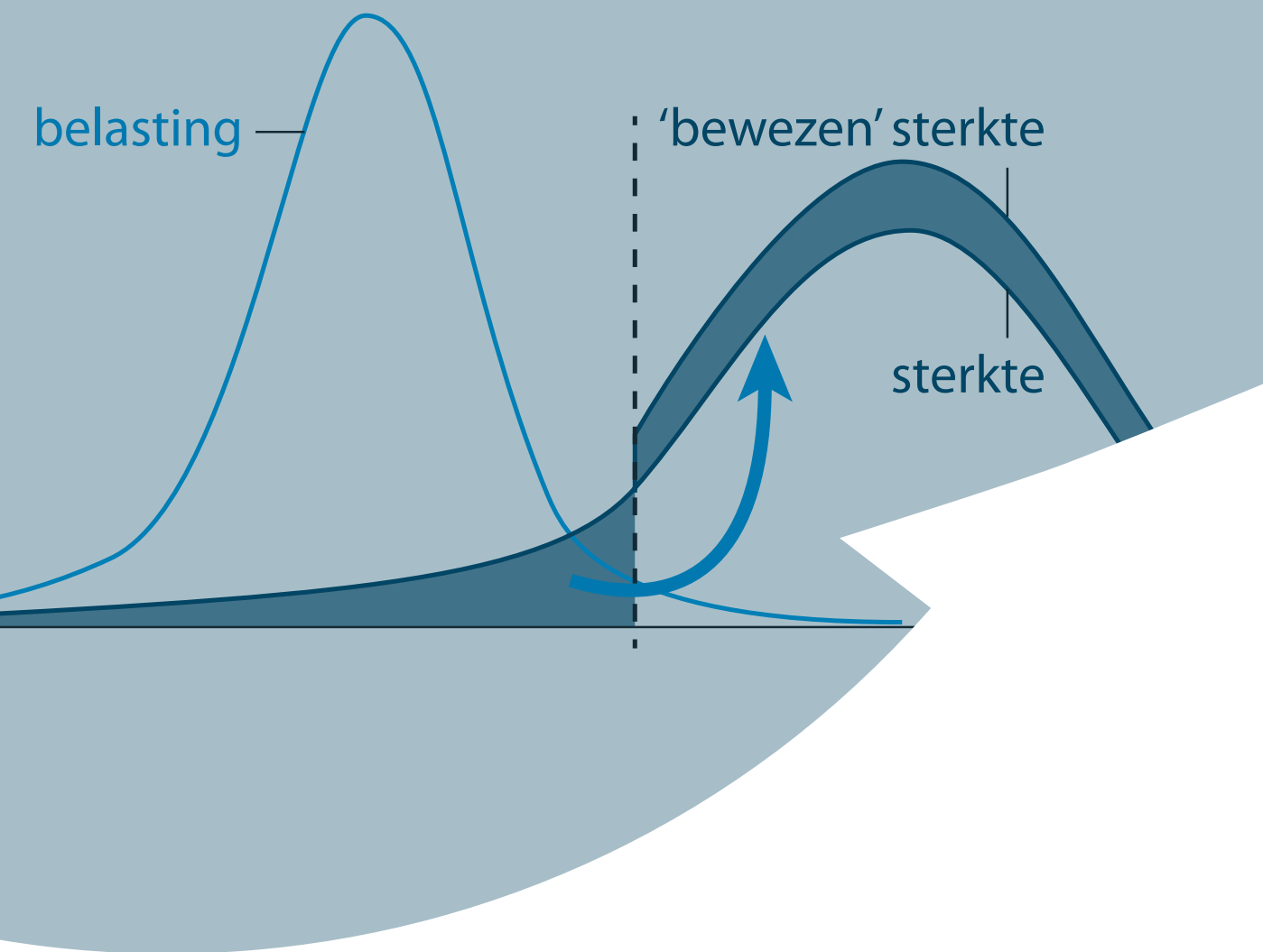


POVM Actuele Sterkte

Een publicatie van de POV Macro stabiliteit



POVM Actuele Sterkte

Een publicatie van de POV Macrostabiliteit

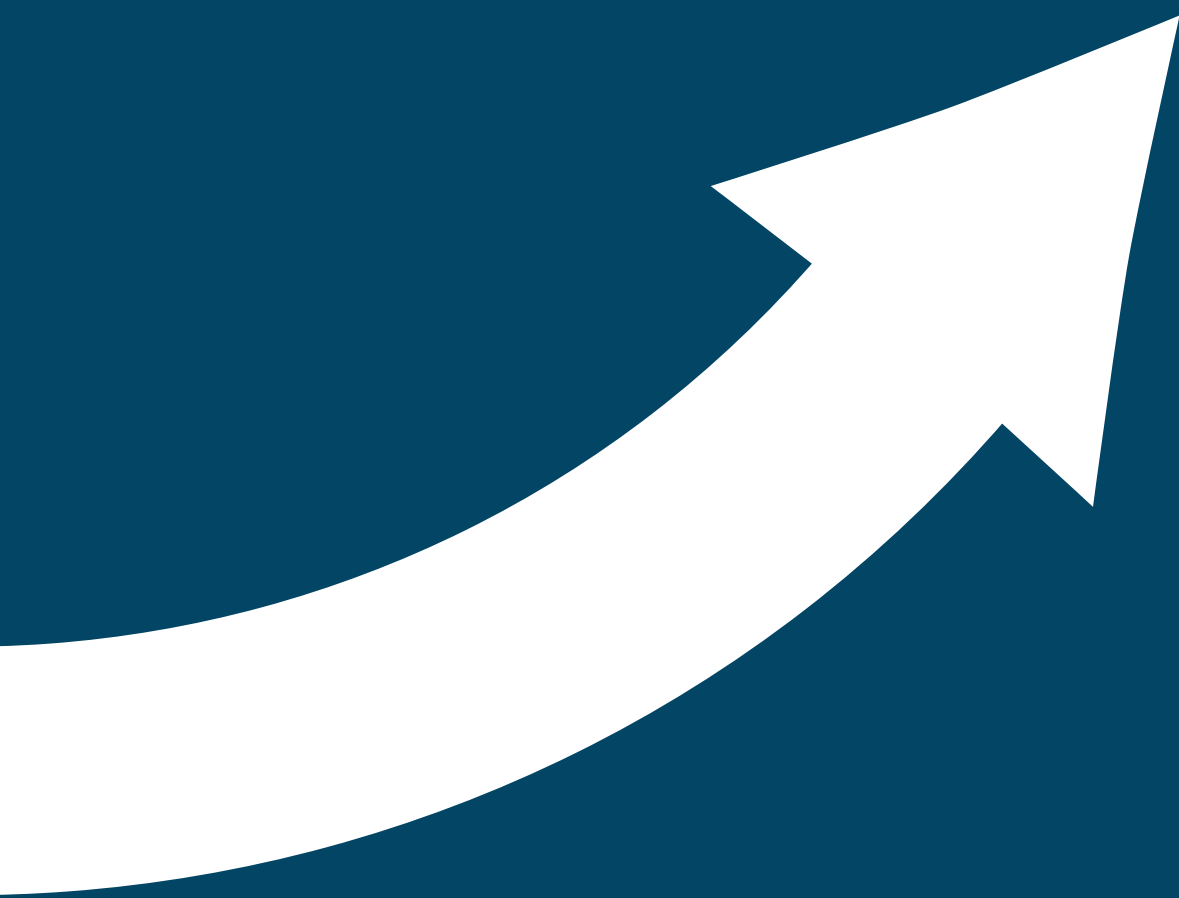
Auteurs

Esther Rosenbrand
Arno Rozing

Datum

juni 2020





Voorwoord

In het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), de alliantie tussen RWS en alle waterschappen, is een Projectoverstijgende Verkenning Macrostabiliteit (POVM) ingesteld (2015-2019). Het HWBP, het bedrijfsleven en de kennisinstututen zoeken hierin samen naar innovaties om het faalmechanisme ‘macrostabiliteit’ effectiever te kunnen aanpakken. Het doel daarbij is om dijkversterking beter, sneller en goedkoper te realiseren. Trekker van dit proces is Waterschap Rivierenland.

Door de POVM zijn een zestal publicaties opgesteld waarin het ontwerp alsmede de beheer- en onderhoudsaspecten van een aantal nieuwe technieken en innovaties zijn beschreven:

- Drainagetechnieken, PPD;
- Grondverbeteringen, PPG;
- Vernagelingstechnieken, PPV;
- Langsconstructies, PPL;
- Eindige-elementenmethode, PPE;
- Actuele sterkte, PPA.

Een van de clusters binnen de POVM is ‘Optimalisaties in rekenmethodieken’. In dit cluster zijn verschillende onderwerpen uitgewerkt; de voorliggende publicatie, de PPA, gaat over Actuele Sterkte. De kennisinnovatie Actuele Sterkte (AS) macrostabiliteit is een methode om het veiligheidsoordeel voor macrostabiliteit aan te scherpen. Dat gebeurt met behulp van gericht grondonderzoek en monitoring en met geavanceerde rekentechnieken, zoals faalkansanalyses en faalkansupdatering (‘bewezen sterkte’ – BS). De methode is in de loop van meerdere projecten doorontwikkeld. Daarbij droegen bij:

| Leden Klankbordgroep | Organisatie |
|----------------------|--|
| Joost Borgers | Waterschap Vallei en Veluwe |
| Jan-Kees Bossenbroek | Waterschap Hollandse Delta |
| Jan Gruppen | Waterschap Drents Overijsselse Delta |
| Eduard Gustin | Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard |
| Peter Hopman | Waterschap Drents Overijsselse Delta |
| Wim Kanning | Deltares |
| Mark van der Krogt | Deltares |
| Bastiaan Los | Waterschap Hollandse Delta |
| Ben Rijnveld | Fugro |
| Arno Rozing | Deltares |
| Dirk van Schie | POV Macrostabiliteit |
| Timo Schweckendiek | Deltares |
| Coen Steetzel | Witteveen+Bos |
| Jasper Tamboer | Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard |
| Ana Teixeira | Deltares |
| Meindert Van | Deltares |
| Marcel Visschedijk | Deltares |

De projectleiding en het schrijfproces waren in handen van Arno Rozing.

Doel van deze publicatie is om met name projectmanagers, technisch managers, en adviseurs/ontwerpers een overzichtelijk, overkoepelend en centraal overzicht te geven van de AS-aanpak voor macrostablieit van waterkeringen.

De inhoud van deze rapportage is gebaseerd op de thans beschikbare kennis en ervaring. De POVVM spreekt zijn dank uit aan allen die een bijdrage hebben geleverd. Met veel inzet en enthousiasme, en in samenwerking met diverse partijen, hebben zij gewerkt aan de realisatie van deze rapportage.

Tiel, juni 2020

ir. B.M. (Bas) Effing
Programmameider POV Macrostablieit

dr. ir. M.A. (Meindert) Van
Technisch Manager POV Macrostablieit

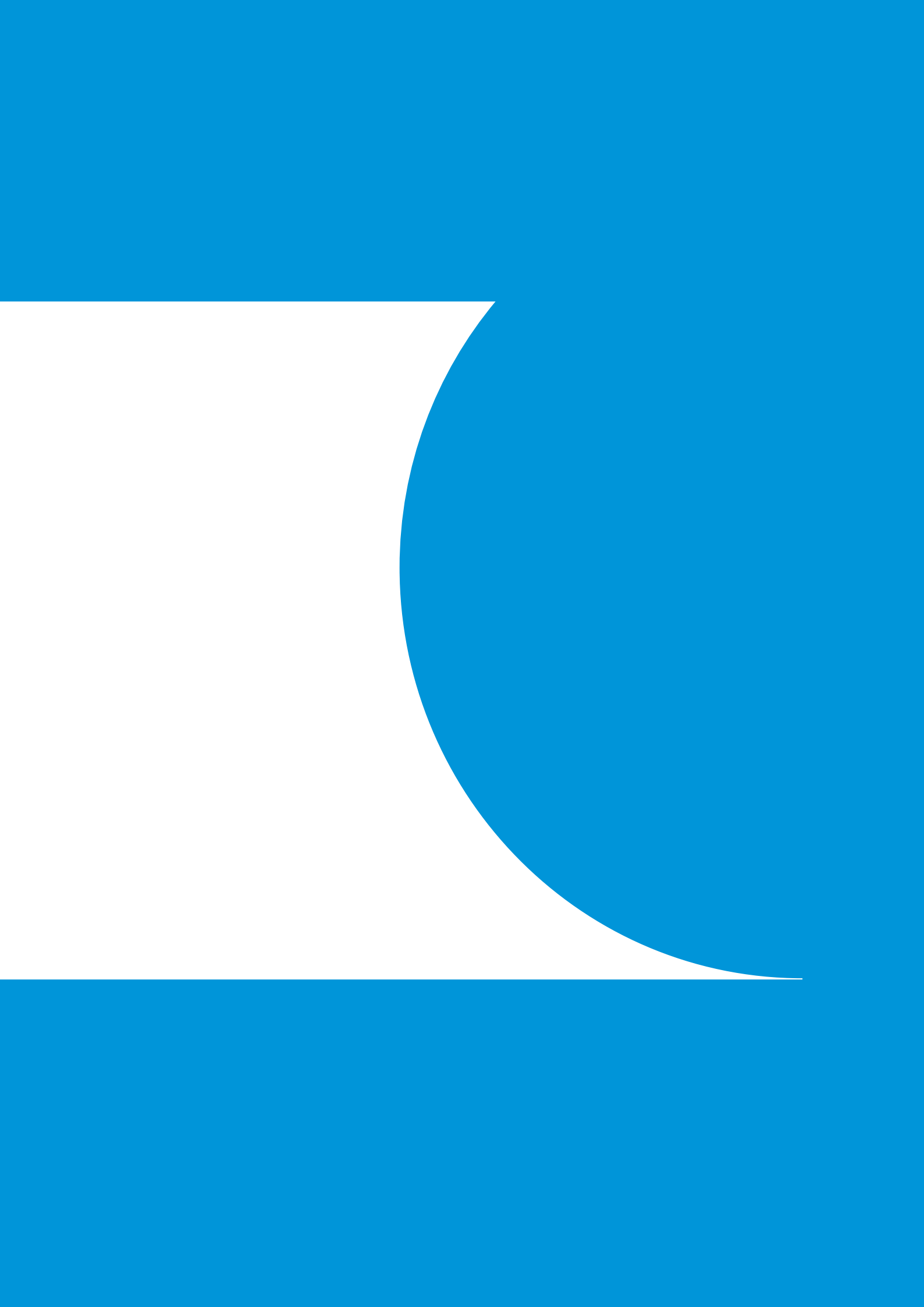
D. (Dirk) van Schie
Projectsecretaris POV Macrostablieit



Inhoud

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| Voorwoord | | 3 |
| 1 | Inleiding | 9 |
| 1.1 | Aanleiding en doel Actuele Sterkte | 9 |
| 1.2 | Reikwijdte publicatie | 9 |
| 1.3 | Doelgroep en doelstelling | 9 |
| 1.4 | Positie ten opzichte van het WBI2017 en OI2014 | 9 |
| 1.5 | Leeswijzer | 11 |
| 2 | De Actuele Sterkte-aanpak | 13 |
| 2.1 | Wat is Actuele Sterkte? | 13 |
| 2.2 | Waarom AS? | 13 |
| 2.3 | Stappenplan Actuele Sterkte | 13 |
| 2.4 | Aandachtspunten en voorwaarden toepassing AS voor macrostabiliteit | 16 |
| 2.4.1 | Toepassing primaire keringen – STBI | 16 |
| 2.4.2 | Toepassing primaire keringen – STBU | 17 |
| 2.4.3 | Toepassing regionale keringen – STBI & STBU | 17 |
| 2.4.4 | Ontwerp primaire waterkering | 17 |
| 2.5 | Proefbelastingen | 18 |
| 3 | Toepassingsvoorbeelden en opbrengsten | 21 |
| 3.1 | Overzicht toepassing AS | 21 |
| 3.2 | Overzicht resultaten en aanbevelingen | 22 |
| 3.3 | Businesscase Actuele Sterkte POVM | 24 |
| 3.4 | Voorbeeld toepassing AS: KIJK (Krachtige IJsseldijk Krimpenerwaard) | 24 |
| 4 | Ervaringen uit referentieprojecten | 31 |
| 5 | Conclusies en aanbevelingen | 37 |
| Referenties | | 41 |
| Bijlagen | | |
| A | Begrippenlijst | 43 |
| B | ENW-advies | 45 |





1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel Actuele Sterkte

In 2016 is de Project Overstijgende Verkenning Macrostabieleit (POVM) gestart met het project 'Beter benutten actuele sterkte macrostabieleit'. De aanleiding van het Actuele Sterkte (AS)-onderzoek was dat de indruk bestond dat de sterkte met betrekking tot macrostabieleit te laag werd ingeschat. Doel van de AS-werkwijze is het veiligheidsoordeel voor macrostabieleit aan te scherpen. Dit gebeurt met behulp van zowel gericht grondonderzoek en monitoring als geavanceerde rekentechnieken, zoals faalkansanalyses en faalkansupdating ('bewezen sterkte' – BS).

AS is een kennisinnovatie die direct toepasbaar is in de HWBP-projecten. In de projecten waar het al is toegepast leverde het een significante bijdrage aan de doelstellingen van het HWBP: goedkoper, sneller en beter. Het project Beter benutten actuele sterkte macrostabieleit heeft tot doel om deze werkwijze praktisch toepasbaar te maken. De voorliggende publicatie, de PPA, draagt hieraan bij door een beknopt overzicht te geven van de methode AS, geïllustreerd met een voorbeeld.

1.2 Reikwijdte publicatie

Deze publicatie geeft een samenvatting van de AS-aanpak voor macrostabieleit en de rekentechnieken waarmee de macrostabieleit kan worden geoptimaliseerd. Voor het uitvoeren van de analyses wordt verwezen naar beschikbare handreikingen. Een toepassingsvoorbeeld wordt in deze publicatie beschreven in § 3.4. Voor verdere toepassingsvoorbeelden, bijvoorbeeld HWBP-projecten, wordt verwezen naar beschikbare rapporten.

Voorafgaand aan de voorliggende publicatie is een achtergrondrapport opgesteld (Rozing & Visschedijk, 2020). Dit is beschikbaar op de website van de POVM¹. Het rapport geeft een gedetailleerdere beschrijving van de AS-methode, en aanvullende voorbeelden.

1.3 Doelgroep en doelstelling

De doelgroepen van deze publicatie zijn:

- technisch managers (primaire doelgroep)
- projectmanagers
- adviseurs en ontwerpers

Deze PPA beoogt de implementatie van de AS-methode te bevorderen. Hiertoe biedt de publicatie inzicht in wat AS voor projecten kan betekenen, door:

- de stapsgewijze aanpak AS inhoudelijk samen te vatten;
- inzicht te geven in de effecten op projecten (winstpotentie versus projectinpassing), voor zowel de beoordelingsfase als de versterkingsfase;
- de aanpak en effecten te illustreren door middel van een praktijkvoorbeeld;
- aanbevelingen te geven voor verdere toekomstige ontwikkeling en implementatie van de methode.

1.4 Positie ten opzichte van het WBI2017 en OI2014

De publicaties van de POVM zijn primair geschreven voor het ontwerpen van primaire waterkeringen. Voor het ontwerpen van een versterkingsmaatregel stelt het waterschap de randvoorwaarden vast. Hierbij geldt dat een primaire waterkering moet voldoen aan de Waterwet. Voor het beoordelen van primaire

¹ Website: www.povmacrostabieleit.nl.

waterkeringen is het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) beschikbaar, voor het ontwerp het Ontwerpinstrumentarium (OI2014).

ENW heeft positief geadviseerd over de AS-methode en aangegeven dat de methode generiek toepasbaar is, en geheel in lijn met zowel het OI2014 als ook het WBI2017 (zie voor het ENW-advies Bijlage B).

Ontwerpen

De leidraden van het WBI2017 bevatten de benodigde informatie om een dijk te beoordelen. Maar voor ontwerpen – in het algemeen, maar zeker voor constructies in dijken – is veel meer nodig.

Sinds 1971 hebben de Technische Adviescommissie Waterkeringen (TAW) en haar opvolger, het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) leidraden en technische rapporten opgesteld voor het ontwerpen van primaire waterkeringen.

Een basis voor het ontwerpen van dijken staat beschreven in de Leidraad Rivieren (TAW, 1989) met aanvullende technische rapporten zoals het TR Waterspanningen bij Dijken (TAW, 2004) en TR Waterkerende Grondconstructies (TRWG) (TAW, 2001). Ook de rapporten over faalmechanismen zijn bruikbaar voor het ontwerpen.

Voor het ontwerpen en ontwerppuntgangspunten van een groene dijk wordt aanvullend verwezen naar het Ontwerpinstrumentarium (OI) OI2014 (Rijkswaterstaat 2017a) en updates daarvan. Het OI is nog in ontwikkeling en dus nog niet volledig. In het project OI2018 krijgt dit Ontwerpinstrumentarium een nadere invulling. Het komt t.z.t. beschikbaar via de Helpdesk Water (www.helpdeskwater.nl). Het OI is een handreiking met aanbevelingen voor het ontwerpen van een kering conform de overstromingskansbenadering.

Binnen de POVM is specifiek gewerkt aan stabiliteitverhogende constructies in een dijk. Hiervoor is voor vier categorieën een ontwerprichtlijn opgesteld. De onderwerpen van deze publicaties zijn: vernagelingstechnieken, drainagesystemen, langsconstructies en grondverbeteringen. Ze zijn opgesteld binnen de POVM en voorgelegd aan ENW. De richtlijnen zijn in de vorm van POVM-publicaties beschikbaar via de website van de POVM², actief tot en met 2020. Voordat deze website opgeheven wordt, zal het eigenschap naar verwachting in het kader van het HWBP worden geregeld.

Naast de vier richtlijnen zijn binnen de POVM rapporten opgesteld over deelaspecten: Eindige Elementen Methode, Veiligheid tijdens de uitvoering, Life Cycle Monitoring, Actuele sterkte (Handreiking Faalkans Analyse en Faalkans Updating), parameterbepaling, etc. Ook deze rapporten zijn beschikbaar via de website van de POVM.

Probabilistische analyses

Als de voor semi-probabilistische analyses beschikbare informatie voldoende is, voldoet deze informatie ook voor probabilistische analyses. Aanvullende informatie is doorgaans niet vereist. Echter, met de probabilistische methode is aantoonbaar een scherpere beoordeling mogelijk. Dit komt vooral doordat in de semi-probabilistische analyse in de meeste gevallen een (te) conservatief verband tussen de toelaatbare veiligheidsfactor en de toelaatbare faalkans wordt gebruikt (zie ook § 2.3).

De methode AS is beschreven in de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating (Kanning & Schweckendiek, 2017). Deze is te downloaden via de POVM-website en de Helpdesk Water.

² Website: www.povmacrostabiliteit.nl.

ENW heeft positief geadviseerd over de methode en aangegeven dat de methode generiek toepasbaar is (zie Bijlage B). Een faalkansberekening ofwel probabilistische berekening is geheel in lijn met het OI2014-v4 en het WBI2017, waarbij wordt opgemerkt dat de faalkansberekening voor macrostabiliteit op termijn ook in het WBI2017 wordt opgenomen.

1.5 Leeswijzer

Voor de technisch managers van HWBP-projecten zijn met name § 2.1, § 2.4, § 3.6, hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5 van belang. Deze geven inzicht in wat AS voor hen / hun project kan betekenen.

In hoofdstuk 2 wordt op hoofdlijnen uitgelegd wat AS (en als onderdeel daarvan, bewezen sterkte (BS)) voor macrostabiliteit is. De methode AS wordt toegelicht aan de hand van het daarvoor ontwikkelde stappenplan. Ook wordt aangegeven wanneer en waar AS kan worden toegepast.

Hoofdstuk 3 bevat een overzicht van projecten waarbij AS is toegepast. Een voorbeeld is uitgelicht: een beschrijving van het project, een toelichting op de aanleiding en een overstijgende samenvatting van de resultaten, conclusies en aanbevelingen. Tot slot komt ook de businesscase voor AS beknopt aan de orde.

In hoofdstuk 4 wordt beschreven welke effecten de toepassing van AS heeft op (dijkversterkings)projecten, vooral voor het waterschap en betrokken ingenieurs- en adviesbureaus. Hiervoor zijn interviews gehouden met technisch managers, projectmanagers en medewerkers van ingenieurs- en adviesbureaus die zijn betrokken bij de toepassing van actuele sterkte binnen hun (dijkversterkings)project.

In hoofdstuk 5 staan de conclusies en aanbevelingen. Hierbij ligt de focus vooral op wat AS voor de diverse projecten heeft opgeleverd en welke uitdagingen er in de nabije toekomst liggen om het toepassen van Actuele Sterkte nog succesvoller te maken.

Voor de gebruikte begrippen en afkortingen wordt verwezen naar Bijlage A.



2 De Actuele Sterkte-aanpak

2.1 Wat is Actuele Sterkte?

Actuele sterkte (AS) is het gedetailleerd modelleren van de sterkte met het doel de werkelijke (actuele) sterkte voor het faalmechanisme macrostabiliteit zo dicht mogelijk te benaderen. Voor het toepassen van AS is een stappenplan opgesteld, dat wordt toegelicht in § 2.3.

2.2 Waarom AS?

Indien een dijk in de Beoordeling (conform WBI) wordt afgekeurd, komt deze op de versterkingslijst van het HWBP. In sommige gevallen is optimalisatie van het resultaat van de Beoordeling voor macrostabiliteit kansrijk.

Dit kan vele oorzaken hebben. Zo kan de ondergrond in werkelijkheid anders (gunstiger) zijn dan in de schematisering. Daarnaast zijn de parameters (vooral de sterkteparameters) veelal bepaald met een beperkt aantal proeven. Ook zijn de waterspanningen in en onder de dijk bij waterstanden hoger dan waarbij ooit is gemeten, moeilijk vast te stellen. En rekentechnieken zijn niet altijd optimaal.

Hoewel een dijk zodanig moet worden ontworpen dat de ontwerpbelasting met voldoende zekerheid kan worden opgenomen, leidt dit soort observaties toch tot de vraag of er bij het ontwerp niet noodgedwongen te veel onzekerheden worden meegenomen. Ook is de vraag of er niet gebruik kan worden gemaakt van het feit dat de dijk bij deze hoge belastingen niet is bezweken. De AS-aanpak start daarom met kijken of meer en betere gegevens en een schematisering gericht op gemiddelde waarden en onzekerheden, leiden tot een beter resultaat.

In 2017 is in het beoordelingsinstrumentarium overgestapt van de overschrijdingskansbenadering op een overstromingskansbenadering, met andere normen. Deze benadering sluit goed aan op het toepassen van faalkansanalyses. Dit is vaak kansrijk omdat ook in de semi-probabilistische benadering sprake is van 'verborgen veiligheid'.

Optimalisatie van het beoordelingsresultaat is vooral kansrijk als in het verleden belastingen (onder andere hoge buitenwaterstanden) zijn weerstaan die hoger dan of vergelijkbaar zijn met de ontwerpbelastingen (ontwerp waterstanden) waarop de dijk dient te zijn onderworpen. In de AS-aanpak wordt dan ook gebruikgemaakt van deze 'bewezen sterkte' (BS).

2.3 Stappenplan Actuele Sterkte

Figuur 2.1 geeft het stappenplan voor de AS-aanpak weer. Het proces verloopt van grof naar fijn.

Het stappenplan begint met het inschatten van de kansrijkheid van AS (stap 0). Dit gebeurt door beschikbaar grondonderzoek te analyseren en op basis van reeds uitgevoerde (semi-probabilistische) macrostabiliteit-analyses. Als de kansrijkheid positief wordt ingeschat, kan worden vervolgd met het aanscherpen van de gewone semi-probabilistische analyses (op basis van rekenwaarden en veiligheidsfactoren) door te schematiseren op maat en eventuele aanscherping op basis van aanvullend terreinonderzoek en/of monitoring van gegevens (stap 1). Vervolgens wordt de stap gemaakt naar probabilistische faalkansanalyses, waarbij rekenwaarden van parameters worden vervangen door kansverdelingen (stap 2). Indien nodig, wordt ten slotte de berekende faalkans bijgesteld door middel van het in rekening brengen van overleefde belastingcondities ('bewezen sterkte', stap 3). In de volgende subparagrafen worden de stappen in meer detail toegelicht.



Figuur 2.1 Stappen in faalkansanalyse en updating (Kanning & Schweckendiek, 2017)

AS: stap 0

In stap 0 (inschatting kansrijkheid actuele sterkte) wordt het beschikbare grondonderzoek – bestaande uit terrein- en laboratoriumonderzoek en monitoringsgegevens van waterspanningen – geanalyseerd om vast te stellen of hierin optimalisatie kan worden bereikt door aanvullend onderzoek. Experts van het waterschap en eventueel betrokken ingenieursbureaus met kennis en (gebieds)ervaring van eerder uitgevoerd onderzoek, en experts met kennis en ervaring van de actuele sterktemethode, kunnen in zogeheten expertsessies deze inschatting gezamenlijk maken op basis van hun expert judgement. In het achtergrondrapport (POVM, 2020) zijn praktijkvoorbeelden gerapporteerd waarbij gebruik is gemaakt van zulke expertsessies.

AS: stap 1

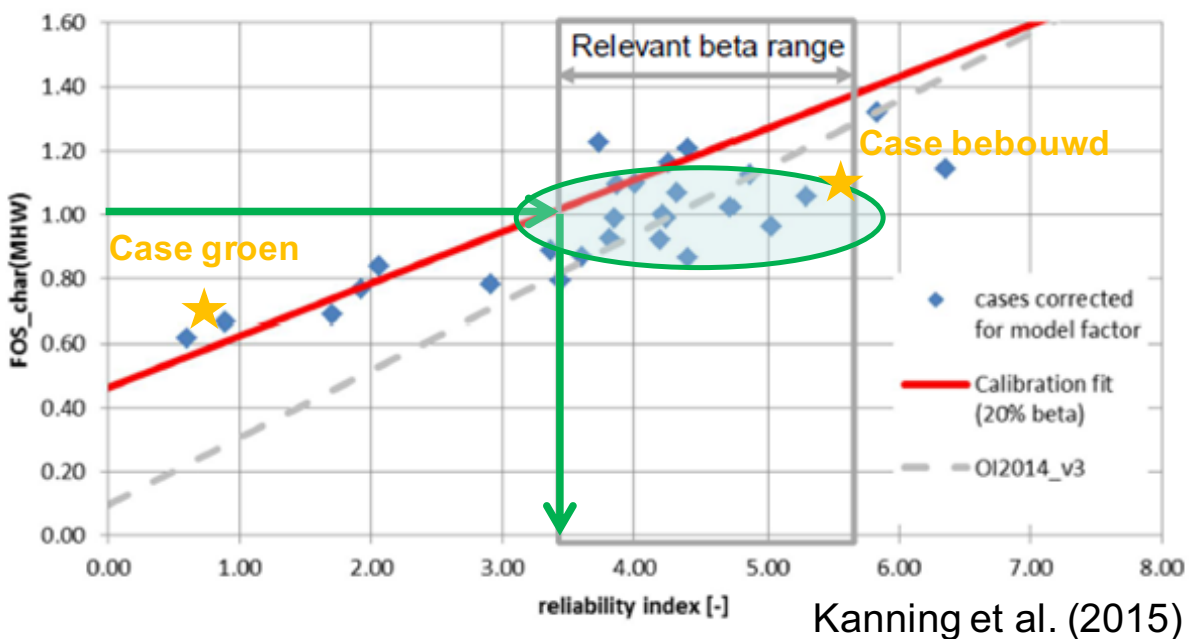
In stap 1 (detaillering schematisering en semi-probabilistische analyses) worden conservatieve aannames waar mogelijk onderbouwd losgelaten, of vervangen door scherpere uitgangspunten. Bijvoorbeeld op basis van aanvullend laboratorium- of terreinonderzoek, monitoring of gedetailleerdere modellering van de fysica.

AS: stap 2

In stap 2 (faalkansanalyse) vinden probabilistische faalkansanalyses plaats. Deze analyses zijn gebaseerd op de concepten beschreven in de Handreiking Faalkansanalyse Macro stabiliteit (Schweckendiek et al., 2017).

In dergelijke analyses worden karakteristieke- en rekenwaarden vervangen door kansverdelingen van bijvoorbeeld grondparameters. Vaak wordt in deze stap al een aanzienlijk gunstigere beoordeling. Dat ligt ook in de lijn der verwachting. De vereiste partiële stabiliteitsfactoren zijn immers conservatief bepaald, om de onzekerheden die samenhangen met de semi-probabilistische methode, af te dekken. Bij de afleiding van de kalibratielijns voor het WBI2017 is deze zodanig gekozen dat ongeveer 80% van de ten behoeve van de kalibratie gebruikte cases onder de lijn vallen. Dat betekent dat de inschatting van de faalkans met de semi-probabilistische methode voor die cases hoger is dan met de probabilistische methode. Figuur 2.2 toont de kalibratielijns tussen veiligheidsfactor en betrouwbaarheid, en de positie van verschillende cases daarop. Zie het Achtergrondrapport voor details.

Zoals te zien is, wordt de berekende faalkans niet in alle gevallen lager door het toepassen van een probabilistische analyse. Maar in ca. 80% van de gevallen wel. In alle gevallen wordt de faalkans echter wel realistischer en nauwkeuriger bepaald. Dit voorkomt, zoveel als mogelijk is, onterecht afkeuren of onterecht versterken.



Figuur 2.2 Kalibratie-fit voor semi-probabilistische eis macro stabiliteit WBI2017 en OI v4 ($\gamma = 0.15 \beta + 0.41$), en resultaten van cases beschouwd in samenwerking met Deltares voor POVM-projecten tussen 2016 en 2020 (zie Achtergrondrapport, (POVM, 2020) voor meer informatie over cases)

De probabilistische AS-analyses kunnen worden uitgevoerd op basis van de gegevens die ook voor semi-probabilistische analyses benodigd zijn. Verdere aanvullende informatie is in principe niet vereist.

AS: stap 3

In stap 3 (faalkansupdate ofwel BS) komt de aanscherping van het veiligheidsbeeld door rekening te houden met in het verleden overleefde belastingcondities. Deze kunnen uitwijzen dat bepaalde combi-

naties van parameters niet voor kunnen komen, omdat de dijk dan bezweken zou zijn bij belastingen die immers wel succesvol gekeerd zijn. De overleefde belasting kan worden gezien als een proefbelasting die de dijk heeft doorstaan.

Stap 3, BS, betreft evenals stap 2 een probabilistische analyse waarin onzekerheid in sterkte en belasting (buitenwaterstand) expliciet wordt gemodelleerd door middel van kansverdelingen. Door rekening te houden met de overleefde belasting kunnen de kansverdelingen van (vooral sterkte-) parameters worden bijgesteld, hetgeen leidt tot een lagere faalkans.

Het bijstellen van de kansverdelingen op basis van overleefde belasting is mogelijk voor parameters waarvan de kansverdeling het gevolg is van kennisonzekerheid. Dat wil zeggen dat wel een echte waarde van de parameter bestaat, maar dat we die waarde niet precies kennen, zoals wel het geval is voor sterkteparameters. De kansverdeling reflecteert met name onze kennisonzekerheid, en kan verminderd worden door het toevoegen van extra informatie zoals een overleefde belasting. Voor parameters met een intrinsieke variabiliteit in de tijd, zoals de buitenwaterstand, zegt de meting van een maximale waterstand in een bepaald jaar in principe weinig over de maximale waterstand in het volgende jaar; een overleefde belasting zegt dus weinig over toekomstige waarden van de belasting. Stap 3 is dus vooral gericht op het reduceren van de onzekerheid in de sterkte. Voor meer informatie betreffende deze stap wordt verwezen naar Kanning & Schweckendiek (2017).

Opgemerkt wordt dat de overleefde belastingcondities, naast een historisch overleefde belastingsituatie, ook kunnen bestaan uit een opgelegde proefbelasting.

2.4 Aandachtspunten en voorwaarden toepassing AS voor macrostabieleit

Enkele aandachtspunten en voorwaarden voor de toepassing van AS voor verschillende doelen:

- beoordelen en vaststellen scope van primaire keringen (STBI)
- beoordelen en vaststellen scope van primaire keringen (STBU)
- beoordelen en vaststellen scope van regionale keringen (STBI en STBU)
- ontwerpen primaire keringen (STBI)

2.4.1 Toepassing primaire keringen – STBI

Faalkansanalyse en faalkansupdating zijn primair ontwikkeld voor het beoordelen van macrostabieleit binnenwaarts van primaire waterkeringen (STBI). Enkele voorwaarden en aandachtspunten hiervoor:

- Voor de faalkansanalyse (stap 2) geldt dat zowel de sterkte- en belastingparameters als de stochastische variabelen gemodelleerd dienen te worden (d.w.z. met kansverdelingen).
- Als de faalkans wordt bepaald door middel van 'fragility curves', dienen de waterspanningen per beschouwde buitenwaterstand te worden bepaald³.
- De berekende faalkans dient lager te zijn dan de faalkanseis voor macrostabieleit binnenwaarts. Er kan in de faalkanseis worden geoptimaliseerd door faalkansruimte uit te wisselen tussen verschillende mechanismen. Zo kan een minder strenge eis voor macrostabieleit worden gebruikt ten koste van een strengere eis voor bijvoorbeeld piping of hoogte. Bij het uitwisselen van faalkansbudget dient wel zorgvuldig om te worden gegaan met het lengte-effect. Dit kan bijvoorbeeld worden ondervangen door het faalkansbudget voor het gehele dijktraject aan te passen.

3 Voor een fragility curve wordt de faalkans conditioneel op een bepaalde belasting (bijvoorbeeld waterstand) voor enkele waarden van de belasting bepaald; de fragility curve wordt gecombineerd met de kansverdeling van de waterstand om de faalkans te bepalen, zie Kanning & Schweckendiek (2017) voor details.

- Voor faalkansupdating (stap 3) moet een extra analyse (ten opzichte van stap 2) worden uitgevoerd. De geobserveerde (overleefde) situatie moet probabilistisch worden gemodelleerd (de toets situatie was in stap 2 al gemodelleerd). Vervolgens wordt de faalkans bijgesteld op basis van de gemodelleerde observatie- en toets situatie. De faalkansupdatingmethode 'fragility curves', zoals deze binnen AS wordt gehanteerd, is op dit moment alleen geschikt voor de beoordeling van een bestaande situatie of bij beperkte aanpassingen van de dijk, omdat de overleefde belasting anders weinig meer zegt over de sterkte bij de huidige situatie. Voor ontwerpen is deze methode daarom nog niet toepasbaar, zie ook aandachtspunten bij ontwerpen in dit hoofdstuk.

2.4.2 Toepassing primaire keringen – STBU

De AS-methode kan ook worden toegepast voor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU). Enkele voorwaarden en aandachtspunten hiervoor:

- STBU wordt beschouwd als een indirect faalmechanisme. Verondersteld wordt dus dat bij optreden van STBU niet direct overstrooming kan/zal plaatsvinden.
- Op basis hiervan wordt in het WBI2017 standaard aangenomen dat de toelaatbare kans op instabiliteit van het buitentalud een factor 10 groter is dan bij STBI. In veel gevallen in het rivierengebied blijkt dit een conservatieve aanname, die mogelijk kan worden geoptimaliseerd. Hierbij kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van de door het Kennisplatform Risicobenadering (KPR) opgestelde Factsheet (KPR 2018) en discussiestuk (KPR 2019).
- Vanwege bovengenoemde onzekerheden bij het rekenen aan STBU is Deltares eind 2019 in opdracht van de POVM gestart met een onderzoek naar rekenmethoden voor het toepassen van AS bij STBU (waaronder AS-faalkansanalyses). De resultaten worden vastgelegd in een rapport. Doel van dit rapport is om handvatten te geven voor een kwantitatieve uitwerking van macrostabiliteit buitenwaarts met de AS-methodiek (stappen 1 en 2). In het rapport worden drie voorbeelden van cases in verschillende watersystemen beschouwd. Beoogde vervolgstap is het beschouwen van verschillende cases in dijkversterkingsprojecten of WBI-beoordelingen 'toets op maat'. Het rapport komt in mei 2020 beschikbaar (van der Meer, 2020). De intentie is om op basis van de resultaten van de beschouwde cases een generalisatie te maken. Verwachting is dat door nader onderzoek zoals beschreven in het bovengenoemde rapport, veel optimalisatie is te bereiken, waardoor STBU realistischer kan worden beschouwd.

2.4.3 Toepassing regionale keringen – STBI & STBU

De AS-methode kan ook worden toegepast bij regionale keringen. Enkele voorwaarden en aandachtspunten hiervoor:

- Aangezien regionale keringen permanent door water belast worden was de verwachting dat BS (stap 3) tot een grote aanscherping van het toetsoordeel kan leiden. Uit enkele praktijktoepassingen blijkt dat dit niet altijd het geval is. Dit is onderzocht voor cases binnen het beheersgebied van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) en Waterschap Rivierenland (WSRL). Conclusie is vooral dat de faalkansinschatting voor macrostabiliteit (bij regionale keringen) wordt gedomineerd door de aanwezigheid van verkeersbelasting in de toets situatie en/of de onzekerheid in waterspanningen ten gevolge van het gebrek aan monitoring. Overigens is de gedachte dat toepassing van proefbelastingen (verkeer en/of infiltratie) en gerichte monitoring hiervoor een oplossing kan bieden, zoals behandeld onder paragraaf 2.5.
- Faalkansanalyses op zich (stap 2) zullen wel naar verwachting een minder conservatief resultaat opleveren. Hiervoor dient het veiligheidsformat (faalkanseis normering) nader te worden beschouwd.

2.4.4 Ontwerp primaire waterkering

Als de, met de AS-aanpak bepaalde, faalkans groter is dan de benodigde faalkans, kan met faalkansanalyses tevens een ontwerp van de dijkversterking (in grond) worden gemaakt.

Zoals eerder aangegeven kan faalkansupdating (BS) nog niet worden toegepast ter bepaling van een dijkversterkingsontwerp. Wel kunnen inzichten door het uitvoeren van faalkansanalyses of faalkansup-dating-analyses helpen bij het ontwerpen van maatregelen. Zo kan het bijvoorbeeld het geval zijn dat door faalkansupdating de kans op diepe glijvlakken aanvaardbaar klein is. Als de kans op ondiepe glijvlakken nog niet acceptabel is, kan een versterkingsmaatregel zich richten op het uitsluiten van ondiepe glijvlakken. Dit is mogelijk een minder ingrijpende maatregel dan het uitsluiten van diepe glijvlakken.

Inmiddels is probabilistisch ontwerpen al in enkele HWBP-projecten toegepast, zij het (nog) in verken-nende context (zie hoofdstuk 4). Ten behoeve van een workshop over probabilistisch rekenen en ontwer-pen bij WSRL zijn voor- en nadelen daarvan in kaart gebracht en beschreven in een memo in Bijlage E van het Achtergrondrapport (POVM, 2020).

Uit het memo volgt dat altijd probabilistisch getoetst en ontworpen zou moeten worden, omdat dat een realistischer beeld geeft van de werkelijkheid, gemiddeld minder conservatief is en niet moeilijker dan semi-probabilistisch zou zijn. Dit is de overheersende mening. Daarnaast bestaat het beeld dat het vaak veel moeite kost om goede semi-probabilistische analyses uit te voeren (met alle recente aanpassingen in het WBI en OI). En daarbovenop leeft nog de vraag of, zolang er nog geen volledig begrip van de fysica is, de stap naar probabilistisch ontwerpen al moet en kan worden gezet. Zou er niet eerst een 'tool' moeten komen waarbij iedereen eenduidig probabilistisch een beoordeling kan uitvoeren en pas daarna de stap naar ontwerpen? Hoewel dit een valide argument is, spreekt hier ook uit dat de stap richting meer en verdergaande integratie van probabilistische rekentechnieken feitelijk wordt onderschreven. Het gaat er dus om in welk tempo dit moet gebeuren en welke hindernissen op de weg ernaartoe moeten worden overwonnen.

De visie is dat probabilistisch ontwerpen de toekomst heeft. De WBI-beoordeling wordt op termijn proba-bilistisch (standaard) en probabilistisch ontwerpen sluit daar goed op aan. Met probabilistisch ontwerpen wordt het ontwerp beter. Bovendien is de verwachting dat in ca 80% van de gevallen het ontwerp minder conservatief wordt, met minder of een kleinere versterkingsopgave. Uiteraard zal probabilistisch ontwer-pen in het begin onwennig zijn en meer tijd kosten, maar aangenomen wordt dat het op den duur net zo snel gaat als semi-probabilistisch ontwerpen.

De vrees bestaat dat door probabilistisch ontwerpen de dijkversterking minder robuust wordt. Die ro-buustheid zou dan vooral zitten in verborgen veiligheid in de huidige ontwerpmethodede met gebruik van de kalibratielijn. Echter, in ca 20% van de gevallen dat niet een minder conservatief ontwerp kan worden gemaakt, wordt met een probabilistisch ontwerp wel aan de norm voldaan. Dus kan worden gesteld dat lokaal dan wel iets wordt ingeleverd aan veiligheid (minder conservatief), maar dat dit niet doen in feite een te hoge investering is. Op andere locaties is een zwaarder ontwerp nodig bij probabilistisch ontwer-pen. Uiteindelijk wordt de dijk dus op de juiste locaties versterkt: wel waar het nodig is, en niet waar het niet nodig is. Dit is een (kosten)efficiënte werkwijze.

Voor de voor- en nadelen van probabilistisch rekenen en overige aandachtspunten wordt verwezen naar het memo in Bijlage E van het Achtergrondrapport (Rozing en Visschedijk, 2020).

2.5 Proefbelastingen

In § 2.2 staat dat de berekende faalkans van de toetsituatie nauwkeuriger kan worden bepaald op grond van een zonder grote problemen overleefde eerdere belastingsituatie. Zo'n situatie uit het verleden is er niet altijd. In dat geval kan ook een proefbelasting worden ontworpen en toegepast waarmee de faalkans

kan worden bijgesteld. Als de dijk deze proefbelasting zonder problemen overleeft kan de geüpdatete faalkans worden goedgekeurd.

Door faalkansanalyses uit te voeren voor de toetsituatie ontstaat inzicht in de dominante onzekerheden en in waar eventueel ruimte zit voor optimalisatie. Zo kan ook inzicht worden verkregen in dominante belastingen of belastingeffecten, bijvoorbeeld het effect van infiltratie bij overslag of de invloed van verkeersbelasting. Door middel van een proefbelasting kan enerzijds de onzekerheid van deze belasting(effecten) worden verkleind; anderzijds kan een proefbelasting zodanig worden ontworpen, dat na het toepassen en zonder schade overleven, kan worden geconcludeerd dat de hierdoor bijgestelde faalkans voldoet aan de gestelde eis (zie ook § 2.3).

Uiteraard dient de dijkbeheerder er vooraf voldoende vertrouwen in te hebben dat bij het (al dan niet stapsgewijs) aanbrengen van de proefbelasting de risico's beperkt blijven. De dijk mag niet te veel schade ondervinden van de proefbelasting. Er moeten dus vooral criteria zijn vastgesteld voor de mate van vervorming waarbij de proef moet stoppen.

Het benodigde type proefbelasting, de grootte en de tijdsduur hiervan zijn sterk afhankelijk van de situatie. Bij dijkversterking KIIJK (zie ook de voorbeeld toepassing voor AS in § 3.4) bleek vooral infiltratie bij golfoverslag dominant te zijn. Over de mate van de infiltratie en de verhoging van de waterspanning (freatisch vlak) bestond grote onzekerheid. Daarom is een proefbelasting uitgevoerd bestaande uit het infiltreren van de dijk bij hoge overslagdebieten. Er zijn twee proeven gedaan. Bij de eerste proef trad al bij geringe overslag schade aan het talud op. Dit kwam door de lokale aanwezigheid van een zandlens onder de kleibekleding, die voorafgaand aan de proef niet was geconstateerd. Daarom volgde een tweede infiltratieproef (zie Figuur 2.3). Hieruit bleek dat het talud bij een relatief geringe hoeveelheid overslag (overslagvolume) verzadigde. Opgemerkt wordt dat de mate van verzadiging is gemeten in twee afzonderlijke raaien (tussenafstand 10 m). En door de heterogeniteit van de kleibekleding en de ondergrond ontstond een verschillend waterspanningsbeeld. Deze proefbelasting heeft waardevolle informatie opgeleverd over het waterspanningsbeeld bij infiltratie door golfoverslag (zie ook van Hoven & Noordam, 2018).



Figuur 2.3 Infiltratieproef als proefbelasting op de Groenendijk te Nieuwerkerk aan den IJssel

Uit enkele uitgevoerde AS-onderzoeken bij regionale keringen volgt dat verkeersbelasting in de toetsituatie een dominante invloed heeft op de macrostablieit. Een proefbelasting bestaande uit een (verkeers)belasting op de kruin zou hiervoor waardevolle informatie kunnen opleveren, waarmee mogelijk goedkeuring wordt bereikt.

3 Toepassingsvoorbeelden en opbrengsten

3.1 Overzicht toepassing AS

In 2016 is de POVM gestart met het project Beter benutten actuele sterkte macrostabiliteit. De kennis-innovatie AS macrostabiliteit is voor het eerst toegepast bij dijkversterking KIJK in samenwerking met het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK). Deze dijkversterking diende als referentieproject voor het onderzoeksspoor van AS binnen de POVM. Niet alleen was het doel de methode verder te ontwikkelen, maar ook om deze toe te passen als ‘versterkingsalternatief’. In § 3.4 is de toepassing van de stappen 1, 2 en 3 binnen dijkversterking KIJK weergegeven.

Na afronding van bovengenoemd onderzoeksproject waarin de toepassing binnen dijkversterking KIJK plaatsvond, besloot HHSK om AS (en dan met name de stappen 1 en 2) uit te werken voor het gehele dijkversterkingsproject.

Vrijwel tegelijkertijd besloot Waterschap Vallei en Veluwe (WSV), na o.a. een positieve uitslag van een expertsessie, om de kansrijkheid van AS nader te verkennen voor de Noordelijke Randmeerdijk. De resultaten zijn opgenomen in het Achtergrondrapport bij deze publicatie (POVM, 2020).

Na deze verkenning volgden er meer. Op het moment van schrijven van deze publicatie is AS al in vele projecten toegepast. Vaak gebeurde dat in de verkenningsfase van de HWBP-projecten. Daarbij lag de focus op de stappen 1 en 2.

In het Achtergrondrapport staat als voorbeeld een beschrijving van het AS-onderzoek dat voor waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOD) is uitgevoerd voor het HWBP-project Zwolle – Olst.

In 2018 besloot Waterschap Hollandse Delta (WSHD) om AS – en hier vooral stap 3: bewezen sterkte (BS) ofwel faalkansupdate – te laten uitwerken voor de Vestingwallen te Hellevoetsluis. Dit als verkenning in aanloop naar de formele Beoordeling van dit deel van Normtraject 20-4. De resultaten hiervan staan ook in het Achtergrondrapport (POVM, 2020).

Ook binnen het meerjarig ontwikkelspoor van Rijkswaterstaat WV zijn diverse onderzoeksprojecten rondom de toepassing van faalkansupdate-analyses uitgevoerd. Dit gebeurde in opdracht van Rijkswaterstaat, STOWA en waterschappen.

Onderstaande tabel geeft een (niet uitputtend) overzicht van de projecten sinds 2016 waarin AS is toegepast.

Tabel 3.1 Projecten waarin AS is toegepast in de periode 2016-2020 (niet uitputtend)

| Project | Opdrachtgever | Type project | Omschrijving AS werkzaamheden ³⁾ |
|---|---------------|------------------------------|---|
| Beter benutten Actuele Sterkte (referentieproject dijkversterking KIJK (HHSK) ¹⁾ | POVM | POVM onderzoeksproject | Onderzoek, ontwikkeling methode stappen 1 t/m 3 aan de hand van referentieproject KIJK in de Krimpenerwaard |
| Dijkversterking KIJK (HHSK) ¹⁾ | HHSK | HBWP dijkversterkingsproject | Verdere verkenning en implementatie (stap 1 en 2) in 10 dijkvakken |
| Dijkversterking Noordelijke Randmeerdijk bij Elburg (WSV) | WSV | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in 3 dijkvakken/ dwarsprofielen (stap 1 en 2) |

| Project | Opdracht-gever | Type project | Omschrijving AS werkzaamheden ³⁾ |
|---|----------------|----------------------------------|---|
| Dijkversterking Zwolle – Olst (WDOD) | WDOD | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in 2 dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) |
| Verkenning Bewezen sterkte Vestingwallen Hellevoetsluis (WSHD) | WSHD | Beoordeling primaire waterkering | Verkenning AS in 3 dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1, 2 en 3) |
| Sterke Lekdijken ²⁾ : deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM) | HDSR | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in 3 dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) |
| 3 cases in N-H (Markermeerdijk) | HHNK | Toetsing Regionale keringen | Onderzoek ontwikkeling bewezen sterke methode (stap 2 en 3) in 3 cases |
| 3 cases regionale keringen binnen WSRL en HHNK | STOWA | Toetsing Regionale keringen | Onderzoek ontwikkeling bewezen sterke methode (stap 2 en 3) in 3 cases |
| Dijkversterking Tiel – Waardenburg (TIWA) | WSRL | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in enkele dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) |
| Dijkversterking Gorkum – Waardenburg GOWA | WSRL | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in enkele dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) |
| Dijkversterking Streefkerk – Ameide Fort Everdingen (SAFE) | WSRL | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in enkele dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) en verkenning prob. ontwerpen |
| Dijkversterking Neder-Betuwe (NeBe) | WSRL | HBWP dijkversterkingsproject | Verkenning AS in 5 dijkvakken/dwarsprofielen (stap 1 en 2) en verkenning prob. ontwerpen |

1) KIJK: Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard

2) Dijkversterking Sterke Lekdijken betreft het traject van Schoonhoven tot Amerongen

3) Stap 1 = detaillering Schematisering en semi-probabilistische analyses; Stap 2 = faalkansanalyse; Stap 3 = faalkansupdating (bewezen sterkte (BS) en/of proefbelasting)

3.2 Overzicht resultaten en aanbevelingen

Voor de primaire keringen richtte de toepassing van AS zich vooral op scopereductie door nadere detaillering van de schematisering en het uitvoeren van specifiek grondonderzoek (stap1) en faalkansanalyses (stap 2). Hierbij is in de verschillende projecten duidelijk winst geboekt. Voor specifieke gevallen, zoals de Vestingwal te Hellevoetsluis, bleek dat met BS (stap 3) er grote kans is op goedkeuren (STBI) van een groot deel van de Vestingwal te Hellevoetsluis.

AS heeft voor STBI in de meeste gevallen een scopereductie gegeven, of geeft aan dat de kans hierop groot is als AS na een eerste verkenning wordt uitgerold voor de gehele STBI-scope van het dijktraject. Onderstaande tabel geeft de winst in termen van scopereductie aan voor enkele voorbeeldprojecten (zie Achtergrondrapport POVM (2020) voor details van deze cases, en § 3.4 voor het project KIJK).

Voor regionale keringen is AS vooral toegepast voor de verkenning van de potentiële winst van faalkansanalyses (stap 2) en bewezen sterkte (faalkansupdate: stap 3) toegepast. De resultaten geven een gemengd beeld. Voor BS is de invloed van de verkeersbelasting dominant, waardoor overleefde belastingen in het algemeen weinig winst opleveren. Daarnaast zorgen onzekerheden met betrekking tot de schematisering van de waterspanningen ook voor minder winst.

Tabel 3.2 Enkele projecten waarin AS is toegepast, waarbij scopereductie is vastgesteld (zie ook het Achtergrondrapport (POVM, 2020))

| Project | Totale scope macrostabiliteit (STBI) [m] | Scope macrostabiliteit. Na AS Stap 1 [m] | Scope macrostabiliteit. Na AS Stap 2 [m] | Scope macrostabiliteit Na AS Stap 3 [m] | Scopereductie door AS [m] | Mogelijk scopereductie na nader onderzoek AS [m] |
|--|---|---|---|--|------------------------------|---|
| Dijkversterking KIJK (HHSK) 1) | 8320 | 7640 | 5170 | n.v.t | 3150 | 6000 |
| Dijkversterking Noordelijke Randmeerdijk bij Elburg (WSVV) | 7200 | 1000 | 600 | n.v.t | 6450 | 6450 |
| Dijkversterking Zwolle – Olst (WDOD) | 5230 | 5230 | 4030 | n.v.t. | 1200 | 2920 |
| Verkenning Bewezen sterkte Vestingwallen Hellevoetsluis (WSHD) | 1260 | 1260 | 1260 | 960 | 300 | 1260 |

1) KIJK: Krachtige Ijsseldijken Krimpenerwaard

2) Stap 1 = detaillering Schematisering en semi- probabilistische analyses; Stap 2 = faalkansanalyse; Stap 3 = faalkansupdate (bewezen sterkte (BS) en/of proefbelasting)

De projecten in Tabel 3.2 leiden specifiek in relatie tot AS tot aanbevelingen die de (project)resultaten kunnen verbeteren of de uitkomst realistischer kunnen maken:

- Extra onderzoek naar de sterkte van het dijksmateriaal is nodig om de spreiding te verkleinen. Ook dient te worden onderzocht of dit moet worden geschematiseerd met ongedraineerd of met gedraineerd grondgedrag. Er moet dus een standpunt worden geformuleerd over het toepassen van cohesie van dijksmateriaal in relatie tot het CSSM-model.
- Een cruciaal element in de modellering van stabiliteit bij overslag en infiltratie is de schematisering van de verzadiging (freatisch vlak) in de dijk. Dit is onder andere afhankelijk van de duur van de overslag en van de kleibekleding. Hier is weinig over bekend. Daarom wordt meestal de zeer conservatieve aanname van volledige verzadiging gemaakt. Experimenteel onderzoek naar dit fenomeen (laboratorium en/of prototype) kan leiden tot een onderbouwde aanscherping van de schematisering.
- Een beter resultaat kan worden verkregen door nauwkeurig het effect van de kans van infiltratie door overslag te bepalen, waarbij de kans op overslag gegeven een waterstand uit overslagberekeningen wordt meegenomen⁴.

4 Deze methode is ten tijde van het schrijven van deze publicatie al wel toegepast bij twee andere projecten, te weten Dijkversterking Neder-Betuwe (WSRL) en Dijkversterking Wijk bij Duurstede – Amerongen (HDSR).

- Een andere dan de standaard verdeling van de faalkansruimtefactor (gunstiger voor macrostabiliteit) kan een evenwichtiger en gunstiger resultaat voor STBI opleveren. Voor nadere uitleg wordt verwezen naar Rozing & Visschedijk (2020).
- Voor bredere toepassing is verdere operationalisering nodig. Aanbevolen wordt om de gebruikersvriendelijkheid van de software te verbeteren, en meer te automatiseren. Dat is nodig omdat de methode nu arbeidsintensief is. Hierin zijn al belangrijke stappen gezet.
- Onderzoek doen naar een voldoende conservatieve inschatting van de sterktereductie in de opbarstzone in AS stap 3, voor beoordeling en vooral voor de observatie.
- Modelleren van de waterspanningen in de probabilistische analyses als stochast (in de vervolganalyses kan dit zonder meer worden toegepast).
- Toepassen van de invloed/reststerkte van eventueel aanwezig hoog voorland in de veiligheidsbeoordeling voor macrostabiliteit van het binnentalud.

3.3 Businesscase Actuele Sterkte POVM

Voor het AS-spoor in de referentieprojecten zijn binnen de POVM analyses uitgevoerd om het rendement van de toepassing van AS te bepalen. Het gaat dan vooral om een verkleining van de versterkingsopgave voor macrostabiliteit. Hieruit bleek dat het rendement voor de referentieprojecten aanzienlijk is en dat een extrapolatie naar het HWBP-programma een substantiële kostenbesparing oplevert.

Een belangrijk aandachtspunt is kennisverspreiding. Door de binnen de POVM gegenereerde kennis te delen met de marktpartijen die er straks mee moeten ontwerpen, kan het volle potentieel van de POVM ook werkelijk benut worden in de projecten.

Ook bij opgaven met betrekking tot een ander mechanisme, zoals hoogte of piping, is AS goed bruikbaar en levert het vrijwel zeker een gemiddeld lichter ontwerp op.

Door de samenwerking tussen de POVM en de bij de projecten KIJK en Markermeerdijken betrokken partijen is het AS-spoor nu zo ver ontwikkeld, dat de kennis ook breder, binnen andere HWBP-projecten, toegepast zou kunnen worden.

3.4 Voorbeeld toepassing AS: KIJK (Krachtige IJsseldijk Krimpenerwaard)

Aanleiding

Het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK) is in 2015 gestart met de verkenningfase van het dijkversterkingsproject KIJK, de dijk langs de Hollandse IJssel in de Krimpenerwaard (Normtraject 15-3).

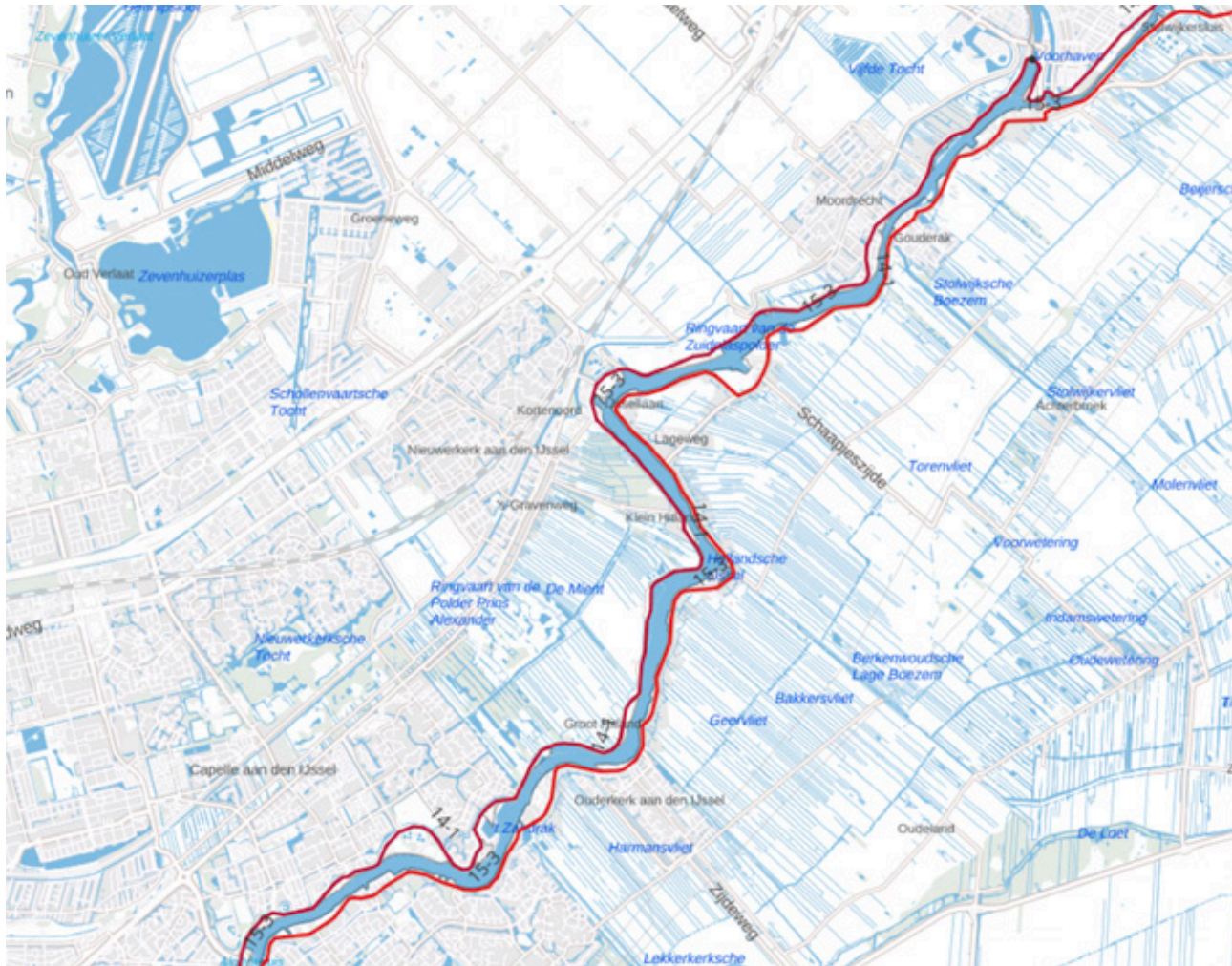
Ook begon in 2015 het POVM-onderzoek Beter benutten actuele sterkte. Naar aanleiding van een overleg tussen HHSK en leden van het kernteam van de POVM is geconcludeerd dat AS voor toepassing bij dit dijktraject kansrijk zou kunnen zijn om de dijkversterkingscope te verkleinen voor wat betreft macrostabiliteit van het binnentalud.

Het POVM-onderzoek werd gekoppeld aan het referentieproject KIJK. HHSK en opdrachtgever POVM voerden in nauwe samenwerking de drie stappen van AS uit. Het doel was om het veiligheidsoordeel voor macrostabiliteit aan te scherpen, door gericht grondonderzoek en monitoring (stap 1), geavanceerde rekentechnieken zoals faalkansanalyses (stap 2) en faalkansupdating ofwel bewezen sterkte (BS) (stap 3). Ten tijde van het starten van dit project (2016) was stap 0 nog geen onderdeel van de AS-methode. Desondanks bestond de verwachting dat de kans op succesvolle toepassing in dit project groot was.

In dit eerste POVM-onderzoek is AS gedemonstreerd aan de hand van drie cases, merendeels gelegen binnen het referentie-dijkversterkingsproject KIJK. De toepassing bleek succesvol. Daarom heeft HHSK in vervolg op dit onderzoek in nog 9 cases onderzoek gedaan, met het doel een uitspraak te kunnen doen voor het gehele dijkversterkingsproject.

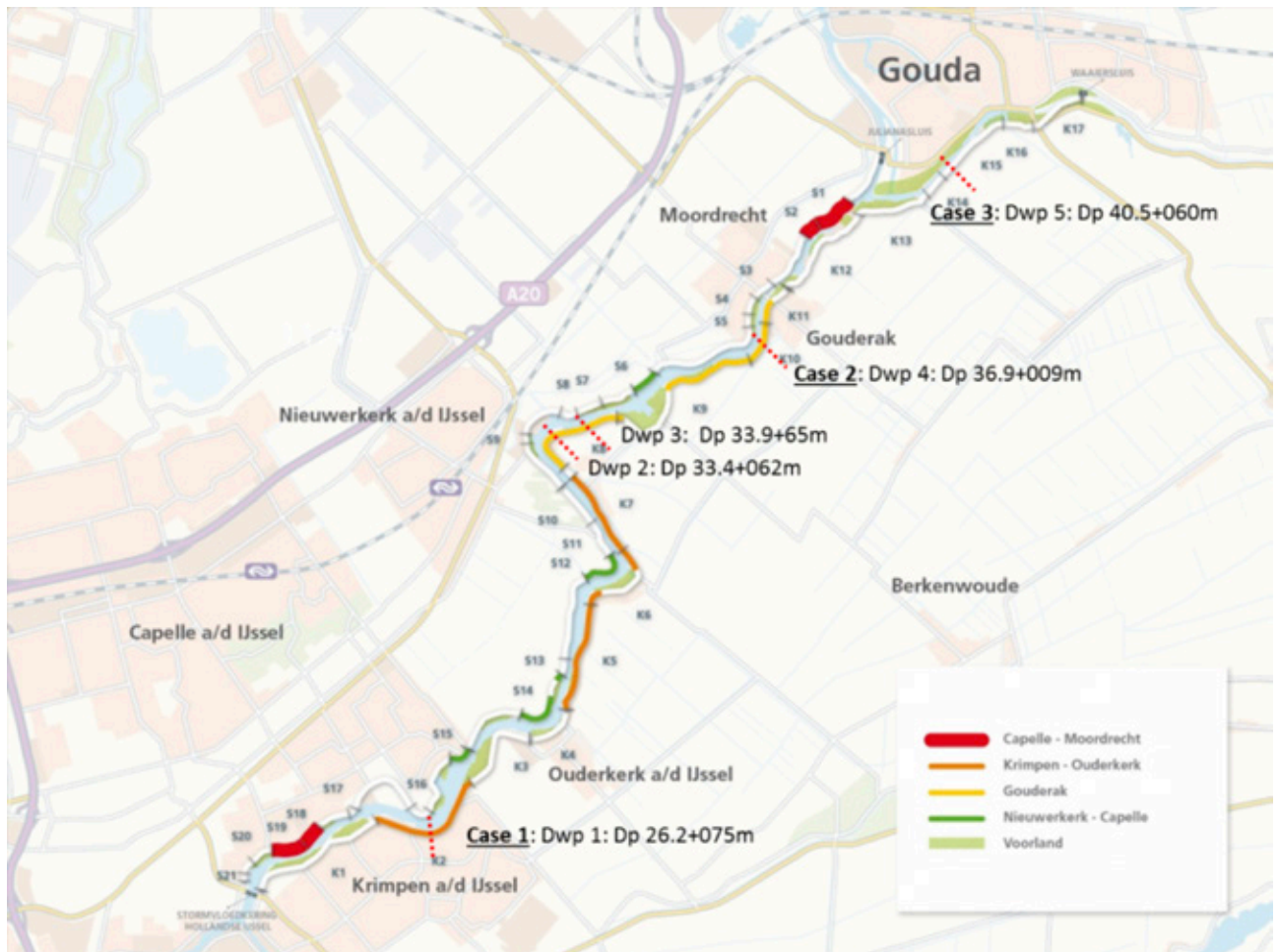
Het project

Figuur 3.1 geeft het beschouwde normtraject weer.



Figuur 3.1 Dijkversterking KIJK (langs de IJssel in de Krimpenerwaard, Normtraject 15-3 (bron: www.waterveiligheidsportaal.nl))

In het verleden zijn de dijken in dit normtraject door Deltares (voorheen GeoDelft) onderzocht in opdracht van Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK) en Hoogheemraadschap van Rijnland (HHR). In totaal betreft de veiligheidsopgave 10,5 km waterkering die is afgekeurd op stabiliteit en hoogte. De in Figuur 3.2 weergegeven projecten langs de Hollandse IJssel zijn geprioriteerd in het HWBP opgenomen en vallen onder het beheersgebied van HHSK en HHR. Bij hoogwater wordt het achterland beschermd door de Stormvloedkering aan de monding van de Hollandse IJssel en door de achterliggende dijken. Ook als de Stormvloedkering gesloten is moeten de dijken hoge waterstanden kunnen keren, omdat er dan veel water vanuit de diepe polders op de Hollandse IJssel wordt uitgemaal.



Figuur 3.2 Scope dijkversterking KJK (oranje en gele deeltrajecten) en 3 cases van het AS-onderzoek (bron: HHSK)

POVM-project Beter benutten actuele sterkte

De drie cases in het POVM-project zijn alle afgekeurd in de derde toetsronde.

In eerste instantie is specifiek ter plaatse van de drie cases uitgebreid grondonderzoek gedaan en heeft uitgebreide monitoring plaatsgevonden. Het grondonderzoek bestond onder andere uit het uitvoeren van boringen en het steken van monsters, sonderingen, vanetests en het steken van grote diameter-monsters. Met waterspanningsmeters en peilbuizen is bepaald welke invloed de neerslag en hoge waterstanden op de Hollandse IJssel hebben op de waterspanningen in en onder de dijk. Het labonderzoek was vooral gericht op het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte van de ondergrond. Resultaat was dat – naast het verkrijgen van de benodigde parameters voor het onderzoek – de onzekerheden in ondergrondopbouw en parameters konden worden verkleind. Daarmee is aangetoond dat ten opzichte van een conventioneel grondonderzoek winst kon worden geboekt: een hogere stabiliteitsfactor voor STBI.

Vervolgens zijn voor deze cases zijn drie Actuele Sterkte-stappen doorlopen⁵: stap 1 t/m 3.

- In stap 1 zijn de conventionele semi-probabilistische analyses aangescherpt door detaillering van de schematisering, mede op basis van een uitgebreid grondonderzoek en monitoring.

⁵ Zonder stap 0, omdat stap 0 nog geen onderdeel uitmaakte van de AS-methode ten tijde van de start van dit project.

- In stap 2 is de stap gemaakt naar een probabilistische faalkansanalyse.
- In stap 3 is informatie van overleefde belastingcondities toegevoegd middels faalkansupdatering (BS).

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door een projectteam bestaande uit Fugro, Royal HaskoningDHV en Deltares. Elk bedrijf nam één case voor zijn rekening, onder leiding van en inhoudelijk begeleid door specialisten van Deltares.

HHSK-project Beter benutten actuele sterkte

Na het POVM-onderzoek is op basis van de resultaten van een kansenscan geconcludeerd dat een AS-onderzoek voor het gehele versterkingsproject zinvol zou zijn. In opdracht van HHSK heeft IB-KIJK in samenwerking met Deltares de stappen 1 en 2 uitgevoerd, gebruikmakend van de resultaten van specifiek hiervoor uitgezet aanvullend grondonderzoek. Naast traditionele oplossingen en AS is tevens de toepassing van een innovatieve maatregel zoals bijvoorbeeld dijkvernageling onderzocht.

Resultaten POVM-project Beter benutten actuele sterkte

In Tabel 3.3 staan de belangrijkste resultaten van de drie cases die in het POVM-project zijn beoordeeld.

Tabel 3.3 Belangrijkste resultaten per doorsnede (groen = voldoende; oranje = voldoet net niet; rood = onvoldoende)

| | Eis | Dp 26.2+75m (case 1) | Dp36.9+51m | Grind (d50 ≥ 2 mm) |
|---------------------------------|---------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Stap 1: Semi-probabilistisch | $SF = 1.19$ | 0.98 | 1.04 | 1.35 |
| | $SF = 1.08^*$ | 0.88 | 0.85 | 0.71 |
| Stap 2: Faalkansanalyse | $\beta = 4.4$ | 4.3 (4.6)** | 5.0 (8.0)** | 4.5 (8.7)** |
| Stap 3: Faalkansupdatering (BS) | $\beta = 4.4$ | 4.3 à 4.5*** | 5.0 | 4.5 |

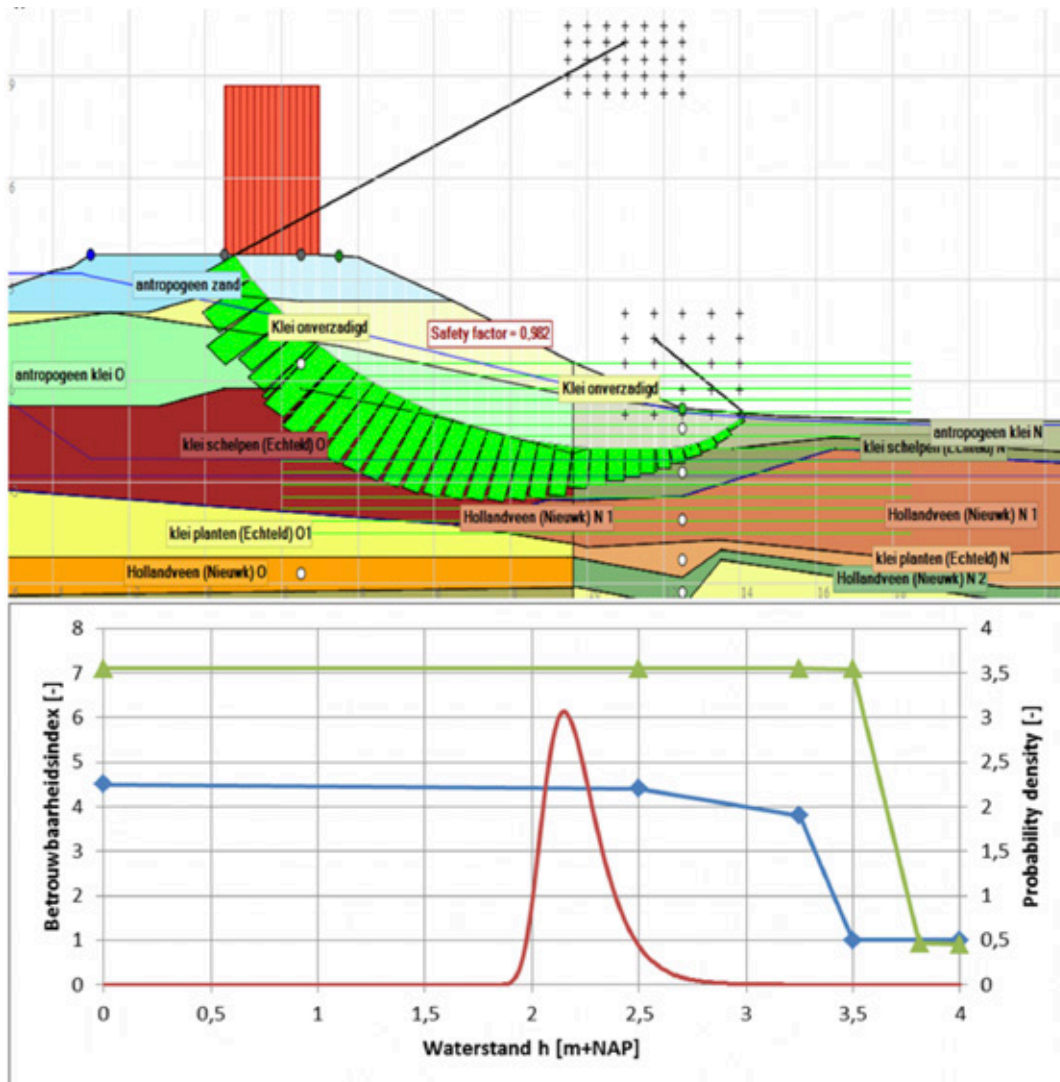
* stabiliteitsfactoren met volledige verzadiging door infiltratie bij overslag

** betrouwbaarheidsindices zonder meenemen van verzadiging door infiltratie

** range is afhankelijk van aannames t.a.v. overslag en infiltratie tijdens de observatie

De resultaten leiden tot de volgende observaties.

1. Alle doorsnedes voldoen duidelijk niet aan de veiligheidseisen in de semi-probabilistische analyse (stap 1, vergelijkbaar met een conventionele toets, hoewel in dit geval aanzienlijk meer grondonderzoek is uitgevoerd dan gebruikelijk).
2. De probabilistische faalkansanalyse (stap 2) geeft voor alle drie de beschouwde gevallen een duidelijk gunstiger beeld ten aanzien van de veiligheid. De veiligheid of faalkans wordt sterk beïnvloed door het effect van verzadiging van het dijklichaam door overslag en infiltratie (ter illustratie is het kritieke glijvlak voor DP 26.2+75 m hieronder weergegeven). Twee van de doorsnedes voldoen aan de eis, de derde net niet.
3. Faalkansupdatering op basis van overleefde condities (stap 3) heeft voor deze doorsnedes weinig tot geen effect. Dit komt door de combinatie van de al lage (a priori) faalkans in stap 2, en de bepalende invloed van infiltratie en verzadiging door overslag. Doordat er geen metingen beschikbaar zijn van waterspanningen in de dijk tijdens de observatie, is deze invloed tijdens de observatie relatief onzeker. Daardoor is de fragility curve (hieronder weergegeven) voor de observatie relatief hoog, wat inhoudt dat het overleven van de belasting relatief weinig zegt over het overleven van de hogere belasting in de toetscondities.



Figuur 3.3 Kritiek glijvlak (boven) en de fragility curves voor profiel Dp26.2+75m (de blauwe lijn betreft de toetscondities in 2035, de groene lijn betreft observatiecondities van 1953 en de rode lijn is de kansverdeling van de waterstand in 2035)

Resultaten HHSK-project Beter benutten actuele sterkte

De belangrijkste resultaten van de negen beschouwde cases in het HHSK-project staan in Tabel 3.4. De resultaten leiden tot de volgende observaties.

1. Eén doorsnede kon met een semi-probabilistische analyse worden goedgekeurd. Voor zes cases wordt verwacht dat door aanvullend onderzoek mogelijk tot goedkeuren kan worden gekomen.
2. De faalkansanalyse (stap 2) verkleint de afstand tot de norm en geeft voor vier van de negen beschouwde cases waarschijnlijk goedkeuring. De veiligheid of faalkans wordt sterk beïnvloed door het effect van verzadiging van het dijklichaam door overslag en infiltratie. Voor vier cases wordt verwacht dat met aanvullend onderzoek mogelijk tot goedkeuren kan worden gekomen.
3. De invloed van verkeersbelasting is groot (zelfs groter dan een hoge buitenwaterstand). Dit was ook al het geval bij de POVM-cases.

Tabel 3.4 Belangrijkste resultaten per dijkvak (bron: HHSK)

| Dijkvak | | | lengte [m] | semi-prob. WBN | prob. | |
|---------|---|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-------------|
| 1 | a | met voorland | 500 | | | |
| | b | zonder voorland | 800 | | | |
| 2 | | | 200 | | | |
| 3 | | | 700 | | | |
| 4 | a | met voorland | 720 | | | |
| | b | zonder voorland | 680 | | | |
| 5 | | | 1300 | | | |
| 6 | | | 1400 | | | |
| 7 | | | 800 | | | |
| 8 | a | van hm 36,3 - 36,55 | 250 | | | |
| | b | van hm 36,55 - 36,70 | 150 | niet beschouwd | niet beschouwd | |
| 9 | | | 800 | | | |
| | | | | Goed | 680 (8%) | 3.150 (38%) |
| | | | | Mogelijk | 3.850 (46%) | 2.800 (34%) |
| | | | | Onvoldoende | 3.620 (44%) | 2.200 (27%) |
| | | | | Geen oordeel | 150 (2%) | 150 (2%) |

Conclusies en aanbevelingen

Voor het POVM-onderzoek zijn alle AS-stappen doorlopen met het doel de versterkingscope voor STBI te verkleinen. Nadere optimalisatie van de schematisering door het uitvoeren van specifiek grondonderzoek en monitoring heeft aangetoond dat winst kon worden geboekt ten opzichte van een conventioneel onderzoek.

De probabilistische stabiliteitsanalyse (stap 2) levert een duidelijk gunstiger veiligheidsbeeld dan de semi-probabilistische analyse (stap 1). Faalkansupdatering (stap 3) heeft voor de beschouwde cases een beperkte meerwaarde vanwege (a) de al hoge betrouwbaarheid en dus lage faalkans die in stap 2 al is bereikt en (b) de dominante invloed van overslag en infiltratie op de faalkans, waarvoor geen relevante observaties bekend zijn.

Het uitvoeren van analysestappen 1 en 2 voor KIJK was daarom zonder meer zinvol. Het nut van bewezen sterkteonderzoek (stap 3) voor KIJK is afhankelijk van een proefbelasting gericht op het effect van infiltratie en verzadiging, en ook van de resultaten van analysestappen 1 en 2 voor KIJK.

In een vervolgfase van het POVM-onderzoek zijn twee proefbelastingen uitgevoerd gericht op infiltratie en verzadiging (zie § 2.3). De gedachte was dat met infiltratieproeven een positief effect op de betrouwbaarheid kon worden bereikt, ofwel door aanscherping van de schematisering van de verzadiging, ofwel door het overleven van de proefbelasting. Uit de twee proeven kwam naar voren dat forse infiltratie optrad, ook bij geringe overslaggebieden, waardoor de schematisering niet beduidend kon worden aangescherpt. Ook het overleven van de proefbelasting was onvoldoende om op basis van BS goed te keuren. Op basis van de analyses zijn zeer gerichte aanbevelingen gedaan voor het vervolgonderzoek voor KIJK door HHSK (Rozing & Schweckendiek, 2016).

In het vervolgonderzoek heeft HHSK aanzienlijke winst behaald door het uitvoeren van AS-analyses. De STBI-scope is in stap 1 verkleind van 8.320 m naar 7.640 m, en door het uitvoeren van faalkansanalyses verder verkleind met circa 2.500 m tot 5.170 m. Mogelijk kan de scope worden verkleind met in totaal circa 6.000 m. De STBI-scope zal echter niet geheel verdwijnen.

4 Ervaringen uit referentieprojecten

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke effecten de toepassing van AS heeft op (dijkversterkings)projecten, voor het waterschap en betrokken ingenieurs- en adviesbureaus.

Praktijkervaringen met AS zijn in kaart gebracht door middel van interviews met technisch managers, projectmanagers en/of adviseurs van ingenieurs- adviesbureaus betrokken bij de toepassing van AS binnen hun dijkversterkingsproject. Daarbij is aangegeven wat de toepassing hen heeft opgeleverd, wat het heeft gekost en wat beter kan. Naast de interviews zijn voor een aantal projecten die zijn gepresenteerd op de vakdag Actuele en Bewezen Sterkte (op 31 januari 2019) de behoeftes geïnventariseerd voor een succesvolle implementatie van AS en BS.

De interviews:

- WSVV: Dijkversterking Noordelijke Randmeerdijk; geïnterviewde: technisch manager bij WSVV en adviseur waterkeringen bij Wi+Bo.
- WDOD: Dijkversterking Zwolle – Olst; geïnterviewde: adviseur Waterveiligheid bij WDOD en specialist waterveiligheid bij WDOD.
- WSHD: Beoordeling Vestingwal te Hellevoetsluis en Dijkversterking Normtraject 20-3; geïnterviewde: technisch manager Dijkversterking Normtraject 20-3 en specialist waterkeringen.

De interviews zijn uitgewerkt in Bijlage B in het Achtergrondrapport (Rozing & Visschedijk, 2020).

Behoeftes zijn geïnventariseerd voor de op de vakdag gepresenteerde projecten:

- Dijkversterking KIJK (Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard).
- Dijkversterking Zwolle – Olst (Waterschap Drents Overijsselse Delta).
- Markermeerdijken (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier).
- STOWA-studie regionale keringen.

Voor het verslag van deze vakdag wordt verwezen naar Bijlage E in het Achtergrondrapport (Rozing & Visschedijk, 2020).

Hieronder volgen de belangrijkste, vooral gezamenlijke, conclusies, aanbevelingen en wenselijke ontwikkelingen die naar voren kwamen uit de interviews en de vakdag.

Ervaringen toepassing van AS-resultaten

Uit de interviews volgt dat AS vooral is toegepast om de winstpotentie (reductie van de scope voor STBI) nader te kunnen onderbouwen in de projecten. Ook wordt het opdoen van kennis en toepassingservaring als belangrijk punt genoemd. Dit geldt vooral voor de faalkansanalyses (stap 2 en 3).

In alle projecten heeft het toepassen van AS in de uitgevoerde verkenningen geleid tot reductie van de scope voor STBI. Gezien de kansrijkheid heeft in de meeste gevallen het waterschap dan ook het voornemen om AS uit te rollen voor het gehele dijktraject.

Voor de gevallen waarbij de methode niet tot goedkeuren heeft geleid, heeft WSVV het voornemen geuit om te onderzoeken welke voordelen een probabilistisch ontwerp biedt ten opzichte van een semi-probabilistisch ontwerp. Ook waterschappen die niet tot de geïnterviewde groep behoren, hebben zich voorgenomen dit te doen.

Ervaringen met de expertsessies/kansenscans (stap 0)

De kansenscan of expertsessie (stap 0) was erg nuttig. Belangrijk is om dit proces vroegtijdig op te starten. Het geeft snel (en gezamenlijk) een beter beeld van de kansen op scopeverkleining voor het dijktraject. Voornemen (van WDOD) is om dit ook te doen voor andere dijktrajecten die in de nabije toekomst versterking behoeven.

Voordeel van het zelf uitvoeren van de probabilistische analyses voor het waterschap is dat in het vervolg de kansenscan geheel of deels zelf kan worden uitgevoerd. De groep adviseurs met ervaring met de methode wordt steeds groter. Deze adviseurs kunnen nu ook helpen bij het uitvoeren van expertsessies bij andere waterschappen, en de ervaringen breder uitdragen.

Ervaringen met uitvoering AS

- Voordat AS wordt toegepast moeten de uitgangspunten duidelijk zijn. Hoewel voor een probabilistische analyse in principe geen extra (grond)onderzoek nodig is, kost het extra inspanning om vanuit de semi-probabilistische uitgangspunten de uitgangspunten voor de probabilistische berekeningen af te leiden.

Uitgangspunten samenstellen kost tijd en kan een iteratief proces zijn. Soms levert AS-stap 1 al een scherpere beoordeling, omdat de uitgangspunten kritisch worden beoordeeld en bediscussieerd. Verder blijkt dat de schematiseringskeuzes in stap 1 belangrijke gevolgen kunnen hebben voor AS-stap 2.

- De AS-werkwijze dwingt tot verdieping van uitgangspunten en berekeningen. De methode geeft veel inzicht in onzekerheden. Daarmee wordt duidelijk welke onzekerheden ertoe doen en waarvoor dus inspanningen om ze te verkleinen, zinvol kunnen zijn.
- De projecten van HHSK (dijkversterking KIJK), WSVV (Noordelijke Randmeerdijk) en WDOD (dijkversterking Zwolle – Olst) zijn op de werkvloer van Deltares uitgevoerd door een team bestaande uit medewerkers van het waterschap of van het advies- en ingenieursbureau en specialisten van Deltares. De goede samenwerking en korte communicatielijnen leidden tot een efficiënte kennisoverdracht.
- Enkele waterschappen geven aan dat voor toekomstige projecten met een significante STBI-scope het wenselijk/noodzakelijk is een kansenscan toe te passen. Daarbij is het van belang om in te schatten of dit effect heeft/zal hebben op het Voorkeursalternatief (VKA) of op andere faalmechanismen.
- Ook is de gebruikersvriendelijkheid van de software en automatisering belangrijk.
- Het blijkt nuttig dat een doorkijk/vertaling wordt gemaakt van de resultaten van enkele dwarsprofielen naar de scope van het gehele dijktraject. De kansenscan (stap 0) wordt daarmee geactualiseerd.

Belangrijkste benodigde/wenselijke ontwikkelingen (methode en instrumentarium)

Software/tools:

- Mogelijkheid om andere variabelen/parameters dan sterkteparameters en waterspanningen als stochast in de probabilistische analyses te beschouwen⁶.
- Omgaan met meerdere maatgevende glijvlakken. De Handreiking faalkansanalyse macrostabieleit kan hierbij helpen (Schweckendiek, et al., 2017).
- Voor toepassing van AS met constructies zijn tools in ontwikkeling (beginfase) zoals probabilistische methoden voor EEM met specifieke sampling-methods.

6 Of in ieder geval onderzoek waaruit volgt welke parameters je als stochast zou willen/moeten beschouwen. Denkende aan grondlagen, waterspanningen. Uit eerder onderzoek bij project KIJK volgt dat volumegewicht als stochast waarschijnlijk niet/minder relevant is.

Documenten/handvatten:

- Updaten en samenvoegen van AS-documenten is wenselijk, inclusief uitgewerkte praktijkvoorbeelden en alle inzichten van de laatste 3 jaren (2016-2019), zodat één, compleet, AS-verhaal kan ontstaan; de voorliggende PPA en het bijbehorende Achtergrondrapport (Rozing & Visschedijk, 2020) beogen hierop al deels een antwoord te geven.
- Handvatten voor het vooraf inschatten van kansrijkheid van de methode (AS-stap 0) zijn wenselijk.
- Correlaties tussen stochasten zijn een belangrijke aanname bij AS-stappen 2 en 3. Diverse correlaties verdienen nog meer aandacht (en handvatten voor het gebruik zijn nodig). Bijvoorbeeld correlaties van sterkteparameters van verschillende grondlagen.
- Meerdere glijvlakken kunnen maatgevend zijn. Duidelijke handvatten hoe hiermee om te gaan zijn nodig. Meerdere glijvlakken kunnen maatgevend zijn voor verschillende waterstanden, of glijvlakken kunnen verschillend zijn voor semi-probabilistische en probabilistische analyses.
- Een fragility curve die op basis van de buitenwaterstand is gemaakt, is niet altijd maatgevend. De fragility curve kan bijvoorbeeld ook op basis van verkeersbelasting worden gemaakt. Een handreiking of handvatten hiervoor zijn belangrijk. Zie ook Kanning & Schweckendiek (2017).
- Handvatten voor de schematisering van een overleefde situatie (observatie) en ook het inzetten van een proefbelasting, zoals een infiltratieproef of proef met verkeersbelasting. Voor regionale keringen is een overleefde verkeersbelastings- (of bouwfase)conditie (meestal) extremer dan de te beoordelen hoogwaterconditie.
- Meer informatie is nodig over koppeling D-Stability met Probabilistic toolkit.

Onderzoek:

- De vertaling van het resultaat van Bewezen Sterkte (AS-stap 3) van dwarsprofiel naar dijkvak was reeds onderzocht (zie Teixeira & Rosenbrand, 2017), maar verdient nog verder onderzoek.
- Onderzoek naar reststerkte door aanwezigheid van hoog voorland en door (kleine) glijvlakken die niet tot overstroming leiden. Hoe deze aanwezige reststerkte voor macro-stabiliteit van het binnentalud kan worden meegerekend is nog niet onderzocht. Opgemerkt wordt dat in het kader van het dijkversterkingsproject Neder-Betuwe (NeBe) van WSRL een methode is uitgewerkt waarmee de reststerkte van hoog voorland kan worden gekwantificeerd. Tevens wordt opgemerkt dat eind 2019 is gestart met een onderzoek om de reststerkte bij STBI (middels faalpad-analyse) te kwantificeren. De resultaten hiervan worden april 2020 verwacht.
- Hoe kan een overleefde situatie zoals bijvoorbeeld bij een berekende hoge faalkans (ofwel een lage β) bij lage/dagelijkse buitenwaterstanden (die meermaals zijn opgetreden), worden benut in de BS-context.
- Onderzoek naar de onzekerheid bij opbarsten en opdrijven (bijvoorbeeld toevoegen van een onzekerheid aan de sterktereductiefactor en/of de Uplift-factor (of het volumegewicht en waterspanningen). De modellering van opbarsten en/of opdrijven in een probabilistische analyse verdient nog aandacht. Tevens zijn handvatten hiervoor belangrijk.
- Een betere definitie van het moment van begin van infiltratie door overslag (buitenwaterstand) en het moment van volledige verzadiging door infiltratie is nodig. Op dit moment worden 2 overslaggebieden gekozen voor het maken van fragility curves in AS-stap 2: (i) waarbij de infiltratie begint en (ii) waarbij de dijk volledig verzadigd zit (meestal wordt 1 en 10 l/s/m gekozen, maar dit is arbitrair). Uit de infiltratieproeven (zie § 2.4.5) volgen eerder 0,1 en 1.0 l/s/m/ als grenzen. De kans op een bepaalde hoeveelheid overslag gegeven een waterstand is inmiddels goed te bepalen.
- De veiligheidsfilosofie voor regionale keringen vereist aandacht. De AS-methode is daar ook van toepassing.

Cruciale punten voor implementatie en acceptatie van het resultaat

- Specialistische kennis/ervaring en kennisoverdracht;
- Uitlegbaarheid/communicatie AS (bestuurders en burgers);
- Verkrijgen van een robuust resultaat. De scope of resultaten moeten niet veel wijzigen door doorontwikkeling van de AS-methode (geldt voor zowel probabilistische als semi-probabilistische analyses);
- Een in het proces tijdige start met toepassen van de AS-methode;
- (Vooraf) een winstverwachting kunnen geven bij toepassing van de AS-methode;
- Bij het toepassen van BS dient de benodigde observatie nagenoeg gelijk of groter te zijn aan de belasting onder Beoordeling of ontwerpcondities;
- ENW-acceptatie/advies (is reeds beschikbaar – zie Bijlage B).

Consequenties toepassing AS in relatie tot projectbeheersing

Gevraagd naar de consequenties van toepassing van AS in relatie tot projectbeheersing (tijd/planning, geld, risico's, communicatie), geven de geïnterviewden aan dat toepassing voor het gehele dijktraject veel inspanning en doorlooptijd vergt en dat dit goed moet worden ingepast in het proces en op tijd moet worden gestart. AS-stap 2 kost vooral meer tijd: betrokkenen moeten nog bekend raken met de software en discussie en overleg voeren over schematiseringskeuzes. Ook eventueel benodigd aanvullend grond- of laboratoriumonderzoek voor stap 1 vergt tijd.

AS is in de hier beschouwde dijkversterkingsprojecten toegepast in de verkenningsfase of als parallel spoor. Zo komt de eventuele winstpotentie (scopereductie) snel aan het licht en kan deze worden meegenomen naar een volgende fase.

Het toepassen van AS biedt kansen om de scope te verkleinen. Vanuit dat oogpunt is de businesscase snel rond, maar techniek is niet altijd leidend voor de beslissing om AS wel of niet toe te passen. Zo is voor de Beoordeling conform WBI de businesscase complexer: de kosten voor AS-onderzoek zijn immers niet direct af te zetten tegen de reductie van de versterkingskosten, omdat de financiering bij verschillende partijen ligt. Met name stap 3 kost naar verhouding veel inspanning (en dus geld) ten opzichte van een regulier onderzoek voor die beoordeling. Het rendement van BS (AS-stap 3) is afhankelijk van de beschikbaarheid en nauwkeurigheid van de gegevens van de observatie. En de observatie dient nagenoeg gelijk of groter te zijn dan de belasting onder beoordeling- of ontwerpcondities.

Nieuwe technieken brengen altijd het risico mee dat ze zich nog verder (moeten) ontwikkelen. Dat kan meevallers maar ook tegenvallers opleveren. Door AS toe te passen wordt scherp ontworpen en beoordeeld; als er mettertijd nieuwe kennisontwikkeling plaatsvindt is er daarom minder veiligheidsmarge om eventuele verschillen op te vangen. Dit risico kan worden afgewogen tegen het risico van een minder sober en doelmatig ontwerp bij het niet toepassen van AS.

Consequenties van AS-toepassing voor het toekomstige beoordelingsproces conform WBI

Voor de Beoordeling mag worden verwacht dat gemiddeld een aanmerkelijk gunstiger resultaat wordt bereikt (minder conservatief). Voor versterkingsprojecten waarin AS wordt toegepast (voor scopereductie of voor het maken van een probabilistisch ontwerp) zal de Beoordeling in de toekomst naar verwachting ook probabilistisch gaan plaatsvinden.

Verdere toepassingen

Naast de hiervoor beschreven ervaringen is ook ervaring opgebouwd binnen andere HBWP-projecten en bij regionale keringen. Deze projecten zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Binnen twee van deze projecten is naast een mogelijke scopeverkleining ook onderzocht welke voordelen een probabilistisch ontwerp biedt in vergelijking met een semi-probabilistisch ontwerp. Deze projecten waren GOWA (Gorkum – Waardenburg) en SAFE (Streefkerk – Ameide Fort Everdingen), beide gelegen binnen het beheersgebied van WSRL. Het onderzoek liet zien dat een probabilistisch ontwerp in de meeste gevallen aanmerkelijk geringere dimensies heeft. Voor dijkversterking NeBe (Neder-Betuwe) is WSRL voornemens een probabilistisch ontwerp voor enkele dijkvakken te verkennen.

Toepassing van het onderdeel BS (stap 3) levert niet altijd iets op bij primaire of regionale keringen. Faalkansanalyses op zich (stap 2) zullen naar verwachting echter in de meeste gevallen een minder conservatief resultaat opleveren in vergelijking met semi-probabilistische analyses.



5 Conclusies en aanbevelingen

Deze PPA geeft een samenvatting van de AS-aanpak die is toegepast binnen een aantal projecten voor STBI (macrostabiliteit van het binnentalud). Daarnaast bevat de publicatie een overzicht van enkele toepassingen in HWBP-projecten, regionale keringen en een Beoordeling (conform WBI), en wordt de toepassing geïllustreerd aan de hand van een praktijkvoorbeeld. De methode is in principe ook toepasbaar voor STBU. Hiervoor worden enkele aandachtspunten benoemd. Tot slot zijn ervaringen gepresenteerd van technisch managers, projectmanagers en/of adviseurs van ingenieurs- adviesbureaus die waren betrokken bij de toepassing van AS binnen hun (dijkversterkings)project. Dit hoofdstuk vat de essentie van de publicatie samen.

De AS-methode bestaat uit vier stappen:

- Stap 0: inschatting kansrijkheid AS
- Stap 1: detaillering schematisering en semi-probabilistische analyses
- Stap 2: faalkansanalyses (probabilistische analyses)
- Stap 3: faalkansupdating (BS) en eventueel proefbelasting

De AS-methode is in detail beschreven in de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating (Kanning & Schweckendiek, 2017). Deze is te downloaden via de POVM-website⁷.

De probabilistische AS-analyses kunnen worden uitgevoerd op basis van de gegevens die ook voor semi-probabilistische analyses benodigd zijn. Aanvullende informatie is in principe niet vereist. Echter, aanvullend grondonderzoek en monitoring leiden in stap 1 vaak tot een aanscherping van de semi-probabilistische analyse ten opzichte van de 'standaard' semi-probabilistische analyse.

ENW heeft positief geadviseerd over de methode en aangegeven dat de methode generiek toepasbaar is (zie Bijlage B). Een faalkansberekening ofwel probabilistische berekening is geheel in lijn met het OI2014-v4 en het WBI2017, waarbij wordt opgemerkt dat de faalkansberekening voor macrostabiliteit op termijn, waarschijnlijk in 2020, ook in het WBI2017 wordt opgenomen.

AS is al in diverse projecten toegepast. In HWBP-projecten (primaire keringen) gebeurde dat vooral voor een nadere vaststelling van de scope. Voor STBI leverde dit in de meeste gevallen een scopereductie op, of er is aangegeven dat de kans daarop groot is als AS na een eerste verkenning wordt uitgerold voor de gehele STBI-scope van het dijktraject. Vooral stap 1 en stap 2 zijn hier toegepast, aangezien daarmee de meeste winst te behalen lijkt. Voor regionale keringen diende de toepassing vooral voor verkenning van de potentiële winst van faalkansanalyses (stap 2) en bewezen sterkte (stap 3).

De resultaten tonen dat de aanpak succesvol is en veel oplevert. Voor primaire keringen gold duidelijk dat er winst werd geboekt door de schematisering nader te detailleren en specifiek grondonderzoek uit te voeren (stap 1). Ook voor de Beoordeling is AS ingezet. Daaruit volgde dat er met bewezen sterkte, namelijk door de overleefde situatie van 1953 te beschouwen, een grote kans is op goedkeuren van STBI van een groot deel van de Vestingwal te Hellevoetsluis. Maar zo'n historische belastingsituatie is er niet altijd. Bijstellen van de faalkans kan ook door een proefbelasting te ontwerpen en toe te passen. Als de dijk deze belasting zonder problemen overleeft, kan goedkeuring worden verleend.

⁷ Website: www.povmacrostabiliteit.nl.

De winst in termen van scopereductie is in dit rapport voor vier dijktrajecten gekwantificeerd. Daaruit volgt dat de scope voor STBI met circa 10 km is gereduceerd. Voor het AS-spoor in de referentieprojecten zijn binnen de POVM analyses uitgevoerd om het rendement van de toepassing van AS te bepalen. Het gaat dan vooral om een verkleining van de versterkingsopgave voor macrostabiliteit. Gebleken is dat het rendement voor de referentieprojecten aanzienlijk was en dat een extrapolatie naar het HWBP-programma een substantiële kostenbesparing oplevert.

Inmiddels zijn gesprekken gaande met enkele niet eerder betrokken waterschappen om de kansrijkheid van AS in te schatten voor HWBP-projecten waarvan in 2020 de verkenningsfase start. Zo'n kansenscan kan worden uitgevoerd door experts van Deltares in samenwerking met het waterschap en eventueel betrokken advies- of ingenieursbureaus. Inmiddels is duidelijk dat bij de ingangstoets voor elk project zal moeten worden onderbouwd waarom AS al dan niet wordt toegepast (comply or explain-principe). Het kan voordelig zijn om deze geavanceerde analyses al bij ingangstoetsen van het HWBP toe te passen. In dat geval zou voor projecten al bij het opstarten meer zekerheid over de scope bestaan.

Een belangrijk aandachtspunt voor de toepassing van AS is de verspreiding van de binnen de POVM gegenereerde kennis onder marktpartijen die ermee moeten ontwerpen. Ook als er een opgave is voor meerdere faalmechanismen, blijft AS goed bruikbaar en levert het vrijwel zeker een gemiddeld lichter ontwerp op.

In dit rapport is hoofdzakelijk ingegaan op de toepassing van AS voor de scopebepaling van STBI bij HWBP-projecten. De methode kan echter ook worden toegepast voor STBU en bij regionale keringen. De voorwaarden en aandachtspunten hiervoor staan ook in deze PPA.

Inmiddels is probabilistisch ontwerpen al bij enkele HWBP-projecten toegepast, zij het (nog) in verkennende context (zie hoofdstuk 4). Ten behoeve van een workshop over probabilistisch rekenen en ontwerpen bij WSRL zijn voor- en nadelen daarvan in kaart gebracht. De hoofdzakelijk vanuit technische invalshoek gegeven resultaten zijn in dit rapport weergegeven. De huidige visie is dat probabilistisch ontwerpen de toekomst heeft. De WBI-beoordeling wordt op termijn (standaard) probabilistisch, dus probabilistisch ontwerpen sluit daar goed op aan.

Probabilistisch ontwerpen maakt ontwerpen beter, en naar verwachting in 80% van de gevallen minder conservatief, met een kleinere versterkingsopgave. Weliswaar wordt er lokaal iets ingeleverd op veiligheid (minder conservatief), maar over het dijktraject als geheel is probabilistisch ontwerpen veiliger.

Op basis van interviews zijn de effecten – voor met name het waterschap en betrokken ingenieurs- en adviesbureaus – beschreven van het toepassen van AS voor STBI op (dijkversterkings)projecten. Daarnaast zijn voor een aantal projecten de aandachtspunten geïnventariseerd voor een succesvolle implementatie van AS en BS. Dit zijn onder andere:

- AS is vooral toegepast om de winstpotentie (reductie van de scope voor STBI) nader te kunnen onderbouwen.
Het opdoen van kennis en toepassingservaring wordt als belangrijk punt genoemd. Dit geldt vooral voor de faalkansanalyses.
- De kansenscan of expertsessie (AS-stap 0) was erg nuttig; het is dan ook belangrijk om deze vroeg in het proces te doen, in feite in elk project met een significante STBI-scope.
- Het toepassen van AS biedt kansen om de scope te verkleinen. Vanuit dat oogpunt is de businesscase snel rond, maar techniek is niet altijd leidend voor de beslissing om AS wel of niet toe te passen. Zo

is voor de Beoordeling conform WBI de businesscase complexer: de kosten voor AS-onderzoek zijn immers niet direct af te zetten tegen de reductie van de versterkingskosten, omdat de financiering bij verschillende partijen ligt.

Met name AS-stap 3 kost meer inspanning (en dus geld) dan een regulier onderzoek voor de Beoordeling.

- Uitgangspunten samenstellen (AS-stap 0) kost tijd en kan een iteratief proces zijn. Toepassing voor het gehele dijktraject kost veel inspanning en doorlooptijd; dit moet goed en tijdig in het proces worden ingepast.
- Het blijkt nuttig dat een doorkijk/vertaling wordt gemaakt van de resultaten van enkele dwarsprofielen naar de scope van het gehele dijktraject. De kansenscan wordt daarmee geactualiseerd.
- In de meeste gevallen zijn de waterschappen van plan om AS uit te rollen voor het gehele dijktraject.
- Voor gevallen waar de methode niet tot goedkeuren leidt hebben enkele waterschappen het voornemen geuit te onderzoeken welke voordelen een probabilistisch ontwerp biedt ten opzichte van een semi-probabilistisch ontwerp.
- Voor versterkingsprojecten waar AS wordt toegepast zal de Beoordeling in de toekomst ook probabilistisch moeten plaatsvinden (Riskeer).

Tot slot bevat dit rapport aanbevelingen die de (project)resultaten kunnen verbeteren of de uitkomst realistischer kunnen maken. Omdat de POVM eind 2020 ophoudt te bestaan, is het van belang dit onderzoek een goede plaats te geven in toekomstige onderzoeksprogramma's. Een eerste aanzet wordt/is reeds gegeven door enkele onderdelen op te nemen in de Kennis en Innovatie Agenda (KIA) van het HWBP.

De aanbevelingen in het kort:

- Documenten/handvatten dienen te worden opgesteld, bijv. voor inschatten kansrijkheid, correlaties, meerdere glijvlakken maatgeven, schematisering van een overleefde situatie (observatie) en inzetten van een proefbelasting. Daarnaast is ook de uitwerking van een praktijkvoorbeeld wenselijk.
- De vertaling van het resultaat van BS van dwarsprofiel naar dijkvak verdient nader onderzoek.
- Hoe om te gaan met reststerkte dient nader te worden onderzocht.
- Hoe om te gaan met BS, bijvoorbeeld bij een berekende hoge faalkans bij lage en of dagelijks optredende buitenwaterstanden, verdient nader onderzoek.
- Hoe om te gaan met de onzekerheid in opbarsten en opdrijven verdient nader onderzoek.
- Een betere definitie opstellen van het moment van begin van infiltratie door overslag (buitenwaterstand) en het moment van volledige verzadiging door infiltratie. Tevens een betere schematisering maken van de verzadiging (freatisch vlak) in de dijk.
- Meer aandacht voor de veiligheidsfilosofie voor regionale keringen.
- Hoe om te gaan met AS voor STBU verdient nader onderzoek.
- Bevorderen van de gebruikersvriendelijkheid van software en automatisering.



Referenties

- ENW (2009) Technisch Rapport Actuele Sterkte van dijken, Gedetailleerde en geavanceerde methoden voor de beoordeling van de macrostabiliteit binnenwaarts, Expertise Netwerk Waterveiligheid, 27 maart 2009.
- ENW (2016). Grondslagen voor hoogwaterbescherming. Expertise Netwerk Waterveiligheid. 2de druk 2017. ISBN/EAN: 978-90-8902-151-9
- Kanning, W. & Schweckendiek, T. (2017). Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating – Groene Versie – Macrostabiliteit Binnenwaarts. Deltares rapport 11200575-014-GEO-0001, Versie 3, 22 september 2017, definitief.
- KPR (2018). Factsheet: Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit, KPR 15 maart 2018.
- KPR (2019). Discussiestuk: Omgang met buitenwaartse stabiliteit (STBU) in het rivierengebied, KPR, 8 februari 2019.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017a). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I. Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen. RWS, WV, januari 2017.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017b). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II. Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017c). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage III. Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Rozing, A. & Visschedijk, M., (2020) Achtergrondrapport voor POVM-publicatie Actuele Sterkte Macrostabiliteit. POVM-rapport, Deltares kenmerk 11203414-002-GEO-0004.
- Rozing, A. & Schweckendiek, T. (2016). POVM Beter benutten actuele sterkte KJK. Activiteit 6 Faalkans updating 3 cases. POV Macrostabiliteit rapport, Deltares project: 1230804-002, definitief, versie 2, april 2017. Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2016a). Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit - WBI 2017. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rapport, definitief, versienummer 2.1, 1 december 2016.
- Rijkswaterstaat. (2017a). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen. RWS-WV, Rapport, versie OI2014v4, februari 2017, versienummer 4, Definitief.
- Rijkswaterstaat. (2017b). Schematiseringshandleiding piping. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rapport, definitief, versienummer 2.2, 2 januari 2017.
- Schweckendiek, T., van der Krogt, M., Rijnveld & Teixeira, A. (2017). Handreiking Faalkansanalyse Macrostabiliteit – Groene versie. Deltares rapport 11200575-016-GEO-0005, Versie 03, 3 oktober 2017, definitief.
- Teixeira, A.M., & Rosenbrand, E. (2017). Doorvertaling van bewezen sterkte resultaten naar een dijkvak. Deltares rapport 11200575-017-GEO-0002-jvm.
- Van der Meer, A., (2020) Macrostabiliteit Buitenwaarts. Deltares rapport 11204873-002
- Van Hoven, A., & Noordam, A., (2018) POVM Infiltratieproef II. Analyse Infiltratieproef IJsseldijk. Deltares rapport 11202663-002. Versie 03.



A Begrippenlijst

| Begrip | Omschrijving |
|--|--|
| belastingen | Op een constructie of waterkering uitgeoefende krachten. Macro-instabiliteit kan worden veroorzaakt door een combinatie van een hydraulische belasting (stijghoogte als functie van buitenwaterstand) en een mechanische belasting (gewicht, versnellingen). |
| betrouwbaarheidseis | Zie 'doelbetrouwbaarheid'. |
| betrouwbaarheidsindex (β) | Waarde die de mate van 'betrouwbaarheid' van een waterkering weergeeft. Een hoge waarde van de betrouwbaarheidsindex correspondeert met een kleine faalkans. |
| buitenwater | Oppervlaktewater waarvan de waterstand direct onder invloed staat van waterstand op zee, de grote rivieren. |
| dijkvak | Een deel van een waterkering met uniforme eigenschappen en belasting. |
| doelbetrouwbaarheid | De minimaal vereiste betrouwbaarheidsindex bij een bepaalde faalkanseis. |
| faalkans | Kans op overschrijden van een grenstoestand. |
| faalkans per dijkdoorsnede en faalmechanisme | De kans op het optreden van een faalmechanisme zoals macro-instabiliteit in een dijkdoorsnede. Doorvertaling via lengte-effectfactor van de faalkanseis per traject naar de maximaal toelaatbare kans op het optreden van een faalmechanisme als macro-instabiliteit in een doorsnede. Daarbij wordt gebruikgemaakt van een faalkansbegroting. |
| faalkansbegroting | Verdeling van de maximaal toelaatbare faalkans per dijktraject over de faalmechanismen. Wordt toegepast in de gedetailleerde toets per dijkvak, waarbij een faalkansbegroting wordt voorgeschreven. In de gedetailleerde toets per traject wordt de faalkansbegroting vrijgelaten. |
| faalkansberekening | Zie 'probabilistische analyse'. |
| faalkanseis per dijktraject | De maximaal toelaatbare faalkans voor een traject. Voor primaire keringen is deze faalkanseis vastgelegd in een wettelijke norm. |
| faalkansruimtefactor | De verhouding tussen de maximaal toelaatbare faalkans voor een mechanisme en de maximaal toelaatbare faalkans voor een dijktraject. Deze verhouding volgt uit de faalkansbegroting. |
| faalmechanisme | De opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot falen. |
| falen | Falen van een technisch systeem of onderdeel ervan houdt in dat het zich bevindt in een toestand waarbij een of meer functies daadwerkelijk niet meer (kunnen) worden vervuld. In de beoordeling van de veiligheid van de primaire waterkeringen is dat de waterkerende functie. |
| freatisch vlak | De vrije grondwaterspiegel, waar de waterdruk gelijk is aan nul. |
| groene dijk | Een dijk die zijn sterkte uitsluitend aan grond ontleent, zonder toepassing van constructieve elementen. |
| kansverdelingsfunctie | Een functie die van een stochastische variabele aangeeft wat de kans is dat deze variabele kleiner dan of gelijk aan een bepaalde waarde is. |
| kruin | 1. Strook tussen buitenkruinlijn en binnenkruinlijn; 2. Hoogste punt in het dwarsprofiel van het dijklichaam; 3. Buitenkruinlijn. |
| kruinhoogte | De hoogte van de waterkering. |

| Begrip | Omschrijving |
|--|--|
| lengte-effect | Invloed van de door ruimtelijke autocorrelatie bepaalde variaties van dijk- en ondergrondeigenschappen binnen een dijktraject op de faalkans van (een faalspoor binnen) dat dijktraject. Wiskundig gezien gelijk aan de verhouding tussen de faalkans van een 'uniform' dijktraject en de faalkans van een dwarsdoorsnede uit dat traject. |
| macro-instabiliteit | Het afschuiven van grote delen van het grondlichaam van een dijk langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel het evenwichtsverlies ten gevolge van het ontstaan van grote plastische zones. |
| macrostabieleit | De weerstand tegen het optreden van een glijvlak in het talud en de ondergrond. |
| overschrijdingskans overstromingskans | De kans dat de ontwerpwaterstand bereikt of overschreden wordt. De kans dat een gebied overstroomt doordat een dijktraject zijn kerende functie verliest. |
| probabilistische analyse | Een analyse waarbij expliciet rekening wordt gehouden met risico's en/of onzekerheden. In deze analyse wordt aan elke mogelijke waarde van een onzekere grootte een kans van voorkomen of kansdichtheid toegekend. Dit wordt ook wel faalkansanalyse genoemd. In deze analyses is gebruikgemaakt van FORM (First Order Reliability Method). Andere methoden zijn: Numerieke integratie en Monte Carlo-analyse. |
| rekenwaarde | De rekenwaarde is de representatieve waarde gedeeld door (sterkte) – of vermenigvuldigd met (belasting) – een partiële veiligheidsfactor. |
| semi-probabilistische analyse | Een deterministische analyse waarin conservatieve rekenwaarden voor sterkte en belasting worden toegepast door karakteristieke waarden te combineren met partiële veiligheidsfactoren. |
| stabiliteitsfactor (SF) | De factor waarin het verschil tussen sterkte en belasting wordt uitgedrukt voor het mechanisme macrostabieleit. |
| stochastische variabele | Een onzekere grootte die wordt gekarakteriseerd door een kansverdelingsfunctie. |
| voorland | Buitendijks terrein tussen de dijk en de rivier, of ondiepe waterbodem voor de teen van de dijk. |

B ENW-advies

B.1 Advies Bewezen Sterkte

Aan Directoraat-Generaal Ruimte en Water, 10 maart 2017
(zie ook <https://www.enwinfo.nl/index.php/adviezen-2017-2>)

Het onderwerp Bewezen Sterkte staat al langer op de agenda van het ENW. Door DGRW en Rijkswaterstaat wordt in nauwe samenwerking met Deltares en enkele beheerders gewerkt aan het ontwikkelen van een praktisch toepasbare methode, in eerste instantie gericht op het meenemen overleefde belastingen bij macrostabiliteitsanalyses. Het ENW herhaalt haar eerdere advies aan DGRW over de juistheid van de methode, die generiek toepasbaar is, maar wel altijd maatwerk vergt bij toepassing in een project. De methode is nu dermate ver uitgewerkt, dat geadviseerd wordt het concept op meerdere plekken te gaan toepassen. Ook voor de Markermeerdijken ziet het ENW kansen, zeker als een werkwijze wordt gevolgd zoals bij project KIJK van HHSK.

Navolgend is de formele brief weergegeven.



Ministerie van Infrastructuur en Milieu
T.a.v. de Directeur-Generaal Ruimte en Water
de heer drs. P.R. Heij
Postbus 20901
2500 EX DEN HAAG

Contactpersonen
ir. D.P. de Bake

Datum
10 maart 2017

Ons kenmerk
ENW-17-08

Onderwerp
Advies bewezen sterkte

Telefoonnummer
06 30389143

Bijlage(n)

Uw kenmerk
IENM/BSK-2016/115893

Afschrift aan
Nijenhuis, DGRW

Geachte heer Heij,

U heeft op 2 juni 2016 een adviesvraag aan het ENW gesteld over de kwaliteit en toepasbaarheid van de ontwikkelde methode voor het toepassen van het concept bewezen sterkte bij het beoordelen van 'stabieleit binnenwaarts' (ref. IENM/BSK-2016/115893). U heeft het ENW gevraagd op de volgende vijf aspecten in te gaan.

1. Juistheid van de methode
2. Toepasbaarheid voor het faalmechanisme macrostabieleit binnenwaarts bij meerdijken
3. De toepassingsvoorwaarden bij de methode (par. 6.5)
4. Aandachtspunten voor de toepassing van de methode op meerdijken
5. Indien mogelijk, een inschatting van de mogelijke impact van de methode op meerdijken

In oktober 2016 heeft het ENW positief geadviseerd over de methode (advies ENW-16-13). Nieuw beschikbare informatie geeft geen aanleiding dit advies te herzien. In voorliggend advies komen de punten 2 t/m 5 aan bod.

Wanneer het over de methode bewezen sterkte gaat, wordt bedoeld op een probabilistische faalkans-analyse waarbinnen 'reliability updating' wordt toegepast. Reliability updating houdt in dat in het verleden overleefde belastingen expliciet mee worden genomen in de analyse. Er vindt feitelijk een correctie op de berekende faalkans plaats.

De sterkte en daarmee de veiligheid van een dijk wordt op deze manier beter ingeschat wat resulteert in een nauwkeuriger veiligheidsbeeld dan een reguliere semi-probabilistische analyse. Door het nauwkeuriger veiligheidsbeeld na de faalkansanalyse (al dan niet in combinatie met reliability updating) kan mogelijk wel aan de eis worden voldaan, waardoor deze technieken mogelijk ingrijpende dijkversterkingen kunnen verminderen of voorkomen.

Sinds het positieve ENW advies over de methode uit oktober 2016 is meer informatie beschikbaar gekomen, waaronder een geactualiseerde beschrijving van de methode en enkele uitgewerkte cases. Deze nieuwe informatie bevestigt ons eerdere advies over de juistheid van de methode. De methode is generiek toepasbaar, dat wil zeggen voor meerdijken, maar ook voor bijvoorbeeld rivierdijken. Er zijn nauwelijks

Expertisenetwerk Waterveiligheid

Zuiderwagenvlein 2
Postbus 17
8200 AA Lelystad

telefoon 06-51-61-79-00
e-mail enwsecretariaat@rws.rj
internet www.enwinfo.nl

BTW-nummer NL0032.14.412.B.23

toepassingsvoorwaarden. Wel is toepassen van de methode maatwerk en is een passend inhoudelijk niveau vereist om de analyses uit te voeren. In de verschillende watersystemen zal de methode echter meer of minder opleveren.

Het project 'Beter benutten actuele sterkte' voor de dijken langs de Hollandse IJssel (project KIJK) heeft in de afgelopen periode aangetoond dat ook daar de methode toepasbaar is en dat de veiligheidsopgave substantieel lijkt te kunnen worden verkleind. De eerste resultaten gebaseerd op drie uitgewerkte cases zijn in elk geval erg hoopvol. Dat vereiste wel een maatwerk aanpak. Begeleid door specialisten van Deltares, zijn drie teams (twee adviesbureaus en Deltares zelf) met de door Deltares ontwikkelde methode en software aan de slag gegaan, waardoor er interactie ontstond tussen de ontwikkelaars van de methode en de gebruikers, maar ook tussen de gebruikers onderling. Keuzes zijn met elkaar gedeeld en uitgediscussieerd, resultaten zijn gezamenlijk besproken waardoor vertrouwen ontstond. Een aanpak in een dergelijke 'beheerste setting' is wat het ENW betreft een voorbeeld en eigenlijk essentieel om vertrouwen te krijgen in een nieuwe methode. Het ENW raadt deze werkwijze dan ook van harte aan.

Geadviseerd wordt dan ook om bij het elders toepassen van deze nog in ontwikkeling zijnde methode aan te sluiten bij de werkwijze die ook voor de Hollandse IJssel is gehanteerd. Op deze manier kunnen eventuele tekortkomingen in de toepassing van de methode vroegtijdig worden gesignaleerd en opgelost. Dit draagt niet alleen bij aan een beter resultaat van de analyses, maar ook aan het verbeteren van de methode.

Ook voor het project Markermeerdijken ziet het ENW nog steeds mogelijkheden. Hoewel het ENW zich realiseert dat dit project inmiddels vergevorderd is in de planstudie, acht het ENW het raadzaam om probabilistische stabiliteitsanalyses en reliability updating uit te voeren analoog aan die bij het project KIJK. Of de methode bij de Markermeerdijken eveneens significant positieve resultaten oplevert, blijft de vraag. Een inschatting van het effect kan het ENW op voorhand niet maken. De situaties zijn immers verschillend, bijvoorbeeld wat betreft de ondergrond, opbouw van de dijken en overleefde belastingen. Door een aantal dwarsdoorsneden te analyseren moet naar het inzicht van het ENW spoedig duidelijkheid ontstaan over het effect van deze analyse op de scope van het project.

Het ENW wil wel graag aandacht vestigen op de volgende aspecten bij het toepassen en doorontwikkelen van de methode:

- De aanname dat bij overslag de waterkering als gevolg van infiltratie volledig verzadigd zal zijn, is mogelijk conservatief. De probabilistische benadering wordt hier nog niet volledig gevolgd.
- Bezijken hoeft niet in alle gevallen tot een overstroming te leiden, wanneer het overgebleven profiel nog voldoende reststerkte bezit (bijvoorbeeld bij een ondiep glijvlak). Dit betekent dat de berekende faalkans nog verder kan worden verkleind.
- Het ENW onderschrijft het voornemen om de methode dusdanig door te ontwikkelen dat deze ook toepasbaar wordt voor andere faalmechanismen dan macrostabiliteit en voor meerdere typen belastingen en observaties. Ook is het van het grootste belang de methode toepasbaar te maken voor gebruik in het ontwerp van verschillende typen waterkeringen, waaronder ook kunstwerken. Er moet voldoende aandacht zijn voor de vertaling van de methode naar praktisch toepasbare software voor de verschillende faalmechanismen.

Wij hopen u naar tevredenheid van advies te hebben voorzien.

Hoogachtend,



Ir. G. Verwolf
Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid

B.2 Advies Beter benutten actuele sterkte (KIJK)

Aan Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard, 10 maart 2017
(zie ook <https://www.enwinfo.nl/index.php/adviezen-2017-2>)

Het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard heeft het ENW om advies gevraagd over het beter benutten van actuele sterkte van de dijken gelegen langs de Hollandse IJssel aan de Krimpenerwaardzijde tussen Gouda en Krimpen aan den IJssel. Onder actuele sterkte wordt verstaan de combinatie van gedegen schematiseren, probabilistisch rekenen en het in rekening brengen van overleefde belastingen. Het ENW acht de aanpak zorgvuldig en juist en juicht de gekozen werkwijze, met meerdere teams die elkaars werk beoordelen en bespreken, van harte toe. Voor dit project blijkt nauwkeurig schematiseren en het uitvoeren van probabilistische berekeningen (stap 1 en 2) al tot een aanzienlijke reductie van de faalkans te leiden, met als resultaat het goedkeuren van twee van de drie beschouwde doorsneden. Een bepalende factor is overslag en infiltratie. Helaas zijn hiervan geen historische gegevens beschikbaar, waardoor het effect van Bewezen Sterkte (stap 3) is in deze gevallen beperkt is. Dit komt mede door de al hoge betrouwbaarheid en dus lage faalkans die al in stap 2 is bereikt. Het ENW is ondersteunt het voorstel praktijkproeven te doen gericht op infiltratie en verzadiging.

Navolgend is de formele brief weergegeven.



College van dijkgraaf en hoogheemraden
van Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard
Postbus 4059
3006 AB ROTTERDAM

Contactpersonen
ir. D.P. de Bake

Datum
10 maart 2017

Ons kenmerk
ENW-17-07

Onderwerp
Advies Beter benutten actuele sterkte KIIK

Telefoonnummer
06 30389143

Bijlage(n)

Uw kenmerk
2017.00505

Afschrift aan
Werumeus Buning, HHSK
Stoop, HHSK
Heij, DGRW

Geacht college,

U heeft op 23 januari 2017 een adviesvraag bij het ENW ingediend (ref 2017.00505) over het beter benutten van actuele sterkte van de dijken gelegen langs de Hollandse IJssel aan de Krimpenerwaardzijde tussen Gouda en Krimpen aan den IJssel. Deze dijken zijn in de 3^e toetsronde afgekeurd op macrostabiliteit. Tijdens de stormvloed van 1953 heeft de dijk langs de Krimpenerwaard een hogere waterstand moeten keren dan de waterstand die bij de oude en nieuwe norm is gehanteerd voor toetsing respectievelijk stabiliteitsberekeningen. Dit gegeven vormde aanleiding om binnen de POV Macrostabiliteit het deelproject 'Beter benutten actuele sterkte KIIK' te starten, waarbinnen een nadere beschouwing van de veiligheid tegen verlies van binnenwaartse macrostabiliteit is uitgevoerd, in drie stappen:

1. Aanscherpen van de conventionele semi-probabilistische analyses aangescherpt door detaillering van de schematisering, mede op basis van eerder in POV-M kader uitgevoerd grondonderzoek en monitoring.
2. Uitvoeren van een probabilistische faalkansanalyse.
3. Informatie van overleefde belastingcondities toevoegen middels de bewezensterktetechniek. (Eng: 'reliability updating with past performance'), wat in geval van significante observaties van dominante belastingen tot verhoging van de betrouwbaarheid leidt.

U heeft, specifiek ten aanzien van het project KIIK, de volgende vier vragen gesteld.

1. Acht het ENW de omschreven aanpak en het daarmee behaalde resultaat van de uitvoering van stap II op profielniveau van voldoende kwaliteit om stand te kunnen houden bij een eerstvolgende beoordelingsronde?
2. Indien het antwoord op de eerste vraag niet zonder voorbehoud bevestigend is, welke aspecten in de uitwerking worden dan nog gemist of welke bezwaren staan dan nog in de weg?
3. Welke aanbevelingen heeft het ENW ten aanzien van de uitwerking van de vertaling van de behaalde resultaten van stap II op profielniveau naar resultaten op deeltrajectniveau van zekere lengte?

Expertisenetwerk Waterveiligheid

Zuiderwagenplein 2
Postbus 47
8200 AA Lelystad

telefoon 06-5161-79-80
e-mail enwsecretariaat@rws.nl
internet www.enwinfo.nl

BTW-nummer NL0032.14.412.B.23

4. Acht het ENW de voorgestelde proefbelasting in de vorm van infiltratie van de dijk, zoals omschreven in het rapport 'Faalkans updating 3 cases', kansrijk om waar nodig alsnog voldoende veiligheid ten aanzien van binnenwaartse macrostabieleit aan te tonen?

Voor dit advies is gebruik gemaakt van het POV-Macrostabieleit-rapport 'Beter benutten actuele sterkte KIJK' van december 2016, drie bijbehorende uitgewerkte cases, resultaten van een eerder uitgevoerde expert-review en een mondelinge toelichting op uw vraag door de heer Stoop (HHSK) en het uitgevoerde onderzoek door de heer Schweckendiek (Deltares) in de ENW-werkgroep Veiligheid vergadering van 2 februari 2017.

Het onderzoek dat momenteel binnen de POV Macrostabieleit wordt uitgevoerd is niet projectspecifiek en reikt dus verder dan project KIJK. Het ENW wordt op de hoogte gehouden van de voortgang van de POV en ziet uit naar de (tussen)resultaten die dit jaar worden verwacht.

Algemene opmerkingen

Als gevolg van nauwkeurig schematiseren en het uitvoeren van probabilistische berekeningen (stap 1 en 2) wordt een aanzienlijke reductie van de faalkans verkregen met als resultaat het goedkeuren van twee van de drie doorsneden. De bepalende factor bij de beoordeling is overslag en infiltratie. Het effect van Bewezen Sterkte (stap 3) is in deze gevallen beperkt vanwege de al hoge betrouwbaarheid en dus lage faalkans die al in stap 2 is bereikt. Daarnaast is er geen (zekere) observatie van de verzadigingsgraad van de dijken in 1953 beschikbaar. In de berekeningen is daarom het conservatieve uitgangspunt van volledige infiltratie gehanteerd en is inzichtelijk gemaakt dat een lagere freatische lijn de betrouwbaarheid aanzienlijk vergroot. Uw voorstel om door middel van infiltratieproeven (al dan niet in combinatie met beperkte bovenbelasting) condities te creëren om de invloed van infiltratie op de freatische lijn te onderzoeken, ondersteunt het ENW van harte.

Antwoorden op vragen

1. *Acht het ENW de omschreven aanpak en het daarmee behaalde resultaat van de uitvoering van stap II op profielniveau van voldoende kwaliteit om stand te kunnen houden bij een eerstvolgende beoordelingsronde?*

De aanpak oogt heel zorgvuldig en de theoretische principes worden goed toegepast. Uit zowel de rapportage, de cases als de toelichting in de ENW-werkgroep Veiligheid spreekt veel begrip voor de materie en dat wekt vertrouwen. Ook de kwaliteitsborging is zorgvuldig uitgevoerd, doordat drie teams hun resultaten over de drie cases onderling hebben uitgewisseld en besproken. Deze manier van werken juicht het ENW toe.

Of zowel de aanpak als de resultaten van voldoende niveau zijn om stand te kunnen houden bij een eerstvolgende beoordelingsronde, hangt af van de vraag of er nog tegenvallers optreden bij de verdere ontwikkeling. Het ENW acht dit onwaarschijnlijk omdat er bij de huidige toepassing is uitgegaan van een aantal conservatieve uitgangspunten.

2. *Indien het antwoord op de eerste vraag niet zonder voorbehoud bevestigend is, welke aspecten in de uitwerking worden dan nog gemist of welke bezwaren staan dan nog in de weg?*

Er lijkt nog ruimte te zijn voor optimalisatie van de methode, leidend tot minder conservatisme en beter passend bij de probabilistische aanpak. Dit leidt naar verwachting tot een nog scherpere beoordeling van de veiligheid en daarmee tot een reductie van de veiligheidsopgave. Op de volgende aspecten zijn naar het inzicht van het ENW nog conservatieve aannames gehanteerd:

- De kans op golfoverslag van meer dan 1 l/m/s (die zeer bepalend is voor de kans op macro-instabiliteit) bij uiteenlopende waterstanden is conservatief bepaald en niet bepaald op basis van de gezamenlijke statistiek van waterstanden en golven.



- Aanneمة van volledige verzadiging bij overslag.
- Bezwijken hoeft niet altijd tot overstroming te leiden, wanneer het overgebleven profiel nog voldoende reststerkte bezit.

Het nog aanwezige conservatisme is overigens onderdeel van een bredere problematiek. De oplossing ligt vooral in het in de praktijk toepassen van de nieuwe norm in termen van de overstromingskans en bijbehorende nieuwe rekenmethoden. Bij een zorgvuldige implementatie van de overstromingskans zullen conservatieve aannames geleidelijk verdwijnen en er zal ook meer balans komen in de resultaten van berekeningen.

3. *Welke aanbevelingen heeft het ENW ten aanzien van de uitwerking van de vertaling van de behaalde resultaten van stap II op profielniveau naar resultaten op deeltrajectniveau van zekere lengte?*

De vertaling van profiel- naar deeltrajectniveau verandert niet door de methode van bewezen sterkte. Vandaar dat er kan worden aangesloten bij de werkwijze die hiervoor is ontwikkeld binnen het wettelijke beoordelingsinstrumentarium en VNK.

4. *Acht het ENW de voorgestelde proefbelasting in de vorm van infiltratie van de dijk, zoals omschreven in het rapport 'Faalkans updating 3 cases', kansrijk om waar nodig alsnog voldoende veiligheid ten aanzien van binnenwaartse macrostabiliteit aan te tonen?*

U stelt voor om met proefbelasting gericht op infiltratie en verzadiging (eventueel met beperkte bovenbelasting) condities te creëren om de invloed van infiltratie op de freatische lijn te onderzoeken. Hierdoor kan (ook) de faalkansanalyse in stap 2 mogelijk 'scherper' worden, hetgeen mogelijk winst kan opleveren bij andere dijkvakken. Het ENW pleit ervoor om ook proeflocaties die bij stap 2 al worden 'goedgekeurd', bij de selectie van proeflocaties te betrekken. Hoewel de keuze voor een proefduur van 8 uur op basis van sluitduur van de Hollandse IJsselkering logisch klinkt, raadt het ENW aan om de proef langer te laten doorlopen. Mocht in een later stadium bijvoorbeeld blijken dat op basis van veranderde inzichten de dijken toch wat langer zullen worden belast, dan hoeven de proeven niet opnieuw te worden uitgevoerd. Ook is het verstandig om nog eens goed te kijken of de breedte van de proefbelasting van 35 m voldoende is vanwege effecten aan de rand van de proeflocatie.

Tenslotte

Bij het advies uit 2015 aan DGRW over de normering van de toenmalige B-keringen (ENW-V-15-07) heeft het ENW onder andere voor de Maeslant- en Hollandse IJsselkering geadviseerd een integrale systeembeschouwing uit te voeren, waarbij de doelmatigheid dient te worden nagegaan van een strengere eis aan voorliggende kering(en) en minder strengere normen voor de waterkeringen langs de Hollandse IJssel ten opzichte van de huidige normen in de Waterwet. Op dit moment wordt onderzocht welke oplossingen voor de Hollandse IJssel het best passend zijn. Het ENW wil graag op de hoogte worden gesteld van de afwegingen die met betrekking tot de Hollandse IJsselkering zijn of nog worden gemaakt.

Wij hopen u naar tevredenheid van advies te hebben voorzien.

Hoogachtend,

Ir. G. Verwolf
Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid

Colofon

Deze publicatie is opgesteld in opdracht van

POV Macrostablieit, onderdeel van het Hoogwaterbeschermingsprogramma

Trekker van de POV Macrostablieit

Waterschap Rivierenland

Postbus 599

4000 AN Tiel

(0344) 64 90 90

Auteurs

Esther Rosenbrand

Arno Rozing

Redactie

Lijn43

Vormgeving

mariëtte jongen vormgeving

ISBN/EAN: 978-90-829248-4-8

© POV Macrostablieit, 2020

Aansprakelijkheid

De POV Macrostablieit en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. De POV Macrostablieit sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product.



Contact

**Deze publicatie is opgesteld
in opdracht van**
POV Macrostabiteit, onderdeel van het
Hoogwaterbeschermingsprogramma

Trekker van de POV Macrostabiteit
Waterschap Rivierenland
Postbus 599
4000 AN Tiel
(0344) 64 90 90