



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

GEOTECHNISCHE INSTABILITEIT DIJKEN/DAMMEN DEEL 1

Handleiding Overstromingskansanalyse



Groene versie december 2023



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding Overstromingskansanalyse Dijken/dammen

Deel 1 Geotechnische instabiliteit

Colofon

Uitgegeven door
Informatie
Versie

Rijkswaterstaat
www.iplo.nl
December 2023

Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse dijken/dammen deel 1 Geotechnische instabiliteit 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	7
1.1.2	Basisinstrumentarium	7
1.1.3	Handleidingen	7
1.1.4	Technische leidraden	8
1.1.5	Software en databases	8
1.1.6	Werkatelier	8
1.2	Verhaal van de kering	8
1.3	Leeswijzer van deze handleiding	9
2	Beschrijving faalmechanisme	10
2.1	Fenomenologische beschrijving geotechnische instabiliteit	10
2.1.1	Gebeurtenissen / mechanismen geotechnische instabiliteit	10
2.1.2	Initiële mechanismen	12
2.1.3	Indirecte mechanismen en scenario's	13
2.1.4	Aanzet tot falen en belastingen	14
2.2	Beschrijving initiële mechanismen	14
2.2.1	Afschuiven diep glijvlak	14
2.2.2	Afschuiven ondiep glijvlak	15
2.2.3	Afdrukken van de binnenbekleding	16
2.2.4	Uitspoelen	16
2.3	Beschrijving vervolgmecanismen	17
2.3.1	Eroderen door golfoverslag / overloop	18
2.3.2	Vervolgafschuivingen met en/of zonder overslag / overloop	18
2.3.3	Kruinverlaging en bresgroei	18
2.4	Inleiding faalpaden en scenario's	18
2.4.1	Faalpaden	19
2.4.2	Scenario's	19
2.5	Archetypen	19
2.6	Faalpaden geotechnische instabiliteit	20
2.6.1	Gebeurtenissenboom geotechnische instabiliteit	20
2.6.2	Vervolgmechanismen per archetype	21
2.7	Vakindeling voor overstromingskansanalyse	21
2.8	Voorbeelden faalpaden	22
3	Bepalen relevantie met beslisregels	23

3.1	Inleiding	23	
3.2	Absolute beslisregels	23	
3.3	Relatieve beslisregels	24	
3.3.1	Afschuiven diep glijvlak	24	
3.3.2	Afschuiven ondiep glijvlak	26	
3.3.3	Afdrukken binnenbekleding	27	
3.3.4	Uitspoelen	27	
4	Eerste inschatting overstromingskans	29	
4.1	Plaats eerste analyse binnen overstromingskansanalyse	29	
4.2	Schematiseren: voorbereiden eerste analyse	29	
4.2.1	Dijkvakindeling	29	
4.2.2	Geometrie	30	
4.2.3	Ondergrond	30	
4.2.4	Geotechnische parameters en gedrag van de grond	30	
4.2.5	Waterspanningen	32	
4.3	Berekeningen voor de eerste analyse	34	
4.3.1	Modellen en berekeningen van de doorsnede faalkans per mechanisme	34	
4.3.2	Bepaling van de doorsnedefaalkans	38	
4.3.3	Vertaling van doorsnede faalkans naar faalkans per dijkvak en per traject	39	
5	Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans	41	
5.1	Inleiding	41	
5.2	Uitwerken van vervolprocessen	41	
5.2.1	Beheers- en calamiteitenmaatregelen	41	
5.3	Verfijnder uitwerken initieel mechanisme: gebruik aanvullende informatie	42	
5.4	Verfijnder uitwerken mechanismen: geavanceerde modellen en rekentechnieken	43	
5.4.1	Grenstoestandmodellen en probabilistisch rekenen	43	
5.4.2	Afschuiven ondiep glijvlak / binnenbekleding, afdrukken binnenbekleding, uitspoelen	44	
5.4.3	Verfijndere analyse initieel mechanisme: benutten historische informatie	44	
5.5	Nadere analyse door benutten kennisontwikkeling	45	
5.6	Kansen schatten op basis van expert judgement	45	
	Literatuur	47	
Bijlage A	Begrippenlijst	49	

1 Inleiding

Deze handleiding beschrijft de aanpak voor een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans vanuit het mechanisme geotechnische instabiliteit. 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.

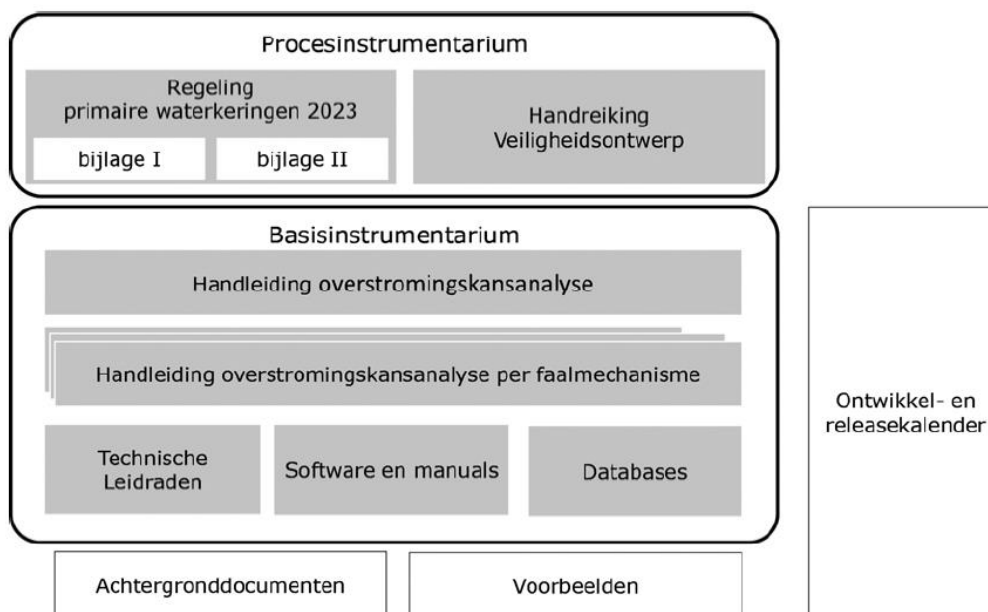
Als het grondlichaam, of de ondergrond, andere elementen bevat dan natuurlijke grond (bijvoorbeeld leidingen, damwanden, geotextielen, grofzandbarrière, verticaal zanddicht geotextiel, drainage- of filterconstructies), dan is deze handleiding niet van toepassing.

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

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

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

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



Figuur 1: Overzicht BOI

1.1.1 *Procesinstrumentarium*

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

- Bijlage I Procedure beoordeling primaire waterkeringen
Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Ook zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.
- Bijlage II Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen
In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

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

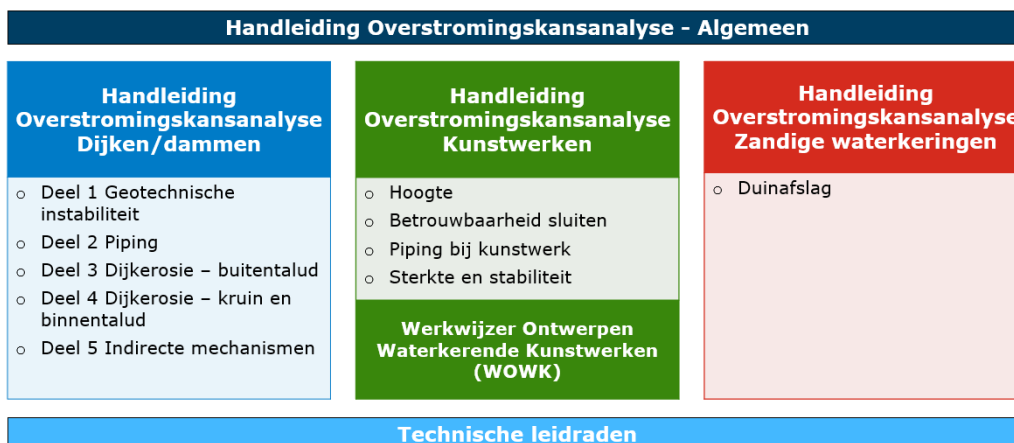
1.1.2 *Basisinstrumentarium*

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

1.1.3 *Handleidingen*

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

Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende handleidingen.



Figuur 2: Overzicht van de verschillende handleidingen

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

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

Deze handleiding geeft handvatten voor de bepaling van de overstromingskans voor het faalmechanisme geotechnische instabiliteit en is een concrete uitwerking van de aanpak zoals beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse.

1.1.4 *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/>.

1.1.5 *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).

1.1.6 *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, 2022a). 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. Hierbij wordt ook de relatie gelegd met de historische achtergrond van de kering. 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 kwalitatief analyseren en beschrijven van geologische afzettingen en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van de ondergrond die relevant zijn voor het functioneren van de kering.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het kwalitatief 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 kering beheerder:** Het duiden van inspecties van de waterkering tijdens eerdere belastingsituaties geeft inzicht 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 geotechnische instabiliteit.

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 geotechnische instabiliteit 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 dwarsdoorsneden. 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

2.1 Fenomenologische beschrijving geotechnische instabiliteit

Geotechnische instabiliteit is het instabiel worden van het grondlichaam van de waterkering en afhankelijk van de aard en omvang van het mechanisme, ook het instabiel worden van de ondergrond.

Dit hoofdstuk gaat in op de verschillende mechanismen die binnen geotechnische instabiliteit worden beschouwd. De gebeurtenissen kunnen zowel een initieel- als een vervolgmecanisme zijn. Deze begrippen worden eerst toegelicht. Een uitgebreidere fenomenologische beschrijving is opgenomen in de Technische leidraden.

De kenmerken van de dijk die van belang zijn voor geotechnische instabiliteit zijn de:

- Geometrie van de dijk, inclusief voor- en achterland.
- Opbouw en samenstelling van de dijk.
- Grondsoorten en laagdiktes in de ondergrond.
- Belastinggeschiedenis van de waterkering.
- Hydrologische situatie onder dagelijkse omstandigheden.
- Aanwezigheid van drainage of sloot.

Daarnaast spelen kenmerken van de belastingen tijdens hoogwater een rol:

- Hydraulische belastingen: met name buitenwaterstand en eventueel golfoverslag;
- Het verloop van belastingen in de tijd;
- Grondwaterstroming onder invloed van een hoogwater: ligging van het freatisch vlak en de stijghoogte in de ondergrond;
- Overige belastingen (zoals verkeer en ijs).

2.1.1 Gebeurtenissen / mechanismen geotechnische instabiliteit

Bij het beoordelen van de kans op overstroming door geotechnische instabiliteit spelen de gebeurtenissen en mechanismen die zijn weergegeven in Tabel 1. Deze gebeurtenissen worden, afhankelijk van het verhaal van de kering, gebundeld in een gebeurtenissenboom waarmee faalpaden kunnen worden opgesteld (zie verder paragraaf 2.4).

Tabel 1: Gebeurtenissen en mechanismen Geotechnische instabiliteit

	Gebeurtenis / mechanisme	Beschrijving	Type
1.	Buitenwaterstand stijgt (en golfhoogte neemt toe)	De waterstand in het watersysteem stijgt en golfhoogte neemt toe (afhankelijk van watersysteem)	Belasting
2.	Waterspanningen nemen toe: 2a. in de dijk 2b. in het watervoerend pakket 2c. in de deklaag	De hogere buitenwaterstand en golfoverslag / overloop veroorzaakt hogere waterspanningen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen waterspanningen in: 2a. De dijk zelf, als gevolg van infiltratie door het buitentalud, of door de kruin en	Belastingeffect

		<p>het binnentalud in geval van overslag / overloop (zie ook 4.). Ook kan water vanuit een watervoerend pakket in de ondergrond infiltreren in de dijk (de mate waarin hangt o.a. af van de doorlatendheid en duur van het hoogwater).</p> <p>2b. In waterdoorlatende lagen in de ondergrond (stijghoogte).</p> <p>2c. De waterspanningen in een slecht doorlatende deklaag nemen toe (indringing).</p>	
3.	Overloop / overslag	De buitenwaterstand stijgt zo ver dat golven over de kruin slaan en/of het buitenwater over de kruin loopt.	Belasting
4.	Freatisch vlak stijgt door overloop / overslag	Het water dat overslaat / overloopt infiltreert door de bekleding tot in de kern van de dijk en zorgt daar voor een verdere verhoging van de waterspanningen.	Belastingeffect
5.	Opdrukken achterland	De waterspanningen in het watervoerende pakket stijgen tot de grenspotentiaal waardoor de grondlagen daarboven omhoog worden gedrukt (opdrijven / opbarsten).	Onderdeel van 6 (kan leiden tot 6)
6.	Afschuiven diep glijvlak: 6a. met overslag / overloop 6b. zonder overslag/overloop	Afschuiven van een grote hoeveelheid grond van de dijk en in de ondergrond, waarbij een groot deel van het binnentalud en soms de kruin instabiel wordt. Het kernmateriaal ligt hierna over een deel van de kering aan de oppervlakte.	Initieel mechanisme
7.	Afschuiven ondiep glijvlak	Afschuiven van een beperkte hoeveelheid grond van het binnentalud (inclusief afschuiven van de bekleding). Het kernmateriaal ligt hierna over een klein deel van het binnentalud aan de oppervlakte. Ook afschuiven van taluds van kwel sloten en dergelijke worden als ondiep glijvlak gekarakteriseerd.	Initieel mechanisme
8.	Afdrukken bekleding	Het afdrukken van de bekleding doordat de waterspanningen in de kern toenemen tot het gewicht van de bekleding (in de richting haaks op de bekleding).	Initieel mechanisme
9.	Uitspoelen	Materiaal van de kern wordt door grondwaterstroming geërodeerd. Dit kan alleen optreden als er een gat/opening in de bekleding aanwezig is, of als vervolgmecanisme na een afschuiving of na het afdrukken van de bekleding. Bij uitspoelen treedt het uit het talud, bij erosie stroomt het water evenwijdig langs het talud.	Initieel mechanisme of vervolgmecanisme
10.	Eroderen door overslag/overloop	Na een afschuiving kan overlopend / overslaand water het kernmateriaal, met name zand of zandige klei, eroderen (oppervlakte-erosie / kliferosie).	Vervolgmecanisme
11.	Vervolgafschuivingen zonder overloop/overslag	Na het optreden van een afschuiving ontstaat er een steil talud dat zelf ook kan afschuiven.	Vervolgmecanisme
12.	Vervolgafschuivingen met overloop/overslag	Door infiltratie van overlopend / overslaand water raakt de dijk verder	Vervolgmecanisme

		verzadigd wat kan leiden tot vervolgfascuivingen.	
13.	Kruinverlaging	De mechanismen zetten zich zo ver door dat de kruin wordt verlaagd. Dit kan, zeker in geval dat afschuiven langs een diep glijvlak al tot kruinverlaging leidt, al de tweede knoop in het faalpad zijn.	Vervolgmechanisme
14.	Bresgroei	Na een kruinverlaging stroomt er zoveel water over de kering dat de dijk verder erodeert.	Vervolgmechanisme

2.1.2

Initiële mechanismen

Bij het selecteren van de relevante faalmechanismen worden generieke faalmechanismen beschouwd. Deze zijn gebundeld in de *Initiële mechanismen*, opgenomen in hoofdstuk 4 van bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) en hieronder in Tabel 2. De keringbeheerder voegt voor de waterkering *specifieke mechanismen* toe, als niet uit te sluiten valt dat deze een bijdrage leveren aan de overstromingskans.

In deze handleiding sluit de terminologie aan bij het Raamwerk voor Analyse overstromingskans geotechnische instabiliteit van dijken (Deltares, 2022). Bij de initiële mechanismen uit Tabel 2 horen de volgende gebeurtenissen:

- **Afschuiven diep glijvlak** (zie paragraaf 2.2.1);
- **Afschuiven ondiep glijvlak**: glijvlak door het binnentalud of afschuiven van de binnenbekleding (zie paragraaf 2.2.2);
- **Afdrukken** van de binnenbekleding (zie paragraaf 2.2.3);
- **Uitspoelen** (zie paragraaf 2.2.4).

Tabel 2: Lijst initiële mechanismen (Regeling 2023 bijlage II), de vetgedrukte mechanismen worden beschouwd in deze handleiding

Aanzet tot falen	Initiële mechanismen
De waterkering faalt door golfaanval op het buitentalud	<ul style="list-style-type: none"> - Falen asfaltbekleding door golfklappen - Falen asfaltbekledingen door wateroverdruk - Erosie van grasbekleding, met inbegrip van overgangsconstructies - Afschuiving van grasbekleding - Instabiliteit steenzetting
De waterkering faalt door water dat over de waterkering stroomt	<ul style="list-style-type: none"> - Erosie van kruin en binnentalud, met inbegrip van overgangsconstructies
De waterkering faalt door hoge waterspanningen in en onder de waterkering	<ul style="list-style-type: none"> - Piping - Binnenwaartse macro-instabiliteit - Binnenwaartse macro-instabiliteit, <ul style="list-style-type: none"> o Micro-instabiliteit, met inbegrip van opdrukken binnenbekleding o Binnenwaartse macro-instabiliteit, met inbegrip van afschuiving binnenbekleding bij overslag
Het waterkerende kunstwerk faalt	<ul style="list-style-type: none"> - Hoogte kunstwerk - Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk - Piping bij kunstwerk - Sterkte en stabiliteit puntconstructies
De zandige waterkering (duin) faalt	<ul style="list-style-type: none"> - Duinafslag

Deze gebeurtenissen kunnen allemaal optreden in situaties met en zonder water dat over de waterkering stroomt door golfoverslag of overloop.

In lijn met de definities in de Regeling wordt in deze handleiding de term gebeurtenis gebruikt voor de beschrijving in faalpaden. Voor de beschrijving van de fysica wordt de term mechanisme gebruikt.

De mechanismen kunnen meestal niet gelijktijdig optreden. Omdat de kans op de verschillende mechanismen ook min of meer wordt bepaald door dezelfde eigenschappen van de kering (de waterspanningen in en onder de dijk nemen toe waardoor de schuifsterkte wordt overschreden), moeten de mechanismen in samenhang worden beschouwd.

De genoemde mechanismen kunnen individueel een initieel mechanisme zijn dat kan leiden tot een overstroming. In veel gevallen zullen vervolgprocessen nodig zijn om daadwerkelijk tot een overstroming te komen. De hier gedefinieerde initiële mechanismen kunnen ook als vervolgproces optreden na andere mechanismen: uitspoelen kan bijvoorbeeld optreden na een ondiepe afschuiving van de binnenbekleding.

2.1.3

Indirecte mechanismen en scenario's

Een indirect mechanisme leidt tot verzwakkende omstandigheden en vergroot de kans dat een of meer faalmechanismen tot een overstroming leiden. Tabel 3 bevat een lijst van indirecte mechanismen die van invloed kunnen zijn op de overstromings- of faalkans. De keringbeheerder voegt, met onderbouwing, specifieke indirecte mechanismen toe wanneer deze de overstromings- of faalkans beïnvloeden.

Tabel 3: Lijst indirecte mechanismen (Regeling 2023 bijlage II)

Type	Indirect mechanisme
<i>Niet-waterkerende objecten</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanismen veroorzaakt door: <ul style="list-style-type: none"> – bebouwing – begroeiing – kabels en leidingen – windmolens
<i>Voorland en havendammen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Afschuiving voorland • Zettingsvloeiing • Golfafslag van voorland • Bezwijken havendammen
<i>Overig</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Afschuiving buitentalud • Graverij

Wanneer de indirecte mechanismen de overstromings- of faalkans beïnvloeden, worden deze met scenario's (zie paragraaf 2.4.2) voor het optreden van initiële mechanismen in de analyse meegenomen. Een scenario beschrijft de situatie van de waterkering na het optreden van een indirect mechanisme. De kans dat een scenario zich voordoet, wordt bepaald door de kans van optreden van het indirecte mechanisme en de kans dat schade wordt waargenomen en tijdig wordt hersteld. De handleiding Overstromingskansanalyse deel 5 Indirecte mechanismen (Rijkswaterstaat, 2023b) gaat hier verder op in.

Geotechnische instabiliteit buitentalud

Geotechnische instabiliteit in buitenwaartse richting of van het buitentalud wordt niet expliciet beschouwd in deze handleiding, maar de rekenmodellen en fysische principes zijn hiervoor wel te gebruiken. In de handleiding "indirecte mechanismen"

is beschreven op welke wijze instabiliteit van het buitentalud kan worden meegenomen in de overstromingskansanalyse.

2.1.4 *Aanzet tot falen en belastingen*

De aanzet tot falen voor alle geotechnische mechanismen zijn hoge waterspanningen in de dijk (freatisch vlak) en onder de dijk (stijghoogte in het watervoerend pakket) en indringing in een slecht doorlatende deklaag, zie Tabel 2. Deze hoge waterspanningen zijn een effect van de hydraulische belasting (inclusief eventuele overloop of golfoverslag). In het verhaal van de kering kan worden beschreven hoe de waterspanningen in en onder de kering naar verwachting reageren op de hydraulische belasting. Hierbij kunnen ook scenario's (zie paragraaf 2.4.2) worden beschouwd, waarin hogere waterspanningen optreden, bijvoorbeeld als gevolg van graverij, droogtescheuren of het falen van een drainage.

Naast hydraulische belastingen kunnen ook andere, externe belastingen een aanzet tot falen zijn, zoals verkeersbelastingen of aardbevingen.

In de meeste gevallen is het samenvallen van een extreme hydraulische belasting en externe belasting niet waarschijnlijk en wordt deze daarom niet simultaan meegenomen. Voordat extreme belasting optreedt, kunnen er nog wel belastingen vanuit het verkeer optreden in combinatie met een verhoogde waterstand. Voor meer informatie over het schematiseren van verkeersbelastingen wordt verwezen naar de Technische leidraden.

Alleen als het samenvallen van een extreme hydraulische- en verkeersbelasting aannemelijk is, kan een realistische verkeersbelasting worden meegenomen. De keringbeheerder moet dit aantonen.

In het artikel 'Belastingen' in de *Technische leidraad Geotechnische Instabiliteit* en de onderliggende artikelen is een volledig overzicht opgenomen van belastingen die beschouwd moeten worden en welke uitgangspunten gebruikt kunnen worden.

2.2 **Beschrijving initiële mechanismen**

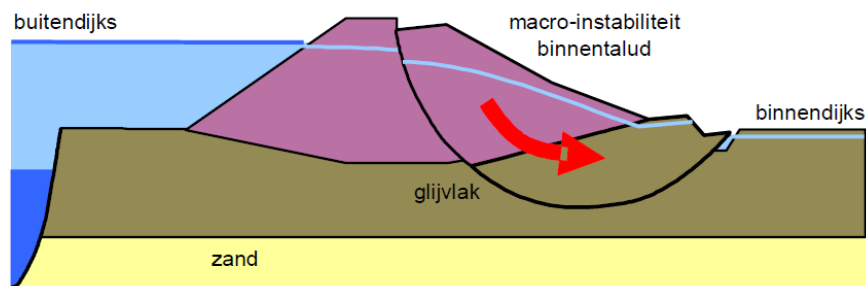
2.2.1 *Afschuiven diep glijvlak*

Bij afschuiven langs een diep glijvlak, komt er een grote hoeveelheid grond in beweging (zie Figuur 3) wanneer de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte langs een glijvlak wordt overschreden (Deltares, 2022a). Het glijvlak kan cirkelvormig zijn (glijcirkel), maar ook gekromd met eventueel horizontale delen.

Als de buitenwaterstand stijgt dan nemen ook de waterspanningen in de dijk en de ondergrond toe. Deze toename kan het gevolg zijn van alleen een verhoogde buitenwaterstand of van een combinatie van verhoogde buitenwaterstand en infiltratie van overslaand water. De waterspanning in een watervoerend pakket in de ondergrond kan zo hoog oplopen dat een slecht doorlatende deklaag wordt opgedrukt (zie verderop in deze paragraaf).

Door de toename van de waterdrukken neemt de effectieve spanning (korrelspanning) af. Zo neemt de schuifsterkte van de grond af en kan een grondmassa instabiel worden. Dit is een geleidelijk proces. Door het opbouwen van de waterdruk, het afnemen van de effectieve spanning en het mobiliseren van de schuifsterkte, neemt de vervorming toe. Als gevolg hiervan zullen eerst langsscheuren in de kruin of het talud ontstaan. Als het proces zich doorzet, zal de vervorming groter worden en kan een afschuiving optreden.

Bij het mobiliseren van de schuifsterkte van grond en de daarbij optredende vervorming wordt eerst een pieksterkte gemobiliseerd. Wordt de vervorming groter, neemt na het overschrijden van de pieksterkte, de sterkte van de grond af (softening). Daarbij treden in toenemende mate schuifvlakken op. Bij ondiepe schuifvlakken ontstaat verlies van samenhang. De sterkte-afname na de pieksterkte kan aanzienlijk zijn en is afhankelijk van de overconsolidatie van de grond. Vooral als de grond voorafgaand aan hoog water deels onverzadigd was, kan een sterke afname van de schuifsterkte optreden.



Figuur 3: Afschuiven diep glijvlak (macro-instabiliteit binnenwaarts)

Opdrukken van het achterland: opdrijven of opbarsten

In die gevallen waar ter plaatse van het achterland een relatief slecht doorlatend pakket (deklaag) aanwezig is boven een watervoerende zandlaag dient te worden nagegaan of er een potentieel gevaar bestaat voor opdrukken van dit slecht doorlatende pakket. Dit als gevolg van hoge waterspanningen/ stijghoogten van het grondwater in deze zandlaag. Er kan, afhankelijk van de verhouding tussen gewicht van de deklaag en opwaartse waterdruk, sprake zijn van opdrijven of opbarsten. In paragraaf 4.3.1 wordt hierop verder ingegaan.

2.2.2

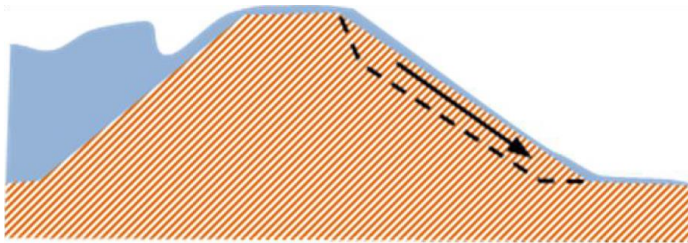
Afschuiven ondiep glijvlak

In Rode Draad nummer 4 "Falen van bekleding op binnentalud" (Adviesteam dijkontwerp, 2022a) is een beschrijving opgenomen van recente inzichten en nog ontbrekende kennis van de diverse vormen van het falen van de binnenbekleding. Het voert te ver om al deze informatie over te nemen in deze handleiding. In deze paragraaf is alleen een globale beschrijving van het mechanisme opgenomen.

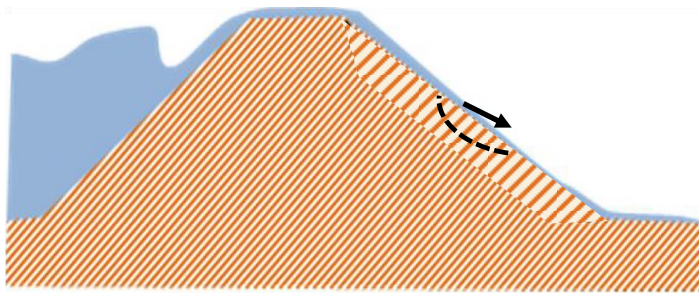
Bij afschuiven langs een ondiep glijvlak komt er een beperkte hoeveelheid grond in beweging. Dit kan (een deel van) de binnenbekleding zijn (Figuur 4), maar ook een ondiepe glijcirkel die door de binnenbekleding en soms het kernmateriaal gaat, zie Figuur 5. De grens tussen ondiep en diep volgt uit het verhaal van de kering maar wordt meestal gelegd bij het doorsnijden van de bekleding op het binnentalud (dijk met zandkern of zandscheg) of het doorsnijden van de gestructureerde toplaag (kleidijk). De aanzet tot het optreden van dit mechanisme is de hogere waterspanning die volgt uit de verhoging van het freatisch vlak door infiltratie bij een hoge buitenwaterstand via het buitentalud en/of door infiltratie bij overloop en golfoverslag via kruin en binnentalud. De stijghoogte in de ondergrond speelt bij ondiep afschuiven normaliter geen rol, met uitzondering van het ondiep afschuiven van taluds bij sloten.

De hogere waterspanningen belasten (drukken tegen) de onderzijde van de bekleding en verminderen de effectieve spanningen op het grensvlak kernmateriaal

– binnenbekleding waardoor de schuifsterkte van de grond afneemt. Als de maximaal opneembare schuifsterkte wordt overschreden, schuift de bekleding af (Figuur 4). Ook in de bekleding zelf nemen de waterspanningen toe, door indringing of infiltratie bij overslag, en kan de maximaal opneembare schuifsterkte worden overschreden. Er ontstaat dan een ondiepe glijcirkel of ondiep glijvlak, zie Figuur 5 door de bekleding en eventueel deels door het kernmateriaal.



Figuur 4: Afschuiven binnenbekleding



Figuur 5: Afschuiven ondiep glijvlak binnentalud

Het optreden van dit mechanisme is minder waarschijnlijk in situaties waarin het freatisch vlak niet of nauwelijks stijgt (Deltares, 2022a), zoals bijvoorbeeld bij kortdurende belasting van een kleidijk zonder overslag of bij een goed werkende drainage in een zanddijk. Dit kan worden beschouwd in de nadere analyse of in aanvulling op de beslisregels.

2.2.3 Afdrukken van de binnenbekleding

Afdrukken van de binnenbekleding treedt op als de waterspanningen onder de binnenbekleding zo hoog oplopen dat er langsscheuren ontstaan. Het evenwicht loodrecht op het talud wordt dan overschreden, inclusief overschrijding van de schuifsterkte binnen de bekleding. Afdrukken is een bijzonder geval van afschuiven binnenbekleding.

2.2.4 Uitspoelen

Als een verhoogde buitenwaterstand, eventueel in combinatie met overslaand water in de dijk infiltreren, dan kan het freatisch vlak stijgen. Bij zanddijken met of zonder bekleding kan, na afdrukken van de bekleding of door gaten in de bekleding, zand uitspoelen. Uitspoelen treedt op wanneer de stromingsbelasting door het verloop van het freatisch vlak, hoger is dan de weerstand tegen uitspoelen van de grond.

Uitspoelen moet niet worden verward met (klif)erosie door overslag of overloop, waarbij wordt gekeken naar de belasting door water dat over het talud of een bres stroomt. De stroming is in dat geval evenwijdig aan het talud, terwijl uitspoelen is gericht op de stroming loodrecht op het talud (Figuur 6) of op de horizontale

stroming uit het talud (zonder bekleding of onder een horizontale deel van de bekleding door).



Figuur 6: Uitspoelen van zand door een gat in de binnenbekleding bij golfoverslagproef Tholen (bron: artikel 'Fenomenologische beschrijving afschuiven en/of afdrucken van de bekleding en uitspoelen')

Als er bij zanddijken met een kleibekleding vanuit wordt gegaan dat de binnenbekleding volledig gesloten is dan kan uitspoelen niet optreden als initieel mechanisme, maar alleen als vervolgmecanisme na afschuiven of afdrucken. Maar er zal vaker, bij de beschouwing van scenario's voor indirecte mechanismen, zoals bijvoorbeeld graverij of structuurvorming (scheuren) van een binnenbekleding, vanuit worden gegaan dat de binnenbekleding niet volledig gesloten is. In dat geval kan uitspoelen optreden door de openingen in de binnenbekleding. Bij zanddijken zonder kleibekleding wordt de kans op uitspoelen bepaald door de kwaliteit van de graszode (Deltares, 2022a).

2.3 Beschrijving vervolgmecanismen

Het optreden van een initieel mechanisme leidt in de meeste gevallen niet direct tot een overstrooming. Er zijn vervolgmecanismen / vervolgproucessen nodig voordat er een overstrooming optreedt. Ook moet de hydraulische belasting lang genoeg optreden om de vervolgmecanismen volledig tot ontwikkeling te laten komen.

Modellen om deze vervolgmecanismen te kunnen bepalen zijn beperkt beschikbaar in de leidraden en handleidingen voor waterkeringen in Nederland. Dit is onder andere het gevolg van het ontbreken van kennis omdat het in de toets- en ontwerprouktijk tot 2017 niet gebruikelijk was om deze sterkte mee te nemen. Ook zijn deze vervolgmecanismen complex. Verschillende factoren spelen hierin een rol zoals de invloed van de duur van een bepaalde golfoverslag, een onzekere opbouw van het dijklichaam, hiaten in kennis over de erosiesterkte bij overslag en de verschillen tussen overloop en overslag.

In paragraaf 5.2 is beschreven op welke manier de vervolgmecanismen kunnen worden meegenomen in de overstroomingskansanalyse. In deze paragraaf volgt een beknopte beschrijving van de fysica van de vervolgmecanismen. In het artikel 'Vevolgmecanismen na binnenwaarts afschuiven langs diep glijvlak' in de technische leidraad, katern geotechnische stabiliteit is een uitgebreidere beschrijving opgenomen.

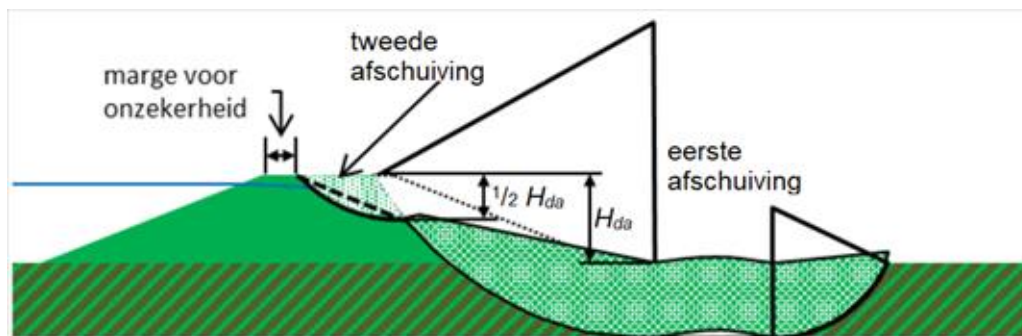
2.3.1 *Eroderen door golfoverslag / overloop*

Onder erosie wordt verstaan het wegspoelen van gronddeeltjes, ten gevolge van water dat parallel aan het binnentalud stroomt (Deltares, 2022a). De stroom water die over het talud stroomt, brengt daar een 'sleepkracht' ofwel schuifspanning over op de bovenste rij gronddeeltjes, die gelijk is aan het eigen gewicht van het laagje water. Die stroming veroorzaakt instabiliteit en transport van de bovenste gronddeeltjes. Zo erodeert het oorspronkelijke talud. De gronddeeltjes sedimenteren weer aan de teen. Erosie en sedimentatie doen een aanzienlijk flauwer talud ontstaan. Zand en klei kunnen beide eroderen, maar de erosiegevoeligheid van zand is groter dan die van klei.

Voor meer informatie over de erosie van bekledingen en kernmateriaal wordt verwezen naar de Handleiding Overstromingskansanalyse deel Dijkerosie kruin en binnentalud.

2.3.2 *Vervolgafschuivingen met en/of zonder overslag / overloop*

Na een initiële afschuiving blijft een steil talud achter wat ook weer kan afschuiven (Figuur 7). Er zijn hier diverse studies naar gedaan (zie bijvoorbeeld Krogt e.a. (2019) en Remmerswaal e.a. (2021)), maar er is nog geen standaard methodiek beschikbaar. De aanname voor de hoogte van het achterblijvende talud ($1/2 H_{da}$) in onderstaande figuur is overigens een conservatieve inschatting, bij afschuivingen in Nederland werd meestal een kleinere hoogte gevonden.



Figuur 7: Tweede afschuiving na een eerste afschuiving

2.3.3 *Kruinverlaging en bresgroei*

De vervolgmechanismen (of soms al het initiële mechanisme) kunnen leiden tot kruinverlaging over de volledige breedte van de kruin, waarna er zoveel water over de kering stroomt dat de bres steeds verder groeit. Er zijn voor het groeien van een bres rekenmodellen beschikbaar die gebruikt kunnen worden voor de overstromingsrisico's.

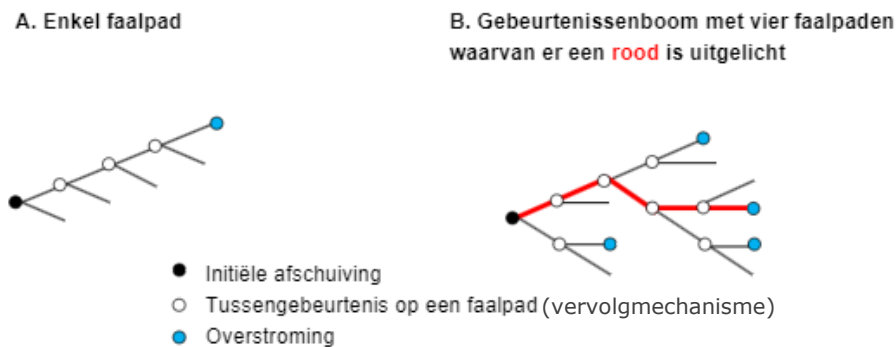
2.4 **Inleiding faalpaden en scenario's**

Faalpaden (paragraaf 2.4.1) hebben een initieel mechanisme dat wordt veroorzaakt door een hoogwatersituatie.

Scenario's (paragraaf 2.4.2) hebben betrekking op de situaties die aanwezig kunnen zijn voordat een hoogwatergolf optreedt (en dus onafhankelijk zijn van een hoogwatergolf) (Deltares, 2022a).

2.4.1 Faalpaden

Een faalpad is een opeenvolging van gebeurtenissen, startend met een initieel mechanisme en eindigend met een overstroming. Een gebeurtenissenboom is een praktische methode om systematisch faalpaden te genereren. In een gebeurtenissenboom wordt na elke gebeurtenis gekeken welke vervolggebeurtenissen kunnen optreden. Figuur 8 geeft schematisch weer hoe een faalpad en een gebeurtenissenboom eruit kunnen zien.



Figuur 8: Enkel faalpad (links) en gebeurtenissenboom met verschillende en dominant faalpad (rechts) (Adviesteam Dijkontwerp, 2021)

Als één gebeurtenis in een faalpad kan worden uitgesloten dan draagt het niet bij aan de overstromingskans en is het faalpad daarom niet relevant voor het faalmechanisme.

2.4.2 Scenario's

Bij het analyseren van geotechnische instabiliteit, kan er aanleiding zijn om verschillende condities, gebeurtenissen of scenario's te onderscheiden. Er kan dan bijvoorbeeld worden gekeken naar graverij, geplande herstelmaatregelen, of het wel of niet functioneren van een drainage. Hoe deze scenario's in de faalkansanalyse kunnen worden meegenomen, is beschreven in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a).

2.5 Archetypen

Archetypen zijn hulpmiddelen om snel te kunnen beoordelen of het aannemelijk is dat een mechanisme kan optreden of niet. Over het algemeen zijn voor dijken in Nederland de volgende archetypen het meest voorkomend en relevant voor geotechnische instabiliteit:

1. Een kleidijk op een goed doorlatende ondergrond;
2. Een kleidijk op een slecht doorlatende ondergrond;
3. Een zanddijk met kleibekleding op een goed doorlatende ondergrond;
4. Een zanddijk met kleibekleding op een slecht doorlatende ondergrond;
5. Een kleidijk met aan de binnenzijde een zandscheg en kleibekleding, op een goed doorlatende ondergrond;
6. Een kleidijk met aan de binnenzijde een zandscheg en kleibekleding, op een slecht doorlatende ondergrond;
7. Een zanddijk of zandige kering zonder kleibekleding.

In Nederland is normaliter onder het pakket slecht doorlatende grond altijd sprake van een goed doorlatend watervoerend pakket.

Vooraf bij de beslisregels en het analyseren van vervolprocessen kunnen de archetypen worden gebruikt. Dit wordt nog verder ontwikkeld en het aantal beslisregels op basis van archetypen is daarom nu nog beperkt.

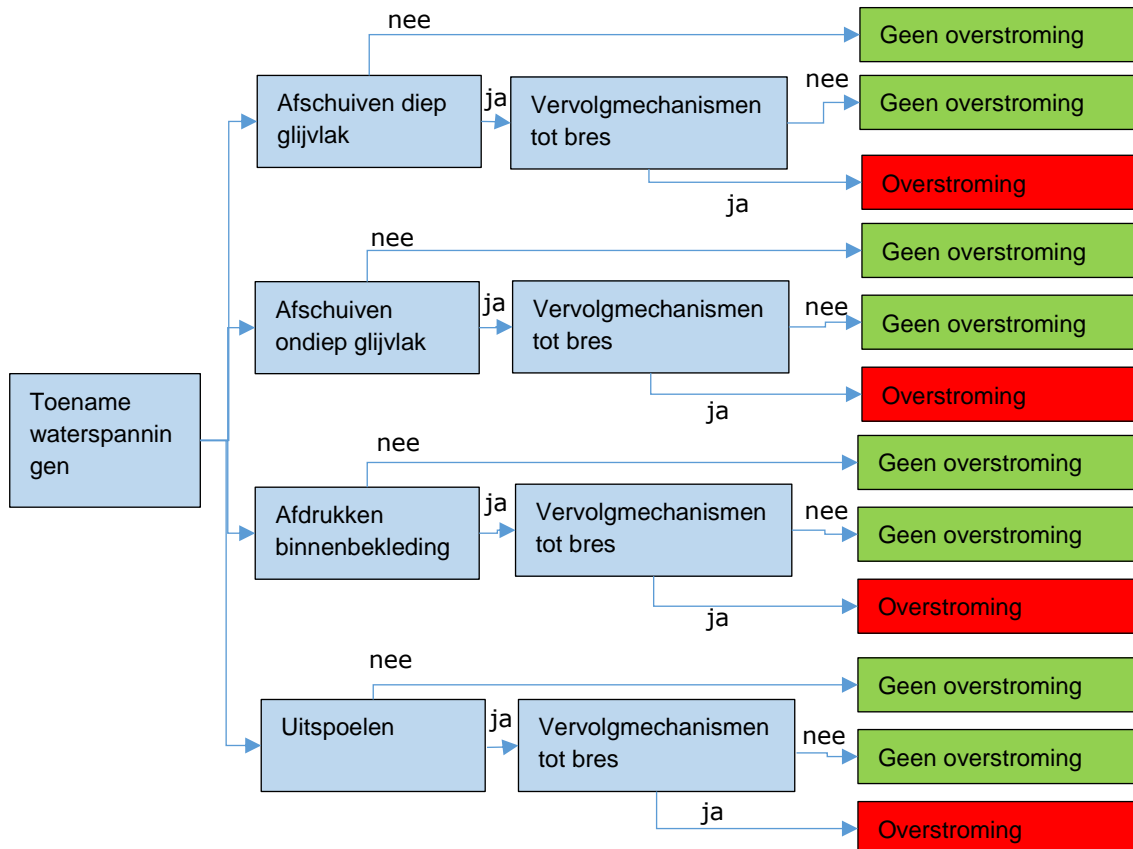
2.6 Faalpaden geotechnische instabiliteit

2.6.1 *Gebeurtenissenboom geotechnische instabiliteit*

Figuur 9 toont een globale gebeurtenissenboom voor geotechnische instabiliteit. Deze gebeurtenissenboom is een globale uitwerking. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen verschillende vervolmechanismen. In de uitwerking van een overstromingskansanalyse moeten op basis van het verhaal van de kering de gebeurtenissen in de boom worden gedefinieerd. Bij een kering die bijvoorbeeld permanent hydraulisch wordt belast, kan een hoge verkeersbelasting of extreme neerslag ook de aanzet tot falen veroorzaken.

Met de globale gebeurtenissenboom kan vaak al snel inzicht worden gekregen in de dominante faalpaden en welke faalpaden niet verder beschouwd hoeven te worden. Op basis van de beslisregels in hoofdstuk 3 kan al blijken dat bepaalde faalpaden niet relevant zijn. In de eerste analyse, hoofdstuk 4, wordt vervolgens bepaald of een faalpad een significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Hierbij wordt de kans op het optreden van vervolmechanismen tot bres op 1 gezet. Voor de faalpaden die dan dominant blijken te zijn voor de faalkans van de kering kan ten slotte een nadere analyse (hoofdstuk 5) worden uitgevoerd. Hoe gedetailleerder er daarbij naar het fysisch gedrag (aan sterkte- en belastingzijde) tijdens de gebeurtenissen wordt gekeken, hoe verfijnder en geloofwaardiger de faalkans van de kering kan worden bepaald.

In het vervolg van deze paragraaf wordt voor de archetypen uitgebreider ingegaan op de vervolmechanismen en de meest voorkomende faalpaden.



Figuur 9: Globale gebeurtenissenboom geotechnische instabiliteit

2.6.2 Vervolgmechanismen per archetype

Er is een grote variatie in de samenstelling van de opbouw van dijken, ondergrond en watersystemen. Het is daardoor op dit moment niet haalbaar om voor alle theoretische combinaties de mogelijke vervolgmechanismen vast te leggen. Deze moeten altijd volgen uit het verhaal van de kering.

2.7 Vakindeling voor overstromingskansanalyse

In de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a) is een aantal overwegingen voor de vakindeling gegeven. Voor de analyse van geotechnische instabiliteit wordt hierbij aanvullend opgemerkt dat het belangrijk is dat er per vak één uniform faalmechanisme is: het dominante faalpad (of de dominante faalpaden) die de faalkans bepalen moeten voor het gehele vak geldig zijn. Het is bijvoorbeeld onwenselijk dat binnen een deel van het vak het faalpad voor uitspoelen dominant is, terwijl voor een tweede deel van hetzelfde vak afschuiven langs een diep glijvlak dominant is. In dat geval wordt geadviseerd het vak te splitsen. In paragraaf 4.2.1 zijn hiervoor aanvullende aanwijzingen opgenomen.

2.8 Voorbeelden faalpaden

Hieronder zijn twee voorbeelden uitgewerkt:

- Een kleidijk zonder overslag
- Een kleidijk met overslag

Benadrukt wordt dat de voorbeelden slechts een indicatie geven van het faalproces en dit proces op hoofdlijnen beschrijven. Het faalproces is per kering verschillend en moet door de keringbeheerder (op basis van het verhaal van de kering) worden aangevuld.

Voorbeeld 1 –kleidijk zonder overslag

Bij een kleidijk zonder overslag in combinatie met opdrijven is afschuiven langs een diep glijvlak het meest waarschijnlijke initiële faalmechanisme. Dit kan leiden tot een groot glijvlak waarbij de kruin in zijn geheel wordt verlaagd (dit leidt mogelijk direct tot bresvorming en verlies van het waterkerende vermogen) of tot een inleidende afschuiving met aansluitend (een serie van) kleinere vervolgafschuivingen. De grootte en vorm van de eerste afschuiving bepaalt, in combinatie met de opbouw van de dijk en hydraulische condities het verdere verloop van het faalpad. Voor het voorbeeld wordt ervan uitgegaan dat er meer vervolgafschuivingen nodig zijn voordat bresvorming optreedt. Omdat geen overslag optreedt, speelt erosie als vervolgmechanisme geen rol. Bij een kleikern zal ook geen sprake zijn van uitspoelen of afdrukken, zodat alleen afschuivingen als vervolgmechanismen kunnen leiden tot kruinverlaging en bresgroei.

Voorbeeld 2 –kleidijk met overslag

De situatie is gelijk aan voorbeeld 1, alleen treedt nu gedurende zeer korte tijd tijdens een storm overslag op. Hierdoor wordt ook het mechanisme ondiep afschuiven relevant. Na een eerste afschuiving zijn er weer vervolgafschuivingen nodig om tot kruinverlaging en bresvorming te komen (er wordt net als in voorbeeld 1 vanuit gegaan dat het initiële mechanisme niet direct tot bresvorming leidt). Ook erosie door overslag kan in dit geval een vervolgmechanisme zijn, maar omdat de overslag slecht zeer kort duurt kan met een model voor erosie worden beredeneerd dat dit mechanisme niet waarschijnlijk is gegeven dat het een kleidijk betreft.

3 Bepalen relevantie met beslisregels

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft hoe een selectie kan worden gemaakt van relevante faalmechanismen voor geotechnische instabiliteit. Deze analyse vindt plaats per dijkvak. Hiervoor zijn twee type beslisregels opgesteld: (1) absolute beslisregels en (2) relatieve beslisregels. Absolute beslisregels geven aan of een mechanisme (fysisch) wel of niet kan optreden. Relatieve beslisregels geven aan of de kans van optreden van een mechanisme (afhankelijk van de lokale omstandigheden) relevant is (Rijkswaterstaat, 2023a). Beide worden gebruikt om vast te stellen of het initiële mechanisme geotechnische instabiliteit een verwaarloosbare bijdrage levert aan de overstromingskans van de kering.

De beslisregels zijn nodig voor screening en geven aan of de juiste randvoorwaarden aanwezig zijn voor het kunnen optreden van falen op geotechnische instabiliteit. Merk op dat diverse beslisregels (deels) zijn gebaseerd op de regels die bij LBO-1 voor de eenvoudige toets werden gebruikt. Bij het BOI-programma 2023 hebben deze geen uitsluitend en limitatief karakter, maar zijn ze indicatief. Het is aan de keringbeheerder om de relevantie van een faalmechanisme te bepalen waarbij de getalswaarden uit onderstaande beslisregels een indicatief hulpmiddel zijn. De beslisregels zijn daarnaast niet uitputtend. Aanvullend op de beslisregels in dit hoofdstuk, kan de keringbeheerder op basis van de kenmerken van de kering (het verhaal van de kering) en/of het faalpad, een faalmechanisme niet relevant verklaren.

3.2 Absolute beslisregels

- **Instabiliteit is niet mogelijk**

Is het achterland, aansluitend aan de kering, hoger of gelijk aan de kruin, dan is een geotechnische instabiliteit van het binnentalud niet mogelijk. Omdat hier geen sprake is van een helling van het binnentalud kunnen de mechanismen afschuiven, afdrukken en uitspoelen niet optreden. De faalmechanismen gerelateerd aan de geotechnische instabiliteit zijn daarmee niet relevant.

- **Uitspoelen bij kleidijken**

Uitspoelen van (kern)materiaal is niet mogelijk bij homogene kleidijken (kleikern en een bekleding van klei en/of een leeflaag). De stromingsbelasting die aan de basis staat van dit faalmechanisme (zie paragraaf 2.1.4) kan niet optreden omdat de doorlatendheid van klei laag is en er daardoor geen sprake kan zijn van stroomsnelheden die leiden tot erosie. Bij oude heterogene kleidijken kan uitspoelen wel optreden als er doorgaande zandinsluitingen aanwezig zijn.

- **Afdrukken van de bekleding bij kleidijken**

Afdrukken van de bekleding is niet mogelijk bij homogene kleidijken (kleikern en een bekleding van klei en/of een leeflaag). In geval van afdrukken moet een significant drukverschil kunnen ontstaan over de bekleding aan de binnenzijde van de dijk (zie hoofdstuk 2.1.4). Dit drukverschil kan bij dijken waar zowel de binnenbekleding als de onderlagen/kern bestaan uit klei(ig) materiaal niet optreden. Afdrukken van de bekleding is daarmee fysisch niet mogelijk.

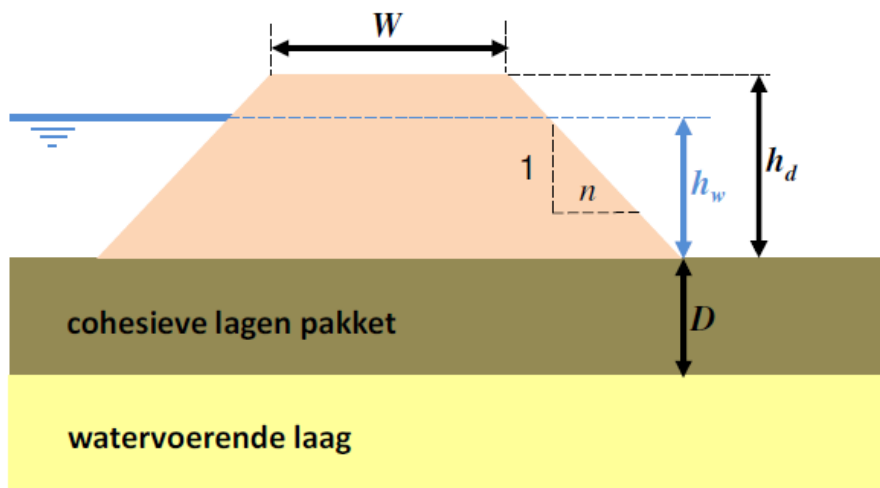
3.3 Relatieve beslisregels

3.3.1 Afschuiven diep glijvlak

Afschuiven van een diep glijvlak kan optreden als sprake is van verhoogde waterspanningen in de dijk en in het watervoerend pakket en de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte wordt overschreden. Dit betekent dat afschuivingen niet waarschijnlijk zijn als de waterspanningen niet of nauwelijks toenemen (let hierbij ook op opdrukken van het achterland) en de mate waarin de schuifsterkte wordt gemobiliseerd niet of nauwelijks wijzigt.

Het is aan de keringbeheerder om op basis van de lokale dijkopbouw, de ondergrondopbouw, de geometrie en de geohydrologische kenmerken in te schatten of bovenstaande basiselementen uit het faalpad (verhoging waterspanning en verlies van het waterkerend vermogen) kunnen optreden. Als deze niet op kunnen treden, is een grote afschuiving geen relevant faalmechanisme. Schat de keringbeheerder in dat deze basiselementen wel relevant zijn (of als daar onzekerheid over bestaat), wordt aangeraden de analyse voort te zetten met een eerste of nadere analyse van de overstromingskans (zie hoofdstuk 4 en 5).

De relevantie kan onderbouwd worden met een redeneerlijn. Waarom afschuiven wel of niet relevant is, kan onderbouwd worden door bijvoorbeeld gebruik te maken van fysische (vuist)regels en eenvoudige toetsregels, zoals de geometrische toets (bron: eenvoudige toets uit LBO1). Op basis van eenvoudige kenmerken van het profiel van de kering in relatie tot de belasting kan worden beoordeeld of in de situatie zonder overslag ($<0,1$ l/m/s) een grote afschuiving een relevant faalmechanisme is. Een grote afschuiving is niet relevant als de dimensies van de dijk voldoende ruim boven de belasting liggen, uitgedrukt in dimensie (waterstand bij de norm en het verval over de kering). Dit kan worden bepaald met zogenaamde contourplots. Deze zijn opgesteld op basis van een groot aantal berekeningen voor dijken van zand en van klei met uiteenlopende geometrieën. De geometrische parameters van de dijk die van belang zijn voor het aflezen van de contourplots zijn in Figuur 13 aangegeven.



Figuur 10: Geometrische dijkparameters voor contourplots.

Hierbij geldt:

- W Kruinbreedte [m]; bereik van 3 tot 30 m.
- n Cotangens van de helling van het binnentalud; bereik van 1 tot 6.

- h_d Dijkhoogte boven maaiveld binnendijks [m].
- D Dikte cohesieve lagen pakket [m].
- h_w Hoogte buitenwaterstand boven maaiveld binnendijks [m].

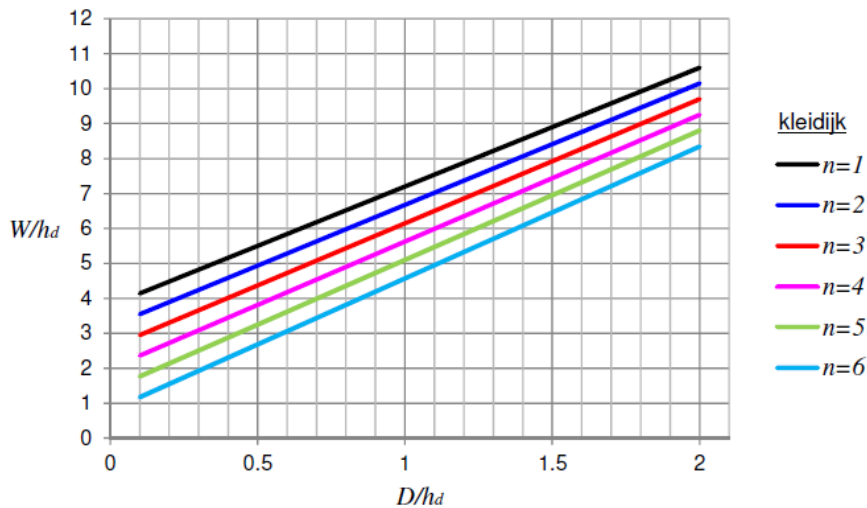
De beslisregel op basis van algemene kenmerken mag alleen worden toegepast wanneer aan beide onderstaande voorwaarden wordt voldaan:

- De kruinbreedte en de helling van het binnentalud vallen binnen het bij deze parameters aangegeven bereik.
- Het verval over de dijk (uitgaande van de waterstand bij norm) is kleiner of gelijk aan $2/3$ van de hoogte van het dijklichaam.

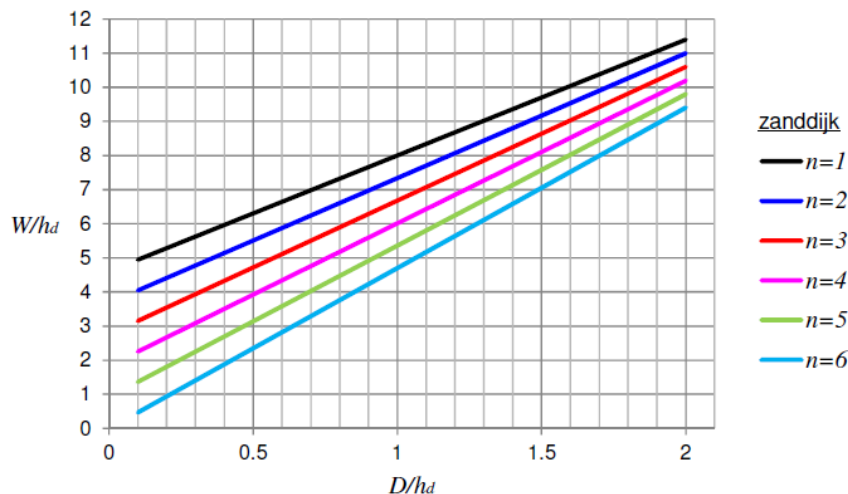
Is er een binnenberm aanwezig, dan moet voor deze beslisregels uitgegaan worden van een dwarsprofiel waarbij de berm achterwege is gelaten en het benedentalud wordt aangesloten op het boventalud. Bij een brede watergang binnendijks wordt de dijkhoogte gemeten vanaf de kruin tot de bodem van de watergang.

In onderstaande figuren zijn de contourlijnen voor een kleidijk en zanddijk weergegeven. Een zanddijk met een kleiafdekking moet worden beschouwd als een zanddijk. Is er sprake van een gemengde opbouw van de dijk, dan moeten de veilige afmetingen voor zanddijken worden gebruikt. De beslisregels zijn overigens niet bruikbaar als in de dijk veenlagen aanwezig zijn op een niveau hoger dan het binnendijks maaiveldniveau.

Gelet op de binnenwaartse stabiliteit heeft de dijk veilige afmetingen wanneer de te keren waterhoogte kleiner of gelijk is aan $2/3$ van de dijkhoogte en de dijk wordt gekarakteriseerd door een punt met de coördinaten D/h_d en W/h_d boven de lijn die hoort bij de helling van het binnentalud.



Figuur 11: Contourplot bij zanddijken



Figuur 12: Contourplot bij kleidijken

3.3.2

Afschuiven ondiep glijvlak

Ondiepe afschuivingen treden in principe op dezelfde manier op als diepe afschuivingen (verhoging van de waterspanningen en evenwichtsverlies) en zijn vooral relevant als de dijk verzadigt door infiltratie en/of overslag. Een ondiepe afschuiving kan bij een dijk met een steil binnentalud het inleidende mechanisme zijn, ook al bij kleine overslagdebieten, waarna vervolgmecanismen bepalend worden voor de bepaling van de overstromingskans.

Voor situaties zonder overslag kan gebruik worden gemaakt de vorige paragraaf, tenzij het om de beschouwing van rechte glijvlakken evenwijdig aan het talud gaat (als uit het verhaal van de kering blijkt dat dit een relevant mechanisme is, moet dit conform paragraaf 4.3.1 worden beschouwd).

De relevantie van ondiepe afschuivingen kan worden onderbouwd met een redeneerlijn op basis van fysische (vuist)regels en inzichten. Voor de invloed van golfoverslag kan gebruik worden gemaakt van de KPR factsheet 'Macrostabiteit i.c.m. golfoverslag' (Kennisplatform Risicobenadering, 2019) en van het artikel 'Invloed van golfoverslag op het freatisch vlak' in de Technische Leidraad, katern Geotechnische stabiliteit.

Verder kan de aanwezigheid van een drainage of het vroegtijdig afdrukken van de kleibekleding bij een zanddijk ervoor zorgen dat een hoge verzadiging niet kan optreden en een ondiepe afschuiving niet het initiële mechanisme is.

3.3.3 *Afdrukken binnenbekleding*

Bij het afdrukken van de binnenbekleding is de (freatische) waterdruk groter dan de weerstand (gewicht en schuifsterkte van de bekleding loodrecht op het binnentalud). Hierdoor drukt deze op, scheurt en verliest zijn bijdrage aan het waterkerende vermogen van de dijk. Bij de beoordeling van de relevantie kan de keringbeheerder inschatten of sprake kan zijn van een (verhoging van de) belasting op de binnenbekleding waardoor sprake is van overschrijding van de sterkte.

Hiervan kan geen sprake zijn bij:

- een brede waterkering en/of
- een goed drainerend dijklichaam en ondergrond / drainage en/of
- een dikke kleibekleding en/of
- een flauw binnentalud.

Het is aan de keringbeheerder om op basis van de lokale dijkopbouw, de ondergrondopbouw, de geometrie en de geohydrologische kenmerken in te schatten of bovenstaande basiselementen uit het faalpad (belasting onder de bekleding op het binnentalud en overschrijding van de sterkte) op kunnen treden. Als deze niet op kunnen treden dan is afdrukken geen relevant faalmechanisme. Schat de keringbeheerder in dat deze basiselementen wel relevant zijn (of als daar onzekerheid over bestaat), wordt aangeraden de analyse voort te zetten met een eerste of andere analyse van de overstromingskans (zie hoofdstuk 4 en 5).

De relevantie kan onderbouwd worden met een redeneerlijn. Waarom afschuiven wel of niet relevant is, kan onderbouwd worden door bijvoorbeeld gebruik te maken van fysische (vuist)regels. Als de dijk bijvoorbeeld bestaat uit een zandkern of een zandscheg aan de binnenzijde, met of zonder een kleibekleding, en er sprake is van een goed werkende (natuurlijke of aangebrachte) drainage aan de binnentoe, kan er geen sprake zijn van afdrukken.

3.3.4 *Uitspoelen*

Bij het uitspoelen is de (freatische) waterlijn dusdanig hoog dat de stromingsbelasting zorgt voor het uitspoelen van korrelmateriaal. Dit uitspoelen treedt alleen op als dit niet op zijn plek gehouden wordt door een cohesieve laag (bijvoorbeeld als op de onderste helft van het talud geen sprake is van een kleibekleding op het binnentalud of als deze lokaal niet meer aanwezig is door vergaande scheurvorming, graverij of afdrukken).

Het is aan de keringbeheerder om op basis van de lokale dijkopbouw, de ondergrondopbouw, de geometrie en de geohydrologische kenmerken in te schatten of bovenstaande basiselementen uit het faalpad (hoge freatische waterlijn en de aanwezigheid van korrel materiaal) op kunnen treden. Kan dit niet, dan is uitspoelen geen relevant faalmechanisme. Schat de keringbeheerder in dat deze basiselementen wel relevant zijn (of als daar onzekerheid over bestaat) wordt aangeraden de analyse voort te zetten met een eerste of andere analyse van de overstromingskans (zie hoofdstuk 4 en 5).

De relevantie kan onderbouwd worden met een redeneerlijn. Waarom uitspoelen wel of niet relevant is, kan onderbouwd worden door bijvoorbeeld gebruik te maken van fysische (vuist)regels. Bijvoorbeeld als de dijk bestaat uit een zandkern of een zandscheg aan de binnenzijde, met of zonder een kleibekleding, en sprake is van

een goed werkende (natuurlijke of aangebracht) drainage aan de binnenteeën, kan er geen sprake zijn van uitspoelen. Ook als er sprake is van een goede kleibekleding (in afwezigheid van scheuren of graverij), is uitspoelen als initieel mechanisme niet mogelijk.

4 Eerste inschatting overstromingskans

4.1 Plaats eerste analyse binnen overstromingskansanalyse

In de eerste analyse van de overstromingskans wordt de kans op het optreden van de initiële mechanismen beschouwd. De kans op vervolprocessen die tot falen van de kering leiden, wordt op 1 gesteld (Rijkswaterstaat, 2023a). Hiermee kan de assemblage plaatsvinden waarmee de dominante faalpaden kunnen worden bepaald. De dominante faalpaden moeten verder worden geanalyseerd (hoofdstuk 2) voor een geloofwaardige overstromingskans. In de handleiding Overstromingskansanalyse wordt uitgebreider ingegaan op deze werkwijze. Ook indirecte mechanismen kunnen soms, als specifiek mechanisme (zie paragraaf 2.1.3), relevant zijn voor de overstromingskans en moeten dan worden toegevoegd aan de analyse.

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke aandachtspunten relevant zijn voor het schematiseren en voor de berekeningen in de eerste analyse. Ten slotte wordt ingegaan op de vertaling van de doorsnedekans naar een faalkans per dijkvak en per dijktraject.

4.2 Schematiseren: voorbereiden eerste analyse

Schematiseren is het proces van het versimpelen van de (complexe) werkelijkheid naar een vereenvoudigde weergave tot specifieke modelinvoer. In dit proces is het belangrijk om onzekerheden expliciet te benoemen en mee te nemen. Bij het ontwerp wordt gebruikt gemaakt van de schematiseringsfactor waarin ongunstigere scenario's en de kans van optreden worden verdisconteerd. Bij beoordelen wordt de schematiseringsfactor niet meegenomen, maar worden de onzekerheden in rekening gebracht door middel van (ondergrond)scenario's. Het artikel '*Schematiseringsfactor voor afschuiven*' in de Technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit beschrijft hoe de schematiseringsfactor bepaald kan worden. Voor het werken met scenario's voor de ondergrond is het artikel '*Onzekerheid in schematisering ondergrond in rekening brengen*' opgenomen in de Technische leidraad Geotechnische stabiliteit.

Zowel bij beoordelen als ontwerpen wordt van grof naar fijn gewerkt. Een nauwkeuriger analyse kan plaatsvinden door meer informatie in te winnen. Op basis daarvan kan een nauwkeuriger schematisering gemaakt worden of door een analyse met een nauwkeuriger of beter passende rekenmethode gewerkt worden (zie hoofdstuk 5). Van grof naar fijn betekent niet van conservatief naar scherp. Alleen om aan te tonen dat één van de geotechnische mechanismen geen significante bijdrage heeft aan de overstromingskans, kan met conservatieve aannames worden gerekend. Het "stapelen" van conservatieve aannames is *niet* de bedoeling.

In de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse wordt uitgebreid ingegaan op de principes voor en het proces van schematiseren. Waar nodig worden in dit hoofdstuk aanvullingen gegeven per mechanisme.

4.2.1 Dijkvakindeling

Bij het maken van de vakindeling is het van belang dat er sprake is van (statistische) homogeniteit binnen een dijkvak. Het artikel '*Vakindeling voor macrostabiliteit en afschuiving voorland*' in de Technische leidraad, katern

Geotechnische Instabiliteit, biedt hiervoor een handreiking. In de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a) is ook een toelichting opgenomen op de systematiek.

Voor een geloofwaardige bepaling van de bijdrage van geotechnische instabiliteit aan de overstromingskans is het belangrijk dat elk dijkvak uniforme dominante faalpaden heeft. Is dit niet het geval, dan kan een opdeling in kleinere vakken nodig zijn. Voor het omgaan met variaties in relatie tot het zogenaamde lengte-effect wordt verder verwezen naar paragraaf 4.3.3.

4.2.2 *Geometrie*

Voor elk te schematiseren dijkvak met een "representatief" dwarsprofiel worden gekozen, waarvoor de overstromingskans wordt berekend. In de praktijk is soms sprake van een relatief grote variatie in geometrie en is het vanwege de benodigde rekeninspanning onmogelijk om een grote hoeveelheid kleine vakken te berekenen. Dit kan worden verdisconteerd via het lengte-effect (paragraaf 4.3.3).

4.2.3 *Ondergrond*

Voor alle primaire waterkeringen in Nederland met uitzondering van de duinen is de globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) opgesteld. Hierbij zijn de keringen opgedeeld in segmenten op basis van bekende informatie over de ondergrond. In een SOS-segment komen één of meer SOS-ondergrondscenario's voor met een bepaalde kans van aantreffen. De SOS-scenario's leggen de opbouw van de ondergrond vast met een opeenvolging van SOS-eenheden en de diepteligging van die eenheden. Door het toepassen van verschillende scenario's worden de onzekerheden van de opbouw van de ondergrond in kaart gebracht.

De eerste analyse van de overstromingskans door geotechnische instabiliteit kan worden uitgevoerd met het SOS. Is de overstromingskans door geotechnische instabiliteit groter dan de eis en wordt deze kans door één ondergrondscenario bepaald, dan is aanvullend onderzoek nodig om scenario's uit te sluiten of te bevestigen. Het aanvullende onderzoek leidt vaak ook tot verfijnen van de vakindeling.

Bij het lokaal aanscherpen van de SOS-schematisatie, moet een balans gevonden worden tussen de ruimtelijke variatie van bodemlagen en de onderzoeksdichtheid van het beschikbare grondonderzoek.

Veel informatie over de algemene aspecten van het opstellen van een schematisering en het werken met de SOS is terug te vinden in de technische leidraad *katern Grondlichaam en Ondergrond* en in het *katern Geotechnische Instabiliteit onder "karakteriseren van dijklichaam en ondergrond"*.

4.2.4 *Geotechnische parameters en gedrag van de grond*

Gedrag van de grond bij afschuiven

Bij het berekenen van de kans op afschuiven, moet er worden gekozen voor een model dat het grondgedrag beschrijft (constitutief model) en een rekenmodel waarmee de respons van het gehele grondlichaam op den belasting kan worden berekend (glijvlakmodel). Voor het constitutief model wordt bij het ontwerp en de beoordeling van waterkeringen in de basis gebruik gemaakt van het zogenaamde Critical State Soil Mechanics (CSSM) model. In artikel '*Schuifsterkte CSSM model*' in de Technische leidraad, *katern Geotechnische Instabiliteit* wordt een toelichting

gegeven op dit model en de benodigde parameters. Binnen het CSSM model bepalen de volgende aspecten de schuifsterkte:

- Gedraineerd of ongedraineerd gedrag.
- Normaal geconsolideerd of overgeconsolideerd gedrag.
- De pieksterkte of de critical state sterkte (of ultimate state sterkte).

In het artikel '*Keuze gedraineerd of ongedraineerd grondgedrag*' in de Technische leidraad is beschreven op basis van welke overwegingen de keuze tussen beide modelleringen wordt gemaakt.

Voor gedraineerd gedrag wordt het Mohr-Coulomb model gebruikt (zie artikel '*Gedraineerde schuifsterkte*' in de Technische leidraad). Bij gedraineerd gedrag is het niet-associatief modelleren van de schuifsterkte een aandachtspunt. Hierop wordt ingegaan in het artikel '*Bepaling hoek van inwendige wrijving*' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

Voor ongedraineerd gedrag wordt gebruik gemaakt van het SHANSEP-model (zie artikel '*Ongedraineerde schuifsterkte*' in de Technische leidraad). In het artikel '*Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkteparameters*' in de Technische leidraad is beschreven op welke wijze de parameters van het SHANSEP-model bepaald kunnen worden (inclusief de invloed van overconsolidatie).

Het artikel '*Piek-schuifsterkte versus grote-rek-schuifsterkte*' geeft aanwijzingen voor de keuze over het gebruik van pieksterkte of critical state sterkte.

Zandige klei en siltige klei met hoge volumegewichten ($\gamma_{nat} > 17$ à 18 kN/m^3) blijkt ander gedrag bij ongedraineerd afschuiven te vertonen dan klei met lagere volumegewichten: er is sprake van sterk dilatant gedrag, ongeacht de mate van overconsolidatie (*OCR*) en vaak ook bij normaal geconsolideerde condities. De modellering van deze zogenaamde "Transitional soils" vraagt specifieke aandacht en is beschreven in het artikel '*Ongedraineerde schuifsterkte van zware zandige siltige klei*' in de Technische leidraad, katern Geotechnische stabiliteit.

Geotechnische parameters voor afschuiven

Er zijn technische artikelen beschikbaar (zie

Tabel 4) die een toelichting geven op de fysische achtergrond, het toepassingsgebied en de wijze van bepaling van elke parameter.

Voor de geotechnische parameters kunnen voor de eerste analyse representatieve waarden uit de literatuur worden gebruikt als er geen lokale proevenverzameling beschikbaar is om de parameters uit af te leiden. Deze waarden zijn over het algemeen conservatief. Als blijkt dat het mechanisme niet dominant is voor de faalkans van de waterkering dan is het gebruik van conservatieve waarden geen probleem. Als het mechanisme wel dominant is voor de faalkans dan dienen de waarden te worden afgeleid uit geotechnisch veld- en laboratoriumonderzoek.

Verder is het van belang dat de juiste waarden worden gebruikt voor semi-probabilistische en probabilistische berekeningen. Voor semi-probabilistische berekeningen worden karakteristieke waarden gebruikt (de waarden met een statistische onderschrijdingskans van 5%). Bij probabilistische berekeningen gaat het om het type kansverdeling, het gemiddelde en de standaarddeviatie van de parameters (stochasten).

Tabel 4: Overzicht artikelen geotechnische parameters afschuiving

Parameter en titel artikel in technische leidraden	Toelichting
Cohesie van grond	
Hoek van inwendige wrijving	In het artikel worden karakteristieke ondergrenswaarden gegeven voor de hoek van inwendige wrijving van verschillende grondsoorten.
Bepaling hoek van inwendige wrijving uit metingen	Inclusief informatie over associatief en niet-associatief gedrag.
Sterktetoename component m	In het artikel worden standaardwaarden genoemd en hoe de waarde bepaald kan worden op basis van laboratoriumonderzoek.
Schuifsterkte in CSSM model	Beschrijft het zogenaamde Critical State Soil Mechanics (CSSM) – model
Gedraineerde schuifsterkte	
Ongedraineerde schuifsterkte	
Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkte parameters	
Ongedraineerde schuifsterkte van zware zandige ziltige klei	Dit artikel gaat in op zogenaamde “transitional soils”
Ongedraineerde sterkte bepalen uit correlaties met sonderingen	
Ongedraineerde sterkte bepalen uit gebied specifieke correlaties met sonderingen	
Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S	In het artikel worden standaardwaarden genoemd
Voorbeelden bepaling ongedraineerde schuifsterkte ratio S	
Grensspanning, OCR en POP	Bepaling van de mate van overconsolidatie. In het artikel worden standaardwaarden genoemd.
S_u en POP bepalen uit één sondering	
S_u en POP bepalen uit meerdere sonderingen	
Grensspanning, OCR en POP uit schuifsterkteparameters afgeleid uit sonderingen	
Grensspanning in het ontwerp	
Grondgedrag en rol van in situ toestand	
Gedraineerd/Ongedraineerd gedrag	Geeft aanwijzingen voor de keuze tussen modellering van gedraineerd of van ongedraineerd bezwijkgedrag
Ruimtelijke variabiliteit van de sondeerweerstand	

4.2.5

Waterspanningen

Het schematiseren van de waterspanningen hangt samen met de ondergrond en dijkopbouw, de geohydrologische eigenschappen en de belastingsituatie. De schematisering bestaat uit de ligging van het freatisch vlak en stijghoogte in een of meer watervoerende pakketten. De schematisering wordt idealiter opgesteld voor een dagelijkse situatie en de hydraulische belasting. Hiermee kan in meer detail het effect van de hogere waterspanningen door de hydraulische belastingen inzichtelijk worden gemaakt.

Bij de dagelijkse condities wordt rekening gehouden met de buitenwaterstand, het polderpeil, de ligging van het freatisch vlak en de indringing van de buitenwaterstand in de watervoerende lagen onder de waterkering.

Bij de schematisering van de extreme conditie wordt rekening gehouden met verhoging van de freatische lijn, indringing van hoge stijghoogtes in deklagen en het optreden van opdrijven en/of opbarsten van de deklaag (zie artikel 'Opdrijven en opbarsten'). Daarnaast wordt rekening gehouden met de invloed van significante golfoverslag (zie artikel 'Significante overslag' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit).

In het artikel 'Schematiseren van de waterspanningen' is een stappenplan opgesteld dat gevolgd kan worden. Dit geeft de belangrijkste aspecten van een schematisering per type waterkering weer. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de belangrijkste artikelen uit de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit waarin relevante informatie staat voor het schematiseren van waterspanningen.

Tabel 5: Artikelen schematiseren waterspanningen in Technische Leidraad katern Geotechnische Instabiliteit

Onderwerp (= titel artikel technische leidraad)	Toelichting
Schematiseren van de waterspanningen	Dit artikel geeft een stappenplan om waterspanningen bij dijken te schematiseren.
Schematiseren waterspanningen stap 1	Het doel van dit artikel is hulp bieden bij het vaststellen van een goede systeembeschrijving.
Schematiseren waterspanningen stap 2	Het doel van dit artikel is het maken van een overzicht van alle relevante situaties waarvoor een schematisering van de waterspanningen nodig is.
Schematiseren waterspanningen stap 3	Het doel van stap 3 is het kwantitatief uitwerken van de beoogde waterspanningsschematisering voor de in stap 2 vastgestelde situaties.
Veilige schematisatie freatisch vlak	Schematiseren m.b.v. één van de vier standaardgevallen (1A, 1B, 2A of 2B), die – bij het ontbreken van geavanceerde studies of metingen - voldoende betrouwbaar (veilig) worden geacht voor nagenoeg alle situaties. Niet toepasbaar voor situaties met overloop en golfoverslag groter dan 0,1 l/s/m. Deze schematisaties zijn ook bruikbaar voor het ontwerpen.
Schematiseren van het freatisch vlak bij golfoverslag	Wijze van schematiseren i.g.v. een significant golfoverslagdebiet.
Veilige schematisatie stijghoogten	Op basis van standaard leklengtes (stationair).
Indringingslaag	Afstand tussen onderkant deklaag en het niveau waarop het hoogwater geen significante invloed meer heeft.
Berekenen waterspanningen	Vertalen van metingen naar modelinvoer (extrapolatie van data).
Schematiseren stijghoogteverloop na opdrijven	Invloed van opbarsten op het verloop van de stijghoogte (grenspotentiaal).

Waternet Creator in Riskeer en D-Stability

De Waternet Creator (in Riskeer en D-Stability) maakt een standaardschematisering van de waterspanningen in en onder een dijk op basis van een aantal kenmerken die door een specialist worden ingevoerd. Deze kenmerken kunnen eenvoudig geïjkt worden aan de hand van waterspanningsmetingen. De schematisatie van de waterspanningen is (deels) gekoppeld aan de opbouw van de ondergrond. De Waternet Creator onderscheidt vier typen situaties: een zand- of een kleidijk op een cohesieve of op een zandondergrond. Nadere informatie over de benodigde invoer en de werking van de Waternet Creator staat in de gebruikershandleiding van D-Stability. De Waternet Creator is niet toepasbaar voor situaties met overloop en golfoverslag groter dan 0,1 l/s/m omdat de dijk dan van bovenaf verzadigt.

Schematiseren op basis van metingen en onderzoek

Het is ook mogelijk om op basis van eerdere beoordelingen, geohydrologisch onderzoek en/of meetnetten de waterspanningen te schematiseren. Hierbij zijn er wel een aantal specifieke aandachtspunten beschreven in het artikel '*Valkuilen bij interpreteren waterspanningsmetingen*' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

4.3 Berekeningen voor de eerste analyse

4.3.1 Modellen en berekeningen van de doorsnede faalkans per mechanisme

Voor elk geotechnisch faalmechanisme is hieronder een korte toelichting gegeven op aandachtspunten bij het rekenmodel. Eerst wordt kort ingegaan op de verschillende analysemogelijkheden om tot een faalkans te komen (semi-probabilistisch, probabilistisch) en op de deterministische methodes die voorlopig nog gebruikt kunnen worden voor afdrukken van de bekleding en uitspoelen.

Semi-probabilistische berekening

Bij een semi-probabilistische berekening wordt middels een controle met rekenwaarden aangetoond dat aan de vereiste faalkans voor een bepaald mechanisme wordt voldaan. De rekenwaarden worden gevonden door partiële veiligheidsfactoren toe te passen op de karakteristieke waarden van parameters.

Voor de partiële veiligheidsfactoren wordt onderscheid gemaakt in de volgende typen:

- Modelfactoren: voor het meenemen van onzekerheden in de voorspellende waarde van het glijvlakmodel en schuifsterktemodel.
- Materiaalfactoren: voor het meenemen van onzekerheden in de grondparameters.
- Schematiseringsfactor (bij ontwerp): voor het meenemen van de onzekerheid in de schematisering (bijvoorbeeld: opbouw van de dijk, de ondergrond, stijghoogte etc.). Bij een beoordeling is de schematiseringsfactor gelijk aan 1,0 en wordt gerekend met (ondergrond)scenario's.
- Schadefactor: beschrijft de relatie tussen de veiligheidsfactor en het vereiste betrouwbaarheidsniveau van de doorsnede.

In het artikel '*Model- en veiligheidsfactoren*' in het katern *Geotechnische instabiliteit* zijn de actuele waarden en de wijze van bepaling van de verschillende factoren te vinden. Voor faalkansanalyses binnen WBI en BOI is de kalibratie zodanig uitgevoerd dat de materiaalfactoren gelijk zijn aan 1,00 (zie Deltares 2017c en Rijkswaterstaat, 2017). Hierbij wordt wel opgemerkt dat deze waarden alleen geldig

zijn bij initieel falen en jaarkansen en formeel gesproken niet in een context van vervolgmechanismen met conditionele kansen.

De relatie voor de schadefactor is niet altijd bruikbaar. Zo is de formule bijvoorbeeld niet geldig bij significante overslag of bij hele kleine of hele grote betrouwbaarheidsniveau 's (beta's). Daarnaast heeft de afgeleide kalibratieformule veel ruis, doordat er een grote spreiding is in de relatie tussen veiligheidsfactor en betrouwbaarheid. Voor meer informatie wordt verwezen naar (Deltares, 2017c). In zulke gevallen is een probabilistische berekening (of een gevoeligheidsanalyse) noodzakelijk.

Probabilistische berekening

Bij een probabilistische berekening wordt een grenstoestandsfunctie gebruikt. Zie voor meer informatie hierover in het artikel '*Betrouwbaarheid*' van de technische leidraad katern Veiligheidsanalyse. De analyse wordt met dezelfde rekenmodellen en parameters uitgevoerd als de semi-probabilistische analyse, maar levert direct de faalkans. Een belangrijk verschil is dat de parameters worden beschreven als een stochast en er daardoor ook informatie nodig is over de statistische verdeling van de parameters.

Meer informatie over de stochasten en de keuze voor statistische verdelingen voor geotechnische instabiliteit is opgenomen in de kalibratiestudie voor het WBI (Rijkswaterstaat, 2017 en Deltares, 2017c).

Een probabilistische analyse van geotechnische instabiliteit wordt uitgevoerd met een first-order-reliability-method (FORM) of Monte Carlo (importance sampling) berekening. Deze berekeningen zijn voor het mechanisme afschuiven geïmplementeerd in D-Stability. Voor de andere mechanismen is maatwerk nodig.

Deterministische berekeningen

Tot slot zijn er nog de klassieke, deterministische berekeningen. Deze lijken in eerste instantie op de semi-probabilistische methoden. Ook deze methoden voeden een grenstoestandsfunctie met waarden van de belastingen en de sterkte-eigenschappen. Vaak wordt daarbij ook een veiligheidsfactor gebruikt. Een essentieel verschil tussen deze twee methoden is dat een expliciete relatie met faalkanseisen bij de deterministische methoden ontbreekt.

Deterministische regels zijn ervaringsregels of regels die gebaseerd zijn op de subjectieve oordelen van experts. Voor de gebeurtenissen afdrukken van de bekleding en uitspoelen is geen semi-probabilistisch rekenmodel beschikbaar, maar alleen deterministische rekenregels. Als blijkt dat deze gebeurtenissen dominant zijn voor de faalkans van de kering dan moet hiervoor een nadere analyse worden uitgevoerd.

De klassieke, deterministische toets- en ontwerpregels zullen steeds vaker worden vervangen door probabilistische instrumenten en semi-probabilistische voorschriften. De ontwikkeling hiervan kost tijd en daarom zullen de oude, deterministische regels voor enkele faalmechanismen nog tijdelijk worden gebruikt.

Rekenmodel afschuiven langs diep glijvlak

Bij de eerste analyse zal doorgaans met een semi-probabilistische glijvlakberekening de stabiliteitsfactor worden bepaald. Deze berekening kan worden uitgevoerd met D-Stability of Riskeer. Op basis van de stabiliteitsfactor en de kalibratiere relatie uit het WBI2017, kan dan de faalkans van de doorsnede worden geschat (zie paragraaf

4.3.2). De glijvlakberekening kan ook probabilistisch worden uitgevoerd (POVM, 2020). Deze berekening vraagt andere input (bijvoorbeeld de statistische verdeling van parameters) en meer rekencapaciteit, maar heeft als voordeel dat de faalkans direct uit de berekening volgt.

Glijvlakmodellen

Een beschrijving van de beschikbare glijvlakmodellen is opgenomen in het artikel 'Rekenmodellen voor macrostabiliteit' in het katern *Geotechnische Instabiliteit*. Er moet worden gekozen tussen de modellen:

- Bishop
- LiftVan
- Spencer

De modellen hebben voor- en nadelen en zijn voor verschillende situaties in meer of mindere mate geschikt. Onzekerheden in het model worden verdisconteerd via de zogenaamde modelfactor (zie artikel 'Model- en veiligheidsfactoren' in de technische leidraad katern *Geotechnische Instabiliteit*).

Het model Bishop beschouwt alleen cirkelvormige glijvlakken en dat kan voor complexere situaties een te grote vereenvoudiging zijn. Bishop itereert het horizontale evenwicht niet uit, wat kan leiden tot foutieve beoordelingen voor lichte (veen)kades. Bij opdrijven, wordt het model LiftVan of Spencer gebruikt, als sprake is van opbarsten wordt tevens het model Spencer of LiftVan gebruikt waarbij de schuifsterkte in de opbarstzone wordt gereduceerd tot 0 kN/m².

Bij de interpretatie van de resultaten van een glijvlakberekening is het belangrijk om te verifiëren of het berekende glijvlak daadwerkelijk maatgevend is en de vrijheid voor het "zoeken van het maatgevende glijvlak" niet is beperkt. Dit kan bijvoorbeeld door te controleren of het middelpunt van een glijcirkel niet aan de rand van het zoekgrid ligt. Consistente antwoorden bij verschillende modellen geven de adviseur een controlemiddel om de resultaten te verifiëren.

Voor D-Stability wordt gewerkt aan de implementatie van een 'safety overview'. Deze zal beschikbaar zijn vanaf versie 2023.02 Hiermee kan niet alleen het glijvlak met de laagste stabiliteitsfactor worden weergegeven, maar ook de resultaten van andere berekende glijvlakken. Het kan zijn dat een glijvlak een net iets hogere stabiliteitsfactor heeft dan het maatgevende, maar wel tot een veel grotere afschuiving leidt. Met deze optie kan dit worden onderzocht en inzichtelijk worden gemaakt.

Het model Uplift-Van kan soms niet goed werken met schuine grondlagen (uitwiggen). Als het nodig is om de grond daarmee te schematiseren, dan kan eventueel een gevoeligheidsanalyse met een ander model zoals Spencer of kan een eindige elementenberekening worden uitgevoerd.

In de nadere analyse kan het initiële mechanisme verfijnder worden beschouwd met een eindige elementen analyse (EEM) of zelfs met een material point method (MPM). De MPM wordt op dit moment vrijwel alleen voor onderzoeksdoeleinden gebruikt. EEM-berekeningen (eventueel 3-dimensionaal) zijn voor de praktijk geschikter. In geval van een complexe geometrie kan ook al in de eerste analyse gebruik worden gemaakt van EEM-berekeningen. Een EEM berekening is altijd noodzakelijk wanneer er sprake is van de interactie tussen grond en een constructief element zoals een damwand.

Opdrukken van het achterland: opdrijven en opbarsten

In die gevallen waar ter plaatse van het achterland een relatief slecht doorlatend pakket (deklaag) aanwezig is boven een watervoerende zandlaag dient te worden nagegaan of er een potentieel gevaar bestaat voor opdrukken van dit slecht doorlatende pakket. Dit als gevolg van hoge waterspanningen/ stijghoogten van het grondwater in deze zandlaag. Daartoe moet de grenspotentiaal worden berekend en vergeleken met de daadwerkelijk optredende waterspanning op het grensvlak van watervoerende laag en deklaag om de "opdrukveiligheid" te bepalen, zie verder het artikel '*Berekenen van de grenspotentiaal*' in de Technische leidraad. Bij de berekening hiervan moet rekening gehouden worden met de invloed van een dunnere deklaag bij een teensloot.

Bij een opdrukveiligheid kleiner dan 1,2 wordt een opbarstzone, gedefinieerd waarop een sterktereductie van 100% in het stabiliteitsmodel wordt toegepast als de deklaagdikte kleiner is dan 4 meter. Lagen dikker dan 4 meter behouden in het model hun volledige sterkte.

In het artikel '*Rekenen aan afschuiven bij opdrukken achterland*' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit wordt hier verder op ingegaan. De lengte van de opbarstzone hangt af van de relatieve deklaagdikte en de geohydrologische eigenschappen van de ondergrond. Vaak wordt een standaardmaat van 3 of 4 maal de dikte van de deklaag gehanteerd. Maar de lengte van de opdrukstaaf kan ook worden berekend voor stationaire en niet-stationaire situaties. Dit is verder beschreven in het artikel '*Berekenen opdrijf lengte stationair*' en het artikel '*Berekenen opdrijf lengte niet stationair*' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

Bij een opdrukveiligheid kleiner dan 1,0 wordt de stijghoogte in de watervoerende laag begrensd, zodat deze in evenwicht is met het gewicht van de opgedrukte deklaag (de grenspotentiaal).

Significante golfoverslag

Bij extreme condities kan er sprake zijn van significante golfoverslag. Als het overslaande water de dijk kan indringen, zal het freatisch vlak stijgen. Dit kan een negatief effect hebben op de stabiliteit. De mate waarop dit gebeurt, is niet alleen afhankelijk van de belasting (golfhoogte, duur, waterstandsverloop) maar ook van de dijkopbouw (porositeit, verzadigingsgraad, doorlatendheden). Zie hiervoor het artikel '*Schematiseren van het freatisch vlak bij golfoverslag*' in het katern *Geotechnische instabiliteit*.

Rekenmodel afschuiven ondiep glijvlak

Ondiepe glijvlakken tot minder dan circa 1 meter diep, kunnen worden berekend met dezelfde rekenmodellen als diepe glijvlakken. Met de kanttekening dat de modellen, en de veiligheidsfilosofie, niet zijn gekalibreerd voor dergelijke ondiepe glijvlakken. Dit betekent dat de resultaten van een semi-probabilistische analyse met terughoudend gebruikt moeten worden. Het model van Spencer leidt bij deze analyses tot de meest betrouwbare resultaten omdat dit model glijvlakken evenwijdig aan het talud (die het meest waarschijnlijk zijn bij dit type afschuivingen) het beste kan benaderen. Het is mogelijk om een probabilistische berekening uit te voeren, maar ook hierbij blijven de beperkingen in de modellering van het grondgedrag van de binnenbekleding geldig. Omdat een ondiepe afschuiving zonder vervolgemechanismen niet leidt tot falen van de kering hoeft deze onzekerheid niet dominant te zijn bij de bepaling van de faalkans van de kering. In

de nadere analyse van vervolprocessen (paragraaf 5.2) worden hiervoor handreikingen gegeven.

Specifiek voor het modelleren van het afschuiven van de bekleding kan het nodig zijn om een extra glijvlakberekening te maken waarbij de vorm van het glijvlak wordt opgelegd langs de rand van de bekleding. Dit kan met het glijvlakmodel Spencer.

De schuifsterkte van de binnenbekleding is op het moment van schrijven nog onderwerp van onderzoek. Het is daardoor op dit moment niet mogelijk om hiervoor een waarde vast te stellen die voor alle situaties toegepast kan worden. In het artikel '*Rekenmodellen afschuiven en/of afdrukken van de bekleding en uitspoelen*' in de Technische leidraad, katern geotechnische stabiliteit, worden actuele inzichten over de schuifsterkte opgenomen.

Rekenmodel afdrukken binnenbekleding

Voor het rekenmodel voor afdrukken van de binnenbekleding wordt verwezen naar het artikel 'Rekenmodel afdrukken bekleding' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

Dit onderwerp wordt nog onderzocht. In afwachting van de resultaten wordt in het rekenmodel de bijdrage van de schuifsterkte van de bekleding niet meegenomen. Er wordt alleen gekeken naar het loodrecht evenwicht van een lamel op basis van gewicht.

Rekenmodel uitspoelen

Voor het rekenmodel uitspoelen van zand door de binnenbekleding wordt verwezen naar het artikel 'Rekenmodel uitspoeling van zand door bekleding' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

4.3.2

Bepaling van de doorsnedefaalkans

Bij een probabilistische berekening volgt de doorsnedefaalkans rechtstreeks uit de berekening. Als een semi-probabilistische berekening wordt uitgevoerd, volgt een stabiliteitsfactor die voor de eerste analyse vervolgens moet worden omgerekend naar een doorsnede faalkans. Dit kan met de formules die zijn opgenomen in het artikel 'Schadefactor voor macrostabiliteit' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit.

Formeel zijn deze formules alleen gekalibreerd voor initiële mechanismen en jaarkansen. Daarom kunnen ze niet zonder meer ingezet worden voor het kwantificeren van vervolmechanismen met conditionele kansen in de nadere analyse. Wel kunnen de formules worden gebruikt om in te schatten of een mechanisme waarschijnlijk wel of niet zal optreden als vervolmechanisme.

Niet bij elk diep glijvlak faalt de waterkering. In het artikel 'Vulvolmechanismen na binnenwaarts afschuiven langs een diep glijvlak' in de technische leidraad katern Geotechnische Instabiliteit worden handreikingen gegeven om hiermee om te gaan. Deze analyse van vervolmechanismen vindt plaats in de nadere analyse (zie paragraaf 5.2).

Voordat de waterkering faalt na een ondiepe afschuiving of na het afschuiven van de binnenbekleding zijn er altijd vervolmechanismen nodig. Als uit de eerste analyse

blijkt dat deze gebeurtenis dominant is, dan moet altijd een nadere analyse uitgevoerd worden voor een geloofwaardige overstromingskans.

4.3.3

Vertaling van doorsnede faalkans naar faalkans per dijkvak en per traject

Na een bepaling van de doorsnedefaalkansen per faalmechanisme, moeten deze nog samengevoegd worden naar een faalkans per faalmechanisme op vakniveau en tot een overstromingskans op trajectniveau. Dit wordt assembleren genoemd. In Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse staat hiervoor een algemene beschrijving. Aandachtspunten die vooral voor geotechnische instabiliteit belangrijk zijn, worden hieronder toegelicht als toevoeging op hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse.

Lengte-effecten

Algemene overwegingen voor het meenemen van lengte-effecten staan in Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse.

Voor geotechnische instabiliteit zijn hierbij een aantal overwegingen:

- Schematiseren. Voor veel dijkvakken is het niet eenvoudig om representatieve, statistisch homogene vakken te modelleren. Dit is wel vaak de achterliggende gedachte bij de schematiseringstheorie. Tenzij er hele kleine vakken worden geschematiseerd met als gevolg veel rekeninspanning. Als alternatief kan worden gedacht aan het schematiseren van de zwakste plek met lengte-effect factor $N = 1$ (let op: gebruik niet een combinatie van de zwakste parameters terwijl deze niet gezamenlijk op 1 plek voorkomen). Dan moet er wel voldoende zekerheid zijn dat andere delen binnen het vak niet bijdragen aan de faalkans. Of kies grotere vakken en houd er bij de assemblage rekening mee dat maar een klein deel bijdraagt aan de overstromingskans, bijvoorbeeld als één deel van het vak significant sterker is door opritten. De relatie tussen schematiseren en lengte-effecten blijft een aandachtspunt omdat het vaak pas achteraf en na veel onderzoek duidelijk is of het gaat om een zwakste doorsnede of een representatieve homogene doorsnede. Een specifieke overweging voor afschuiven langs een diep glijvlak is dat die afschuifvlakken een bepaalde lengte nodig hebben om tot ontwikkeling te komen, orde 30 à 100 meter. Bij het schematiseren moet hier rekening mee worden gehouden. Hoe hier precies mee moet worden omgegaan, wordt nog onderzocht.
- Ontwerpen versus beoordelen. Het is gangbaar om op doorsnedekans te ontwerpen. Hierin wordt de trajecteis vertaald naar een doorsnede-eis op basis van lengte-effect en faalkansbegroting. De uitgangswaarden voor het lengte-effect hierin zijn conservatief. Hierdoor kan een andere aanpak tot scherpere resultaten leiden. Voor beoordelen wordt eerst de doorsnedekans geassembleerd naar een vakkans met verschillende mogelijkheden om het lengte-effect mee te nemen. Voor het lengte-effect binnen het vak is optie 2 (zelf te bepalen a) uitgangswaarde voor b) uit de handleiding de meest voor de hand liggende. Voor het combineren van de vakken tot een trajectkans, zijn er meer opties waartussen de gebruiker kan kiezen. De optie 1 (aanname onafhankelijkheid tussen vakken) is voor stabiliteit de meest logische keuze.
- Probabilistische stabiliteitsanalyses geven een scherper veiligheidsbeeld. Deze worden goed ondersteund in verschillende software tools zoals D-Stability, en zijn daarom vaak een optie voor aanscherping. Probabilistische analyses maakt het mogelijk een lengte effect lokaal af te leiden op basis van de aanwezige correlaties en correlatielengtes. Deze optimalisaties zorgen voor een nadere bepaling van de vakkans of de trajectkans en niet van de doorsnedekans. In de regel liggen optimalisaties van het lengte effect in de orde 3-10 op trajectniveau..

Bepaling lengte-effecten voor afschuiven diep glijvlak

De uitgangswaarde voor lengte-effect factoren voor de vertaling van trajecteis naar doorsnede eis in het ontwerp zijn: $a = 0,033$, $b = 50$ m. Vooral a kan per traject nader ingeschat worden. De uitgangswaarde voor de faalkansbegroting voor stabiliteit is meestal $0,04$, maar kan project-specifiek aangepast worden.

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

- Lengte-effect binnen vak optie 2: waarde voor a bij voorkeur zelf ingeschat, grove inschatting van bijdragende lengte, waarde voor b de uitgangswaarde. Voor de inschatting van a moet gekeken worden naar welk deel van de kering een significante bijdrage levert aan de kans. Als slechts de helft van het vak een zwakke grondlaag heeft (en de geometrie verder gelijk is), kan $a = 0,5$ worden gekozen. Zonder goed inzicht in de ruimtelijke variatie in het vak geldt als uitgangswaarde $a = 1$.
- Lengte-effect tussen vakken optie 1: beginnen met keuze onafhankelijkheid
Een speciaal geval is stabiliteit als gevolg van overslag. Als overslag domineert in de faalkans voor instabiliteit, dan zijn kleinere lengte-effecten van overslagmechanismen van toepassing.

Bepaling lengte-effecten voor overige geotechnische mechanismen

Voor de overige geotechnische mechanismen (afschuiven ondiep glijvlak/binnenbekleding, afdrukken binnenbekleding, uitspoelen) is nog geen werkwijze vastgesteld voor het bepalen van de lengte-effecten. Op het moment van schrijven wordt hiernaar nog onderzoek verricht. Voor deze mechanismen is dan ook altijd een nadere analyse volgens hoofdstuk 5 nodig voor het bepalen van een geloofwaardige overstromingskans.

5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

5.1 Inleiding

Na de eerste analyse van de overstromingskans, is het duidelijk welke initiële mechanismen de grootste invloed hebben op de overstromingskans en daarmee welke faalpaden verder geanalyseerd moeten worden. Het doel is om te komen tot een geloofwaardige overstromingskans. In veel gevallen zal deze analyse leiden tot een aanscherping van de bijdrage van de dominante faalpaden aan de overstromingskans. Er zijn vier aanscherpingen gedefinieerd (Rijkswaterstaat, 2023a):

1. Uitwerken van vervolgprocessen.
2. Verfijnder uitwerken van initiële mechanismen.
3. Meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen.
4. Probabilistisch combineren van faalgebeurtenissen op trajectniveau.

Voor aanscherpingen 3 en 4 wordt verwezen naar de generieke handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a).

5.2 Uitwerken van vervolgprocessen

In de eerste analyse is aangenomen dat vervolgprocessen (vervolgmechanismen) na het initiële mechanisme per definitie tot falen van de kering leiden. In de nadere analyse wordt voor de dominante faalpaden beoordeeld of dit terecht is. Hiervoor worden de vervolgmechanismen nader geanalyseerd en zoveel mogelijk gekwantificeerd. Het kan nodig zijn om hiervoor aanvullend veld- of laboratoriumonderzoek uit te voeren en/of geavanceerdere kennis en rekenmodellen in te zetten. In sommige gevallen kan het ook nuttig zijn om bij de vervolgprocessen naar tijdsafhankelijkheid te kijken.

Voor de vervolgprocessen na een binnenwaartse afschuiving zijn in het kader Geotechnische Instabiliteit van de technische Leidraden enkele artikelen opgenomen:

- Vervolgmechanismen na binnenwaarts afschuiven langs diep glijvlak.
- Controle van de binnenwaartse stabiliteit na een binnenwaartse afschuiving.
- Controle op uitspoelen na een binnenwaartse afschuiving.
- Controle van erosie kruin en binnentalud na een binnenwaartse afschuiving.

De informatie uit deze artikelen kan ook worden gebruikt voor het beschouwen van de vervolgprocessen na het afschuiven of afdrukken van de bekleding of als uitspoelen als initieel mechanisme is geïdentificeerd.

Het kwantificeren van de (voorwaardelijke) kans op falen als gevolg van vervolgmechanismen is hierbij een belangrijke stap. De werkwijze is beschreven in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a).

5.2.1 *Beheers- en calamiteitenmaatregelen*

Bij de bepaling van de overstromings- of faalkansen wordt alleen rekening gehouden met gepland menselijk ingrijpen. Hierdoor kan bij de bepaling van de overstromings- of faalkans rekening worden gehouden met – geplande – noodmaatregelen. Er zijn twee soorten maatregelen: preventieve en reactieve.

Preventieve maatregelen worden ingezet voorafgaand aan een hoogwater, zoals hoogwaterprotocollen en/of peilopzet. Reactieve maatregelen worden tijdens een

hoogwater ingezet, zoals opkisten van zand meevoerende wellen, of de aanleg van noodbermen.

Het meenemen van deze geplande maatregelen kan leiden tot een aangescherpte faalkans.

5.3 Verfijnder uitwerken initieel mechanisme: gebruik aanvullende informatie

Wordt de faalkans vanuit de eerste analyse sterk bepaald door (statistische) onzekerheid of door het ontbreken van informatie dan kan aanvullend onderzoek en het verzamelen van meer informatie leiden tot een verfijndere berekening van de faalkans door het initiële mechanisme.

Vaak zal hiervoor meer informatie worden verzameld over de samenstelling van de ondergrond en dijkopbouw én over het grondmechanisch en/of geohydrologisch gedrag van de kering. Deze informatie draagt dan vanuit het verhaal van de dijk bij aan een scherpere beoordeling van de mechanismen afschuiven, opdrukken en uitspoelen.

Voorbeelden voor het verfijnder uitwerken van de gebeurtenis **afschuiven diep glijvlak**:

- Vakindeling aanpassen aan de hand van nieuwe inzichten in de laagindeling van de ondergrond of geohydrologie;
- Verkleinen van onzekerheid over de schuifsterkte van de grond door aanvullend veld- en/of laboratoriumonderzoek;
- In rekening brengen van tijdseffecten in belastingen en respons van de waterkering;
- De doorlatendheid van de binnenbekleding nauwkeuriger onderzoeken om zo de infiltratiesnelheid bij golfoverslag en de ligging van het freatisch vlak in de waterkering beter te kunnen bepalen.

Voorbeelden van het verwerken van meer informatie voor **afschuiven ondiep glijvlak / afschuiven binnenbekleding**:

- Verwerken van informatie over dikte, gewicht en sterkte van de bekleding;
- Verwerken van informatie over de diepte van structuurvorming of meerdere te onderscheiden kleilagen;
- In rekening brengen van tijdseffecten in belastingen en respons van de waterspanningen in de dijkopbouw (freatisch vlak).

Voorbeelden van het verwerken van meer informatie voor **afdrukken binnenbekleding**:

- In rekening brengen van tijdseffecten in belastingen en respons van de waterspanningen in de dijkopbouw (freatisch vlak);
- Verwerken van informatie over dikte, gewicht en sterkte van de bekleding, vooral bij de teen van de dijk.

Voorbeelden van het verwerken van meer informatie voor **uitspoelen**:

- Verwerken informatie over schematisering dijkkern / aanwezige zand en kleilagen;
- In rekening brengen van tijdseffecten in belastingen en respons van de waterspanningen in de dijkopbouw (freatisch vlak).

5.4 **Verfijnder uitwerken mechanismen: geavanceerde modellen en rekentechnieken**

De derde optie is het toepassing van andere modellen en rekentechnieken bij het schatten van de (voorwaardelijke) kansen op gebeurtenissen (mechanismen).

Hiervoor worden de volgende mogelijkheden gegeven:

1. Grenstoestandmodellen en probabilistisch rekenen (paragraaf 5.4.1).
2. Benutten historische informatie (paragraaf 5.4.3)

5.4.1 *Grenstoestandmodellen en probabilistisch rekenen*

Grenstoestandmodellen geven de overgang tussen falen en niet-falen weer in model- of formulevorm. Bij geotechnische instabiliteit bestaan verschillende modellen om het grondgedrag te beschrijven. Deze kunnen dan ook leiden tot een verschillende beschrijving van de grenstoestand.

Voor het omgaan met onzekerheden, is probabilistisch rekenen in theorie de beste optie. Hiermee kunnen onzekerheden op een meer expliciete en exacte wijze worden meegenomen. Een probabilistische analyse vergt meer rekencapaciteit, maar levert extra inzicht op en daarmee vaak een geloofwaardiger inschatting van de faalkans.

Geavanceerde probabilistische rekentechnieken

Een voorbeeld van een probabilistische rekentechniek is een stabiliteitsanalyse op basis van een first-order-reliability-method (FORM). Bij deze methode wordt rondom een te verwachten ligging van een glijvlak een FORM analyse uitgevoerd met een betrouwbaarheidsindex (of faalkans) als resultaat (Deltares, 2017b). Door dit bij verschillende waterstanden te herhalen en de kans op een waterstand te verwerken (uitintegratie) kan de faalkans van de doorsnede worden afgeleid. Deze analyse kan worden uitgevoerd met dezelfde software en schematisatie (met uitzondering van de stochasten) als de semi-probabilistische analyse.

Het voordeel van een volledig probabilistische methode in plaats van een semi-probabilistische rekenregel is dat eventuele bias wordt vermeden. Ook weegt de kalibratie-onzekerheid van de partiële veiligheidsfactoren niet meer mee. Daarnaast geeft de uitkomst van de berekening aan welke parameters belangrijk zijn voor de faalkans en welke combinatie van parameterwaarden het meest waarschijnlijk leidt tot falen (ontwerppunt). Het nadeel van een volledig probabilistische methode is dat bij het schematiseren rekening gehouden moet worden met discontinuïteiten door opdrijven/opbarsten, het voorkomen van overslag en de selectie van het glijvlak dat - gegeven de waterstand - bepalend is voor de veiligheid (faaldefinitie). Deze stappen kunnen ook aanleiding zijn voor nieuwe onzekerheden (ten opzichte van de semi-probabilistische som) die meewegen in de veiligheid, maar dit hoeft niet per se. De schematisatie van de berekening is verder niet veel anders dan bij een semi-probabilistische schematisatie maar kost door het grotere aantal stappen meer tijd.

Naast FORM zijn ook andere rekentechnieken mogelijk zoals Monte Carlo of directional sampling (Jonkman ea, 2015). Het voordeel van de laatste methodes is hun robuustheid ten opzichte van FORM (kleinere kans op afwijkende uitkomsten). Het nadeel is de fors grotere rekentijd. Daarnaast zijn ook bij de vertaling van doorsnede naar dijktraject nog optimalisaties mogelijk, zie par. 8.2.4 van de handleiding Overstromingskansanalyse.

Fragility curves

Een fragility curve geeft het verloop van de faalkans van een dijkstrekking als functie van een belastingparameter zoals de waterstand. De fragility curve verschilt per faalmechanisme en hangt af van de sterkte-eigenschappen van de dijk. Hoe groter de onzekerheid over de sterkte, des te flauwer de fragility curve verloopt. De gevoeligheid of fragility is dan klein. Daarom verlopen de fragility curves voor geotechnische faalmechanismen vaak relatief flauw. Voor een faalmechanisme als overloop of golfoverslag verloopt de fragility curve meestal steil nabij de ontwerpwaterstand.

Fragility curves zijn nuttig om de faalkans bij een bepaalde waterstand te visualiseren. Hiermee kan het inzicht in de sterkte van de waterkering bij een bepaalde belasting vergroot worden. Ook kunnen ze gebruikt worden om, samen met de kansverdeling van de waterstand, een benadering te maken van de faalkans van de waterkering. Fragility curves kunnen zo een bruikbaar hulpmiddel zijn in de nadere analyse.

3-Dimensionale rekenmodellen

Met de rekenmodellen die zijn geïmplementeerd in D-Stability en Riskeer wordt een 2-dimensionale schematisering doorgerekend. In werkelijkheid is een afschuiving een 3-dimensionaal mechanisme. Bij de afleiding van grondparameters en de modelonzekerheden, is rekening gehouden met de vertaalslag van 2D naar een 3D rechte dijk. Soms heeft een dijk sterke krommingen waardoor aanvullende 3D-effecten een significante invloed kunnen hebben op de stabiliteit. Naast krommingen kunnen ook lokale geometrische afwijkingen of objecten aanwezig zijn, zoals op- en afritten, landhoofden, constructies, kopsloten, e.d. Ook in die situatie kan een 2D-benadering niet goed genoeg zijn.

Voor die situaties kan overwogen worden om een 3D Eindige Elementen Model (EEM) te gebruiken. Ook als meer inzicht in de vervormingen nodig is kan een (2D) EEM berekening uitkomst bieden. In de meeste gevallen is een 2D-schematisatie een goede benadering van de werkelijkheid. De dijk kan als oneindig uitgestrekt worden beschouwd als de rechte strekking een minimale lengte heeft van 2x de lengte van het te verwachten glijvlak loodrecht op de dijk.

- 5.4.2 *Afschuiven ondiep glijvlak / binnenbekleding, afdrukken binnenbekleding, uitspoelen*
 Voor deze initiële mechanismen zijn nog geen semi-probabilistisch en volledige probabilistisch gekalibreerde rekenmethode beschikbaar. Voor afdrukken binnenbekleding en uitspoelen zijn alleen deterministische modellen beschikbaar (zie paragraaf 4.3.1), waarin wordt beoordeeld of de rekenwaarde van de belasting kleiner is dan de rekenwaarde van de sterkte. Ook het lengte-effect en de kalibratie van de modelfactor zijn niet onderzocht voor deze initiële mechanismen. Voor een geloofwaardige inschatting van de overstromingskans, kan gebruik worden gemaakt van het analyseren van de vervolgmecanismen.

- 5.4.3 *Verfijndere analyse initieel mechanisme: benutten historische informatie*
 Vaak hebben waterkeringen al eerder hoge belastingen ondergaan en overleefd. Deze historische informatie kan gebruikt worden om de faalkans aan te scherpen (een zogenaamde Bayesiaanse update/bewezen sterkte).

In (Deltares, 2017a en POVM, 2020) is een methode gepresenteerd voor bewezen sterkte. Hiervoor moet een fragility curve van de historische situatie van de

observatie en de beoordelingssituatie worden gemodelleerd. Ook de verwachte correlatie tussen observatie en beoordeling (bijvoorbeeld grond sterkte wordt niet verwacht te veranderen in de tussentijd) moeten worden meegenomen. De twee fragility curves worden gebruikt om Monte Carlo samples van de sterkte af te leiden. Daarbij worden alle samples in de beoordelingssituatie verwijderd die niet waar kunnen zijn, omdat deze tot falen in het verleden hadden geleid. Dit resulteert in een update van de faalkans. Naast de methode met fragility points, kunnen ook de karakteristieken van de parameters worden aangepast, maar hier valt vaak minder winst uit te halen (Deltares, 2017a en POVM, 2020).

Vaak zijn de normatieve extreme condities veel zwaarder dan de opgetreden historische gebeurtenissen waardoor het effect van bewezen sterkte beperkt is. Voor keringen die in het verleden zwaar zijn belast en nu worden beschermd door dammen en stormvloedkeringen én een lage relatieve norm hebben is dit niet het geval. Hier lijkt potentie aanwezig, als ook de duur van de doorstane belasting tenminste even groot is als de belastingduur in maatgevende condities. Want, als de historische belasting maar kort was zegt dit weinig over een lange belasting bij een beoordelingssituatie.

Het gebruik van historische informatie aan de hand van de Bayesiaanse update is vooral geschikt voor afschuiven met diepe glijvlakken. De methode leent zich minder goed voor de initiële mechanismen afschuiven met ondiepe glijvlakken, afdrukken bekleding en uitspoelen, omdat historische gegevens van de ligging van het freatische vlak of overslag meestal niet beschikbaar zullen zijn. Ook voor diepe glijvlakken is de methode niet altijd succesvol; soms ontbreekt informatie over allerlei onzekerheden die grote invloed hebben in de Bayesiaanse update.

De meerwaarde van deze methode zal in de praktijk nog duidelijk moeten worden, en naar verwachting per geval verschillen.

5.5 Nadere analyse door 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 hebben voor het bepalen van de overstromingskans van primaire waterkeringen.

Vanuit het BOI-programma is een ontwikkel- en releasekalender opgesteld van de lopende en verwachte kennisontwikkeling.

Een aandachtspunt is dat de kennis met voldoende vertrouwen kan worden toegepast voor een geloofwaardige bepaling van de overstromingskans. Opgemerkt wordt dat nieuwe kennis niet altijd hoeft te leiden tot een lagere overstromingskans. Soms leidt nieuwe kennis juist tot een hogere faalkans, zoals bij droogte en graverij bijvoorbeeld. Aangeraden wordt om de kennisontwikkeling te bespreken in het werkatelier.

5.6 Kansen schatten op basis van expert judgement

In Nederland worden (overstromings)kansen vaak aan de hand van schematiseringen en rekenmodellen bepaald. Om deze modellen te kunnen toepassen, zijn schematiseringen van het gebied nodig, die door experts worden gemaakt op basis van de aanwezige gegevens. Naast deze gebieds- en modelgerelateerde kennis wordt in de literatuur van de risico-analyse 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). Deze methode heeft vooral meerwaarde in situaties waar modellen minder goed of minder makkelijk toepasbaar zijn. Bij SEJ wordt de inschatting van experts op gestructureerde wijze gekalibreerd, gewogen en omgezet tot een kans op een vooraf 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 geeft 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, forthcoming).

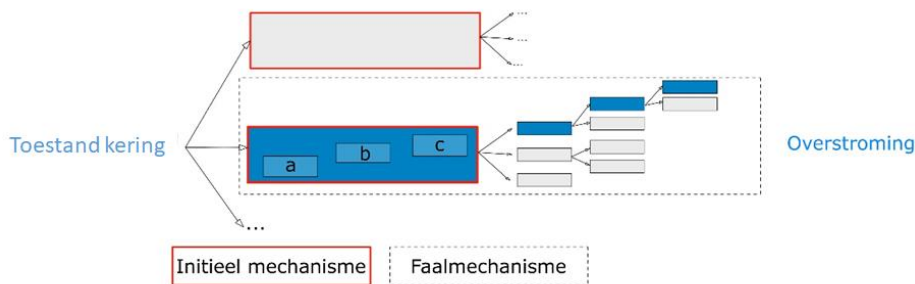
Bij het gebruik van expert judgement is het ook belangrijk om bias en doelredeneringen (zie par. 7.1 van de handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen) te vermijden.

Literatuur

- Adviesteam Dijkontwerp (2021). Rode draad nummer 3 *Werkwijze falen door macrostabiliteit*
- Adviesteam Dijkontwerp (2022a). Rode draad nummer 4 *Falen van bekleding op binnentalud*.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2017). *Factsheet KPR vakgrootte*.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2019). *Factsheet Macrostabiliteit bij golfoverslag*
- Rijkswaterstaat (2017). *WBI2017 Code Calibration Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment rules for the WBI2017*
- Rijkswaterstaat. (2023a). *Handleiding overstromingskansanalyse*.
- Rijkswaterstaat. (2023b). *Handleiding overstromingskansanalyse – Indirecte mechanismen*.
- Deltares. (2017a). Reliability updating for slope stability of dikes” (background report), 1230090-033
- Deltares. (2017b). *Handreiking Faalkansanalyse Macrostabiliteit, groene versie*.
- Deltares. (2017c). *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability*. 1230086-009-GEO-0030, 28 April 2017.
- Deltares (2022a). *Raamwerk voor analyse overstromingskans geotechnische instabiliteit van dijken*. 11208057-032-GEO-0001.
- Jonkman S.N. (2015), R.D.J.M. Steenbergen, O. Morales-Nápoles, A.C.W.M. Vrouwenvelder, J.K. Vrijling. *Probabilistic Design: Risk and Reliability Analysis in Civil Engineering*.
- Cooke R.M. (1991). *Experts in Uncertainty*. Oxford University Press.
- Meuse E.J. (forthcoming) *Estimating Discharge Extremes with experts*.
- Minister van Infrastructuur en Waterstaat. (2023). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2023 - Staatscourant Nr. 11307*.
- Krogt, M. van der, Schweckendiek, T., Kok, M. (2019). *Do all dike instabilities cause flooding?* Proc. 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil engineering, ICASP13 Seoul, South Korea, May 26-30.
- Remmerswaal, G., Vardon Ph. J., Hicks, M. (2021). *Evaluating residual dyke resistance using the Random Material Point Method*. Computers and Geotechnics. Volume 133, May 2021, 10403.
- POVM (2020). *POVM Publicatie Actuele Sterkte*.

Bijlage A Begrippenlijst

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



Figuur 13: 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 13</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 13 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 13 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 13 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 13 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 13 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 13 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>

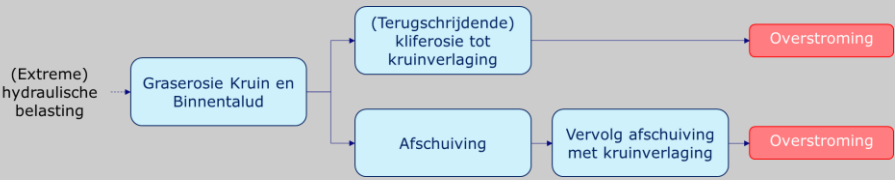
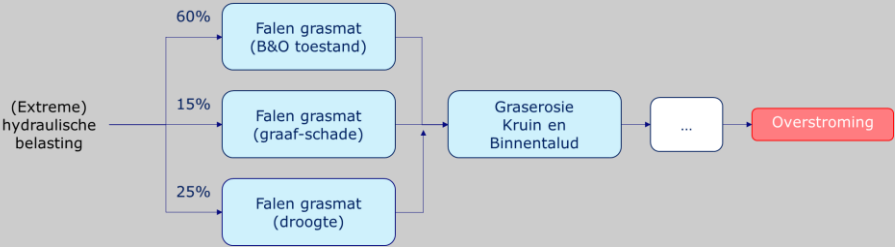
<p>Directe mechanismen</p>	<p>Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling. Directe mechanismen kunnen ook een vervolgmecanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</i></p>
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven Tabel 5.2 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling</i></p>
<p>Generieke faalmechanismen</p>	<p>Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke faalmechanismen. De generieke faalmechanismen die worden beschouwd in de overstromingskansanalyse zijn gebundeld rondom de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling.</p> <p><i>Voorbeeld van een generiek faalmechanisme gebundeld rond Grasbekleding erosie kruin en binnentalud als initieel mechanisme</i></p>  <pre> graph LR A["(Extreme) hydraulische belasting"] --> B["Graserosie Kruin en Binnentalud"] B --> C["(Terugschrijdende) kliferosie tot kruinverlaging"] B --> D["Afschuiving"] C --> E["Overstroming"] D --> F["Vervolg afschuiving met kruinverlaging"] F --> G["Overstroming"] </pre>
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatiespecifiek. Specifieke faalmechanismen kunnen het gevolg zijn van een optreden van een direct of indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme is het falen van innovaties.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanismen, die het gevolg is van het optreden van een direct mechanisme, is het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme die het gevolg is van een indirect mechanisme is het falen van een waterkering als gevolg aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding.</i></p>
<p>Scenario</p>	<p>Een scenario beschrijft een mogelijke geometrie of staat van de waterkering die wordt gebruikt als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</i></p>  <pre> graph LR A["(Extreme) hydraulische belasting"] -- 60% --> B["Falen grasmat (B&O toestand)"] A -- 15% --> C["Falen grasmat (graaf-schade)"] A -- 25% --> D["Falen grasmat (droogte)"] B --> E["Graserosie Kruin en Binnentalud"] C --> E D --> E E --> F["..."] F --> G["Overstroming"] </pre>



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