



INDIRECTE MECHANISMEN DIJKEN/DAMMEN DEEL 5

Handleiding Overstromingskansanalyse





Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding Overstromingskansen Dijken/Dammen

Deel 5 Indirecte mechanismen

Colofon

Uitgegeven door
Informatie
Versie

Rijkswaterstaat
www.iplo.nl
Juli 2023

Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse dijken/dammen - deel 5 Indirecte mechanismen is onderdeel van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

Een van de doelstellingen van het programma BOI is het denken vanuit het gedrag van de kering en het werken met overstromingskansen beter mogelijk te maken. De inzet van het instrumentarium is flexibeler geworden. De beheerder maakt zelf de afweging welk model het meest geschikt is voor zijn kering. Ook wordt het volledige faalpad dat leidt tot een overstroming beschouwd.

Het 'papieren' instrumentarium is daarom opnieuw ingericht en bestaat nu uit de handleidingen Overstromingskansanalyse voor de verschillende typen keringen en de verschillende faalmechanismen én de Technische leidraden. De nog relevante onderdelen uit het WBI2017 uit bijlage III, de schematiseringshandleidingen en de leidraden en technische rapporten zijn hierin opgenomen.

Het gedrag van de kering centraal zetten klinkt logisch en past bij de ervaringen uit LBO-1. Deze stap lijkt dan ook eenvoudig: het basisinstrumentarium wijzigt inhoudelijk nauwelijks, de kering blijft hetzelfde en er zijn weinig nieuwe inzichten van de fysica. Toch hebben we bij de ontwikkeling van het instrumentarium en het opstellen van de handleidingen ervaren dat het in de praktijk lastig en soms theoretisch is. Het 'gedrag van de kering centraal' werkt namelijk door in het hele instrumentarium en vraagt dat er met een nieuwe blik naar wordt gekeken. Het kostte tijd om de nieuwe begrippen te doorgronden en op te schrijven. We zijn dan ook verschillende keren opnieuw begonnen.

Deze eerste groene versies zijn daarom nog niet perfect. De theoretische discussies zijn gevoerd, maar voor verdere aanvulling is het nodig dat praktijkervaring wordt opgedaan. Daarbij is het belangrijk dat we de nieuwe begrippen die steeds aan het eind van elke handleiding staan, consistent en eenduidig gebruiken.

We houden rekening met een continue doorontwikkeling van deze handleiding. Door praktijkervaringen toe te voegen gaan we ervan uit dat we de handleiding steeds completer en gebruiksvriendelijker kunnen maken. We willen u daarom vragen om zoveel mogelijk ervaringen, positief en negatief, met ons te delen. Dat kan via [het vragenformulier op de IPLO](#). Op Iplo, de pagina van het BOI-portaal, zal periodiek een samenvatting van opmerkingen, vragen en antwoorden worden gepubliceerd en waar nodig een lijst met errata. Op basis van de opmerkingen en ontwikkelingen van kennis en instrumenten wordt jaarlijks een afweging gemaakt of een nieuwe versie nodig is.

Deze eerste groene versie van de handleiding is gezamenlijk opgesteld door Rijkswaterstaat, Deltares en marktpartijen. De kwaliteit is geborgd door een interne inhoudelijke review en controle op de consistentie over alle handleidingen vanuit het programma BOI. In 2024 worden nieuwe versies verwacht aangevuld met de eerste ervaringen en ook opmerkingen en aanbevelingen van ENW.

Het BOI-team

Inhoud

1	Inleiding	6
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	6
1.1.1	Procesinstrumentarium	6
1.1.2	Basisinstrumentarium	7
1.1.3	Werkatelier	8
1.2	Verhaal van de kering	8
1.3	Leeswijzer van deze handleiding	9
2	Beschrijving faalmechanisme	10
2.1	Niet Waterkerende objecten	12
2.1.1	Bebouwing	12
2.1.2	Begroeiing	13
2.1.3	Kabels en leidingen	14
2.1.4	Windmolens	15
2.2	Voorland en havendammen	17
2.2.1	Afschuiving voorland	17
2.2.2	Zettingsvloeiing	18
2.2.3	Golfafslag van voorland	18
2.2.4	Bezwijken havendammen	19
2.3	Overig	20
2.3.1	Afschuiving buitentalud	20
2.3.2	Graverij	21
3	Bepalen relevantie met beslisregels	23
3.1	Niet-waterkerende objecten	23
3.1.1	Bebouwing	23
3.1.2	Begroeiing	24
3.1.3	Kabels en leidingen	24
3.1.4	Windmolens	24
3.2	Voorland en havendammen	24
3.2.1	Afschuiving voorland	24
3.2.2	Zettingsvloeiing	25
3.2.3	Golfafslag van voorland	26
3.2.4	Bezwijken havendammen	26
3.3	Overig	27
3.3.1	Afschuiving buitentalud	27
3.3.2	Graverij	27
4	Eerste inschatting van de overstromingskans	29
4.1	Niet-waterkerende objecten	30
4.1.1	Bebouwing	30
4.1.2	Begroeiing	31
4.1.3	Kabels en leidingen	31
4.1.4	Windmolens	33
4.2	Voorland en havendammen	35
4.2.1	Afschuiving voorland	35
4.2.2	Zettingsvloeiing	36
4.2.3	Golfafslag van voorland	36
4.2.4	Bezwijken havendammen	37
4.3	Overig	38
4.3.1	Afschuiving buitentalud	38

4.3.2 Graverij 39

5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans 47

5.1 Niet-waterkerende objecten 47

5.1.1 Bebouwing 47

5.1.2 Begroeiing 48

5.1.3 Kabels en leidingen 48

5.1.4 Windmolens 49

5.2 Voorland en havendammen 49

5.2.1 Afschuiving voorland 49

5.2.2 Zettingsvloeiing 50

5.2.3 Golfafslag van voorland 50

5.2.4 Bezwijken havendammen 51

5.3 Overig 51

5.3.1 Afschuiving buitentalud 51

5.3.2 Graverij 52

6 Literatuur 53

Bijlage A Begrippenlijst 55

1 Inleiding

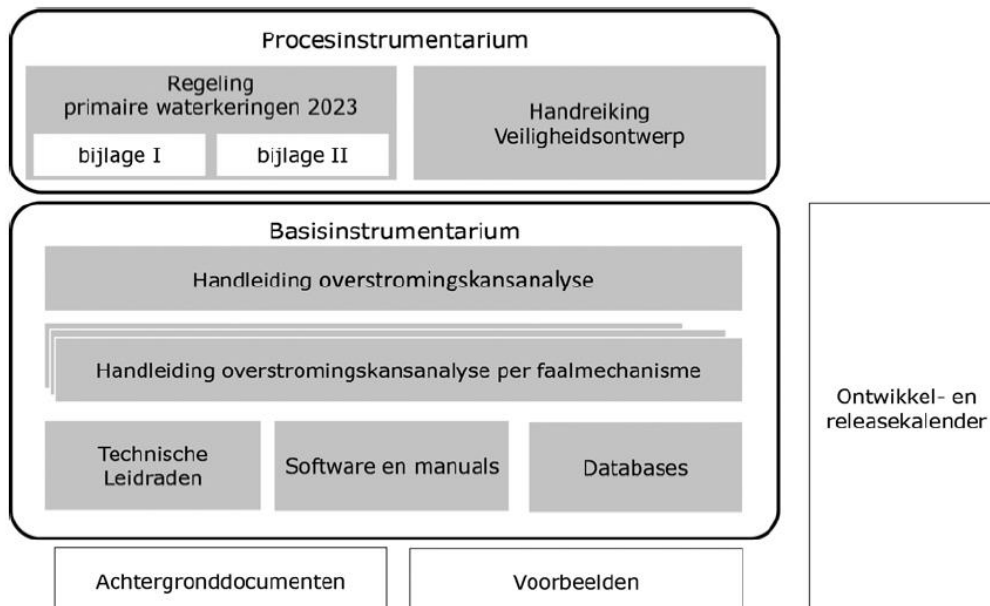
Deze handleiding beschrijft de aanpak voor een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans vanuit indirecte mechanismen. Het verhaal van de kering staat daarbij centraal. De handleiding is geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling, of bij het maken van een ontwerp voor een versterking, de overstromingskans te bepalen.

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023, zie Bijlage A.

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling op en stelt leidraden, handleidingen en software beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire keringen. Onder het beheer van een waterkering vallen alle activiteiten die erop gericht zijn de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten uitvoeren.

Als hulpmiddel bij de veiligheidsbeoordeling en het opstellen van een ontwerp voor een versterking stelt het Rijk het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) beschikbaar. Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten, zie Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht BOI

1.1.1 *Procesinstrumentarium*

Voor het beoordelen bestaat het procesinstrumentarium uit de Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2023 en twee bijlagen:

- Bijlage I Procedure beoordeling primaire waterkeringen
Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Ook zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.
- Bijlage II Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen

In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

De handreiking *Veiligheidsontwerp* is het procesinstrumentarium dat vanuit BOI beschikbaar wordt gesteld. Deze handreiking geeft ondersteuning en licht de keuzes toe die voor waterveiligheid moeten worden gemaakt. Zowel in het ontwerpproces van het definiëren van de dijkversterkingsopgave in de trajectaanpak, als voor het realiseren van dijkversterkingsmaatregelen.

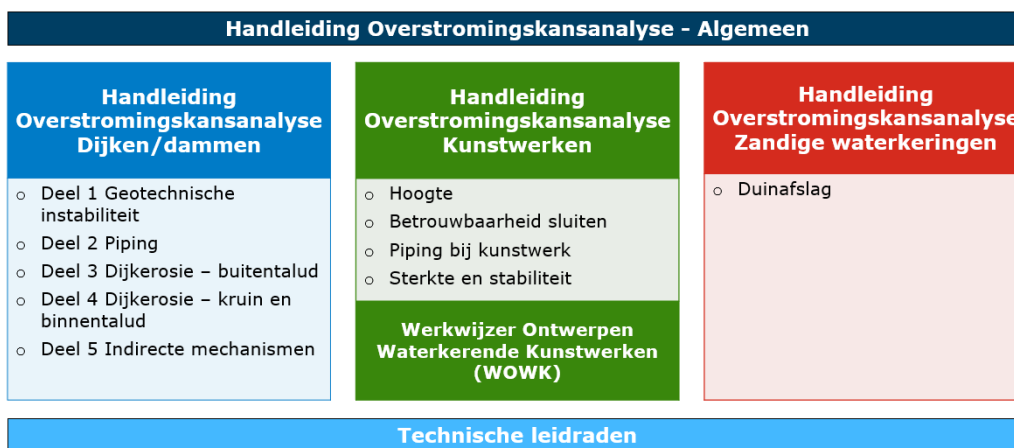
1.1.2 Basisinstrumentarium

Het basisinstrumentarium bestaat uit handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases. Deze instrumenten kunnen worden gebruikt om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen.

1.1.2.1 Handleidingen

De handleidingen van het BOI ondersteunen bij het uitvoeren van de analyses om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen, zowel voor het uitvoeren van een beoordeling als een ontwerpverificatie. In de handleidingen worden alle keuzes, overwegingen en activiteiten beschreven die op basis van het verwachte gedrag van de waterkering nodig zijn om de overstromingskans te bepalen.

Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende handleidingen.



Figuur 2: Overzicht van de verschillende handleidingen

De handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen (Rijkswaterstaat, 2023) beschrijft de algemene aanpak van de bepaling van de overstromingskans van primaire waterkeringen. Daarnaast staan er handvatten in voor het opstellen van het verhaal van de kering (zie paragraaf 1.2), waarmee de waterkering in de context van de omgeving wordt bekeken. Hierbij is uitgegaan van drie leidende principes:

1. Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
2. Een geloofwaardige overstromingskans.
3. Het systeem staat centraal.

Deze handleiding geeft handvatten voor de bepaling van de overstromingskans voor indirecte mechanismen en is een concrete uitwerking van de aanpak zoals beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse.

1.1.2.2 Technische leidraden

Naast handleidingen voor faalmechanismen maken ook technische leidraden onderdeel uit van het BOI. Technische leidraden bevatten informatie over onderdelen van de waterkering, mechanismen, sterkte en belastingen die samen bepalend zijn voor de overstromingskans. Ook gaan de technische leidraden in op rekenmodellen en rekentechnieken die kunnen worden gebruikt voor het berekenen van overstromingskansen. De technische leidraden zijn te vinden op <https://tl.iplo.nl/>.

1.1.2.3 Software en databases

De modellen en applicaties die onderdeel uitmaken van het BOI, kunnen gebruikt worden om de kans van optreden van bepaalde mechanismen te berekenen. *Riskeer* is de user interface (UI) van de applicaties van het BOI. *Riskeer* voegt de resultaten van de verschillende faalpadanalyses samen om een inschatting te kunnen maken van de overstromingskans van het dijktraject.

De databases bevatten de hydraulische belastingen voor de verschillende watersystemen en de scenario's voor de schematisatie van de ondergrond (SOS).

1.1.3 *Werkatelier*

Deze handleiding is vooral gericht op de bepaling van de overstromingskans en *niet* op het proces. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage I en II van de Regeling en de afspraken die hierover zijn gemaakt in het draaiboek (Rijkswaterstaat, 2022). In het draaiboek is een werkatelier gedefinieerd waarin een groep specialisten en beheerders onder leiding van een voorzitter een doelmatig en uitvoerbaar advies opstellen voor de bepaling van de overstromingskans van het dijktraject van de beheerder. Het doel hiervan is een verklaarbaar, consistent en stabiel resultaat van de beoordeling. Ook kan dit aanbevelingen geven voor het BOI.

1.2 **Verhaal van de kering**

Het verhaal van de kering draagt bij aan het begrijpen en kunnen duiden van de functie van het dijktraject in het systeem. Het geeft per dijktraject ook inzicht in de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Gebeurtenissen- en foutenbomen zijn methoden die daarbij kunnen helpen.

Het verhaal bestaat uit een beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het wordt opgesteld op basis van bestaande informatie en geeft een overzicht van de ordening en interpretatie van de gegevens in het data- en informatiesysteem van de waterkering waar het een onderdeel van is. Dit verhaal bepaalt de ordening en de aard van gegevens die nodig zijn voor een analyse van de overstromingskans. Een actueel en volledig data- en informatiesysteem, waarin continu de laatste inzichten worden verwerkt, is een voorwaarde voor een plausibele uitkomst van een overstromingskansanalyse. Het verhaal van de kering is nooit af. Door nieuwe inzichten en ervaringen kan het verhaal wijzigen of worden aangescherpt.

Het verhaal van de kering bevat een aantal basiselementen:

- **Beschrijving van de waterkering:** De beschrijving van de eigenschappen van de waterkering die van belang zijn voor een overstromings- of faalkansanalyse, waarbij ook de relatie wordt gelegd met de historische achtergrond van de waterkering. Het gaat onder andere om de geometrie en de opbouw van de waterkering. Zoals bijvoorbeeld type bekledingen,

waterkerende constructies en kunstwerken en niet-waterkerende objecten die de overstromings- of faalkans kunnen beïnvloeden.

- **Geologische en geohydrologische analyse:** Het analyseren van geologische tijdvakken en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van het ondergrondsysteem kwalitatief beschrijven.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het beschrijven van de hydraulische belasting van het dijktraject vanuit het watersysteem, waar nodig in combinatie met hydrologische gebeurtenissen, zoals extreme neerslag.
- **Kennis en ervaring van de keringbeheerder:** Inspecties van de waterkering hebben inzicht gegeven in het optreden van schade en vervormingen van de waterkering. Daarnaast heeft de keringbeheerder de waterkering eerder beoordeeld en mogelijk versterkt.

1.3 Leeswijzer van deze handleiding

De handleidingen zijn geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling een geloofwaardige, herleidbare en stabiele overstromingskans te bepalen. De handleiding is geschreven voor de deskundige gebruiker die bekend is met de voorschriften, de (deel)faalmechanismen en de modellen die van toepassing zijn.

Deze handleiding is gericht op indirecte mechanismen. Hoofdstuk 2 beschrijft het gedrag van de kering en de wijze waarop de invloed van indirecte mechanismen op initiële mechanismen via faalpaden in rekening gebracht kan worden. In hoofdstuk 3 is geïnventariseerd in welke mate generieke beslisregels het mogelijk maken snel te filteren in welke situaties indirecte mechanismen niet relevant zijn.

Hoofdstuk 4 beschrijft de uitwerking van een eerste generieke analyse van de invloed van indirecte mechanismen op de overstromingskans. Deze eerste inschatting van de overstromingskans gaat er van uit dat voor de initiële mechanismen schematisaties en rekenmethoden beschikbaar zijn, zodat hiervan gebruik gemaakt kan worden om de invloed van indirecte mechanismen te benaderen. Afhankelijk van de lokale situatie kan de overstromingskans met nadere analyses worden aangescherpt, dit staat beschreven in hoofdstuk 5.

2 Beschrijving faalmechanisme

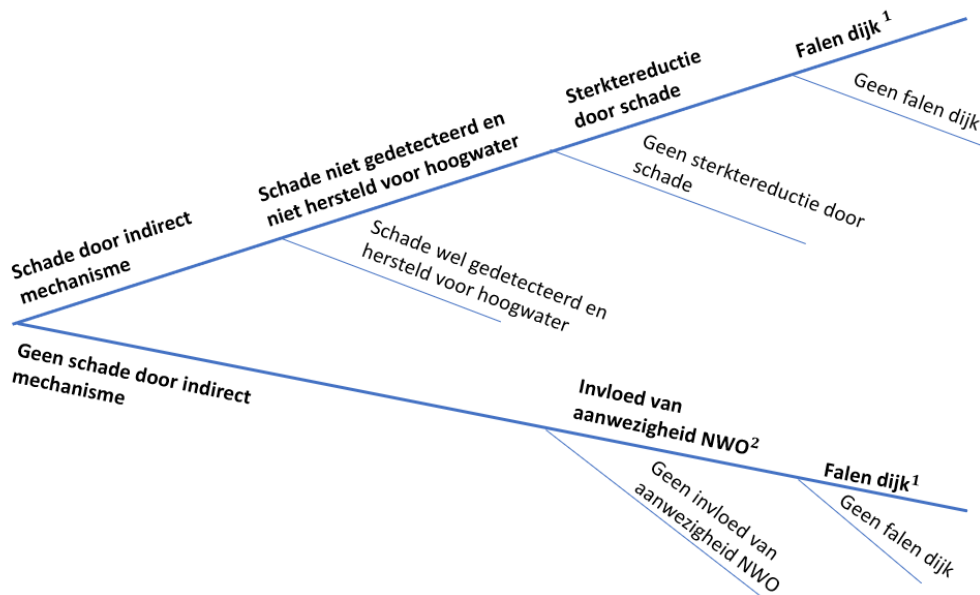
Indirecte faalmechanismen zijn in Tabel 4.2 van Bijlage II van de Regeling benoemd. In onderstaande tabel wordt dit herhaald:

Tabel 1: Overzicht van indirecte mechanismen

Type	Indirect mechanisme
Niet-waterkerende objecten	Mechanismen veroorzaakt door: <ul style="list-style-type: none"> - Bebouwing - Begroeiing - Kabels en leidingen - Windmolens
Voorland en havendammen	<ul style="list-style-type: none"> - Afschuiving voorland - Zettingsvloeiing - Golfafslag voorland - Bezwijken havendammen
Overig	<ul style="list-style-type: none"> - Afschuiving buitentalud - Graverij

“Indirecte mechanismen” is een verzamelterm en omvat zowel (niet-waterkerende) objecten als mechanismen. De “indirecte mechanismen” uit Tabel 1 zijn dan ook verschillend van aard.

Een belangrijk onderscheid dat gemaakt kan worden tussen de mechanismen is het moment waarop ze een negatieve invloed hebben op de overstromingskans. De mechanismen voorland en havendammen, afschuiving buitentalud en een graverij hebben slechts een invloed op de dijk als dit mechanisme optreedt. Niet-waterkerende objecten (NWO's) kunnen een negatieve invloed hebben als ze falen maar ook als ze niet falen, alleen door hun aanwezigheid. In Figuur 3 is dit weergegeven met globale faalpaden. In de figuur geeft het bovenste faalpad falen van de dijk (ofwel een overstroming) weer als gevolg van falen van een NWO of optreden van een indirect mechanisme. Het onderste faalpad geeft falen van de dijk weer door de aanwezigheid van een niet-gefaald NWO.



Figuur 3: Globale faalpaden voor indirecte mechanismen

Aan alle takken in de faalpaden (Figuur 3) kunnen kansen worden toegekend: de kans op optreden van het indirecte mechanisme, het wel of niet herstellen van de schade voordat de dijk zijn kerende functie moet vervullen, het soort en de mate van schade en tot slot het falen van de dijk met een overstroming als gevolg. In Figuur 3 zijn slechts twee (generieke) faalpaden opgenomen. Dit kan verder worden gedetailleerd als er echter meerdere oorzaken van optreden van indirecte mechanismen met verschillende gevolgen zijn welke met aparte faalpaden kunnen worden weergegeven en beschouwd.

Belangrijke factoren om rekening mee te houden zijn:

- Welke initiële mechanismen (geotechnische stabiliteit, piping, erosie) worden negatief beïnvloed door de schade van het NWO of het optreden van het indirecte mechanisme?
- Welk negatief effect heeft het niet-gefaalde NWO op de faalkans van de dijk?
- Verschillende oorzaken van optreden van een indirect mechanisme of falen van een NWO. Deze moeten allen worden beschouwd of kunnen worden uitgesloten. Het falen van een leiding kan bijvoorbeeld komen door graafschade, materiaal fouten, corrosie, vervormingen van het dijklichaam en operationele fouten. Een buitenwaartse afschuiving kan optreden door extreme neerslag of een snelle val van de buitenwaterstand.
- Is het optreden van het indirecte mechanisme of falen van het NWO gerelateerd aan hoogwater of niet? Bevers komen naar de dijk als het water stijgt, windmolens en bomen hebben een grotere faalkans als het stormt, et cetera. Een buitenwaartse afschuiving is daarentegen vaak gerelateerd aan een val na hoogwater.
- Kan de schade makkelijk worden ontdekt en hersteld? Een gebroken waterleiding in de kruin van de dijk die niet tot een ontgrondingskrater leidt, maar tot verhoogde waterspanningen wordt waarschijnlijk minder snel ontdekt dan een leiding met een ontgrondingskrater als gevolg.

In dit hoofdstuk wordt per indirect mechanisme een beknopte beschrijving gegeven van de faaloorzaken en de invloed die dat specifieke mechanisme kan hebben op de initiële mechanismen.

2.1 Niet Waterkerende objecten

2.1.1 *Bebouwing*

Bij bebouwing zijn de wijze van fundering (op staal of op palen) en de plaats in het dwarsprofiel bepalende factoren. Een aantal voorbeelden:

Geotechnische stabiliteit

Als de bebouwing op staal staat, dan levert deze een eigen gewicht belasting. Het gewicht van de bebouwing moet dan in de stabiliteitssommen worden meegenomen, mits aannemelijk is dat deze invloed negatief is. Voor binnenwaartse stabiliteit is dit het geval als de bebouwing in de (binnen)kruin of de bovenste helft van het binnentalud is gesitueerd. Een gemiddelde woning weegt ongeveer 15 kN/m². Vaak doorsnijden woningen, kelders en kruipruimtes het dwarsprofiel in grond, zodat er ook minder grond aanwezig is. Deze effecten kunnen elkaar deels of geheel opheffen, zodat de verwachting is dat de invloed van panden op staal in zijn algemeenheid redelijk beperkt is.

Als de bebouwing op palen is gefundeerd dan wordt het eigen gewicht via deze palen afgedragen aan de diepe ondergrond. Er moet dan echter wel worden gekeken of er onder het pand (diepe) kruipruimtes en of kelders zijn. Daar waar onder het maaiveld het gebouw aanwezig is bevindt zich geen grond. Het gemis aan grond kan negatief uitpakken indien dit in de onderste helft van het binnentalud of binnendijks is.

In het geval dat de bebouwing insnijdt in het dwarsprofiel dan kan er ook een invloed zijn op ondiepe faalmechanismen (uitspoelen en opdrukken bekleding binnentalud). De aanwezigheid van bebouwing kan ook invloed hebben op de waterhuishouding of de freatische lijn in de dijk. Deze fenomenen spelen vooral als ingesneden wordt in de onderste helft van het binnentalud.

Er zijn bij bebouwing op en nabij waterkeringen in het heden en verleden op veel locaties langsconstructies, erosieschermen of zogeheten functiescheidende damwanden toegepast om bebouwing bij dijkversterking sparen. In die gevallen moet de situatie inclusief constructie worden beschouwd.

Er wordt doorgaans vanuit gegaan dat de bebouwing tijdens hoogwater niet instort. Voor recente bebouwing is dat zeker aannemelijk, maar veel panden bij waterkeringen zijn historisch en de bouwkundige staat is niet altijd bekend. Bij twijfel zou er naar het ontstaan van een gat ter plaatse van het pand kunnen worden gekeken, maar vaak wordt ook geredeneerd dat als het pand instort het gewicht van het puin tijdens hoogwater niet wordt verwijderd, dus dat er feitelijk niet veel verandert ten aanzien van de stabiliteit van de waterkering.

Piping

Het mechanisme piping kan worden beïnvloed door bebouwing indien de bebouwing (inclusief het gedeelte wat zich beneden het maaiveld bevindt) insnijdt in het maaiveld. Indien de bebouwing insnijdt tot in watervoerende lagen dan is dat evident, maar onder in slappe lagen kan opbarsten eerder optreden onder het pand dan daarnaast. Met name binnendijks kan dit bij panden op palen een rol spelen. Als

de grond onder en rondom het pand zakt, maar het pand blijft op dezelfde hoogte, kan onder het pand ruimte ontstaan. Voor panden op palen met een verzwaarde punt kan kwel of piping optreden langs de palen. Dit soort verschijnselen is niet goed inspecteerbaar.

Erosie

Bij stroming van water vormt bebouwing een obstakel. Deze situatie kan optreden indien de bebouwing op voorland ligt dat bij hoogwater onder water komt te staan, of als er sprake is van golfoverslag of golfoverloop bij bebouwing die zich op de kruin, het binnentalud of binnendijks dicht bij de dijk bevindt.

Er zijn twee nadelige invloeden:

- Door bebouwing kan geen water stromen. Het water moet dus rondom het gebouw stromen, waardoor er sprake is van concentratie van stroming en extra belasting op de ondergrond rondom het gebouw.
- Het is rondom bebouwing doorgaans niet goed mogelijk om een gesloten erosiebestendige grasmat te garanderen. Het ligt daarom voor de hand om rondom bebouwing in deze omstandigheden rekening te houden met erosie.

2.1.2

Begroeiing

Bij begroeiing zijn het type begroeiing en de plaats in het dwarsprofiel belangrijke gegevens. Er wordt in de relevante literatuur ook vaak gewezen op de invloed van goede 'standplaatsfactoren' en de gezondheid van de begroeiing. Met de standplaatsfactoren wordt feitelijk bedoeld of de omstandigheden rondom de boom gunstig zijn voor een goede ontwikkeling van het wortelstelsel van de boom:

- Is er voldoende ruimte voor de wortels?
- Vaak groeien wortels niet goed in een zandondergrond, dus het kan voorkomen dat als er ondiepe zandlagen aanwezig zijn dat de wortels niet diep doordringen en er makkelijk ontworteling plaats kan vinden.

Het kan verondersteld worden dat gezonde en goed gewortelde bomen een vrij geringe kans op omwaaien (windworp) of afbreken hebben. Vaak zijn het oudere en minder gezonde exemplaren die omwaaien of afbreken. Op voorhand kunnen hier twee conclusies aan verbonden worden:

- Het kan zinvol zijn om met een bomendeskundige het bestand aan begroeiing op en langs de waterkeringen in beeld te brengen en potentieel minder stabiele beplanting te identificeren.
- Verschillende boomsoorten zijn meer of minder gevoelig voor windworp. Sommige boomsoorten zullen niet omwaaien, maar eerder zal de stam afbreken. De ontgroning bij windworp kan ook per boomsoort in doorsnee en diepte verschillend zijn. Dit soort gegevens kan helpen om een betere risico-inschatting te maken.

Geotechnische stabiliteit

Bij hoogopgaande beplanting kan er sprake zijn van een aanzienlijke windbelasting. Deze kan softwarematig worden meegenomen in stabiliteitsberekeningen. Indien er sprake is van een rij bomen dan kan dit redelijk tweedimensionaal (in een dwarsdoorsnede) worden gemodelleerd. Bij één of enkele bomen wordt de invloed in een tweedimensionale berekening overschat.

Bij windworp van een boom kan er een ontgrondingskuil ontstaan. Als de boom inclusief ontgrondingskluit op zijn plaats blijft liggen verandert er niet zoveel ten aanzien van de stabiliteit. Als de boom dwars over een weg ligt dan is het waarschijnlijk dat deze snel zal worden verwijderd en kan het zinnig zijn om een

berekening inclusief ontgroning uit te voeren. Overigens kan ook gewoon eerst het gat worden opgevuld met grond voordat de boom wordt verwijderd.

Omwaaien van bomen en ontgroning kan invloed hebben op mechanismen als opdrukken en erosie van de bekleding op het binnentalud. Als er een gat ontstaat in het binnentalud, kan hier water uitstromen en erosie optreden als een kleibekleding hierdoor wordt doorbroken.

Piping

Het mechanisme piping kan worden beïnvloed als bomen inclusief wortels reiken tot de watervoerende lagen. De boom wortelt in de klei, maar er is een ondiepe zandlaag aanwezig. Dit zal vooral binnendijks een risico kunnen vormen. Een ontgrondingskuil van een boom bij windworp kan een geconcentreerd uittredepunt voor piping vormen. Dat een ontgrondingskuil van een boom buitendijks grote invloed op de grondwaterstroming en het mechanisme piping heeft wordt minder waarschijnlijk geacht.

Erosie

In beperkte mate vormen bomen, net als bebouwing, obstakels in stromend water. Begroeiing en wortels kunnen echter ook grond vasthouden. Bij beplanting op de kruin en het binnentalud en een situatie met golfoverslag kan dit een risico vormen.

Het kan ook zijn dat bomen omwaaien of door stroming worden ontworteld. Er ontstaat dan een ontgrondingskuil die met name in zandig materiaal aangrijpingspunt kan vormen voor verdere erosie. Als de beplanting op meer dan enkele meters uit de waterkering staat is het risico dat hierdoor de waterkerende functie wordt beïnvloed normaliter verwaarloosbaar.

Bomen op de kruin of het binnentalud geven ook schaduw wat de kwaliteit van de grasmat negatief beïnvloed en daarmee de erosiesterkte van de grasmat.

2.1.3

Kabels en leidingen

In de meer stedelijke gebieden en bij bebouwing in de buurt van de waterkeringen is het onvermijdelijk dat er ook kabels en leidingen in de dijk en de invloedzone van de dijk liggen. De risico's concentreren zich met name op de leidingen. Er is relatief veel onderzoek gedaan naar de effecten van leidingen op de waterveiligheid. Verwezen wordt naar de Handreiking Niet-waterkerende objecten (RWS WVL 2021), omdat daarin de essentie is opgenomen, en ook verwezen wordt naar diverse praktijkcases die hier mee zijn uitgewerkt. Daarnaast zijn er verschillende nationale en internationale databases met leiding faalgevallen beschikbaar (onder andere EGIG voor gastransportleidingen, Nestor voor gasdistributieleidingen, Ustore voor drinkwaterleidingen en Concawe voor olietransportleidingen).

Oorzaken

Leidingfalen kan verschillende oorzaken hebben. Vaak wordt er onderscheid gemaakt tussen vijf verschillende oorzaken: graafschade, materiaalfouten, corrosie, grondvervormingen en operationele fouten. In de bovengenoemde databases (EGIG, Nestor, Ustore en Concawe) wordt ook aan elk faalgeval één van deze oorzaken toegekend. Samen met de aanwezige leidinglengte (ook vernoemd in de databases) kan de faalkans worden bepaald. Over het algemeen is de leidingfaalkans kleiner voor grotere leidingen. Dit is het gevolg van o.a. intensiever beheer en onderhoud en dikkere wanddiktes voor grotere leidingen. Verder wordt onderscheid gemaakt tussen de leeftijd van de leiding, leidingdrukken en leidingmateriaal (gietijzer, PE, PVC, etc.). Als bekend is dat de leiding van slechte kwaliteit is, niet voldoet aan de

NEN3650, kan niet zonder meer de leidingfaalkansen uit de databases worden aangehouden.

Gevolgen

Het gevolg van leidingfalen kan een erosiekrater, explosiekrater, verweking van verwekingsgevoelige lagen en verhoogde waterspanningen zijn. Verhoogde waterspanningen in het geval van "lekkende vloeistofleidingen", aangeduid als "sluipend lek". Een erosiekrater door uitstromend gas of vloeistof in het geval van grote leidingbreuken, wordt aangeduid als "gapend lek". Een explosiekrater en eventueel verweking in het geval van gasleidingen met een hoge druk. In de NEN3651 is de kwantificering van de schade uitgewerkt.

Naast de gevolgen van falende leiding kan ook langsloopsheid langs intacte leidingen een negatief effect hebben op de overstromingskans. Dit vergt vooral speciale aandacht indien de leiding in een betonnen koker of op betonplaten is aangelegd.

Geotechnische stabiliteit

Een krater in het talud, berm en de nabijheid van de dijk kan een negatieve invloed hebben op de macrostabiliteit van de dijk. Bij een zanddijk met krater is ook microstabiliteit relevant. Verhoogde waterspanningen in het dijklichaam hebben ook een negatieve invloed op de stabiliteit. Verweking heeft een negatief effect op de schuifspanning in de betreffende grondlaag.

Piping

Een krater in het voor- of achterland kan leiden tot een nieuw in- of uittredepunt voor piping, waardoor de kwelweglengte verkort.

Erosie

Als de bekleding van de dijk is aangetast door een krater heeft dit een negatief effect op de erosiebestendigheid. Een krater in het buitentalud vergroot de kans op erosie door golfaanval. Met een krater binnenwaarts of in de kruin neemt de kans op erosie door golfoverslag of overloop toe. Een krater kan ook invloed hebben op de hoogte van de dijk en daarmee een verhoging van de kans op overloop of overslag.

2.1.4

Windmolens

In bijlage II van de Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2023 worden windturbines aangeduid met de term 'windmolens'. Derhalve wordt in deze handreiking ook de term windmolens gehanteerd.

Windmolens worden vaak op of langs waterkeringen geplaatst, enerzijds omdat dit in het algemeen gunstige windlocaties betreft anderzijds vanwege het lijnelementkarakter. Windmolens zijn in principe niet waterkerende objecten, die vallen in de categorie "overige constructies". Je zou ze bijvoorbeeld als bebouwing kunnen beschouwen. Ditzelfde geldt voor constructies zoals brugpijlers en aanlegsteigers.

Gezien de omvang (grootte), specifieke risico's (aspecten) en inmiddels opgedane kennis met betrekking tot waterveiligheid, zijn windmolens separaat in deze handleiding opgenomen. Belangrijke referenties, waarin de kennis van windmolens in relatie tot de waterveiligheid is opgenomen zijn: KPR 2018, Stowa 2018 a, b en c en de Handreiking Risicozonering Windturbines die bestaat uit:

1. De HWR2020 (handreiking risico zonering), 20 mei 2020
2. Een handleiding Risicoberekeningen Windturbines; Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid; Module IV – Windturbines, oktober 2020.

Schade aan waterkeringen door (falen van) een windmolen kan ontstaan door het bezwijken van onderdelen van een windmolen: mastbreuk, gondelval, bladworp of bezwijken fundering. Dit kan een negatieve invloed hebben ten aanzien van: (kruin)hoogte, geotechnische stabiliteit, piping en erosie.

Ook indien er geen sprake is falen van een windmolen, kan deze (negatieve) invloed uitoefenen op een waterkering. De belangrijkste aspecten daarbij zijn: belasting op de waterkering (windkracht die wordt overgedragen op de waterkering), trillingen tijdens bedrijf, aangrijpingspunt voor erosie, in-/uittrede punt voor piping (onder andere ook de kwelweg langs funderingspalen).

Met name tijdens de aanleg- en/of ontmantelingsfase zullen er specifieke en mogelijk grotere risico's zijn ten aanzien van bovengenoemde aspecten. Van belang bij aanleg en in het ontwerp zijn:

- De locatiekeuze ten opzichte van de waterkering; zo mogelijk buiten de invloedzone van de waterkering, aan de lizijde van de waterkering en op minder kwetsbare locaties.
- De keuze van het type windmolen (o.a. hoogte, gewicht, afmetingen rotorbladen e.d.)
- De keuze van bouwkundige eisen die aan de constructieve elementen gesteld worden
- Specifieke maatregelen die getroffen kunnen worden ten behoeve van de veiligheid van de waterkering, dit geldt voor zowel de bedrijfsfase als voor de uitvoeringsfase
- Bijkomende werkzaamheden zoals aanleg trafostation en het leggen van kabels en leidingen naar de windmolen(s).

Hoogte

Het mechanisme hoogte kan worden beïnvloed door calamiteiten met een windmolen, zoals mastbreuk (val), gondelval en/of bladworp. Door dergelijke incidenten kan de kruinhoogte aangetast worden. Tijdens hoge waterstanden kan dit leiden tot overloop en overslag met bijkomende gevolgen zoals erosie en infiltratie, wat uiteindelijk kan leiden tot bezwijken van de waterkering en inundatie.

Geotechnische stabiliteit

Windmolens zijn gefundeerd op palen en een betonnen funderingselement, waardoor het eigen gewicht via deze palen afgedragen wordt aan de diepe ondergrond. Derhalve zal het eigengewicht geen rol spelen qua belasting op een waterkering. Er kan echter onder de fundering, door zakking wel ruimte ontstaan waar rekening mee gehouden moet worden. Het gemis aan grond kan theoretisch gezien negatief uitpakken voor geotechnische stabiliteit, maar in het algemeen zal dit voor geotechnische stabiliteit geen probleem vormen.

Verder dient er wel rekening gehouden te worden met het, via de fundering, overbrengen van trillingen in de ondergrond. Deze kunnen theoretisch een effect hebben op de sterkte van de ondergrond als gevolg van verweking en hogere waterspanningen. Hiermee kan derhalve ook de geotechnische stabiliteit worden beïnvloed.

Als gevolg van mastbreuk (val), gondelval kan een verlaging plaatsvinden van het maaiveld ter plaatse van een waterkering of kan een krater ontstaan. Afhankelijk van de omvang en locatie kan dit een negatief effect hebben op de geotechnische (macro)stabiliteit. Dit kan zowel binnen- als buitenwaarts zijn. Bij een zanddijk met een krater is ook microstabiliteit relevant.

Piping

Het mechanisme piping kan worden beïnvloed door windmolens indien deze insnijden (funderingspalen en funderingselement) in watervoerende lagen. Dit kan zowel binnen als buitendijks een rol spelen. Indien de grond onder het funderingselement zakt kan onder het funderingselement holle ruimte ontstaan. Dergelijke holle ruimtes kunnen een in- of uittredepunt voor piping vormen. Het ontstaan van holle ruimtes is niet goed inspecteerbaar.

Verder kan een krater in het voor- of achterland leiden tot een nieuw in- of uittredepunt voor piping, waardoor de kwelweglengte verkort.

Erosie

Als de bekleding van de dijk is aangetast door een krater heeft dit een negatief effect op de erosiebestendigheid. Een krater in het buitentalud vergroot de kans op erosie door golfaanval. Met een krater binnendijks of in de kruin is er een grotere kans op erosie door golfoverslag of door overloop. Een krater kan ook invloed hebben op de hoogte van de dijk, dus een verhoging van de kans op overloop of overslag.

2.2 Voorland en havendammen

2.2.1 Afschuiving voorland

In de beoordeling van de initiële mechanismen dient uitgegaan te worden van het fysiek aanwezige voorland. Als er door mechanismen als 'Afschuiving voorland', 'Zettingsvloeiing' of 'Golfafslag van voorland' iets verandert aan het fysiek aanwezige voorland, dan moet dat in beschouwing worden genomen. Dit kunnen aparte scenario's zijn, met een eigen kans van optreden.

Geotechnische stabiliteit

Door afschuiving van het voorland kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Er kan dan meer water onder de dijk doorstromen, waardoor binnendijks de potentiaal hoger wordt en de stabiliteit binnenwaarts afneemt.

Voor een afschuiving buitenwaarts kan een afschuiving van het voorland betekenen dat er aan de passieve kant van de glijcirkel grond verdwijnt, waardoor de stabiliteit buitenwaarts afneemt.

Piping

Door afschuiving van het voorland kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Het intredepunt voor piping kan dichterbij de waterkering komen te liggen, waardoor de kans op piping toeneemt.

Erosie

Als door een afschuiving van het voorland het maaiveld buitendijks lager komt te liggen dan kan er een invloed zijn op de golfhoogte ter plaatse van de dijk. Deze invloed is doorgaans klein. Er kan wel een invloed zijn op erosie van het voorland doordat grondlagen bloot komen te liggen, of omdat de erosie dichterbij de dijk optreedt.

Neveneffecten

Door afschuiving van het voorland kan het voorland bloot komen te staan aan vervolgerosie door stroming en golven.

2.2.2

Zettingsvloeiing

In de beoordeling van de initiële mechanismen dient uitgegaan te worden van het fysiek aanwezige voorland. Als er door mechanismen als 'Afschuiving voorland', 'Zettingsvloeiing' of 'Golfafslag van voorland' iets veranderd aan het fysiek aanwezige voorland dan moet dat in beschouwing worden genomen. Dit kunnen aparte scenario's zijn, met een eigen kans van optreden.

Geotechnische stabiliteit

Door een zettingsvloeiing kan een inscharing van het voorland optreden. Hierdoor kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Er kan dan meer water onder de dijk door stromen, waardoor binnendijks de potentiaal hoger wordt en de stabiliteit binnenwaarts afneemt.

Piping

Door een zettingsvloeiing kan een inscharing van het voorland optreden. Hierdoor kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Het intredepunt voor piping kan dichterbij de waterkering komen te liggen, waardoor de kans op piping toeneemt.

Erosie

Als door een zettingsvloeiing er een inscharing van het voorland optreedt dan komt het maaiveld buitendijks over een zekere afstand lager te liggen. Er kan een invloed zijn op de golfhoogte ter plaatse van de dijk. Deze invloed lijkt klein, maar is groter dan bij een afschuiving van het voorland. Er kan ook een invloed zijn op erosie van het voorland doordat grondlagen bloot komen te liggen, of omdat de erosie dichterbij de dijk optreedt.

Kruinhoogte

Hoewel zettingsvloeiing gerubriceerd is als een indirect mechanisme is er een kans dat door een zettingsvloeiing een dussdanige inscharing kan ontstaan dat deze tot in het buitentalud reikt of zelfs direct de kruinhoogte aantast. In het verleden zijn veel zettingsvloeiingen opgetreden, die al naar gelang de opgetreden inscharing aangeduid werden als 'oeverval' (de inscharing reikte tot in de vooroever) of als 'dijkval' (de inscharing reikte tot in de dijk of daarachter). In Zeeland is het lang gebruikelijk geweest dat er een stelsel van hoofdwaterkeringen met inlaagdijken was. Als er dan door een vloeiing een dijk in het water was verdwenen werd de inlaagdijk de nieuwe hoofdwaterkering. Gaandeweg de tijd werd dit tegengegaan door te diepe en te steile vooroevers te bestorten en zijn de risico's op dijkval afgenomen.

Neveneffecten

Door het profiel na optreden van een zettingsvloeiing kan het voorland bloot komen te staan aan vervolgerosie door stroming en golven.

2.2.3

Golfafslag van voorland

In de beoordeling van de initiële mechanismen dient uitgegaan te worden van het fysiek aanwezige voorland. Als er door mechanismen als 'Afschuiving voorland', 'Zettingsvloeiing' of 'Golfafslag van voorland' iets veranderd aan het fysiek

aanwezige voorland dan moet dat in beschouwing worden genomen. Dit kunnen aparte scenario's zijn met ieder een kans van optreden.

Onder golfafslag wordt hier verstaan dat er buitendijks erosie ontstaat gedurende een korte periode (dagen tot weken) bij maatgevende waterstanden. Er wordt met andere woorden niet een langduriger verandering in morfologie van voorland en vooroever bedoeld.

Geotechnische stabiliteit

Door golfafslag van het voorland kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Er kan dan meer water onder de dijk door stromen, waardoor binnendijks de potentiaal hoger wordt en de stabiliteit binnenwaarts afneemt.

Piping

Door golfafslag van het voorland kunnen watervoerende lagen bloot komen te liggen op een kleinere afstand van de waterkering dan bij een intact voorland. Het intredepunt voor piping kan dichterbij de waterkering komen te liggen, waardoor de kans op piping toeneemt.

Erosie

Als door golfafslag het profiel van het voorland lager komt te liggen dan kan er een invloed zijn op de golfhoogte ter plaatse van de dijk. Deze invloed lijkt doorgaans klein.

2.2.4

Bezwijken havendammen

Voor de beoordeling of het ontwerpen van waterkeringen gelegen achter havendammen zijn met name de hydraulische belastingen, afgegeven voor een locatie aan de ingang (buitenzijde) van een haven (buiten de invloed van havendammen), van belang.

Het mechanisme 'Bezwijken havendammen' is alleen van belang indien de havendammen een bijdrage hebben aan de waterveiligheidsbeschouwing. Dat is het geval indien bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de beoordeling van de primaire waterkering rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van de havendammen. Dit levert een gereduceerde hydraulische belasting op, die met name invloed heeft op de golfbelasting en de integriteit van bekledingen op het buitentalud. Als uitvloeisel daarvan zal er ook invloed zijn op de kruinhoogte en de mate van golfoverslag.

Indien een havendam niet bijdraagt aan de waterkerende functie van een waterkering, mag geen reductie van hydraulische belasting als gevolg van aanwezigheid van een havendam worden toegepast.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee type havendammen:

1. Havendammen met een grondlichaam, bestaande uit een buitentalud (met eventueel bermen), een ongeveer horizontale of afgeronde kruin, en een binnentalud (met eventueel bermen).
2. Verticale havendammen of havendammen met verticale elementen, bestaande uit een verticale voorzijde (meestal een damwand of kademuur).

Een combinatie van 1 en 2 is ook mogelijk. De te beoordelen mechanismen zijn verschillend per type havendam.

2.3 Overig

2.3.1 *Afschuiving buitentalud*

De afschuiving van het buitentalud is in Bijlage II onder de indirecte mechanismen gerangschikt.

Buitenwaartse afschuiving is een fenomeen dat op kan treden bij een (snel) dalende buitenwaterstand. De buitenwaterstand zakt sneller dan de waterstand in de dijk. Gesteld kan worden dat hier sprake is van een grote regionale verschillen in de mate van risico:

- In het bovenriviereengebied fluctueert de buitenwaterstand relatief langzaam onder invloed van rivierafvoeren. Aan de ene kant is er wel veel tijd om een hoge waterstand in de dijk te krijgen, maar de afname van de waterstand is ook dusdanig langzaam dat het onwaarschijnlijk lijkt dat buitenwaartse afschuiving op zal treden. Mocht er een afschuiving optreden dan zal het lang duren voordat er weer een hoogwater optreedt, zodat er tijd is voor maatregelen en herstel.
- In het benedenriviereengebied en de meren is sprake van langduriger hoogwater onder invloed van rivierafvoeren, maar wordt ook rekening gehouden met kortdurende stormopzet. De stormopzet neemt ook snel weer af. De vraag is of de waterstand in de dijk gedurende een storm heel hoog zal oplopen, dusdanig dat er groot verschil in waterstand in de dijk en de waterstand buiten de dijk op zal treden. Er is wel een kans dat als een afschuiving optreedt dat er relatief snel een nieuwe storm kan optreden.
- In de kust en estuaria wordt de waterstand gedomineerd door getij en stormopzet. Dit zijn relatief snelle gebeurtenissen, waardoor de waterstand in de dijk niet de gelegenheid krijgt om hoog op te lopen. De buitenwaterstand neemt wel relatief snel af (in enkele uren). Als er een afschuiving optreedt dan is er weinig tijd voor maatregelen en herstel, want binnen korte tijd kan er een nieuwe stormperiode optreden.

Er is een kleine kans dat een buitenwaartse afschuiving direct leidt tot kruinverlaging. In de overige gevallen is er sprake van een restkruinbreedte en moet er vervolgens erosie optreden of een ander initieel mechanisme vooraleer er sprake is van overstroming. De kans op vervolgerosie wordt ook bepaald door de vraag of er een hoogwater en storm met golven optreedt vóórdat de schade is geconstateerd en hersteld.

Geotechnische stabiliteit

Als het buitentalud bestaat uit een bekleding op een zandkern, dan kan de zandkern bloot komen te liggen. Water kan makkelijk in de zandkern infiltreren en een hoge waterstand in de dijk veroorzaken, waardoor ook de geotechnische mechanismen binnendijs een grotere kans op optreden hebben.

Piping

Dat een buitenwaartse afschuiving invloed heeft op piping, bijvoorbeeld doordat het intredepunt voor piping dicht bij de dijk komt te liggen lijkt niet waarschijnlijk.

Erosie

Naar verwachting de grootste bijdrage aan het overstromingsrisico zit in de sequentie van gebeurtenissen (faalpad) waarbij:

- Tijdens hoogwater de dijk volstroomt met water
- Tijdens een snelle val van de buitenwaterstand de dijk buitenwaarts afschuift
- De schade niet wordt geconstateerd en wordt niet hersteld kan worden of noodmaatregelen kunnen worden genomen vóórdát een volgend hoogwater optreedt
- Door storm en golven treedt vervolgerosie op, waardoor de kruin wordt verlaagd en uiteindelijk een dijkdoorbraak wordt veroorzaakt.

2.3.2

Graverij

Voor dierlijke graverij is de invloed van de graverij afhankelijk van verschillende aspecten, zoals het soort dier (bever, das, konijn, mol, et cetera), de locatie van de graverij in de kering (binnen- of buitenwaarts, talud, berm, et cetera) en de opbouw van de kering (zanddijk, kleidijk, et cetera).

Geotechnische stabiliteit

Door de dierlijke graverijen bestaat de mogelijkheid dat het verloop van het freatische vlak verandert en hierdoor van invloed kan zijn op de macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Tevens zal de heterogeniteit toenemen en het aantal holtes in de kering toenemen. De graverij kan hierdoor zorgen voor een lokale afname van de schuifweerstand in de kering met tot gevolg een invloed op de macrostabiliteit.

Onder geotechnische stabiliteit wordt ook microstabiliteit verstaan. In het geval van dierlijke graverij kan hier ook uitspoelen van grond door de gaten in de bekleding optreden. Het is hier wat gekunsteld om onderscheid te maken in microstabiliteit en hetgeen onder het kopje 'Erosie' of zelfs onder 'Falen grasbekleding' staat beschreven te maken.

Piping

Hol of ingang van een burcht aan de buitenzijde van de dijk kan leiden tot verkorting van de kwelweglengte, wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag wordt doorgraven.

Erosie

Wanneer het waterpeil in de rivier de ingang van een hol in het buitenwaartse talud overschrijdt, stroomt het water de graverij in en vult dit met water. Wanneer er kortsluiting optreedt met gangen aan het binnenwaartse talud, ontstaat er een drukverschil tussen de buiten- en binnenuitgang. De kwelkrachten die langs het oppervlak werken, kunnen de deeltjes eroderen en meenemen, waardoor het mechanisme van "interne erosie" binnen het dijklichaam wordt ontwikkeld. Internationaal wordt dit vaak aangeduid met de termen 'concentrated leak erosion', 'piping' of 'general piping' (niet te verwarren met terugschrijdende erosie door zandmeevoerende wellen ónder de dijk door, hetgeen binnen Nederland 'piping' wordt genoemd en in de internationale vakliteratuur wordt aangeduid met de term 'backward erosion piping').

Falen grasbekleding

Graverijen buitendijks kunnen leiden tot afdrucken van de kleibekleding binnendijks doordat de freatische lijn in de zandkern sneller zal stijgen, waardoor gemakkelijker verweking van het binnentalud ontstaat of afschuiving van het binnentalud door

verlaging van de korreldruk (en daarmee verlies van schuifsterkte) en toename van het gewicht. Het is gevolg is voortschrijdende erosie mede via het hol/de holen gecombineerd met toenemende kwel. Er zijn ook proeven gedaan met golfoverslag op het binnentalud waarbij een intacte grasmat flink wat overslag kon weerstaan, maar bij de aanwezigheid van dierlijke graverij al heel snel problemen met uitspoelen ontstonden (Wissekerke, Hedwigepolder).

3 Bepalen relevantie met beslisregels

In dit hoofdstuk wordt per indirect mechanisme ingegaan op de vraag in hoeverre er met beslisregels uitspraken gedaan kunnen worden over de relevantie van het indirecte mechanisme. De benadering met overstromingsrisico's en faalpaden geeft aan dat generieke beslisregels alleen aan kunnen geven of er situaties zijn aan te geven waarbij de indirecte mechanismen geen invloed hebben. Er zijn geen uitspraken mogelijk in termen als "de invloed is klein", want als de situatie zonder initiële mechanismen juist voldoet dan kan dat toch te veel invloed hebben. Zonder rekenen zijn zaken als 'veilige afmetingen' of 'beoordelingsprofiel' slecht te onderbouwen.

Er wordt om deze redenen ook niet voor gekozen om beslisregels op basis van invloedsgrenzen of invloedslijnen te geven. Hiervoor zijn (veel) berekeningen nodig. Het is in de filosofie met faalpaden logischer om direct uit te gaan van de invloed van indirecte faalmechanismen op de initiële mechanismen en te beoordelen of de kans op die complete keten van gebeurtenissen voldoet aan de eisen. De uitspraak of de situatie mét indirecte mechanismen voldoet hangt in deze visie sterk af van de vraag of de situatie zónder indirecte mechanismen ruim voldoet of slechts marginaal voldoet.

3.1 Niet-waterkerende objecten

3.1.1 *Bebouwing*

In het geval dat er bij voorgaande dijkversterking maatregelen of (langs)constructies zijn toegepast om de aanwezige bebouwing te sparen kan met de huidige inzichten worden bekeken of dat voldoende garantie biedt om verdere analyse achterwege te laten.

Het kan ook zijn dat de bebouwing in het verleden vergund is op basis van een analyse van de invloed op de waterkerende functie. Indien die vergunning nog steeds voldoet aan de huidige inzichten dan is verdere analyse niet nodig.

Indien de funderingswijze met zekerheid bekend is dan kan een negatieve invloed van panden op staal op het binnendijks maaiveld en de onderkant van het binnentalud worden uitgesloten. Voor panden op kruin en de bovenste helft van het binnentalud is de verwachting dat het eigen gewicht van het pand deels of geheel wordt gecompenseerd doordat het pand insnijdt in het dwarsprofiel en er dus minder grond aanwezig is. Een analyse hiervan kan ook aanleiding zijn om panden op staal uit te sluiten van verdere analyse.

Voor panden op palen kan een negatieve invloed worden uitgesloten indien de panden zich buitendijks, aan of op de kruin of het bovenste deel van het binnentalud bevinden.

Voor het overige wordt (zoals aangegeven in de inleiding van dit hoofdstuk) afgezien van algemene beslisregels. Er wordt vanuit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting van de overstromingskans inclusief aanwezige bebouwing worden gemaakt, zie paragraaf 4.1.1. Op basis van die berekeningsresultaten kan een nadere schifting worden aangebracht in bebouwing met en zonder relevante invloed.

3.1.2 *Begroeiing*

Het komt voor dat bij dijkversterkingen begroeiing is aangeplant in de berm, waarbij op de berm een overhoogte (1 meter) is toegepast. Ook als de beplanting omwaait is er dan geen invloed te verwachten op de initiële mechanismen.

Voor het overige wordt (zoals aangegeven in de inleiding van dit hoofdstuk) afgezien van algemene beslisregels. Er wordt vanuit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting van de overstromingskans inclusief aanwezige beplanting worden gemaakt, zie paragraaf 4.1.2.

3.1.3 *Kabels en leidingen*

Voor het overige wordt (zoals aangegeven in de inleiding van dit hoofdstuk) afgezien van algemene beslisregels. Er wordt vanuit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting van de overstromingskans inclusief aanwezige kabels en leidingen worden gemaakt, zie paragraaf 4.1.3.

3.1.4 *Windmolens*

Een algemene beslisregel is voor windmolens niet aanwezig of afgeleid. Het enige kan zijn dat er een dusdanige locatie wordt gekozen dat uitgesloten kan worden dat een windmolen effect heeft op de waterkering. Er wordt vanuit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting van de overstromingskans inclusief een aanwezige of aanwezige windmolens worden gemaakt. Daarbij kunnen negatieve effecten zoals kratervorming, of kruinhoogteverlies door valincidenten (mast, gondel rotorblad) binnen de trefzones van de waterkering in rekening worden gebracht op de van toepassing zijnde initiële faalmechanismen, zie paragraaf 4.1.4.

3.2 **Voorland en havendammen**

3.2.1 *Afschuiving voorland*

Het is mogelijk om beslisregels aan te geven aan de hand waarvan min of meer wordt uitgesloten dat afschuiving van het voorland op zal treden. Een afschuiving treedt mogelijk op als voldaan wordt aan één van de volgende voorwaarden:

- De gemiddelde taludhelling is steiler of gelijk aan 1V: 2H over een hoogte van minimaal 5 meter mits dit steile gedeelte niet alleen uit klei bestaat;
- De gemiddelde taludhelling is steiler of gelijk aan 1V: 1H over een hoogte van minimaal 5 meter mits dit steile gedeelte geheel bestaat uit klei;
- De totale taludhelling (van geulrand tot geulbodem) is steiler of gelijk aan 1V: 4,5H.

Indien aan ten minste aan één van deze voorwaarden wordt voldaan dan kan een afschuiving optreden. Er kan dan op grond van deze beslisregel geen oordeel worden gegeven.

Indien er aan geen van deze voorwaarden wordt voldaan dan is de kans op een afschuiving klein. Zonder afschuiving is er geen invloed op andere mechanismen.

Indien een afschuiving van het voorland niet kan worden uitgesloten wordt er van uit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting gemaakt worden van de overstromingskans inclusief afgeschoven profiel. In de beschouwing kan dan worden gekeken naar de kans van afschuiving van het voorland en naar de verwachting ten aanzien van het profiel ná de afschuiving. Zie verder paragraaf 4.2.1.

3.2.2 Zettingsvloeiing

Het is mogelijk om beslisregels aan te geven aan de hand waarvan min of meer wordt uitgesloten dat zettingsvloeiing van het voorland op zal treden. Een zettingsvloeiing kan worden uitgesloten als er geen zand in het voorland en de ondergrond zit of als de vooroever volledig is bestort:

- De vooroever en de ondergrond bestaan niet tot anderhalf maal de geuldiepte (hoogteverschil tussen geulrand en geulbodem) volledig uit cohesief materiaal. De aanwezigheid van zand is een voorwaarde voor zettingsvloeiing;
- De vooroever is niet volledig bestort. Met volledig bestort wordt bedoeld dat de geul van geulrand tot geulbodem is voorzien van een erosiebescherming (doorgaans is dat een steenbestorting).

Een zettingsvloeiing treedt mogelijk op als voldaan wordt aan één van de volgende voorwaarden:

- De gemiddelde taludhelling $\cot \alpha_R$ is steiler of gelijk aan $1V: 7 \cdot (H_R/24)^{1/3}$. De definitie van α_R en H_R zijn gegeven in van den Ham (2015a);
- Het steilste deel van het onbestorte deel van het onderwatertalud is steiler over een zekere hoogte zoals aangegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Maximaal toelaatbare lokale hellingen (geldig voor zand met een diameter $D_{50_{\text{gemiddeld}}} > 200 \mu\text{m}$ en $D_{15_{\text{gemiddeld}}} > 100 \mu\text{m}$)

Diepte-interval van onbestorte deel van het onderwatertalud [m]	Maximale helling [V:H]
0 - 5	1: 2
5 - 10	1: 2,5
10 - 15	1: 3
15 - 20	1:3,5
20 - 25	1: 4
25 - 30	1: 4,7
30 - 35	1: 5,4
35 - 40	1: 6

Indien aan ten minste aan één van deze twee voorwaarden wordt voldaan dan kan een zettingsvloeiing optreden. Er kan dan op grond van deze beslisregel geen oordeel worden gegeven.

Indien er aan geen van deze voorwaarden wordt voldaan dan is de kans op een zettingsvloeiing klein. Zonder zettingsvloeiing is er geen invloed op andere mechanismen.

Indien zettingsvloeiing van het voorland niet kan worden uitgesloten wordt er van uit gegaan dat er voor de initiële mechanismen een vakindeling en een

schematisatie per dijkvak is gemaakt. Er kan dan een eerste inschatting gemaakt worden van de overstromingskans inclusief profiel na het optreden van een zettingsvloeiing. In de beschouwing kan dan worden gekeken naar de kans van optreden van een zettingsvloeiing van het voorland en naar de verwachting ten aanzien van het profiel ná de zettingsvloeiing. Zie verder paragraaf 4.2.2.

3.2.3 *Golfafslag van voorland*

Voor golfafslag van het voorland zijn verschillende situaties te onderscheiden:

- In het bovenrivierengebied bestaat het voorland voor de dijk vaak uit uiterwaarden die bij hoogwater onderlopen. De belangrijkste belasting bestaat uit langsstroming. Het gebeurt frequent dat uiterwaarden onderlopen, maar er is weinig ervaring dat hierbij problemen met erosie en afslag van het voorland optreden. Als deze er zijn dan wordt verondersteld dat deze bij de keringbeheerder bekend zijn en dat er zo nodig maatregelen zijn getroffen.
- Bij hoge voorlanden (met als definitie dat deze tijdens hoogwater boven de hoogwaterlijn uitkomen) zijn er afslagprofielen gedefinieerd voor voorlanden in klei en voor voorlanden in zand. In een eerste inschatting van de overstromingskans (zie paragraaf 4.3.2) kunnen deze worden toegepast.
- In andere gevallen (benedenrivierengebied, meren, kust en estuaria en voorland dat niet hoog is) is al snel een geavanceerdere analyse noodzakelijk (zie paragraaf 5.3.2). Er is wel als beslisregel dat als het voorland lager ligt dan de normwaterstand minus tweemaal de golfhoogte of als de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m en het voorland dat onder water stroomt is beschermd door gras of klei dan is er weinig erosie te verwachten.

Naast deze punten zijn er twee beslisregels aan te geven waardoor geen rekening gehouden hoeft te worden met de invloed van golfafslag op initiële faalmechanismen:

- Het is vrij gebruikelijk om geen rekening te houden met bekleding, damwanden en/of andere constructies bij het bepalen van golfafslag van voorland. De reden is dat deze elementen doorgaans niet ontworpen zijn op golfafslag en ook niet als onderdeel van de waterkering worden beheerd en onderhouden. Indien aangetoond wordt of aannemelijk gemaakt kan worden dat het voorland tegen erosie is beschermd dan mag daar rekening mee worden gehouden.
- Het is denkbaar dat aangetoond of aannemelijk gemaakt kan worden dat erosie van het voorland wel op kan treden maar geen invloed heeft op andere mechanismen. Denk dan aan een breed en hoog voorland waarbij de afslag ruim buiten de teen van de dijk blijft (er is geen invloed op afschuiving buitentalud), het voorland uit klei bestaat en er geen zandlagen worden doorsneden (geen invloed op intredepunt voor piping).

3.2.4 *Bezwijken havendammen*

Havendammen worden geacht alleen een positieve invloed te hebben op de hydraulische randvoorwaarden van primaire waterkeringen. Als blijkt dat de primaire waterkering voldoet zonder de invloed van havendammen in rekening te brengen dan hoeven havendammen niet te worden beschouwd.

Indien blijkt dat de primaire waterkering niet voldoet, ook al wordt de positieve invloed van de havendam wel in rekening gebracht, dan hoeft de havendam in de beoordeling ook niet te worden beschouwd. Echter bij ontwerp van versterkingsmaatregelen dient wel de afweging plaats te vinden of de havendam een waterkerende functie heeft of krijgt. Indien dit het geval is mag uitgegaan worden van reductie van de hydraulische belasting (en daarmee ook de versterkingsopgave). De stabiliteit en/of (constructieve) sterkte van de havendam dient in dat geval wel te worden aangetoond. Hiervoor zijn geen eenvoudige beslisregels beschikbaar.

In het overige geval, wanneer een waterkering alleen voldoet indien er rekening gehouden is met de positieve invloed van een havendam op de hydraulische belasting, moet worden gekeken naar de mogelijkheid van bezwijken van de havendam. In dat geval heeft de havendam dus invloed op de waterkerende functie van de waterkering. Het bezwijken van een havendam dient in dat geval als scenario in de beschouwing van de initiële mechanismen worden meegenomen. Het scenario "bezwijken havendam" kan uitgesloten worden indien wordt aangetoond dat de havendam onder maatgevende condities voldoende stabiel is. In het verleden opgetreden belastingen kunnen daarbij een belangrijke rol spelen.

3.3 Overig

3.3.1 *Afschuiving buitentalud*

Er zijn een aantal aspecten die het risico op overstroming mede als gevolg van een buitenwaartse afschuiving bepalen. Te noemen zijn:

- De kans dat een snelle val van buitenwater optreedt dusdanig dat een afschuiving van het buitentalud optreedt. Hierin zijn regionale verschillen, maar afhankelijk van de ondergrond en de geometrie zijn er ook lokale verschillen;
- De restbreedte van de kruin die overblijft na een buitenwaartse afschuiving. Dit hangt vooral af van de lokale situatie en de geometrie;
- De kans dat er een hoogwater en storm optreedt vóórdat de schade is geconstateerd en hersteld. Mede hierop gebaseerd: de kans dat er vervolgerosie optreedt die voor een overstroming zorgt.

Zoals eerder benoemd zijn er grote regionale verschillen. Met name voor het bovenrivierengebied lijkt dit mechanisme minder bedreigend en kan het lonen om hier een generieke redeneerlijn voor te ontwikkelen om dit aan te tonen. Vooral nog is deze redeneerlijn er nog niet.

Voor de overige gevallen wordt verwezen naar de uitwerking voor een eerste inschatting van de overstromingskans in paragraaf 4.3.1.

3.3.2 *Graverij*

Het feit dat er alleen een graverij in een kering aanwezig heeft geen aanleiding te geven voor maatregelen. In de onderstaande tabel is de mogelijke invloed beschreven van een dierlijke graverij op de geotechnische aspecten van de kering. Daar waar in Tabel 4 een min staat kan de invloed van de dierlijke graverijen uitgesloten worden.

Tabel 3: Invloedsmatrix van mogelijke invloed dierlijke graverij op geotechnische eigenschappen van de kering. (Van den Berg, 2022)

Dier	Aanpassing verloop freatische lijn	Aantasting deklaag	Aantasting gras bekleding	Verzakking talud of kruin	Optreden kortsluiting binnen- en buitenwaarts	Uitspoelen zand
Bever	+	+	+/-	+	+	+
Mol	+/-	+	+	-	-	+
(Woel-, muskus) rat	-	+	+	-	-	-
Vos	+/-	+	+	+	-	+
Das	+	+	+	+	+	+
Konijn	-	+	+	+/-	-	+
Muis	-	+	+	-	-	-

+ = van invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

+/- = van mogelijk invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

- = geen invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

In hoofdstuk 4.7 en 5.7 wordt de aanpak beschreven.

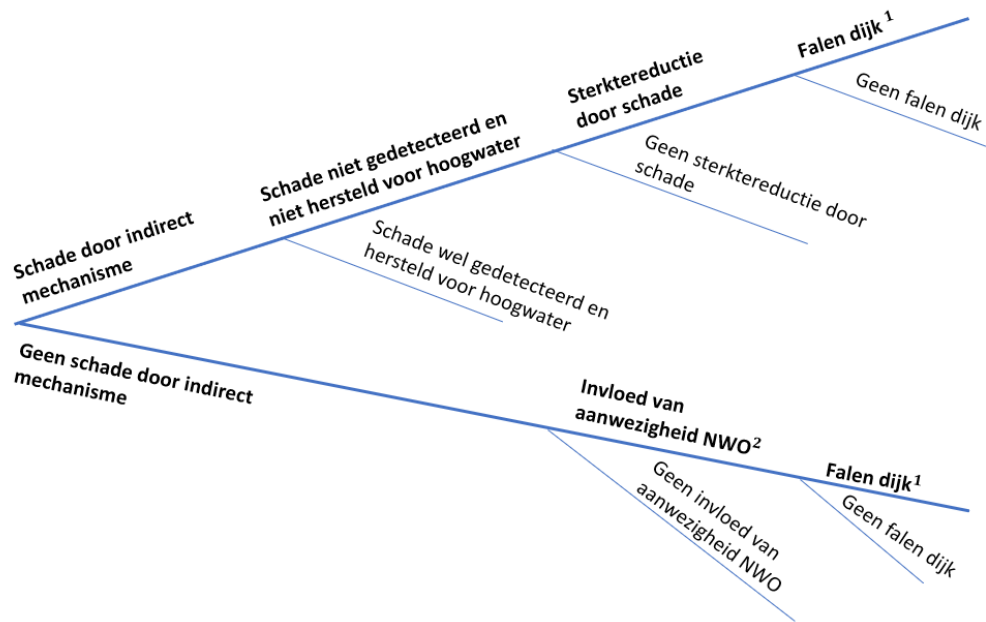
4 Eerste inschatting van de overstromingskans

In dit hoofdstuk wordt per indirect mechanisme ingegaan op de vraag in hoeverre er een analyse van de bijdrage aan de overstromingskans uitgevoerd kan worden. Voor het uitwerken van scenario's is het daarbij wenselijk dat deze bijdrage in kansen kan worden uitgedrukt. Deze kennis is nog niet voor alle mechanismen en alle invloeden op de initiële mechanismen in generieke rekenregels beschikbaar. Het is echter wel van wezenlijk belang dat relevante bijdragen aan de overstromingskans zichtbaar worden, ook al kan er nog niet gedetailleerd aan gerekend worden. Dit zijn kennisleemtes waarin in de komende jaren voorzien moet gaan worden. In dit hoofdstuk zijn handvaten gegeven om tot een faalkansinschatting te komen.

Een algemeen schema/faalpad (Figuur 4) geeft de redeneertrant die in deze handleiding voor Indirecte mechanismen wordt gehanteerd:

- In beginsel kan optreden van een indirect mechanisme tot schade leiden waardoor sterkte-reductie en/of verhoogde belasting optreedt, wat invloed heeft op de initiële mechanismen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een falende vloeistof- of gasleiding die een ontgrondingskuil veroorzaakt. Dit is de bovenste tak in bijgaande foutenboom. Hierbij kan ook worden gekeken naar de kans dat schade al dan niet wordt gedetecteerd en hersteld vóórdat een hoogwater optreedt.
- In beginsel kan een NWO ook zonder falen invloed hebben op initiële mechanismen. Het meest sprekende voorbeeld hiervan is een aanwezig pand op of nabij de dijk. Dit kan door de aanwezigheid op de dijk leiden tot verminderde sterkte (ontbrekend gewicht bij een pand op palen op het binnendijks maaiveld) of een verhoogde belasting (eigen gewicht van een pand op staal in de binnenkruin). Dit wordt weergegeven in de onderste tak van de foutenboom.

Beide mogelijkheden moeten worden bekeken, maar zijn niet voor alle indirecte mechanismen van toepassing. In beide gevallen is de laatste stap in het faalpad dat de invloed van het indirecte mechanisme op de initiële mechanismen wordt gemodelleerd en wordt meegenomen in de berekening van de faalkansen van de initiële mechanismen. Er wordt hierbij van uit gegaan dat er al schematisaties van de initiële mechanismen zijn opgesteld. Onder deze voorwaarde kan de invloed van indirecte mechanismen worden bepaald.



Figuur 4: Algemeen faalpad voor indirecte mechanismen. ¹Falen door bijvoorbeeld piping, dijkerosie of geotechnische instabiliteit. ²Sterktereductie door bijvoorbeeld ontbrekende grond bij binnendijkse panden op palen

De faalkans wordt bepaald door voor elk faalpad de kans op alle opeenvolgende gebeurtenissen te vermenigvuldigen (alle takken zijn namelijk conditioneel op de voorgaande takken en exclusief met de andere takken uit dezelfde knoop). Het resultaat is een faalkans per pad. Vervolgens is de totale faalkans de som van de kansen per faalpad.

4.1 Niet-waterkerende objecten

4.1.1 Bebouwing

Voor een inventarisatie van aanwezige bebouwing kan naast de eigen informatiesystemen gebruik gemaakt worden van bestanden als de Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT), Basisregistratie adressen en gebouwen (BAG) of Kadaster. Bebouwing heeft zonder zelf te falen invloed op het overstromingsrisico. Het modelleren kan in twee generieke stappen worden samengevat:

- Sterkte-reductie door de aanwezigheid van bebouwing. Bij fundering op staal is dit door eigen gewicht van de bebouwing. Dit kan worden gecompenseerd door het ontbreken van grond indien het pand ondergrondse ruimtes heeft. Bij fundering op palen is dit door ontbrekende grond. Afhankelijk van de plaats in het dwarsprofiel heeft dit een positieve of een negatieve invloed op de macrostabiliteit van de dijk. Een andere vorm van sterkte reductie is het tegenhouden van (grond)water. Dit heeft mogelijk een invloed op erosie van kruin en binnentalud (in de vorm van stromingsconcentratie van overslaand water), of op uitspoelen of afdrucken van de bekleding op het binnentalud (door een hogere grondwaterstand dan zonder object).
- De negatieve invloed op de kans op falen van de dijk wordt inclusief sterkte-reductie middels conventionele rekenmethoden voor initiële mechanismen als scenario's meegenomen.

Vaak is bij bebouwing onbekend of een gebouw op staal of op palen is gefundeerd. Aanbevolen wordt dan (afhankelijk van de plaats in het dwarsprofiel) welke van de twee negatieve invloed heeft en die in beschouwing te nemen. Als de situatie dan voldoet is dat genoeg informatie. Voldoet de situatie niet dan is het een mogelijke optimalisatie om dit uit te zoeken.

Voor het modelleren van de invloed van panden op palen is doorgaans voldoende om aan te nemen dat onder de panden een kruipruimte zit. Een lege ruimte onder het pand bedraagt dan tussen 0,5 meter en 1 meter ruimte. Bij bewoners kan worden nagevraagd of er geen kelderruimtes zijn. De lege ruimte kan gemakshalve over de gehele oppervlakte van het pand worden aangenomen. Een praktische aanwijzing is verder om te beginnen met de bebouwing die in een dijkvak het dichtste bij de dijk kruin (panden op staal) of bij de binnenteen (panden op palen) staan.

4.1.2 *Begroeiing*

Voor een inventarisatie van aanwezige begroeiing kan naast de eigen informatiesystemen gebruik gemaakt worden van bestanden als de Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT) en voor grotere bomen het nationaal Bomenregister.

Bij begroeiing is er zowel een invloed als de begroeiing blijft staan en als de begroeiing omwaait. Dit kunnen daarom ook twee scenario's zijn met ieder een kans van voorkomen. Storm en hoge waterstanden zijn niet overal in Nederland sterk gecorreleerd, dus de kansen op gelijktijdig omwaaien van bomen en hoge waterstanden zijn regionaal verschillend.

De generieke aanpak wordt dan:

- Bepaal de negatieve invloed bij windworp. Een eerste benadering is een ontgrondingskuil van 1 meter diep met een diameter gelijk aan de diameter van de boom bovengronds. Bepaal voor dit scenario ook de kans dat dit optreedt.
- Bepaal de negatieve invloed als de boom blijft staan. Dit is een windbelasting. De windbelasting wordt gevormd door een windsnelheid en een oppervlakte van het gebladerte van de boom. De windsnelheid samen met de kans op hoge waterstanden zijn ook voor dit scenario regionaal verschillend.
- De negatieve invloed op de kans op falen van de dijk wordt inclusief sterkte-reductie middels conventionele rekenmethoden voor initiële mechanismen als scenario's meegenomen.

Voor zover de ervaring strekt is de kans op omwaaien beperkt, en is de invloed van windbelasting ook niet heel doorslaggevend. Dit geeft aanleiding tot de veronderstelling dat begonnen kan worden met enkele naar verwachting meer kritieke situaties, en dat daarna mogelijk vrij snel kan worden besloten dat voor een dijkvak de invloed van begroeiing beperkt is. Hier moet echter nog meer ervaring mee worden opgedaan voordat dit in meer generieke zin tot beslisregels kan leiden.

4.1.3 *Kabels en leidingen*

Een inventarisatie van bestaande kabels en leidingen kan naast de bestaande informatiesystemen van beheerders worden verkregen uit de KLIC-melding. De KLIC-melding is geschikt om de ligging van kabels en leidingen te achterhalen. Het medium dat door de leidingen gaat is ook vaak aangegeven. Leidinggegevens en drukken zijn vaak niet aanwezig of onbetrouwbaar. Navraag bij leidingbeheerders is vaak nuttig. Niet-falende leidingen worden verondersteld geen invloed op de

overstromingskans te hebben. Dit is niet altijd terecht, dus dit dient per specifiek geval eerst te worden vastgesteld.

Voor het beoordelen van leidingen zijn rekenmethoden en beoordelingsgrafieken te vinden in NEN 3651 (2012). Hier zijn ook aanwijzingen te vinden voor de grootte van de verstoringszone van leidingen.

De mogelijke negatieve invloed van falende leidingen laat zich onderscheiden in een aantal fenomenen:

- Lekkage van vloeistofleidingen (sluipend lek), soms leidend tot verhoging van waterspanningen in de dijk;
- Barsten van vloeistofleidingen of gasleidingen (gapend lek) met een ontgrondingskuil door uitstroming als gevolg;
- Explosie van gasleidingen met een ontgrondingskuil als gevolg;

Daarnaast kan een niet falende leiding een negatief effect hebben, denk aan lekkage en erosie langs een kruisende leiding die niet boven de dijktafelhoogte kruist en niet is voorzien van een erosiescherm. Dit leidt tot het volgende generieke faalpad voor leidingen waarin de kans op deze fenomenen en de vervolgmecanismen in staan benoemd:



Figuur 5: Generieke faalpaden voor falende leidingen (Bron: WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen)

De generieke faalpaden dienen voor elke relevante combinatie van initiële faalmechanisme en (type en plaats van) het NWO uitgewerkt te worden. Het meenemen van (kans op) detectie en (kans op succes van) herstelmaatregelen kan kansrijk zijn. Na uitwerking van een integraal faalpad kan een conclusie getrokken worden over (al dan niet) verwaarloosbaarheid van de invloed van (het) NWO('s).

Voor de praktische invulling en handhaving van het faalpad zijn de volgende kanttekeningen te plaatsen:

1. De kans op falen van de leiding kan ingevuld worden volgens de bekende methodes uit de NEN 3650 serie, of door gebruik te maken van eventueel beschikbare empirische gegevens. Soms kan het in een beoordelingscontext ook voldoende zijn om een hoge schatting van de faalkans van de leiding te hanteren als hiermee kan worden aangetoond dat de leiding geen significante invloed heeft op de overstromingskans (werkwijze 'van grof naar fijn'). Opgemerkt wordt dat in 2020 in de POV K&L de faalkanstabellen uit de NEN 3650 serie zijn geupdate, zie POV K&L (2020a).
2. Soms zijn meerdere faalscenario's voor een leiding denkbaar (bv. sluipend en gapend lek), met verschillende kans van optreden en gevolgen. In dat geval kunnen meerdere takken startend met 'falen leiding' in het faalpad aanwezig zijn. De uitwerking is verder analoog voor alle takken.
3. De opbouw van het faalpad veronderstelt in principe dat falen van de leiding onafhankelijk van hoogwater optreedt. In de praktijk betekent dit dat een toepassingsvoorwaarde is dat de waterkering tijdens hoogwater niet zodanig vervormt dat de leiding bezwijkt. Mocht er toch een afhankelijkheid bestaan kan deze in de kans op leidingfalen en de gelijktijdigheid met hoogwater ('hoogwater tijdens herstelperiode') in rekening worden gebracht.
4. Bij hoogwater moet voor sommige faalscenario's niet aan hoogwaters in de klassieke zin worden gedacht waarbij de statistieken van de jaarextremen van toepassing zijn, maar aan hoogwaters binnen de detectie en herstelperiode, die mogelijk veel korter is. Idealiter wordt dan ook de statistiek van de belastingextremen voor een kortere periode toegepast. Als de beschikbare tools deze mogelijkheid niet bieden is het wel hanteren van belastingstatistieken op jaarbasis een conservatief uitgangspunt (werkwijze 'van grof naar fijn').
5. Schade aan de waterkering door een falende leiding kan al dan niet worden gedetecteerd. De informatie over mogelijke detectie kan in de kans op 'hoogwater tijdens herstelperiode' worden verwerkt. Zo kan voor explosies en gapende lekken van detectie worden uitgegaan, terwijl voor sluipende lekken doorgaans zal gelden dat deze onopgemerkt blijven en de kans op samenvallen met hoogwater praktisch gelijk aan één zal zijn.
6. Detectie door middel van monitoring kan in combinatie met beheersmaatregelen (bv. afsluiten vloeistofleiding) worden ingezet om anderszins onvoldoende veilige situaties te beheersen. Indien handig kunnen hiervoor de takken in de generieke foutenboom nog verder worden opgesplitst (bv. 'detectie lek', 'beheersmaatregel succesvol' etc.).
7. Reststerkte zoals weergegeven met de laatste tak 'overstroming' wordt hier niet nader uitgewerkt, kan echter in een nadere analyse worden meegenomen indien nodig of doelmatig.

De sterkte-reductie voor verschillende gebeurtenissen moet eerst worden gemodelleerd. Dit betreft bijvoorbeeld verhoging van de waterspanning bij een sluipend of een gapend lek, of ontgroning bij erosie of een gasexplosie. Voor de uiteindelijke stap (Bepalen van de kans op falen dijk gegeven falen leiding) wordt gebruik gemaakt van de conventionele analyse van de initiële faalmechanismen inclusief negatieve invloed (sterkte reductie in het schema).

4.1.4 *Windmolens*

Het (kunnen) optreden van valincidenten die een relevante invloed kunnen hebben op een waterkering zal afhankelijk zijn van onder andere de grootte van de windmolen, de locatie ten opzichte van het dijkprofiel en de ouderdom/kwaliteit van de turbine. Verder zijn van belang aspecten, zoals windrichting, het tijdstip van

optreden van hoog water in combinatie met hoge windkracht, mogelijkheden voor hertel en benodigde hersteltijd et cetera.

Locaties van windmolens, zeker waar het gaat om windmolens binnen de waterkeringszones, zijn bij beheerders bekend en voor realisatie vergunningsplichtig. Ten aanzien van de waterveiligheid zijn/worden eisen gesteld waaraan bij realisatie van een windmolen voldaan moet worden. Dat betekent dat er in ieder geval een analyse van de waterveiligheid aanwezig dient te zijn. Gelet op de toenemende omvang van windmolens kunnen deze invloed op de faalkans van de waterkering hebben zelfs als deze (ruim) buiten de in de legger opgenomen beschermingszones van de waterkering staan gepositioneerd. Dit geldt voor zowel de bouw- exploitatie als ontmantelingsfase.

Plaatsing van windmolens in de kern- en de beschermingszone van de primaire waterkering wordt afhankelijk van de beheerder wel of niet toegestaan. De bouw, exploitatie en ontmanteling van windmolens resulteert meestal in een (tijdelijke) afname van het waterkerend vermogen van de waterkering. De mate hiervan is afhankelijk van de fase van het project en de lokale omstandigheden. Aan de beheerder dient te worden aangetoond dat de additionele faalkans ten gevolge van de aanwezigheid van windmolens de waterveiligheid niet dusdanig beïnvloed dat deze niet meer aan de wettelijke norm voldoet.

Bij de bepaling van de invloed en additionele faalkans, dienen in principe alle mogelijke faalmechanismen beschouwd te worden. Dit kan per faalmechanisme in principe in eerste instantie via het generieke faalpad, dat in hoofdstuk 4 is aangegeven, nader worden geanalyseerd.

Faalmechanismen waterkering

De te beschouwen faalmechanismen waar een windmolen invloed op kan hebben zijn:

- Overloop en golfoverslag, in combinatie met doorgaande erosie;
- Geotechnische instabiliteit
- Piping (inclusief opbarsten en heave);
- Instabiliteit van het voorland door afschuiving of zettingsvloeiing;
- Erosie en/of instabiliteit van de bekleding.

Type invloed

Voor de beoordeling van de additionele faalkans door een windmolen op of nabij een waterkering worden twee soorten invloeden onderscheiden:

- Ondergrondse invloeden van de bouw, exploitatie en ontmanteling van de windmolen, de fundering en bijbehorende werken. Tot de ondergrondse effecten behoren onder andere:
 - Trillingen door inbrengen van funderingspalen of damwanden;
 - Trillingen opgewekt door de windmolen;
 - Toename bovenbelasting door kranen, transporten of opslag van materialen;
 - Afname van de sterkte door ontgravingen (zowel ontgravingen van het dijklichaam zelf als eventuele ontgravingen op of nabij de kering die medebepalend zijn voor de stabiliteit van de kering);
 - Beïnvloeding verloop grondwaterstand door funderingen;
 - Beïnvloeding van de bekleding door afvoer van regenwater langs de mast en het funderingsblok of erosie op de overgang naar het funderingsblok.

- Bovengrondse invloeden bij falen van de windmolen of een onderdeel hiervan tijdens de exploitatiefase. Tot deze effecten behoren de faalscenario's:
 - Mastbreuk;
 - Gondelval;
 - Bladbreuk.

Beoordelingskader

Het waterkerend vermogen van de kering voor de situatie met de windmolen(s) dient beoordeeld te worden volgens methoden die aansluiten op de wettelijke beoordelings- en ontwerpinstrumentaria voor niet waterkerende objecten. Hierbij kan in eerste instantie gebruik gemaakt worden van het in hoofdstuk 4 aangegeven generieke faalpad, dat voor de verschillende faalmechanismen van een waterkering dient te worden uitgewerkt.

Voor zover de ervaring strekt is de kans op omwaaien/mastbreuk of een valincident met rotor of gondel beperkt, maar er zijn wel voorbeelden hiervan. De invloed van windbelasting en trillingen blijkt in het algemeen ook vrij beperkt te zijn, maar kan, zeker met het steeds groter worden van windmolens, niet uitgesloten worden. Dit geeft aanleiding tot de veronderstelling dat begonnen kan worden met enkele naar verwachting meer kritieke situaties, en dat daarna mogelijk vrij snel kan worden besloten dat voor een dijkvak de additionele faalkans en invloed van een windmolen vrij beperkt is. Hierin speelt met name ook de gelijktijdigheid van een valincident in combinatie met hoogwater en windkracht uit een ongunstige richting een belangrijke rol. Daarnaast is dit ook afhankelijk van getroffen, of te treffen, mitigerende maatregelen en beschikbare tijdsperiode voor herstel.

4.2 Voorland en havendammen

4.2.1 Afschuiving voorland

De kans op afschuiving van het voorland kan met conventionele rekenmethoden voor geotechnische stabiliteit worden vastgesteld.

De kritieke situatie voor afschuiving voorland is een lage buitenwaterstand in combinatie met een hoge grondwaterstand. In de TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied worden drie belastingsituaties onderscheiden [5]:

1. Een buitenwaterstand bij een snelle val van het buitenwater in combinatie met de grondwaterstand die behoort bij het voorafgaand hoogwater.
2. Een gemiddelde laagwaterstand (GLW) van het buitenwater in combinatie met extreme regenval.
3. Een laagwaterstand die eens per 10 jaar wordt overschreden (LW1/10 jaar) in combinatie met een normale freatische lijn in het voorland.

De criteria voor 'snelle val' zijn voor verschillende situaties in het rivierengebied (bovenrivieren, benedenrivieren, IJssel/ Vecht-delta) uitgewerkt in het TR Ontwerpbelastingen Rivierengebied [5], paragraaf 7.4 en verder. Voor meren kan eenzelfde aanpak worden gevolgd, waarbij "op bepaalde punten de specifieke karakteristieken voor meren moeten worden gebruikt" (Addendum I bij de Leidraad Zee- en Meerdijken t.b.v. het ontwerpen van meerdijken, [7]). Voor zeegedomineerde situaties moet rekening worden gehouden met een springtij laagwaterstand.

Vervolgens moet de invloed op de initiële mechanismen worden gemodelleerd. Dit hangt mede af van de geometrie van het afgeschoven profiel. Er kan ook worden gekeken naar de kans dat de schade tijdig wordt gesignaleerd en tijdig (vóór een volgend hoogwater) kan worden hersteld.

4.2.2 *Zettingsvloeiing*

De software voor het rekenen aan zettingsvloeiing (DFlowslide) is nog niet toegespitst op de nieuwe inzichten ten aanzien van de indirecte mechanismen. DFlowslide berekent de overschrijdingskansen van een toelaatbare inscharingslengte. Op zich is de onderliggende statistiek wel geschikt om in een kansenbenadering te worden toegepast:

- De kans op een zettingsvloeiing kan bepaald worden aan de hand van de Zeeuwse statistiek (zie referentie van den Ham 2015a en van den Ham 2015b);
- Op basis van dezelfde statistiek kan de kansverdeling worden opgesteld dat gegevens het optreden van een zettingsvloeiing het schadeprofiel een inscharingslengte groter dan een zekere waarde heeft;
- De kans dat een zettingsvloeiing optreedt die een inscharingslengte heeft groter dan een bepaalde waarde is het quotiënt van deze laatste twee kansen.

Voor de diepte van de inscharing wordt ervan uitgegaan dat deze op de halve geuldiepte begint.

Op deze manier zijn dus meerdere schadeprofielen met een kans van voorkomen te bepalen. Het restprofiel is daarom als een stochastische variabele te benaderen in de beoordeling van de initiële mechanismen.

Een omgekeerde redenering zou kunnen zijn om te bekijken vanaf welke afmetingen van de inscharing de verwachting is dat er invloed is op de initiële faalmechanismen en daarna te bekijken hoe groot de kans hierop is.

Een bijzonder geval hierbij is een zettingsvloeiing waarvan het schadeprofiel reikt tot in, of voorbij, de kruin van de waterkering. Een extremere mate van inscharing (bijvoorbeeld tot in de kruin) heeft een kleinere kans van voorkomen dan een minder extreme inscharing (die beperkt blijft tot het voorland), maar eigenlijk dienen ten aanzien van de mogelijke omvang van de inscharing meerdere scenario's te worden bekeken.

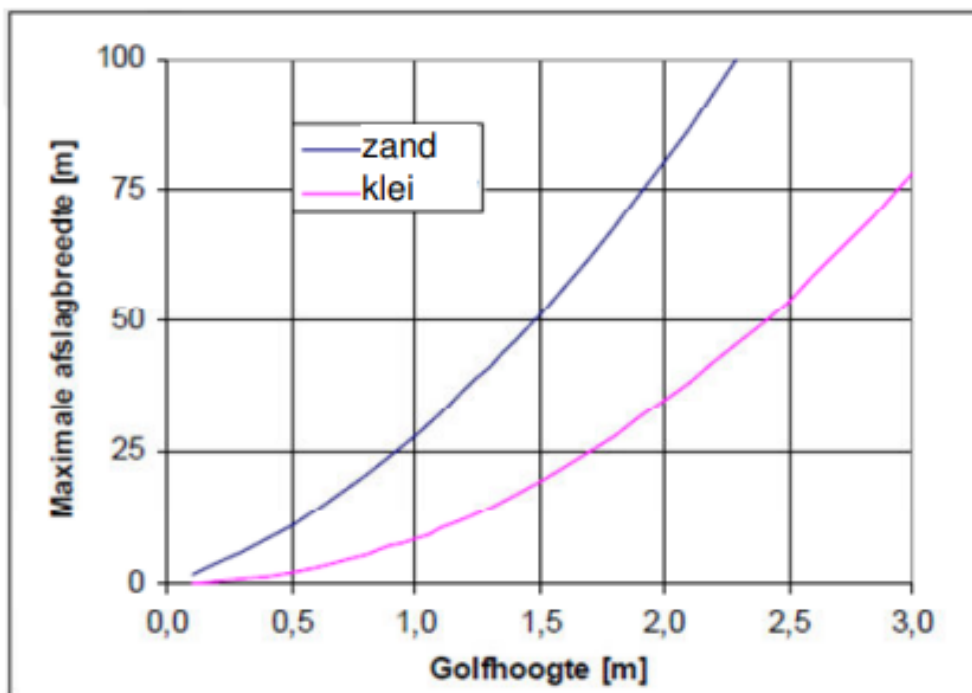
4.2.3 *Golfafslag van voorland*

Bij een eerste benadering van de erosie door golfafslag van het voorland zijn enkele constatering van belang:

- Voor de geldigheid van de benadering is het nodig dat het voorland in zijn geheel boven de waterstand ligt. In andere gevallen moet direct naar een nadere analyse worden gegaan.
- Doorgaans wordt geen rekening gehouden met erosieremmende factoren, zoals oeverbekleding of kadeconstructies. Indien dat wel wenselijk is dan is dat onderdeel van een nadere analyse, en moet ook aannemelijk zijn dat die factoren gedurende langere tijd (beoordelingsperiode, levensduur) aanwezig blijven. Er kan gesteld worden dat de kans op het optreden van golfafslag 100% is.

- De benadering gaat uit van een voorland bestaande uit hetzij zand, hetzij klei. Mengvormen kunnen in eerste inschatting van de overstromingskans als zand worden benaderd.
- Tijdsafhankelijkheid kan een belangrijke rol spelen, zeker in getijdegebieden. Dit is niet in de benadering voor een eerste inschatting van de overstromingskans opgenomen, dus als dit relevant is kan dit in een verder inschatting van de overstromingskans een plek krijgen.

Onder deze voorwaarden kan de golfafslag als volgt worden bepaald:



Figuur 6: Maximale afslagbreedte door golfbelasting voorland

De maximale afslagdiepte is ongeveer 1 maal de golfhoogte onder de waterlijn. Aan de hand van het afslagprofiel moet de invloed op de initiële mechanismen worden bepaald en berekend.

4.2.4

Bezwijken havendammen

Bij beoordelen of ontwerpen wordt per faalmechanisme een koppeling gelegd tussen een dijkvak (waar de sterkte wordt geschematiseerd) en een HB-locatie (waar de hydraulische belasting informatie beschikbaar is). In het algemeen betreft dit de benodigde hydraulische belasting ter plaatse van de teen van de beschouwde waterkering. De HB-locaties liggen echter op enige afstand van de teen van de waterkering.

In veel gevallen is de belastinginformatie op de HB-locatie, ondanks de afstand, voldoende representatief voor de belastinginformatie ter plaatse van de teen van het beschouwde vak van de waterkering. Echter, wanneer tussen de HB-locatie en de dijkteen een dam en/of voorland aanwezig is, zal het in de meeste gevallen wenselijk zijn om het effect daarvan op de hydraulische belasting in rekening te brengen.

Indien in de toetsing of het ontwerp rekening is gehouden reductie van de hydraulische belasting door aanwezigheid van havendammen, dan dient in de beoordeling of analyse het risico op bezwijken havendammen te worden bepaald. In eerste instantie dient dan onderzocht te worden hoe groot de reductie is en of dit relevant is voor de achterliggende waterkering. Vervolgens dient de standzekerheid en stabiliteit van de havendam onderzocht te worden. Resultaat is de kans op het bezwijken van de havendam. Het gevolg van het bezwijken van de havendam is hogere hydraulische belasting op de dijk en zal vooral doorwerken op de mechanisme erosie door golfaanval (op de verschillende bekleding type) en erosie door golfoverslag.

Hoogte

Feitelijk wordt de kruinhoogte van havendammen niet beoordeeld. Maar de kruinhoogte en de daaruit resulterende golftransmissie levert wel de randvoorwaarden op voor de waterkering achter de havendam. Voor het gehele waterkeringssysteem geldt dat de hoogte van de havendam en de sterkte van primaire waterkering samen afdoende moeten zijn om een overstroming te voorkomen.

Geotechnische stabiliteit

De geotechnische stabiliteit van een havendam kan beoordeeld worden analoog aan de geotechnische stabiliteit van een waterkering. Wat anders is, is dat in het algemeen de waterstand aan de binnenzijde vrijwel gelijk zijn als aan de buitenzijde. Daarnaast is er bij een snelle waterstandsdaling zowel een risico voor de buitenwaartse-als de binnenwaartse stabiliteit. In het meren- en bovenrivierengebied hoeft geen rekening gehouden te worden met een snelle val van hoog water.

In het geval van een dam bestaande uit een zandkern met klei of asfaltbekleding moet ook microstabiliteit beoordeeld worden. In het geval van een (verticale) constructie dient, naast de geotechnische stabiliteit ook een constructieve beoordeling plaats te vinden al dan niet in combinatie met het grondlichaam.

Piping

Piping speelt geen rol bij havendammen.

4.3 Overig

4.3.1 Afschuiving buitentalud

Voor afschuiving van het buitentalud geldt bijna hetzelfde als voor afschuiving voorland. De negatieve invloed op de initiële mechanismen is echter directer en groter. In paragraaf 2.3.1 is een beschrijving gegeven van de mogelijke invloeden, die voldoende is om dit in faalpaden te beschrijven. De inleidende gebeurtenis is de afschuiving van het buitentalud. Als vervolgmecanismen moet rekening worden gehouden met het afgeschoven talud en kan dat aanleiding zijn tot kwetsbaarheid voor erosie van het buitentalud of tot infiltratie van water in de dijk en een verhoogde kwetsbaarheid voor macrostabiliteit binnenwaarts. Om de erosie van dijkgrond te modelleren is nog geen geaccepteerde kwantitatieve methode beschikbaar. De verhoogde kans op macrostabiliteit binnenwaarts is in eerste inschatting van de overstromingskans te benaderen door de dijk volledig verzadigd aan te nemen. Als de kans op erosie van de dijk in één van deze twee scenario's te groot wordt dan is dit mogelijk verder door experts te beoordelen. Zie verder paragraaf 5.3.1 voor mogelijke aanscherping van de overstromingskans.

4.3.2 Graverij

4.3.2.1 Inleiding

De duiding van het indirecte mechanismen graverij is in paragraaf 3.3.2 duidelijk geworden. Om overstromingsrisico's van de dierlijke graverij in een waterkering te beheersen wordt een zogenaamde bowtie-analyse gebruikt.

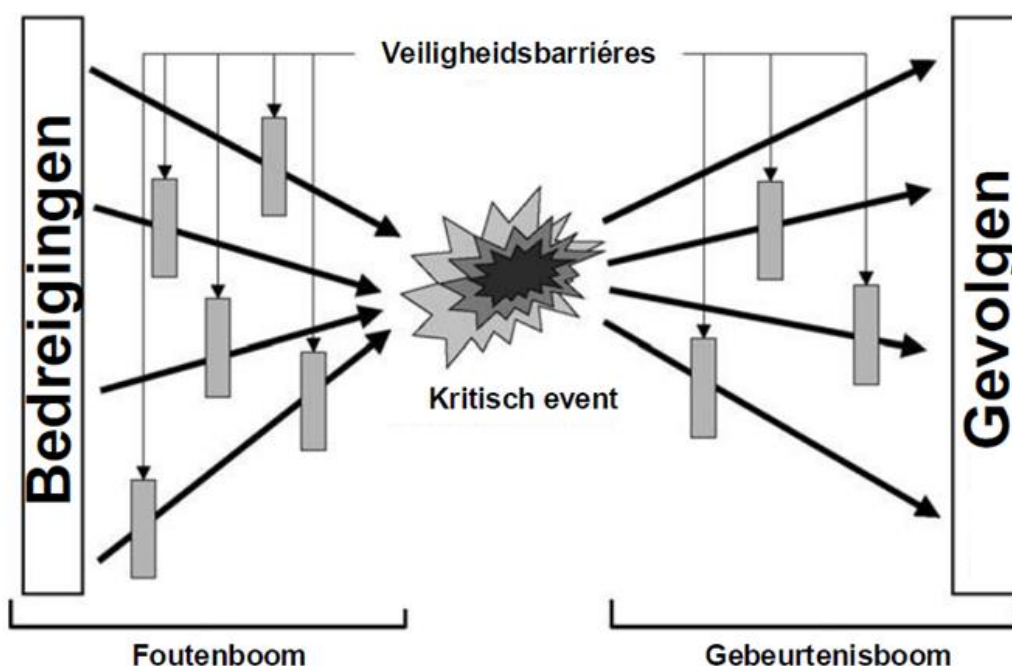
De vraag is hoe kunnen we de overstromingsrisico's beheersen? Hiertoe is het noodzakelijk om te weten welke bedreigingen een rol spelen, *de scenario's*, en de gevolgen van deze bedreigingen, *de faalpaden*, die tot een overstroming leiden. Met behulp van de zogenoemde bowtie-methode (zie §4.7.2) wordt vervolgens een analyse uitgevoerd. Aan de hand van deze analyse kan, indien gewenst, ook de faalkans bepaald worden.

Met behulp van de bowtie-analyse kan het probleem beter ontleed worden en ontstaan er mogelijkheden om het probleem te beheersen. De gevolgde methodiek is analoog aan (Van den Berg, 2022).

Voor de beoordeling kan deze methode toegepast worden. Voor het ontwerp geldt dat door het toepassen van de verschillende maatregelen de overstromingskans niet zal toenemen, maar de kans op toename van de overstromingskans ten gevolge van een graverij zal worden verminderd dan wel uitgesloten.

4.3.2.2 Bowtie-analyses

De bowtie-analyses worden breed gehanteerd in veiligheidsanalyses in industriële toepassingen met een hoog risico. De naam is ontleend aan de vorm van de figuren die vaak worden gebruikt om risico's inzichtelijk te maken zie Figuur 7



Figuur 7: Voorbeeld van een bowtie diagram. Vertaalde versie overgenomen uit (Klerk, 2021) origineel van (De Dianous & Fiévez, 2006).

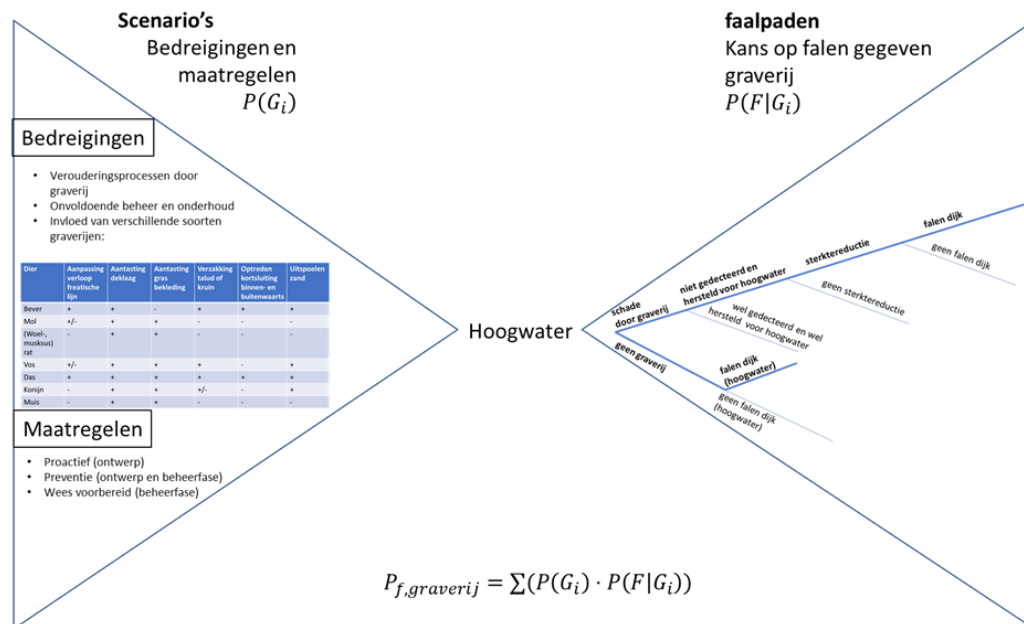
De traditionele Bowtie methode, zoals in Figuur 7 gaat uit van een *foutenboom* aan de linkerkant, waarbij een "normale situatie" wordt verondersteld met bedreigingen (de diagonale pijlen) en belemmeringen van de bedreigingen (de grijze vlakken). De belemmeringen van de bedreigingen zijn de te nemen maatregelen.

Ten gevolge van de bedreigingen (en onvoldoende maatregelen) zal in het midden van de bowtie een ongewenste situatie, een kritisch event, ontstaan. Aan de rechterzijde worden in de gebeurtenissenboom de gevolgen beschreven van deze ongewenste situatie. De gevolgen kunnen door middel van de belemmeringen (de grijze vlakken) worden verkleind of weggenomen.

Als voorbeeld is voor dierlijke graverijen in waterkeringen een bowtie-analyse opgesteld, Figuur 8. Deze geeft een overzicht van:

1. Aan de linkerkant de foutenboom met mogelijke *scenario's* die op kunnen treden (bedreigingen en de maatregelen).
2. Aan de rechterzijde de gebeurtenissenboom met de mogelijke *faalpaden* (consequenties) die tot falen kunnen leiden met als gevolg een overstroming (de ongewenste situatie).

Deze bowtie geeft een overzicht van de scenario's en de faalpaden die gezamenlijk tot falen (overstroming) kunnen leiden en geeft de totale faalkans (P_f). Deze totale faalkans moet voldoen aan de faalkanseis van de waterkering.



- $P_{f,graverij}$ = de kans op falen van de dijk
- $P(G_i)$ = de kans op een graverij
- $P(F|G_i)$ = falen dijk gegeven een graverij

Figuur 8: Bowtie dierlijke graverijen in waterkeringen.

De bovengenoemde scenario's en faalpaden worden nader toegelicht in de volgende paragraaf. De kans op falen van de dijk ten gevolge van een graverij wordt toegelicht in paragraaf 4.3.2.5.

4.3.2.3 Scenario's en faalpaden

De bepaling van de faalkans van de waterkering kan op basis van scenario's en faalpaden worden uitgevoerd en is de ingang voor het uitvoeren voor een bowtie-analyse. Hieronder volgt een beschrijving van de faalpaden en de scenario's zoals gehanteerd in Figuur 8.

Scenario's

Dit zijn verschillende gebeurtenissen die kunnen optreden waardoor de kering met graverij er in slechtere toestand verkeert dan waar in het ontwerp van uit is gegaan met bijbehorende kans $P(G)$. Zoals eerder beschreven bestaan deze uit bedreigingen en maatregelen om deze bedreigingen weg te nemen.

De *bedreigingen* binnen deze scenario's zijn onder andere:

- De invloed van verschillende soorten graverijen
- Verouderingsprocessen door graverijen.
- Onvoldoende beheer en onderhoud.
- Et cetera.

De te nemen *maatregelen* zijn onder andere:

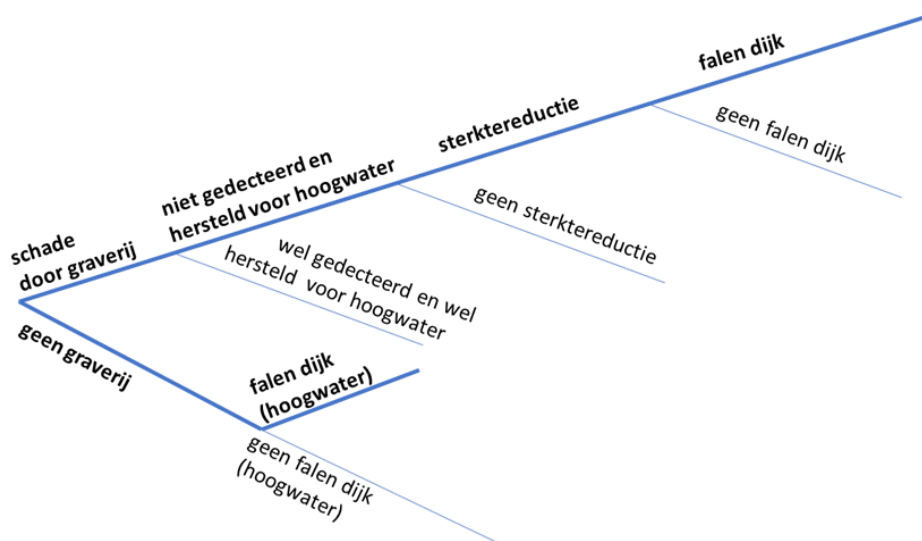
- Inspectie, detectie en herstellen bij dierlijke graverijen
- Zodanig ontwerp van waterkeringen dat dit de dierlijke graverij afschrikt of niet mogelijk is, denk hierbij onder andere aan:
 - Het aanbrengen van gaas.
 - Damwanden.
 - Bestorting van steen in de buitenoever.
 - Taluds van een klei-kalkmengsel.
- Dieren voorzien van een aantrekkelijk alternatieve locatie, in de buurt van een waterkering die een dijkomgeving kan vervangen, denk hierbij aan:
 - (Drijvende) hoogwatervluchtplaatsen.
 - Een kunstmatige heuvel.

Faalpaden

De faalpaden beschrijven de verschillende ketens van gebeurtenissen die na een initiële gebeurtenis leiden tot overstroming. Een faalmechanisme is de verzameling faalpaden met dezelfde initiële gebeurtenis die leiden tot overstroming.

Dierlijke graverijen tasten de sterkte en de hydraulische weerstand aan van de waterkering. De aanpassing van deze aspecten door een graverij op een specifieke locatie is van invloed op de overstromingskans voor die locatie. Daarom is het van belang om door middel van een analyse te bepalen welke faalpaden het meest waarschijnlijk zijn.

In Figuur 9 is een voorbeeld gegeven van een faalpad voor dierlijke graverij.



Figuur 9: Generiek faalpad voor de beoordeling van een waterkering met de aanwezigheid van dierlijke graverij als indirect mechanisme en de beschouwing van de gelijktijdigheid van dierlijke graverijen en hoogwater

4.3.2.4 Stappenplan aantonen veiligheid graverijen

Dit stappenplan is naar analogie opgesteld van Kanning (2019) en Van den Berg (2022).

De bedoeling van de te doorlopen stappen is dat:

- (I) Inzicht wordt verkregen in welke graverijen (dier, locatie etc.) mogelijk grote gevolgen hebben voor de veiligheid.
- (II) Dat gerichte maatregelen kunnen worden uitgedacht om deze graverijen te kunnen voorkomen/de kans hierop voldoende klein te maken.

De te doorlopen stappen zijn op hoofdlijnen de volgende:

1. Inventarisatie mogelijke bedreigingen

Als eerste worden mogelijke bedreigingen geïdentificeerd die afwijkingen van het gewenste gedrag van het functioneren van de waterkering kunnen veroorzaken.

Voorbeeld:

Te denken valt aan een graverij van een bever in de teen van een waterkering.

2. Inventarisatie invloed bedreigingen op faalpad(en)

Na inventarisatie van de mogelijke indirecte mechanismen wordt voor elk indirect mechanisme onderbouwd wat de globale invloed op het functioneren van de waterkering is. Daarbij wordt voor elke knoop in de relevante faalpaden kwalitatief beschreven wat de invloed is, en globaal ingeschat wat de invloed op de faalkans is.

Voorbeeld:

Sterktereductie van de waterkering door een verhoogde freatische lijn ten gevolge van een bevergraverij in de waterkering.

3. Inventarisatie mogelijke maatregelen

Op basis van de eerste inventarisatie kunnen maatregelen worden gedefinieerd waarmee doelmatig bedreigingen kunnen worden uitgesloten of/de kans erop kan worden verkleind. Deze maatregelen kunnen plaatsvinden in de verschillende fases van de life-cycle van de waterkering:

- a. Het ontwerp.
- b. De uitvoering.
- c. Dagelijks beheer.

Voorbeeld:

Een aantal voorbeelden zijn hierna in Tabel 4 tijdens de verschillende fases weergegeven:

Tabel 4: Voorbeelden van de te nemen maatregelen in de verschillende fases van de life-cycle van de waterkering

Ontwerp	Uitvoering	Dagelijks beheer
Plaatsen van een fijnmazig gaas	Diep genoeg plaatsen van een voldoende sterk fijnmazig gaas om uit te sluiten dat er bijvoorbeeld bevers (onder)doorgraven, ook bij laag water	Verhoogde visuele inspectie
Plaatsen damwanden	Combineren damwanden als maatregel tegen graverij	Detectiemethodieken
Taluds van klei/ kalk	Steenbestorting in de teen van de dijk	Bestrijding van graaf dieren

4. Iteratief bepalen meest significante indirecte mechanismen

Op basis van de inventarisatie van bedreigingen en de mogelijke maatregelen kan (kwalitatief) worden ingeschat welke indirecte mechanismen het meest significant zijn. Hier kan vervolgens in een FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) mee om worden gegaan. Deze methode kan ook gebruikt worden voor andere indirecte mechanismen bijvoorbeeld K&L, bomen, bebouwing, windmolens en dergelijke.

Om de mate van bedreigingen en maatregelen te kunnen onderbouwen, is het essentieel om gebeurtenissen (gewenst en ongewenst gedrag; Failure Mode) van de dierlijke graverij en alle componenten hiervan vooraf te identificeren, en de gevolgen (Effect) van dit ongewenste gedrag en de relevantie (Criticality) te analyseren. Dit wordt een FMECA genoemd. Aan de hand hiervan wordt inzichtelijk gemaakt waar uitdagingen liggen voor de veiligheid van de waterkering. Aanvullend wordt gekeken of en hoe zo een failure mode aan de hand van een maatregel kan worden verholpen of de kans erop voldoende kan worden gereduceerd. De FMECA kan worden opgesteld aan de hand van een matrix. Een vereenvoudigd voorbeeld van hoe een FMECA eruit kan zien, is weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Voorbeeld FMECA voor dierlijke graverij

Gebeurtenis S		A. Kans	B. Effect	C. Maatregel	Relevantie	
#	wat	CAT	P(S)	P(F S)		
A	Graafschade in het binnentalud	B	+	++	1) Uitgraven en herstellen 2) monitoren 3)..	Nader uit te werken in stap 5
B	Mogelijk bever in de teen van de dijk	B	++	++	1) Inspectie en detectie 2) Uitgraven en herstellen 3) Aanbrengen gaas	Nader uit te werken in stap 5
C	..	B	++	+	Ontwerp-maatregel	Niet relevant
D	..		--	--		Niet relevant
totaal						

ad gebeurtenis: uitsplitsen naar ontwerp (O), uitvoering (U) en beheer (B)

ad A. Kans: Detectie onderdeel van P(S)

ad B. Effect: verschillende faalpaden beschouwen (Macrostabiliteit, grasbekleding, et cetera)

ad C. Maatregel: kan invloed hebben op zowel kans als effect

ad Relevantie: na het uitvoeren van maatregel.

Het overkoepelende idee van de FMECA is om alle gebeurtenissen (S) te beschouwen en op basis van de kans van optreden (P(S)), het effect (P(F|S)) en mogelijke maatregelen te onderbouwen dat aan veiligheidseisen wordt voldaan.

Grofweg kan dit op 3 manieren:

1. Onderbouwen dat de combinatie van kans en effect voldoende klein is zonder maatregel.
2. Maatregelen nemen die de kans op het effect zodanig verkleinen dat de kansbijdrage niet relevant is.
3. In een faalpadenanalyse onderbouwen dat aan de veiligheid wordt voldaan.

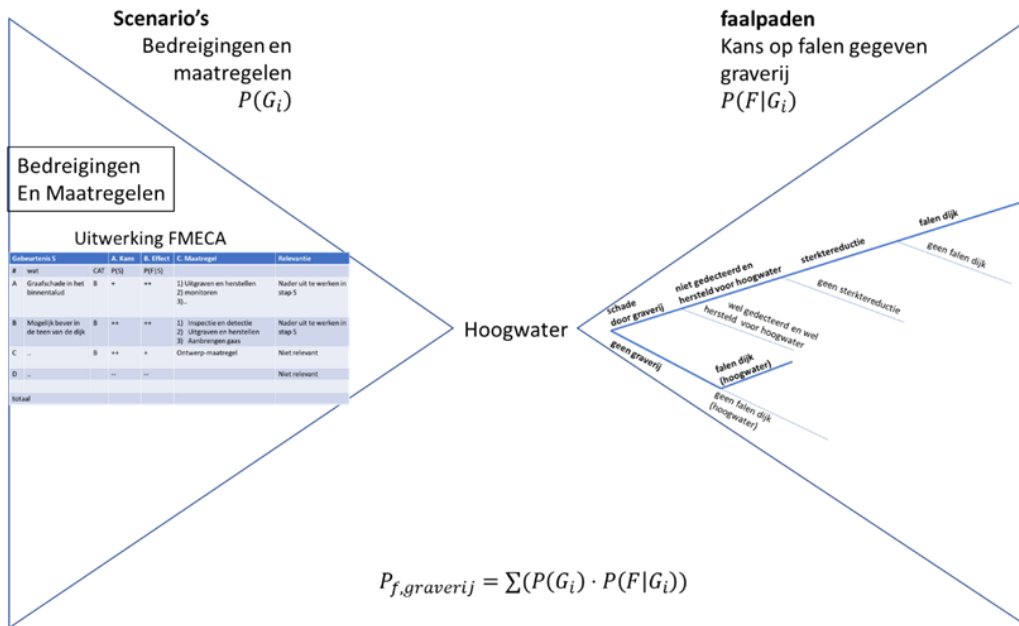
Op basis hiervan worden in de volgende stap de meest significante bedreigingen nader uitgewerkt.

5. Uitwerken significante bedreigingen

Uitwerken van de FMECA van de meest significante bedreigingen en hoe deze met veiligheidsbarrières (maatregelen) kunnen worden beheerst. Dit is een iteratief proces met stap 4. Het idee hierachter is dat veel gebeurtenissen relatief eenvoudig kunnen worden ondervangen met een beheersmaatregel of uitgesloten kunnen worden op basis van ervaringen, zodat uiteindelijk alleen wordt ingezoomd met een faalpadenanalyse op de belangrijkste gebeurtenissen. Dit kan een iteratief proces zijn omdat niet altijd meteen duidelijk is wat de belangrijkste gebeurtenissen zijn.

Voorbeeld:

Het opstellen van één bowtie zoals hieronder afgebeeld voor dierlijke graverij, waarbij voor de meest significante gebeurtenissen ook een faalpad wordt opgesteld.



6. Overzicht handelingsperspectief voor benodigd veiligheidsniveau

Op basis van de uitwerking van de significante bedreigingen, en op basis van de gekozen maatregelen ontstaat een helder handelingsperspectief t.a.v. hoe het vereiste veiligheidsniveau kan worden gehaald.

4.3.2.5 Bepalen van de overstromingskans door een dierlijke graverij in de waterkering
Meerdere combinaties van scenario's en faalpaden, zoals in de vorige paragraaf zijn bepaald, kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans. Het is niet werkbaar en ook niet nodig om voor alle scenario's en faalpaden een kwantitatieve analyse uit te voeren. Om deze te bepalen wordt iteratief te werk gegaan.

Eerst wordt op basis van een verkennende analyse het relatieve belang van verschillende paden en scenario's ingeschat en geïdentificeerd. Hierbij is het mogelijk om met eenvoudige maatregelen bepaalde gebeurtenissen uit te sluiten. Voor de belangrijkste paden en scenario's kan vervolgens met een gedetailleerde analyse worden onderzocht wat nodig is om aan de vereiste veiligheid te voldoen.

Dit kan op basis van geavanceerde probabilistische analyses, maar ook op basis van eenvoudiger manieren om te onderbouwen dat iets wel of niet een significant effect kan hebben op de kans, in combinatie met mogelijke maatregelen. In de volgende paragraaf wordt een relatief eenvoudig manier gepresenteerd.

Afhankelijk van het scenario wordt het faalpad op verschillende manieren doorlopen (bijvoorbeeld uitgaande van een dassenburcht in een waterkering). Er zijn dus veel verschillende combinaties van scenario's en faalpaden. Gezamenlijk leiden deze tot een totale faalkans.

Doelstelling is uiteindelijk dat voldoende wordt onderbouwd dat de totale overstromingskans van de waterkering, gegeven alle scenario's en faalpaden voldoende klein is. Het stappenplan in §4.3.2.4 beoogt deze onderbouwing te

ondersteunen. Vooral van belang hierbij is om de verschillende scenario's te identificeren en iteratief vast te stellen:

- (I) welke bedreigingen significant zijn en
- (II) welke maatregelen te treffen zijn.

Hierbij ontstaat een top 5 van de belangrijkste bedreigingen waar in detail naar gekeken moet worden.

5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

In dit hoofdstuk worden per indirect mechanisme aanwijzingen gegeven voor nadere verfijning van de beoordelingen. In veel gevallen is een beoordeling afhankelijk van lokale specifieke kenmerken (denk aan niet-waterkerende objecten). Deze bepalen welke fysische processen een rol spelen of niet. Bovendien zijn er niet voor alle indirecte mechanismen beoordelingsmethoden, technische leidraden, software en manuals beschikbaar. Gegevensverzameling is in dit stadium essentieel, maar soms is dat juist moeilijk te achterhalen (denk aan wat er bij bebouwing in de ondergrond zit). Waar mogelijk wordt voor nadere informatie verwezen naar achtergronddocumenten.

In zijn algemeenheid wordt in dit document een aanzet gegeven om de invloed van indirecte mechanismen op het overstromingsrisico te duiden en zo mogelijk te kwantificeren. Aanscherping van de eerste inschatting van de overstromingskans kan plaatsvinden aan de hand van uitgebreidere faalpadanalyses, betere gegevensverzameling, geavanceerdere schematiseringen of rekenmodellen of metingen.

In eerste lijn is dit een poging om beoordeling mogelijk te maken. Er is echter een grens tussen het aanscherpen van een beoordeling (wat veel moeite, tijd en kosten met zich mee kan brengen) en de afweging op wat voor manieren er maatregelen mogelijk zijn om de invloed aanvaardbaar te maken ("ontwerp"). In ontwerp van maatregelen is vaak veel meer mogelijk, en soms is een kleine ingreep meer voor de hand liggend dan een diepgaander analyse. Deze afweging behoort bij de beheerder.

5.1 Niet-waterkerende objecten

5.1.1 *Bebouwing*

Bij de eerste inschatting van de overstromingskans van bebouwing is nadrukkelijk de mogelijkheid opengelaten om als er weinig gegevens zijn van de funderingswijze van de bebouwing en wat er verder onder de grond aanwezig is toch een beoordeling uit te voeren. Er wordt van de meest ongunstige veronderstelling uitgegaan. Een voor de hand liggende optimalisatie is om na te gaan of deze veronderstelling terecht is.

Een tweede aanwijzing is gericht op de initiële mechanismen. Als de invloed van de bebouwing op één of meerdere initiële mechanismen te groot is, dan kan ook naar het initiële mechanisme gekeken worden of daar verdere optimalisatie mogelijk is om het oordeel aan te scherpen.

Ten derde (hoewel dit net als het vorige punt ook onder aanscherping van de initiële mechanismen geschaard kan worden) kan er naar het complete faalpad gekeken worden of daar onzekerheden in zitten die nader aangescherpt kunnen worden. Te denken valt dan aan bijvoorbeeld vervolgerosie na een binnenwaartse afschuiving. In het geval dat er geen of weinig golfoverslag optreedt dan is de kans op vervolgerosie leidend tot een daadwerkelijke dijkdoorbraak mogelijk gering.

Een laatste stap gaat richting maatregelen indien na voorgaande stappen de invloed van bebouwing onaanvaardbaar blijft.

5.1.2 *Begroeiing*

Bij begroeiing waarvan in de eerste inschatting van de overstromingskans niet is aangetoond dat de invloed aanvaardbaar klein is kan op verschillende manieren nagegaan worden of de aangenomen kans op (met name) windworp en de grootte van de daardoor veroorzaakte ontgronding kunnen worden aangescherpt. Gezonde bomen hebben een aanzienlijk kleinere kans op windworp dan oudere en/of zieke exemplaren. Er is ook verschil in verschillende typen begroeiing. Het kan daarom zinvol zijn om een bomendeskundige de situatie te laten beoordelen.

In Bijlage III bij WBI 2017 zijn ten aanzien van het rekenen aan bomen specificaties gegeven voor het beoordelen van beplanting. Bekeken kan worden of dit in specifieke gevallen soelaas biedt.

Bomen in blad vangen meer wind dan bomen zonder blad (herfst en winter). De kans op storm is in voorjaar en zomer ook kleiner. Dit kan aanleiding zijn om de kans op windbelasting en op windworp aan te passen.

De tweede en derde aanwijzing zijn gelijk aan die zoals genoemd bij bebouwing. De beoordeling van de initiële mechanismen en vervolgprocessen kan mogelijk ook nog worden geoptimaliseerd.

Ten slotte is er ook de stap en de overweging om maatregelen te nemen om begroeiing te sparen ondanks het feit dat de invloed op het overstromingsrisico te groot is. De tweede optie is om de begroeiing te verwijderen. Om hier een onderbouwde beslissing in te nemen is het raadzaam om met bomendeskundige en landschapsdeskundige vast te stellen of de begroeiing ecologische en landschappelijke waarde vertegenwoordigd. Hier zijn in STOWA handreikingen handvaten voor aangegeven. Zo mogelijk wordt de omgeving ook bij de overwegingen betrokken. Begroeiing kan ook emotionele waarde vertegenwoordigen.

5.1.3 *Kabels en leidingen*

De kans op een overstroming door leiding falen is dus (Hoofdstuk 4) het product van de kans op leiding falen in of nabij de dijk, de kans op herstel voordat de dijk zijn waterkerende functie moet vervullen en de kans op dijkkfalen gegeven de niet herstelde schade. In alle drie de deeltansen kan geoptimaliseerd worden.

De kans op leiding falen (afkomstig uit de incidenten databases) kan case specifiek aangescherpt worden omdat de leiding bijvoorbeeld gemonitord wordt, de wanddikte van de leiding is gemeten, de leiding beschermt is tegen corrosie. Dit kan door leidingfaalkansen te vermenigvuldigen met reductiefactoren.

De kans op herstel kan geoptimaliseerd worden door de kans op een hoogwater case specifiek te verfijnen of door een geavanceerd calamiteitenplan.

De kans op falen van de dijk gegeven de niet herstelde schade kan per "initieel faalmechanisme" worden geoptimaliseerd door optimalisatie van de invoervariabele of optimalisatie van het rekenmodel. Er kan bijvoorbeeld 3D gerekend worden voor geotechnische stabiliteit en piping aangezien de ontgrondingskuil door leidingfalen ook in de richting van de dijk een beperkte afmeting heeft. Er kan ook gedacht worden aan het meenemen van de erosie van het kernmateriaal. Tot slot kan ook de schematisering van de ontgrondingskuil geoptimaliseerd worden door de uitstroming van het gas of water tijdsafhankelijk mee te nemen.

De rapporten van de POV Kabels en Leidingen kunnen ter inspiratie dienen. Hierin zijn verschillende optimalisatie uitgevoerd.

5.1.4 *Windmolens*

Voor een nadere analyse van de overstromingskans van een waterkering in relatie met de aanwezigheid van windmolens kan gebruik worden gemaakt van de Handreiking Risicozonering Windturbines (RWS – Min I&W 2020).

Deze Handreiking Risicozonering Windturbines biedt een overzicht met de veiligheidsrisico's van een windmolen of windpark en hoe deze zich verhouden tot wet- en regelgeving en uitgangspunten omtrent het veiligheidsbeleid. Deze veiligheidsrisico's kunnen worden berekend met de rekenmethode uit de handleiding Risicoberekeningen Windturbines die onder beheer is gebracht bij het RIVM (RIVM – Min VW&S 2020; Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, Module IV – Windturbines, versie oktober 2020)¹.

De regels uit het rekenvoorschrift geven aan hoe de kans moet worden berekend dat er een (stuk van een) blad van de windturbine afvalt, een gondel valt of een mast breekt, en tot op welke afstand dit invloed kan hebben op de veiligheid. Om risico's te beperken gelden er minimale afstanden voor het plaatsen van windturbines in de nabijheid van gebouwen en objecten, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten. Daarnaast moet ook rekening gehouden worden met het risicoverhogend effect van windturbines op risicovolle objecten in de nabijheid. Dit geldt derhalve ook voor waterkeringen.

Vervolgens dienen deze kansen gecombineerd te worden met de kans op het optreden van initiële of vervolgmecanismen bij een hoge waterstand, waarbij er een risico is ten aanzien van de waterveiligheid in combinatie met het mogelijke gevolg of effect dat het val incident op de waterkering heeft.

5.2 **Voorland en havendammen**

5.2.1 *Afschuiving voorland*

Voor de kans op afschuiving van het voorland is heel belangrijk hoe de daling van de buitenwaterstand en de reactie van de waterstand in het voorland precies wordt gemodelleerd. Het kan veel inzicht geven en winst opleveren om hier tijdsafhankelijk aan te rekenen. De berekeningen kunnen worden ondersteund door metingen.

Een eerste benadering voor de opbouw van de ondergrond kan aan SOS Stochastische Ondergrond Schematisatie) worden ontleend. Een betere modellering kan door grondonderzoek op het voorland zelf uit te voeren worden verkregen.

Voor de kans dat een afschuiving tijdig wordt gedetecteerd en de kans dat er tijdig maatregelen kunnen worden getroffen zijn eigenlijk geen getallen beschikbaar. Deze kansen moeten door de beheerder worden geschat op basis van inspectie en eventuele beheermaatregelen die zijn voorzien. Hier zullen ook regionale verschillen in zijn. In beperkte mate kunnen deze kansen worden beïnvloed door beheermaatregelen aan te scherpen.

¹ De Handleiding Risicoberekeningen Windturbines (rekenvoorschrift) is te vinden op: <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/rekenvoorschrift-omgevingsveiligheid> Het voorschrift staat in module IV, de toelichting staat in een apart document (H9).

5.2.2 *Zettingsvloeiing*

Voor de kans op zettingsvloeiing zijn een aantal parameters waar nader naar gekeken kan worden:

- Gesteldheid van de zandlagen: de dichtheid van het zand (uitgedrukt in de state parameter) en de korrelgrootte. Zo mogelijk worden hier sonderingen en boringen van de vooroever zelf voor gebruikt;
- De migratiesnelheid van de vooroever. Deze bepaalt mede de kans op een vloeiing. Het is wel een punt van aandacht dat deze vooral bepaald wordt door het gedrag van de vooroever in de afgelopen jaren (verleden), terwijl een beoordeling gaat over de komende periode (toekomst). Met name als de migratiesnelheid beperkt is, bijvoorbeeld omdat de oever (deels) is bestort, dan kan het zinvol zijn om de peilgegevens van de onderwaterbodem van de laatste aantal jaren naast elkaar te leggen om zo mogelijk onderbouwde migratiesnelheid van de vooroever aan te scherpen;
- De aanwezigheid van gehele of gedeeltelijke bestorting. Uit historisch onderzoek is soms nog te achterhalen of en waar er in het verleden is bestort. In overleg met deskundigen kan dit aanleiding zijn om de kans op vloeiing of de te verwachten inscharing beter in te schatten.

Een zettingsvloeiing wordt volgens de huidige inzichten geïnitieerd bij een lage waterstand (althans, die kans is het grootst). Er zijn daarom mogelijkheden om als de inscharing niet verder komt dan het voorland om te kijken hoe groot de kans is dat de schade wordt opgemerkt en hersteld kan worden vóórdat een volgend hoogwater optreedt.

Een bijzondere aanscherping hierbij is ten aanzien van de kans op overstroming als gevolg van aantasting van de kruinhoogte. Er is in het verleden een redenering opgezet bij wijze van geavanceerde analyse waarbij de kans op aantasting van de kruinhoogte werd berekend, en aan de hand van getallen voor de waterstandstatistiek werd gekeken hoe groot de kans op een waterstand groter dan de resterende kruinhoogte was binnen de periode die voor herstel noodzakelijk werd geacht.

Met HMTurb en SLIQ2D zijn geavanceerde modellen beschikbaar om verwekingsvloeiing en bresvloeiing nader te beschouwen op basis van een fysische modellering van het grondgedrag. Deze modellen zijn in het verleden vooral gebruikt als onderzoeksmodellen die de tendenzen en kansenverdelingen konden helpen onderbouwen. De veronderstelling is dat de fysische processen weerspiegeld worden in de kansenverdelingen, dus dat het in beperkte mate zinvol is om met geavanceerde modellen te rekenen. Dit zal vaak geen kwantificeerbaar voordeel opleveren.

De conventionele maatregel bij een te grote invloed van een zettingsvloeiing is het aanbrengen van een steenbestorting over de volledige hoogte van de vooroever.

5.2.3 *Golfafslag van voorland*

In de eerste inschatting van de overstromingskans kan bij gebrek aan kennis over de samenstelling van het voorland uitgegaan worden van een voorland dat geheel bestaat uit zand. Een logische aanscherping is om de samenstelling van het voorland te bepalen. Als het voorland uit klei bestaat dan is dat voordelig.

De mogelijkheden om op eenvoudige manieren te rekenen aan een voorland dat bijvoorbeeld afwisselend uit zand en uit klei bestaat, dat slechts gedeeltelijk of niet boven de waterstand is gelegen of om tijdsafhankelijkheid van de waterstand

gedurende de storm in rekening te brengen zijn beperkt. Gevoelsmatig zijn hier wel grote voordelen te behalen. Hiervoor zullen dan experts geraadpleegd moeten worden. Met Durosta of Delft3D kunnen nadere analyses worden uitgevoerd.

Een laatste overweging is ook hier om als het overstromingsrisico door invloed van golfafslag te groot is om maatregelen te treffen. Dit kan aan de rand van het voorland (maar dan is de vraag of dit in het beheer en onderhoud kan worden opgenomen) of in het voorland zelf met erosieschermen.

5.2.4 *Bezwijken havendammen*

Het bezwijken van havendammen kan analoog geschieden aan een reguliere stabiliteitsbeoordeling van een waterkering. Bij havendammen zal echter de maatgevende belastingsituatie anders zijn. Er zal sprake zijn van een vergelijkbare waterstand aan de binnen- en buitendijkse zijde waarbij, met name in het zee-, getijden en merengebied, de golfbelasting een belangrijke rol zal spelen. Dit zal met name ook het geval zijn bij verticale constructies.

De maatgevende belasting is mede afhankelijk van de hoogte van de havendam en hoeft zeker niet op te treden bij de ontwerpwaterstand die voor de achterliggende waterkering van toepassing is. Dat betekent dat voor een havendam in bepaalde gevallen wellicht uitgegaan kan worden van een bewezen sterkte.

Naast de golfbelasting wordt een andere maatgevende belasting voor havendammen gevormd door een snelle waterstandsval, die kan zorgen voor instabiliteit van zowel het buiten- als het binnentalud van een havendam of golfbreker. Indien in korte tijd daarna zich een nieuwe hoogwatergolf voordoet, wat in het zee-, getijden- en merengebied gebied niet ondenkbaar is dan is een afgeschoven talud kwetsbaar voor verdere erosie en kruinhoogteverlies. Er kan een bres ontstaan in de havendam.

Voor de kans dat erosie of een afschuiving tijdig wordt gedetecteerd en de kans dat er tijdig maatregelen kunnen worden getroffen zijn bij havendammen eigenlijk geen getallen beschikbaar. Deze kansen moeten door de beheerder worden geschat op basis van inspectie en eventuele beheermaatregelen die zijn voorzien. Hier zullen ook regionale verschillen in zijn. In beperkte mate kunnen deze kansen worden beïnvloed door beheermaatregelen aan te scherpen.

5.3 **Overig**

5.3.1 *Afschuiving buitentalud*

Voor de kans op afschuiving van het buitentalud is heel belangrijk hoe de daling van de buitenwaterstand en de reactie van de waterstand in de dijk precies wordt gemodelleerd. Het kan veel inzicht geven en winst opleveren om hier tijdsafhankelijk aan te rekenen. De berekeningen kunnen worden ondersteund door metingen.

Voor de kans dat een afschuiving tijdig wordt gedetecteerd en de kans dat er tijdig maatregelen kunnen worden getroffen zijn eigenlijk geen getallen beschikbaar. Deze kansen moeten door de beheerder worden geschat op basis van inspectie en eventuele beheermaatregelen die zijn voorzien. Hier zullen ook regionale verschillen in zijn. In beperkte mate kunnen deze kansen worden beïnvloed door beheermaatregelen aan te scherpen.

5.3.2

Graverij

De kans op een overstroming door een graverij is de som van de kans op verschillende scenario's van graafschade vermenigvuldigd met de conditionele kans op een overstroming gegeven de specifiek graafschade inclusief de mogelijkheid van tijdig herstel. Deze conditionele kans op een overstroming wordt bepaald met een schematisatie van de schade. In de optimalisatie kunnen we dus de kans op de graafschade of de omvang van de schade of de conditionele kans op een overstroming nauwkeuriger inschatten. De omvang van de graafschade kan bijvoorbeeld als stochastische variabele worden beschouwd. De conditionele kans op piping of geotechnische stabiliteit kan bijvoorbeeld in 3D worden bepaald (overeenkomstig met de optimalisatie voor leidingen in dijken). Ook kan de kans op herstel worden toegevoegd of geoptimaliseerd worden, idealiter met een calamiteiten- bestrijdingsplan.

6 Literatuur

- De Dianous & Fiévez, 2006. V. De Dianous and C. Fiévez, "ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance," J. Hazard. Mater., vol. 130, no. 3 SPEC. ISS., pp. 220–233, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.010.
- Kanning, 2021. Wim Kanning, *Veiligheid innovaties*, Deltares, kenmerk 11207012-004-GEO-0001 concept, d.d. 6-10-2021
- Kanning et al, 2017. Dr. W. Kanning, Dr. A. Teixeira, Ir. M. van der Krogt, Ir. K. Rippi, *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability*, Deltares, kenmerk 1230086-009-GEO-0030 versie 3, d.d. April 2017
- Klerk, 2021. Wouter Jan Klerk, Methodiek voor risicogestuurd B&O van dijkbekledingen, groene versie, Deltares, kenmerk 11206820-005-GEO-0005, 13-12-2021
- Min. I&W, 2022c. *Handleiding overstromingskansanalyse*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, BOI, concept, juli 2022 versie 0.8 Concept, gevonden op: <https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/beoordelen-primaire-waterkeringen/uitvoerbaarheidstoets-beoordelings/onderdelen-boi/> (bezocht 9 december 2022)
- Van den Berg, 2022. Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen in waterkeringen, Deltares, kenmerk 11208018-002-GEO-0001 versie 1.0, 15-12-2023
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2017. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid
- Rijkswaterstaat WVL 2021. Handreiking NWO's in de veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen. 12 maart 2021, versie 2.0 definitief.
- Deltares 2015. Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing. Kenmerk 1220078-007-GEO-0007, december 2015, versie 4 definitief
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2016a. Schematiseringshandleiding afschuiving voorland. 1 december 2016. Definitief
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2016b. Schematiseringshandleiding golfafslag voorland. 1 december 2016. Definitief
- Van den Ham, G. A. 2015a. WTI Cluster Indirecte faalmechanismen- Update of detailed assessment method on flow slides – final. Deltares rapport kenmerk 1209439-002-GEO-0001, mei 2015
- Van den Ham, G. A., 2015b. Faalmechanismebeschrijving zettingsvloeiing. Deltares rapoort kenmerk 1220078-008-GEO-0003, mei 2015
- Knoeff, Han, 2017. Memo Factsheet indirecte mechanismen. Deltares memo kenmerk 11200574-007-GEO-0001, 18 september 2017

KPR 2018. Factsheet Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit. Kennisplatform Risicobenadering, Jan Tigchelaar, 15 maart 2018

KPR 2018. Memo Windmolens op of nabij primaire waterkeringen (473), Ruben Jongejan, Gerard Harmsen, Jan Willem Nieuwenhuis, 19-07-2018

Stowa 2018 a. Handreiking Windmolens en waterkeringen, Bestuur en beleid 2018-51

Stowa 2018 b. Handreiking Windmolens en waterkeringen, Wetgeving 2018-52

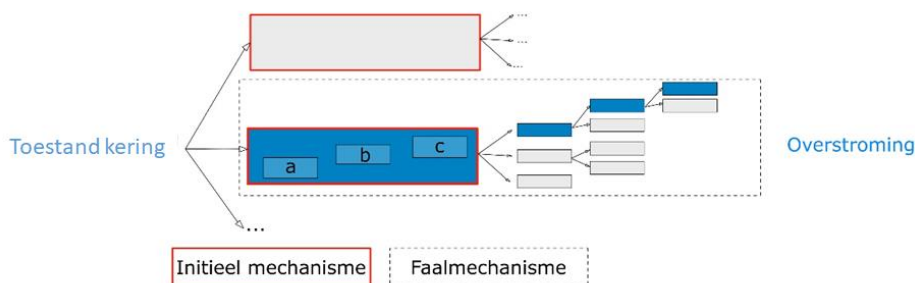
Stowa 2018 c. Handreiking Windmolens en waterkeringen, Techniek 2018-53

RWS – Min I&W 2020 Handreiking Risicozonering Windturbines (HRW 2020), 20 mei 2020, versie 1.1 definitief

RIVM – Min VW&S 2020 Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, Module IV – Windturbines, versie oktober 2020

Bijlage A Begrippenlijst

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023.



Figuur 10: Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen

Tabel 6: Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie is contextafhankelijk, geen absoluut begrip. Het betekent dat binnen het beoordelingsproces de term wordt gebruikt met de betreffende definitie. De definities van deze termen zijn uitgewerkt in bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling)

Naam	Omschrijving en voorbeelden
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme. <i>Voorbeeld: gestippelde kader in Figuur 10</i>
Faalpad*	Een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 10 in blauw aangegeven reeks van gebeurtenissen/ mechanismen</i>
Gebeurtenis*	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Een gebeurtenis of knoop geeft de stap in het proces aan (zie ook mechanisme). <i>Voorbeeld: in Figuur 10 zijn a-b-c drie gebeurtenissen binnen het initiële mechanisme (met een rode rand aangegeven)</i>
Mechanisme	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Mechanisme wordt gebruikt om de fysica te beschrijven en kan bestaan uit een gebeurtenis of uit een aaneenschakeling van meerdere gebeurtenissen (zie ook gebeurtenis). <i>Voorbeeld: in Figuur 10 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 10 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 10 aangegeven met een rode rand</i>
Vervolgmechanismen*	De mechanismen die de initiërende mechanisme opvolgen. Samen leiden ze tot overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 10 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>


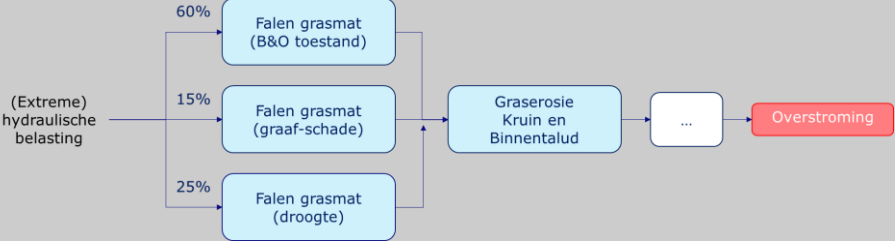
<p>Directe mechanismen</p>	<p>Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling. Directe mechanismen kunnen ook een vervolgmecanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</i></p>
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven Tabel 5.2 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling</i></p>
<p>Generieke faalmechanismen</p>	<p>Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke faalmechanismen. De generieke faalmechanismen die worden beschouwd in de overstromingskansanalyse zijn gebundeld rondom de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling.</p> <p><i>Voorbeeld van een generiek faalmechanisme gebundeld rond GEKB als initieel mechanisme</i></p> 
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatiespecifiek. Specifieke faalmechanismen kunnen het gevolg zijn van een optreden van een direct of indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme is het falen van innovaties.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanismen, die het gevolg is van het optreden van een direct mechanisme, is het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme die het gevolg is van een indirect mechanisme is het falen van een waterkering als gevolg aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding.</i></p>
<p>Scenario</p>	<p>Een scenario beschrijft een mogelijke geometrie of staat van de waterkering die wordt gebruikt als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</i></p> 



Foto voorzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat - Ruimte voor de Rivier / Ruimte voor de Rivier
Foto achterzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Jan van den Broeke



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares