van de deklaag geen rol. De linker foto in [Figuur 4-3](#) laat een model van een dijklichaam zien voor beproeving. Het dijklichaam in het model is opgebouwd uit zand. Om vervormingen in het dijklichaam zichtbaar te maken is in het zandlichaam een band van rood gekleurd zand aangebracht. Het dijklichaam is aangebracht op een ondergrond van kunstklei waarvan de eigenschappen exact bekend zijn. In de foto's is deze laag te herkennen als een witte laag. In de uitgevoerde proevenserie is gevarieerd met eigenschappen van de ondergrond en zijn ook proeven uitgevoerd op natuurlijke klei. Voor het model zijn camera's geplaatst zodat tijdens de proef de vervormingen van het dijklichaam en ondergrond kunnen worden gevolgd.

De rechter foto's tonen het model na afloop van de proef waarbij de dijk is afgeschoven, zowel voor de proef met de kunstklei als voor de proef met de natuurlijke klei. [Figuur 4-4](#) laat zien hoe stapsgewijs het dijklichaam in het model, na afloop van de proef, is verwijderd om zo de glijvlakken in het dijklichaam vast te leggen.

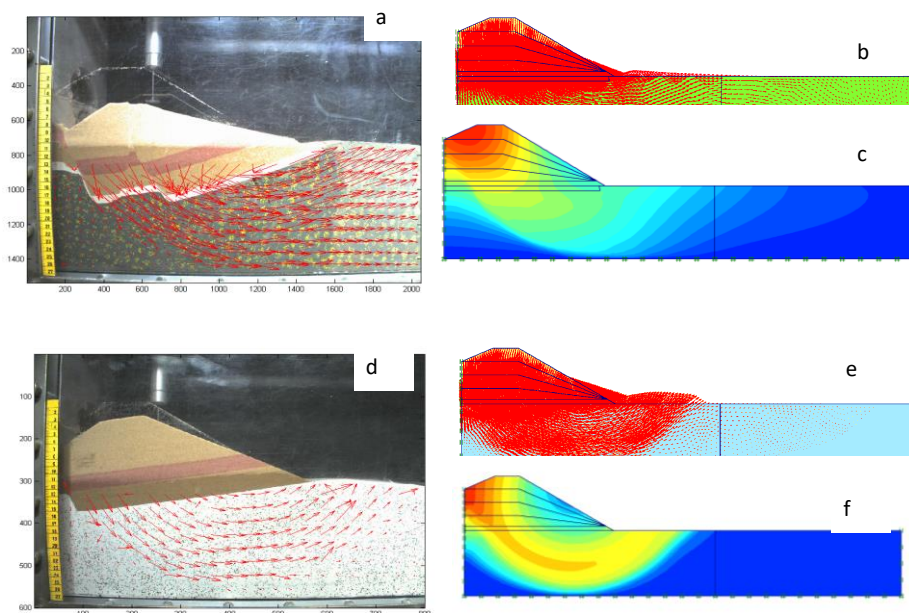
[Figuur 4-5](#) geeft een impressie van de analyse. Aan de hand van vergelijking van de opeenvolgende camerabeelden zijn de verplaatsingen van de grond onder de dijk tijdens het afschuiven vastgelegd. De techniek die hiervoor wordt toegepast heet particle image velocimetry, PIV. Dit leidt tot de vectorplots in [Figuur 4-5a](#) en [Figuur 4-5d](#). Deze vectorplots geven de mogelijkheid om het glijvlak inzichtelijk te maken ook wanneer deze met het blote oog, zoals het geval met de witte kunstklei, niet goed is waar te nemen. De vorm van het glijvlak en de grootte van de verplaatsingen met de bijbehorende belasting kunnen vervolgens worden vergeleken met de numerieke analyses, zoals weergegeven in [Figuur 4-5b,c](#) en [Figuur 4-5e, f](#).



Figuur 4-3, Voorbeeld onderzoek GeoCentrifuge; links: model dijklchaam voor beproeving, rechtsboven: model na uitvoeren proef op ondergrond kunstklei, rechtsonder: model na uitvoeren proef op ondergrond van natuurlijke klei.



Figuur 4-4, Voorbeeld onderzoek; Stapsgewijs verwijderen dijklchaam en het vastleggen van het bezwijkmechanisme in het dijklchaam



Figuur 4-5, Resultaat centrifugeproef en analyse. Boven: proef op natuurlijke klei, a; resultaat centrifugeproef, b; Numerieke simulatie vectorenplot verplaatsingen, c; numerieke simulatie schaduwplot verplaatsingen. Onder: proef op kunstklei (Speswhite clay), d; resultaat centrifugeproef, e; Numerieke simulatie vectorenplot verplaatsingen, f; numerieke simulatie schaduwplot verplaatsingen.

Op basis van numerieke analyses zal een ontwerp van de proevenserie en een bijbehorend draaiboek worden gemaakt. De proeven zullen in een serie worden uitgevoerd waarbij resultaten tussentijds worden geëvalueerd zodanig dat het ontwerp van de proeven tussentijds kan worden aangepast als de uitkomsten van de proeven daar aanleiding toe geven. Dit houdt in dat numerieke analyses en uitvoeren van experimenten elkaar zullen afwisselen. Hoewel de exacte proeven en bijbehorende uitvoering in een later stadium worden vastgesteld, kan wel een impressie worden gegeven hoe de proeven eruit kunnen komen te zien.

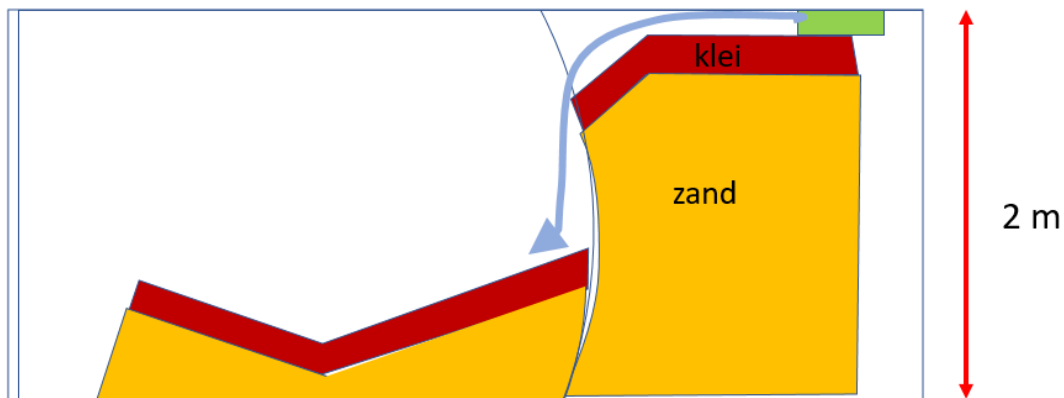
Naar verwachting zullen de proeven in de proevenserie een olopende complexiteit kennen. De eerste proeven kunnen bestaan uit een kleilaag met uniforme dikte op een zandlaag. Vervolgens wordt in de zandlaag de waterstand opgevoerd tot opdrijven of opbarsten optreedt. Om te voorkomen dat bezwijken van de laag aan de randen van het model optreedt kan daar de laag dikker worden gemaakt. Vervolgens kan worden gevarieerd met laagdikte en klei-eigenschappen. Als variant kan ook een verloop in de opgelegde stijghoogte worden aangebracht. Hiermee kan het verloop van de stijghoogte in watervoerende lagen bij dijken, waarbij de stijghoogte met toenemende afstand tot de rivier, afneemt, worden gesimuleerd. Indien het wenselijk is om ook de waterstroming goed te modelleren dient aandacht aan de viscositeit van het water te worden besteed en zal mogelijk de proef niet met regulier water, maar met een alternatieve vloeistof worden uitgevoerd.

Na het succesvol uitvoeren van proeven met enkel een kleilaag kunnen modellen worden beproefd waarbij een dijklichaam wordt gemodelleerd in combinatie met opdrijven of opbarsten van de dunne deklaag en de gevolgen voor stabiliteit kan worden beproefd. Ook hier kunnen varianten met laagdikte, klei-eigenschappen en dijkgeometrie worden uitgevoerd.

Het exacte aantal centrifugeproeven dat zal worden uitgevoerd zal volgen uit het ontwerp van de proeven en de proevenserie. Hieruit zal volgen welke varianten relevant zijn en in hoeverre het wenselijk is om proeven in duplo uit te voeren om de reproduceerbaarheid vast te stellen. Vooral nog wordt gedacht aan circa 15 proeven.

Met betrekking tot vervolgprocessen geldt dat het op een correcte manier representeren van (klei)erosie in schaalproeven een gekend probleem is. Belasting door water schaalt niet hetzelfde als het gedrag van het materiaal, en vers aangebrachte, geprepareerde, klei is niet representatief voor het materiaal klei op dijken. Klei op dijken is beïnvloed, gestructureerd, door weer en wind, vorst en dooi, vernatting en droogte, en biologische activiteit. Daarom kan er op modelschaal een volledig verkeerd beeld optreden van de in werkelijkheid optredende processen.

Het is wel mogelijk om kijkproeven uit te voeren en op die manier meer begrip te krijgen van de processen en de modellering daarvan. Onderstaand is een model van een afgeschoven talud geschetst. Dit afgeschoven talud wordt belast met water en het erosieproces wordt gemonitord. De kleilaag kan met bijvoorbeeld fijn grind, kleibrokjes of wat vastere klei worden gemodelleerd, en een variant is om een asfaltweg op de kruin te modelleren.



Figuur 4-6: Schematisatie van een afgeschoven talud.

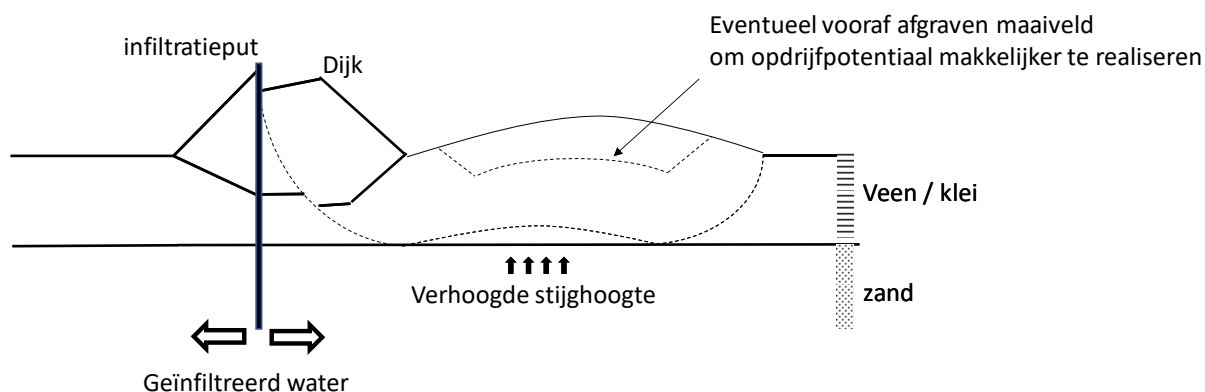
In deze fase worden de volgende activiteiten onderscheiden:

- 3a** Opstellen predicties en ontwerp van de proevenserie
- 3b** Opstellen draaiboek
- 3c** Uitvoeren van de proeven
- 3d** Vastleggen resultaten in factual report
- 3e** Opstellen postdictie
- 3f** Analyserapport, hierin zijn de postdictie opgenomen, een vergelijking tussen de postdictie en de predictie en de consequenties voor praktische toepassing
- 3g** Vaststellen consequenties voor veldproef
- 3h** Vastleggen resultaten kijkproef vervolprocessen; aanvullen narratief vervolprocessen met relevante / dominante parameters en mechanisme.

4.5 Fase 4, Veldproeven

Op basis van het numerieke, en modelonderzoek wordt het ontwerp van de veldproef uitgewerkt. Het ontwerp van de proef zal een gedetailleerd draaiboek en predictie van de proef omvatten. Ook in de veldproef zijn er verschillende accenten te leggen in het onderzoek naar opbarsten met betrekking tot piping, opbarsten met betrekking tot macrostabiliteit en het onderzoek naar vervolprocessen. In het ontwerp dient hiervoor aandacht te zijn en zodanig in het draaiboek te zijn uitgewerkt dat er zich geen conflicterende belangen tijdens de proefuitvoering voor kunnen doen.

Figuur 4-7 geeft een impressie van de proefopzet. De proef zal zorgvuldig worden ontworpen op basis van numerieke analyses en ervaringen van de modelproeven. Daarnaast zal voorafgaand aan de proef een gedetailleerd draaiboek worden opgesteld. Om opdrijven van de deklaag te realiseren zullen enkele infiltratieputten ter plaatse van de kruin worden geplaatst. Hiermee wordt water in de onderliggende zandlaag geïnfiltreerd om zo de stijghoogte in de zandlaag te verhogen tot opdrijven of opbarsten van de deklaag optreedt. Eventueel kan het maaiveld worden afgegraven om zo de opdrijfpotentiaal makkelijker te kunnen realiseren.



Figuur 4-7, Principeschets macrostabiliteitsproef

Vorbereiding veldproef

Voor het ontwerp van de proef en de analyse van de proefresultaten is goed inzicht in de opbouw van de ondergrond en dijklichaam en de eigenschappen van de aanwezige grondsoort noodzakelijk. De voorbereiding van de veldproef zal dan ook starten met een terreinonderzoek, activiteit **4a**, **4b** en **4f** uit Tabel 4-1. Voorafgaand aan het grondonderzoek zal op basis van de reeds beschikbare informatie een grondonderzoeksplan worden opgesteld. Ondanks dat deze activiteit hoort bij fase 4 zal het plan en onderzoek reeds enkele maanden na de start van het innovatieproject plaatsvinden. Tabel 4-2 geeft een indicatie van het type onderzoek dat kan worden uitgevoerd. De aantallen proeven en veldmetingen zullen in het grondonderzoekplan worden vastgesteld. Het grondonderzoek zal minimaal bestaan uit sonderingen, boringen en peilbuismetingen. Naast conventionele boringen zullen, met name voor het bemonsteren van het veen, grote diameter monsters met een diameter van 40 cm worden gestoken.

Tabel 4-2 Indicatie grond- en labonderzoek

Type onderzoek	Omschrijving en doel
Sonderingen (20 m-mv)	Afwijkingen in de bodemopbouw onderzoeken en aantonen van kleilaag op ca. NAP -12 m
HPT-AMPT Sonderingen (30 m-mv)	Doorlatendheid en anisotrope zandpakket onderzoeken
Mechanische boringen (achterland) met continue monstername (6 m-mv)	Monsters steken i.v.m. sterkteproeven <ul style="list-style-type: none"> - Classificering cf. NEN14688 - Beschrijfkwaliteit B1 - Uitgebreide setjes indextesten elke 0,5 m diepte - Fotograferen boorstaat
Mechanische boringen (kruin) met continue monstername (10 m-mv)	Monsters steken i.v.m. sterkteproeven
Monstername met DLDS	Veen monsters steken met minimale verstoring
CAD triaxiaalproeven	Sterkteparameters dijksmateriaal (zand)
CAU triaxiaalproeven (NC of OC)	Sterkteparameters holocene kleilaag
DSS proeven (NC)	Sterkteparameters veenlaag
CRS proeven (tot 1500 kPa)	State parameters klei en veenlaag. I.v.m. grote spreiding op state 50% extra proeven t.o.v. sterkteproeven
Handboringen met monstername kleibekleding	Samenstelling kleibekleding onderzoeken
Falling head / constant head proeven	Bepaling in situ doorlatendheid van met name de veenlaag.
Onderzoek kleibekleding	Zandgehalte, indextesten

Type onderzoek	Omschrijving en doel
Korrelverdeling met D70 bepaling	Samenstelling pleistocene zandlaag i.v.m. pipingproeven
Peilbuizen t.p.v. mechanische boringen	Monitoring en doorlatenheidsmetingen (insitu)
Geavanceerde sterkteproeven	Bijvoorbeeld voor treksterkte klei of veen.

De resultaten van het grondonderzoek en de daaruit bepaalde parameters worden vastgelegd in het geotechnisch uitgangspuntenrapport, activiteit **4c**. Het geotechnisch uitgangspuntenrapport vormt de basis voor het ontwerp van de proef en de analyse van de proef.

In de geplande veldproef is het opdrijven en vervolgens opbarsten van de deklaag essentieel. Het gecontroleerd laten opdrijven en vervolgens laten opbarsten van de deklaag zal worden gerealiseerd door middel van infiltratieputten. Vanuit deze infiltratieputten zal, onder druk, water in de onderliggende zandlaag worden geïnfiltrerd. De grote onzekerheid in de verdere uitwerking van de proeven zit in het benodigde aantal infiltratieputten, het benodigd debiet per put en eventueel benodigde aanvullende maatregelen om over een voldoende groot gebied de deklaag te opdrijven te realiseren en zo tot opbarsten te komen. Bij aanvullende maatregelen kan worden gedacht aan het gebruik van damwanden om de afstroom van het geïnfiltrerde water naar de omgeving te beperken.

In een vroege fase van het project zal een testput worden geïnstalleerd en uitgevoerd, activiteit **4d**. Aan de hand van de testput kan worden vastgesteld welke debieten nodig zijn om een verhoging van de waterdruk in de zandlaag te realiseren. Aan de hand van de testproef kan worden nagegaan hoeveel putten nodig zijn en in hoeverre aanvullende maatregelen nodig. Het uitvoeren van een testput speelt een belangrijke rol in het verder uitwerken van de veldproef, zowel inhoudelijk als in de budgettaire uitwerking.

Naast de haalbaarheid van het gecontroleerd realiseren van de oprijf- en opbarstpotentiaal in de onderliggende zandlaag is voor de verdere uitwerking van de veldproef inzicht in grondopbouw, sterkte en stijfheidseigenschappen van de ondergrond nodig.

Na het uitvoeren en analyseren van het grondonderzoek en de testput zal een voorontwerp van de proef worden opgesteld, activiteit **4e**. Het voorontwerp zal bestaan uit een haalbaarheidsstudie, met name bedoeld voor het tweede go – no go moment. Uit het voorontwerp wordt duidelijk hoeveel infiltratie putten en bijbehorende debieten er nodig zijn en of er nog aanvullende maatregelen nodig zijn om het dijklichaam tot bezwijken te brengen.

Na een positieve uitkomst van het tweede go – no go moment kan het ontwerp en de voorbereiding van de veldproef verder worden uitgewerkt en gedetailleerd. Dit zal leiden tot een definitief, integraal ontwerp van de proef, activiteit **4g**. Om tot het integraal ontwerp te komen, worden een aantal aspecten apart benoemd die ook voor de verschillende sporen, opbarsten bij piping, opbarsten bij macrostabiliteit en vervolprocessen parallel worden uitgewerkt. Dit zijn het opstellen van een predictie, **4h, 4n, 4t**. Hierin worden de ervaringen van het modelonderzoek en literatuurstudie opgenomen.

Ook het opstellen van het draaiboek en het monitoringsplan, **4i, 4o en 4u** zijn onderdeel van het ontwerp van de proef. De exacte definitie van de benodigde monitoring, bestaande uit type sensor, aantal en positie, zal aan de hand van de ontwerpberekeningen en resultaten van het modelonderzoek worden vastgesteld. Van belang zijn het meten van de waterspanningen zowel in de zandlaag als in de afdekkende kleilaag om vast te stellen of de opdrijfpotentiaal is bereikt en over welke traject, loodrecht op de dijk, deze is bereikt. Daarnaast zijn de verplaatsingen van belang. Het gaat hierbij zowel om de verticale verplaatsingen bij het opbollen van het maaiveld als de horizontale verplaatsingen aan de teen van de dijk en op verschillende afstanden uit het dijklichaam om horizontale verplaatsingen van

de deklaag vast te kunnen stellen. Ook de vervormingen van het dijklichaam zullen tijdens de proef worden vastgelegd. Daarnaast is enige monitoring nodig om de werking van de infiltratieputten te controleren.

Zoals eerder aangegeven zal de exacte invulling van de monitoring in een later stadium worden vastgesteld. Echter in dit stadium wordt gedacht aan remote sensing technieken voor het vastleggen van de vervormingen en verplaatsingen van het maaiveld en dijklichaam. Voor het meten van de waterspanningen en vervormingen in de ondergrond wordt gedacht aan het instellen van een drietal meetraaien, loodrecht op het dijklichaam, waarin waterspanningsmeters en hellingmeetbuizen zijn opgenomen.

Hiermee zijn de voorbereidingen afgerond en kan de veldproef worden uitgevoerd. De uitvoering van de veldproef wordt in verschillende onderdelen gesplitst. Met betrekking tot opbarsten bij piping wordt voorgesteld onderscheid te maken tussen opbarsten op enige afstand van het dijklichaam, waar horizontale kracht uit het dijktaalud geen rol speelt en opbarsten waarin dat wel een rol speelt. Om het eerste te kunnen realiseren kan op een gedeelte wat verder van de waterkering de waterdruk worden opgevoerd om te zien of opbarsten optreedt. Er kan hiervoor een kleine oppervlakte (orde 10 x 10 m) deels worden ontgraven. Omdat de proeflocatie wat verder van de waterkering is voorzien zal in het ontwerp moeten worden nagegaan of er extra infiltratiepunten nodig zijn om de waterdruk voldoende op te kunnen voeren of dat eerdergenoemde aanvullende maatregelen zoals het plaatsen van damwanden geplaatst moeten worden. Eventueel kan het maaiveld in stappen verder worden verlaagd tot opbarsten optreedt. Uitgangspunt voor de aanvullende werkzaamheden ten aanzien van opbarsten op enige afstand van de dijk is dat het de bezwijkproef, opbarsten in relatie tot macrostabiliteit, niet mag beïnvloeden. Dit is activiteit **4j**.

Met betrekking tot macrostabiliteitproef is een principeschets gegeven in [Figuur 4-7](#). Het uitvoeren hiervan is activiteit **4p**.

Met betrekking tot vervolprocessen, activiteit **4v**, dient nog de keuze te worden gemaakt of overloop of golfoverslag zal worden gesimuleerd. Op voorhand is nu de gedachte dat overslagproeven meer realistisch zijn dan overloopproeven. Overloop zit in deze gedachtegang al erg dicht tegen een ongewenste situatie van de ontwikkeling van een bres aan, dus een waterstand iets onder de kruin met enige golfoverslag zal zowel voor het bovenrivierengebied als voor het benedenrivierengebied meer representatief zijn.

De erosieproef zal volgen op de afschuifproef met opdrijven van het achterland. In het geval dat deze proef succesvol is verlopen, is er een afgeschoven talud aanwezig. Mocht het niet lukken om het talud af te laten schuiven dan zal er een deel van de dijk afgegraven worden, beginnende halverwege de kruin.

Om golfoverslag te realiseren zal de golfoverslagsimulator die ook al vaak is gebruikt om graserosie op het binnentalud te testen worden ingezet. Er wordt dan een strook van 4 meter breedte afschot en er kunnen, te starten met een laag overslagdebiet, steeds hogere overslagdebieten worden opgelegd. Zie [Figuur 4-8](#) voor de simulator bij het onderzoeksproject Gras op Zand (2021). Omdat de verwachte breedte van een afschuiving in de orde van 10 meter of meer zal liggen is het waarschijnlijk mogelijk om twee proefstroken te maken. In de beide proefstroken kunnen dan verschillende golfhoogten worden beproefd.



Figuur 4-8: Overslagsimulatoren bij het onderzoeksproject Gras op Zand

Na afloop van de proef worden de resultaten vastgelegd in een factueel report, **4k**, **4q** en **4w**. Op basis van de resultaten wordt een postdictie uitgevoerd, **4l**, **4r** en **4x**. De postdictie zal onderdeel uitmaken van het analyserapport, **4m**, **4s** en **4y**. Hierin zullen de conclusies van de proefresultaten worden opgenomen, een vergelijk van de predictie en de postdictie en een vooruitblik op de consequenties voor een praktische toepassing van de resultaten. De praktische toepassing wordt uitgewerkt in fase 5.

4.6 Fase 5, Utilisatie; inpassing in veiligheidsfilosofie

Na afronding van de proeven, zowel op modelschaal als in het veld en het afronden van de analyses van deze proeven dienen de resultaten toepasbaar te worden gemaakt voor de dagelijkse ingenieurspraktijk. In deze fase worden de onderzoekshypothesen getoetst, zoals toegelicht in paragraaf 0.

Voor het onderdeel opbarsten bij piping worden de onderzoeksresultaten verwerkt in beslisregels over het wanneer en hoe opbarsten in aanloop naar piping in rekening moet worden gebracht, activiteit **5a** in Tabel 4-1. Vervolgens worden de beslisregels verder uitgewerkt in handvatten voor het bepalen van de overstromingskans door piping na opbarsten en een bijbehorende consequentieanalyse, **5b** en **5c**. Voor een eventueel benodigde calibratie van een vernieuwde rekenregel met betrekking tot opbarsten voor piping wordt voornamelijk uitgegaan dat gebruik kan worden gemaakt van de calibratie van opbarsten met betrekking tot macrostabiliteit.

Voor het onderdeel opbarsten met betrekking tot macrostabiliteit is vooraf een werkwijze opgesteld. Deze werkwijze wordt gedurende het project op basis van de (tussentijdse) onderzoeksresultaten aangepast. Deze werkwijze kan in deze stap worden afgerond en definitief worden gemaakt. Dit betreft

een kalibratiestudie waarin de variabiliteit van de verschillende relevante parameters en de invloed van deze parameters op de uitkomst van de analyse wordt vastgesteld, **5f** en **5g**.

Met betrekking tot vervolprocessen zal met name kennis worden ontwikkeld die kan worden toegepast in de toets op maat, **5i**. In de afsluitende rapportage worden ook aanbevelingen ten aanzien van verdere onderzoeken of stappen gedaan, **5d**, **5h** en **5j**. Van belang voor de inbedding van de onderzoeksresultaten is het bespreken van de resultaten in ENW en aansluiten bij het Rijkswaterstaat onderzoeksprogramma Kennis voor Keringen (KvK) en het Beoordelings en Ontwerpinstrumentarium (BOI).

Specifiek voor piping wordt een uitbreiding voorzien in de vorm van een afwegingskader voor versterkingsmaatregelen en noodmaatregelen, **5e**. Tot slot wordt nog een overkoepelend document voorzien met een integrale analyse van de resultaten in relatie tot het faalpad bij opbarsten van dunne deklagen, **5k**.

4.7 Afbakening onderzoek

Het plan van aanpak beschrijft een breed opgezet onderzoek naar het gedrag van dijken bij opbarsten van dunne deklagen. Hoewel het onderzoek breed wordt opgezet is wel enige afbakening aangebracht. De volgende punten worden genoemd:

- Hoewel het onderzoek zich richt op validatie en waar mogelijk optimalisatie van bestaande rekentechnieken en methoden zal in dit onderzoek geen nieuwe software worden ontwikkeld. Wel is het mogelijk dat het onderzoek aanleiding geeft tot het ontwikkelen van nieuwe software. In voorkomende gevallen zal dit in een nieuw project worden uitgewerkt. De reden hiervoor is dat de ontwikkeling van software een eigen dynamiek kent. Op dit moment is nog niet duidelijk of er nieuwe software gewenst is en welke ontwikkeling dat zou zijn. Planning, zowel financieel als in de tijd van eventueel ontwikkelen van software is op dit moment dan ook niet mogelijk.
- Het onderzoek richt zich specifiek op het opdrijven en opbarsten van relatief dunne deklagen. Dikke deklagen worden hier buiten beschouwing gelaten. De definitie van een dunne deklaag is een deklaag die potentieel kan opbarsten. Bij dikke deklagen, die wel opdrijven, treedt opbarsten niet meer op. Het voorgestelde onderzoek zal antwoord geven op de vraag tot welke laagdikte opbarsten mag worden verwacht. In de huidige ingenieurspraktijk ligt, voor het faalmechanisme macrostabiliteit, de grens tussen dikke lagen en dunne lagen bij een laagdikte van 4 m. Dit is een empirische rekenregel. Het is mogelijk dat het onderzoek naar opbarsten van dunne lagen ook nieuwe inzichten oplevert voor stabiliteitsanalyses van dijken bij opdrijven van dikke deklagen. Deze nieuwe inzichten voor dikke deklagen kunnen leiden tot voorstellen van nieuw onderzoek, maar worden in dit project niet uitgewerkt.

4.8 Aftapmomenten en impact op uitvoeringsprojecten WDOD

Dit innovatieproject kent twee aftapmomenten, waarbij resultaten van dat moment al kunnen worden toegepast in de praktijk, met name lopende dijkversterkingsprojecten:

- **Aftapmoment 1:** Q1 '23: de lab- en schaalproeven zijn uitgevoerd en de resultaten hiervan geanalyseerd. Met deze resultaten kan de eerste versie van de concept werkwijzer voor macrostabiliteit gevalideerd worden. De eerste informatiestroom richting versterkingsprojecten kan gaan lopen. De resultaten zullen worden gedeeld en per project kan er een afweging worden gemaakt om de concept resultaten alvast te implementeren (bij voldoende zekerheid).
- **Aftapmoment 2:** Q4 '23: de veldproef is afgerond en geanalyseerd, maar fase 5 heeft nog niet plaatsgevonden. De concept werkwijzer voor macrostabiliteit is een slag verder gebracht. De resultaten zullen worden gedeeld en per project kan er een afweging worden gemaakt om de concept resultaten alvast te implementeren (bij voldoende zekerheid).

Deze aftapmomenten zullen ook gebruikt worden in de roadmap over opbarsten die in opdracht van RWS-WVL (dossier macrostabiliteit) wordt uitgevoerd. Dit innovatieproject levert aan de roadmap informatie aan en de dossierhouder macrostabiliteit is aangehaakt bij het onderzoek middels deelname aan de klankbordgroep.

Binnen de projecten van WDODelta kunnen de resultaten gegarandeerd meegenomen worden (qua timing) in de verkennings- of planuitwerkingsfase van de projecten Mastenbroek-IJssel, Mastenbroek Zwarte Water en Genemuiden – Hasselt. Daarnaast zijn er een flink aantal andere versterkingsprojecten die een relatie kennen met het onderwerp opbarsten. Merk op, hier is enkel gefocust op de projecten welke (gaan) lopen bij WDODelta. De genoemde data van de projecten is op basis van de huidige HWBP planning en kan nog gewijzigd worden naar aanleiding van de resultaten van de eerste beoordelingsronde en andere overwegingen.

Zwolle – Olst (2017-2027): het onderwerp opbarsten is relevant in het project. Geen of geringe winst te verwachten, de informatiestromen komen te laat om meegenomen te kunnen worden.

Stadsdijken Zwolle (2016-2024): opbarsten is minder relevant, en qua timing te vroeg om de resultaten van dit onderzoek mee te kunnen nemen.

Stenendijk (2019-2022): opbarsten is relevant, maar qua timing te vroeg om de resultaten van dit onderzoek mee te kunnen nemen.

Veilige Vecht (2020 – 2027): opbarsten is nauwelijks relevant, qua timing sluiten de projecten goed aan. Geringe winst te verwachten uit de aftapmomenten.

Mastenbroek-IJssel (2022-2029): opbarsten is relevant in de Mastenbroek, timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan in de planuitwerkingsfase. Winst verwacht uit aftapmomenten en na afronden innovatieproject.

Mastenbroek-Zwartemeer (2024-2031): opbarsten is relevant in de polder Mastenbroek, timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan. Winst verwacht na afronden innovatieproject.

Mastenbroek-Zwartewater (2028-2033): opbarsten is relevant in de polder Mastenbroek. Timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan, omdat het versterkingsproject pas na eindoplevering onderzoek start. Winst verwacht na afronden innovatieproject.

Genemuiden-Hasselt (2030-2035): opbarsten is relevant in de polder Mastenbroek. Timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan, omdat het versterkingsproject pas na eindoplevering onderzoek start. Winst verwacht na afronden innovatieproject.

Vecht Noord Zwartewaterland (2031-2038): opbarsten is relevant. Timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan, omdat het versterkingsproject pas na eindoplevering onderzoek start. Winst verwacht na afronden innovatieproject.

Random Kampen (2037-2044): opbarsten is relevant. Timing innovatie- en versterkingsproject sluiten aan, omdat het versterkingsproject pas na eindoplevering onderzoek start. Winst verwacht na afronden innovatieproject.

4.9 Versterkingsprojecten buiten beheergebied WDOD

Navolgend is een opsomming gegeven van de HWBP-versterkingsprojecten welke mogelijk relevant zijn ten aanzien van het laten landen van de resultaten welke uit het innovatietraject te verwachten

zijn. Uitgangspunt hiervoor het projectenboek HWBP 2021 en gesprekken met de betrokken waterschappen. Projecten die qua timing duidelijk niet aansluiten zijn niet in beschouwing genomen. Dit zijn de projecten die starten met de realisatiefase voor Q3 2024. Hetzelfde geldt voor versterkingsprojecten waarvoor geldt dat de ondergrond duidelijk niet in verband kan worden gebracht met opbarsten.

Jaarsveld – Vreeswijk (JAV) : opbarsten is hier een relevant faalmechanisme, er is een grote STBI en STPH scope (8,4 km en 7,0 km). Aftapmomenten vallen in planuitwerkingsfase, goede afstemming vooraf is nodig om resultaten te kunnen laten landen in het versterkingsproject.

Irenesluizen - Culemborgsche Veer (ICU) opbarsten is naar verwachting relevant, er zijn dunne deklagen(>3-4m). Qua timing sluit het innovatieproject goed aan; de verkenningsfase start in 2021. De aftapmomenten en resultaten van dit onderzoek kunnen worden geïmplementeerd in het begin van de planuitwerkingsfase (2024).

Spijk - Westervoort Deelproject 1 (Westervoort – Pannerdense Waard): Het opbarsten (piping en macrostabiliteit) is zeer relevant. Verkenningsfase loopt tot half 2024. Resultaten van dit innovatieproject kunnen mee worden genomen in planuitwerkingsfase.

Spijk - Westervoort Deelproject 2 (Pannerdense Waard – Tolkamer): Het opbarsten (piping en macrostabiliteit) is zeer relevant. Verkenningsfase start in 2024, resultaten van dit innovatieproject kunnen mee worden genomen in verkenningsfase.

Spijk - Westervoort Deelproject 3 (Tolkamer – Duitse grens): Het opbarsten (piping en macrostabiliteit) is zeer relevant. Resultaten van dit innovatieproject kunnen mee worden genomen in verkenningsfase.

Doesburg – Zutphen (fase 1-3): Het opbarsten (piping en macrostabiliteit) is relevant. Voorverkenning is gestart, verkenningsfase start eind 2022. Resultaten van dit innovatieproject kunnen mee worden genomen in verkenningsfase.

Naast bovenstaande projecten zijn er nog meer projecten waar de resultaten van dit onderzoek mogelijk relevant zijn. Dit betreft: Kerkhovenspolder – Duitsland, Boxmeer – Cuijk, Zuid Beveland Oost, Oosterschelde, Zuid-Beveland Oost, Westerschelde en Sprok - Sterreschans – Heteren.

4.10 Concrete producten, resultaten en mijlpalen

Een vijftal fases, diverse activiteiten, een twee go-no go momenten en kwaliteitsborging resulteren in onderstaande samenvattende tabel van de eindproducten.

Tabel 4-3: Documententabel met op te leveren producten

Doc. Nr	Activiteit Nr.	Omschrijving	Review ¹	Opmerking
1	1a, 1b, 1c, 1d	<ul style="list-style-type: none"> • Identificeren situaties (omstandigheden & parameters) die bepalen of de deklaag scheurt waarbij geen sprake is van macro-instabiliteit (literatuur & database wellen) • Uitbreiden conceptueel model voor opdrijven en opbarsten. • Aanpassen narratief opbarsten, welke gegevens zijn in de praktijk benodigd voor analyse 	KBG	incl. verslag workshop (1d)
2	1e	Opstellen gedetailleerd onderzoeksplan op basis van de POVM vooronderzoek		
3	1f, 1g	<ul style="list-style-type: none"> • Beschrijven faalpad voor het erosieproces bij zanddijken met kleiafdekking. • Inventariseren beschikbare modellen voor faalpadanalyse 		
4	2a, 2b	<ul style="list-style-type: none"> • Verificatie toepasbaarheid numeriek model uit POVM (verwacht wordt dat het huidige model geschikt is) • Bevestigen werking conceptueel model met numerieke berekeningen 		
5	2c, 2d, 2e	<ul style="list-style-type: none"> • Bepalen toepassingsgebied door middel van gevoeligheidsanalyses • Opstellen veiligheidsformat • Opstellen praktische werkwijzer 		
6	2f, 2g	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek impact voor veiligheidsformat (zijn kalibratie relaties macrostabiliteit nog geldig?) en consequenties voor schematisering (bijv. waterspanning) • Opstellen praktische werkwijze bij opdrijven en opbarsten 		
7	2j	Vaststellen (predictie) model voor vervolprocessen: erosie van zanddijken met kleiafdekking en vervolgafschuivingen		
8	2k	Expert workshop voor vaststellen (m.b.v. predictiemodel) van benodigde schaalproeven voor kwalitatieve validatie van erosie model		
9	2h	Opstellen integraal plan van aanpak voor validatie van het numerieke model met schaalproeven (centrifuge) gegeven 2a)-g).	KBG	
10	2i	Bepalen welke activiteiten voor uitvoering praktijkproef moeten worden opgestart ook t.b.v. Go-No Go moment	KBG	Notitie
11	3a	Opstellen predicties van de centrifuge proeven met numerieke berekeningen		
12	3b	Draaiboek centrifugeproeven		Vooraf voor intern gebruik
13	3d	factual report centrifuge proeven		Incl. activiteit 3c, uitvoeren proeven
14	3e,3f, 3g	<ul style="list-style-type: none"> • Postdicties proeven • Analyserapport incl. voorlopige concept versie handvatten voor bepalen overstromingskans bij opbarsten (update praktische werkwijze uit stap 2) 	KBG	
15	3h	Aanvullen narratief met relevante/dominante parameters en mechanismen van faalpad	KBG	Notitie, mogelijk opnemen in einddocument (?)
16	4a, 4b, 4c, 4f	<ul style="list-style-type: none"> • Terreinonderzoek (boringen, sonderingen en peilbuismetingen) • Laboratoriumonderzoek • Onderzoek naar opbouw kering • Opstellen geotechnisch uitgangspuntenrapport 	KBG	
17	4d	Infiltratiemetingen op de testlocatie om te bepalen of er voldoende water in de zandlaag geïnfiltreerd kan worden om opdrijven te realiseren	KBG	Dit betreft factual report en conclusies voor proef
18	4e	Voorontwerp veldproef	KBG	

¹Alle documenten worden intern Deltares gereviewed, deze kolom geeft aan welke documenten ook door klankbordgroep (KBG) en ENW worden gereviewed.

Plan van aanpak HWBP innovatieproject Opbarsten

19	4g	Integraal ontwerp veldproeven piping, macrostabiliteit, en vervolgprocessen (locatie, volgorde, scenario's voor macrostabiliteitsproef	KBG	
20	4h, 4n, 4t	Predictie veldproef		Combinatie van piping, macrostabiliteit en vervolgprocessen
21	4i, 4o, 4u	Draaiboek en monitoringsplan		idem
22	4k, 4q, 4w	factual report		Idem; inclusief activiteiten 4j, 4p en 4v; uitvoeren proeven
23	4l, 4m	Postdictie en analyse piping	KBG	
24	4r, 4s	Postdictie en analyse macrostab	KBG	
25	4x, 4y	Postdictie en analyse vervolgprocessen	KBG	
26	5a, 5b, 5c	<ul style="list-style-type: none"> Opstellen beslisregels Uitwerken handvatten voor bepalen overstromingskans bij opbarsten. Consequentie analyse voor overstromingskans door piping 	KBG	
27	5d	Consequenties voor kennisagenda/rode draad piping	KBG	notitie
28	5e	Uitwerking afweegkader voor versterkingsmaatregelen en/of noodmaatregelen.	KBG	
29	5f, 5g	Uitwerking handvat / werkwijze omgaan met opbarsten en macrostabiliteit voor overstromingskansanalyses Consequentie analyse voor overstromingskans door macro-instabiliteit	KBG	
30	5h	Consequenties voor kennisagenda/rode draad macrostabiliteit	KBG	notitie
31	5i	Factsheet meenemen vervolgprocessen voor overstromingskansanalyse	KBG	
32	5j	Consequenties voor kennisagenda/rode draden (dijkerosie, macrostabiliteit	KBG	notitie
33	5k	Einddocument; integrale beschrijving faalpad opbarsten	KBG, ENW	animatie

5 Locatie veldproef

Een belangrijk onderdeel van dit innovatietraject bestaat uit een grootschalige veldproef. De geschiktheid, vergunbaarheid en andere aspecten ten aanzien van de locatie zijn gedurende het uitwerken van voorliggend plan van aanpak verkend. De beschikbaarheid van een veldproeflocatie is (sterk) van invloed op de uitvoering van het onderzoek, zowel budgettair als wat betreft de uitvoeringstijd en planning. Daarom is dit traject zo veel mogelijk doorlopen tijdens het opstellen van dit Plan van Aanpak en de subsidieaanvraag. Op basis van de momenteel beschikbare gegevens qua ondergrond (opbouw, uniformiteit) en omgeving (vergunning, beheer, etc.) is er een geschikte locatie gevonden; “proeflocatie Kampen”.



Figuur 5-1: Proeflocatie Kampen, rood gearceerd.

5.1 Proeflocatie Kampen

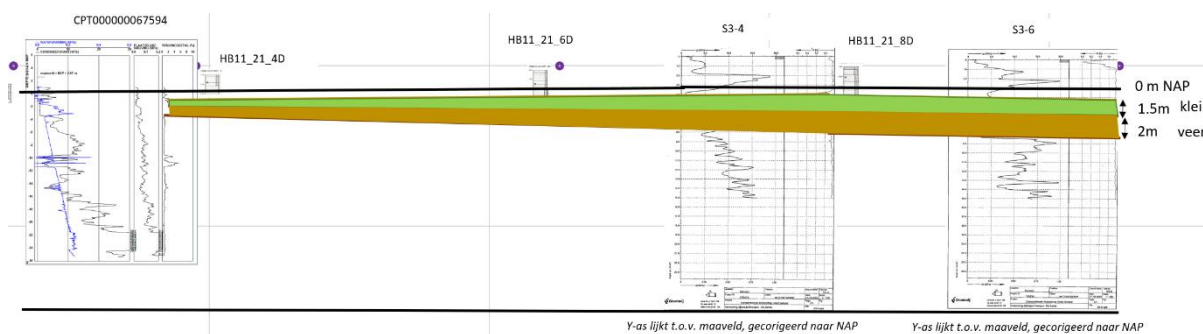
De IJsseldijk die onderdeel vormt van (voormalige) dijkkring 11 rondom Kampen ligt ter hoogte van hm 21.0-21.8, voor de monding van het gerealiseerde Reevediep. Ze sluit de ingang van de inlaat af. Zolang de keringen van het Reevediep nog niet op sterkte zijn, heeft deze kering een kerende functie. Naast de sterkte ontwikkeling van de nieuwe dijken speelt de verplaatsing van de Roggebot sluis een rol in de planning. Op de huidige locatie vormt deze sluis een obstakel voor de gecreëerde nevengeul. Op een alternatieve locatie is een nieuwe sluis, de Reevesluis, gebouwd en zal de Roggebotsluis geamoveerd worden. Na het verwijderen van de Roggebotsluis en het op sterkte komen van de nieuwe dijken kan de afsluitende dijk bij het Reevediep worden verwijderd.

Het moment waarop naar verwachting het dijklichaam beschikbaar is voor proeven is 15 april 2023. Vanaf dat moment verliest de dijk haar functie. Bij aanvang van het stormseizoen, 15 oktober 2023, dient de voorliggende kering geamoveerd te zijn, zodat het Reevediep daadwerkelijk als nevengeul kan functioneren. Dat betekent dat de proeven zullen moeten worden uitgevoerd in het eerste deel van de periode tussen 15 april 2023 en 15 oktober 2023. In gesprekken met de aannemer zal later moeten blijken wat de exacte window is.

5.2 Ondergrond van de locatie

Op basis van het voorlopig beschikbaar onderzoek is de locatie in beeld gekomen als beoogde veldproeflocatie. In december 2020 is aanvullend grondonderzoek uitgevoerd op deze locatie, met als doel om de geschiktheid van de ondergrond nader te bepalen. Dit onderzoek - bestaande uit sonderingen, boringen en labonderzoek - geeft een redelijk homogene aanwezigheid van een slappe laag nabij het maaiveld weer (zie ook [Figuur 5-2](#)). De deklaag ter plaatse heeft een dikte van 3,5 tot 4 m en bestaat uit een kleilaag van 1,5 tot 2 m dik en een circa 2 m dikke veenlaag. Hiermee sluit de opbouw van de ondergrond goed aan bij de wensen vanuit het onderzoek; er is sprake van een dunne deklaag.

Onder de dunne deklaag bevindt zich een zandlaag van waaruit het opdrijven zal plaats vinden. Het dijklichaam zelf bestaat uit een zandkern met een kleiafdekking.



Figuur 5-2 Indicatie bodemopbouw lokaal (zonder aanvullend onderzoek december 2020).

5.3 Omgevingsaspecten van de locatie

Het is nodig om in nader detail vast te stellen dat er vanuit de omgeving geen bezwaar is om deze locatie in te zetten als veldproeflocatie. Tot dusverre zijn er geen bezwaren opgeworpen, dit dient echter volledig te worden beschouwd.

Deze actie ligt in eerste instantie bij WDOD, die de stakeholders in beeld brengt en inventariseert of er bezwaren liggen. Dit traject verloopt parallel aan de werkzaamheden uit het plan van aanpak en kan om die reden nog niet worden meegenomen in dit voorliggend plan van aanpak. Het inventariseren van de omgevingsaspecten kan niet wachten tot het moment van beschikking, dus dit wordt zo veel

mogelijk al uitgewerkt voordat aan het innovatieproject is begonnen. De werkzaamheden worden wel meegenomen in de kostenraming ten behoeve van het innovatieproject en moeten worden gezien als een soort van 'nulstap' welke benodigd is om überhaupt het innovatieproject te kunnen starten.

5.4 Planningsaspecten van de locatie

Het verwijderen van de oude IJsseldijk is in de planning van het Project Reevesluis gekoppeld aan andere mijlpalen binnen het programma IJsseldelta en mag niet eerder beginnen dan dat de vernieuwing van N307, de bouw van een nieuwe brug en het weghalen van de Roggebotsluis, is gerealiseerd. Het verwijderen van de Roggebotsluis was oorspronkelijk gepland vóór 1 juli 2022 (gereed), waarbij de IJsseldijk Kampen dan per 1 oktober 2022 afgegraven moest zijn. Inmiddels is deze mijlpaal niet meer haalbaar en ligt een voorstel voor uitstel bij de minister.

De huidige planning van het innovatieproject volgt de aangepaste planning van het verwijderen van de oude IJsseldijk en is erop gericht de praktijkproef uit te voeren in de periode van 01-04-2023 t/m 30-06-2023. Dit window is afgestemd met het projectteam Reevesluis, echter een formeel besluit moet door de minister nog worden genomen. Binnen het Regieteam IJsseldelta Zuid is echter nog geen consensus om uitstel te vragen voor de bestuurlijk mijlpaal (1 oktober 2022). Voorgesteld wordt gezamenlijk druk uit te oefenen vanuit WDOdelta en het HWBP op snelle (gewenste) besluitvorming binnen het programma IJsseldelta Zuid.

5.4 Stakeholders met betrekking tot de proeflocatie Kampen

Ten aanzien van de beoogde locatie voor de veldproef zijn tijdens het opstellen van het plan van aanpak al diverse contacten gelegd met betrekking tot de beschikbaarheid van de locatie:

- IJsseldelta fase 1: de Opdrachtgeverscombinatie die opdracht verstrekt heeft aan de aannemerscombinatie Isala Delta om het Reevediep te realiseren (voltooid) met als sluitstuk het amoveren van de voorliggende keringen bij het inlaatwerk. De OG combinatie representeert de Provincie Overijssel en het Rijk / RWS.
- Isala Delta: de combinatie Isala Delta bestaat uit Boskalis en Van Hattum en Blankevoort. Deze combinatie heeft van Rijkswaterstaat en de provincie Overijssel de opdracht gekregen voor het uitvoeren van het project Ruimte voor de Rivier IJsseldelta. Sluitstuk van deze opdracht is het amoveren van de IJsseldijk, de beoogde projectlocatie voor de veldproef. De concrete opdracht voor het amoveren ligt bij Boskalis. Er is contact met de betreffende uitvoerders. Zij staan zeer positief tegenover medewerking aan de veldproef.
- Staatsbosbeheer: de natuurgebieden in de uiterwaarden van het Reevediep, en daarmee de beoogde projectlocatie, zijn in beheer bij Staatsbosbeheer. Het betreffende perceel is in eigendom van Staatsbosbeheer. Staatsbosbeheer is op de hoogte dat er een proef gaat komen en heeft vooralsnog geen bezwaar. Een volgende stap is om de plannen nader toe te lichten.
- Waterschap Drents Overijsselse Delta: omdat de legger gewijzigd is op het moment dat deze kering verwijderd gaat worden, zijn er vanuit WDOdelta geen vergunningen nodig. WDOdelta is overigens geen beheerder meer van de kering. Deze is overgegaan in (tijdelijk) beheer naar RWS.

5.5 Werkproces t.a.v. locatie

Voor het kunnen gebruiken van de locatie als proeflocatie zijn drie zaken van belang:

- Ondergrond;
- Vergunningen;
- Toestemming/medewerking van de stakeholders.

Ondergrond

In de voorbereiding van het innovatieproject is een relatief uitgebreide stap gemaakt ten aanzien van het verkennen van de ondergrond. Met de nu beschikbare informatie kan worden gesteld dat de proeflocatie geschikt is voor zover het de ondergrond, geometrie, etc. betreft.

Vergunningen

Om de voorgenomen werkzaamheden op de proeflocatie te kunnen uitvoeren is het nodig om 1) in beeld te hebben welke vergunningen daarvoor nodig zijn en 2) die benodigde vergunningen te verkrijgen.

Voor het plan van aanpak is er voor gekozen om een eerste stap te voeren middels een vergunningsscan, die in detail wordt uitgewerkt bij de start van het project. Stap 2 is nog niet uitgevoerd. Er is echter wel ingeschat wat de (on)mogelijkheden zijn t.a.v. de vergunningen; m.a.w. verwachten we problemen of niet. In hoofdstuk 10 is e.e.a. opgenomen ten aanzien van de vergunningen.

Afstemming met stakeholders

De betreffende locatie valt in het spanningsveld van meerdere verschillende (grote) projecten met elk zijn belang.

Een belangrijke stakeholder voor de proeflocatie is de projectorganisatie Isala Delta. De opdrachtgever hiervoor (Ijsseldelta fase 1) staat (zeer) positief tegenover de plannen en wil graag meehelpen. Op moment van schrijven is de status:

- WDODelta is in afstemming met Ijsseldelta fase 1 ten aanzien van de planning en eventuele wijzigingen hier op. Op basis van huidige informatie is het haalbaar om betreffende locatie te gebruiken voor een veldproef. Dit afstemmen met Ijsseldelta fase 1 is een iteratief proces en zal steeds nauwkeuriger en gedetailleerder uitgevoerd worden.
- WDODelta heeft afgestemd met Boskalis, de aannemer uit de combinatie die als opdracht heeft om de uiteindelijke ontgraving te doen. Boskalis staat zeer positief tegenover de plannen en afstemming t.a.v. haalbaarheid en inpasbaarheid hebben plaatsgevonden op een eerste detailniveau. Gedurende het project wordt deze afstemming en inpassing steeds nader gedetailleerd.

Een volledig overzicht van de stakeholders volgt in hoofdstuk 6.

6 Omgeving en stakeholders

6.1 Strategisch Omgevingsmanagement

Voor dit project is een omgevingsmanager aangesteld vanuit WDODelta. Om het omgevingsmanagement goed in te vullen werkt WDODelta volgens de principes van Strategisch Omgevingsmanagement (SOM). De stappen van het SOM-model zijn: doelen stellen (stap 1), inventariseren van stakeholders en issues (stap 2), identificeren en analyseren van standpunten en belangen (stap 3) en het bepalen van een strategie per stakeholder (stap 4). Voor dit innovatieproject worden deze stappen bij de start van het project uitgewerkt door de omgevingsmanager van het project, eventueel met ondersteuning van omgevingsadviseurs van WDODelta.

Aan het begin van het innovatieproject vinden gesprekken met de stakeholders (overheden, grondeigenaren en overige direct belanghebbenden) plaats om de mate van betrokkenheid af te stemmen. Dit resulteert in een afgerond participatie- en communicatieplan.

6.2 Participatie en communicatie in het project

Dit plan van aanpak bevat de hoofdlijn van de te volgen participatie- en communicatiestrategie. Aan het begin van het innovatieproject wordt deze nader uitgewerkt en vastgelegd in een participatie- en communicatieplan. In dit plan wordt de aanpak voor participatie en communicatie uitgewerkt in samenhang en afstemming met de betrokken partijen.

De omgeving wordt vooral geïnformeerd over wat er gemeten wordt en waar dat toe leidt. Naast heldere communicatie, is kennis delen een andere strategie. We delen de gekozen onderzoeksplan en resultaten met relevante stakeholders, zoals kennisinstituten. De stakeholders worden nader toegelicht in de volgende paragraaf.

Ten aanzien van de IJsseldijken bij Kampen, de beoogde locatie voor de veldproef, zijn enige werkzaamheden in gang gezet parallel aan het uitwerken van het plan van aanpak. Dit betreft de fysieke geschiktheid en omgevingsaspecten (vergunbaarheid) van de locatie.

6.3 Stakeholders

Voor de fase van het plan van aanpak schatten we in dat het voldoende is om 1) de stakeholders te benoemen en 2) de (hoofd)stakeholders te informeren en mee te nemen in het innovatieproject en om te proberen hun medewerking te krijgen. Dit laatste is dan nog niet officieel, maar het geeft wel een richting.

6.3.1 Andere waterschappen

Het uitgevoerde onderzoek moet bekend worden gemaakt aan collega-beheerders door heel Nederland die te maken hebben met dezelfde problematiek. In de toekomst is het niet ondenkbaar dat ook voor regionale waterkeringen de in het onderzoek opgedane kennis kan worden toegepast. We helpen hen desgewenst ook op gang om zelf de eerste stappen te zetten met de nieuwe aanpak.

6.3.2 Kennisinstituten en universiteiten

Het onderzoeksinstituut Deltares is betrokken bij de uitvoering van dit innovatieproject. Overige kennisinstituten en universiteiten zoals de TU Delft, Universiteit Twente en Wageningen Universiteit die geïnteresseerd zijn in het project, zullen ook op de hoogte gebracht worden van de onderzoeksresultaten. Voor een aantal opleveringen gedurende het project zal er zelfs een review worden gevraagd van deze partijen. Dit dient nog nader uitgewerkt te worden. Voor wat betreft kennisdeling wordt verwezen naar hoofdstuk 8.

6.3.3 Ingenieursbureaus/aannemers

Ingenieursbureaus en aannemers die betrokken zijn bij dijkversterkingen zijn ook stakeholders van dit project. De Taskforce Deltatechnologie (TFDT) bestaat uit vertegenwoordigers van het bedrijfsleven met de gezamenlijke missie om te zorgen voor toegang tot kennis en expertise. De betrokken partijen hierbij zijn onder andere NLIingenieurs, Bouwend Nederland en de Vereniging van Waterbouwers. De meest logische manier om de TFDT te betrekken bij dit innovatieproject is door ze te laten plaatsnemen in de klankbordgroep.

7 Organisatie

8 Kwaliteitsborging en kennisdoorwerking

8.1 Kwaliteitsborging

8.1.1 Deltares

Deltares zorgt, conform het kwaliteitssysteem van Deltares, ervoor dat alle documenten zoals dit voorliggende plan van aanpak en de daaruit voorkomende producten worden getoetst. De inhoudelijke voortgang wordt besproken in de klankbordgroep die rondom dit project is opgericht. Onderdeel van de kwaliteitsborging van Deltares zal ook het betrekken van externe deskundigen zijn voor de review van een aantal producten (dat bij aanvang project bepalen).

8.1.2 Klankbordgroep

Ter ondersteuning van het onderzoek wordt een klankbordgroep opgericht. De klankbordgroep heeft als hoofddoel kwaliteitsborging van de op te leveren producten. Speciale aandachtspunt van de klankbordgroep is de praktische toepasbaarheid en aansluiting met de ingenieurspraktijk. Een belangrijk nevendoeel is het creëren van draagvlak onder de belangrijkste stakeholders. Om aan deze doelen te voldoen wordt de klankbordgroep gevuld met vertegenwoordigers van de verschillende partijen uit het werkveld. Hierbij wordt aansluiting gezocht met de dagelijkse ingenieurspraktijk via vertegenwoordigers van waterschappen en ingenieursbureaus, maar ook bij de lopende programma's van Rijkswaterstaat en ondersteunende gremia als expertise netwerk waterkeringen, ENW en adviesteam dijkontwerp, ADO.

Bij aanvang van het project zal worden vastgesteld welke documenten in de klankbordgroep worden besproken. Ook zal van de klankbordgroep worden verwacht dat zij een advies uitbrengen met betrekking tot de go no-go momenten. Verwacht wordt dat de klankbordgroep 3 a 4-maal per jaar bijeen zal komen. Tussentijds zal de klankbordgroep ook worden geïnformeerd over de voortgang van het onderzoek om betrokkenheid te blijven houden.

De leden van de beoogde klankbordgroep staan weergegeven in onderstaande tabel 8-1. Er is gekozen voor een vertegenwoordiging van beheerders, marktpartijen en verantwoordelijke van kennisagenda's. Vaste deelnemers van deze overleggen zijn ***** namens het HWBP-Begeleidingsteam, ***** vanuit het kernteam WDODelta en een vertegenwoordiger vanuit Deltares (afhankelijk van de agenda kan ingevuld worden wie dat zal zijn). De projectmanager van WDODelta ***** zal deze overleggen met de klankbordgroep voorzitten en initiëren. In de planning zijn een negental bijeenkomsten voorzien gedurende de looptijd van het onderzoek.

Tabel 8-1: Beoogde leden van de klankbordgroep

Naam	Organisatie	Expertise
****	Waterschap Rivierenland	Integraal
****	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden	Integraal
****	Waterschap Drents Overijsselse Delta	Integraal
****	Waterschap Hollandse Delta	Integraal en ervaring met bezwijkproef
****	Waterschap Rijn en IJssel	Integraal
****	Fugro & ADO	Piping/Marcostabiliteit
****	RHDHV & ADO	Piping en geohydrologie
****	Arcadis	Piping/Marcostabiliteit
****	HKV	Piping/Marcostabiliteit
****	Boskalis	Macrostabiliteit

Naam	Organisatie	Expertise
****	TU Delft, sectie Geo-Engineering	Macrostabieleit en numerieke modellen
****	RWS-WVL & ADO	Erosie door overslag (vervolgprocessen)
****	Deltares / ENW	Integraal/veiligheidsfilosofie
****	RWS/STOWA/ENW/KVK	Piping
****	RWS/KVK/BOI	Macrostabieleit
****	HWBP	Integraal

De beoogde leden van de klankbordgroep zijn allemaal gepolst en hebben hun interesse in deelname bevestigd. Ze hebben toegezegd dat ze gedurende de looptijd van het onderzoek zich committeren en dat ze de achterban binnen hun organisatie betrekken. De leden vanuit de commerciële partijen (incl. TU Delft) zullen een vergoeding krijgen. Het is mogelijk om indien nodig extra (tijdelijke) leden met specifieke kennis en kunde in de klankbordgroep uit te nodigen.

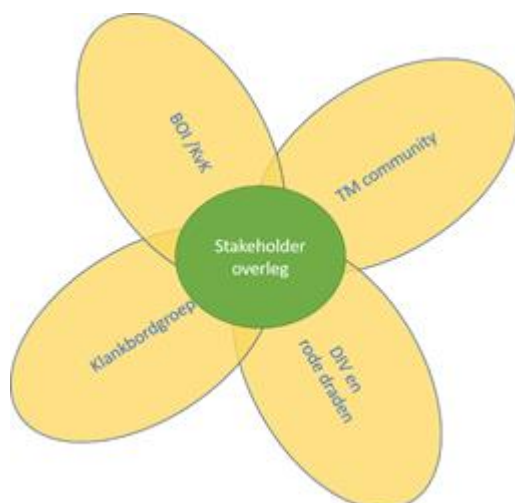
8.1.3 ENW

Expertise Netwerk Waterveiligheid is een onafhankelijk kennisnetwerk van specialisten in waterveiligheid. De belangrijkste taak van het ENW is het (gevraagd én ongevraagd) adviseren van overheidsorganisaties met een verantwoordelijkheid voor waterveiligheid over actuele vraagstukken en innovaties. ENW heeft een rol bij de kennisborging van nieuwe kennis. Afstemming met ENW loopt via WDOD. De vragen en agendering wordt voorbereid met pdHWBP en Deltares. Het plan van aanpak zal gepresenteerd worden aan het ENW en het ENW zal tussentijds geïnformeerd worden. Het einddocument zal middels een formele ENW adviesvraag worden voorgelegd.

8.2 Kennisdoorwerking

Onder kennisdoorwerking verstaan we het leren “over de projecten heen” van de kennis die in projecten gegenereerd en gemanaged is en wordt. Kennisdoorwerking gaat niet vanzelf. In de navolgende paragrafen volgt welke aandacht er is voor kennisdeling, kennisborging en kennisoverdracht.

Voor het betrekken van de relevante stakeholders in het vakgebied wordt gebruik gemaakt van bestaande platforms (zie figuur). Regelmatige afstemmingsmomenten met vertegenwoordigers van KvK/BOI, de TM Community, Dijk Innovatie Versneller (DIV) en de rode draden en de klankbordgroep, dienen om te bespreken in welke gremia en op welke wijze de resultaten gedeeld worden om de relevante stakeholders te informeren en betrekken. Hiermee wordt de ontwikkelde kennis en opgedane ervaring breed verspreid op een wijze die afgestemd is op de behoefte van de desbetreffende doelgroep. Ook kan op deze wijze input opgehaald worden om de toepasbaarheid van de te ontwikkelen handvatten te vergroten.



Figuur 8-1: Stakeholders kennisborging

8.2.1 Kennisdeling met betrokken partijen

Andere waterschappen/TM-Community

Collega-waterschappen hebben aangegeven belang te hebben bij de te ontwikkelen kennis. Het uitgevoerde onderzoek moet bekend worden gemaakt aan collega beheerders door heel Nederland die te maken hebben met dezelfde problematiek. Binnen het project worden collega's vanuit andere waterschappen en het HWBP tijdig en voldoende ingelicht over de stand van het onderzoek. Dit zal via de TM-Community plaatsvinden. De TM-Community bestaat uit 100 actieve Technisch managers van de waterbeheerders uit het hele land. Op reguliere basis komen zij zowel online als offline bij elkaar. Deze community deelt kennis, ervaringen, schrijft mee aan handreikingen en factsheets vanuit de rol als technisch managers. Vanuit dit project zal daarom deelgenomen worden aan een aantal de online en offline activiteiten van de TM Community.

Adviesteam Dijkontwerp

Het Adviesteam Dijkontwerp ondersteunt de versterkingsprojecten bij toepassing van (bestaande) specialistische kennis. De focus van het Adviesteam Dijkontwerp ligt op technisch inhoudelijke aspecten rondom projectaanpak, projectuitgangspunten en specialistische ontwerpvragestukken. Daarnaast adviseert het Adviesteam de programmadirectie HWBP door het beantwoorden van technisch inhoudelijke vragen vanuit de begeleiding en het leveren van bijdragen aan bijvoorbeeld reviews en de ingangstoets. Het is daarom met name belangrijk kennis uit te wisselen over de ervaringen met – en ontwikkeling van - nieuwe kennis die binnen dit project wordt opgedaan. We zullen daarom het adviesteam informeren (over-en-weer). In de klankbordgroep zullen ook leden vanuit het adviesteam deelnemen.

Afstemming BOI en KvK

Het BOI is een programma gericht op de doorontwikkeling van het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium voor primaire waterkeringen. Daarnaast ontwikkelt Rijkswaterstaat in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat waterveiligheidskennis. Dat gebeurt binnen het project Kennis voor Keringen (KvK). De kennis wordt ontwikkeld om Nederland op een optimale manier te beschermen tegen overstromingen, nu en in de toekomst. Vanuit Rijkswaterstaat-WVL zal deelname zijn aan de klankbordgroep. Dit innovatieproject levert kennis voor de roadmap opbarsten.

8.2.2 Kennisborging binnen WDOD

Binnen WDODelta zal er aanvullend op de reeds voorziene momenten nog extra kennisborging zijn. Dit wordt ingevuld door met de technisch managers van de relevante projecten regelmatig bij te praten over de voortgang en de concept conclusies van dit onderzoek. Daarnaast is er een regulier overleg (tweewekelijks) met beleidsadviseurs, specialisten en technisch managers waar de laatste ontwikkelingen worden gedeeld.

8.2.3 Kennisoverdracht en Databeheer

Het project beoogt een verbetering van de huidige ingenieurspraktijk, zoals beschreven in hoofdstuk 1. Essentieel in het bereiken van dit doel is de overdracht van de kennis die in dit project is opgedaan naar de dagelijkse adviespraktijk. Enerzijds zullen de resultaten van het onderzoek beschikbaar komen voor de programma's BOI en KvK, zie paragraaf 8.2.1. Anderzijds zullen communicatiemomenten worden opgezocht en waar mogelijk gecreëerd om resultaten van het onderzoek te delen. Om de kennisoverdracht in goede banen te leiden zal bij aanvang van het project een communicatieplan worden opgesteld.

Dit communicatieplan zal minimaal de volgende acties bevatten:

- Aanwezigheid op diverse kennisdagen, hierbij kan worden gedacht aan de dijkwerkersdag, landelijke beoordelingsdag, geotechniekdag, linked-in groepen zoals Dijken van Innovaties, Technisch Managers van HWBP-projecten, De Innovatieversneller etc.
- Publicaties in nationale vakbladen, hierbij kan worden gedacht aan De Ingenieur, Land en Water, vakblad Geotechniek etc.
- Internationale exposure, hierbij kan worden gedacht aan internationale conferenties en internationale vakbladen.

Onder het motto "Dare to Share" zullen de onderzoeksgegevens beschikbaar worden gesteld. Na afronding van het project kunnen andere onderzoekers beschikking over de data krijgen. Hiermee kan in de toekomst nieuwe inzichten of (reken)modellen worden gevalideerd en kunnen nieuwe ontwikkelingen worden ondersteund.

Om dit mogelijk te maken zullen alle relevante rapportages vrij beschikbaar zijn. Om langdurige beschikbaarheid te garanderen zullen de definitieve versies van de rapportages in een repository worden opgenomen. Als illustratie worden genoemd de rapportages die in het Delft Cluster zijn opgesteld, terug te vinden via [Delft Cluster | KIVI](#) of de rapportage uit de POVM, [Projectoverstijgende Verkenning Macrostabieleit \(POVM\) | Hoogwaterbeschermingsprogramma \(hwbp.nl\)](#). Een gedetailleerde uitwerking van de beschikbaarstelling van de rapportage zal in het communicatieplan nader worden uitgewerkt.

Naast de rapportages zullen ook de meetdata beschikbaar zijn. De meetdata wordt op de Deltares server opgeslagen. Zowel voor laboratoriumproeven als de modelproeven zijn databases beschikbaar waarin resultaten worden opgeslagen. De meetdata zullen op aanvraag vrij beschikbaar zijn. Wel wordt van de aanvragende partijen verwacht het eindresultaat van hun analyses open te delen en bij publicaties de gebruikte data met de juiste bronvermelding weer te geven.

9 Marktbenadering en samenwerken met de markt

9.1 Participatie Subsidiekaders HWBP

WDOD besteedt als overheidsorgaan de voor de HWBP-projecten benodigde diensten, leveringen, onderzoeken en werken aan volgens vigerende wet- en regelgeving en het vastgestelde inkoopbeleid van WDOD. Daarnaast gelden voor de inkopen binnen het HWBP-programma van WDOD de Leidende Principes, die kaders geven voor het omgaan met risico's, de omgeving, de markt en kwaliteiten van de organisatie. Ten aanzien van de visie op de wijze van samenwerking wordt aangehaakt bij de principes en de afspraken tussen de Unie van Waterschappen en de brancheorganisaties [19].

Voor de dijkversterkingsprojecten stimuleert de programmadirectie HWBP een vroegtijdige marktbenadering. Daarbij is wel specifiek aandacht gevraagd voor de marktwerking en bijbehorende prijsprikkel in de realisatie van projecten.

Projectkarakteristieken en risico's

Voor de marktbenadering zijn de volgende karakteristieken en risico's van het project relevant:

- Het project is een innovatieproject waarin specialistische kennis wordt ontwikkeld. Daarbij is inzicht in het proces hoe tot de huidige modellen is gekomen en ervaring met het doen van proeven van grote meerwaarde. De kennis en ervaring is bij een zeer beperkt aantal partijen aanwezig. Dit zijn de partijen die in het verleden vergelijkbare proeven hebben gedaan en de resultaten hebben gebruikt voor het opzetten van de huidige sterktemodellen voor grasbekleding. Dit betreft enkel het onderzoeksinstituut Deltares.
- Onderzoeksprojecten kennen een groot risicoprofiel als gevolg van kennisonzekerheid. Het is immers onbekend wat de resultaten uit de proeven zijn en of die tot de gewenste resultaten zullen leiden. Het financiële risico voor WDOD is beperkt daar het een innovatieproject betreft met 100% subsidie, maar dient vanzelfsprekend wel beheerst te worden in het kader van maatschappelijk verantwoord omgaan met belastinggeld. Het planningsrisico is groot voor de lopende HWBP-projecten binnen WDOD. De uitkomsten zullen naar verwachting impact hebben op de veiligheidsopgave en ontwerpbesluiten in deze projecten. In de projecten wordt rekening gehouden met het moment dat er nieuwe kennis verwerkt moet worden vanuit dit innovatieproject.
- Het project is in stappen onderverdeeld. Deze stappen hebben een zeer sterke inhoudelijke relatie, waarbij het wenselijk is dat de voorbereidende, uitvoerende en analyserende activiteiten bij één partij liggen.
- Het succes van het innovatieproject is gekoppeld aan het reduceren van investeringen in de HWBP-versterkingsprojecten. Voor het behalen van een goed rendement is kwaliteit en diepgang van de onderzoeken een randvoorwaarde. Sturing op kwaliteit in plaats van prijs ligt daarom voor de hand.

9.2 Marktbenadering onderzoeken

Ten behoeve van de marktbenadering is een marktbenaderingsdocument opgesteld, waarbij de onderzoeken zijn gedecomposeerd in 3 onderdelen:

1. Fundamenteel onderzoek
2. Geotechnisch onderzoek
3. Civieltechnische activiteiten

In het marktbenaderingsdocument (bijlage 4) wordt per onderdeel beschreven hoe deze worden aanbesteed. Hierin zijn de mogelijkheden beschreven tot welke hoogte 1-op-1 gunning van de werkzaamheden mogelijk zijn, en welke onderdelen in een aanbesteding of raamcontract moeten vallen. Het marktbenaderingsdocument is opgesteld en vastgesteld binnen de mandateringsregeling van WDODelta in april van 2021. Sindsdien is het Plan van Aanpak op onderdelen aangepast en

omgevormd van een werkpakketten structuur naar een fasering met 5 fasen. Ten aanzien van de 3 hoofdonderdelen wijzigt dit niet en blijft de marktbenadering zoals deze is vastgesteld.

De offertes en de daarin aangegeven prijzen dienen middels een open begroting onderbouwd te worden. Voor specifieke onderdelen worden afspraken gemaakt of prijzen op nacalculatie worden verrekend dan wel op basis van een vaste prijs. Het verrekenen op basis van nacalculatie dan wel vaste prijs is afhankelijk van de mogelijkheid om risico's in te schatten en te beheersen.

Kwaliteitsborging contractmanagement

De kwaliteit van het inkoopplan en de contractdocumenten wordt geborgd via collegiale toetsing door waterschapscollega's. Indien de complexiteit van de plannen erom vraagt, is het tevens mogelijk om door een externe onafhankelijke contract- en aanbestedingsadvocaat te laten toetsen.

10 Vergunningen en veiligheid

Het uitvoeren van een veldproef op de beoogde locatie bij de IJsseldijken Kampen brengt met zich mee dat het noodzakelijk is om alvast enige kaders te schetsen ten aanzien van veiligheid en vergunningen. Voor de volledigheid zijn hieraan de kaders in de tijd aan toegevoegd, zoals deze eerder genoemd zijn in hoofdstuk 4

10.1 Vergunningen

In het plan van aanpak is een eerste slag gemaakt ten aanzien van de benodigde vergunningen. Gedurende fase 1 wordt dit verder uitgewerkt. Hierna de beoogde werkwijze en enige aandachtspunten.

Werkwijze

Voor het sluitstuk van Reevediep fase 1, het amoveren van de huidige kering, is een projectplan water opgesteld en zijn/moeten in het kader daarvan reeds vergunningen geregeld worden. De eerste stap t.a.v. de werkzaamheden voor innovatieproject Opbarsten bestaat er uit om de reeds benodigde vergunningen voor Reevediep te beschouwen en uit te zoeken in hoeverre de werkzaamheden voor de innovatieproef binnen de reeds bestaande vergunningsruimte vallen.

Waterwet

Voor de uitvoering van de proeven kan een Waterwetvergunning nodig zijn.

Ecologie

Ten aanzien van ecologie dient (max. 1 week vooraf) een inventarisatie op broedende vogels te worden uitgevoerd. In het geval van het aantreffen van een nest moet er minimaal 20 m afstand worden bewaard.

N2000

De uiterwaard aan buitenzijde van de kering betreft een N2000 gebied. Indien het bevoegd gezag onze activiteiten niet binnen de bestaande vergunning toe staat is er een risico ten aanzien van broedgebied (zie paragraaf hier voor) en ten aanzien van Stikstofdepositie.

Archeologie

In dit stadium kan nog niet worden uitgesloten dat de projectlocatie voor de veldproef een archeologische waarde heeft. Wanneer dat het geval is, dan moeten er - alvorens het verwijderen van de dijk - proefsleuven gegraven worden om inzichtelijk te maken of er archeologische waarden te vinden zijn. Bij het aantreffen van vondsten gaat er een werkprotocol in werking. Waarschijnlijk kunnen het graven van proefsleuven en het verwijderen van de dijk vrijwel gelijktijdig worden opgepakt mits er goede afstemming plaatsvindt en het niet exact dezelfde locatie betreft.

NGE

ECG heeft in 2014 vooronderzoek gedaan waarbij geconcludeerd is dat het gebied niet verdacht is voor NGE.

K&L

Er moet een Klic melding gedaan worden. Er liggen ca. 10 kabels en leidingen die waarschijnlijk vervallen zijn, maar dit moet worden gecheckt. Gedurende eerdere uitvoeringsproject is namelijk het hele kabeltracé omgelegd via een boring.

Doorsteken van eventuele kabels en leidingen is verboden; deze dienen door de netbeheerders zelf geknipt te worden. Tevens niet dieper graven dan dat voor de eindsituatie noodzakelijk is i.v.m. risico op raken gestuurde boring.

Milieu

Het asfalt op de Kamperstraatweg, dat op de binnenberm van de kering is (was) gelegen, is niet teerhoudend. De wegberm is geclassificeerd als “industrie” o.b.v. de (oude) gemeentelijke bodem kwaliteitskaart. Per 1 januari 2019 is de bestemming van de wegberm gewijzigd van Landbodem naar Waterbodem. Voor de definitie van wegberm wordt aangehouden: een strook van 10m aangrenzend aan een weglichaam, met een dikte van 0,5 m, mits deze niet onderbroken wordt door “natuurlijke barrières” (zoals de sloot en dijk in dit geval). Het asfalt of het afvoeren daarvan, is nadrukkelijk geen onderdeel van dit innovatieproject.

Het materiaal afkomstig uit de te vervallen IJsseldijk betreft uitsluitend milieukwaliteit AW. De uiterwaarde idem, met uitzondering van de bovenste 0,5m (klasse A). De grens tussen uiterwaarde en dijk ligt in de teen van de dijk, dus niet op de kruin van de dijk.

10.2 Veiligheidsprocedures

Gedurende het uitvoeren van de proeven is veiligheid van groot belang. Om de kans op ongelukken te minimaliseren zijn er verschillende veiligheidsprocedures. Gedurende fase 1 zal voor fase 2, de veldproef, een integraal veiligheidsplan worden opgesteld.

10.2.1 Veiligheidsprocedures tijdens uitvoeren proeven

Tijdens de proeven moeten adequate persoonlijke beschermingsmiddelen worden gedragen door de uitvoerenden. Alle uitvoerenden zijn in bezit van VCA VOL.

10.2.2 Beveiliging van het terrein

De locatie waar de proeven worden uitgevoerd, wordt voorzien van beveiliging. Deze beveiliging bestaat uit het monitoren door Bouwatch of door een vergelijkbare organisatie. De politie wordt verwittigd en er is contact met de meldcentrale. De locatie wordt indien nodig (of indien gewenst door opdrachtgever) aanvullend afgezet met bouwhekken.

11 Projectbeheersing

Het doel van projectbeheersing is op een beheerste wijze het project te realiseren. Dit hoofdstuk beschrijft hoe invulling wordt gegeven aan de projectbeheersingsaspecten kwaliteit, risico's, scope, planning en financiën.

11.1 Kwaliteitsmanagement

In hoofdstuk 8 wordt beschreven hoe de externe kwaliteitsborging en kennisdoorwerking tot stand komt. Deltares draagt zorg, conform het kwaliteitssysteem van Deltares, voor de inhoudelijke controle van de producten voorkomend uit het plan van aanpak.

Naast de interne kwaliteitscontrole van Deltares wordt de klankbordgroep, toegelicht in paragraaf 8.1.2, betrokken. Dit heeft onder andere een onafhankelijke kwaliteitsborging als doel. Verder is hiermee eveneens het doel om te borgen dat de resultaten naast kwalitatief goed, ook bruikbaar zijn om in versterkingsprojecten te worden toegepast. Een voorstel voor participanten is gedaan in tabel 8-1. Deze kan nog wijzigen door aanvullingen. Het doel is om van elkaar te leren, ervaringen te delen en te discussiëren over de toepasbaarheid, bruikbaarheid en kwaliteit van de aangepaste beoordelingsmethode. Dit team wordt op negen momenten gevraagd om kritisch mee te denken.

Naast de klankbordgroep wordt ook de ENW betrokken bij de externe kwaliteitsboring. Dit met als doel het creëren van draagvlak voor de onderzoeksresultaten. De belangrijkste resultaten zullen binnen ENW worden besproken. Daarnaast zal een vertegenwoordiger van ENW deelnemen aan de klankbordgroep.

Om de kwaliteit van de interne werkprocessen te borgen werkt het project conform de werkwijzer "Zo werken wij in projecten". Dit is kwaliteitssysteem van Waterschap Drents Overijsselse delta waarin per projectfase de processen en ondersteunende processen zijn beschreven. De hieronder beschreven processen zijn hier in detail uitgewerkt en worden gevolgd.

11.2 Scopemanagement

De scope wordt continue geactualiseerd en bewaakt door de projectmanager van het innovatieproject. Naar de interne opdrachtgever, het bestuur en de programmadirectie HWBP wordt gecommuniceerd over de scope, zodat er tijdig geanticipeerd kan worden op scopeafwijkingen.

Wijzigingen binnen in de scope van het project worden, afhankelijk van het mandaat, afgehandeld door de projectmanager, opdrachtgever of het bestuur en zal ten alle tijden duidelijk worden gecommuniceerd en worden afgewogen. In het geval van scopewijzigingen, waarbij afgeweken wordt van de onderzoeksopzet, wordt hierover apart met het BGT en/of de PD gesproken en bij akkoord zal de scopewijziging worden doorgevoerd.

11.3 Risicomanagement

Voor dit plan van aanpak is een risicodossier opgesteld, conform de, door het HWBP voorgeschreven, RISMAN-methode. De risico's zijn opgehaald bij betrokkenen en gebaseerd op ervaringen vanuit andere projecten. Hierdoor is inzichtelijk gemaakt welke risico's van invloed zijn op het projectresultaat, uitgedrukt in tijd en geld. Op basis van deze uitkomsten wordt besloten welke beheersmaatregelen te nemen. Risicomanagement helpt bij het focussen op de hoofdzaken binnen het project. Het belangrijkste resultaat van risicomanagement ligt in het vergroten van het risicobewustzijn bij de mensen die betrokken zijn bij het project en het verkrijgen van inzicht in kansen en bedreigingen die van invloed zijn op de realisatie van het project.

De restrisico's (kans * geld) bij elkaar opgeteld betreffen het voorziene risicoprofiel van het project. Binnen WDODelta ligt het mandaat voor het aanwenden van dit voorziene deel bij de Projectmanager.

Het mandaat voor het aanwenden van de onvoorziene risicoreservering is bij interne opdrachtgever belegd. Bij het optreden van zowel voorziene- als onvoorziene risico's zal de subsidieverstrekker worden geïnformeerd. In het geval opgetreden risico's leiden tot een scopewijziging, met mogelijk financieel gevolg, wordt de subsidieverstrekker meegenomen in de besluitvorming.

Door de risico's onderling te wegen is een lijst met top risico's benoemd. Hieronder zijn de 5 top risico's weergegeven met de bijbehorende beheersmaatregelen. In totaal zijn er 25 risico's geïdentificeerd. In tabel 11-1 wordt de top 5 endogene risico's na beheersing weergegeven.

Tabel 11-1: Top 5 endogene risico's na beheersing

#	Risico	Oorzaken	Gevolgen	Beheersmaatregelen
1	Kwaliteit van (deel)onderzoeken wordt niet door iedereen gedragen (De resultaten hebben veel onzekerheid), waardoor extra onderzoek nodig is.	Te weinig sturing op kwaliteit, doelgerichtheid, het resultaat of het niet goed communiceren van het resultaat.	Hierdoor is er meer onderzoek nodig en meer metingen nodig (meerdere locaties) dan voorheen was verwacht, waardoor het project vertraging oploopt. Dit kost ook meer geld.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sterkte sturing op resultaten; 2. Vooraf het doel goed afstemmen tussen Deltares en WDODelta; 3. Plan van aanpak ter verificatie bespreken met Deltares. Bijeenkomen en resultaten delen, zodat alle partijen op één lijn zitten. 4. Vooraf en gedurende het project een goed verwachtingenmanagement toepassen 5. Het goed betrekken van de klankbordgroep met externe experts in alle fases van het onderzoek 6. Het goed betrekken van het ENW in alle fases van het onderzoek
17	Modelproeven opbarsten & macrostabiliteit leveren geen bruikbaar resultaat op	Bezwijken van het schaalmodel treedt niet op of andere mechanismen, al dan niet het gevolg van randeffecten, zijn dominant.	De numerieke methoden kunnen minder betrouwbaar worden gevalideerd. Validatie op een andere manier nodig.	<ol style="list-style-type: none"> 1. De modelproeven worden ontworpen met aandacht voor mogelijke beïnvloeding van randeffecten; 2. Er worden meerdere schaalproeven uitgevoerd waarbij eerst een evaluatie van een proef plaatsvindt voordat de volgende proef uitgevoerd. Dit geeft de mogelijkheid bij te sturen indien nodig.
18	Modelproeven voor het piping onderzoek (centrifuge of andersoorts) leveren geen bruikbaar resultaat op	Bezwijken van het schaalmodel treedt niet op of andere mechanismen, al dan niet het gevolg van randeffecten, zijn dominant. Onvoldoende afbakening n.a.v. fase 1.	De numerieke methoden kunnen minder betrouwbaar worden gevalideerd. Validatie op een andere manier nodig.	<ol style="list-style-type: none"> 1. De modelproeven worden ontworpen met aandacht voor mogelijke beïnvloeding van randeffecten; 2. Er worden meerdere schaalproeven uitgevoerd waarbij eerst een evaluatie van een proef plaatsvindt voordat de volgende proef uitgevoerd. Dit geeft de mogelijkheid bij te sturen indien nodig.
8	Onderzoekstrategie onduidelijk	Afspraken over doel of methode van (sub)vragen in het onderzoek zijn onduidelijk. Onvoldoende afbakening n.a.v. fase 1.	Vertraging. Opnieuw doen van delen onderzoek	<ol style="list-style-type: none"> 1. Goed vooronderzoek naar de meetlocatie; 2. Regelmatig overleg binnen kernteam en klankbordgroep 3. Bespreken van het PvA tijdens de eerste klankbordgroep bijeenkomst
19	Veldproef piping levert minder bruikbare resultaten op (andere resultaten dan verwacht)	De predictie van de proef blijkt niet te kloppen	1) De proef mislukt: De voorgestelde werkwijzer kan alleen gevalideerd worden	<ol style="list-style-type: none"> 1. Er wordt vroegtijdig een haalbaarheidsstudie naar het uitvoeren van de full-scale proef uitgevoerd;

#	Risico	Oorzaken	Gevolgen	Beheersmaatregelen
			aan de schaalproeven en mogelijk moet er een extra veldproef worden uitgevoerd. 2) De proef geeft aanleiding om de hypothese te herzien (zie risico 25: inhoudelijk risico)	2. Het ontwerp van de proef houdt rekening met onzekerheid in de ondergrond; 3. maatregelen voor extra belastingen, of verantwoord verzwakken van de deklaag worden achter de hand gehouden. 4. opstellen backup plan 2e veldproef

Om het risicobewustzijn verder te vergroten bij de kernteamleden zal een cyclisch proces worden ingericht. Na het vaststellen van het risicodossier wordt gestuurd op het uitvoeren van de beheersmaatregelen. Het projectteam werkt risico gestuurd. De kernteamleden zijn eigenaar van risico's en beheersmaatregelen, hier zal tijdens het kernteamoverleg aandacht aan worden besteed. Door middel van risicosessies, eens per 2 maanden, het bewaken van de planning en de kosten en bilaterale overleggen tussen de risicomanager en de kernteamleden van het project worden potentiële wijzigingen in het risicodossier verzameld, die na goedkeuring door het kernteam zullen worden doorgevoerd in het risicodossier.

Het complete risicodossier is terug te vinden in bijlage 1 Het risicodossier levert tevens de onderbouwing voor de geraamde post 'voorzien' in de SSK-raming en is input voor de probabilistische planning. De totstandkoming van probabilistische planning en de PPI-rapportage wordt verder toegelicht in paragraaf 11.4.2.

11.4 Planningsmanagement

Het doel van planningsmanagement is het beheersen en sturen van het project op het aspect tijd. De Manager Projectbeheersing, in samenspraak met de planner van het projectteam, is verantwoordelijk voor het managen van de planning. Ook dit is een cyclisch proces. Door middel van maandelijkse planningsessies en een weekstart en/of bilaterale overleggen tussen de planner en de kernteamleden van het project worden potentiële wijzigingen in de planning verzameld, die na goedkeuring door het kernteam zullen worden doorgevoerd en vastgesteld. Het planningsproces werkt nauw samen met het risicomangementproces.

Voor dit plan van aanpak is een deterministische planning van het project opgesteld. De achterliggende activiteiten en hoofdproducten/onderzoeken zijn gespecificeerd in hoofdstuk 4. In de deterministische planning (zie bijlage 2A) worden de doorlooptijden van de verschillende werkzaamheden visueel weergegeven.

De geplande deterministische einddatum voor het onderzoeksproject is 07-11-2024. Dit betekent dat de doorlooptijd van het project wordt geschat op 33 maanden. Er zijn na de subsidievernemering zogenoemde Go/No-Go momenten gepland gedurende de uitvoering van het project. Deze momenten worden hieronder verder toegelicht.

11.4.1 Go/no-go momenten

Tijdens dit innovatieproject zijn er go & no-go momenten. Dit zijn momenten om de balans op te maken waarbij over het project heen gekeken wordt en de vraag gesteld wordt of we nog op de juiste weg zijn. Hierbij wordt o.a. nagedacht over of we de hoofddoelstelling van het hele project nog gaan halen of dat er aanpassingen nodig zijn. Is het verantwoord is om door te gaan of om te stoppen met de daaropvolgende activiteiten? Dit kan ook betekenen dat een deel van de activiteiten niet wordt uitgevoerd.

Per inhoudelijk thema (macrostabiliteit, piping en vervolgprocessen) zijn er twee go & no-go momenten. Dit maakt het een complex geheel. Er is namelijk een risico dat een no-go bij een van de thema's kan leiden tot een verhoging van de kosten voor een ander onderdeel. Daarom is het belangrijk om van te voren goed na te denken over de criteria die we stellen. Hieronder staat een lijst met criteria die het projectteam doorloopt per go & no-go moment.

- De resultaten en uitkomsten van de uitgevoerde activiteiten maakt het **onmogelijk** om één of meerdere van de sub-onderzoeksdoelen (paragraaf 1.2) te behalen in de beschikbare resterende tijd of budget → no go
- De resultaten en uitkomsten van de uitgevoerde activiteiten maakt het **lastig** om één of meerdere van de sub-onderzoeksdoelen te behalen in de beschikbare resterende tijd of budget → het projectteam WDODelta stelt een advies met een of meerdere scenario's op naar opdrachtgever op basis van de adviezen van Deltares, het begeleidingsteam HWBP en de klankbordgroep → aanpassen (in scope en/of planning).
- De resultaten en uitkomsten van de uitgevoerde activiteiten maakt het **mogelijk** om één of meerdere van de sub-onderzoeksdoel te behalen in de beschikbare resterende tijd of budget → go

Voorafgaand aan dit belangrijke keuzemoment zullen er adviezen liggen van de stakeholders naar de opdrachtgever: het projectteam WDODelta, het projectteam Deltares, de klankbordgroep en het begeleidingsteam HWBP.

Met betrekking tot de go/no-go momenten is het waarschijnlijk dat hier een voorwaarde over wordt opgenomen in de subsidiebeschikking, waarin zal worden bepaald dat de pd HWBP hier een besluitvormende rol in heeft. Wanneer er geen projectmatige obstakels zijn voor een go besluit, zal dit naar verwachting worden gemandateerd aan de teammanager van team Kennis & Innovatie. Wanneer wel projectmatige obstakels aanwezig zijn zal een mogelijk no-go besluit naar verwachting worden genomen door pd HWBP.

In de planning (bijlage 2A en paragraaf 4.2 zijn een twee concrete Go / No-Go momenten genoemd. Bij het eerste moment (na fase 1 en tijdens 2) zal een belangrijk aspect de vooruitzichten en kansen zijn van een succesvol onderzoek. Het accent zal meer liggen op het draagvlak van de modellen en vooruitzichten dan op budget en planning.

Bij het tweede moment (na fase 3) zullen de uitkomsten van de schaalproeven en numerieke modellen leiden tot de conclusie of de proef door kan gaan binnen de beschikbare planning en budgetten.

Tabel 11-2 Beslismomenten gedurende het onderzoek

Omschrijving Go/No-Go	Datum mijlpaal (deterministisch)
Go / No-Go moment voor fase 3	10-08-2022
Go / No-Go moment veldproeven	31-01-2023

11.4.2 Probabilistische planning

Het risicodossier is input voor de PPI. Om die reden worden relaties gelegd tussen risico's en activiteiten in de planning. Voor de totstandkoming van probabilistische planning en de PPI-rapportage worden de volgende stappen gezet.

Stap 1 Projectanalyses en deterministische planning

De planning is op basis van ervaringsgegevens en planningssessies opgesteld aan de hand van de HWBP template. In de planning is op overzichtelijke wijze de fase van het project in beeld gebracht, inclusief

alle belangrijke mijlpalen, afhankelijkheden en doorlooptijden. De realisatiefase worden op hoofdlijnen weergegeven in de planning.

Stap 2 Probabilistische planning

Voor het berekenen van de P50 buffer (na beheersing) wordt de probabilistische planning opgesteld in Primavera Risk Analysis.

Stap 3 Beheersing

De opdrachtnemer is verantwoordelijk voor de beheersing van de planning. WDO Delta toetst de planning aan de contracteisen die zijn gesteld en elke ingebrachte wijziging wordt ter acceptatie door de opdrachtnemer ingediend.

Tot en met fase 4 van het project geen ruimte is voor vertraging, er is daarom gekozen om alleen de risico's die vertraging in fase 5 van het project kunnen veroorzaken te koppelen aan de planning. Deze vertraging zal ook worden meegenomen in de SSK-raming. Om gedurende het project vertraging te voorkomen zal er extra worden ingezet op het sturen van de planning door middel van planningsessies een weekstart en/of bilaterale overleggen tussen de planner en de kernteamleden. Daar waar mogelijk zal worden gekeken naar versnellingsopties. Een mogelijkheid is het werken met concept rapportages, hierdoor kan het afronden en starten van een nieuwe stap/fase parallel lopen.

Tabel 11-3 Deterministische en probabilistische data van de mijlpalen na beheersing

Mijlpalen	Deterministisch	P50 na beheersing
Informeel start (na akkoord Dagelijks Bestuur WDO)	16-11-2021	
Subsidiebeschikking HWBP	14-01-2022	
Akkoord Algemeen Bestuur WDO Opbarsten en formele start	25-01-2022	
Deadline veldproeven	30-06-2023	
Eindrapportage gereed	30-07-2024	23-08-2024
Einde project	07-11-2024	13-12-2024

11.5 Financieel

Voor het onderzoeksproject is een SSK-raming opgesteld, waarbij de kosten zijn opgebouwd uit de verschillende project onderdelen. Input voor de SSK-raming is de capaciteitsraming, het risicodossier, de onderzoekskosten en financiële planningsgevolgen. De uitgangspunten die voor de raming zijn gebruikt worden vermeld in het ramingendossier, zie bijlage 3A. De totale raming komt uit op € 7.173.271 incl. BTW.

Tabel 11-4 Samenvatting SSK-raming

Kostensoort	Waarde	percentage
Vorbereidingskosten	€ 218.972	3%
Inzet kernteam	€ 479.851	7%
Onderzoekskosten (onderverdelen in verschillende onderzoeken)	€ 5.666.379	79%
Overige kosten (klankbordgroep)	€ 156.816	2%
Risicoreservering voor- en onvoorzien	€ 651.252	9%
Totale kosten	€ 7.173.271	100%

11.6 Voortgangsbewaking

Om de (financiële) voortgang van het project te bewaken wordt eens per maand een dashboard, met daarin zowel de interne als externe kosten, bijgewerkt. Als uitgangspunt voor het dashboard geldt het verleende krediet. Onder de administratie vallen alle (deel)opdrachten en de urenadministratie van het project. Ook een eventuele aanspraak op de risicoreservering wordt hierin verwerkt. Zo is te allen tijde de financiële voortgang en de uitputting van de subsidie inzichtelijk.

Daarnaast worden periodiek interne en externe voortgangsrapportages opgesteld. In de voortgangsrapportages wordt gerapporteerd over:

- Algemeen beeld;
- Planning;
- Financiën;
- Capaciteit;
- Risico's.

Hieronder is het overzicht opgenomen welke voortgangsrapportages worden ingediend.

Tabel 11-5 Overzicht Voortgangsrapportages

Type	t.b.v. overleg	Bestemd voor	Frequentie	Middel
Intern	Voortgangsoverleg HWBP	Ambtelijk opdrachtgever	1x per 4 maanden	Voortgangsrapportage
Intern	-	Bestuur	1x per half jaar	All Solutions
Extern	-	Programmadirectie	1x per half jaar	VTW-formulier

Naast deze formele momenten vindt er wekelijks IPM-(kernteam en 2^e schil) overleg plaats waarin de voortgang van het project wordt besproken.

12 Referenties

- [1] Van Hoven, Koopmans R., van Zuijlen J. (2016) POVM opbarsten, consequentie-analyse POVM rapport
- [2] Visschedijk, M., van Hoven A., Zwanenburg C. (2020) POVM Opbarsten – Fase 2b. , rapport nr 11204649-002
- [3] Baudain C.M.H., Moes C.J.B., van Baalen M. (1989)The influence of uplift water pressures on the deformation and stability of flood embankments *Proc. 12th Conf. Soil Mech. Found. Eng. Rio de Janeiro*, 3: 1713-1716 Balkema, Rotterdam
- [4] Cooling L.F., Marsland A. (1953) Soil mechanics studies of failures in the sea defence banks of Essex and Kent *Conf. On the North Sea Floods of 31st January – 1st February 1953*: 58-73 London Inst.Civil Eng.
- [5] Marsland A. (1961)A study of a breach in an earthen embankment caused by uplift pressures *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Paris*:2: 663-668, Dunod, Paris
- [6] Van M.A., Koelewijn A.R., Barends F.B.J. (2005) Uplift phenomenon: Model, Validation and Design *International Journal of Geomechanics* 2005.5:98-106
- [7] Zwanenburg C., Den Haan E.J., Kruse G.A.M., Koelewijn A.R. (2017) Failure of a trial embankment on peat in Booneschans, the Netherlands *Géotechnique* 62 no 6,p 479-490 doi: 10.101680/geot.9.P.094
- [8] POVM (2020) POVM Eindige Elementen methode, een publicatie van de POV Macrostablieit, POVM, donwloadbaar via www.hwbp.nl/kennisbank/pov-macrostablieit
- [9] POVM (2020) POVM Langsconstructies, een publicatie van de POV Macrostablieit, POVM, donwloadbaar via www.hwbp.nl/kennisbank/pov-macrostablieit
- [10] notitie: Rode draad overstroming door macrostablieit, versie 5 HWBP, RWS, Deltares 2021
- [11] notitie: Rode draad overstroming door piping, versie 3 HWBP, RWS, Deltares 2021
- [12] notitie: Rode draad overstroming door dijkerosie, versie 6 HWBP, RWS, Deltares 2020
- [13] ENW (2016) Grondslagen voor hoogwaterbescherming, Expertise Netwerk Waterveiligheid, ISBN / EAN 978-90-8902-151-9
- [14] TAW (2001) Technisch Rapport Waterkerende grondconstructies, Technische adviescommissie voor de waterkeringen, publicatienummer P-DWW-2001-035, ISBN 90-369-3776-0
- [15] Min.I.enM. (2016) Schematiseringshandleiding Macrostablieit binnenwaarts, Ministerie van Infrastructuur en Milieu
- [16] TAW (2004) Technisch Rapport waterspanningen bij dijken, Technische adviescommissie voor de waterveiligheid, DWW-2004-057 ISBN 90-369-5565-3
- [17] Faalpadenanalyse macrostablieit binnenwaarts, Deltares 11203719-027, van den Ham, maart 2020
- [18] Dijkerosie door overloop en overslag in waterkeringen, Faalpaden en modelbeschrijving, Deltares 1000545-023-OA-0001, Wichman et al, december 2020
- [19] Waterschapsmarkt van de toekomst – bouwstenen voor vernieuwing, Unie van Waterschappen.
- [20] POVM (2020) POVM Cluster rekentechnieken, oplegnotitie
- [21] POVM (2019) POVM Opbarsten, Cluster rekentechniek, versie 1, juli 2019
- [22] POVM (2020) POVM Opbarsten Fase 2b, Numerieke variatiestudie en raamwerk voor controle, versie 1, sept. 2020