



DIJKEROSIE BUITENTALUD

DIJKEN/DAMMEN DEEL 3

Handleiding Overstromingskansanalyse





Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding overstromingskansanalyse Dijken/dammen

Deel 3 Dijkerosie - buitentalud

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Informatie	www.iplo.nl
Versie	December 2023

Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse dijken/dammen deel 3 Dijkerosie - buitentalud 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
1.1.2.1	Handleidingen	7
1.1.2.2	Technische leidraden	8
1.1.1.1	Software en databases	8
1.1.2	Werkatelier	8
1.2	Verhaal van de kering	8
1.3	Leeswijzer van deze handleiding	9
2	Beschrijving faalmechanisme	10
2.1	Fenomenologische beschrijving dijkerosie buitentalud	10
2.2	Faalpaden	10
2.2.1	Trigger: Verhoogde hydraulische belasting	11
2.2.2	Bezwijken toplaag	12
2.2.3	Erosie onderlagen	13
2.2.4	Erosie dijk kern	13
2.2.5	Overstroming	13
2.3	De rol van NWO's, voorlanden en (haven)dammen	14
2.3.1	De rol van NWO's	14
2.3.2	De rol van het voorland	14
2.3.3	De rol van (haven)dammen	15
3	Bepalen relevantie met beslisregels	16
3.1	Beslisregels	16
3.1.1	Algemene beslisregels	17
3.1.2	Beslisregels voor asfaltbekledingen	17
3.1.3	Beslisregels voor grasbekledingen	18
4	Eerste inschatting overstromingskans	19
4.1	Faalkansbepaling	19
4.2	Dijkvakindeling	22
4.3	Lengte-effecten	22
4.4	Steenzetting	23
4.4.1	Hydraulische belastingen	24
4.4.2	Schematisatie	24
4.4.3	Model en berekening	25
4.5	Asfaltbekleding	26
4.5.1	Hydraulische belastingen	26
4.5.2	Schematisatie	27
4.5.3	Model en berekening	28
4.6	Grasbekleding	29
4.6.1	Hydraulische belastingen	30
4.6.2	Schematisatie	30
4.6.3	Model en berekening	31
5	Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans	33
5.1	Inleiding	33
5.2	Mogelijkheden	33

5.2.1	Optie 1 Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie	33
5.2.2	Optie 2 Uitwerken vervolgmecanismen	35
5.2.3	Optie 3 Toepassen andere modellen en technieken	35
5.2.4	Optie 4 Benutten kennisontwikkeling	38
6	Literatuur	40
Bijlage A.	Begrippenlijst	41

1 Inleiding

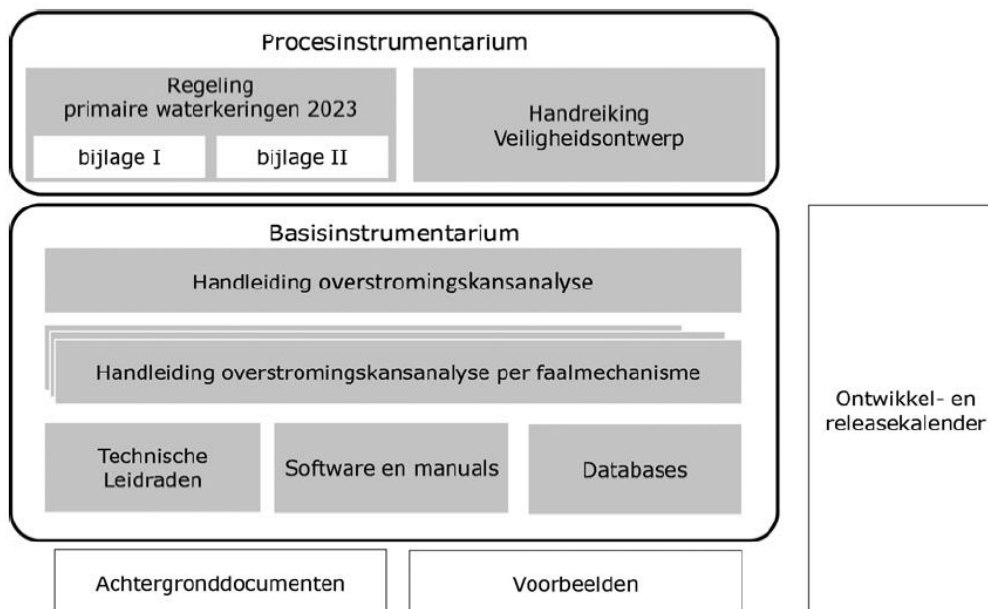
Deze handleiding beschrijft de aanpak voor een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans vanuit het mechanisme Dijkerosie buitentalud. Het verhaal van de kering staat daarbij centraal. De handleiding is geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling, 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 handleiding Veiligheidsontwerp is het procesinstrumentarium dat vanuit BOI beschikbaar wordt gesteld. Deze handleiding 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.

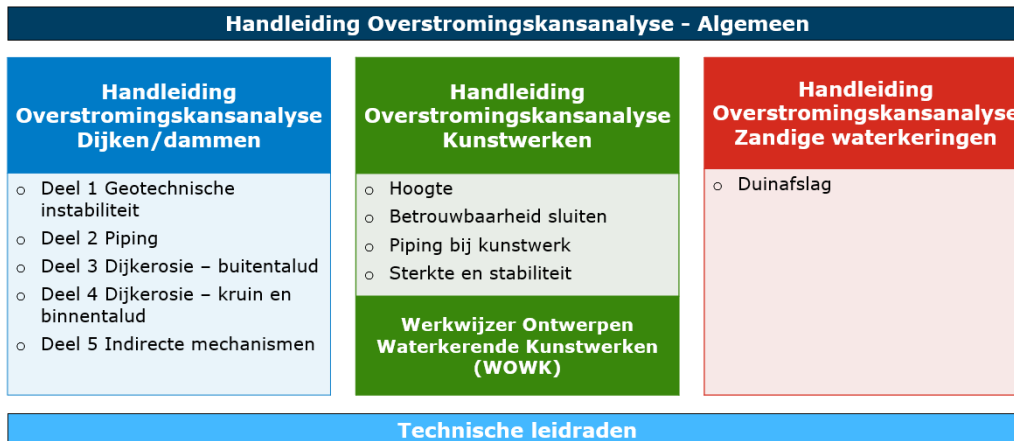
1.1.2 Basisinstrumentarium

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, 2023a) 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 het faalmechanisme Dijkerosie buitentalud 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/>.

1.1.1.1 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).

1.1.2 *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 het faalmechanisme dijkerosie buitentalud.

Hoofdstuk 2 beschrijft het gedrag van de kering en het faalpad. In **hoofdstuk 3** staan generieke beslisregels die het mogelijk maken snel te filteren in welke situaties het faalmechanisme dijkerosie buitentalud niet relevant is.

Hoofdstuk 4 beschrijft de uitwerking van een generieke analyse van de overstromingskans. Deze geeft, samen met de technische leidraad voor dit mechanisme, de handvatten voor het schematiseren en analyseren van dijktrajecten, dijkvakken en dwarsdoorsnedes. Deze eerste inschatting van de overstromingskans gebruikt generieke methodes met een zeker toepassingsgebied. Afhankelijk van de lokale situatie kan de overstromingskans met verdere analyses worden aangescherpt. Dit staat beschreven in **hoofdstuk 5**.

2 Beschrijving faalmechanisme

Dit hoofdstuk beschrijft de faalmechanismen die vallen onder erosie van het buitentalud van dijken. De eigenschappen van de belasting en waterkering worden beschreven in relatie tot het faalmechanisme. Dit is onderdeel van het verhaal van de kering. Op basis van deze eigenschappen kunnen voor een specifieke locatie en context de relevantie van het faalmechanisme (hoofdstuk 3), de toepasbaarheid van de generieke analyse (hoofdstuk 4) en de mogelijke vervolganalyses (hoofdstuk 5) worden bepaald.

2.1 Fenomenologische beschrijving dijkerosie buitentalud

Het dijklichaam wordt beschermd tegen erosie door een dijkbekleding. Voordat erosie kan optreden, zal eerst de dijkbekleding moeten bezwijken¹. Bij de beschouwing van dijkerosie wordt meestal onderscheid gemaakt tussen faalpaden die bij de bekleding op het buitentalud horen en de bekleding op kruin en binnentalud. Deze handleiding gaat over het faalmechanismen van dijkerosie van het buitentalud.

Uitgangspunt van dit faalmechanisme is dat falen van de kering optreedt door een verhoogde hydraulische belasting welke leidt tot een initieel mechanisme waarbij de bekleding op het buitentalud bezwijkt. Verhoogde hydraulische belastingen bestaan over het algemeen uit combinaties van hoge waterstanden en hoge golfbelastingen (die niet noodzakelijkerwijs gelijktijdig op hoeven te treden) welke niet tot dagelijkse condities gerekend kunnen worden.

Het optreden van schade aan de bekleding op het buitentalud impliceert een verandering in het profiel en de doorsnede van een dijk. Het dijklichaam wordt dan kwetsbaarder voor de vervolgmecanismen erosie van onderlagen en dijk kern en/of geotechnische instabiliteit.

Als stappen in een faalproces leiden tot (significante) kruinverlaging, ontstaat er een bres en overstroomt het achterland. In dat geval spreken we van falen van de kering.

In paragraaf 2.2 wordt een generiek faalpad voor de mechanismen voor Dijkerosie buitentalud beschreven. Voor een uitgebreide fenomenologische beschrijving van deze faalmechanismen wordt verwezen naar de technische leidraden.

2.2 Faalpaden

De keten van blauwe gebeurtenissen in Figuur 3 illustreert het in deze handleiding beschreven generieke faalpad voor dijkerosie buitentalud.

¹ In deze handleiding heeft 'falen' betrekking op de kering als geheel en heeft 'bezwijken' betrekking op slechts een onderdeel van de kering.



Figuur 3: Generiek faalpad voor het faalmechanisme dijkerosie buitentalud

Afhankelijk van het verhaal van de kering (vorm dijklichaam, objecten op de dijk en de ligging van het dijktraject) kan het te beschouwen faalpad worden aangepast en/of specifieker worden ingevuld. Andere faalpaden zijn namelijk ook mogelijk. Dit kan bijvoorbeeld een faalpad zijn waar bezwijken van de toplaag leidt tot verhoging van de freatische lijn en geotechnische instabiliteit. Een faalpad kan daarnaast ook meer mogelijke scenario's bevatten. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de kans van bezwijken van de teenconstructie welke ook de faalkans van de hierboven gelegen toplaag/toplagen beïnvloedt. In deze situaties is het dus van belang om het faalpad te splitsen en alle scenario's te beschouwen met bijbehorende kansen van optreden.

De hiernavolgende sub-paragrafen geven een toelichting op de verschillende gebeurtenissen in het generieke faalpad in Figuur 3.

2.2.1 Trigger: Verhoogde hydraulische belasting

Kanttekening over positie als eerste gebeurtenis

De positie van de gebeurtenis 'verhoogde hydraulische belastingen' als eerste gebeurtenis in het generieke faalpad is een vereenvoudiging om de figuur met faalpaden overzichtelijk te houden. Het nadeel hiervan is dat dit de suggestie wekt dat deze gebeurtenis alleen voorafgaat aan het initiële mechanisme en verder geen rol meer speelt. In werkelijkheid bestaan belastingen uit verschillende componenten zoals waterstanden en golven met een verschillend verloop van tijd. Het verloop in de tijd van de hydraulische belastingen is tijdens het hele faalpad van de kering relevant. Verhoogde hydraulische belastingen zijn niet alleen een trigger voor het (moment van) optreden van het initiële mechanisme. De mate waarin en wijze waarop de verhoogde belastingen nog aanwezig zijn, bepalen vervolgens ook het verloop van de vervolgmecanismen.

Initiële mechanismen gerelateerd aan de faalmechanismen *Dijkerosie buitentalud* worden vooral veroorzaakt door golfbelastingen. Daarbij spelen ook de belastingduur en het belastingverloop in bredere zin een belangrijke rol. De waterstand bepaalt vooral welke delen van het buitentalud (het zwaarst) door de golven worden belast. Bovendien kan een overstroming alleen optreden als de waterstand hoger is dan het achterland.

De combinatie van waterstand en golfbelasting bepaalt op welke locatie het buitentalud wordt belast. De belasting door golven is het sterkst in een gebied rond de stilwaterlijn. Binnen dit gebied worden doorgaans twee zones onderscheiden: de golfklapzone en de golfploopzone.

Windgolven

De meest relevante belasting voor de initiële mechanismen binnen *Dijkerosie buitentalud* is belasting door windgolven (in deze context horen daar ook de deininggolven bij), veelal in combinatie met verhoogde waterstanden.

De golfbelasting kan ruimtelijk vrij sterk variëren. Voor dijkerosie buitentalud worden de golfcondities ter plaatse van de dijkteen als meest relevant beschouwd. De grootte van de golfbelasting is primair afhankelijk van de wind (snelheid en richting), de strijklengte en de waterdiepte. Daarnaast kan er sprake zijn van lokale invloeden op de golfcondities, bijvoorbeeld door een (haven)dam of een ondiep voorland.

Belastingverloop

Het verloop in de tijd van de waterstand en de golfcondities (storm) bepaalt de belastingduur per locatie (zone) op het buitentalud. Merk op:

- Voor relatief laag gelegen bekledingen zijn de golfbelastingen bij relatief lage waterstanden van belang.
- Binnen een belastinggebeurtenis hoeft de zwaarte van de golfbelasting niet per se synchroon te lopen met de hoogte van de waterstand.
- De storm die de grootste kans op bezwijken van de bekleding geeft, hoeft niet per se het meest relevant te zijn voor het optreden van het gehele faalpad.

Gezien deze nuanceringen is het raadzaam om te evalueren of de afgeleide belastingen plausibel zijn voor de betreffende kering. Zijn hier twijfels over, dan kan contact opgenomen worden met het [Informatiepunt Leefomgeving](#).

Waterstand

Naast de hierboven beschreven rol van de waterstand, kan ook een (snelle) daling van de waterstand relevant zijn voor dijkerosie buitentalud, met name voor gras- en asfaltbekledingen.

Scheepsgolven

Bestendigheid van de bekleding tegen scheepsgolven moet worden geborgd in het kader van de zorgplicht; Het bepalen van de bestendigheid van de bekleding tegen scheepsgolven maakt geen deel uit van de analyse van de overstromingskans. Indien Is de kans op schade door scheepsgolven en niet-tijdig herstel daarvan toch reëel , dan wordt aangeraden hier door middel van scenario's rekening mee te houden. Daarnaast zijn scheepsgolven mogelijk relevant als na het bezwijken van de dijkbekleding (het initiële faalmechanisme) de dijk kern open ligt en dagelijkse processen tot toename van dijkerosie leiden. Dit is alleen relevant als een analyse van het volledige faalpad wordt uitgevoerd.

Stroming

Stroming langs dijkbekledingen is in sommige situaties relevant om te beschouwen. Een voorbeeld hiervan kan een schaarlijk in het rivierengebied zijn waar lokaal hoge stroomsnelheden kunnen optreden. In deze handleiding wordt hier niet nader op ingegaan.

2.2.2 *Bezwijken toplaag*

Het bezwijken van de toplaag door initiële mechanismen wordt beschouwd als tweede gebeurtenis in het faalpad. De toplaag wordt hierbij gedefinieerd als de eerste aangevallen laag die het dijklichaam beschermt tegen erosie. De toplaag van een dijk kan bestaan uit een steenzetting, asfaltbekleding, grasbekleding en/of een ander bekledingstype zoals breuksteen. Het bezwijkproces van de toplaag door een verhoogde hydraulische belasting, is afhankelijk van het type en de locatie op het buitentalud. Zo kent een bekleding in de golfoploopzone een ander bezwijkproces dan een bekleding in de golfklapzone.

Ook teen- en overgangsconstructies op het buitentalud, welke de functie hebben om een boven- of tussengelegen dijkbekleding op te sluiten, kunnen een bijdrage leveren aan de bezwijkkans van de toplaag zelf. Het eventuele bezwijken van deze elementen kan als scenario worden beschouwd in het faalproces, maar is verder niet beschreven in deze handleiding.

Hieronder wordt per type toplaag kort ingegaan op de initiële mechanismen die kunnen leiden tot het bezwijken van de toplaag. Merk op dat per type mogelijk ook andere mechanismen zijn die kunnen leiden tot bezwijken.

Instabiliteit steenzetting

Een steenzettingsconstructie op een dijk bestaat overwegend uit een toplaag van zuilen of blokken met daaronder in de meeste gevallen een filterlaag en/of geokunststof. De toplaag kan instabiel worden als gevolg van een verhoogde hydraulische belasting. Dit kan gebeuren door instabiliteit van de toplaag als gevolg van golfaanval, maar ook door materiaaltransport vanuit bijvoorbeeld de filterlaag of door afschuiven als gevolg van golfaanval. Paragraaf 4.4 en de technische leidraden beschrijven het initiële mechanisme *Instabiliteit steenzetting* (ZST) in meer detail.

Bezwijken asfaltbekleding

In een asfaltbekleding kunnen scheuren ontstaan door herhaalde golfklappen tijdens een storm. Bij gesloten asfaltbekledingen kunnen ook wateroverdrukken onder de bekleding ontstaan waardoor deze wordt opgedrukt of er een S-profiel ontstaat. In paragraaf 4.5 en de technische leidraden worden deze mechanismen in meer detail beschreven.

Bezwijken grasbekleding

Als een grasbekleding op enig moment tijdens een storm rond de waterstand ligt, is deze onderhevig aan golfklap en/of langsstroming. Door de herhalende belasting van de golfklappen, kan de bekleding als gevolg van erosie bezwijken. Ook kan als gevolg van wateroverdrukken bij teruglopende golven de grasbekleding afschuiven. In de golfoploopzone kan erosie van de grasbekleding plaatsvinden door de herhaaldelijke belasting als gevolg van oplopende golven. In paragraaf 4.6 en de technische leidraden worden deze mechanismen in meer detail beschreven.

2.2.3 *Erosie onderlagen*

Na het bezwijken van de toplaag kunnen eventueel aanwezige onderlagen (bijvoorbeeld een afdeklaag van klei) door golfaanval en/of (langs)stroming eroderen. Vooral een onderlaag van klei kan een aanzienlijke standtijd hebben. De standtijd neemt daarbij toe met toename van de dikte van de onderlaag van klei. Het is ook mogelijk dat er geen onderlaag aanwezig is en dat de toplaag direct op bijvoorbeeld een dijk kern van zand ligt.

2.2.4 *Erosie dijk kern*

Na het bezwijken van de toplaag en de eventueel aanwezige onderlagen, zoals kleilagen, wordt de dijk kern belast. De dijk kern bestaat in de meeste gevallen uit klei, zand of een combinatie daarvan. Deze kan verder eroderen door golfaanval en/of (langs)stroming. Ook kan vervolgerosie aanleiding geven tot geotechnisch bezwijken van het restprofiel. De dijk kern kan afhankelijk van het kernmateriaal en de omvang van de dijk kern, een aanzienlijke standtijd hebben.

2.2.5 *Overstroming*

Er is sprake van een overstroming als gevolg van dijkerosie buitentalud wanneer door vervolgprocessen een dusdanige kruinverlaging en daarmee ongecontroleerde instroom van water in het achterland plaatsvindt dat de kering volgens de wet gefaald is.

2.3 De rol van NWO's, voorlanden en (haven)dammen

2.3.1 De rol van NWO's

In en op een waterkering zijn vaak objecten aanwezig die een andere functie hebben dan waterveiligheid. Deze niet-waterkerende objecten (NWO's) worden onderverdeeld in bebouwing, begroeiing, kabels en leidingen en overige constructies. Door hun aanwezigheid en/of falen kunnen deze objecten de kans op overstroming in zowel negatieve als positieve zin beïnvloeden. Het is dus van belang om bij een beoordeling in te schatten hoe groot deze invloed is. Is de invloed op voorhand als relevant ingeschat, wordt aangeraden de rol van NWO's als gebeurtenis(sen) in de te beschouwen faalpaden mee te wegen.

Het is daarbij van belang om de rol van een NWO te beschouwen tijdens het optreden van het mechanisme. In een windgedreven hoogwatersysteem is de kans op samenloop van een omgewaaide boom en golfoverslag groter dan in een afvoergedreven hoogwatersysteem. Bij een bebouwing op het binnentalud kan een hogere belasting door het effect van stromingscontractie optreden. Daarnaast kunnen op een voorland (zie volgende paragraaf) aanwezige NWO's leiden tot een reductie van de hydraulische belasting op de kruin en binnentalud door een afname in de golfbelasting op de dijk.

Daarnaast is het van belang de staat van een NWO aan het begin van een mechanisme te beschouwen. Door de aanwezigheid en falen van het NWO, kan de waterkering ook bij minder extreme condities beschadigd raken. Hoewel mogelijk tijd beschikbaar is tussen het beschadigen en een extreem hoogwater, wordt aangeraden om met scenario's rekening te houden met het falen van tijdig herstel van dergelijke schade.

Voor een nadere beschrijving van de relevantie van NWO's wordt verwezen naar de handleiding Indirecte Mechanismen.

2.3.2 De rol van het voorland

Een voorland, het buitendijks gelegen land grenzend aan de buitenteen van de dijk, kan invloed hebben op de hydraulische belasting op de dijk. Bij een hooggelegen (breed) voorland, wordt de waterdiepte beperkt en kan door breking van golven de golfbelasting gereduceerd worden. Dit verkleint de mate van overslag over de dijk en daarmee de kans op falen van de dijkbekleding op het binnentalud. Dit is het meest voorkomende effect van een voorland. Bij minder hoog gelegen voorlanden is het niet uitgesloten dat het voorland leidt tot juist iets zwaardere golfbelasting².

Voor eenvoudige voorlanden kan het effect op de hydraulische belasting verdisconteerd worden met de *voorlandmodule* (als onderdeel van de 'DaF module'), die in diverse rekenmodellen van het Basisinstrumentarium is opgenomen. Deze voorlandmodule bevat sterke vereenvoudigingen, zoals een 1D-benadering, en is dus bijvoorbeeld niet geschikt voor situaties met een voorland waarvan het profiel varieert langs de dijk. Ook in situaties waarbij (zeer) schuin invallende golven belangrijk zijn, is grote voorzichtigheid geboden bij het gebruik van deze voorlandmodule. Voor dergelijke complexere situaties wordt aanbevolen een meer geavanceerd golfmodel (zoals SWAN) te laten toepassen door specialisten. Dit kan onderdeel zijn van de optie '*andere modellen en technieken*' zoals beschreven in paragraaf 5.2.3. Nadere achtergronden bij het omgaan met voorlanden, zijn

² Dit kan het geval zijn als binnen de golfprocessen shoaling dominant is boven breking.

beschreven in het technisch leidraadartikel 'Transformatie hydraulische belastingen met de DAF module'.

Merk op dat (al bij minder extreme condities) het voorland zelf door erosie en afslag, afschuiving of zettingsvloeiing verkleind kan worden. Hierdoor zal waarschijnlijk het positieve effect van het voorland afnemen en neemt de overstromingskans toe. Vegetatie op het voorland kan daarbij een stabiliserende werking hebben. Voor het bepalen van de standzekerheid van het voorland zijn beslisregels en uitgebreidere modellen beschikbaar (zie de technische leidraden). Is de kans op verkleining van het voorland reëel en is het van belang voor de bepalende faalpaden, dan wordt aangeraden dit te behandelen als een indirect mechanisme en hier met scenario's rekening mee te houden, zie (RWS WVL, 2023a).

2.3.3 *De rol van (haven)dammen*

Ook in het buitenwater aanwezige (haven)dammen kunnen leiden tot een reductie van de golfbelasting op de dijk en daarmee van de mate van overslag over de dijk. Daarbij spelen, afhankelijk van de situatie, processen als diffractie, transmissie en lokale golfgroei een rol.

Voor eenvoudige dammen kan het effect op de golfbelasting verdisconteerd worden met de *dammodule* (als onderdeel van de 'DaF module') die in diverse rekenmodellen van het Basisinstrumentarium is opgenomen. Deze dammodule bevat sterke vereenvoudigingen: uitsluitend transmissie wordt beschouwd en er is sprake van een 1D-benadering. De module heeft alleen gevolgen voor de golfhoogte achter de dam. De golfperiode en -richting blijven ongewijzigd. De dammodule is dus bijvoorbeeld niet geschikt als er sprake is van een dam met variërende kenmerken langs de dijk of waarbij lokale golfgroei achter de dam significant is.

Voor deze complexere situaties, zoals havenbekkens, kan gebruik worden gemaakt van de tool '*HB Havens*', waarbinnen zowel een eenvoudige als een geavanceerde aanpak beschikbaar is. Vooral bij toepassing van de geavanceerde aanpak, wordt inzet van specialisten aanbevolen. Dit kan onderdeel zijn van de optie '*andere modellen en technieken*' zoals beschreven in paragraaf 5.2.3. Verdere achtergronden bij het omgaan met dammen, zijn beschreven in de technische leidraden.

Merk op dat (al bij minder extreme condities) een (haven)dam niet meer standzeker kan zijn. Hierdoor zal het positieve effect van deze dam afnemen en neemt de overstromingskans toe. Het is dus van belang om bij een beoordeling in te schatten wat het belang van de (haven)dam voor het veiligheidsbeeld is. Hiervoor zijn absolute en relatieve beslisregels en uitgebreidere modellen beschikbaar, zie hiervoor de technische leidraden. Is de kans op een niet-standzekere (haven)dam reëel en is deze van belang is voor de bepalende faalpaden, wordt aangeraden dit te behandelen als een indirect mechanisme en hier met scenario's rekening mee te houden, zie (RWS WVL, 2023a).

3 Bepalen relevantie met beslisregels

3.1 Beslisregels

Er zijn generieke beslisregels om vast te stellen of de faalmechanismen voor Dijkerosie buitentalud een verwaarloosbare bijdrage leveren aan de faalkans van de kering. Deze regels zijn afgeleid voor de initiële mechanismen:

- Stabiliteit steenzetting (ZST);
- Bezwijken asfaltbekleding door golfklappen (AGK);
- Bezwijken asfaltbekleding door ontstaan S-profiel door golfsterugtrekking (ASP);
- Bezwijken asfaltbekleding als gevolg van wateroverdrukken door snelle waterstandsval (AWO);
- Grasbekleding erosie buitentalud door golfklappen (GEBU-golfklap);
- Grasbekleding erosie buitentalud door golfploop (GEBU-oploop);
- Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU).

De beslisregels zijn vooral relevant voor het inschatten of een mechanisme niet van toepassing is óf een verwaarloosbare kans op optreden heeft. Een ontwerp kan op maat worden gemaakt zodat het mechanisme geen rol van betekenis meer speelt.

In sommige beslisregels is de uitkomst mede afhankelijk van de lokaal mogelijke belastingcondities, met name de waterstand en de significante golfhoogte. Er is echter geen harde, scherpe afbakening van 'de lokaal mogelijke belastingcondities'. Als indicatie van lokaal mogelijke zware belastingcondities kunnen de waterstand en de significante golfhoogte bij een door de gebruiker te kiezen kans worden bepaald, bijvoorbeeld de overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de signaleringsparameter. Deze indicatieve waarden kunnen worden vergeleken met de grenswaarden die genoemd worden in de hieronder beschreven beslisregels. Maar voor het trekken van een conclusie uit deze vergelijking is een eigen duiding nodig.

In paragraaf 3.1.1 zijn generieke beslisregels voor de relevantie van het bezwijken van de bekleding op het buitentalud beschreven, die onafhankelijk zijn van het bekledingstype.

In paragraaf 3.1.2 en 3.1.3 zijn generieke beslisregels voor de relevantie van het bezwijken van asfaltbekledingen en grasbekledingen opgenomen. Merk op dat bij deze analyses ervan wordt uitgegaan dat aanwezige teen- en/of overgangsconstructies te allen tijde stabiel zijn. De huidige generieke beslisregels beperken zich tot de verschillende toplagen, maar ook voor onderlagen zouden beslisregels toegepast kunnen worden.

Voor steenzettingen zijn alleen de algemene beslisregels (paragraaf 3.1.1) van toepassing. Er zijn geen generieke beslisregels beschikbaar voor dit specifieke bekledingstype.

Merk op dat diverse ondergenoemde beslisregels zijn gebaseerd op de regels die bij LBO-1 voor de eenvoudige toets werden gebruikt. In het BOI-programma hebben deze geen uitsluitend maar indicatief karakter. Het is aan de beheerder om de relevantie van een faalmechanisme te bepalen, waarbij de getalswaarden uit onderstaande beslisregels indicatief zijn.

3.1.1 Algemene beslisregels

Hieronder volgen generieke beslisregels voor het bepalen van de relevantie van het bezwijken van de bekleding op het buitentalud, die onafhankelijk zijn van het bekledingstype.

Een zelfstandig kerende constructie of kunstwerk in het dijklichaam maakt - mits stabiel - een overstroming als gevolg van dijkerosie van het buitentalud onmogelijk. Merk op dat de stabiliteit van zelfstandig kerende constructies en kunstwerken binnen een ander generiek faalpad valt.

Uit het verhaal van de kering kan ook volgen dat de kans op een overstroming als gevolg van dijkerosie na bezwijken van de dijkbekleding op het buitentalud verwaarloosbaar is als een voldoende hoog en breed achterland aanwezig is.

3.1.2 Beslisregels voor asfaltbekledingen

Onderstaande beslisregels hebben betrekking op de volgende typen asfaltbekledingen:

- waterbouwasfaltbeton (WAB)
- open steenasfalt (OSA)
- vol en zat gepenetreerde (V&ZG) breuksteen
- asfaltmastiek
- dicht steenasfalt
- geprefabriceerde open steenasfaltmatten (eventueel met wapening)
- zandasfalt
- patroongepenetreerde breuksteen

Bij de beslisregels kan onderscheid worden gemaakt tussen het bezwijken van de asfaltbekleding als gevolg van golfklappen en wateroverdrukken.

Golfklappen

Voor asfaltbekledingen die niet door golfklappen worden belast, is de kans op bezwijken verwaarloosbaar. Dit is het geval als de asfaltbekleding niet in de golfklapzone ligt. De golfklapzone voor asfaltbekledingen loopt tot aan een kwart van de significante golfhoogte boven de waterstand.

Voor asfaltbekledingen die wel in de golfklapzone liggen, is de kans op bezwijken van de toplaag verwaarloosbaar als de significante golfhoogte kleiner is dan 0,5 m.

Specifiek voor V&ZG breuksteen in de golfklapzone geldt dat de kans op bezwijken verwaarloosbaar is als:

- de toegepaste breuksteensortering 5-40 kg of 10-60 kg is
én
- de dikte van de laag breuksteen minimaal 1,5 maal de nominale steendiameter (D_{n50}) van de toegepaste breuksteensortering is
én
- de bovenste laag breuksteen ten minste voor 2/3 deel is ingebed met penetratiemortel (gietasfalt of asfaltmastiek);
én
- de significante golfhoogte kleiner is dan 3,0 m.

Wateroverdrukken

Voor asfaltbekledingen die direct liggen op een kleikern, boven de waterstand liggen of horizontaal gelegen zijn, is de kans op opdrukken van de asfaltbekleding verwaarloosbaar.

Als een asfaltbekleding direct op zand ligt, en de bekleding doorlatender is dan het zand, kunnen zich geen wateroverdrukken onder de bekleding ontwikkelen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij Open Steenasfalt. De kans op bezwijken door wateroverdruk is in dat geval verwaarloosbaar. Wel kan het wenselijk zijn dan te controleren dat er geen uitspoeling van het zand door de asfaltbekleding kan plaatsvinden.

3.1.3 Beslisregels voor grasbekledingen

Bij de beslisregels kan onderscheid worden gemaakt tussen het bezwijken van de grasbekleding door afschuiven en erosie door golfklap/-oploop.

Afschuiven

Voor een grasbekleding op een dijk met kleikern (kleidijk) is de kans op optreden van het afschuiven van de grasbekleding verwaarloosbaar.

Ligt de grasbekleding op een zanddijk met afdekkende (klei)laag, en niet op een zandscheg, dan is de kans op optreden van het afschuiven van de toplaag verwaarloosbaar als de dikte van deze kleilaag groter is dan de significante golfhoogte.

Erosie door golfklap/-oploop

Voor een grasbekleding op een dijk met kleikern (kleidijk), is de kans op bezwijken van de kering door erosie verwaarloosbaar als de significante golfhoogte kleiner is dan 0,6 m en er een kleikern aanwezig is tot 0,5 m boven de waterstand.

Bestaat de grasbekleding uit een gesloten en open zode op een zanddijk met afdekkende (klei)laag, dan is de kans van bezwijken van de toplaag door erosie verwaarloosbaar als de significante golfhoogte kleiner is dan 0,25 m.

4 Eerste inschatting overstromingskans

Uit het verhaal van de kering en de toepassing van beslisregels uit Hoofdstuk 3 blijkt voor welke delen van het dijktraject de bepaling van de overstromingskans voor het faalmechanisme Dijkerosie buitentalud relevant is. Daarbij is in feite al een eerste indeling in dijkvakken gemaakt en is het schematiseringsproces al begonnen. Voor ieder relevant dijkvak, kan dan een eerste analyse worden uitgevoerd. Dit betreft het bepalen van de kans van optreden van de verschillende initiële mechanismen, met behulp van beschikbaar gestelde rekenmodellen. Voor deze analyse kan aan de hand van kenmerken van de kering en belasting de indeling in dijkvakken verfijnd worden.

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de eerste analyse leidt tot een kans van optreden op doorsnedeniveau van de initiële mechanismen voor dijkbekledingen op het buitentalud van de types steenzetting, asfalt- en/of grasbekleding. Voor overige bekledingstypes zijn geen analyses opgenomen. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Voor de eerste analyse worden schematisaties en modellen gebruikt om de kans op deze initiële mechanismen te bepalen. In de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022) wordt uitgelegd hoe de kans op doorsnedeniveau kan worden opgeschaald naar een faalkans op dijktrajectniveau, rekening houdend met lengte-effecten. Ook wordt daar beschreven hoe deze kansbijdrage kan worden gecombineerd met andere faalmechanismen om te komen tot een overstromingskans van het dijktraject.

De beschikbare gegevens en de context van de kering bepalen het detailniveau van de schematisering en analyse. Bij een eerste analyse (zie hoofdstuk hieronder) kunnen generieke uitgangspunten worden gehanteerd. Indien nodig kunnen de uitgangspunten specifiekere worden afgeleid voor de lokale situatie met aanvullend onderzoek (zie ook hoofdstuk 5).

Bij de uitwerking moet rekening gehouden worden met de invloed van indirecte mechanismen. Hiervoor worden scenario's gedefinieerd, zie (RWS-WVL, 2023a).

4.1 Faalkansbepaling

Voor dijkbekledingen op het buitentalud zijn voor de meeste initiële mechanismen semi-probabilistische analysemethodes beschikbaar om de kans op bezwijken van de toplaag te bepalen. Voor enkele mechanismen wordt daarbij ook de sterkte van (een deel van) eventueel aanwezige onderlagen gedeeltelijk meegewogen.

Voor enkele mechanismen is geen semi-probabilistische rekenmethode beschikbaar. Dit betreft:

- Opdrukken asfaltbekleding door wateroverdrukken (AWO),
- Bezwijken asfaltbekleding door ontstaan S-profiel (ASP),
- Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU).

Voor deze mechanismen kan met 'expert judgement' of een niet- (semi-) probabilistische analyse bepaald worden of deze wel of niet dominant is. Wanneer het mechanisme niet dominant is, wordt geen faalkans bepaald. Als het mechanisme wel dominant is, moet met een nadere analyse een faalkans worden onderbouwd. Hiervoor is vaak specialistische kennis nodig. Bij de beoordeling kan een geschikte

methode hiervoor in het werkatelier worden bepaald. Zie ook hoofdstuk 7 van de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023).

De bezwijkkansen op doorsnedeniveau per type bekleding en per deelmechanisme worden met een assemblage verwerkt, zie Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023).

De faalkansbepaling op basis van de semi-probabilistische methode geeft ook ruimte om eventuele vervolprocessen mee te nemen. Handvatten hiervoor staan in paragraaf 5.2.2.

De rol van de hydraulische belastingen in de faalkansbepaling

De kans op een initieel mechanisme binnen het faalmechanisme Dijkerosie buitentalud wordt gedomineerd door de hydraulische belastingen. Daarom is in de semi-probabilistische analyse aangenomen dat de kans (op doorsnedeniveau) op een initieel mechanisme gelijk is aan de overschrijdingskans van de hydraulische belasting. Hierbij wordt de rekenwaarde van de sterkte *nét* overschreden wordt. Deze rekenwaarden van de sterkte zijn mechanisme-afhankelijk. Veiligheidsmarges die voortkomen uit onzekerheden, hebben effect op de gekozen waarde.

Door deze analyse uit te voeren voor verschillende terugkeertijden van de hydraulische belastingen, kan bekeken worden bij welke terugkeertijd de sterkte van de betreffende dijkbekleding net volstaat (en dus het initiële mechanisme *niet* optreedt). De beheerder bepaalt zelf met welke nauwkeurigheid (en welk interval) de hydraulische belastingen worden afgeleid. Hierin wordt een interval van ongeveer een factor 3 in overschrijdingskans van de hydraulische belastingen geadviseerd (dus bijvoorbeeld de belastingen met een overschrijdingskans van 1/100 – 1/300 – 1/1.000 – 1/3.000 per jaar).

Zoals in paragraaf 2.2.1 beschreven, is voor dijkerosie buitentalud het *tijdsverloop* (binnen elke belastinggebeurtenis) van de *combinatie van waterstand en golfcondities bij de dijkteen* van belang. De kennis en middelen om deze informatie nauwkeurig te bepalen zijn vooralsnog beperkt. Binnen de standaard beschikbare semi-probabilistische analyse worden vooralsnog sterk vereenvoudigende aannames gehanteerd:

- De aannames ten aanzien van het tijdsverloop van de combinatie van waterstand en golfcondities zijn verwerkt in een methodiek die wordt aangeduid als de 'Q-variant'. Het tekstkader verderop in deze paragraaf geeft aandachtspunten bij deze methodiek.
- Voor de bepaling van de (waterstand en) golfcondities bij de dijkteen is de *DaF-module* beschikbaar om rekening te houden met het effect van een voorland en/of een dam. Aandachtspunten bij dit model zijn beschreven in paragraaf 2.3.2.

Aandachtspunten bij toepassing van de Q-variant

De Q-variant bevat de volgende vereenvoudigingen:

- De rekenwaarden van de belastingparameters worden afgeleid bij de *illustratiepunten* voor een *vereenvoudigde Z-functie*. Een illustratiepunt geeft minder robuuste informatie dan een overschrijdingskans. De vereenvoudigde Z-functie bevat alleen de relatieve gevoeligheid van het bekledingstype voor respectievelijk de golfhoogte, golfperiode en golfrichting.
- Omdat binnen de data alleen informatie beschikbaar is over de topwaarde van de waterstand en golven per storm, wordt (met grove aannames) een schatting gemaakt van de golfcondities binnen elke storm op het moment dat de gezochte waterstand optreedt.
- De belastingduur voor de diverse faalmechanismen wordt afgeleid uit één 'representatief' waterstandsverloop, zonder rekening te houden met de mogelijke variatie in waterstandsverlopen in de praktijk.
- Na het berekenen van de golfcondities bij de verschillende waterstandsniveaus, wordt deze informatie gekoppeld aan het representatieve waterstandsverloop in de tijd om te komen tot het gecombineerde verloop van waterstand en golfcondities: het reken-event. De gehanteerde koppeling levert een synchroon verloop van waterstand en golfcondities, waardoor dit reken-event niet altijd representatief hoeft te zijn voor de praktijk. Bovendien kunnen de golfcondities op verschillende tijdstippen in dit reken-event afkomstig zijn uit totaal verschillende oorspronkelijke stormen.

Bij het bepalen van de rekenwaarden voor de golfcondities bij verschillende waterstandsniveaus, kan blijken dat de zwaarte van de golfcondities afneemt met toenemende waterstand met name voor de hoogste waterstanden. Hoewel dit vanuit de gehanteerde rekenmethode verklaarbaar is³, vraagt dit een eigen afweging van de toepasbaarheid van deze waarden voor het bepalen van de bijdrage van de faalkans van Dijkerosie buitentalud aan de overstromingskans.

En ander punt van aandacht is dat sommige mechanismemodellen zijn gekalibreerd op bepaalde waterstandsverlopen. Het is daarom niet zondermeer mogelijk om een eigen waterstandsverloop te kiezen en te hanteren in de mechanismemodellen: dan zou een herkalibratie nodig zijn.

Al deze vereenvoudigingen en aandachtspunten vragen een nadere duiding van de resultaten uit de analyses, voordat daaruit harde conclusies kunnen worden getrokken.

Bij twijfel of een nog onvoldoende bruikbaar rekenresultaat, wordt aanbevolen advies te [vragen via het Informatiepunt Leefomgeving](#). Op basis van verder advies kan eventueel besloten worden het werkatelier te benaderen. Op diverse onderdelen vindt kennisontwikkeling plaats en worden (vooralnog experimentele) tools ontwikkeld en toegepast voor specifieke situaties. Zie ook paragraaf 5.5 en 5.6. Hier kan mogelijk op worden aangesloten, al vraagt dit waarschijnlijk de inzet van specialisten. De releasekalender kan inzicht geven in de verwachte ontwikkelingen in kennis en tools voor eindgebruikers.

³ Bij bovenrivieren en soms ook de westzijde van grote meren geldt dat er geen eenduidig dalend of stijgend verband is tussen golfbelastingen en waterstand. Vaak nemen de golfbelastingen eerst enige tijd toe met de waterstand (naarmate de waterdiepte bij de dijkteen groter wordt) om voor nóg hogere waterstanden weer af te nemen omdat de extreem hoge waterstand dan te weinig kansruimte overlaat voor extreme wind.

4.2 Dijkvakindeling

Voor het uitvoeren van de eerste analyse van de verschillende initiële mechanismen wordt het dijktraject opgeknipt in dijkvakken. Binnen elk dijkvak is sprake van – bij benadering – uniforme kenmerken, zodat de geschematiseerde sterkte en belasting zo goed als constant is.

Aspecten die een rol spelen bij de keuze van vakgrenzen zijn bijvoorbeeld:

- Aansluitingen op andere typen waterkeringen (zoals kunstwerken of duinen);
- Veranderingen in geometrie van de dijk met duidelijke wijzigingen aan de buitenzijde van de dijk:
 - oriëntatie
 - taludhelling buitentalud
 - aanwezigheid en kenmerken (hoogte, breedte) berm in buitentalud
 - kruinhoogte
- Veranderingen in bekledingstype
- Veranderingen in kenmerken bekledingstype en/of onderlagen en/of dijkopbouw;
- Veranderingen in niveau overgang(en) bekledingssegment(en);
- Aan-/afwezigheid bijzondere constructies;
- Aan-/afwezigheid zandscheg;
- Veranderingen in hydraulische belastingen;
- Aan-/afwezigheid voorland en/of dam(men).

Op plaatsen waar een verandering in één of meer van deze aspecten langs de dijk optreedt, kan een vakgrens worden gedefinieerd. Voor elk van de vakken wordt vervolgens een profiel opgesteld. Er kan ook voor gekozen worden om een grof naar fijn aanpak te hanteren. Hierbij worden grotere vakken gekozen, waarbij het ongunstigste profiel maatgevend wordt voor het vak. Als de faalkansberekening daartoe aanleiding geeft, vanwege grote faalkansen bijvoorbeeld, kan de vakindeling verfijnd worden. Het is aan de beheerder om hier een keuze in te maken (bijvoorbeeld afhankelijk van het handelingsperspectief, het gewenste detailniveau en de benodigde inspanning).

De dijkvakindeling voor de overstromingskansanalyse moet afgestemd worden op het beschouwde initiële mechanisme voor Dijkerosie buitentalud. Elk initieel mechanisme kan een eigen dijkvakindeling vergen. Aandachtspunten hierbij zijn:

- Bezwijken van lager gelegen bekledingsegmenten kan invloed hebben op hoger gelegen bekledingsegmenten en vice versa.
- Dijkerosie kruin en binnentalud en dijkerosie buitentalud (met name bezwijken grasbekleding) kunnen in veel gevallen gezamenlijk worden beschouwd. In voorkomende gevallen is de dijkvakindeling voor de betreffende mechanismen gelijk aan elkaar.
- Het beschouwen van faalpaden kan invloed hebben op de keuze voor de dijkvakindeling. Hoe de vakindeling kan worden gekozen bij het beschouwen van faalpaden is geen onderdeel van dit hoofdstuk.

4.3 Lengte-effecten

Algemene overwegingen voor het meenemen van lengte-effecten staan in Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse. Voor het initiële mechanisme binnen dijkerosie kruin en binnentalud zijn hierbij een paar overwegingen:

- Schematiseren. Lengte-effecten en schematiseren zijn sterk aan elkaar verbonden. Voor dijkerosie kruin en binnentalud geldt dat de sterkte-

eigenschappen relatief homogeen zijn en doorgaans op basis een representatieve doorsnede geschematiseerd worden. De belangrijkste variatie zit in de golfcondities, waarbij het van belang is de verschillende oriëntaties goed te modelleren.

- Ontwerpen vs beoordelen. Bij ontwerpen is het gangbaar om op doorsnedekans te ontwerpen. Hierin wordt de traject-eis vertaald naar een doorsnede-eis op basis van lengte-effect en faalkansbegroting. Voor beoordelen wordt eerst de doorsnedekans geassembleerd naar een vakkans. Daarbij bestaan verschillende mogelijkheden om het lengte-effect mee te nemen. Voor het lengte-effect binnen het vak is optie 3 (doorsnedekans is gelijk aan vakkans) uit de handleiding de meest voor de hand liggende. Voor het assembleren van de vakken tot een trajectkans zijn er meer opties waartussen de gebruiker kan kiezen. De optie 2 (aannee afhankelijkheid tussen vakken) is voor dijkerosie kruin en binnentalud de meest voor de hand liggende keuze.

Voor *vervolgmechanismen* zijn nog geen lengte-effectfactoren bepaald.

Bepaling lengte-effecten voor dijkerosie buitentalud

De uitgangswaarde voor de lengte-effectfactor is per initieel mechanisme gegeven in *Riskeer*. Voor een grasbekleding is de uitgangswaarde voor de lengte-effectfactor per dijktraject bepaald en gegeven in de bijlage van de handleiding *Dijkerosie Kruin en Binnentalud*. Ook deze waarden zijn opgenomen in *Riskeer*. De uitgangswaarde voor de lengte-effectfactor kan projectspecifiek aangepast worden.

De uitgangswaarde voor de faalkansbegroting varieert tussen de verschillende bekledingstypes en profieldelen (zie handleiding *Ontwerpen op overstromingskans*) en kan projectspecifiek aangepast worden.

Voor het assembleren bij een beoordeling worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Lengte-effect binnen vak optie 3: vakkans is gelijk aan doorsnedekans
- Lengte-effect tussen vakken optie 2: beginnen met keuze volledige afhankelijkheid

Hierbij wordt opgemerkt dat de genoemde lengte-effectfactor voor de initiële mechanismen geldt. Als er met vervolprocessen wordt gerekend, is het nog niet duidelijk welke lengte-effecten hier voor gelden.

4.4 Steenzetting

Een steenzetting op het buitentalud kan op verschillende manieren bezwijken. Hiervoor zijn deelmechanismen gedefinieerd. Het bezwijken van de bekleding als gevolg van een van deze mechanismen hoeft niet altijd te leiden tot falen van de waterkering. Binnen de analyse wordt gekeken naar de combinatie van waterstand, waterstandsverloop en golfcondities die de maatgevende belastingcombinatie oplevert. Merk op dat de duur van belasting op de bekleding op een specifiek niveau langs het talud doorgaans korter is dan de stormduur: de waterstand verloopt immers tijdens een storm.

Voor een steenzetting op het buitentalud wordt één initieel mechanisme beschouwd: *Stabiliteit steenzetting (ZST)*. Dit mechanisme bestaat uit de volgende deelmechanismen:

- Toplaaginstabiliteit onder golfaanval (ZTG);
- Toplaaginstabiliteit onder langsstroming (ZTS);
- Afschuiving (ZAF);
- Materiaaltransport vanuit de granulaire laag (ZMG);
- Materiaaltransport vanuit de ondergrond (ZMO).

NB Bij de analyse van de deelmechanismen ZTG, ZMG en ZMO kan ook de erosie van de onderlagen (ZEO) worden meegenomen.

Merk op dat voor het bezwijken van de steenzetting wordt gekeken naar de combinatie van golfhoogtes en waterstanden die een maatgevende belastingsituatie oplevert. Deze situatie zou op een zeker moment tijdens de storm kunnen optreden. Indien de steenzetting niet stabiel is, en dus bezwijkt, is nog niet automatisch sprake van het falen van de dijk als geheel. Daarvoor moet tijdens de resterende duur van de storm ook nog een bres kunnen ontstaan.

Bij de analyse van de belasting en sterkte van het initiële mechanisme ZST wordt ervan uitgegaan dat er vooraf geen schadebeelden (bijvoorbeeld ontbreken van toplaagelementen, verzakkingen en uitspoelen inwasmateriaal, zie Technische leidraad artikel '*Schadebeelden steenzetting*') aanwezig zijn en dat de teenconstructie te allen tijde stabiel is. Binnen de zorgplicht dient er dan ook voor gezorgd te worden dat de schadebeelden geen invloed hebben op de overstromingskans. Is dit niet het geval, dan kan door middel van scenario's worden beschouwd wat de invloed hiervan is op de overstromingskans.

4.4.1 Hydraulische belastingen

In *Tabel 1* zijn de relevante hydraulische belastingparameters voor de analyse van het initiële mechanisme ZST weergegeven. Voor meer informatie over de betreffende parameters wordt verwezen naar de artikelen in de Technische leidraden.

Tabel 1 Relevante hydraulische parameters voor analyse initiële mechanismen steenzetting

Parameter	Technische leidraad artikel	Opmerking
Waterstand	[Waterstanden]	
Significante golfhoogte	[Golfhoogte]	
Golfperiode	[Golfperiode]	
Golfrichting	[Golfrichting]	
Golfcondities per waterstandsniveau	[Golfcondities per waterstandsniveau]	Bij de bepaling van de golfcondities kan, indien standzeker, ook de invloed van een voorland en/of dam(men) worden meegenomen. Zie [Geometrie dijk, voorland en dammen]
Waterstandsverloop	[Waterstandsverloop ZST]	

4.4.2 Schematisatie

Voor de analyse van de belasting en sterkte van de steenzetting, wordt de werkelijkheid benaderd met een schematisering. Dit is een technisch inhoudelijk onderbouwde vertaling van de verzamelde relevante informatie naar een invoer voor de analyse. In deze paragraaf worden aandachtspunten gegeven voor de schematisatie van het dijkprofiel en de voor de analyse te gebruiken sterkteparameters.

Dijkprofiel

Voor elk vak wordt een representatief dijkprofiel gekozen. Het te schematiseren profiel bestaat meestal uit meer segmenten. Binnen een segment zijn de helling en eigenschappen van de toplaag, granulaire laag/lagen en eventuele onderlaag, gelijk. Indien voor de analyse de software 'Steentoets' gebruikt wordt, moet het dijkprofiel geschematiseerd worden conform de regels in het Technische leidraad artikel 'Schematisatie dijkprofiel steenzetting'.

Sterkteparameters

Wanneer de software Steentoets gebruikt wordt om voor ZST een analyse van de belasting en sterkte uit te voeren, zijn verschillende sterkteparameters nodig. Deze parameters hebben betrekking op de toplaag, de granulaire laag/lagen en de eventueel aanwezige onderlaag. In het Katern *Dijkerosie* van de technische leidraden wordt in de volgende artikelen ingegaan op deze parameters:

- [Dikte toplaagelement steenzetting]
- [Dichtheid toplaagelement steenzetting]
- [Open oppervlak toplaagelementen steenzetting]
- [Eigenschappen granulaire laag]
- [Eigenschappen geokunststof]

4.4.3 Model en berekening

Steentoets geeft voor de meeste situaties en toplaagtypen⁴ een indicatie of de steenzetting bij een gegeven belasting al dan niet stabiel is (en het initiële mechanisme ZST al dan niet optreedt). De bepaling van de uiteindelijke kans op optreden van het mechanisme is beschreven in paragraaf 4.1.

Steentoets levert voor elk van de segmenten met een steenzetting zowel een score per deelmechanisme als een eindscore. Wanneer een dijkprofiel meer segmenten met een steenzetting bevat, is het resultaat voor dit profiel gelijk aan de slechtste score. Merk op dat bij het bepalen van de scores voor de afzonderlijke segmenten met een steenzetting geen rekening wordt gehouden met de andere segmenten. Het effect van een niet-stabiele steenzetting van een lager gelegen segment wordt dus niet meegenomen bij de analyse van een steenzetting op (een) hierboven gelegen segment(en). Ditzelfde geldt voor segmenten met een andere bekleding dan een steenzetting, of de teenconstructie (deze worden niet door Steentoets beschouwd).

Bij de analyse van de deelmechanismen ZTG, ZMG en ZMO met Steentoets wordt ook de erosie van de eventueel aanwezige granulaire la(a)g(en) en/of onderlaag meegenomen. Als de sterkte van deze laag/lagen (uitgedrukt in uren) groter is dan de belastingduur na bezwijken van de toplaag kan, wanneer voor de betreffende deel-mechanismen het segment niet stabiel is, het alsnog als stabiel worden beschouwd.

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor een segment niet meer stabiel is, kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme ZST op doorsnedeniveau. Merk op dat met het bezwijken van de steenzetting nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen.

⁴ In de documentatie bij de softwareapplicatie Steentoets is opgenomen voor welke situaties en/of toplaagtypen Steentoets niet gebruikt kan worden.

4.5 Asfaltbekleding

Bij de eerste analyse van de bijdrage aan de overstromingskans van het bezwijken van een asfaltbekleding op het buitentalud worden de volgende twee initiële mechanismen onderscheiden:

- Bezwijken asfaltbekleding door golfklappen (AGK);
- Bezwijken asfaltbekleding door wateroverdrukken;

Deze tweede is onder te verdelen in twee mechanismen:

- Bezwijken asfaltbekleding door ontstaan S-profiel (ASP);
- Opdrukken asfaltbekleding door wateroverdrukken (AWO).

Het al dan niet analyseren van een mechanisme is afhankelijk van het niveau van de asfaltbekleding ten opzichte van de golfklapzone en de ligging van de freatische lijn. Zowel de golfklapzone als de freatische lijn zijn afhankelijk van de voor de analyse beschouwde situatie. De mechanismen AGK en ASP gelden alleen voor asfaltbekledingen in de golfklapzone. ASP en AWO gelden alleen wanneer de freatische lijn onder extreme condities tot onder de asfaltbekleding reikt, loodrecht op het talud gezien.

Merk op dat voor het bezwijken van de asfaltbekleding door golfklappen wordt nagegaan of een herhaaldelijke golfbelasting kan leiden tot scheurvorming. Voor ASP wordt geen 'vermoeiingsberekening' uitgevoerd, maar wordt nagegaan of bij de maatgevende belastingsituatie een S-profiel kan ontstaan (en de asfaltbekleding bezwijkt). Deze situatie zal op een zeker moment tijdens de storm optreden. Als de asfaltbekleding bezwijkt, is niet automatisch sprake van dijkfalen. Daarvoor moet tijdens de resterende duur van de storm ook nog een bres kunnen ontstaan. Bij AWO wordt nagegaan of de asfaltbekleding voldoende dik is om weerstand te bieden tegen de bij een snelle val van de buitenwaterstand ontstane wateroverdrukken. Dit is meestal het geval aan het einde van de storm.

Bij de analyse van de belasting en sterkte van deze initiële mechanismen wordt ervan uitgegaan dat er vooraf geen schadebeelden (zoals bijvoorbeeld scheuren, opbollingen en aangetast oppervlak, zie het technische leidraden artikel '*Schadebeelden asfaltbekleding*') aanwezig zijn. Binnen de Zorgplicht dient er dan ook voor gezorgd te worden dat de schadebeelden geen invloed hebben op de overstromingskans. Als dit niet het geval is, kan door middel van scenario's worden beschouwd wat de invloed hiervan is op de overstromingskans (zie hoofdstuk 2). Merk op dat de sterkte van asfalt zal afnemen in de tijd. Deze sterkteafname heeft invloed op de scheurvorming door golfklappen en wordt meegenomen bij de analyse van het mechanisme AGK.

4.5.1 Hydraulische belastingen

In *Tabel 2* zijn de relevante hydraulische belastingparameters voor de analyse van de initiële mechanismen weergegeven. Voor meer informatie over de betreffende parameter wordt verwezen naar de artikelen in *Katern Dijkerosie van de technische leidraden*.

Tabel 2 Relevante hydraulische parameters voor analyse initiële mechanismen asfaltbekleding

Parameter	Technische leidraad artikel	Opmerking
Waterstand	[Waterstanden]	
Significante golfhoogte	[Golfhoogte]	
Golfperiode	[Golfperiode]	
Golfcondities per waterstandsniveau	[Golfcondities per waterstandsniveau]	Bij de bepaling van de golfcondities kan, indien standzeker, ook de invloed van een voorland en/of dam(men) worden meegenomen. Zie technische leidraad artikel - <i>Geometrie dijk, voorland en dammen</i>
Waterstandsverloop	[Waterstandsverloop AGK]	

4.5.2 Schematisatie

Voor de analyse van de belasting en sterkte van de asfaltbekleding, wordt de werkelijkheid benaderd met een schematisering. Dit is een technisch inhoudelijke onderbouwde vertaling van de verzamelde relevante informatie naar een invoer voor de analyse. In deze paragraaf worden aandachtspunten gegeven voor de schematisatie van het dijkprofiel en de voor de analyse te gebruiken sterkteparameters.

Dijkprofiel

Voor elk vak wordt een representatief dijkprofiel gekozen. Indien voor de analyse de software 'BM – Asphalt Golfklap' gebruikt wordt, moet het dijkprofiel geschematiseerd worden conform de regels in het technisch leidraad artikel 'Schematisatie dijkprofiel asfaltbekleding'.

Merk op dat bij de analyse van ASP en AWO alleen gebruik wordt gemaakt van de helling van het taluddeel met een asfaltbekleding. Deze taludhelling volgt uit het geschematiseerde profiel.

Sterkteparameters

Om voor de verschillende initiële mechanismen een analyse van de belasting en sterkte uit te voeren, zijn verschillende sterkteparameters benodigd. De belangrijkste parameters zijn in *Tabel 3* weergegeven. Voor meer informatie over de betreffende parameter wordt verwezen naar de artikelen in *Katern Dijkerosie* van de technische leidraden.

Tabel 3 Overzicht belangrijkste parameters voor analyse initiële mechanismen asfaltbekleding.

Parameter	Technische leidraad artikel	Opmerking
Dikte asfaltbekleding	[Dikte asfaltbekleding]	
Buigtreksterkte asfaltbekleding	[Sterkte asfaltbekleding]	Wordt alleen gebruikt voor AGK
Vermoeiingsparameters asfaltbekleding		
Stijfheid asfaltbekleding	[Stijfheid asfaltbekleding]	Wordt alleen gebruikt voor AGK
Beddingsconstante van de ondergrond	[Beddingsconstante ondergrond]	Wordt alleen gebruikt voor AGK
Dichtheid asfaltbekleding	[Dichtheid asfaltbekleding]	Wordt alleen gebruikt voor ASP en AWO

Voor asfaltbekleding op een fundering kunnen de eigenschappen ook worden meegenomen bij de analyse.

4.5.3 Model en berekening

Met de voor AGK, ASP en AWO beschikbare modellen is het mogelijk om, gegeven hydraulische condities, te bepalen of het initiële mechanisme al dan niet optreedt. Dit wordt hieronder nader uitgewerkt. De bepaling van de uiteindelijke kans op optreden van de mechanismen is beschreven in paragraaf 4.1.

Bezwijken asfaltbekleding als gevolg van golfklappen (AGK)

Het initiële mechanisme AGK is alleen van toepassing voor asfaltbekledingen in de golfklapzone. Voor de analyse van de belasting en sterkte van dit mechanisme kan de software BM – Asphalt Golfklap gebruikt worden. Hierin is het model GOLFKLAP (zie technische leidraden) opgenomen. Merk op dat dit model alleen toepasbaar is voor een asfaltbekleding waarvoor, gegeven de voor de analyse gebruikte overschrijdingskans, de freatische lijn niet tot onder de asfaltbekleding reikt en de significante golfhoogte kleiner is dan 3,0 m (Zie technische leidraden).

Merk op dat het model is ontwikkeld voor het bepalen van de vermoeiingschade voor een asfaltbekleding van waterbouw-asfaltbeton (WAB). Het model kan echter ook toegepast worden voor andere asfaltmengsels (zie ook Hoofdstuk 5.2.3).

De software BM – Asphalt Golfklap geeft de Minersom (maximale vermoeiingschade) als resultaat. Zonder veiligheidsfactoren zou de maximaal toelaatbare Minersom gelijk aan 1 zijn, in de praktijk is de maximaal toelaatbare Minersom een functie van de veiligheidsfactoren (de vaste modelfactor en de variabele schadefactor).

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor de Minersom klein genoeg is, kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme AGK op doorsnedeniveau. Merk op dat met het bezwijken van de asfaltbekleding als gevolg van golfklappen nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen.

Bezwijken asfaltbekleding door ontstaan S-profiel (ASP)

Het initiële mechanisme ASP is alleen van toepassing voor asfaltbekledingen in de golfklapzone én waarvoor de freatische lijn tot onder de asfaltbekleding reikt.

Voor de analyse van de belasting en sterkte is een evenwichtsmodel beschikbaar waarmee kan worden nagegaan of de asfaltbekleding (op een fundering) voldoende weerstand kan bieden tegen de opwaartse druk die ontstaat als gevolg van golfterugtrekking. Het model is beschreven in de technische leidraden.

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor niet meer wordt voldaan aan de evenwichtsbeschouwing kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme ASP op doorsnedeniveau. Merk op dat met het bezwijken van de asfaltbekleding door het ontstaan van een S-profiel, nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen.

Bezwijken asfaltbekleding als gevolg van wateroverdrukken (AWO)

Voor asfaltbekledingen waarvoor de freatische lijn tot onder de asfaltbekleding reikt, moet ook het initiële mechanisme AWO beschouwd worden.

Voor de analyse van de belasting en sterkte is een evenwichtsmodel beschikbaar. Hiermee kan worden nagegaan of de asfaltbekleding (op een fundering) inclusief eventueel aanwezige onderlaag, voldoende weerstand kan bieden tegen de wateroverdruk die ontstaat door een snelle val van de buitenwaterstand. Het model is beschreven in de technische leidraden.

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor niet meer wordt voldaan aan de evenwichtsbeschouwing, kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme AWO op doorsnedeniveau. Merk op dat met het bezwijken van de asfaltbekleding door wateroverdrukken er nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen.

4.6 Grasbekleding

Een grasbekleding op het buitentalud van een dijk kan als erosiebestendig worden beschouwd, als uit de analyse van de belasting en sterkte blijkt dat de kracht van de grasbekleding afdoende is. Voor een grasbekleding op het buitentalud worden de volgende twee mogelijke initiële mechanismen onderscheiden:

- Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU);
 - door golfklap (GEBU-golfklap);
 - door golfoploop (GEBU-golfoploop);
- Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU).

Bij erosie van de grasbekleding is het bezwijkproces een accumulatie van schade als gevolg van golfoploop of golfklap. Hierdoor kent het mechanisme een duidelijk verloop van schade over tijd. Het afschuiven van een grasbekleding heeft een meer instantaan gedrag. Ook in dit geval kan de weerstand tegen afschuiven (sterkte) over tijd afnemen, al is hiervoor nog geen duidelijke beschrijving. De huidige analyse betreft dan ook een evenwichtsvergelijking, waarbij een overschrijding van een golfhoogte tot bezwijken leidt.

Bij de analyse van de belasting en sterkte van deze initiële mechanismen wordt ervan uitgegaan dat er vooraf geen schadebeelden (bijvoorbeeld graverij) aanwezig zijn (zie het artikel in de technische leidraden 'Schadebeelden grasbekleding'). De invloed van eventuele schades kan door middel van scenario's worden beschouwd (zie hoofdstuk 2). De analyses voor GEBU-golfklap en GEBU-golfoploop zijn in de

basis alleen toepasbaar als de graskwaliteit geïnclassificeerd is als 'open zode' of 'gesloten zode' (zie het artikel in de technische leidraden 'Graskwaliteit').

4.6.1 Hydraulische belastingen

In *Tabel 4* zijn de relevante hydraulische belastingparameters voor de analyse van de initiële mechanismen GEBU en GABU weergegeven. Voor meer informatie over de betreffende parameter wordt verwezen naar de artikelen in het *Katern Dijkerosie van de technische leidraden*. Indien er specifieke afwegingen zijn voor een mechanisme is dit toegelicht.

Tabel 4 Relevante hydraulische parameters voor analyse initiële mechanismen grasbekleding

Parameter	Technische leidraad artikel	Opmerking
Waterstanden	[Waterstanden]	
Significante golfhoogte	[Golfhoogte]	Voor de generieke analyse van GABU kan de golfhoogte worden gebruikt. Echter, het meenemen van de dijkoriëntatie en eventuele golfreducerende werking van een voorland en/of dam resulteert veelal in een lagere belasting .
Golfperiode	[Golfperiode]	
Golfrichting	[Golfrichting]	
Golfcondities per waterstandsniveau	[Golfcondities per waterstandsniveau]	Bij de bepaling van de golfcondities kan, indien standzeker, ook de invloed van een voorland en/of dam(men) worden meegenomen. Zie (Zie technische leidraden 'Geometrie dijk, voorland en dammen')
Waterstandsverloop	[Waterstandsverloop GEBU]	Voor de eerste analyse van GABU is geen waterstandsverloop benodigd.

4.6.2 Schematisatie

Voor de analyse van de belasting en sterkte van de grasbekleding wordt de werkelijkheid benaderd met een schematisering. Dit is een technisch inhoudelijke onderbouwde vertaling van de verzamelde relevante informatie naar een invoer voor de analyse. In deze paragraaf worden aandachtspunten gegeven voor de schematisatie van het dijkprofiel en te gebruiken sterkteparameters.

Dijkprofiel

Voor elk vak wordt een representatief dijkprofiel gekozen. Wordt voor de analyse van GEBU-golfoploop de software 'BM – Gras Buitentalud' gebruikt, moet het dijkprofiel geschematiseerd worden volgens de regels in het leidraad artikel 'Schematisatie dijkprofiel grasbekleding'. Bij de analyse voor zowel GEBU-golfklap als GABU moet voor dit profiel de helling van het taluddeel met een grasbekleding in de golfklapzone bepaald te worden.

Sterkteparameters

Om voor de verschillende initiële mechanismen een analyse van de belasting en sterkte uit te voeren zijn verschillende sterkteparameters nodig. De belangrijkste

parameters staan in *Tabel 5*. Voor meer informatie over deze parameter wordt verwezen naar de artikelen in de Katern Dijkerosie van de technische leidraden.

Tabel 5 Overzicht belangrijkste parameters voor analyse initiële mechanismen grasbekleding

Parameter	Technische leidraad artikel	Opmerking
Graskwaliteit	[Graskwaliteit]	Alleen relevant voor GEBU.
Gras parameters buitentalud	[Gras parameters buitentalud]	Alleen relevant voor GEBU en afhankelijk van de graskwaliteit.
Parameters kleilaag	[Kleilaag]	Zowel voor GABU als GEBU de relevante parameters.
Zandscheg	-	Toepassingsvoorwaarde voor rekenmodel.

4.6.3 Model en berekening

Met de voor GEBU en GABU beschikbare modellen is het mogelijk om, gegeven hydraulische condities, te bepalen of het initiële mechanisme al dan niet optreedt. De bepaling van de uiteindelijke kans op bezwijken van de mechanismen is beschreven in paragraaf 4.1.

Merk op dat de te analyseren mechanismen (GEBU-oploop, GEBU-golfklap en/of GABU) afhankelijk zijn van de waterstand en de hoogteligging van de grasbekleding. Ligt de grasbekleding op het talud hoger dan de waterstand gegeven de overschrijdingsfrequentie, dan kunnen de mechanismen GEBU-golfklap en GABU niet optreden. Er is dan immers geen moment in het waterstandsverloop dat de grasbekleding op deze mechanismen belast wordt. GEBU-golfoploop kan dan nog wel optreden. Een zwak punt in de grasbekleding is de overgang van de harde bekleding naar de grasbekleding.

Ligt de maximale waterstand ter hoogte van de grasbekleding dan kan deze bezwijken als gevolg van GABU en GEBU-golfklap. Als gevolg van het gebruikte waterstandsverloop kan het zijn dat de grasbekleding slechts een beperkt deel van de storm belast wordt door golfklap. In deze gevallen is het zinvol om zowel GEBU-golfoploop, als GEBU-golfklap te beschouwen. Het mechanisme met het slechtste resultaat is dan maatgevend voor GEBU.

Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)

Voor de analyse van de belasting en sterkte grasbekledingen in de golfklap-/golfoploopzone kan de software 'BM – Gras Buitentalud' gebruikt worden. Het model is ook in staat de erosieweerstand van een kleilaag tegen golfklap tot 0,5 meter diepte mee te nemen waarvan de bovenste 0,2 meter bestaat uit de graszode. Voor golfoploop is enkel de erosieweerstand van de grasmat meegenomen. Hierin is voor GEBU-golfklap en GEBU-golfoploop respectievelijk het standtijdmodel (zie het artikel in de technische leidraden 'Model GEBU-golfklap') en de cumulatieve overbelastingsmethode (zie het artikel in de technische leidraden 'Model GEBU-golfoploop') opgenomen.

Het rekenmodel voor zowel GEBU-golfklap als GEBU-golfoploop, is op dit moment alleen toepasbaar voor een grasbekleding op een substraat van klei. Daarnaast is het rekenmodel voor GEBU-golfklap niet toepasbaar voor taluds met een helling steiler dan 1V:2,5H of in situaties waar een zandscheg aanwezig is. Hoofdstuk 5 geeft handvatten voor situaties waarin de rekenmodellen niet toepasbaar zijn.

Merk op dat op dit moment alleen rekenwaarden voor grasbekledingen met een 'gesloten' en 'open' zode beschikbaar zijn. Ook zijn geen waarden beschikbaar voor het in rekening brengen van de invloed van overgangen en/of objecten op zowel de belasting als sterkte van de grasbekledingen in de golfploopzone.

De software BM – Gras Buitentalud geeft voor zowel een golfklap- als golfploopberekening een stabiliteitsfactor⁵ als resultaat. Wanneer deze groter is dan of gelijk aan 1,0 is de sterkte van de grasbekleding gegeven de belasting voldoende.

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor de stabiliteitsfactor kleiner is dan 1,0, kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme GEBU op doorsnedeniveau. Merk op dat met het bezwijken van de grasbekleding als gevolg van golfklappen/golfploop nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen.

Aanbevolen wordt om bij de analyse zowel GEBU-golfklap als GEBU-golfploop te beschouwen. In sommige situaties is het echter mogelijk om voor GEBU enkel een golfklap- óf golfploopberekening te maken. De volgende situaties worden hiervoor onderscheiden:

- Wanneer het volledige buitentalud is bekleed met een grasbekleding hoeft erosie door golfploop niet beschouwd te worden. De kans op bezwijken voor GEBU-golfploop zal voor deze situatie altijd kleiner zijn dan GEBU-golfklap; óf
- In het geval er sprake is van een horizontale overgang van een harde bekleding naar een grasbekleding met waterveiligheidsfunctie is het mogelijk om in sommige gevallen alleen GEBU-golfploop te beschouwen en geen GEBU-golfklap. Hiervoor geldt de volgende voorwaarde: de bezwijkkans voor GEBU-golfploop dient groter te zijn dan de kans dat de waterstand het niveau van de horizontale overgang overschrijdt.

Grasbekleding afschuiven Buitentalud (GABU):

Voor het initiële mechanisme GABU is een evenwichtsmodel beschikbaar waarin de kleilaag, de significante golfhoogte en de taludhelling gewogen worden om te bepalen of, gegeven de terugkeertijd van golfbelastingen, de grasbekleding afschuift. Het model is beschreven in (zie het artikel in de technische leidraden 'Model GABU'). Wanneer het resultaat van de weging kleiner is dan 3, schuift de grasbekleding niet af.

De grootste overschrijdingsfrequentie van de belasting waarvoor niet meer wordt voldaan aan de evenwichtsbeschouwing kan worden beschouwd als de kans op optreden van het mechanisme GABU op doorsnedeniveau.

Merk op dat met het afschuiven van de grasbekleding er nog geen sprake hoeft te zijn van dijkfalen. GABU zal zeer waarschijnlijk plaatsvinden bij grote golfhoogtes. Dit zal over het algemeen tijdens de piek van de storm zijn. Het rekenen met de vervolgmecanismen stelt hierdoor hogere eisen aan de sterkte (ten aanzien van de vervolgmecanismen) dan bij GEBU omdat er naar verwachting meer tijd beschikbaar is voor het optreden van de vervolgmecanismen.

⁵ Let op: In BM – Gras Buitentalud wordt de stabiliteitsfactor omschreven als 'veiligheidsfactor.'

5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

5.1 Inleiding

De eerste analyse van de overstromingskans uit hoofdstuk 4 biedt handvatten voor een onderbouwing van het handelingsperspectief. Als dit nog niet heeft geleid tot een voldoende resultaat dan is een nadere analyse nodig. Dit hoofdstuk geeft handvatten voor de nadere analyse van de overstromingskans.

Hiervoor zijn veel mogelijkheden die in meer of mindere mate effectief kunnen zijn om het doel te bereiken. Iedere analyse vraagt een investering en heeft een effect. Daarom moet in de praktijk worden afgewogen welke nadere analyses het meest effectief zijn tegen acceptabele kosten.

Deze afweging is lastig generiek te maken, maar het meest effectief zijn vaak analyses gericht op het beperken (of wegnemen) van de dominante onzekerheden. Dit is afhankelijk van de karakteristieken van het gebied en de waterkering, de beschikbare gegevens en de bandbreedtes voor het handelingsperspectief. Om een goede afweging te kunnen maken is dan ook gebiedskennis, kennis van de uitgevoerde analyses en onzekerheden, expertkennis en ervaring nodig. Het werkatelier vervult hierin een belangrijke rol om dit bijeen te brengen en een goede afweging te maken.

In de praktijk zullen meer iteratieslagen nodig zijn om een stabiel (continu) inzicht te verkrijgen. Aangeraden wordt hier in de programmering en planning rekening mee te houden.

5.2 Mogelijkheden

De volgende opties zijn mogelijk om een nadere analyse uit te voeren (zie ook Rijkswaterstaat, 2022):

1. Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie
2. Uitwerken vervolgmecanismen
3. Toepassen andere modellen en technieken
4. Benutten kennisontwikkeling

In de praktijk zal vaak een combinatie van één of meerdere opties worden gekozen.

5.2.1 Optie 1 Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie

Op basis van een eerdere analyse kan duidelijk zijn geworden dat het verzamelen van meer informatie bijdraagt aan het verkleinen (of wegnemen) van de dominante onzekerheden. Met deze informatie kunnen alle voorgaande keuzes worden geëvalueerd en (eventueel) aangepast. Bijvoorbeeld, keuzes ten aanzien van: vakgroottes, relevante mechanismen en de schematisering.

Voorbeelden van onzekerheden en mogelijke informatiebronnen om deze te verkleinen voor de mechanismen gerelateerd aan dijkerosie buitentalud zijn:

- *Gebruik standaardwaarden voor sterkteparameters*

Wordt voor sterkteparameters gebruik gemaakt van standaardwaarden (bijvoorbeeld in Steentoets), dan kan het zinvol zijn om de waarde van de betreffende parameter aan te scherpen als blijkt dat met de standaardwaarden geen uitlegbare en stabiele faalkans wordt verkregen. Inwinning van extra informatie door het uitvoeren van veld- en/of laboratoriumonderzoek kan hierbij helpen. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse zinvol om in te schatten of aanscherping van parameters kan leiden tot een significant andere faalkans. Indien dit het geval is, wordt aangeraden om de onzekerheid rond die parameters te verkleinen door bijvoorbeeld veldonderzoek uit te voeren.

- *Schematisatie met golfreducerende werking van voorland en/of dam(men)*

Het beleidsmatige uitgangspunt is dat de (doorgaans⁶) golfreducerende werking van voorlanden en dammen waar mogelijk en zinvol in rekening wordt gebracht. In sommige gevallen wordt er vanwege een gebrek aan informatie, onzekerheid over standzekerheid⁷ of vanwege reductie van rekentijd voor gekozen om de golfreducerende werking van een voorland en/of dam(men) niet bij voorbaat in rekening te brengen bij het bepalen van de hydraulische belasting. Het heeft uiteindelijk wel de grote voorkeur deze golfreducerende werking in rekening te brengen. Zeker als dit invloed heeft op de uiteindelijke faalkans van het dijktraject. Door informatie-inwinning van bijvoorbeeld historische lodingen/peilingen of door nieuwe lodingen uit te vragen kan dit resulteren in een aanscherping van het oordeel. Vooraf is het zinvol om op basis van expert opinion in te schatten of golfreductie ook daadwerkelijk optreedt in de meest waarschijnlijke belastingcombinaties.

- *Betrouwbaarheid van besteks- en ontwerpgegevens*

Het is belangrijk om sterkteparameters te valideren zodra deze afgeleid zijn op basis van besteks-, revisie-aanleg- en/of ontwerpgegevens. Het is mogelijk dat door veroudering, inaccurate data of simpelweg onjuistheid, te veel waarde aan de gegevens gehecht wordt. Daarnaast is het mogelijk dat de aanlegkwaliteit invloed heeft op de faalkans. Denk hierbij aan behaalde inklemming van zetsteen of vochtgehaltes/verdichting in de kleilaag bij aanleg. In deze gevallen kan het zinvol zijn om de gegevens te valideren of aan te scherpen met nieuw onderzoek.

- *Verouderingsprocessen na laatste meting/onderzoek*

Materialen toegepast als dijkbekleding kunnen als gevolg van veroudering sterkte verliezen. Zo kunnen Uv-straling, belastingen, vries-dooi-cycli of droogte leiden tot scheuren, verharderen of andere schades die tot een toename leiden van de faalkans. Ook processen als zetting, aanpassingen/veranderingen van het voorland, maar ook verandering van de graskwaliteit en verwachte schadebeelden (bijvoorbeeld graverij) kunnen invloed hebben. Monitoring en aanvullend sterkteonderzoek kunnen hierin helpen. Sommige processen zijn geen onderdeel van de in hoofdstuk 4 genoemde eerste analyse en zullen in een nadere analyse beschouwd moeten worden.

- *Spreiding in grond- of veldonderzoeken*

Wanneer beschikbaar veld- of grondonderzoek met relatief grote tussenafstanden of op gunstige of juist ongunstige locaties is opgenomen, kan dit invloed hebben op

⁶ In relatief zeldzame gevallen kan een voorland leiden tot een lichte verhoging van de golfbelasting, zie ook hoofdstuk 2.

⁷ Hierbij is van belang of de keringbeheerder voldoende zeggenschap en invloed heeft over de staat en het beheer het voorland of de dam om de integriteit daarvan in voldoende mate te kunnen garanderen.

representatieve sterkteparameters en daarmee op de faalkans. Het verfijnen van het onderzoek kan resulteren in een reductie van de onzekerheid in de parameterset en daarmee tot aanscherping van de faalkans.

5.2.2 *Optie 2 Uitwerken vervolgmecanismen*

Op basis van het verhaal van de kering en de eerdere analyse kan worden geconcludeerd dat het uitwerken van vervolgmecanismen leidt tot een betere inschatting van de overstromingskans. Een belangrijk onderdeel van deze analyse is het kwantificeren van de (voorwaardelijke) kansen op vervolgebeurtenissen. De werkwijze is beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a).

Bij de uitwerking van faalpaden moet rekening gehouden worden met mogelijke scenario's en afhankelijkheden (ruimte en tijd) tussen gebeurtenissen. Hiervoor wordt verwezen naar de handleiding Indirecte mechanismen (RWS-WVL, 2023a), de bijlage scenario's (RWS-WVL, 2023b) en het raamwerk dat binnen kennis voor keringen wordt ontwikkeld (RWS-WVL, 2023c).

Om de gebeurtenissen uit te werken, kan nadere informatie nodig zijn. Naast informatie over de dijk, kan dit ook informatie zijn over vervolgebeurtenissen. Hierbij zal het gaan om een (conditioneel) belastingdeel en (conditioneel) sterktedeel.

Volleggebeurtenissen kunnen zowel met probabilistische als semi-probabilistische analyses beschouwd worden. Er zijn verschillende ontwikkelingen gaande met betrekking tot probabilistische tooling voor een faalpadanalyse voor erosie van een grasbekleding op het buitentalud. Deze tooling is nog in prototype stadium beschikbaar voor golfoploop (Waddenzee) en golfklap (in het bovenriviereengebied). Houd de releasekalender in de gaten om op de hoogte te blijven van de meest recente ontwikkelingen.

In semi-probabilistische context is het mogelijk om met conditionele kansen te werken voor vervolgebeurtenissen. In hoofdlijnen werkt dit als volgt: gegeven een terugkeertijd kan bepaald worden of de grasbekleding bezwijkt volgens de beschikbare analyse (zie bijvoorbeeld de analyses in hoofdstuk 4). Wanneer bezwijken bij een gegeven terugkeertijd optreedt kan het moment van bezwijken herleid worden middels de software. Met de conditionele⁸ kansen van vollegprocessen die resulteren in falen van de waterkering, kan vervolgens een algehele conditionele kans van falen gegeven de terugkeertijd bepaald worden. Door vervolgens deze kansen te integreren in de verschillende terugkeertijden, kan een faalkans met vollegprocessen bepaald worden. Dit vraagt significante kennis over het faalproces, bepaling van conditionele kansen en de manier waarop de kansen gecombineerd worden.

Voor een beeld van de vervolgebeurtenissen wordt verwezen naar de voorbeelden in paragraaf 5.5 en de andere handleidingen die hier meer informatie over geven.

5.2.3 *Optie 3 Toepassen andere modellen en technieken*

⁸ De kans van optreden gegeven het optreden van voorgaande gebeurtenis(sen).

De derde optie is de toepassing van andere modellen en technieken bij het schatten van de (voorwaardelijke) kansen. Hiervoor zijn de volgende mogelijkheden (in willekeurige volgorde):

1. Kansen schatten op basis van expert judgement
2. Nieuwe kennis en rekentechnieken

Kansen schatten expert judgement

In Nederland worden (overstromings-)kansen vaak aan de hand van schematisaties en rekenmodellen bepaald. Om deze modellen te kunnen toepassen, zijn schematisaties van het gebied nodig, die door experts worden gemaakt op basis van de aanwezige gegevens. Naast deze expert kennis wordt in de literatuur van de risicoanalyse steeds meer onderkend dat ook experts individueel maar vooral ook gezamenlijk tot een kansschatting kunnen komen. Een methode die hierbij gebruikt kan worden is structured expert judgement (SEJ). Bij SEJ wordt de inschatting van experts op gestructureerde wijze gekalibreerd, gewogen en omgezet tot een kans op een vooral gedefinieerde gebeurtenis [Cooke, 1991]. Deze expertmeningen kunnen met andere beschikbare gegevens worden gecombineerd. Dit veld is in Nederland op het gebied van waterveiligheid nog in ontwikkeling maar heeft bijvoorbeeld potentie voor het reduceren van onzekerheden bij extrapolatie naar extreme situaties of het schatten van kansen van deelprocessen (vervolggebeurtenissen). Dit hoeven niet altijd kleine kansen te zijn. Voor een voorbeeld van hydrologie wordt verwezen naar [Meuse, nog te verschijnen]. Bij het gebruik van expert judgement is het belangrijk om bias en doelredeneringen te vermijden (zie par. 7.1 van de handleiding Overstromingskansanalyse; Rijkswaterstaat, 2023a).

Nieuwe kennis en rekentechnieken

Hieronder staat een overzicht van recent toegepaste nieuwe of afwijkende rekentechnieken die *niet* beschreven zijn als onderdeel van de eerste analyse. Dit overzicht is zeker niet compleet, maar geeft een indruk van de mogelijkheden om nieuwe kennis toe te passen.

- *Probabilistische berekeningsmethode bekledingen*

De eerste analyse van de initiële mechanismen is semi-probabilistisch of soms ook deterministisch. De voor de verschillende initiële mechanismen toegepaste mechanismedescripties (en rekenmodellen) lenen zich inmiddels ook voor toepassing in een volledig probabilistische context. Hierdoor vervalt de tussenstap waarbij eerst rekenwaarden van hydraulische belastingen afgeleid moeten worden, en kan zonder iteratie een faalkans bepaald worden. Er zijn verschillende projecten uitgevoerd met deze nieuwe (vooralnog experimentele) rekentechniek.

- *Combineren van initiële mechanismen*

Met het combineren van initiële mechanismen kan op correcte wijze de correlatie beschreven worden. Hierdoor wordt een deel van de assemblage van doorsnede faalkansen al in het rekenmodel opgenomen. Een toegepast voorbeeld is de combinatie van GEBU en GEKB. Deze techniek is vooral interessant langs trajecten waar sprake is van een grote correlatie tussen het faalmoment van GEBU en GEKB. Dit is meestal het geval bij de meren en langs de kust. Inmiddels is er software ontwikkeld waarmee voor GEBU en GEKB de gecombineerde kans op doorsnedeniveau bepaald kan worden. Met deze software is het ook mogelijk om voor GEBU de kans op doorsnedeniveau te bepalen.

- *Vervolgmechanismen*

Na het optreden van het initiële mechanisme, is voor dijkerosie buitentalud nog geen sprake van falen van de waterkering. In deze situaties zullen in veel gevallen eerst onderlagen en/of de dijk kern eroderen voordat falen optreedt. Het kan echter ook zo zijn dat uit de faalpadanalyse blijkt dat andere vervolgmechanismen optreden. Voor het vervolgmechanisme 'erosie onderlagen' kan gebruik worden gemaakt van onderzoek door van Mourik (2015). Hierin is de erosie van onderlagen over de tijd beschreven. De resultaten hiervan zijn inmiddels ook in een probabilistisch model opgenomen wat toepasbaar is in het bovenriviereengebied. Merk op dat vertalen van de erosie-eigenschappen van geteste kleisoorten naar andere kleisoorten een aandachtspunt is. Ook zijn er lokale variaties in de fysische eigenschappen van één en dezelfde kleisoort mogelijk, zoals andere fysische factoren (bijvoorbeeld watergehalte) of chemische factoren (bijvoorbeeld organisch gehalte en ionsterkte). De erosie-eigenschappen hangen verder ook sterk af van de mate van structuurvorming en de verdichtingsgraad tijdens aanleg. Kleine variaties in de mate van verdichting of het watergehalte tijdens verdichting kunnen grote verschillen geven in de snelheid van erosie van de klei.

- *Aanscherping hydraulische belastingen*

In sommige gevallen kan het meerwaarde opleveren om de standaard beschikbaar gestelde databases met hydraulische belastingen met meer geavanceerde modellen te vertalen naar de buitenteen van de dijk. Dit geldt vooral voor het omgaan met voorlanden (zie paragraaf 2.3.2) en (haven)dammen (zie paragraaf 2.3.3). Specifiek voor harde bekledingen (schaardijken) in het bovenriviereengebied, kan het opportuun zijn om de strijklengtes bij lagere waterstanden aan te passen omdat de uiterwaarden mogelijk nog niet zijn overstroomd. In de standaard beschikbaar gestelde databases is uitgegaan van strijklengtes die onafhankelijk zijn van de waterstand, hetgeen leidt tot overschatting voor de lagere waterstanden.

- *Tijdsafhankelijke analyse*

Bij het beschouwen van het mechanisme zijn - bij de gegeven stand van de kennis - verschillende pragmatische vereenvoudigingen gehanteerd voor het verloop van de belastingen. Bij sommige is sprake van een conservatieve benadering. Daar zouden nadere kennisontwikkeling en bijbehorende rekenmodelontwikkeling tot reductie van de faalkans kunnen leiden. Bij andere vereenvoudigingen, zoals bijvoorbeeld het beschouwen van slechts één waterstandsverloop, is op voorhand niet te zeggen of deze benadering conservatief is. Aanbevolen wordt in overleg met het werkatelier te bepalen in hoeverre de beperkingen van de beschikbare methode van invloed zijn op het resultaat van de locatiespecifieke analyse, en - indien die invloed groot is - of alternatieve methodes beschikbaar zijn dan wel binnen afzienbare termijn beschikbaar komen. Bij het opstellen van alternatieve methodes dient men erop bedacht te zijn dat veel huidige rekenregels voor dijkbekledingen zijn afgestemd op standaardduren en standaardverlopen van de belastingen, en dat die samenhang niet uit het oog verloren moet worden.

- *Faalkansbepaling open steenasfalt*

Het bij het bepalen van de Minersom gebruikte rekenmodel voor golfklap kan ook toegepast worden voor andere asfaltmengsels zoals open steenasfalt (OSA). De software BM – Asfalt Golfklap kan bij de eerste analyse dus ook voor OSA gebruikt worden om de Minersom te bepalen. Het bepalen van de rekenwaarden voor de sterkteparameters voor OSA vraagt echter om specialistische kennis en waarschijnlijk ook specifieke gegevens over de betreffende asfaltmengsels. De omzetting van de Minersom waarde naar een veiligheidsfactor (zoals ook in de BM is weergegeven) is specifiek geldig voor WAB. Het bepalen van de veiligheidsfactor is

in de huidige aanpak niet meer noodzakelijk (zie ook paragraaf 4.5.3). In geval wel een veiligheidsfactor voor OSA afgeleid wenst te worden is her kalibratie waarschijnlijk benodigd.

- *Faalkansbepaling asfaltbekleding bij grotere golfhoogtes (>3 meter)*

Het bij het bepalen van de Minersom gebruikte rekenmodel voor golfklap is ook toepasbaar in situaties waarbij de golfhoogte groter is dan 3 meter. Dit vraagt echter om specialistische kennis. Wel moet dan geëvalueerd worden of de ondergrond niet zal bezwijken als gevolg van de golfklap.

- *Faalkansbepaling breuksteen (bijv. teenconstructie)*

De bepaling van de faalkans voor breuksteen is in de huidige versie geen onderdeel van de handleiding of technische leidraden. Voor de meest actuele kennis kan de meest recente Rock Manual (CIRIA, 2007) toegepast worden.

- *Toepasbaarheid erosiemodellen grasbekleding op zand*

De bij de eerste analyse van GEBU-golfklap en GEBU-golfoploop gebruikte rekenmodellen gelden voor grasbekledingen op een substraat van klei. Op basis van de binnen het HWBP-innovatieproject Gras op Zand uitgevoerde onderzoeken is gebleken dat de modellen ook toepasbaar kunnen zijn voor gesloten/open grasbekledingen op een substraat van zand, mits specifieke keuzes voor de sterkteparameters worden gemaakt (Deltares, 2022). De aanwezigheid van een 'organische kitlaag' direct onder het gras is wel een voorwaarde om dit model te kunnen gebruiken. Dit moet worden nagegaan in het veld.

- *Rekenwaarden erosiemodellen grasbekleding*

Bij de eerste analyse van GEBU-golfklap en GEBU-golfoploop worden rekenwaarden voor de coëfficiënten van de standtijdlijn en de kritische stroomsnelheid gebruikt. Wanneer met deze rekenwaarden de sterkte van grasbekleding niet voldoende is, dan kan aanvullend onderzoek worden uitgevoerd. Dat laatste is vooral zinvol als uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat met andere waarde(n) van de rekenwaarde(n) een stabiele grasbekleding kan worden gevonden. Daarbij kan voor de onderbouwing worden gedacht aan het uitvoeren van grastrekproeven. Met deze proeven kan de kritische stroomsnelheid geschat worden en kan worden nagegaan of aanscherpen van de gebruikte rekenwaarde kan lonen. Voor het vaststellen van een nieuwe rekenwaarde van de kritische stroomsnelheid is grootschalig onderzoek met simulatoren nodig.

5.2.4 Optie 4 Benutten kennisontwikkeling

De laatste optie is het inventariseren en verwerken van nieuwe relevante ontwikkelingen. In Nederland wordt kennis ontwikkeld in het waterbeheer vanuit verschillende programma's en invalshoeken. Dit kan meerwaarde opleveren voor het bepalen van de overstromingskans van primaire waterkeringen.

Vanuit het BOI wordt een releasekalender gepubliceerd en periodiek bijgewerkt. Dit geeft richting aan de te verwachten kennisontwikkeling. Een aandachtspunt is dat de kennis met voldoende zekerheid kan worden toegepast voor het beoogde doel. Aangeraden wordt dit punt te bespreken in het werkatelier. Merk verder op dat nieuw(e) (ontwikkelde) kennis (maar ook innovaties) te vinden zijn op de wiki van De Innovatieversneller (DIV).

Tot slot is het van belang op te merken dat nieuwe kennis niet altijd hoeft te leiden tot een lagere berekende overstromingskans. Soms leidt nieuwe kennis juist tot een ongunstiger veiligheidsbeeld.

6 Literatuur

- CIRIA, 2007. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. 2nd edition. CIRIA C683, 2007.
- Cooke, R.M. 1991. Experts in Uncertainty, Oxford University Press, oktober 1991.
- Deltares, 2021. Assemblageprotocol WBI2017. Nadere uitwerking van het beoogde assemblageprotocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium. Deltares rapport 11205758-005-GEO-0001, 11 mei 2021.
- Deltares, 2022. Eindadvies beoordeling gras op zandbekledingen, Deltares rapport 11204369-002-GEO-0018, 22 november 2022.
- Meuse, E.J., Estimating Discharge Extremes with experts, nog te verschijnen.
- Mourik, G.C., 2015. Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack. WTI-2017 Product 5.21. Deltares rapport 1209437-017, 5 January 2015.
- Rijkswaterstaat, 2023a. Handleiding overstromingskansanalyse - Algemeen. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022.
- RWS WV, 2023b. Bijlage Indirecte Mechanismen, 2023 (nog op te stellen).
- RWS WV, 2023c. Bijlage Scenario's, 2023 (nog op te stellen).
- RWS WV, 2023d. Raamwerk Kennis voor keringen, 2023 (nog op te stellen).

Bijlage A. Begrippenlijst

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

Figuur 4: Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen

Tabel 6: Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie 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 4</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 4 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 4 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 4 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 4 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 4 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 4 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>
Directe mechanismen	Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting. <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 vervolgmechanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</i>

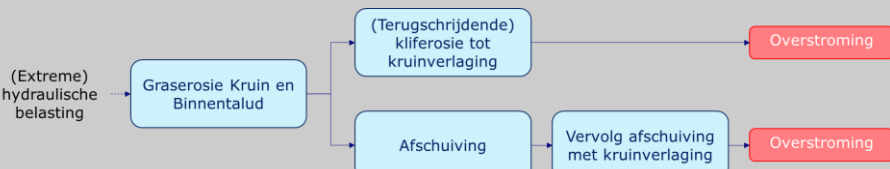
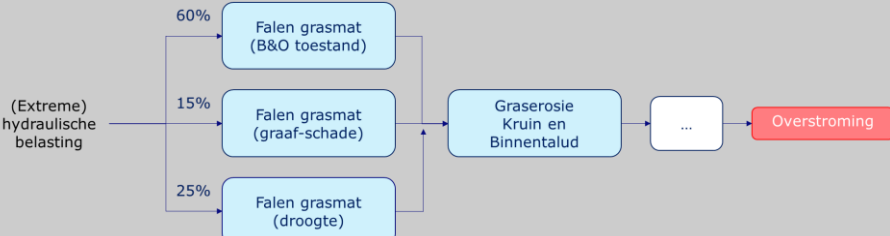
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven 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 Grasbekleding erosie kruin en binnentalud als initieel mechanisme</i></p> 
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatie specifiek. 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 gebruik 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