

Raamwerk voor analyse overstromingskans geotechnische instabiliteit van dijken



Auteur(s)

Jan Blinde

Alexander van Duinen

Alfons Smale

Raamwerk voor analyse overstromingskans geotechnische instabiliteit van dijken

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	M. Hulst
Referenties	
Trefwoorden	Waterkeringen, faalpaden, taludstabiliteit, afschuiven, afdrukken, uitspoelen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	15-12-2022
Projectnummer	11208057-032
Document ID	11208057-032-GEO-0001
Pagina's	38
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Jan Blinde Alexander van Duinen Alfons Smale	

Samenvatting

Een geotechnische instabiliteit kan door verschillende oorzaken optreden. Bij het bepalen van de overstromingskans door een geotechnische instabiliteit spelen verschillende mechanismen een rol: afschuiven en uitspoelen. De mechanismen kunnen meestal niet gelijktijdig optreden, sterker nog soms sluiten ze elkaar uit (causale interactie mechanismen). Omdat daarnaast de kans op de verschillende mechanismen wordt bepaald door min of meer dezelfde eigenschappen van de kering (statistische correlatie) dienen de mechanismen in samenhang te worden beschouwd. Wanneer de mechanismen los van elkaar worden beschouwd, wordt geen rekening gehouden met de interactie tussen mechanismen en worden onzekerheden over de eigenschappen soms dubbel meegenomen waardoor de overstromingskans sterk wordt overschat.

Bepalend voor het optreden van een dijkinstabiliteit bij een verhoogde buitenwaterstand zijn de opbouw van de dijk en de ondergrond, het vrijboord bij de verhoogde waterstand, de golfcondities bij dezelfde verhoogde waterstand, de grondwaterstroming als gevolg van een verandering in de hydraulische belasting en de fysische processen die in de dijk en de ondergrond plaats vinden onder invloed van de grondwaterstroming. De dijkconfiguratie en het al dan niet optreden van golfoverslag (binnentalud) of golfklappen (buitentalud), de grondwaterstroming en de sterkte van de dijk bepalen welk fysisch proces optreedt en of het om een diep of ondiep mechanisme gaat.

De genoemde mechanismen kunnen elk een initiërend mechanisme zijn welke kan leiden tot een overstroming. In veel gevallen zullen vervolprocessen nodig zijn om daadwerkelijk tot een overstroming te komen. De hier genoemde initiërende mechanismen kunnen ook vervolprocessen zijn.

Dit rapport bevat het raamwerk voor een integrale analyse van dijkstabiliteit voor gangbare dijktypen en verschillende watersystemen, met daar voorkomende hydraulische belastingen. Vanuit het raamwerk wordt per watersysteem en dijktype een overzicht gegeven van analyses (initieel mechanisme of vervolmechanisme) waarmee een scherpere analyse van de overstromingskans kan worden uitgevoerd. Daarbij ligt de focus op een instabiliteit aan de land (binnen) zijde van de waterkering. Waar relevant wordt het raamwerk uitgebreid met een instabiliteit aan de buiten (rivier) zijde. Vanuit het raamwerk worden de prioritaire kennisleemten beschreven.

Dit document is het resultaat van lopend onderzoek. Enkele hoofdstukken en paragrafen zijn nog niet ingevuld. De paragrafen over samenhang en vervolprocessen zijn nog niet of onvoldoende met gebruikers besproken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en kader	7
1.2	Probleemstelling	7
1.3	Doelstelling	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Achtergrond en kader	9
2.1	Van overschrijdingskansbenadering naar overstromingskansbenadering	9
2.2	Geotechnische instabiliteit en ketens van gebeurtenissen	9
3	Raamwerk analyse geotechnische instabiliteit	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Opbouw dijk en ondergrond van primaire waterkeringen	14
3.3	Initiële mechanismen geotechnische instabiliteit	15
3.3.1	Afschuiven	15
3.3.2	Uitspoelen	17
3.4	Samenhang initiële mechanismen	18
3.4.1	Relevante en/of dominante mechanismen	18
3.4.2	Werken met scenario's	20
3.5	Vervolgprocessen	21
3.5.1	Inleiding	21
3.5.2	Erosie	22
3.5.3	Zettingsvloeiing	22
3.6	Samenhang initiële mechanismen en vervolgprocessen	23
4	Toepassing raamwerk	27
4.1	Bepalen relevantie en dominante initiële mechanismen	27
4.2	Bepalen te beschouwen scenario's en bepalen analyse voor eerste bepaling overstromingskans	27
4.3	Voorbeelden	28
4.3.1	Zanddijk met kleibekleding	28
4.3.2	Kleidijk	29
5	Kennisleemten	31
6	Conclusies	32
7	Aanbevelingen	33
	Referenties	34

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en kader

Voor de hoogwaterbescherming in Nederland is in 2017 de overstap gemaakt van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering. Voor een goede bepaling van de overstromingskans is het belangrijk om het gedrag van de kering centraal te zetten en het gehele faalproces tot doorbraak te beschouwen: alleen dan kan tot een realistische inschatting van de overstromingskans worden gekomen. Een goede inschatting van de overstromingskans wil zeggen dat de juiste informatie ten aanzien van de bijdragen aan overstromingskans beschikbaar is om de juiste beslissingen te nemen ten aanzien van beleid, beheer, onderhoud en versterken.

In de achterliggende jaren is nagedacht over de manier waarop we het gedrag van de waterkering meer centraal kunnen zetten bij het bepalen van de overstromingskans. In het onderzoeksprogramma Kennis voor Keringen wordt een aanpak ontwikkeld waarbij (meer) vanuit fysica en samenhang van mechanismen en eigenschappen van de kering een overstromingskans wordt bepaald en minder vanuit de beoordelingssporen uit het WBI2017.

Voor de nieuwe aanpak van het analyseren van overstromingskansen worden in 2022 een knopenkaart en raamwerken per faalmechanisme ontwikkeld. Deze memo beschrijft het raamwerk voor het faalmechanisme geotechnische instabiliteit.

1.2 Probleemstelling

De overstromingskansen die met het huidige (2017) instrumentarium worden berekend, zijn vaak een overschatting (conservatief), omdat causale interactie tussen beoordelingssporen en statistische correlaties niet of beperkt worden meegenomen en geen rekening wordt gehouden met vervolprocessen die nodig zijn om tot falen van een waterkering en een overstroming te komen. Daarmee sluit het huidige instrumentarium nog niet volledig aan op de overstromingskansbenadering.

In het huidige instrumentarium worden verschillende mechanismen die een geotechnische instabiliteit veroorzaken afzonderlijk van elkaar beschouwd, terwijl deze mechanismen vanuit het verhaal van de kering en vanuit de ketens van gebeurtenissen die tot falen van een waterkeringen kunnen leiden veel raakvlakken hebben. De mechanismen die betrekking hebben op de instabiliteit van (binnen)taluds van dijken worden los van elkaar in verschillende beoordelingssporen GABI, STMI, STBI geanalyseerd. Deze mechanismen hebben overlap (sterkte toplaag, schuifvlakmodel en invloed waterspanningen al dan niet door overslag), maar worden op verschillende manieren geanalyseerd. De mechanismen kennen een verschillend niveau van uitwerking. Hetzelfde geldt voor de mechanismen die betrekking hebben op de instabiliteit van buitentaluds (beoordelingssporen STBU en GABU).

In 2021 is door het Adviesteam Dijkontwerp de Rode draden nr. 4 – Bekleding op het binnentalud uitgebracht. Het Adviesteam ziet dat veel dijkversterkingsprojecten worstelen met de vraag welk effect de overstromingskansbenadering heeft op het ontwerp van de bekleding op het binnentalud van waterkeringen. Projecten lopen in hun ontwerppoging tegen kennisleemtes aan. Het memo van het Adviesteam geeft aan hoe je met de kennisleemtes om kunt gaan maar geeft geen concrete oplossingen voor de geconstateerde kennisleemtes.

1.3 Doelstelling

Vanuit de fysica van de mechanismen, het verhaal van de kering en faalpaden, is het voor de hand liggend om de mechanismen die betrekking hebben op de geotechnische instabiliteit van het binnentalud geïntegreerd te beschouwen. In de Ministeriële Regeling voor beoordelen (bijlage XXXIIa van de Omgevingsregeling) wordt de stabiliteit van het binnentalud integraal beschouwd en geen onderscheid gemaakt tussen de beoordelingssporen GABI, STMI en STBI.

In dit project wordt een raamwerk opgezet als basis voor het geïntegreerd uitvoeren van de overstromingskansanalyse van geotechnische instabiliteit en relevante kennisvragen te definiëren voor de bepaling van een realistischer overstromingskans. Het raamwerk maakt gebruik van faalpaden en sluit aan op het 'verhaal van de kering'. In het raamwerk worden de fysische processen centraal gesteld in plaats van bestaande beoordelingssporen. In dit raamwerk wordt voor gangbare dijktypen, verschillende watersystemen met daar voorkomende hydraulische belastingen aangegeven hoe een overstromingskansanalyse van de geotechnische instabiliteit geïntegreerd wordt uitgevoerd.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de achtergrond en het kader van het raamwerk toegelicht. Ter verdere toelichting is daarvoor in Bijlage A de huidige situatie van het WBI 2017 ten aanzien van de toetssporen GABI, GABU, STMI, STBI en STBU geschetst. In Hoofdstuk 3 wordt eerst een generiek en beknopt overzicht gegeven van primaire waterkeringen in Nederland. In paragraaf 3.3 wordt ingegaan op de initiële fysische processen afschuiven en uitspoelen. De samenhang tussen deze mechanismen wordt in paragraaf 3.4 beschreven. In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op de vervolprocessen. In Hoofdstuk 4 wordt het raamwerk voor verschillende dijktypen uitgewerkt. In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de kennisleemtes, die vanuit de voorgaande hoofdstukken zijn geïdentificeerd. In Hoofdstuk 6 worden de conclusies getrokken en in Hoofdstuk 7 worden aanbevelingen gedaan.

Dit document is het resultaat van lopend onderzoek. De hoofdstukken 4 tot en met 7 zijn nog niet of onvolledig ingevuld. De paragrafen over samenhang (§ 3.4) en vervolprocessen (§ 3.5) zijn nog niet of onvoldoende met gebruikers besproken.

2 Achtergrond en kader

2.1 Van overschrijdingskansbenadering naar overstromingskansbenadering

Voor de hoogwaterbescherming in Nederland is in 2017 de overstap gemaakt van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering. Bij de overschrijdingskansbenadering was het veiligheidsniveau van waterkeringen en van alle afzonderlijke faalmechanismen die bij waterkeringen kunnen optreden, gekoppeld aan een maatgevende hydraulische belasting. De maatgevende belasting was daarbij gekoppeld aan een terugkeertijd die per dijkkring in de wet was vastgelegd. Bij deze hydraulische belasting moest de waterkering (in al zijn functies) nog functioneren. Bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen stond het begin van bezwijken, dus schade, centraal en niet het optreden van een overstroming. Aangetoond moest worden dat bij de maatgevende belasting geen schade aan de kering plaats zou vinden. Alle onderdelen van de kering en mogelijke (initiële) mechanismen werden los van elkaar geanalyseerd. In het Voorschrift Toetsen op Veiligheid zijn voor elk (initieel) mechanisme regels (beoordelingssporen) afgeleid waarmee de veiligheid kan worden aangetoond.

In de overstromingskansbenadering zijn maximaal toelaatbare overstromingskansen vastgelegd. Daarbij gaat het om de gemiddelde kans per jaar dat een gebied daadwerkelijk overstroomt met significante schade en slachtoffers tot gevolg. Bij de maximaal toelaatbare overstromingskans zijn signaalwaarden gedefinieerd zodat op tijd maatregelen kunnen worden genomen waardoor de overstromingskans niet hoger wordt dan de maximaal toelaatbare waarde. Voor het bepalen van de overstromingskans dienen alle onderdelen en mechanismen van een waterkering in samenhang te worden beschouwd. Daarbij is het niet voldoende om alleen het initiële mechanisme (begin van bezwijken) te analyseren. Afhankelijk van het type waterkering en de geometrie en de opbouw van de waterkering en het watersysteem waar een waterkering zich bevindt en de daar voorkomende hydraulische belastingen kan het zijn dat na het begin van bezwijken nog geen water in de polder stroomt en vervolprocessen nodig zijn om tot falen van de waterkering te leiden.

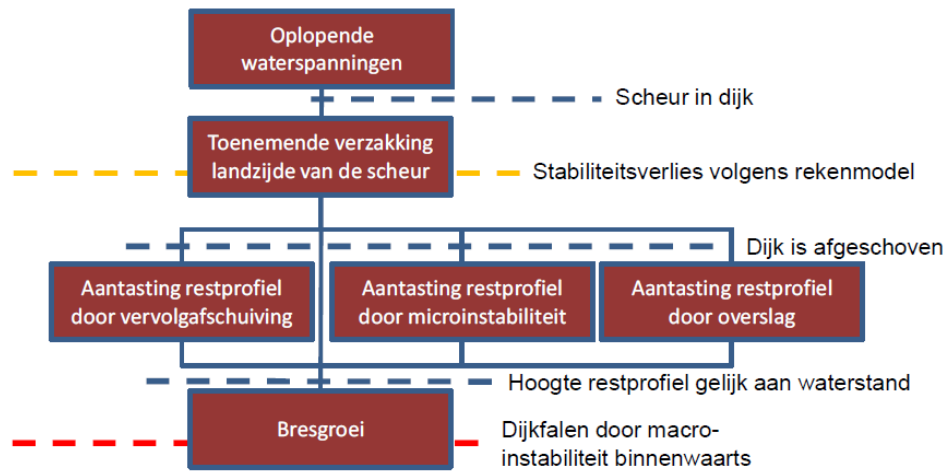
2.2 Geotechnische instabiliteit en ketens van gebeurtenissen

Een geotechnische instabiliteit kan verschillende oorzaken hebben. Bij het bepalen van de overstromingskans door een geotechnische instabiliteit spelen verschillende mechanismen een rol: afschuiven, afdrukken en uitspoelen. De mechanismen kunnen meestal niet gelijktijdig optreden, sterker nog soms sluiten ze elkaar uit (causale interactie mechanismen). Omdat daarnaast de kans op de verschillende mechanismen wordt bepaald door min of meer dezelfde eigenschappen van de kering (statistische correlatie) dienen de mechanismen in samenhang te worden beschouwd. Wanneer de mechanismen los van elkaar worden beschouwd, wordt geen rekening gehouden met de interactie tussen mechanismen en worden onzekerheden over de eigenschappen dubbel meegenomen waardoor de overstromingskans sterk wordt overschat.

De genoemde mechanismen kunnen elk een initiërend mechanisme zijn welke kan leiden tot een overstroming. In veel gevallen zullen vervolprocessen nodig zijn om daadwerkelijk tot een overstroming te komen. De hier gedefinieerde initiërende mechanismen kunnen ook als vervolproces optreden.

In Figuur 2.1 en Figuur 2.2 zijn twee voorbeelden gegeven van mogelijke ketens van gebeurtenissen die kunnen leiden tot overstroming van het achterland. In Figuur 2.1 gaat het om een mogelijke keten van gebeurtenissen die kan leiden tot falen van een waterkering als

gevolg van afschuiven (macro-instabiliteit conform WBI 2017) en daardoor tot een overstroming ('t Hart, 2018). Na het optreden van een taludafschuiving zijn het andere processen die het dijkprofiel verder aantasten, totdat een bres ontstaat, waardoor een gebied kan overstromen. ¹

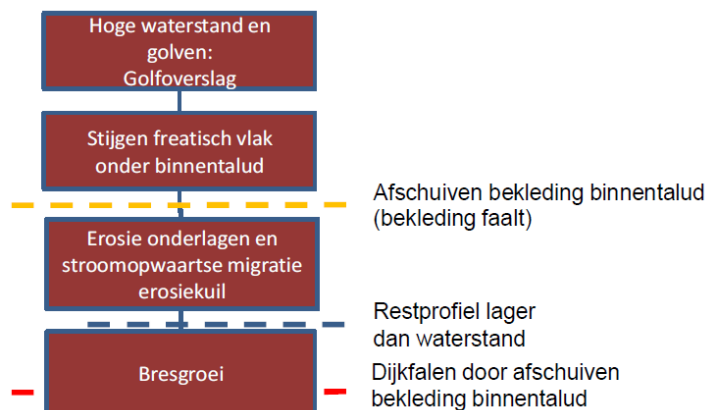


Figuur 2.1 Overzicht van mogelijke ketens van gebeurtenissen zoals beschreven in WBI 2017 die tot falen van een waterkering leiden als gevolg van afschuiving van het binnentalud ('t Hart, 2018).

Figuur 2.2 geeft de mogelijke ketens van gebeurtenissen die tot falen van de waterkering leiden als gevolg van het afschuiven van de bekleding van het binnentalud ('t Hart et al., 2018). Na het afschuiven van de bekleding zijn het andere processen die het dijkprofiel verder aantasten, totdat een bres ontstaat, waardoor een achterliggend gebied kan overstromen.²

¹ Figuur 2.1 laat met de gele onderbroken lijn ook zien dat met de beoordelingsschema's en rekenmodellen die conform het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI 2017) worden gebruikt om een waterkering op macro-instabiliteit in de gedetailleerde toets te beoordelen niet de hele keten van gebeurtenissen die tot een bres en een overstroming leiden wordt geanalyseerd. Afhankelijk van het type waterkering en de geometrie en de opbouw van de waterkering en het watersysteem waar een waterkering zich bevindt en de daar voorkomende hydraulische belastingen kan het zijn dat de sterkte van de waterkering wordt onderschat en de kans op een overstroming wordt overschat.

² Ook in Figuur 2.2 laat de gele onderbroken lijn zien dat met de beoordelingsschema's en rekenmodellen die conform het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI 2017) worden gebruikt om een waterkering in de gedetailleerde toets te beoordelen niet de hele keten van gebeurtenissen die tot een bres en een overstroming leiden wordt geanalyseerd.



Figuur 2.2 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk door afschuiven van de bekleding op het binnentalud ('t Hart, 2018).

De beide figuren laten ook zien dat er overlap is in de ketens van gebeurtenissen. Beide figuren betreffen processen die betrekking hebben op geotechnische instabiliteit van binnentaluds van dijken. In beide gevallen gaat het over de interactie tussen de waterspanningen en de schuifsterkte van de grond. Bij de vervolprocessen gaat het ook om dezelfde processen. Voor de processen die betrekking hebben op buitentaluds van dijken is er een soortgelijke overlap.

In de achterliggende jaren is nagedacht over de manier waarop we het gedrag van de waterkering meer centraal kunnen zetten bij het bepalen van de overstromingskans. In het onderzoeksprogramma Kennis voor Keringen wordt een aanpak ontwikkeld waarbij (meer) vanuit samenhang van mechanismen en eigenschappen van de kering een scherpere en realistischer overstromingskans kan worden bepaald. Het verhaal van de kering en faalpaden staan hierin centraal.

Met het verhaal van de kering wordt aangegeven dat een overstromingskans niet het resultaat is van een modelberekening. Het verhaal van de kering is het resultaat van een analyse van de waterkering gericht op het begrijpen van de overstromings- of faalkans door de beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het resultaat van het verhaal van de kering is een ordening en interpretatie van de gegevens en gebeurtenissen die kunnen leiden tot een overstroming. Modelberekeningen ondersteunen het verhaal van de kering.

Met de nadruk op faalpaden wordt aangegeven dat we bij een overstromingskans niet alleen kijken naar het initiële mechanisme maar de hele keten (een faalpad) van gebeurtenissen beschouwen die leiden tot een overstroming. Een faalmechanisme is daarbij gedefinieerd als alle faalpaden met hetzelfde initieel mechanisme. Uit onderzoek (Kanning et al., 2019) is gebleken dat het toepassen van faalpaden voor de Nederlandse context haalbaar is en meerwaarde heeft. Het toepassen van faalpaden leidt tot een betere benadering van de overstromingskans. De huidige praktijk is dat de faalkans per faalmechanisme of beoordelingsspoor wordt bepaald door één of enkele gebeurtenissen. Faalpaden bieden de mogelijkheid hier gebeurtenissen aan toe te voegen, zodat alle noodzakelijke gebeurtenissen tussen de initiële gebeurtenis en overstroming inzichtelijk worden. Dit levert ten opzichte van de huidige praktijk een scherpere inschatting van de overstromingskans op. Daarbij leidt het toepassen van faalpaden tot meer inzicht in een systeem (bijvoorbeeld een normtraject) en tot meer focus op de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming, het geeft een mogelijkheid om verschillende 'typen' kennis toe te passen en specifieke gevallen mee te nemen en de relatie tussen beoordelen, ontwerpen en zorgplicht kan makkelijker vorm

krijgen. In genoemd rapport is ook aangegeven dat er verschillende kennisvragen liggen om de methodiek van de faalpaden betrouwbaar toe te kunnen passen.

Voor het analyseren van overstromingskansen vanuit het gedrag van de kering worden in het programma Kennis voor keringen een knopenkaart (REF volgt) en raamwerken per faalmechanisme opgesteld. Deze memo beschrijft het raamwerk voor het faalmechanisme geotechnische instabiliteit.

3 Raamwerk analyse geotechnische instabiliteit

3.1 Inleiding

Om het werken met de overstromingskansbenadering verder te ontwikkelen, wordt gebruik gemaakt van faalpaden en het verhaal van de kering (zie hoofdstuk 1). Hierbij staat het werkelijke gedrag van de kering tijdens hoog water centraal en niet de in het verleden ontwikkelde modellen (die in het nader uitwerken overigens wel gebruikt kunnen worden voor het kwantificeren van kansen). Belangrijk bij de bepaling van de overstromingskans door een geotechnische instabiliteit zijn de opbouw van de dijk en de ondergrond, de hydraulische belastingen, de grondwaterstroming als gevolg van een verandering in de hydraulische belasting en de fysische processen die in de dijk en de ondergrond plaats vinden onder invloed van de grondwaterstroming. Dit zijn de aspecten die met elkaar bepalen wat er kan gebeuren met een dijklichaam wanneer er sprake is van een verhoogde buitenwaterstand. Om de kans op een overstroming te bepalen, wordt daarom geredeneerd vanuit de kering en niet vanuit losse mechanismen.

Voor analyse van de overstromingskans wordt integraal naar de geotechnische instabiliteit gekeken en daarin de focus gelegd op de fysica. Vanuit de fysica worden afschuiven en uitspoelen als de relevante initiële mechanismen gezien, zie nader toelichting in sectie 3.3. Afschuiven en uitspoelen worden niet heel frequent in Nederland waargenomen, maar als zich in Nederland of in het buitenland extreme hoogwatersituaties voordoen, treden deze mechanismen vrijwel altijd op. Uitspoelen is ook meerdere malen bij praktijkproeven in het veld waargenomen. Het optreden van afschuiven is aannemelijk, zeker bij wat steilere taluds, als de waterdruk in een dijk zich opbouwt en de effectieve spanning (korrelspanning) en de schuifsterkte afnemen. Het optreden van uitspoelen bij zanddijken of kleidijken met een zandscheg is eveneens aannemelijk, omdat er vaak wel gaten of gaatjes door krimpscheuren of door dierlijke graverij in een kleibekleding aanwezig zijn, waardoor deeltjes uit kunnen spoelen. Als er al aanzienlijke schade door dierlijke graverij is, kan erosie (door waterstroming over een taludoppervlak met zandkorrels) mogelijk ook een initieel mechanisme zijn. De dijkconfiguratie en het al dan niet optreden van golfoverslag (binnentalud) of golfklappen (buitentalud), de grondwaterstroming en de sterkte van de dijk bepalen welk fysisch proces optreedt en of het om een diep of ondiep mechanisme gaat.

De twee genoemde fysische processen kunnen een initiërend mechanisme zijn, wat kan leiden tot een overstroming. In veel gevallen zullen ook vervolprocessen nodig zijn om daadwerkelijk tot een overstroming te komen. Deze vervolprocessen kunnen vervolgafschuivingen, erosie of zettingsvloeiing (verwekingsvloeiing bij losgepakt zand of bresvloeiing bij vastgepakt zand) zijn. Wat erosie betreft, moet eerst de kleibekleding (deels) afgeschoven zijn of moeten zanddeeltjes onder de kleibekleding uitgespoeld zijn en moet zich een holte onder de kleibekleding hebben gevormd (bij dierlijke graverij kan dit al voorafgaand aan hoog water het geval zijn), waar het erosieproces op gang kan komen. Wat zettingsvloeiing betreft, wordt niet verwacht dat dit een initieel mechanisme zal zijn, omdat er gangbaar van wordt uitgegaan dat voor zettingsvloeiing eerst een initiërende verstoring nodig is, bijvoorbeeld een afschuiving.

In dit hoofdstuk wordt een raamwerk gegeven voor het analyseren van de overstromingskans door afschuiven en uitspoelen van het binnentalud. Daarbij wordt ingegaan op deze fysische processen, de opbouw van dijken, de kenmerkende hydraulische belastingen in verschillende watersystemen en de vervolprocessen. Wat de fysische processen betreft, komen deze

beknopt aan de orde. Voor uitgebreidere beschrijvingen van de fysische processen wordt verwezen naar de fenomenologische beschrijvingen ('t Hart et al., 2018).

De Rode draden nr. 4 – Bekleding op het binnentalud van het Adviesteam Dijkontwerp (2021) geeft een overzicht van de kennisleemtes ten aanzien van stabiliteit van bekledingen waar projecten in hun ontwerpogave tegen aan lopen.

3.2 Opbouw dijk en ondergrond van primaire waterkeringen

Een gangbare opbouw van een dijklichaam is een dijk volledig bestaande uit klei of uit zand, een zanddijk met kleibekleding of een zanddijk met kleikern (en kleibekleding). Met name kleidijken kunnen een lange historie hebben en daardoor niet uniform zijn. Kleidijken zijn vaak gedurende verschillende eeuwen in verschillende fases tot stand gekomen. Vaak bestaan die verschillende fases uit verschillende kleisoorten met verschillende volumegewichten en sterkte eigenschappen en die meer of minder doorlatend zijn. Ook kunnen zand en puinlagen in een dergelijke oude dijk aanwezig zijn, bijvoorbeeld van oude wegfunderingen. Deze heterogeniteit in als kleidijken gekarakteriseerde dijken kan gevolgen hebben voor de grondwaterstroming door de dijk. Denk hierbij aan geconcentreerde uitstroom van water, waardoor gronddeeltjes uitspoelen (Van Hoven, 2017). Daarnaast kunnen ook de sterkte-eigenschappen voor de verschillende ophoogfases van een dijk verschillend zijn.

Dijkopbouw in historisch perspectief

Tot 1953 werden waterkeringen op basis van ervaring en historische belastingen aangelegd en versterkt. Dijken werden daarbij gedimensioneerd op de hoogstbekende waterstand. De **dijken** werden **verhoogd** (of hersteld na een dijkdoorbraak) **met kleiig materiaal uit de omgeving. Het verkrijgen van de benodigde aarde voor herstel of onderhoud van de dijken en kaden gaf nogal eens aanleiding tot geschillen. Over het algemeen ontstonden die tussen de verantwoordelijke overheden en de landeigenaren. Zij ruzieden niet alleen over prijs maar ook over de plaats van de zogenaamde aardhaling. Uitgangspunt was het zo dicht mogelijk afgraven van de klei bij de locatie van de dijk waar de aarde nodig was. Ook was het gebruikelijk dat de aarde binnen de dijkkring werd gehaald. Daarnaast speelde de prijs van de aarde een rol. Klei uit de uiterwaarden was bijvoorbeeld goedkoper dan binnendijkse klei. Door onderhandelingen en fraude is het mogelijk dat niet altijd de allerbeste klei voor het dijkherstel is gebruikt. Dit is echter geen aanleiding te veronderstellen dat systematisch inferieur materiaal voor dijkherstel is gebruikt.**

Bij dijkdoorbraken **waardoor continu water door het dijkgat stroomt kan niet direct begonnen worden met het aanbrengen van klei om het gat te dichten. Dit zou immers direct weer wegspoelen. In de literatuur wordt melding gemaakt van het bekragen van het gat met palen en rijshout. Palen worden in de grond geslagen waartussen rijshout wordt aangebracht om de stroom in het gat te verkleinen. Hierdoor kan dijksmateriaal achter het rijshouten scherm worden aangebracht zonder dat het direct weggespoeld. Het is niet duidelijk of deze palen met rijshout in de dijk zijn verwerkt of voor de dijk zijn blijven staan. Soms wordt melding gemaakt dat ook ander materiaal, zoals stro en daken van huizen, voor dijkherstel wordt gebruikt. Er zijn echter geen aanwijzingen gevonden die duiden op een systematisch gebruik van inferieur materiaal voor dijkherstel.**

Na de watersnood in 1953 zijn de waterkeringen in Nederland, op basis van de bevindingen van de Deltacommissie, systematisch versterkt. De waterkeringen worden daarbij steeds rationeler versterkt waardoor een trendbreuk in de dijkbouw en de ontwikkeling van de overstromingskans ontstaat. Aan de eigenschappen van klei worden steeds meer eisen gesteld en bij dijkversterkingen wordt steeds vaker zand als kernmateriaal gebruikt.

bronnen:

Delft Cluster 2001, Effectiviteit tweede waterkeringen, fase 4-4: Historische dijkdoorbraken, 720301/300 definitief, december 2001

GeoDelft 2005, Ontwikkeling van overstromingskansen sinds 1950, 422010/006, december 2005

Zanddijken met een kleikern zijn dijken die oorspronkelijk een kleidijk zijn geweest en die op enig moment zijn versterkt met zand. Een dergelijk dijktype betekent bij dijken bij de kust vaak dat de oude kleikern relatief beperkt van afmetingen is ten opzichte van de latere versterking van zand. Ergens binnen het profiel van de zanddijk bevindt zich dan de oude

kleikern. De oude kleikern is dus relatief beperkt van afmetingen, maar kan toch een relevante invloed hebben op de grondwaterstroming of de vervolprocessen bij dit type dijk. Rivierdijken die van oudsher vaak uit klei zijn opgebouwd, kunnen in de recentere tijd binnenwaarts zijn versterkt met zand. Een binnendijkse versterking van zand met een kleibekleding wordt ook wel een zandscheg genoemd. De oude kleikern en de binnenwaartse versterking in zand zijn dan in de regel even hoog.

De kleibekleding op dijktaf is meestal sterk gestructureerd. De mate van structuurvorming hangt af van de kleisoort, de begroeiing en het vochtgehalte. Deze structuurvorming heeft ook consequenties voor de grondwaterstroming in de dijk en voor de schuifsterkte.

Uit onderzoek blijkt dat de doorlatendheid van kleibekledingen in dezelfde orde van grootte kan zijn als de doorlatendheid van de onderliggende zandkern. Dit hangt onder meer af van de dikte van de kleibekleding en van de verdichting van de kleibekleding bij aanleg. Bij zanddijken is vaak een drainage-constructie in de binnenteen aanwezig. Een drainage-constructie kan op verschillende manieren zijn uitgevoerd. Soms betekent dit dat bij de binnenteen van de dijk de kleibekleding dunner werd uitgevoerd, zodat de dunne bekleding als ventiel zou werken bij een oplopend freatisch vlak.

De ondergrond kan bestaan uit zand of uit slecht doorlatende klei- en veenlagen op een watervoerende zandlaag. De opbouw van de ondergrond is ook relevant voor de grondwaterstroming in het dijklichaam.

PM Opbouw ondergrond wordt nog iets verder uitgewerkt.

3.3 Initiële mechanismen geotechnische instabiliteit

3.3.1 Afschuiven

Bij het mechanisme afschuiven gaat het om een grondmassa die instabiel wordt en afschuift langs een schuifvlak, waarin de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte wordt overschreden. Wanneer de buitenwaterstand stijgt, nemen ook de waterdrukken in de dijk en de ondergrond toe. Deze toename van de waterdrukken kan het gevolg zijn van alleen een verhoogde buitenwaterstand of van een combinatie van verhoogde buitenwaterstand en infiltratie van overslaand water (afhankelijk van golfcondities en aanwezig vrijboord). Door de toename van de waterdrukken neemt de effectieve spanning (korrelspanning) af en daardoor neemt ook de schuifsterkte van de grond af en kan een grondmassa instabiel worden. Dit is een geleidelijk proces. Door het opbouwen van de waterdruk, het afnemen van de effectieve spanning en het mobiliseren van de schuifsterkte neemt de vervorming toe. Als gevolg van de toenemende vervorming zullen eerst langsscheuren in de kruin of het talud ontstaan. Als het proces zich doorzet, zal de vervorming groter worden en zal een afschuiving kunnen optreden. Bij het mobiliseren van de schuifsterkte van grond en de daarbij optredende vervorming wordt eerst een pieksterkte gemobiliseerd. Wanneer de vervorming groter wordt, neemt na het overschrijden van de pieksterkte de sterkte van de grond af (softening). Daarbij treden in toenemende mate schuifvlakken op. Bij ondiepe schuifvlakken ontstaat daarbij verlies van samenhang. De sterkte-afname na de pieksterkte kan aanzienlijk zijn, afhankelijk van de mate van overconsolidatie van de grond. Met name wanneer de grond voorafgaand aan hoog water deels onverzadigd was, kan een sterke afname van de schuifsterkte optreden.

Afhankelijk van de geometrie van de dijk, opbouw van de dijk, duur van hoog water, duur en intensiteit van golfoverslag en mate van infiltratie van water kan een diepe of een ondiepe afschuiving ontstaan. Een ondiepe afschuiving treedt op wanneer stijging van waterspanningen voornamelijk in de dijk plaatsvinden. Zonder overslag is dit bij een kleidijk

minder aannemelijk. Diepe afschuivingen treden op wanneer waterdrukken in de ondergrond ook vanuit het diepe watervoerende pakket toenemen. Door de toename van de waterdrukken in het diepe watervoerende pakket kan opdrijven of opbarsten van de slecht doorlatende deklaag achter de waterkering optreden. Een afschuiving kan langs een recht of een gekromd schuifvlak plaatsvinden. In het geval van een ondiepe afschuiving kan dit alleen de bekleding betreffen, die langs een recht schuifvlak afschuift, evenwijdig aan het talud. Dit afschuifmechanisme kan bij alle dijktypen optreden. Met name bij zanddijken met een kleibekleding kan door het verschil in doorlatendheid van de zandkern en de kleibekleding een wateroverdruk onder de kleibekleding ontstaan, waardoor de kleibekleding (ondiep) afschuift. In een situatie zonder golfoverslag kan bij een zanddijk (met kleibekleding) in eerste instantie een kleine afschuiving optreden van het onderste deel van het talud waar zich het sijpeloppervlak bevindt. Bij een stijgende buitenwaterstand en stijgend freatisch vlak kunnen dan vervolgafschuivingen optreden op een steeds hoger deel van het talud. Diepe en ondiepe afschuivingen betreffen dezelfde fysische processen, alleen de afmetingen zijn verschillend.

Loodrecht evenwicht (afdrukken)

Bij een zanddijk/scheg met kleibekleding kan bij de teen van de dijk, waar de waterdruk in de onderliggende zandkern het grootst wordt, de opwaartse waterdruk zo groot worden, dat langsscheuren in de kleibekleding ontstaan (loodrecht evenwicht). Daarvoor moet de opwaartse waterdruk groter worden dan de schuifsterkte die de kleibekleding kan mobiliseren (schuifvlak loodrecht op het talud). Verlies van loodrecht evenwicht (afdrukken) is een bijzondere vorm van afschuiven. Verlies van loodrecht evenwicht kan alleen optreden bij dijken met een slecht doorlatende kleibekleding van voldoende dikte. Dit mechanisme zal alleen maatgevend zijn bij flauwe taluds.

Opbouw waterdruk

De opbouw van de waterdruk kan snel of langzaam gaan, afhankelijk van het watersysteem en de opbouw van de dijk en de ondergrond. Wanneer de buitenwaterstand voldoende hoog is en als daarbij ook relatief zware golfcondities optreden, kan golfoverslag optreden. Door het overslaande water is er ook infiltratie via de kruin en het binnentalud van een dijk. Ook hierdoor nemen de waterdrukken in een dijk toe. Door de scheuren in de gestructureerde kleibekleding kan deze infiltratie snel gaan, maar de scheuren zwellen ook dicht bij toenemend watergehalte. Uit metingen bij golfoverslagproeven blijkt dat de waterdruk in een kleibekleding een hydrostatische waterdruk benaderd bij een golfoverslagdebiet vanaf 30 l/s per meter, bij golfoverslag gedurende 6 uur (Van Hoven et al., 2010). Bij kleinere golfoverslagdebieten is de opbouw van de waterdruk in een kleibekleding minder dan hydrostatisch (bij 6 uur golfoverslag).

Initiërend mechanisme versus vervolgprocessen

Het afschuiven van een grondmassa zal vaak een initiërend mechanisme zijn. In dat geval zijn vervolgprocessen nodig om tot een dijkdoorbraak en overstroming te komen. Deze vervolgprocessen kunnen vervolgafschuivingen, uitspoeling van kernmateriaal of erosie door golfoverslag zijn. In het geval van een heel grote en diepe afschuiving, waardoor een substantiële verlaging van de volledige dijk kruin optreedt, kan een afschuiving meteen tot een overstroming leiden.

Buitentalud

Afschuiven kan ook bij het buitentalud optreden. Ook hier kan het een diep of ondiep mechanisme zijn. Een diep mechanisme kan worden geïnitieerd door een (snelle) val van de buitenwaterstand, waarbij het freatisch vlak relatief hoog blijft ten opzichte van de dalende buitenwaterstand (nauw). Een ondiep afschuifmechanisme kan optreden onder invloed van golfbelasting op het buitentalud. Wanneer een golf zich terugtrekt, ontstaat ook een situatie waarin de waterdruk in het dijklichaam relatief hoog is ten opzichte van de buitenwaterstand.

Dit afschuiven onder invloed van golfbelasting kan zowel bij een stijgende als een dalende buitenwaterstand plaatsvinden. Ook voor de situatie van een buitentalud geldt, dat afschuiven vaak een initieel mechanisme zal zijn, zodat vervolprocessen nodig zijn voordat een overstroming plaats kan vinden. Alleen in het geval van een grote afschuiving, waardoor een substantiële verlaging van de volledige dijk kruin optreedt, bij een wederom stijgende buitenwaterstand, kan de afschuiving direct worden gevolgd door een overstroming. In andere situaties zijn vervolprocessen nodig, voordat sprake kan zijn van een overstroming. Bij een afschuiving bij een vallende buitenwaterstand is een volgend hoog water nodig, waarbij er geen gelegenheid is geweest om reparaties uit te voeren, voordat sprake kan zijn van een overstroming.

Scenario's

Bij het analyseren van het mechanisme afschuiven kan er aanleiding zijn om verschillende condities, gebeurtenissen of scenario's te onderscheiden. De initiële conditie van een dijk kan verschillend zijn als gevolg van de weersomstandigheden in de periode voorafgaand aan het optreden van hoog water. Bij een hoog water in het najaar of het begin van de winter kan het vochtgehalte in de dijk laag zijn, waardoor zuigspanningen in de dijk en scheuren in de kleibekleding aanwezig zijn. Bij een hoog water aan het einde van de winter of het begin van het voorjaar zal het vochtgehalte normaal gesproken hoger zijn dan in het najaar en het begin van de winter. De zuigspanning zal dan substantieel lager of zelfs afwezig zijn en scheuren zullen minder breed en minder diep zijn. Deze initiële conditie van een dijk heeft consequenties voor de schuifsterkte en de doorlatendheid van een dijk tijdens hoog water. Een ander aspect is de aanwezigheid van drainage die wel of niet goed functioneert tijdens hoog water. Dit kan ook met scenario's in rekening worden gebracht.

Faalpaden en scenario's

Scenario's hebben betrekking op de situaties die aanwezig kunnen zijn voordat een hoogwatergolf optreedt (en dus onafhankelijk zijn van een hoogwatergolf). Faalpaden hebben een initieel mechanisme die wordt veroorzaakt door een hoogwatersituatie.

Scenario's worden soms ook gebruikt als rekentechniek om bepaalde aspecten mee te nemen. Zoals ook eerder gemeld heeft infiltratie van overslaand water ook invloed op het optreden van met mechanisme afschuiven. Het is echter niet altijd zo dat een hoge waterstand gepaard gaat met golfcondities die tot overslag leiden. Het wel of niet hebben van overslag (en daaruit volgende infiltratie) wordt daarom gezien als een scenario (met een bepaalde kans van voorkomen) en niet als een separaat mechanisme.

3.3.2

Uitspoelen

Bij uitspoelen gaat het om het transport van zanddeeltjes van een zanddijk of van een zanddijk met een kleibekleding. Bij uitspoelen gaat het om transport in de richting (ongeveer) loodrecht op de talud. Dit in tegenstelling tot erosie, waar het gaat om waterstroming over het talud, waarbij deeltjes worden meegevoerd en het transport van de deeltjes evenwijdig aan het talud plaats vindt. Transport van zanddeeltjes door uitspoelen vindt plaats als gevolg van de grondwaterstroming door een dijk. Deze grondwaterstroming wordt geïnitieerd door een verhoogde buitenwaterstand. Wanneer het verhang van de waterdrukken bij het binnentalud voldoende groot wordt, worden zanddeeltjes meegevoerd. Uitspoelen zal vrijwel altijd een lokaal fenomeen zijn, waarbij geconcentreerde grondwaterstroming zorgt voor uitspoelen van deeltjes via reeds aanwezige gaten of scheuren in een bekleding. Het is niet aannemelijk dat uitspoelen plaats vindt over grote breedte op een dijk talud vanwege de grote heterogeniteit. Daarnaast zal door de aanwezigheid van de kleibekleding en/of een graszode grootschalig optreden van uitspoelen waarschijnlijk niet optreden.

Bij heel hoge buitenwaterstanden in relatie tot de kruinhoogte kan ook golfoverslag optreden, waardoor ook infiltratie van water plaats vindt via de kruin en het binnentalud van een dijk. Dit zorgt voor meer grondwaterstroming in de dijk en dit bespoedigt het transport van zanddeeltjes. Uitspoelen in een situatie zonder golfoverslag is een langzaam proces (Den Adel et al., 2008). In een situatie zonder golfoverslag zal alleen aanzienlijke schade aan een dijkprofiel door uitspoelen kunnen optreden bij een zeer langdurige hoge buitenwaterstand.

Bij een zanddijk liggen de zanddeeltjes meteen langs het talud en kan de grondwaterstroming deeltjes meenemen. Uitspoelen kan bij zanddijken een initiërend proces zijn. Daarbij is het wel zo dat wortels van een goede grasbekleding de zanddeeltjes vasthouden. Wortels zorgen voor een schijnbare cohesie van meerdere kilopascals in de bovenste decimeters onder het maaiveld (Van Hoven et al., 2008; BAW, 2011; Fraccica et al., 2020). Plekken op het talud met een slechte zode zijn daarom het meest gevoelig voor uitspoelen.

Bij zanddijken met een kleibekleding kan uitspoelen ook een initiërend proces zijn, ervan uitgaande dat er altijd wel gaten of scheuren in een kleibekleding aanwezig zijn, waardoor deeltjes kunnen uitspoelen. De kleibekleding kan gescheurd zijn door structuurvorming (krimp en zwel van klei). Gaten in een kleibekleding kunnen het gevolg zijn van graverij door dieren. Als wordt uitgegaan van een volledig gesloten kleibekleding is uitspoelen een vervolproces, omdat eerst afschuiven van de kleibekleding moet optreden. Bij een zanddijk met een kleikern kan de grondwaterstroming beperkt worden door de gunstige invloed van de kleikern, zodat het zandtransport geringer is of niet optreedt.

Uitspoelen kan ook optreden bij buitentaluds van dijken. Ook dan geldt dat bij een volledig gesloten kleibekleding eerst afschuiven moet plaats vinden, voordat uitspoelen kan optreden.

Uitspoelen kan het dijkprofiel zodanig aantasten, dat hierdoor weer andere mechanismen optreden. Te denken valt aan vervolgschuivingen en/of erosie. Deze twee mechanismen kunnen ook tegelijkertijd optreden en elkaar versterken.

3.4 Samenhang initiële mechanismen

3.4.1 Relevante en/of dominante mechanismen

Uit de bovenstaande beschrijvingen volgt dat beide mechanismen (afschuiven en uitspoelen) worden veroorzaakt door verhoging van de waterspanningen. De weerstand die de waterkering kan mobiliseren tegen het optreden van deze mechanismen wordt bepaald door de geometrie van de kering, dikte en gewicht van de bekleding en de mobiliseerbare schuifsterkte in de dijkskern en bekleding. De mechanismen zullen niet altijd gelijktijdig optreden, sterker nog: soms sluiten ze elkaar uit (causale interactie mechanismen). Omdat de kans op de verschillende mechanismen wordt bepaald door min of meer dezelfde eigenschappen van de kering (statistische correlatie) dienen de mechanismen in samenhang te worden beschouwd. Wanneer de mechanismen los van elkaar worden beschouwd, wordt geen rekening gehouden met de interactie tussen mechanismen en worden onzekerheden over de eigenschappen dubbel meegenomen, waardoor de overstromingskans sterk wordt overschat.

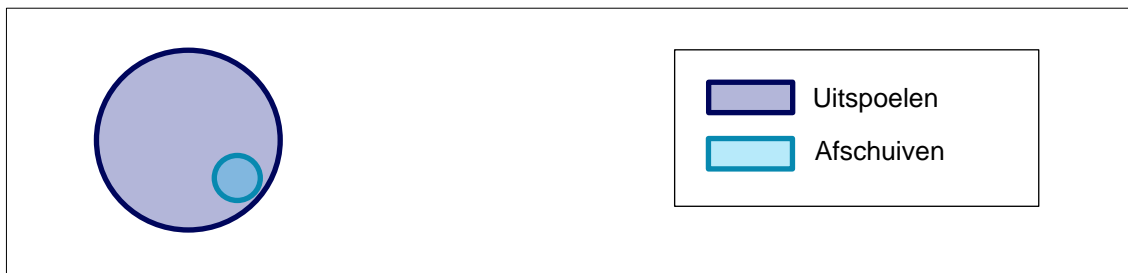
Als onderdeel van het raamwerk worden drie mogelijke situaties van de individuele en/of gezamenlijke mechanismen beschreven:

1. Mechanisme kan niet optreden: geen relevant mechanisme.
Een belangrijke stap in de beschouwing van de verschillende initiërende mechanismen is de verificatie of het optreden van deze mechanismen mogelijk is. Als het mechanisme niet kan optreden, heeft het logischerwijs ook geen zin om een nadere beschouwing te

doen. Dit is het geval bij uitspoelen bij een kleidijk. Een ander voorbeeld van een dergelijke situatie is een zanddijk met een kleikern zodanig dat de grondwaterstroming in de dijk wordt beperkt: in een dergelijke situatie kan uitspoelen niet optreden en hoeft deze niet te worden beschouwd: het is geen relevant mechanisme.

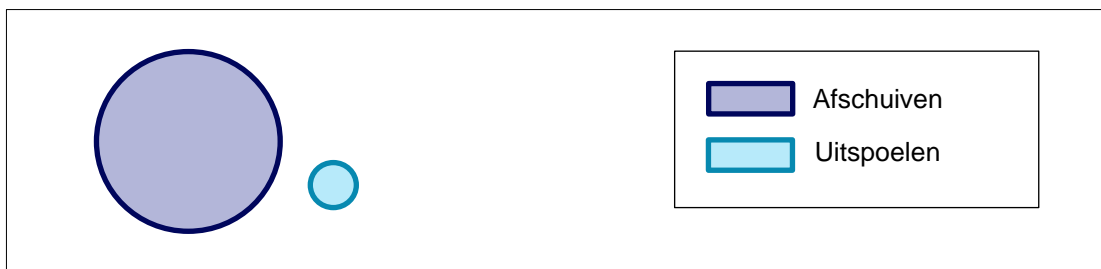
2. Mechanisme treedt altijd later op dan ander mechanisme: geen dominant mechanisme. Er zijn waterkeringen waarbij mechanismen bijna volledig (statistisch) gecorreleerd zijn. Bij de analyse van de geotechnische instabiliteit van zanddijken met een steil binnentalud en een dunne kleibekleding kan een zeer sterke correlatie aanwezig zijn tussen uitspoelen en afschuiven van de bekleding.

Echter zal bij een geotechnische instabiliteit van het binnentalud vaak maar één mechanisme bepalend zijn, waarbij dit mechanisme wordt bepaald door de dikte en gestructureerdheid van de deklaag, welke bepalend is voor de waterspanningen. Bij een zanddijk of zandscheg met een dunne gestructureerde kleideklaag zal zand kunnen uitspoelen via de scheuren in de bekleding en zal de waterdruk zodanig reduceren dat afschuiven van de toplaag later zal optreden dan uitspoelen. In dit geval is er een correlatie tussen beide mechanismen maar zal het eerste mechanisme altijd eerder optreden. Dit kan schematisch worden weergegeven zoals in Figuur 3.1: er is overlap tussen beide mechanismen en de kans van het tweede mechanisme is kleiner dan de kans van het eerste mechanisme. In een dergelijke situatie is het eerste mechanisme dominant



Figuur 3.1 Mechanismen bijna volledig (statistisch) gecorreleerd.

3. Mechanisme heeft een veel kleinere kans van optreden: geen dominant mechanisme. Ook zonder correlatie en causale interactie tussen mechanismen kan het ook zo zijn dat, gegeven locatie specifieke condities, één mechanisme veel waarschijnlijker is dan de ander. Denk bijvoorbeeld aan een situatie waarbij het verhoogde freatisch vlak vooral het gevolg is van de buitenwaterstand en niet van golfoverslag, met tegelijkertijd een goede drainage in de binnenteen. In een dergelijke situatie is het veel waarschijnlijker dat er stabiliteitsverlies (diep schuifvlak) optreedt als gevolg van een tekort aan schuifspanning dan dat er afschuiven van de kleibekleding of uitspoelen optreedt, zie onderstaande afbeelding. In een dergelijke situatie is afschuiven het dominante mechanisme. Zie Figuur 3.2.

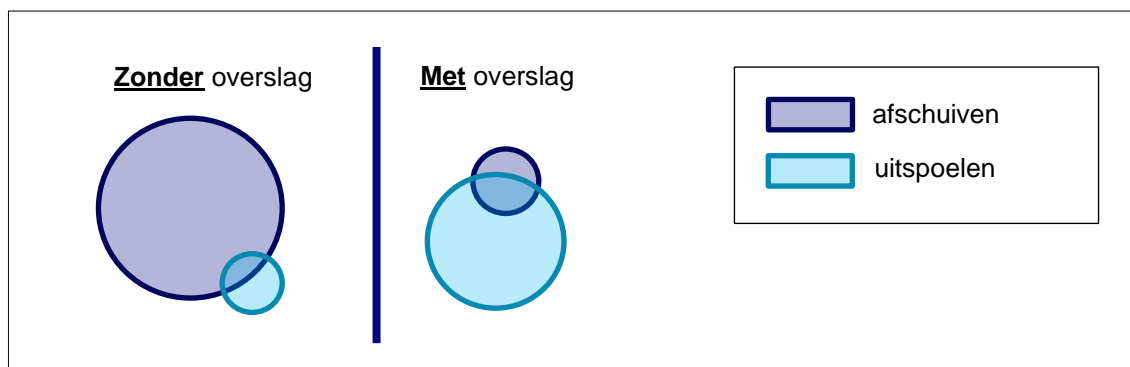


Figuur 3.2 Mate van waarschijnlijkheid van het optreden van de mechanismen.

3.4.2 Werken met scenario's

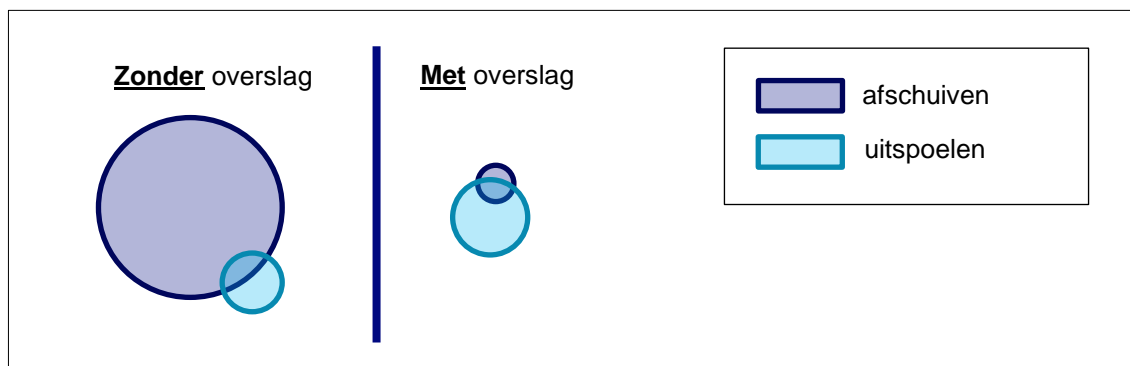
Tot slot is duidelijk dat een verhoogd freatisch vlak het gevolg is van ofwel alleen een verhoogde waterstand ofwel een combinatie van verhoogde waterstand in combinatie met verhoogd golfoverslagdebiet.

Rekening houdend met de bovenstaande situatie kan dit worden beschouwd als twee verschillende situaties. Verwacht mag worden dat de kans van voorkomen/dominantie van mechanismen verschilt tussen beide scenario's: in geval van een zanddijk zonder golfoverslag is het veelal afschuiven langs een diep schuifvlak, terwijl met golfoverslag wellicht juist uitspoelen een grote rol speelt. Zie Figuur 3.3.



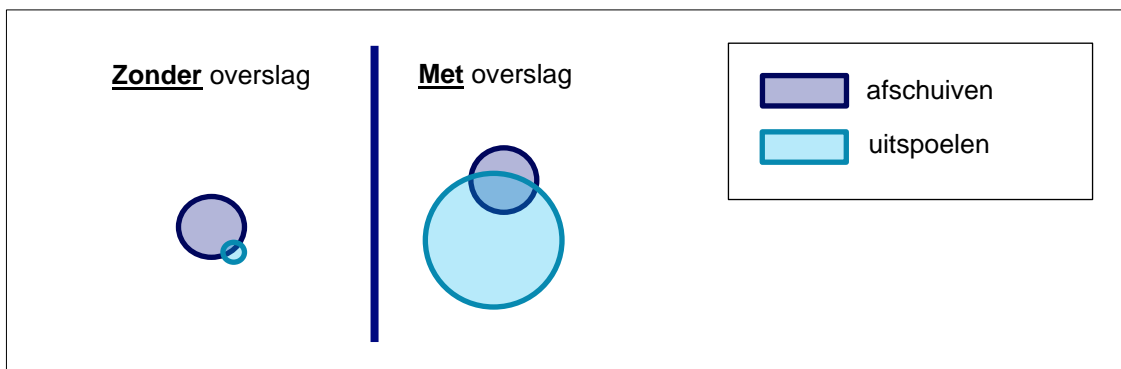
Figuur 3.3 Twee scenario's met verschillende kans van optreden van de mechanismen.

Afhankelijk van het watersysteem/beschouwde locatie is de kans op een hoge waterstand EN hoge overslagdebieten klein (bijvoorbeeld omdat de waterstand door meerpeil wordt gedomineerd en de golven door wind of omdat er sprake is van een groot vrijboord). In die gevallen is de kans dat de situatie met golfoverslag optreedt klein, wat weergegeven kan worden door kleinere cirkels voor de situatie met golfoverslag, zie Figuur 3.4.



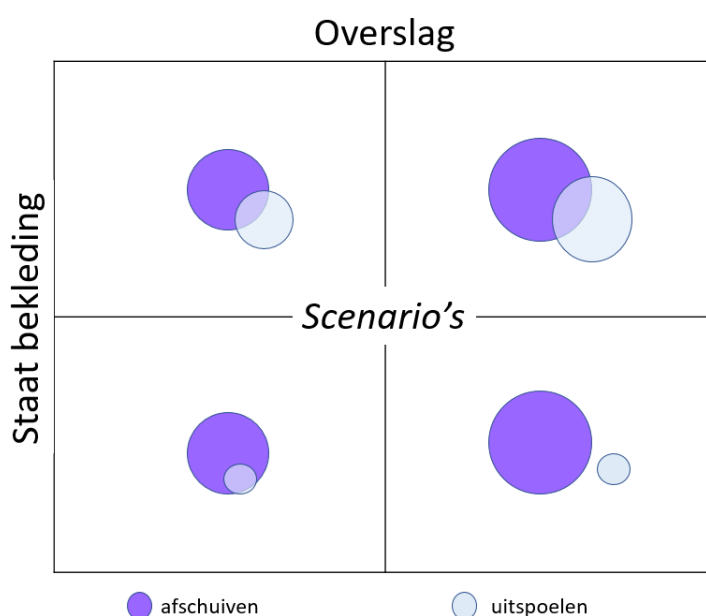
Figuur 3.4 Twee scenario's met verschillende kans van optreden van de mechanismen. In dit geval is de kans op golfoverslag klein en daardoor is de kans op het optreden van de mechanismen die worden geïnitieerd door golfoverslag ook klein.

Omgekeerd kan het zijn dat er een sterke correlatie is tussen waterstand en golven of een klein vrijboord, waardoor de kans op een situatie zonder golfoverslag erg klein is. Een dergelijke situatie is onderstaand weergegeven (Figuur 3.5).



Figuur 3.5 Twee scenario's met verschillende kans van optreden van de mechanismen. In dit geval is de kans op overslag groot en daardoor is de kans op het optreden van de mechanismen die worden geïnitieerd door golfoverslag ook groot.

Figuur 3.6 vat het voorgaande samen: afhankelijk van de staat van de bekleding (wel of niet gestructureerd) en de kans van optreden van golfoverslag dragen de mechanismen afschuiven, afdrucken en uitspoelen in meer of mindere mate bij aan de overstromingskans. Afhankelijk van de situatie van de waterkering zijn ook meer of andere scenario's mogelijk.



Figuur 3.6 Mogelijke scenario's: afhankelijk van de staat van de bekleding en het optreden van overslag dragen de mechanismen afschuiven, afdrucken en uitspoelen meer of minder bij aan de overstromingskans.

3.5 Vervolprocessen

3.5.1 Inleiding

De in paragrafen 3.3 en 3.4 beschreven mechanismen en samenhang tussen mechanismen gaat nog enkel uit van "begin van schade" als gevolg van het initiële mechanisme. Voor de meeste mechanismen wordt daarbij aangenomen dat de kans op schade praktisch gelijk is aan de kans op overstroming. In de praktijk is dit (lang) niet altijd het geval. Vaak is er nog meer voor nodig voordat daadwerkelijk sprake is van een overstroming: er dienen bepaalde vervolprocessen plaats te vinden (de in paragraaf 3.4 beschreven "cirkels" betreffen dus eigenlijk ketens van mechanismen). In de volgende paragrafen komen de vervolprocessen

erosie en zettingsvloeiing aan de orde. Ook vervolgfascuivingen en uitspoeling kunnen een vervolproces zijn. Vervolgfascuivingen betreffen hetzelfde mechanisme (dezelfde fysica) als initiële afschuivingen (zie paragraaf 3.3).

3.5.2 Erosie

Onder erosie wordt verstaan het wegspoelen van gronddeeltjes, ten gevolge van water dat parallel aan het binnentalud stroomt. De stroom water die over het talud stroomt, brengt daar een 'sleepkracht' ofwel schuifspanning over op de bovenste rij gronddeeltjes, die gelijk is aan het eigen gewicht van het laagje water. Die stroming veroorzaakt instabiliteit en transport van de bovenste gronddeeltjes. Zo erodeert het oorspronkelijke talud. De gronddeeltjes sedimenteren weer aan de teen. Erosie en sedimentatie doen een aanzienlijk flauwer talud ontstaan. Zand en klei kunnen beide eroderen, maar de erosiegevoeligheid van zand is groter dan die van klei.

In een zanddijk met kleibekleding is er altijd wel een gaatje in de kleibekleding. Rond dit gaatje concentreert zich de grondwaterstroming. Het zand dat onder de kleibekleding ligt, begint daar uit te spoelen. Er vormen zich dan één of meerdere kanaaltjes onder de kleibekleding. Het water graaft het zand onder de kleibekleding uit, waardoor onder de kleibekleding een gat ontstaat. Als het gat te groot wordt, stort de kleibekleding die het gat overspant in en neemt de schade verder toe. Zodoende ontstaat er een grensvlak tussen water en zand, zonder bekleding er op. Hier kan erosie optreden.

De erosie vindt alleen onder het zogenaamde sijpeloppervlak plaats. Boven het sijpeloppervlak kan in het droge of vochtige zand in een situatie zonder golfoverslag een steile rand (bres) ontstaan. Deze steile rand schrijdt geleidelijk terug tijdens het erosieproces. Dit terugschrijden van een bres is een proces wat ook bij een bresvloeiing plaatsvindt (zie paragraaf 3.5.3).

3.5.3 Zettingsvloeiing

Bij zettingsvloeiing gaat het om een mechanisme waarbij zandige en siltige materialen instabiel worden en grote vervormingen kunnen optreden die tot grote schade aan het dijkprofiel kunnen leiden. Als het materiaal enige mate van klei bevat, kan een zettingsvloeiing niet optreden. Bij een intact dijklichaam is het niet aannemelijk dat een zettingsvloeiing van het dijklichaam zal optreden. Een zettingsvloeiing zal dus meestal geen initieel mechanisme zijn. De aanleiding voor het optreden van zettingsvloeiing bij een dijklichaam kan een (kleine) afschuiving zijn. Het vervolmechanisme zettingsvloeiing kan in dat geval substantieel meer schade veroorzaken dan de initiële kleine taludafschuiving.

Bij zettingsvloeiing wordt onderscheid gemaakt tussen verwekingsvloeiing en bresvloeiing. Een verwekingsvloeiing kan worden omschreven als een verschijnsel waarbij een pakket losgepakt zand onder water plotseling verweekt. Het gaat om een afname van het onderlinge contact tussen de zandkorrels en daarmee van de schuifsterkte van het zandlichaam. Een gedeeltelijke verweking kan het vermogen van het zand om schuifspanning op te nemen al zodanig doen verminderen dat het talud instabiel wordt en er een grote massa zand naar beneden vloeit. Als het zandpakket in een helling aanwezig is, dan zal de verweekte massa naar beneden vloeien en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen.

De belangrijkste parameters voor het optreden van een verwekingsvloeiing zijn:

- De verwekinggevoeligheid: hoe lossers het zand is gepakt, des te groter is het risico.
- De taludhelling: hoe steiler het talud, des te groter het risico.
- De hoogte van het talud: hoe hoger het talud, des te groter het risico.

Een bresvloeiing is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat zichzelf versterkt of althans zichzelf in stand houdt. Het proces wordt in gang gezet door een lokale afschuiving of verwekingsvloeiing. Dit resulteert in een zand-watremengsel dat als een dichtheidsstroom langs het talud naar beneden stroomt (“suspensiestroom”) en daarbij verdere erosie veroorzaakt, waardoor de suspensiestroom steeds sterker wordt. Daarnaast leidt de lokale taludinstabiliteit doorgaans tot een zo steil taludgedeelte (“bres” of “walleetje”), dat het zand aan het oppervlak afregent, waardoor het steile taludgedeelte terugschrijdt en het afregende zand de suspensiestroom voedt.

Voorwaarden voor het ontstaan van een bresvloeiing zijn:

- Het talud bestaat uit silt of fijn zand (hoe fijner des te gevoeliger voor bresvloeiing; bij een korrelgrootte D_{50} groter dan 1 mm is een bresvloeiing nauwelijks mogelijk).
- Het “afgebreste” materiaal moet in de vorm van een suspensiestroom vanaf de teen van de initiële bres in voldoende mate kunnen wegstromen.
- Het talud moet voldoende hoog en steil zijn.

Combinaties van zettingsvloeiing en bresvloeiing zijn ook mogelijk. Een verwekingsvloeiing en bresvloeiing kunnen alleen onder water optreden, gezien de aard van de processen. Boven het zogenaamde sijpelpunt op het binnentalud van de dijk zal een zettingsvloeiing of een verwekingsvloeiing niet op kunnen treden. Nadat het dijkprofiel is aangetast door een verwekingsvloeiing of bresvloeiing en er een instabiel profiel is ontstaan, kan een afschuiving voor verdere aantasting van het dijkprofiel zorgen. Als bij een hoog water de buitenwaterstand en het freatisch vlak gaan dalen, zal een proces van een verwekingsvloeiing of bresvloeiing stoppen.

3.6 Samenhang initiële mechanismen en vervolprocessen

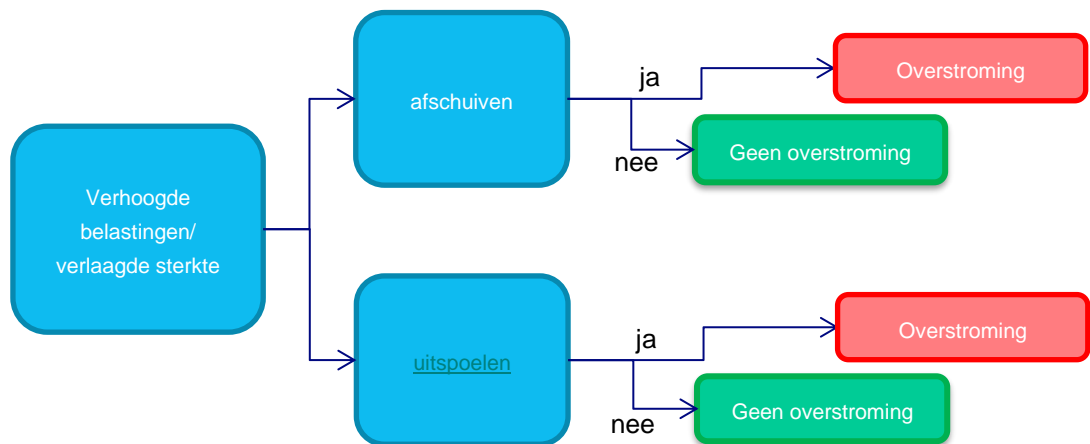
De in paragraaf 3.4 beschreven samenhang en de in paragraaf 3.4.1 beschreven relevantie zou dus ook uitgebreid kunnen worden rekening houdend met vervolprocessen. Dit betekent dat de beschrijving van de mechanismen uitgebreid kan worden zodanig dat het gehele faalpad beschreven wordt. Hierbij is het goed om te realiseren dat faalpaden lineaire combinaties van achtereenvolgend optredende gebeurtenissen zijn die tot een overstroming leiden.

In de praktijk kunnen na optreden van het initiële mechanisme verschillende faalpaden tot een doorbraak leiden. Een gebeurtenissenboom geeft de verschillende faalpaden weer. Tussen de verschillende takken (faalpaden) van de gebeurtenissenboom kunnen geen verbindingen worden gelegd. In de verschillende takken treden weliswaar dezelfde mechanismen (knopen) op, echter de situatie in de verschillende takken is verschillend.

Theoretisch kunnen een oneindige hoeveelheid faalpaden worden bedacht. In werkelijkheid dragen meestal slechts één of hooguit enkele faalpaden bij aan de overstromingskans. Elk van deze faalpaden vormt dan een cirkel in de aanpak zoals beschreven in paragraaf 3.4. Voor een nadere toelichting op het werken met faalpaden wordt verwezen naar Smale et al. (2022).

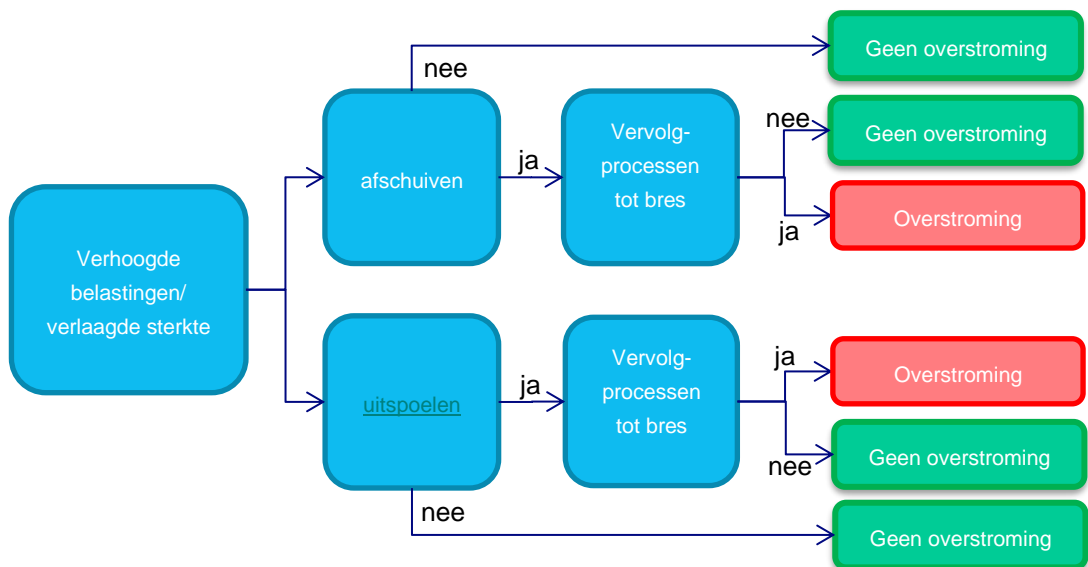
Om het effect van vervolprocessen op de overstromingskans in rekening te kunnen brengen, is in het kader van kennis voor Keringen gewerkt aan “knopenkaarten”, zie REF (volgt). Het doel van deze “knopenkaarten” is om voor veel voorkomende faalpaden een overzicht te bieden van de middelen om de relevantie (grote/kleine kans van optreden) van individuele knopen vast te stellen. Naast de relevantie wordt ook een overzicht gepresenteerd van de beschikbare tools/rekenteknieken om (delen van) faalpaden te kwantificeren. Tot slot wordt een overzicht geboden van de kansrijkheid/relevantie en mogelijkheden om faalpaden te combineren.

Ter illustratie/inspiratie wordt onderstaand de knopenkaart voor geotechnische instabiliteit getoond, welke vooralsnog uit drie gebeurtenissenbomen bestaat, zijnde overstroming (falen) als gevolg van (i) afschuiven (ii) uitspoelen, zie Figuur 3.7.



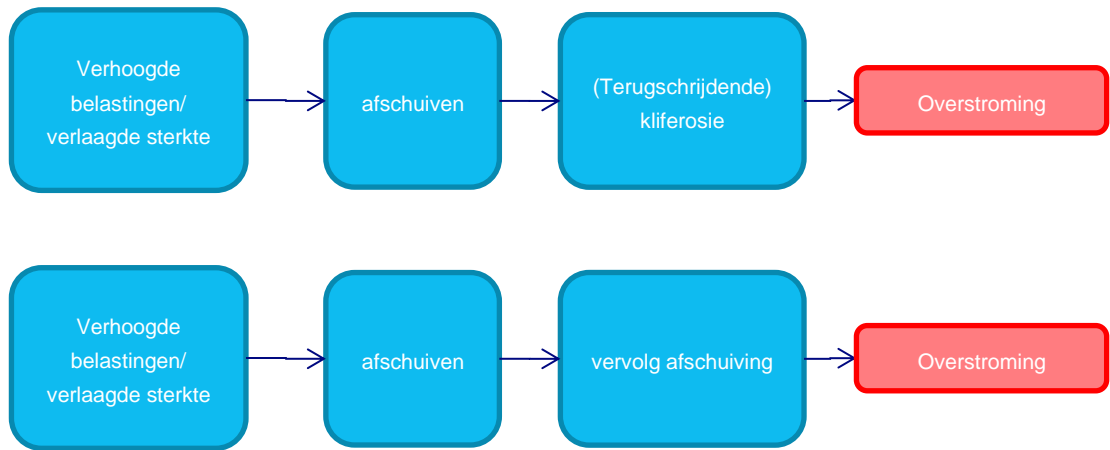
Figuur 3.7 Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor geotechnische instabiliteit, zonder vervolprocessen, aansluitend op het WBI2017.

In Figuur 3.7 zijn als eerste knoop de in paragraaf 3.3 beschreven mechanismen gehanteerd. Na deze eerste knopen dienen veelal nog vervolprocessen plaats te vinden voordat sprake is van bresvorming en overstroming. Dit betekent dat er nog knopen na het initiërende mechanisme (eerste knoop) kunnen/moeten worden opgenomen in de gebeurtenissenboom, zie Figuur 3.8. Hierbij kan het zo zijn dat de vervolprocessen kunnen bestaan uit meerdere takken (faalpaden).



Figuur 3.8 Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor geotechnische instabiliteit.

Uitgaande van de twee voor de hand liggende vervolgmechanismen kliferosie en vervolgafschuiving kunnen dan de volgende lineaire faalpaden geconstrueerd worden uitgaande van het initiële mechanisme afschuiven (een vergelijkbare aanpak kan voor afdrukken en uitspoelen worden gevolgd). De knopenkaart gepresenteerd in REF (volgt) geeft vervolgens een beeld van de bepalende factoren en beschikbare instrumenten voor deze faalpaden.



Figuur 3.9 Voorbeelden van lineaire faalpaden volgend uit het initele mechanisme afschuiven.

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

4 Toepassing raamwerk

Concretiseren hoe je met de cirkels tot een overstromingskans komt:

- 4.1 Bepalen relevantie rondjes (uit te werken tot beslisregels) – 3.3 beschrijft de fysica van het rondje en 4.1 beschrijft de manier waarop de grootte van het rondje kan worden bepaald ten opzichte van elkaar.
- 4.2 Bepalen te beschouwen scenario's en bepalen analyse voor eerste bepaling overstromingskans.
- 4.3 voorbeelden gerelateerd aan archetypen van primaire keringen in hoofdstuk 3.

4.1 Bepalen relevantie en dominante initiële mechanismen

PM

Diepe en ondiepe afschuivingen

Hoewel diepe en ondiepe afschuivingen fysisch dezelfde processen zijn, kan er bij het uitvoeren van analyses aanleiding zijn om diepe en ondiepe afschuivingen afzonderlijk uit te werken. In de ideale situatie zou met hetzelfde model de geotechnische instabiliteit integraal worden geanalyseerd. In de huidige praktijk met de beschikbare rekenmodellen is dat niet altijd mogelijk. Denk hierbij aan het toepassen van verschillende schematisaties, verschillende schuifsterktemodellen en verschillende schuifvlakmodellen als het accent op de diepe of juist op de ondiepe mechanismen ligt. Als op voorhand duidelijk is of een diep of een ondiep mechanisme maatgevend is, kunnen de schematisatie en de toe te passen modellen daarop worden afgestemd. Het is in dat geval een niet noodzakelijke inspanning om beide mechanismen te analyseren. Als een diep mechanisme maatgevend is, kan bijvoorbeeld het model LiftVan worden toegepast en ligt de nadruk in de schematisatie op de stijghoogte in de watervoerende zandlaag en het freatisch vlak in de dijk kern. Als een ondiep mechanisme maatgevend is, ligt het toepassen van het model Spencer-Van der Meij meer voor de hand en ligt het accent in de schematisaties op de waterspanningen in de kleibekleding en de initieel onverzadigde zone. Wanneer niet op voorhand duidelijk is of een diep of een ondiep mechanisme maatgevend is, moeten beide mechanismen geanalyseerd worden. In dat geval zal het vaak nodig zijn om beide mechanismen afzonderlijk te analyseren, omdat het lastig is met hetzelfde schuifvlakmodel en zoekgebied met voldoende nauwkeurigheid het maatgevende schuifvlak te vinden als dat zowel een diep als een ondiep mechanisme kan zijn. Dit vraagt dan om meerdere schuifvlakberekeningen met verschillende zoekgebieden. De schematisatie kan in dit geval wel dezelfde zijn, mits deze schematisatie een realistische weergave van de fysica betreft met alle aspecten voor zowel het diepe als het ondiepe mechanisme.

4.2 Bepalen te beschouwen scenario's en bepalen analyse voor eerste bepaling overstromingskans

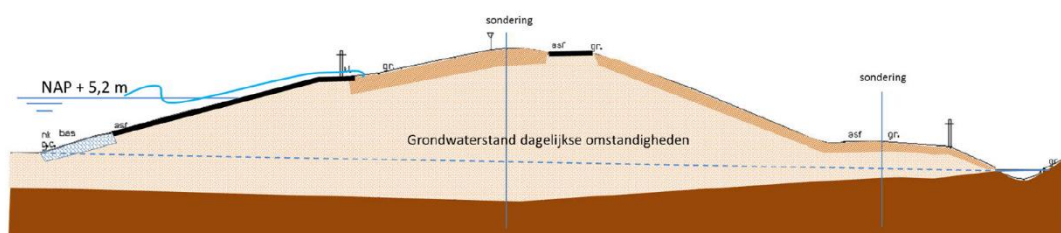
PM

4.3 Voorbeelden

4.3.1 Zanddijk met kleibekleding

In dit voorbeeld wordt een zanddijk met een kleibekleding langs de Waddenzee beschouwd. De dijk is in de jaren 70 van de vorige eeuw aangelegd door het opspuiten van zand. De dijk heeft een brede basis van circa 60 m. De kruinhoogte is NAP +8,90 m. De bekleding op het buitentalud bestaat van onder naar boven uit een steenzetting, vaak deels (in de teen) bestort met gepenetreerde breuksteen, daarboven tot de buitenberm uit asfalt, daarboven uit een kleibekleding met gras. Het onderste deel van het talud met de steenzetting is vrij waterdoorlatend. Het asfalt daarentegen is min of meer waterdicht. De kleibekleding is afhankelijk van de vochtigheid en structuurvorming meer of minder doorlatend. De dikte van de kleilaag is in de orde van 1 m of dunner. Verwacht mag worden dat deze relatief doorlatend is.

Het binnentalud heeft een taludhelling van 1:2,5 en wordt beschermd door een kleilaag met een dikte van 0,6 m met daarop een laag teelaarde van 0,1 m en gras. De totale dikte van de laag bedraagt dus 0,7 m. De dijk heeft geen werkende drainage. De dijk ligt op een Holoceen pakket van klei en een enkel veenlaagje.



Figuur 4.1 Zanddijk met een kleibekleding langs de Waddenzee.

Voor de situatie zonder overslag geldt dat het freatisch vlak vooral gedomineerd wordt door de buitenwaterstand. Door de combinatie van de relatief korte duur van hoog water op de Waddenzee, de brede dijkbasis, de relatief dichte bekleding (veel asfalt) op het buitentalud en de doorlatende dijkskern, wordt bij hoog buitenwater bij de binnenteen van de dijk geen significante verhoging van het freatisch vlak verwacht.

Omdat geen significante verhoging van het freatisch vlak bij de binnenteen van de dijk wordt verwacht, is het niet aannemelijk dat afdrukken, uitspoelen of afschuiven van de bekleding van het binnentalud zullen optreden.

De ondergrond onder de dijk en in de polder bestaat uit een pakket van klei en kleizandige lagen met een dikte van circa 4 m.

Voor de dijk bevindt zich een brede kwelder. De kwelder is ruim een halve kilometer breed en bestaat uit een laag slib van ongeveer een meter dik met daaronder zand.

De kwelder is derhalve slecht waterdoorlatend.

Op basis van metingen van de waterspanningsrespons is vastgesteld dat verhoging van de buitenwaterstand leidt tot een verhoging van de stijghoogte in het watervoerende pakket. In hoogwateromstandigheden zal als gevolg van de stijghoogtetoeename in het watervoerende pakket ook de stijghoogte/waterspanning onder in de deklaag toenemen. Tevens kan bij een voldoende hoge waterstand de grenspotential worden bereikt. Hetgeen betekent dat er in een bepaald zone binnendijs vanaf de teen van de dijk opdrijven/opbarsten kan plaatsvinden.

Verhoging van de stijghoogte in het watervoerende pakket leidt daarom tot afname van de van de stabiliteit van diepe glijvlakken.

Bij zeer extreme condities kan golfoverslag optreden. Het golfoverslagdebiet zal echter gering zijn. Bij een gering golfoverslagdebiet wordt geen significante verhoging van het freatisch vlak in de dijk verwacht. De verzadigingsgraad van de klei op het binnentalud zal wel toenemen. Als gevolg daarvan neemt de mobiliseerbare schuifsterkte van de kleibekleding af. In situaties met overslag zal daarom naar verwachting geen afdrucken en/of uitspoelen optreden. Afschuiven van de kleibekleding van het binnentalud wordt in situaties met golfoverslag echter wel mogelijk geacht.

De overstromingskans wordt bepaald door afschuiven langs een diep schuifvlak.

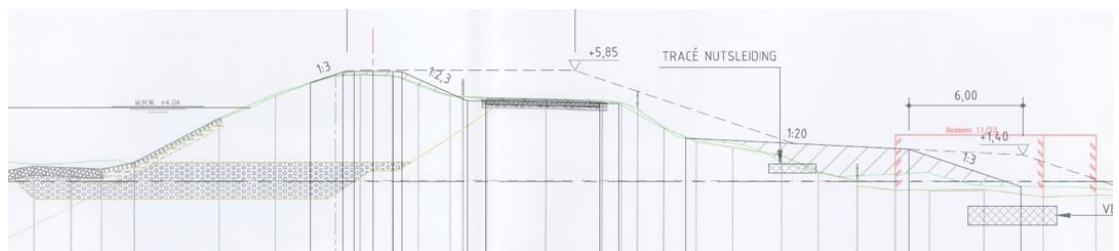
4.3.2 Kleidijk

In dit voorbeeld wordt een kleidijk in het westelijkdeel van het rivierengebied beschouwd. Deze dijk kent een lange geschiedenis van versterkingen. En zijn al eeuwen oud.

In de binnenteen en het binnentalud staan vaak woningen. Van 400 jaar oude monumenten tot moderne woningen van recente datum.

Van oorsprong is deze dijk opgebouwd uit lokaal gewonnen klei. In de eeuwen tot aan de grote dijkversterkingsprojecten van de jaren 80 en 90 van de 20^e eeuw en het eerste decennium van de 21^e eeuw zijn deze dijken ook met lokaal gewonnen klei versterkt en verhoogd. In de kern van de 'oude' dijk worden vaak grind en puin lagen aangetroffen, dit zijn door de tijd weggezakte oude wegverhardingen.

In de jaren 80 en 90 van de 20^e eeuw is deze dijk buitenwaarts versterkt met een zogenaamde paralleldijk. Deze paralleldijk is opgebouwd uit van elders aangevoerde rivierklei die aan de toen geldende eisen van klei voor dijken voldeed. In het tweede decennium van de 21^e eeuw is deze dijk versterkt met een kleine verhoging van de parallelkade en een stevige binnenberm.



Figuur 4.2 Kleidijk in het westelijkdeel van het rivierengebied.

De ondergrond onder de dijk en in de polder bestaat uit een dik pakket slappe lagen van organische klei en veen met in de top een dunne laag licht zandige klei.

De belasting is in dit gedeelte van het rivierengebied vooral storm gedomineerd. De belastingduur is daardoor vrij kort.

De korte duur en de uit goede dijkklei opgebouwde dijk zorgen er voor dat de freatische lijn in het dijklichaam in de zone waar deze invloed heeft op de stabiliteit niet stijgt als gevolg van de verhoging van de buiten waterstand. Eventuele golf overslag kan de waterspanningen in de binnendijkse gestructureerde deklaag verhogen.

Gegeven het feit dat de freatische lijn niet stijgt, zal in de situatie dat er geen significante overslag is de stabiliteit van ondiepe glijvlakken niet afnemen ten opzichte van de dagelijkse situatie.

Als er sprake is van significante overslag, dan kan door verzadiging van de toplaag van het binnentalud de toplaag van het binnentalud instabiel worden.

De schade zal ondiep zijn, maximaal de diepte waarover de klei van het binnentalud gestructureerd is.

Na het optreden van een dergelijke schade zijn er nog vervolprocessen nodig om een bres te veroorzaken.

Gezien de duur van de belasting, en de brede dijk, is het optreden van een bres door bijvoorbeeld erosie uitermate onwaarschijnlijk.

De mechanismen opdrukken en uitspoelen spelen niet bij een kleidijk.

Op basis van metingen van de waterspanningsrespons is vastgesteld dat verhoging van de buitenwaterstand leidt tot een verhoging van de stijghoogte in het watervoerende pakket. In hoogwateromstandigheden zal als gevolg van de stijghoogtetoeename in het watervoerende pakket ook de stijghoogte/waterspanning onder in de deklaag toenemen. Tevens zal bij een voldoende hoge waterstand de grenspotential worden bereikt. Hetgeen betekent dat er in een bepaald zone binnendijs vanaf de teen van de dijk opdrijven/opbarsten zal plaatsvinden.

Verhoging van de stijghoogte in het watervoerende pakket leidt daarom tot afname van de van de stabiliteit van diepe glijvlakken.

De overstromingskans wordt bepaald door afschuiven langs een diep schuifvlak.

5 Kennisleemten

PM

6 Conclusies

PM

7 Aanbevelingen

PM

Referenties

- Den Adel, H., Mastbergen, E.R. en Stoutjesdijk, T.P. Experimenteel onderzoek in geocentrifuge, Micro-instabiliteit kan ook optreden bij flauwe taluds. Land + Water nr. 5, 2008. (Nb. het artikel vermeldt ten onrechte: A.R. Koelewijn, C. Zwanenburg).
- Adviesteam Dijkontwerp (2021). Rode draden nr. 4 – Bekleding op het binnentalud. 24 december 2021.
- BAW (2011). BAW Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Ausgabe 2011.
- BOI (2019). Programmaplan BOI 2020 – 2023. Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Datum 30 november 2019. Status Definitief.
- Duinen, T.A. van, Hulst, M., Rinkel, H., Knoeff, H. (2021). Rode draad overstrooming door macrostabiliteit. Rijkswaterstaat, Hoogwaterbeschermingsprogramma, Deltares. 29 juni 2021.
- Fraccica, A., Romero, E., Fourcaud, T., Sondon, M., & Gandarillas, L. (2020). Tensile strength of a vegetated and partially saturated soil. In E3S Web of Conferences (Vol. 195, p. 03001).
- Ham, G., van den, van Hoven, A., van der Meer, A. (2020). Faalpadenanalyse macrostabiliteit. Binnenwaarts. Deltares rapport 11203719-027-GEO-0001, Versie 1, maart 2020, definitief.
- Hart, R., 't. (2018). Fenomenologische beschrijving. Faalmechanisme WBI. Deltares rapport, kenmerk 11200547-007-GEO-0005, versie C5, mei 2018.
- Van Hoven (2008). Sterkte van Kleibekleding bij Golfoverslag - Invloed van gras en bodemstructuur op de sterkte van klei. Deltares rapport 418020, Versie 1, 29 december 2008.
- Van Hoven, A., Hardeman, B., van der Meer, J. W., & Steendam, G. J. (2010). Sliding stability of landward slope clay cover layers of sea dikes subject to wave overtopping. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 5-5.
- Van Hoven (2017). POVM Beter benutten actuele sterkte - KIJK Analyse Infiltratieproef IJsseldijk. 11200643-002-GEO-0002, 29 november 2017, definitief.
- Kanning, W., ter Horst, W., Pol, J., Kok, M., Knoeff, H., Hüsken, L., De Visser, M. (2019). Faalpaden-Mogelijkheden faalpaden voor Nederlandse dijkveiligheidsanalyses. Deltares rapport (in samenwerking van TU Delft, HKV en RWS), kenmerk 11202560-004-GEO-0006, maart 2019.
- KPR (2018). KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4. Kennisplatform Risicobenadering. Datum : 08-03-2018. Versie : 2.
- Smale, A.J., Jongejan, R., Van der Kolk, B.. Werken met faalpaden - Deel 1: naar een beter beeld van de overstromingskans. Deltares rapport 11206817-005-GEO-0002, 6 juli 2022.

A Huidige situatie WBI 2017

In de huidige situatie kent het WBI 2017 vijf toetsporen die betrekking hebben op de sterkte en stabiliteit van binnen- en buitentaluds van dijklichamen. Het gaat om:

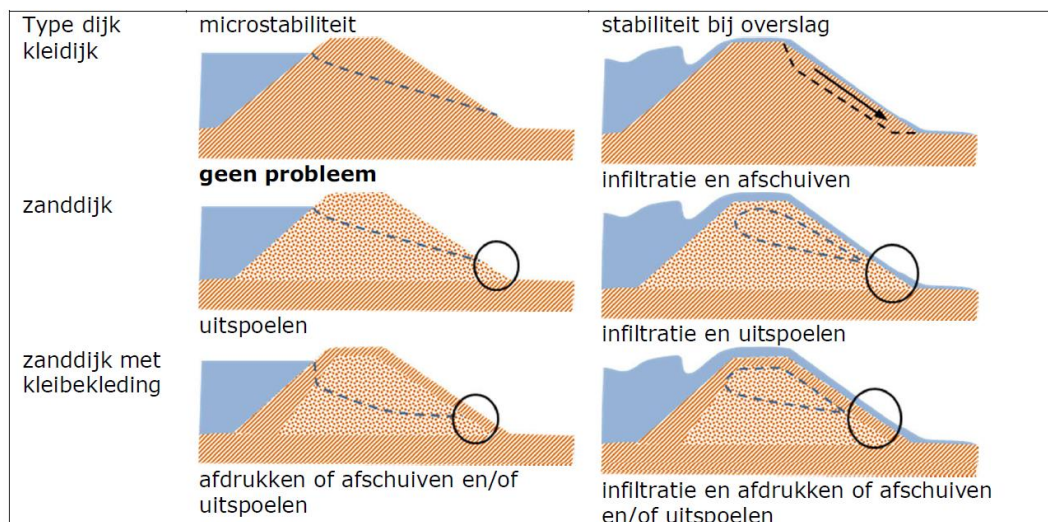
- Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI).
- Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU).
- Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI).
- Macrostabieliteit buitenwaarts (STBU).
- Microstabieliteit (STMI).

Bij deze toetsporen gaat het in wezen om drie fysische processen, namelijk afdrukken van een grasbekleding, uitspoelen en afschuiven (kleibekleding of een diepere afschuiving). In Tabel 2.1 is de samenhang tussen de bestaande beoordelingssporen in het WBI 2017 en de drie fysische processen waarop deze beoordelingssporen betrekking hebben weergegeven.

Tabel 7.1 Samenhang tussen de bestaande beoordelingssporen in het WBI 2017 en de fysische processen waarop deze beoordelingssporen betrekking hebben.

Mechanisme	Binnentalud		Buitentalud
	Overslag	Geen overslag	
Afdrukken kleibekleding	GABI	STMI	GABU (met golfklappen)
Uitspoelen	GABI	STMI	GABU (met golfklappen)
Afschuiven kleibekleding	GABI	STMI	GABU (met golfklappen)
Afschuiven (diep)	STBI (met KPR factsheet)	STBI	STBU

De toetsporen Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI) en Microstabieliteit (STMI) zijn nauw aan elkaar verwant. Indien er geen overslag van betekenis is (rekenwaarde bij overschrijdingskans van hydraulische belasting gelijk aan de norm is kleiner of gelijk aan 0,1 l/s per m (1×10^{-4} m³/s per m in SI eenheden)) dan worden beide toetsporen beoordeeld, waarbij uit de eenvoudige toets van het toetsspoor GABI overigens direct volgt dat de faalkans verwaarloosbaar is. Wanneer de rekenwaarde van het golfoverslagdebiet bij de norm groter is dan 0,1 l/s per m (1×10^{-4} m³/s per m in SI eenheden) wordt alleen het toetsspoor GABI doorlopen. Figuur 2.1 geeft de samenhang tussen de toetsporen GABI en STMI.



Figuur 7.1 Samenhang tussen de toetsporen GABI en STMI.

De samenhang tussen de toetsporen GABI, GABU, STMI, STBI en STBU betreft verschillende aspecten. GABI, GABU en STMI gaan over ondiepe stabiliteit-mechanismen (bekledingen/toplagen) en STBI en STBU gaan over diepere stabiliteit-mechanismen. Bij al deze toetsporen wordt stabiliteit langs een schuifvlak beschouwd. Bij GABI, GABU en STMI wordt daarnaast ook opdrukken van de bekleding en uitspoelen van zanddeeltjes beschouwd. Daarbij wordt GABI beschouwd als er overslag is en STMI als er geen overslag is. Uiteraard zijn voor GABU en STBU andere hydraulische condities relevant dan voor GABI, STMI en STBI.

De samenhang tussen de stabiliteit-mechanismen van deze vijf toetsporen betreft de beschrijving van de waterspanningen en de schuifsterkte. In de huidige praktijk worden deze mechanismen echter los van elkaar beschouwd. Vanuit het perspectief van de overstromingskansbenadering en het verhaal van de kering is het wenselijk de beoordeling van deze mechanismen in lijn met elkaar te brengen. In de concept Ministeriële Regeling voor het BOI 2023 wordt al voorgesteld de stabiliteit van het binnentalud integraal te beschouwen en daarbij geen onderscheid te maken tussen GABI, STMI en STBI.

Wat de afschuifmechanismen van GABI, GABU, STMI, STBI en STBU betreft, worden GABI, GABU en STMI met empirische rekenregels beoordeeld. Hierbij wordt uitgegaan van het Mohr-Coulomb schuifsterktemodel. In de analyse van afschuiven van een kleibekleding is hierbij vaak een onrealistische hoge waarde voor de schuifsterkteparameter cohesie nodig om voor een gangbare taludhelling een realistische stabiliteitsfactor te berekenen. Het waterdrukverloop in de kleilaag wordt hydrostatisch aangenomen. GABU wordt op basis van een empirische formule beoordeeld, waarin de eigenschappen van de kleilaag, de golfhoogte en de taludhelling van belang zijn. Ook in dit model wordt het waterdrukverloop in de kleilaag hydrostatisch aangenomen. Voor STBI en STBU worden de schuifvlakmodellen Bishop, Uplift-Van en Spencer-Van der Meij toegepast. Bij toepassing van deze schuifvlakmodellen kan een schuifsterktemodel afzonderlijk worden gekozen (in D-Stability: Mohr-Coulomb, SHANSEP of su-tabel). Het waterdrukverloop kan door de gebruiker worden geschematiseerd. Voor de analyse van de afschuifmechanismen van GABI, GABU en STMI kan in principe ook gebruik worden gemaakt van de methode Spencer – Van der Meij.

Voor STBI en STBU is er in de achterliggende jaren veel ontwikkeling geweest in het beschrijven van de schuifsterkte en het probabilistisch rekenen. Wat de beschrijving van de schuifsterkte betreft, wordt op dit moment nog onderzoek gedaan naar de (initieel)

onverzadigde zone. Voor het uitvoeren van probabilistische analyses voor STBI en STBU zijn diverse documenten opgesteld, o.a. de publicatie POV-M Actuele Sterkte. Deze kennis kan ook worden benut voor de stabiliteit-mechanismen van GABI, GABU en STMI. De aanpak voor het uitvoeren van probabilistische analyses voor STBI en STBU (met fragility curves) kan ook worden benut voor de opdruk- en uitspoelmechanismen vallend onder GABI, GABU en STMI. In het kader van de ontwikkeling van de Embankment Suite wordt gewerkt aan een grondwaterstromingsmodel (D-Flow). Dit grondwaterstromingsmodel is gebaseerd op de eindige elementen methode en hiermee kan op termijn ook niet-stationair worden gerekend en kan worden gerekend aan onverzadigde grondwaterstroming. Dit grondwaterstromingsmodel kan de waterspanningsschematisatie voor schuifvlakberekeningen in D-Stability genereren. Bij het toepassen van het schuifvlakmodel Spencer – Van der Meij voor de beoordeling van de afschuifmechanismen van GABI, GABU en STMI zou het grondwaterstromingsmodel D-Flow ook kunnen worden ingezet voor het modelleren van de waterspanningen voor deze afschuifmechanismen.

Wat de situatie met overslag betreft, worden bij macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) veelal relatief ondiepe schuifvlakken berekend. Bij GABI worden ook ondiepe schuifvlakken door de kleibekleding geanalyseerd. Voor beide toetssporen is op dit moment nog een ander veiligheidsformat van toepassing. Voor het beoordelen en ontwerpen van macrostabiliteit in situaties met overslag wordt een buitenwaterstand gecombineerd met een overslagdebiet. Bij semi-probabilistische analyses van macrostabiliteit worden conform het KPR-factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4 (KPR, 2018) voor situaties met overslag twee scenario's doorgerekend, namelijk 1) met de waterstand bij de norm en 2) met een overslagdebiet van 1,0 l/s/m en infiltratie in het dijklichaam gecombineerd met een buitenwaterstand behorend bij de overschrijdingskans van het overslagdebiet van 1,0 l/s/m. Voor GABI zijn op dit moment nog empirisch vastgestelde partiële veiligheidsfactoren van toepassing (toetsspoor in groep 4).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl