

Werken met faalpaden

Deel 3 - Aanscherping 1 - rekening houden met vervolprocessen - Knopenkaart



Werken met faalpaden

Deel 3 - Aanscherping 1 - rekening houden met vervolprocessen - Knopenkaart

Auteur(s)

Bianca Hardeman

Alfons Smale

Werken met faalpaden

Deel 3 - Aanscherping 1 - rekening houden met vervolprocessen - Knopenkaart

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw drs. A.L.T.C.M. Bizzarri
Referenties	Plan van Aanpak WK01 2021 Kennis voor Keringen
Trefwoorden	Overstromingskans, faalpaden, knopenkaart

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	07-03-2023
Projectnummer	11206817-006
Document ID	11206817-006-GEO-0001
Pagina's	42
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bianca Hardeman Alfons Smale	

Samenvatting

Met de introductie van overstromingskansnormen en de vrijgave van het WBI2017 is de overstap gemaakt van een beheersing van overstromingsrisico's op basis van een overschrijdingskans van waterstanden die veilig gekeerd moeten kunnen worden naar een beheersing van risico's op basis van een overstromingskans van waterkeringen.

Het WBI 2017 betreft het instrumentarium voor de analyse en het beoordelen van overstromingskansen. Het WBI 2017 maakt daarbij onderscheid tussen eenvoudige toetsen, gedetailleerde toetsen en een Toets op Maat. In WBI2017 is voor de gedetailleerde toets een faaldefinitie gehanteerd die gebaseerd is op een beperkte gebeurtenisboom. In de Toets op Maat (ToM) moet eigenlijk verder worden gekeken wanneer beschouwing van vervolgmecanismen leidt tot ander veiligheidsoordeel. Doordat instrumenten hiervoor ontbreken wordt dit in de praktijk vaak niet gedaan. Dit leidt ertoe dat het begin van schade veelal als overstroming wordt beschouwd omdat de kansen op de vervolgprocessen impliciet gelijk aan één worden verondersteld. Een realistischere overstromingskans wordt dan ook veelal verkregen door bijvoorbeeld de gebeurtenissenboom (locatie-specifiek) uit te breiden met vervolgprocessen. Het WBI is in de afgelopen jaren doorontwikkeld naar het Beoordeling en Ontwerpinstrumentarium (BOI) met als doel een realistisch overstromingskans te bepalen door het hele faalproces te beschouwen en het beter benutten van alle beschikbare kennis en ervaringen.

Het doel van deze rapportage is het genereren van een overzicht van instrumenten en rekenregels welke gebruikt kunnen worden om na te gaan (i) of het zinnig is om vervolgprocessen in rekening te brengen en (ii) op welke wijze de bijdrage van de vervolgprocessen in gekwantificeerd kan worden.

Het in rekening brengen van vervolgprocessen is nog sterk in ontwikkeling. Dat betekent dat een overzicht van beschikbare instrumenten snel achterhaald zal zijn. In dit document wordt een momentopname van beschikbare kennis gepresenteerd, waarbij automatisch ook de "witte vlekken" / kennisleemtes in beeld komen. Daarnaast zullen praktische toepassingen meer inzicht geven in de situaties waarbij het meenemen van vervolgprocessen zinnig is. Om deze redenen moet dit document als een groeidocument worden gezien, dat desgewenst periodiek aangevuld/bijgewerkt dient te worden.

In aanvulling op het bovenstaande worden twee algemene opmerkingen gemaakt ten aanzien van het status van deze rapportage:

- Parallel aan de totstandkoming van deze rapportage is ook gewerkt aan de uitwerking van de Ministeriële Regeling. Als gevolg van dit parallelle spoor sluit het onderhavige rapport in beschrijvingen en definities soms niet geheel aan op de Ministeriële Regeling. Voorbeeld hiervan is het gebruik van de benaming van de toetssporen voor de initiële mechanismen.
- Dit rapport is bedoeld om een eerste overzicht te geven van de mogelijke vervolgprocessen na optreden van een aantal initiële mechanismen en daarbij ook aan te geven op welke wijze de bijdrage van het vervolgproces (met de huidige kennis) kan worden gekwantificeerd. Waar mogelijk is in generieke termen een indicatie gegeven van de bijdrage van de vervolgprocessen aan de overstromingskans. Dit is bedoeld als hulpmiddel bij een beoordeling van de waterkeringen: een indicatie van de impact van vervolgprocessen op de overstromingskans.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	8
1.3	Leeswijzer	8
2	BOI: gebruik gebeurtenissenbomen en faalpaden voor een betere inschatting van de overstromingskans op trajectniveau	9
3	Waarom knopenkaarten?	11
4	Knopenkaart Dijkerosie	13
4.1	Faalmechanismen binnen dijkerosie	13
4.2	Faalpad initiatie GEKB en vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie	15
4.2.1	Beschrijving faalpad	15
4.2.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	16
4.2.3	Beschikbare (reken)modellen	16
4.2.4	Relevantie vervolgproces terugschrijdende erosie na GEKB	17
4.3	Faalpad initiatie GEKB vervolgproces afschuiving	19
4.3.1	Beschrijving faalpad	19
4.3.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	20
4.3.3	Beschikbare (reken)modellen	20
4.4	Faalpad initiatie GEBU vervolgproces (voortschrijdende) erosie	21
4.4.1	Beschrijving faalpad	21
4.4.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	21
4.4.3	Beschikbare (reken)modellen	21
4.4.4	Relevantie vervolgproces voortschrijdende erosie na GEBU	22
4.5	Faalpad initiatie GEBU vervolgproces afschuiving	25
4.5.1	Beschrijving faalpad	25
4.5.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	25
4.5.3	Beschikbare (reken)modellen	26
4.6	Faalpad initiatie ZST vervolgproces (voortschrijdende) kliferosie	26
4.6.1	Beschrijving faalpad	26
4.6.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	26
4.6.3	Beschikbare (reken)modellen	27
4.7	Faalpad initiatie ZST vervolgproces afschuiving	27
4.7.1	Beschrijving faalpad	27
4.7.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	27
4.7.3	Beschikbare (reken)modellen	27
5	Knopenkaart Stabiliteitsverlies	28
5.1	Faalmechanismen binnen Stabiliteitsverlies	28

5.2	Faalpad initiatie STBU vervolgproces (voortschrijdende) erosie	30
5.2.1	Beschrijving faalpad	30
5.2.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	30
5.2.3	Beschikbare (reken)modellen	30
5.2.4	Relevantie vervolgproces voortschrijdende erosie na STBU	30
5.3	Faalpad initiatie STBU vervolgproces afschuiving	34
5.3.1	Beschrijving faalpad	34
5.3.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	34
5.3.3	Beschikbare (reken)modellen	34
5.4	Faalpad initiatie STBI vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie	35
5.4.1	Beschrijving faalpad	35
5.4.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	35
5.4.3	Beschikbare (reken)modellen	35
5.4.4	Relevantie vervolgproces terugschrijdende erosie	36
5.5	Faalpad initiatie STBI vervolgproces afschuiving	38
5.5.1	Beschrijving faalpad	38
5.5.2	Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme	39
5.5.3	Beschikbare (reken)modellen	39
6	Knopenkaart Interne Erosie	40
	Referenties	41

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Met de introductie van overstromingskansnormen en de vrijgave van het WBI2017 is de overstap gemaakt van een beheersing van overstromingsrisico's op basis van een overschrijdingskans van waterstanden die veilig gekeerd moeten kunnen worden naar een beheersing van risico's op basis van een overstromingskans van waterkeringen.

De eis ten aanzien van de overstromingskans is afgeleid op basis van een maatschappelijke kosten-batenanalyse, zie IenM (2016). Deze kosten-batenanalyse heeft geleid tot een eis ten aanzien van de overstromings- of faalkans¹ op trajectniveau, uitgedrukt in een kans per jaar.

In de eerste landelijke beoordeling op basis van overstromingskansen (LBO-1) zijn de eerste ervaringen opgedaan met het bepalen van de overstromingskans van de primaire waterkeringen door het gebruik te maken van het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI2017). Het WBI is in de afgelopen jaren doorontwikkeld naar het Beoordeling en Ontwerpinstrumentarium (BOI) met als doel een realistischer overstromingskans te bepalen door het hele faalproces te beschouwen en het beter benutten van alle beschikbare kennis en ervaringen. Het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) bevat een procesinstrumentarium en Basisinstrumentarium. Dit laatste wordt beschikbaar gesteld als ondersteuning voor de bepaling van een reële overstromingskans.

De huidige instrumenten van het BOI Basisinstrumentarium zijn veelal ontwikkeld voor WBI2017, waarbij een aanpak conform de overschrijdingskansbenadering werd gehanteerd. Voor vertaling van deze instrumenten naar toepassing bij overstromingskansbenadering zijn aannames/vereenvoudigingen gebruikt, waarbij vaker conservatieve keuzes zijn gemaakt ter voorkoming van onterecht goedkeuren dan omgekeerd. Dit betekent dat de middels het WBI2017 bepaalde overstromingskans veelal een conservatieve benadering is van de werkelijke overstromingskans, maar dit geldt zeker niet altijd.

Voor een reële bepaling van de overstromingskans dienen alle relevante en achtereenvolgende gebeurtenissen beschouwd te worden welke kunnen leiden tot een overstroming. Een manier hierbij is het beschouwen van gebeurtenissen en/of foutenbomen, waarbij de verschillende gebeurtenissen die kunnen leiden tot een overstroming met elkaar in verband worden gebracht. Een faalpad beschrijft dan een lineaire reeks van achtereenvolgende gebeurtenissen van begin van schade tot overstroming.

In WBI2017 is voor de gedetailleerde toets een faaldefinitie gehanteerd die gebaseerd is op een beperkte gebeurtenisboom. In de Toets op Maat (ToM) moest verder worden gekeken wanneer een nadere analyse, onder anderen de beschouwing van vervolgmechanismen leidt tot ander veiligheidsoordeel. Doordat instrumenten hiervoor ontbraken werd dit in de praktijk vaak niet gedaan. Dit leidt ertoe dat het begin van schade veelal als overstroming wordt beschouwd omdat de kansen op de vervolgprocessen impliciet gelijk aan één worden verondersteld. Een realistischere overstromingskans wordt dan ook veelal verkregen door bijvoorbeeld de gebeurtenissenboom (locatie-specifiek) uit te breiden met vervolgprocessen.

¹ Een faalkans is bepaald voor waterkeringen waarbij falen leidt tot een verhoging van de hydraulische belasting op achterliggende keringen

1.2 Doel

In Deltares (2022a) is een schets gegeven van de wijze waarop gekomen kan worden tot een realistische overstromingskans met het huidige instrumentarium als startpunt. Hierin is aangegeven dat een mogelijke aanscherping van de overstromingskans verkregen kan worden door het in rekening brengen van vervolprocessen. Het in rekening brengen van vervolprocessen vraagt veelal om analyses welke nog niet gefaciliteerd zijn in de huidige instrumenten. Daarnaast is het niet altijd even duidelijk wanneer het zin heeft om vervolprocessen in rekening te brengen (wanneer draagt het meenemen van een vervolproces bij aan een realistischer overstromingskans?).

Het doel van deze rapportage is het genereren van een overzicht van instrumenten en rekenregels welke gebruikt kunnen worden om na te gaan (i) of het zinnig is om vervolprocessen in rekening te brengen en (ii) op welke wijze de bijdrage van de vervolprocessen in gekwantificeerd kan worden.

Het in rekening brengen van vervolprocessen is nog sterk in ontwikkeling. Dat betekent dat een overzicht van beschikbare instrumenten snel achterhaald zal zijn. Ook is door het opstellen van dit document duidelijk geworden dat er nog kennisleemtes zijn die opgepakt moeten gaan worden. Daarnaast zullen praktische toepassingen meer inzicht geven in de situaties waarbij het meenemen van vervolprocessen zinnig is. Om deze redenen moet dit document als een groeidocument worden gezien, dat desgewenst periodiek aangevuld/bijgewerkt dient te worden.

In aanvulling op het bovenstaande worden twee algemene opmerkingen gemaakt ten aanzien van het status van deze rapportage:

- Parallel aan de totstandkoming van deze rapportage is ook gewerkt aan de uitwerking van de Ministeriële Regeling. Als gevolg van dit parallelle spoor sluit het onderhavige rapport in beschrijvingen en definities soms niet geheel aan op de Ministeriële Regeling. Voorbeeld hiervan is het gebruik van de benaming van de toetssporen voor de initiële mechanismen.
- Dit rapport is bedoeld om een eerste overzicht te geven van de mogelijke vervolprocessen na optreden van een aantal initiële mechanismen en daarbij ook aan te geven op welke wijze de bijdrage van het vervolproces (met de huidige kennis) kan worden gekwantificeerd. Waar mogelijk is in generieke termen een indicatie gegeven van de bijdrage van de vervolprocessen aan de overstromingskans. Dit is bedoeld als hulpmiddel bij een beoordeling van de waterkeringen: een indicatie van de impact van vervolprocessen op de overstromingskans.

1.3 Leeswijzer

In deze rapportage wordt allereerst beknopt beschreven welke aannames in het huidige instrumentarium zijn opgenomen ten aanzien van vervolprocessen (Hoofdstukken 2 en 3). Vervolgens wordt voor twee groepen van mechanismen (Dijkerosie: Hoofdstuk 4 en Stabiliteitsverlies: Hoofdstuk 5) aangegeven op welke wijze de relevantie van vervolprocessen geïdentificeerd kunnen worden. De derde groep van mechanismen (gekoppeld aan het initiërende mechanisme Interne erosie) is niet nader uitgewerkt.

2 BOI: gebruik gebeurtenissenbomen en faalpaden voor een betere inschatting van de overstromingskans op trajectniveau

Bij het denken in gebeurtenissenbomen, wordt gekeken naar de gebeurtenissen die leiden tot overstroming. Een realistischer overstromingskans kan worden verkregen door de volgende aanscherpingen:

1. Voeg vervolprocessen toe aan faalpaden: dit betekent het beschouwen van alle relevante gebeurtenissen binnen een faalmechanisme, wat niet alleen initiatie van schade betreft maar ook vervolprocessen.
2. Voeg scenario denken toe aan knopen: een knoop kan bestaan uit wel/niet, maar kan ook bestaan uit een kans op. Dit geldt voor zowel de eerste knoop als vervolknopen, effectief leidend tot verschillende faalpaden met een kans van voorkomen.
3. Beschouw niet alleen faalpaden maar ook gebeurtenissenbomen: verschillende faalpaden (of faalmechanismen) moeten in samenhang worden beschouwd omdat ze sterk gecorreleerd zijn. Dit kan gerealiseerd worden door te kijken naar de gebeurtenissenboom waarin deze faalmechanismen zijn opgenomen.

In Deltares (2022a) worden deze aanscherpingen ten aanzien van de analyse van de overstromingskans nader toegelicht.

In het kader van deze rapportage hanteren we de definities conform het BOI instrumentarium:

Faalpad:	een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering.
Faalmechanisme:	de verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme.
Gebeurtenis of knoop:	stap in het proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand.
Mechanisme:	beschrijft de fysica van het proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Een mechanisme kan bestaan uit een gebeurtenis of uit een aaneenschakeling van meerdere gebeurtenissen.
Initieel mechanisme:	eerste mechanisme in het faalmechanisme.

Dit rapport richt zich alleen op de hierboven genoemd aanscherping 1, Voeg vervolprocessen toe aan faalpaden, waarbij worden de faalmechanisme Dijkerosie, Stabiliteitsverlies en Interne Erosie beschouwen. Concreet betekent dat:

- In WBI2017 wordt de conditionele kans op falen door vervolprocessen gegeven initiatie gelijk gesteld aan 100%, ofwel: $P(\text{vervolprocessen} | \text{initiatie}) = 1$. Dit leidt ertoe dat $P_{ini} = P_{faalpad}$, zie ook Tabel 2-1.
- De aanscherping van de overstromingskans wordt gerealiseerd door de vervolprocessen in rekening te brengen bij de voor de waterkering relevante faalpaden, zie Tabel 2-2. De conditionele kans van een vervolgproces is veelal ongelijk aan 1.

Cluster van faalmechanismen	Faalmechanisme	Initiatie	Vervolgprocessen*	Faalkans
Dijkerosie	GEKB	$P_{\text{GEKB,ini}}$	$P_{\text{GEKB,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{GEKB,ini}}$
	GEBU	$P_{\text{GEBU,ini}}$	$P_{\text{GEBU,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{GEBU,ini}}$
Stabiliteit	STBI	$P_{\text{STBI,ini}}$	$P_{\text{STBI,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STBI,ini}}$
	STBU	$P_{\text{STBU,ini}}$	$P_{\text{STBU,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STBU,ini}}$
Interne erosie	STPH	$P_{\text{STPH,ini}}$	$P_{\text{STPH,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STPH,ini}}$
.....				

Tabel 2-1: bepaling faalkans per faalpad conform WBI2017 aannames (* conditionele kans gegeven initiatie)

Cluster van faalmechanismen	Faalmechanisme	Initiatie	Vervolgprocessen*	Faalkans
Dijkerosie	GEKB	$P_{\text{GEKB,ini}}$	$P_{\text{GEKB,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEKB,ini}} * P_{\text{GEKB,vervolg}}$
	GEBU	$P_{\text{GEBU,ini}}$	$P_{\text{GEBU,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{GEBU,vervolg}}$
Stabiliteit	STBI	$P_{\text{STBI,ini}}$	$P_{\text{STBI,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STBI,vervolg}}$
	STBU	$P_{\text{STBU,ini}}$	$P_{\text{STBU,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STBU,vervolg}}$
Interne erosie	STPH	$P_{\text{STPH,ini}}$	$P_{\text{STPH,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STPH,vervolg}}$
.....				

Tabel 2-2: bepaling faalkans per faalpad met aanscherping door meenemen kans dat vervolgprocessen leiden tot overstrooming (* gegeven optreden initiële proces)

3 Waarom knopenkaarten?

In de strikte zin van de overstromingskansbenadering zou gesteld kunnen worden dat altijd alle faalpaden in volledige samenhang beschouwd dienen te worden. Dit is zeer arbeidsintensief en met name het combineren van faalpaden kan complex zijn. Het beschouwen alle faalpaden is echter niet efficiënt en ook niet noodzakelijk omdat niet alle (combinaties van) faalpaden evenveel bijdragen aan de overstromingskans.

Het kan daarom handig zijn om:

- a) een beeld te hebben van de kans op optreden van specifieke knopen binnen faalpaden
- b) gegeven de kans op deze knopen de relevantie van specifieke faalpaden in te schatten
- c) gegeven de relevantie van de faalpaden de relevantie van het combineren van faalpaden in te schatten
- d) een beeld te hebben van de (on)mogelijkheden voor het combineren van faalpaden

De knopenkaart beoogt voor veel voorkomende faalpaden een overzicht te geven van de middelen om de relevantie (grote/kleine kans van optreden) van individuele knopen vast te stellen. Naast de relevantie wordt ook een overzicht gepresenteerd van de beschikbare tools/rekentechnieken om (delen van) faalpaden te kwantificeren. Tot slot wordt een overzicht geboden van de kansrijkheid/relevantie en mogelijkheden om faalpaden te combineren. Hierbij wordt nadrukkelijk aangegeven welke elementen onderdeel zijn van BOI en op welke wijze deze meegenomen kunnen worden.

Ontwikkelingen met betrekking tot het beoordelen van waterkeringen staan niet stil, wat betekent dat het overzicht gepresenteerd een momentopname is. De knopenkaarten zullen altijd in ontwikkeling blijven zodat verscherpingen van de beoordeling mogelijk kunnen blijven.

Voor dit moment worden de mogelijke faalpaden gebundeld naar drie hoofdoorzaken van falen van de kering:

1. Dijkerosie
2. Stabiliteitsverlies
3. Interne erosie

Met deze opdeling wordt aangesloten op de “rode draden” van HWBP, WVl en Deltares.

Bij de beschouwing van de faalpaden voor de verschillende faalmechanismen beschouwen we de volgende generieke knopen:

1. Trigger: Er is normaliter een trigger nodig voor het starten van het faalpad, dit is ofwel een verandering van belasting ofwel een verandering van sterkte. Afhankelijk van de ligging van het achterland is tenminste een verhoogde belasting benodigd om tot een overstroming te komen, maar dit is niet altijd het geval (denk aan diepe polders).
2. Initiërend mechanisme: de eerste schade wordt door het initiërende mechanisme veroorzaakt. In deze rapportage nemen we de faaldefinitie uit WBI2017 over om deze knoop te beschrijven.
3. Vervolgprocessen: na begin van schade zijn er vervolgprocessen benodigd om tot een kruinverlaging/bres te komen

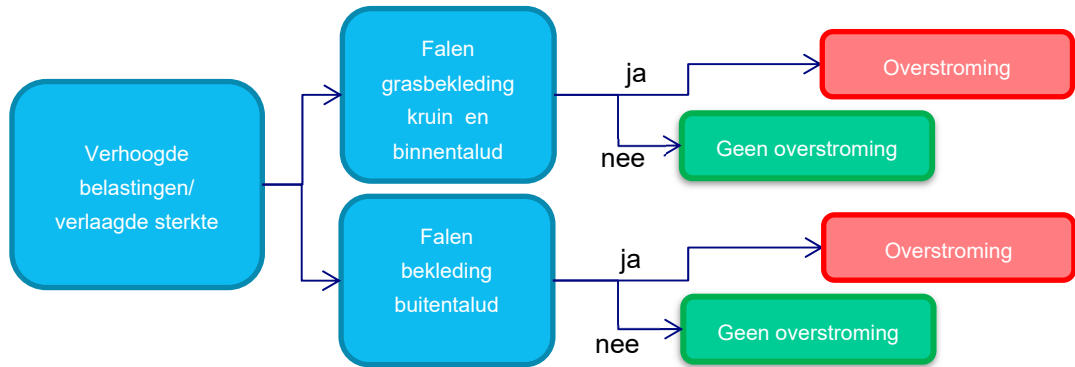
4. Bresgroei: indien sprake is van een kruinverlaging of bres dan zal deze bres groeien tot een afmeting welke leidt tot het doorlaten van substantiële hoeveelheden water
5. Overstroming: indien er voldoende water door de bres is gestroomd is sprake van een overstroming.

In deze rapportage ligt de focus op het verleggen van de faaldefinitie van het moment dat schade ontstaat naar het moment dat vervolgprocessen zijn opgetreden. De gebeurtenissen kruinverlaging en bresgroei dienen dan nog plaats te vinden en worden vooralsnog als één gebeurtenis beschouwen met als label “overstroming” (terwijl dat in werkelijkheid meerdere gebeurtenissen zijn).

4 Knopenkaart Dijkerosie²

4.1 Faalmechanismen binnen dijkerosie

De knopenkaart voor Dijkerosie bestaat (vooralsnog) uit twee faalmechanismen, zijnde (i) overstroming (falen) volgend op initiatie van schade aan de (gras-)bekleding op kruin en binnentalud door overloop/overslag en (ii) overstroming (falen) volgend op initiatie van schade aan (gras-)bekleding op het buitentalud door golfaanval, zie Figuur 4-1.



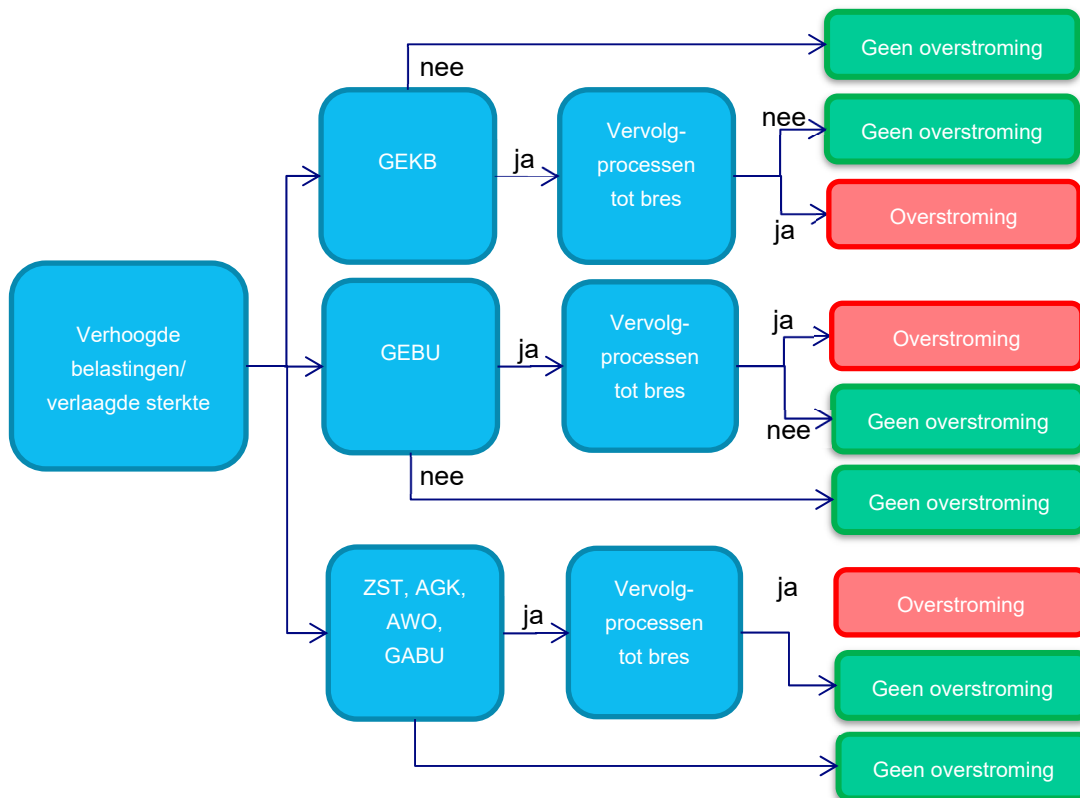
Figuur 4-1: Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor Dijkerosie.

Voor deze twee faalmechanismen wordt voor de eerste knoop (initiatie van schade) aangesloten op de in WBI2017 gehanteerde faaldefinities voor de gedetailleerde beoordeling:

- Falen grasbekleding op kruin en binnentalud: GEKB
- Falen bekleding buitentalud: GEBU, ZST, AGK, AWO, GABU, ...

In Figuur 4-2 zijn als eerste knoop de WBI2017 faaldefinities gehanteerd, zodat duidelijk is wat reeds onderdeel is van het bestaande instrumentarium van de overstromingskans en welke onderdelen toegevoegd kunnen worden om tot een scherper beeld van de overstromingskans te komen. Na deze eerste knopen dienen veelal nog vervolgprocessen plaats te vinden voordat sprake is van bresvorming en overstroming. Dit betekent dat er nog knopen na het initiërende mechanisme (eerste knoop) kunnen/moeten worden opgenomen in de gebeurtenissenboom. Dit is geïllustreerd voor 3 initiële mechanismen in Figuur 4-2. Hierbij kan het zo zijn dat de vervolgprocessen kunnen bestaan uit meerdere takken (faalpaden).

² Bij falen gras-bekleding



Figuur 4-2: Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor 3 mechanismen Dijkerosie.

In de hiernavolgende paragrafen worden per faalmechanisme de meest voor de hand liggende faalpaden geschetst. Daarnaast wordt aangegeven op welke wijze een inschatting van de relevantie van de vervolgnopen vastgesteld kan worden. Tot slot wordt een overzicht gegeven van de beschikbare instrumenten om tot een kwantitatieve kansinschatting te komen.

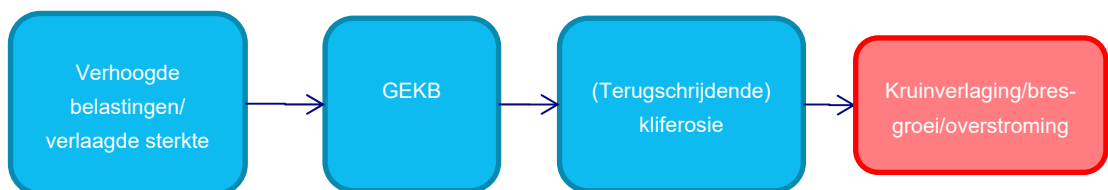
Het startpunt voor deze beschrijving is opgenomen in Tabel 4-1, waarin een samenvatting is gepresenteerd van de voor de hand liggende faalpaden. Hierin worden de veelal dominante vervolgprocessen per initiërende knoop (WBI2017 mechanisme) benoemd. Vervolgens worden per vervolgproces de bepalende factoren benoemd: deze kunnen gebruikt worden om op basis van expert judgement de relevantie van de vervolgprocessen/knopen te duiden. Tot slot worden de beschikbare tools voor de kansbepaling gepresenteerd in drie categorieën: a) expert judgement, b) benadering/orde grootte en c) gedetailleerd. Opgemerkt wordt dat in sommige gevallen een deel van het vervolgproces (impliciet) onderdeel is van het faalmechanisme/eerste knoop. Bij daadwerkelijke kansbepaling dient hiermee rekening te worden gehouden.

Cluster van faalmechanismen	Faalmechanisme	Vervolgprocessen		
		Vervolgproces(sen)	Relevantiecheck (P<<)	Kansbepaling (P≠1)
Dijkerosie	GEKB	Kliferosie (e.v.)	Bepalende factoren: - Overslagvolume - Restduur overslag - Erosiebestendigheid en erodeerbaarheid binnentalud/onderlagen	a. Expert judgement b. Deltares (2022b)-Hoofdstuk 4 c. --
		Afschuiving (e.v.)	Bepalende factoren: - Overslagvolume - Duur overslag - Infiltratiecapaciteit	a. Expert judgement b. -- c. Deltares (2020a)
	GEBU	Voortschrijdende erosie (e.v.)	Bepalende factoren: - Golfhoogte - Restduur - Erosiebestendigheid en erodeerbaarheid buitentalud/onderlagen	a. Expert judgement b. CSOLievensse (2018) c. Erosietool HWBP
		Afschuiving (e.v.)	Bepalende factoren: - Duur hoge waterstand - Infiltratiecapaciteit	a. Expert judgement b. -- c. --
	ZST, AGK, AWO, GABU	Voortschrijdende erosie (e.v.)	Bepalende factoren: - Golfhoogte - Restduur - Erosiebestendigheid buitentalud/onderlagen	a. Expert judgement b. -- c. Deltares (2022c)
		Afschuiving (e.v.)	Bepalende factoren: - Duur hoge waterstand - Infiltratiecapaciteit	a. Expert judgement b. -- c. --

Tabel 4-1: Samenvattende tabel Dijkerosie

4.2 Faalpad initiatie GEKB en vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie

4.2.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van het initiële mechanisme falen grasmat op kruin of binnentalud als gevolg van veranderde verhouding belasting/sterkte zijn er tenminste twee vervolgprocessen denkbaar: (i) terugschrijdende kliferosie en (ii) afschuiving. Het vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie betreft het eroderen van kruin en binnentalud als gevolg van golfoverslag (of overloop) nadat de grasmat (en leeflaag) zijn beschadigd door overslag (of overloop).

4.2.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Terugschrijdende erosie van kruin en binnentalud is het transport van het dijksmateriaal als gevolg van overslag of overloop. Bepalende factoren voor het optreden van terugschrijdende erosie na falen grasmat zijn:

- de hoeveelheid en duur van overslag/overloop na falen van de grasmat, en
- de erodeerbaarheid en erosiebestendigheid van het dijksmateriaal.

Als de grasmat op het binnentalud pas aan het einde van de storm (of hoogwater in geval van overloop) bezwijkt en als de onderlaag erosiebestendig is, dan zal de kans dat dit faalpad optreedt klein zijn (kans van optreden van de knoop is klein). Omgekeerd, als de grasmat aan het begin van de storm bezwijkt en de erosiebestendigheid van de onderlaag is beperkt, dan zal de kans dat dit faalpad optreedt groot zijn (d.w.z. dat de kans van optreden van deze knoop is groot).

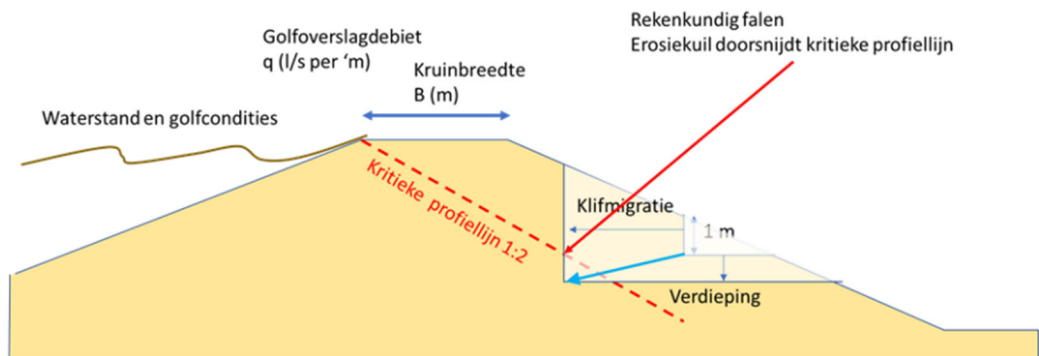
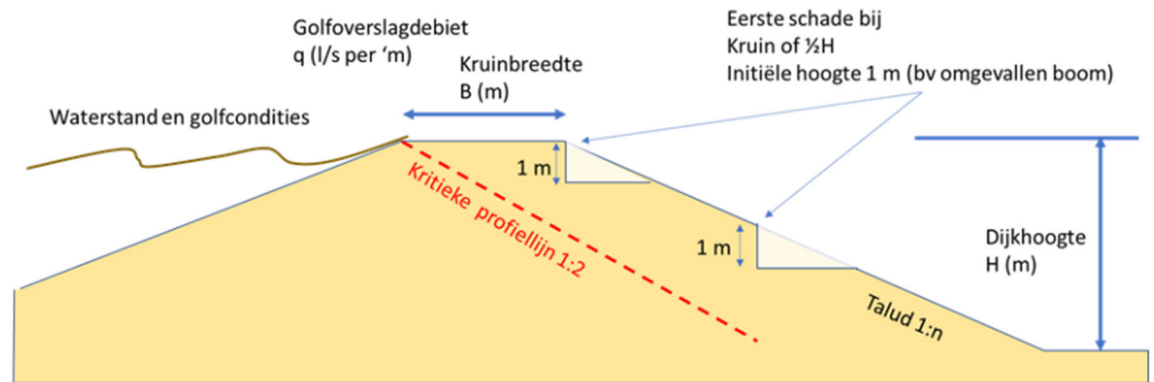
De erosiebestendigheid en erodeerbaarheid van het dijksmateriaal zijn bepalende factoren voor de snelheid waarmee de terugschrijdende erosie op kan treden. In het kader van de knopenkaart wordt ervan uitgegaan dat in geval van niet-cohesief dijksmateriaal de erosiesnelheid zo hoog is dat dit geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Voor cohesief dijksmateriaal is de erosiebestendigheid zodanig dat redelijkerwijs een effect op de overstromingskans mag worden verwacht van het meenemen van het vervolgproces terugschrijdende erosie.

4.2.3 Beschikbare (reken)modellen

De tools om terugschrijdende erosie door golfoverslag te voorspellen zijn op dit moment beperkt en/of er is nog geen algemene consensus over generiek gebruik voor Nederlandse dijken. Er zijn internationaal gezien procesmatige modellen beschikbaar (zie bijvoorbeeld <https://www.dambreach.org/tools/embrea>) om de erosie van het binnentalud als gevolg van overloop te modelleren. Deze zijn ontwikkeld in het kader van gronddammen voor onder meer stuwmeren en gaan uit van cohesief dijksmateriaal. De toepasbaarheid van deze relaties voor de Nederlandse waterkeringen (met andersoortige belasting en grotere variatie dijkopbouw) is enkel mogelijk met betrokkenheid van experts. De beschikbare tools kunnen gebruikt worden als gevoeligheidsanalyse met als doel om na te gaan in hoeverre het vervolgproces terugschrijdende erosie bijdraagt aan de overstromingskans. Een gedetailleerde aanpak is nog niet beschikbaar voor dit mechanisme.

In Deltares (2022b) is beschreven hoe de model componenten gegeven door Temple et al. (2005), die zijn ontwikkeld voor bresvorming door overloop, zijn toegepast om kansverdelingen voor het kritiek overslagdebiet af te leiden voor een fragmentarische zode en een vooraf gedefinieerde faaldefinitie. Deze modelcomponenten zijn ook verwerkt in het EMBREA model (<https://www.dambreach.org/tools/embrea>). De gehanteerde (rekenkundige) faaldefinitie is terugschrijdende erosie tot een kritieke profiellijn van 1:2 vanaf de buitenkruinlijn, zie onderstaande afbeelding. Het bereiken van deze faaldefinitie betekent nog niet dat sprake is van een overstroming: daarvoor is nog kruinverlaging en bresgroei nodig. Dit model is gebaseerd op bestaande kennis over het erosieproces bij overloop van homogene kleidijken (NCRS, 1987), en beperkt gevalideerd en gekalibreerd aan 1 test waarbij golfoverslagproeven zijn uitgevoerd op kale klei.

Het model resulteert in een kansverdeling van het kritiek overslagdebiet voor het bereiken van het kritieke profiel. Dit kritieke overslagdebiet kan gebruikt worden om na te gaan of de dijk na falen grasmat nog veel of beperkt overslag kan weerstaan. Het gaat dan om een overslagdebiet waarbij terugschrijdende erosie optreedt tot de kritieke profiellijn gegeven een bepaalde breedte van de kruin, verschillende initiële schades, verschillende golfcondities en verschillende waarden voor de erodeerbaarheid en kritieke erosieschuifspanning van klei. In een figuur ziet het er als volgt uit:



4.2.4 Relevantie vervolproces terugschrijdende erosie na GEKB

Met het hiervoor beschreven model zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de relevantie van het vervolproces voor het bepalen van de overstromingskans in te schatten voor verschillende archetypen van dijken en belastingen. Hierbij wordt het kritieke overslagdebiet dat door het model berekend wordt als maat voor relevantie van het vervolproces terugschrijdende erosie gehanteerd: hoe hoger het kritieke overslagdebiet hoe groter de relevantie van het beschouwde vervolproces. De gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd voor verschillende waarden van:

- Kruinbreedte
- Golfhoogte
- Plaats initiële afschuiving (klif)
- Erosiebestendigheid klei

Hierbij zijn een aantal belangrijke aannames gedaan:

- De gevoeligheidsanalyses zijn alleen geldig voor een kleidijk: voor een zanddijk wordt aangenomen dat het vervolproces terugschrijdende erosie zo snel zal gaan dat het geen substantiële bijdrage levert aan de (reductie van de) overstromingskans.
- De onzekerheden die er zijn over het proces van erosie van kale grond wordt in rekening gebracht door grote bandbreedtes en enkele conservatieve aannames.
- Er is in alle gevallen rekening gehouden met een stormduur van 3 uur.
- De formules in dit model bevatten een drempelwaardeparameter (kritieke schuifspanning) en een erosiesnelheidsparameter (Erodeerbaarheid). In het kader van onderzoek naar sterkte van de dijk na macro-instabiliteit bij golfoverslag is gekeken naar verschillende waarden van deze parameter voor klei. Hierbij is gebruik gemaakt van de relaties tussen grondeigenschappen en erosieparameters die

worden gegeven in de literatuur en is een golfoverslagproef 'Delfzijl' en een overloopproof op klei 'Bergambacht' nagerekend.

- Als initiële schade is op 2 plaatsen op het talud een klif van 1 meter meegenomen. Dit wordt als een conservatieve maat voor initiële schade gezien, omdat verwacht wordt dat falen van de grasmat en de onderliggende leeflaag veelal niet direct tot 1 meter erosie zal leiden (dan is al sprake van erosie zoals beschreven in dit vervolgproces).

De hierboven beschreven gevoeligheidsanalyse met dit model geeft de volgende inzichten waarmee ingeschat kan worden of het nader onderzoeken van het vervolgproces kliferosie na falen grasmat op kruin of binnentalud relevant is voor de bepaling van de overstromingskans:

- Voor een zanddijk of dijk met zandkern en kleibekleding wordt aangenomen dat het vervolgproces terugschrijdende erosie (zeer) snel zal verlopen. Het nader beschouwen van het vervolgproces terugschrijdende zal in voorkomende gevallen dan ook niet leiden tot een significante bijdrage aan de overstromingskans.
- De gevoeligheidsanalyse laat (conform verwachting) zien dat met name de variabele "erodeerbaarheid" enorm belangrijk is bij het vervolgproces kliferosie. Helaas is hier nog sprake van een kennisleemte: er is nog maar beperkte (generieke) kennis over de erodeerbaarheid van de Nederlandse klei op het binnentalud. Om toch iets over de relevantie van het vervolgproces terugschrijdende erosie te kunnen zeggen is naar de volgende parameters in het model gekeken: erosiesnelheid, effectieve schuifspanning, een belasting parameter met daarin het debiet (m^3/s) en de hoogte van het klif. Hierbij is gebruik gemaakt van de relaties tussen grondeigenschappen en erosieparameters die worden gegeven in de literatuur en is een golfoverslagproef 'Delfzijl' en een overloopproof op klei 'Bergambacht' nagerekend.
- Indien er sprake is van:
 - o (i) een initiële afschuiving die niet in de kruin insnijdt,
 - o (ii) de klif niet groter is dan 1 meter,
 - o (iii) een golfhoogte van 0,5 meter en
 - o (iv) een erodeerbaarheid berekend vanuit eerder genoemde proeven (met een grote spreiding),

dan worden de volgende kritieke overslagdebieten berekend: een 5% ondergrenswaarde van 5,6 l/s/m tot wel 10 en 20 l/s/m (en nog hoger). Deze kritieke overslagdebieten zijn dusdanig hoog dat hieruit volgt dat het meenemen van het vervolgproces terugschrijdende erosie relevant kan zijn voor de overstromingskans. In de navolgende tabel is hoe het kritieke overslagdebiet (en dus daarmee de relevantie van het meenemen van het vervolgproces) verder afhangt van de kruinbreedte en golfhoogte.

- Met name voor dijken gelegen langs rivieren geldt dat het van belang is om rekening te houden met erosie binnen de hersteltijd, omdat hoge waterstanden langer aanhouden (en het dus kan voorkomen dat er gedurende dit hoogwater meerdere malen sprake is van overslag/overslag). De relevantie van het meenemen van het vervolgproces gedurende de hersteltijd kan benaderd worden door te kijken naar het kritieke overslagdebiet behorende bij een golfhoogte van een halve meter; te hanteren na het optreden van de eerste schade. Dit betreft een conservatieve benadering, omdat dit tot het laagste kritieke overslagdebiet leidt t.o.v. grotere golfhoogtes: lagere golven leiden in het algemeen tot een sneller erosieproces dan de hogere golven. Dit kan worden verklaard door de relatief lage drempelwaarden voor erosie van kale grond, ten opzichte van bijvoorbeeld gras. Bij klei zullen ook kleine golven leiden tot enige erosie, terwijl dat bij gras niet zo is. De optelsom van erosie door veel kleine golven is voor kale grond doorslaggevend ten opzichte van enkele hele grote golven. Deze bevinding lijkt tegenstrijdig te zijn met recente bevindingen uit het Polder2C's project. De hier gepresenteerde informatie moet dan ook met zorg worden gebruikt en worden geüpdatet zodra er meer duidelijkheid is over de aard/oorzaak van de verschillen.

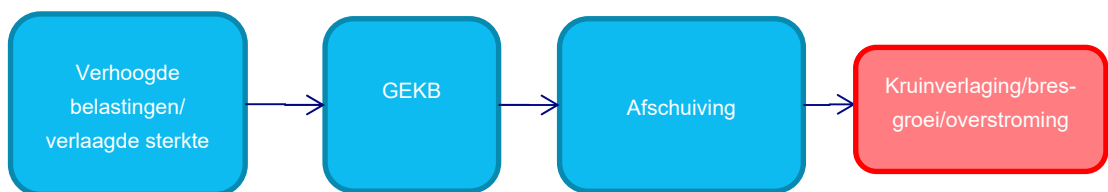
Op grond van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse wordt gesteld dat het in het geval van een kleidijk relevant is om naar het vervolgproces terugschrijdende erosie te kijken: dit vervolgproces heeft dan naar verwachting een grote bijdrage aan de sterkte. De komende jaren zal kennis ontwikkeld gaan worden op het gebied van de erodeerbaarheid van Nederlandse klei op het binnentalud en wordt er verder gewerkt aan het ontwikkelen van een gevalideerd model voor golfoverslag bij homogene kleidijken en toplagen van klei. Zodra deze kennis beschikbaar is, kan hiermee een nog realistischer beeld van de overstromingskans worden gecreëerd.

In de navolgende tabel is bovengenoemde samengevat (overgenomen uit Deltares (2022b)). Deze tabel toont voor een kleidijk met verschillende kruinbreedtes, verschillende afmetingen van initiële schade en verschillende golfcondities na optreden initiële schade de kansverdeling van het kritieke overslagdebiet. Hoe hoger het kritieke overslagdebiet hoe groter de bijdrage van het vervolgproces terugschrijdende erosie aan de overstromingskans. Voor een eerste schatting kan de 5% ondergrens waarde worden beschouwd. De hier gepresenteerde informatie moet met zorg worden gebruikt omdat er mogelijk andere inzichten zijn vanuit het Polder2C's project en worden geüpdatet zodra er meer duidelijkheid is over de aard/oorzaak van de verschillen.

Scenario	Hs (m)	mu (l/s/m)	sigma (l/s/m)	5% ondergrens
Kruin 3 m Aanvangskuil binnenkruin	0.5	82	147	5,6
	1	70	73	12
	2	58	57	11
	3	60	59	11
Kruin 3 m Aanvangskuil halverwege talud	0.5	119	233	7
	1	102	150	10
	2	148	173	21
	3	149	160	24
Kruin 6 m Aanvangskuil binnenkruin	0.5	194	222	30
	1	215	226	35
	2	222	214	40
	3	250	239	50

4.3 Faalpad initiatie GEKB vervolgproces afschuiving

4.3.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de eerste knoop (initiële mechanisme) GEKB is het ook mogelijk dat er een afschuiving optreedt leidend tot achtereenvolgens kruinverlaging, bresgroei en uiteindelijk een overstroming. Voornaamste oorzaak/drijver voor het optreden van een deze knoop het een verhoogd freatisch vlak, veroorzaakt door het opgetreden overslagdebiet in combinatie met mogelijk grotere infiltratiecapaciteit, leidend tot instabiliteit.

4.3.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Het vervolgproces afschuiving na falen grasmat op kruin en binnentalud betreft een afschuiving welke het gevolg is van een grotere mate van infiltratie van overslaand water (leidend tot een verhoogd freatisch vlak) al dan niet in combinatie met het verlies van gewicht in het passieve deel van een afschuifvlak. De bepalende factoren voor het optreden van dit mechanisme zijn (i) de mate waarin sprake is van infiltratie van overslaand water leidend tot de verhoging van het freatisch vlak, (ii) de omvang van de initiële schade na falen van de grasmat (en onderlaag) en (iii) de weerstand die de dijk kan mobiliseren tegen afschuiven. Afgeleide factoren zijn daarmee:

- de mate van overslag, en
- de duur waarover dit overslagdebiet aanhoudt.
- Gewijzigde doorlatendheid van oppervlak
- Sterkte-eigenschappen kernmateriaal en ondergrond

Veel infiltratie (bijvoorbeeld als gevolg veel overslag of verhoogde doorlatendheid) leidt tot een verhoogd freatisch vlak en daarmee minder stabiliteit; dit geeft een grotere kans van optreden van dit vervolgproces. Verwacht wordt dat voor dit vervolgproces vooral het verhoogde freatische vlak bepalend zal zijn, de afname van het gewicht in de passieve deel van de afschuiving zal van ondergeschikt belang zijn (vanwege de beperkte omvang van de erosie van de grasmat).

4.3.3 Beschikbare (reken)modellen

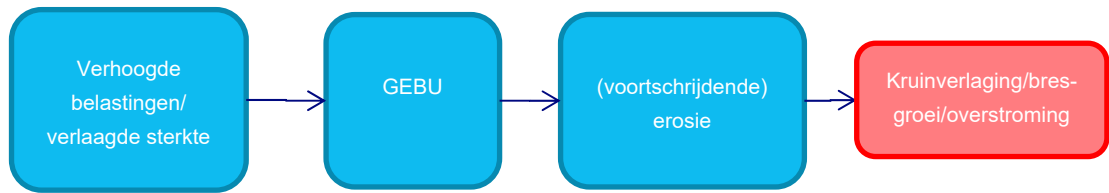
De relevantie van het vervolgproces afschuiving na falen grasmat (en onderlaag) wordt, naar verwachting, veelal bepaald door de verandering van het freatische vlak door verhoogde infiltratie. Een eerste inschatting van de mate van infiltratie gegeven golfhoogte en gemiddeld overslagdebiet (maat voor vrijboord) kan verkregen worden op basis van hoofdstuk 6 uit RWS (2012). Naast deze inschattingen kan ook gebruik gemaakt worden van de meer geavanceerdere modellen zoals ook genoemd in RWS (2012).

De mate van infiltratie kan vervolgens vertaald worden naar een gewijzigde ligging van freatisch vlak en hiermee geassocieerde waterspanningen. Met behulp van deze informatie kan vervolgens met reguliere stabiliteitsanalyses nagegaan worden of sprake is van een afschuiving. Indien de stabiliteitsanalyse laat zien dat er bij gewijzigde waterspanningen geen afschuiving optreedt, dan is het meenemen van dit vervolgproces relevant: het heeft een grote invloed op de overstromingskans.

Het is ook mogelijk om de kans op afschuiving na falen grasmat kruin en binnentalud te kwantificeren door enerzijds de kans op overslag in rekening te brengen (bijvoorbeeld middels een fragility curve voor overslag) en anderzijds door de onzekerheid in de stabiliteitsanalyse in rekening te brengen. Hierbij kan een semi-probabilistische analyse worden gehanteerd, maar inmiddels zijn er ook mogelijkheden om dit volledig probabilistisch te analyseren, zie Deltares (2020a).

4.4 Faalpad initiatie GEBU vervolproces (voortschrijdende) erosie

4.4.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële knoop/het mechanisme Gras Erosie Buitentalud (GEBU) zijn er ten minste twee vervolprocessen denkbaar: (i) voortschrijdende erosie en (ii) afschuiving. Het vervolproces van voortschrijdende erosie betreft het transport van dijksmateriaal uit de dijk wat bij voldoende erosie tot een kruinverlaging, bresgroei en uiteindelijk een overstroming kan leiden. Opgemerkt wordt dat bij het bepalen van de kans op initiatie van het faalpad als gevolg van GEBU mogelijk ook al een (beperkt) deel van het vervolproces in rekening is gebracht. Bij het beschouwen van het faalpad is het van belang na te gaan of sprake is van (significante) dubbeltellingen.

4.4.2 Beschrijving vervolproces na initieel mechanisme

Het vervolproces voortschrijdende erosie betreft het eroderen van het buitentalud (en de kern) als gevolg van golfaanval. Doordat de grasmat reeds gefaald is, komt het dijksmateriaal bloot te liggen. Afhankelijk van de eigenschappen van het dijksmateriaal en de mate van golfaanval zal materiaal uit de dijk getransporteerd worden. Dit vervolproces wordt voortschrijdende erosie genoemd omdat zich tijdens het proces een klif vormt die zich in de richting van de binnentoe verplaatst.

De bepalende factoren voor het optreden van het vervolproces (voortschrijdende) erosie zijn:

- de mate van golfaanval (duur na falen grasmat en grootte van de golven)
- de erosiebestendigheid en erodeerbaarheid van de onderlagen/kern.

Een kortere duur van golfaanval of lagere golfconditie in combinatie met een grotere erosiebestendigheid of lagere erodeerbaarheid (erosiecoëfficiënt) van onderlaag/kern zorgt voor een kleinere conditionele kans van optreden voor deze knoop.

4.4.3 Beschikbare (reken)modellen

Voor het vervolproces voortschrijdende erosie in geval van volledig groene dijken is een model beschikbaar dat zowel in een semi-probabilistische als een volledig probabilistische context beschikbaar is. LievenseCSO (2018) beschrijft semi-probabilistische rekenregels voor het bepalen van de conditionele kans van optreden van deze knoop. Deltares (2022c) beschrijft het instrument dat de volledig probabilistische beschouwing van de combinatie van GEBU en voortschrijdende erosie (dus de combinatie van de initiërende knoop en de eerstvolgende knoop).

De kern van de beschikbare rekenmodellen (semi-probabilistisch en probabilistisch) voor groene dijken wordt gevormd door het model van Mourik (overgenomen uit Deltares 2020b):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_{e0}}{H_s^2} \right] \cdot \left[16,4 \cdot (\tan \alpha)^2 \right] \cdot \left[\min \left(3,6 ; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot \left[1,7 \cdot (H_s - 0,4)^2 \right]$$

mits $H_s > 0,4$ m;

voor $H_s \leq 0,4$: $\partial V/\partial t = 0$

met:

∂V_e = toename erosie in een tijdstap [m^3/m]

∂t = grootte van de tijdstap [h]

c_e = erosiecoëfficiënt voor de kleisoort (zie hieronder) [-]

V_{e0} = reeds aanwezig, gecorrigeerd erosievolume in de belaste zone [m^3/m]

H_s = significante golfhoogte [m]

$\tan \alpha$ = taludhelling [-]

s_{op} = golfsteilheid $s_{op} = \frac{H_s}{1,56 \cdot T_p^2}$ [-]

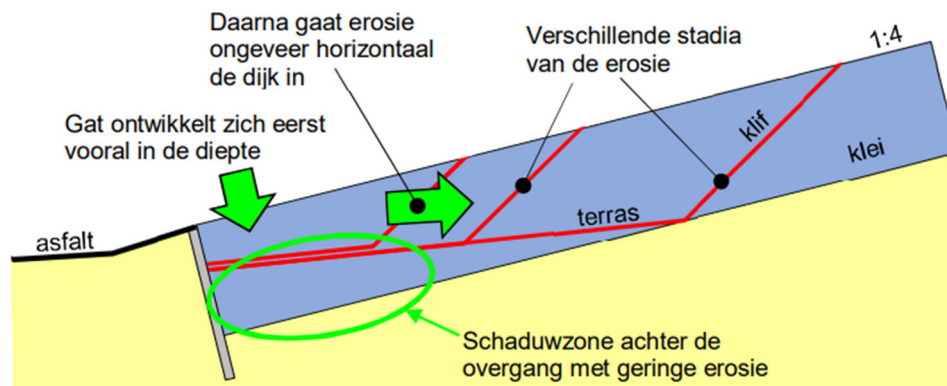
T_p = golfperiode van de piek van het golfspectrum [s]

De erosiecoëfficiënt voor het type klei is vastgelegd voor klei en keileem van gestructureerd materiaal. Onderstaand zijn de waarden gegeven voor het gemiddelde μ en de variatiecoëfficiënt V (met $V = \sigma/\mu$, met σ = standaardafwijking) van de erosiecoëfficiënt:

- klei met zandgehalte < 40% en organische stof gehalte < 5%:
 $\mu(c_e) = 0,55$; $V(c_e) = 0,25$
- keileem met zandgehalte < 60% en organische stof gehalte < 5%:
 $\mu(c_e) = 0,35$; $V(c_e) = 0,27$

Voor de dijken waarbij het ondertalud bekleed is met harde bekleding is als basis tevens het model van Mourik gebruikt. Er zijn aanpassingen gedaan voor wat betreft de erosie coëfficiënten, toepassing voor een flauwer talud, verschillende golfhoogtes en de aanwezigheid van een harde taludbekleding op het ondertalud.

Schematische weergave van het erosieproces voor de Waddenzee dijken:



4.4.4 Relevantie vervolproces voortschrijdende erosie na GEBU

Er zijn gevoeligheidsanalyses gedaan met een aantal modellen (Deltares (2022c) in deterministische en probabilistische vorm) om inzicht te krijgen in de relevantie van het meenemen van vervolprocessen bij het faalpad met initiële schade door GEBU en het vervolproces voortschrijdende erosie.

De kern van de gebruikte rekenmodellen (de procesbeschrijving van voortschrijdende erosie) is nog in ontwikkeling en nog niet overal toepasbaar, maar kan wel een eerste beeld geven van de relevantie van het meenemen van vervolprocessen. In het kader van deze rapportage zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd met zowel het model van Mourik en de implementatie ervan in een probabilistische context (Deltares, 2022c). Met deze modellen wordt inzicht verkregen in de relevantie van het meenemen van het vervolgproces door na te gaan hoe snel de erosie optreedt en tot een welke diepte erosie plaats vindt. Ten behoeve van de gevoeligheidsanalyses zijn aannames gedaan zoals onder andere de erosiebestendigheid van klei, omdat deze nog niet voor elke kleisoort beschikbaar is. Op een aantal kleisoorten zijn Deltagootproeven uitgevoerd en dat is vooral klei van de Waddenzeedijken.

Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat voor dijken in het bovenrivierengebied, waar sprake is van golven van 0,5 tot 1 meter en een redelijke tot goede kleikwaliteit, niet meer dan één meter erosiediepte ontstaat bij een talud van 1 op 3 tot 1 op 4. Bij een talud van 1 op 4 wordt de 1 meter erosiediepte niet eens gehaald. In het geval van een flauw talud (1 op 4), goede kleikwaliteit en lage golven wordt soms zelfs bijna geen erosie berekend. Als er een kleilaag aanwezig is van tenminste 1 meter dikte, heeft het zin om naar vervolprocessen te kijken. Er is dan sprake van een grote impact op de overstromingskans. Ook voor een minder goede kleikwaliteit, met een hoger zandgehalte heeft het zin om naar vervolprocessen te kijken. De erosiediepte kan dan oplopen tot net boven de meter, maar dat kan bij een kleidijk of dikke kleibekleding nog steeds een relevante bijdrage leveren aan de overstromingskans.

Zeker in het bovenrivierengebied is er een kans dat herstel niet direct na het ontstaan van schade kan plaats vinden. Indien rekening gehouden wordt met meerdere stormen binnen de hersteltijd wordt de erosiediepte bij golven van 1 meter fors groter. Dan kan de erosiediepte oplopen tot bijna 3 meter in het geval van een talud van 1 op 3. Indien er sprake is van een talud van 1 op 4 kan een diepte van 2,5 meter bereikt worden. Dit is dan afhankelijk van de duur van de hersteltijd/hoog water. In de hier gepresenteerde gevoeligheidsanalyse is een duur van de hersteltijd van 48 tot 240 uur meegenomen. Het meenemen van het vervolgproces voortschrijdende erosie kan dan, afhankelijk van de te realiseren hersteltijd, nog steeds een grote impact hebben op de berekende overstromingskans.

Een nieuwe ontwikkeling is een Brede groene dijk. Hier is sprake van een groene dijk (met grasbekleding) en flauw talud van 1 op 7 tot 1 op 8. Onderzoek laat zien dat de erosie (afhankelijk van de soort klei) een stuk minder snel gaat dan bij dijken met een steiler talud. Bij golven van 2 meter, zoals deze voorkomen bij de Waddenzeedijken, met de daar aanwezige kleikwaliteit van gemiddeld tot goed, ontstaat een erosiediepte van nog geen meter. Dit betekent dat het meenemen van het vervolgproces voortschrijdende erosie een relevante bijdrage kan leveren aan de berekende overstromingskans. Hierbij is de erosiebestendigheid van de in de dijk aanwezige klei een belangrijke variabele.

Bij de dijken met een harde bekleding met een talud van 1 op 3 tot 1 op 4 is op een aantal plaatsen onderzocht wat de erosiediepte wordt indien de grasmat gelegen boven de harde bekleding reeds is gefaald. Ook hier is de mate van erosie, en dus de relevantie van het vervolgproces, afhankelijk van de golfhoogte en erosiebestendigheid en erodeerbaarheid van de klei. Bij een hoge belasting, talud van 1 op 3 en minder goede erosiebestendigheid of grotere erodeerbaarheid van de klei wordt een erosiediepte van minder dan 2 meter gevonden. Bij een talud van 1 op 4 is de erosiediepte zelfs minder. Bij een lagere belasting en sterkere klei wordt een erosiediepte tot 1 meter gevonden. Op basis van deze informatie wordt gesteld dat het bij (i) een deklaag dikker dan 2 meter of (ii) een deklaag dikker dan 1 meter in combinatie met minder zware golfcondities en een flauwer talud ook verstandig om naar het vervolgproces voortschrijdende erosie te kijken.

Er vindt op dit moment veel onderzoek plaats naar de erosiebestendigheid en erodeerbaarheid van Nederlandse klei en de komende jaren worden resultaten verwacht die ook toegepast kunnen worden. Deze nieuwe inzichten zullen aanleiding zijn om de hier gepresenteerde kentallen bij te werken.

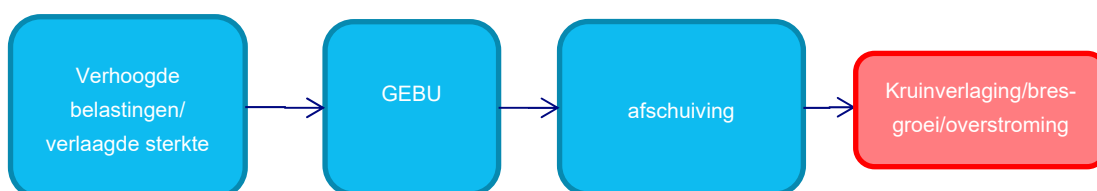
In de navolgende tabellen wordt het bovengenoemde samengevat. Bij de getoonde erosie in meters zal de kans op het optreden van het faalpad erosie buitentalud met voortschrijdende erosie als vervolg niet groot zijn en heeft het zin om naar vervolgprocessen te kijken. Op dit moment zijn er verschillende kennisleemtes waardoor niet alle combinaties van dijktipe en belasting zijn ingevuld in onderstaande tabellen.

Erosie na GEBU na 1° hoog water	Belasting rivierdijk golven 0,5 tot 1 meter	Belasting kust, golven tot 2 meter	Belasting meren
Brede groene flauwe dijk, gemiddelde sterkte klei		Erosie tot max 1 meter diep	
Rivierdijk talud 1 op 4, gemiddelde sterkte klei	Erosie van max 1 meter, bij golven van 0,5 meter erosie 0,2 meter		
Rivierdijk talud 1 op 3, gemiddelde sterkte klei	Erosie van 1 meter, bij golven van 0,5 meter erosie 0,2 meter		
Zeedijk Waddenzee met harde bekleding en talud 1 op 4, gemiddelde sterkte klei		Erosie max 2 meter, bij lagere golven, minder impact 1 meter	
Zeedijk Waddenzee met harde bekleding en talud 1 op 3, gemiddelde sterkte klei		Erosie max 2 meter, bij lagere golven, minder impact 1 meter	
Zeedijk met harde bekleding, talud 1 op 3 of 1 op 4, gemiddelde sterkte klei			
Meerdijk met grasbekleding, talud 1 op 3 of 1 op 4			Tussen 0,6 en 0,9 meter bij golven 0,5 meter, afhankelijk van klei en talud Tussen 1,2 en 2,1 bij golven 1 meter afhankelijk van klei en talud

Erosie na GEBU na 2° hoog water zonder herstel na 1° hoog water	Belasting rivierdijk, golven 0,5 tot 1 meter, duur tot 240 uur	Belasting kust, golven tot 2 meter	Belasting meren
Brede groene flauwe dijk		N.t.b.	
Rivierdijk talud 1 op 4	Erosie van max 2,5 m bij 240 uur hoog water, afhankelijk van de duur		
Rivierdijk talud 1 op 3	Erosie van max 3 m bij 240 uur hoog water, afhankelijk van de duur		
Zeedijk Waddenzee, harde bekleding en talud 1 op 4, gemiddelde sterkte klei		Niet direct relevant, kans op zware 2° storm kort na 1° storm is niet groot	
Zeedijk Waddenzee, harde bekleding en talud 1 op 3, gemiddelde sterkte klei		Niet direct relevant, kans op zware 2° storm kort na 1° storm is niet groot	
Zeedijk met harde bekleding, talud 1 op 3 of 1 op 4, gemiddelde sterkte klei			
Meerdijk met grasbekleding, talud 1 op 3 of 1 op 4			Tussen 1,5 en 2,9 meter bij golven van 0,5 en 1 meter, afhankelijk van klei, talud en duur van hoogwater

4.5 Faalpad initiatie GEBU vervolproces afschuiving

4.5.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële knoop/het mechanisme Gras Erosie Buitentalud (GEBU) kan ook een afschuiving van het binnentalud optreden, leidend tot achtereenvolgens kruinverlaging, bresgroei en uiteindelijk een overstroming. Dit is dan het gevolg van een verhoogd freatisch vlak in de dijk door versterkte infiltratie via het beschadigde buitentalud.

4.5.2 Beschrijving vervolproces na initieel mechanisme

Het vervolproces afschuiving na falen grasmat op het buitentalud betreft een afschuiving welke afhangt van (i) een grotere mate van infiltratie van water door het beschadigde buitentalud (leidend tot een verhoogd freatisch vlak) en (ii) de weerstand die de dijk kan mobiliseren tegen afschuiven.

De bepalende factoren voor dit vervolgproces zijn:

- de restduur van de hoge waterstand na falen van de grasbekleding in combinatie met de infiltratiecapaciteit van de onderlaag/kern, en
- de gevoeligheid van de dijk voor het optreden van glijcirkels voor een verhoogd freatisch vlak.

Veel infiltratie leidt tot een verhoogd freatisch vlak en daarmee minder stabiliteit; dit geeft een grotere kans van optreden van dit vervolgproces. Verwacht wordt dat voor dit vervolgproces vooral het verhoogde freatische vlak bepalend zal zijn en daarmee de mate van infiltratie.

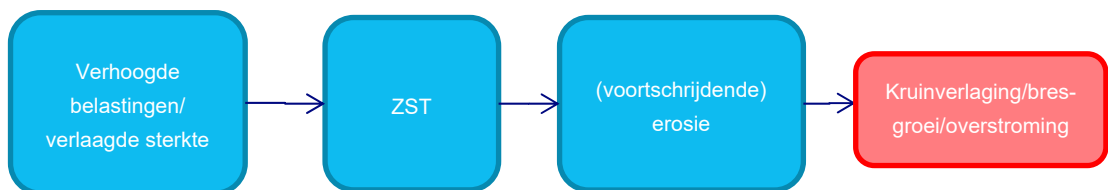
4.5.3 Beschikbare (reken)modellen

Voor de (verhoogde) infiltratie na falen van de grasmat op het buitentalud zijn op dit moment nog geen kant en klare rekenregels beschikbaar. Het is denkbaar dat dit op pragmatische wijze ingevuld kan worden, waarna in combinatie met de restduur van de hoge waterstand en de dijkopbouw met behulp van bestaande modellen voor stabiliteit van de dijk een orde grootte kansinschatting gemaakt kan worden van de bijdrage van dit vervolgproces aan de overstromingskans.

Naast rekenregels is het denkbaar dat er ook gedetailleerde (numerieke) modellen beschikbaar zijn om de mate van infiltratie na falen grasmat te beschrijven. Voor gebruik van dergelijke modellen is met name van modellering van infiltratie de grootste onzekerheid.

4.6 Faalpad initiatie ZST vervolgproces (voortschrijdende) kliferosie

4.6.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële mechanisme Zetsteen (ZST) zijn er net als bij GEBU tenminste twee vervolgprocessen denkbaar:

- voortschrijdende erosie, en
- afschuiving.

Het vervolgproces (voortschrijdende) erosie betreft het eroderen van het buitentalud als gevolg van golfaanval. Opgemerkt wordt dat bij het bepalen van de kans op initiatie van het faalpad als gevolg van ZST mogelijk ook al een (beperkt) deel van het vervolgproces in rekening is gebracht. Bij het beschouwen van het faalpad is het van belang na te gaan of sprake is van (significante) dubbeltellingen.

4.6.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Het vervolgproces voortschrijdende erosie betreft het eroderen van het buitentalud (en kern) als gevolg van golfaanval. Doordat de steenbekleding reeds gefaald is, komt het dijksmateriaal bloot te liggen. Afhankelijk van de eigenschappen van het dijksmateriaal en de mate van golfaanval zal materiaal uit de dijk getransporteerd worden. Dit vervolgproces wordt voortschrijdende erosie genoemd omdat zich tijdens het proces een klif vormt die zich door de dijk in de richting van de binnentoeen verplaatst.

De bepalende factoren voor het optreden van het vervolgproces (voortschrijdende) erosie zijn:

- de mate van golfaanval (duur na falen steenbekleding en grootte van de golven)
- de erosiebestendigheid van de onderlagen/kern.

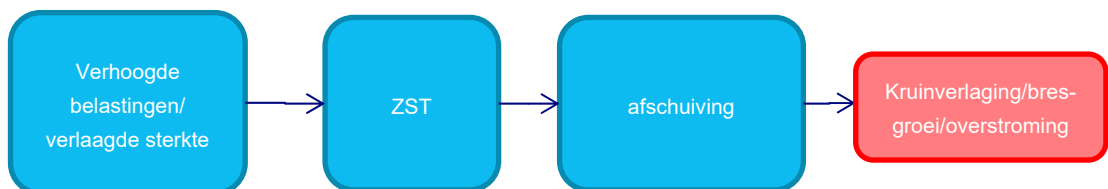
Een kortere duur van golfaanval of lagere golfconditie in combinatie met een grotere erosiebestendigheid van onderlaag/kern zorgt voor een kleinere conditionele kans van optreden voor deze knoop.

4.6.3 Beschikbare (reken)modellen

In tegenstelling tot het vervolgproces (voortschrijdende) erosie na GEBU geldt dat in dit geval nog geen (of zeer beperkte) kennis van het erosieproces bekend is. Duidelijk is dat grotere golfaanval in combinatie met beperkte erosiebestendigheid van de onderlagen zal leiden tot een grotere conditionele kans van optreden van deze knoop. Kwantificering van deze conditionele kans is nog niet mogelijk anders dan op grond van expert judgement.

4.7 Faalpad initiatie ZST vervolgproces afschuiving

4.7.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële knoop/het mechanisme ZST kan mogelijk ook een binnenwaartse afschuiving optreden. Deze afschuiving is dan veroorzaakt door een verhoogd freatisch vlak als gevolg van meer infiltratie door het buitentalud, leidend tot minder weerstand tegen afschuiving.

4.7.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Net als voor het vervolgproces afschuiving na GEBU gelden de volgende bepalende factoren voor deze knoop:

- de restduur van de hoge waterstand na falen van de grasbekleding in combinatie met de infiltratiecapaciteit van de onderlaag/kern, en
- de gevoeligheid van het optreden van glijcirkels voor een verhoogd freatisch vlak.

4.7.3 Beschikbare (reken)modellen

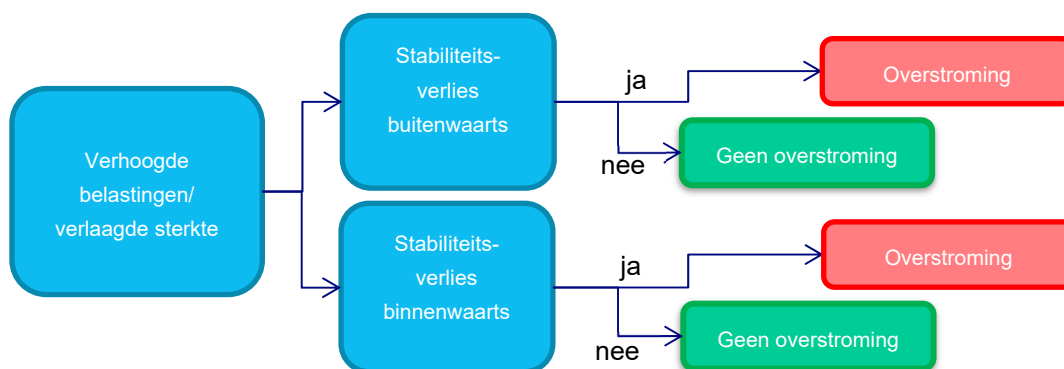
Ook hier geldt dat, net als voor vervolgproces afschuiving na falen grasmat buitentalud, voor de (verhoogde) infiltratie na falen van de bekleding op dit moment nog geen kant en klare modellen en rekenregels beschikbaar zijn. Het is denkbaar dat dit op pragmatische wijze ingevuld kan worden, waarna in combinatie met de restduur van de hoge waterstand en de dijkopbouw met behulp van bestaande modellen voor stabiliteit van de dijk een orde grootte kansinschatting gemaakt kan worden van de bijdrage van dit vervolgproces aan de overstromingskans.

Naast rekenregels is het denkbaar dat er ook gedetailleerde (numerieke) modellen beschikbaar zijn om de mate van infiltratie na falen grasmat te beschrijven. Voor gebruik van dergelijke modellen is met name van modellering van infiltratie de grootste onzekerheid.

5 Knopenkaart Stabiliteitsverlies

5.1 Faalmechanismen binnen Stabiliteitsverlies

De knopenkaart voor Stabiliteitsverlies bestaat (vooralnog) uit twee faalmechanismen, zijnde (i) overstroming (falen) volgend op stabiliteitsverlies buitenwaarts en (ii) overstroming (falen) volgend op stabiliteitsverlies binnenwaarts, zie Figuur 5-1.

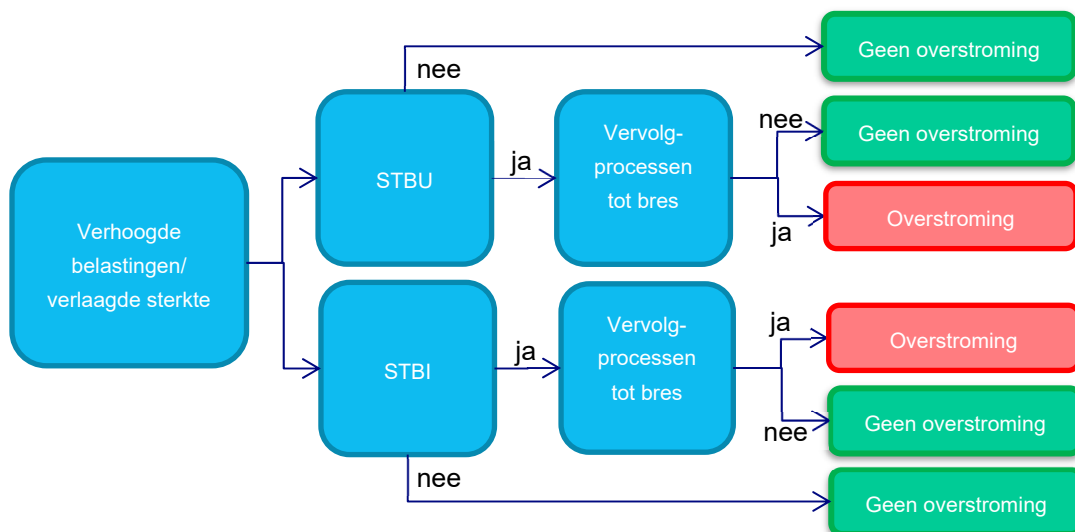


Figuur 5-1: Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor Stabiliteitsverlies.

Voor deze twee gebeurtenissenbomen wordt voor de eerste knoop (initiatie van schade) aangesloten op de in WBI2017 gehanteerde faaldefinities voor de gedetailleerde beoordeling:

- Stabiliteitsverlies buitenwaarts: STBU
- Stabiliteitsverlies binnenwaarts: STBI

In Figuur 4-2 zijn als eerste knoop de WBI2017 faaldefinities gehanteerd, zodat duidelijk is wat reeds onderdeel is van het bestaande instrumentarium voor de bepaling van de overstromingskans en welke onderdelen toegevoegd kunnen worden om tot een scherper beeld van de overstromingskans te komen. Na deze eerste knopen dienen veelal nog vervolprocessen plaats te vinden voordat sprake is van bresvorming en overstroming. Dit betekent dat er nog knopen na het initiërende mechanisme (eerste knoop) kunnen/moeten worden opgenomen in de gebeurtenissenboom, zie Figuur 4-2. Hierbij kan het zo zijn dat de vervolprocessen kunnen bestaan uit meerdere takken (faalpaden).



Figuur 5-2: Knopenkaart (deel-gebeurtenissenboom) voor Stabiliteitsverlies.

In de hiernavolgende paragrafen worden per initiërend mechanisme uit het WBI2017 de meest voor de hand liggende faalpaden geschetst. Daarnaast wordt aangegeven op welke wijze een inschatting van de relevantie van de vervolgnodden vastgesteld kan worden. Tot slot wordt een overzicht gegeven van de beschikbare instrumenten om tot een kwantitatieve kansinschatting te komen.

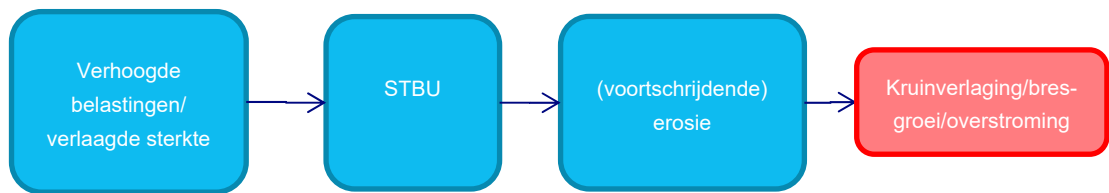
Het startpunt voor deze beschrijving is opgenomen in Tabel 5-1, waarin een samenvatting is gepresenteerd van de voor de hand liggende faalpaden. Hierin worden de veelal dominante vervolgnodden per initiërende knoop (WBI2017 mechanisme) benoemd. Vervolgens worden per vervolgnodden de bepalende factoren benoemd: deze kunnen gebruikt worden om op basis van expert judgement de relevantie van de vervolgnodden/knopden te duiden. Tot slot worden de beschikbare tools voor de kansbepaling gepresenteerd in drie categorieën: a) expert judgement, b) benadering/orde grootte en c) gedetailleerd.

Cluster van faalmechanismen	Faalmechanisme	Vervolgnodden		
		Vervolgnodden	Relevantiecheck (P<<)	Kansbepaling (P≠1)
Stabiliteitsverlies	STBU	Voortschrijdende erosie (e.v.)	Bepalende factoren: - Golfhoogte - Restduur - Erosiebestendigheid buitentalud/onderlagen	a. Expert judgement b. CSOLievens (2018) c. Deltares (2022c)
		Afschuiving (e.v.)	Bepalende factoren: - Verloop waterstand - Infiltratiecapaciteit	a. Expert judgement b. -- c. --
	STBI	Kliferosie (e.v.)	Bepalende factoren: - Overslagvolumen - Restduur overslag - Erosiebestendigheid binnentalud/onderlagen	a. Expert judgement b. Deltares (2022b)-Hoofdstuk 5 c. --
		Afschuiving (e.v.)	Bepalende factoren: - Overslagvolumen - Duur overslag - Infiltratiecapaciteit	a. Expert judgement b. RWS (2012)-H6 c. Deltares (2022a)

Tabel 5-1: Samenvattende tabel Stabiliteitsverlies

5.2 Faalpad initiatie STBU vervolproces (voortschrijdende) erosie

5.2.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële knoop/het mechanisme Stabiliteitsverlies Buitenwaarts (STBU) zijn er ten minste twee vervolprocessen denkbaar alvorens sprake zal zijn van een overstroming: (i) voortschrijdende erosie en (ii) afschuiving. Het vervolproces voortschrijdende erosie betreft het eroderen van het buitentalud (en kern) als gevolg van golfaanval.

5.2.2 Beschrijving vervolproces na initieel mechanisme

Doordat er reeds een afschuiving heeft plaatsgevonden op het buitentalud, komt het dijksmateriaal bloot te liggen. Afhankelijk van de eigenschappen van het dijksmateriaal en de mate van golfaanval zal materiaal uit de dijk getransporteerd worden. Dit vervolproces wordt voortschrijdende erosie genoemd omdat zich tijdens het proces een klif vormt die zich in de richting van de dijk verplaatst.

De bepalende factoren voor het optreden van het vervolproces (voortschrijdende) erosie zijn:

- de mate van golfaanval (duur na falen grasmat en grootte van de golven)
- omvang van de afschuiving op het buitentalud
- erosiebestendigheid van de onderlagen/kern.

Een kortere duur van golfaanval of lagere golfconditie in combinatie met een grotere erosiebestendigheid van onderlaag/kern zorgt voor een kleinere conditionele kans van optreden voor deze knoop.

5.2.3 Beschikbare (reken)modellen

Voor het vervolproces voortschrijdende erosie in geval van volledig groene dijken is een model beschikbaar dat zowel in een semi-probabilistische als een volledig probabilistische context gebruikt kan worden. CSOLievensse (2018) beschrijft semi-probabilistische rekenregels voor het bepalen van de conditionele kans van optreden van deze knoop. Deltares (2022c) beschrijft het instrument dat de volledig probabilistische beschouwing van de voortschrijdende erosie (dus de combinatie van de initiërende knoop en de eerstvolgende knoop) beschrijft.

Het model waarmee de voortschrijdende erosie wordt beschreven is nader toegelicht in sectie 4.4.3 van dit rapport.

5.2.4 Relevantie vervolproces voortschrijdende erosie na STBU

Met het beschikbare model, gebaseerd op van Mourik (zie sectie 4.4.3) zijn gevoeligheidsanalyses gedaan. In plaats van initiale schade als gevolg van falen grasmat is nu initiële schade als gevolg van een afschuiving beschouwd. Het erosieprofiel na afschuiving is als volgt gedefinieerd:

- (i) Het betreft een “plak” uit het profiel/buitentalud met een dikte van 0.5 of 1.0 meter (haaks op het talud) en een verticale hoogte van 1, 2, of 3 meter

- (ii) De bovenzijde van de “plak” ligt op het niveau van de piekwaterstand (aanname: tot daar is het freatisch vlak opgetild), de onderzijde ligt op piekwaterstand minus bovenstaande verticale hoogte

Vervolgens is voor drie soorten belastingsituaties nagegaan wat de extra erosie na storm en na hersteltijd is:

- (i) Rivieren: afschuiving op basis van bovenstaand, gegeven een piekwaterstand; vervolgens erosie tijdens na de snelle val van de waterstand (tijdens hersteltijd) met waterstand op referentieniveau ($h=0$) en verschillende combinaties van duur en golfhoogte
- (ii) Kust: afschuiving op basis van bovenstaand, gegeven een piekwaterstand. Erosie tijdens de storm begint vanaf het moment dat de waterstand na de piek van de storm gelijk is aan de onderzijde van de afschuiving (we hebben val van de waterstand gehad van piek tot onderzijde afschuiving, dan treedt achtereenvolgens afschuiving en erosie op), daarna erosie na de storm (tijdens hersteltijd) met waterstand op referentieniveau ($h=0$) en verschillende combinaties van duur en golfhoogte
- (iii) Meren: afschuiving op basis van bovenstaand, gegeven een piekwaterstand. Erosie tijdens de storm begint vanaf het moment dat de waterstand na de piek van de storm gelijk is aan de onderzijde van de afschuiving (we hebben val van de waterstand gehad van piek tot onderzijde afschuiving, dan treedt achtereenvolgens afschuiving en erosie op), daarna erosie na de storm (tijdens hersteltijd) met waterstand op referentieniveau ($h=0$) en verschillende combinaties van duur en golfhoogte.

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat voor het rivierengebied dit betekent dat het vervolgproces voortschrijdende erosie een grote bijdrage geeft aan de overstromingskans. Tijdens de storm is de kans zeer klein dat een afschuiving van het buitentalud zal plaats vinden omdat daarvoor een val van de waterstand benodigd is, welke in het rivierengebied afhankelijk van de afvoer en niet van de wind). Indien er geen herstel van de afschuiving heeft plaats gevonden voor de eerstvolgende gebeurtenis met zware golfcondities, dan zal erosie gaan optreden. Indien de golfhoogte niet boven de 0,5 meter uit komt zal tussen de 0,2 en 0,6 meter erosie optreden bij goede klei en tot 0,7 meter bij klei met een hoger zandgehalte. De erosie is niet erg gevoelig voor de aanwezige taludhelling (1 op 3 of 1 op 4). Het is vooral de duur van de tweede storm/hersteltijd die meer erosie veroorzaakt. Bij golven van 1 meter zal er veel meer erosie optreden, tot wel 2.4 meter bij een langere stormduur en meer zandige klei. Hier is vooral ook de plaats/hoogte van de afschuiving op het talud van belang. Bij een afschuiving lager op het talud gaat de erosie minder diep.

Erosie klei rivierdijk 2^e hoog water na 1^e hoog water zonder herstel schade.

2° hoog water zonder herstel	Golfhoogte na 1° hoog water 0,5 m duur tussen 48 en 240 uur	Golfhoogte na 1° hoog water 1 m duur tussen 48 en 240 uur
	Duur 48 uur / 240 uur	Duur 48 uur / 240 uur
Kleidijk talud 1 op 3 goede klei		
Afschuiving hoog	0,2 m / 0,6 m	1,7 m / 2,3 m
Afschuiving laag	0,2 m / 0,6 m	1,4 m / 2,1 m
Kleidijk talud 1 op 3 zandige klei		
Afschuiving hoog	0,3 m / 0,7 m	1,9 m / 2,4 m
Afschuiving laag	0,3 m / 0,7 m	1,7 m / 2,1 m
Kleidijk talud 1 op 4 goede klei		
Afschuiving hoog	0,2 m / 0,5 m	1,5 m / 2,2 m
Afschuiving laag	0,2 m / 0,5 m	1,2 m / 1,8 m
Kleidijk talud 1 op 4 zandige klei		
Afschuiving hoog	0,2 m / 0,6 m	1,7 m / 2,2 m
Afschuiving laag	0,2 m / 0,6 m	1,4 m / 1,8 m

In het kustgebied zijn wind en waterstand wel aan elkaar gekoppeld en kan er daardoor aan het einde van de storm wel een afschuiving plaats vinden, gevolgd door het vervolgproces voortschrijdende erosie gedurende de storm en binnen de hersteltijd. Bij een golfhoogte van 1 meter tijdens de storm gaat het om een beperkte erosiediepte van 0,4 meter. Bij een golfhoogte van 2 meter gaat het om een erosiediepte van tot wel 1,8 meter bij een talud van 1 op 3. Dit zijn erosiedieptes in geval van redelijke klei. Bij meer zandige klei wordt de erosiediepte groter: tot wel 2,4 meter bij een golfhoogte van 2 meter en een talud van 1 op 3. Afhankelijk van de opbouw van de dijk (aanwezigheid van klei op het buitentalud) kan het vervolgproces voortschrijdende erosie relevant zijn voor de overstromingskans.

1° storm kust	Golfhoogte 1° storm 1m	Golfhoogte na 1° storm 2m
Kleidijk talud 1 op 3 goede klei		
Afschuiving hoog	0,4 m	1,8 m
Afschuiving laag	0 m	0 m
Kleidijk talud 1 op 3 zandige klei		
Afschuiving hoog	1,3 m	2,4 m
Afschuiving laag	0 m	0 m
Kleidijk talud 1 op 4 goede klei		
Afschuiving hoog	0,3 m	1,2 m
Afschuiving laag	0 m	0 m
Kleidijk talud 1 op 4 zandige klei		
Afschuiving hoog	0,4 m	1,7 m
Afschuiving laag	0 m	0 m

Hierbij moet wel genoemd worden dat dit nog conservatieve waarden zijn omdat de aanwezigheid van harde bekleding op het ondertalud (veelal het geval langs de kust) nog niet is meegenomen in het model.

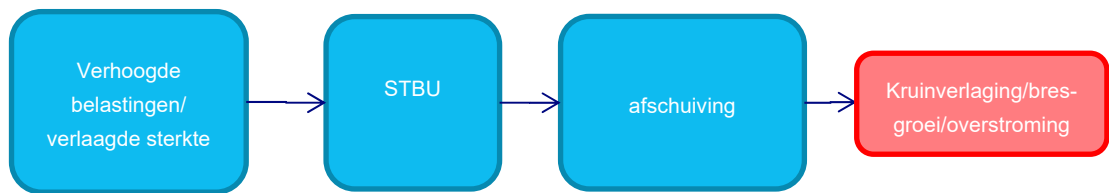
De gevoeligheidsanalyse laat zien dat in het merengebied de erosiediepte als gevolg van het vervolproces voortschrijdende erosie tot een variërend beeld leidt. De combinatie van de waterstand na initiële schade en de plek van de initiële schade op het talud verschilt erg van de rivieren en de kust. Voor het merengebied wordt de mate van erosie bepaald door de duur van golfaanval na de afschuiving. Als de afschuiving al snel na de piek van de waterstand optreedt (en het betreft dan een kleine afschuiving hoger op het talud), dan kunnen de golven geen erosie meer veroorzaken op het niveau van de afschuiving (het water is inmiddels al gezakt). In een dergelijke situatie zal er vooral erosieoptreden lager op het talud. Als de afschuiving echter groot is, dan zal het erosieprofiel wel samenvallen met de afschuiving en daarmee zal erosie versterkend werken. In navolgende tabel is de erosiediepte niet meer uitgedrukt in afschuiving hoog of laag, omdat daar niet direct verband in zit. Het is nu uitgedrukt in afschuiving kritische plek op talud (dus erosieprofiel wel/niet samenvallen met afschuiving).

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse wordt gesteld dat het vervolproces voortschrijdende erosie (afhankelijk van de aanwezigheid van klei in de beschouwde dijk) voor dijken in het merengebied een relevante bijdrage kan leveren aan de overstromingskans en dat het daarmee relevant is om dit vervolproces in beschouwing te nemen. Indien de schade na de eerst storm nog niet hersteld is bij de 2^e storm kan de erosie oplopen tot wel 2,5 meter bij golven van 2 meter: dan is de relevantie van het vervolproces voor de overstromingskans een stuk kleiner (zeker als het niet een volledige kleidijk betreft).

1 ^e storm meren	Golfhoogte na 1 ^e storm 1m	Golfhoogte na 1 ^e storm 2m
Kleidijk talud 1 op 3 goede klei		
Afschuiving kritische plek talud	1,6 m	1,2 m
Afschuiving niet kritische plek	0 m	0,7 m
Kleidijk talud 1 op 3 zandige klei		
Afschuiving kritische plek talud	1,6 m	1,5 m
Afschuiving niet kritische plek	0 m	0 m
Kleidijk talud 1 op 4 goede klei		
Afschuiving kritische plek talud	1,5 m	0,9 m
Afschuiving niet kritische plek	0,3 m	0,6 m
Kleidijk talud 1 op 4 zandige klei		
Afschuiving kritische plek talud	1,5 m	1,1 m
Afschuiving niet kritische plek	0,3 m	0,8 m

5.3 Faalpad initiatie STBU vervolproces afschuiving

5.3.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van het initiële mechanisme Stabiliteitsverlies Buitenwaarts (STBU) kan ook een afschuiving van het binnentalud optreden. Dit is dan het gevolg van een verhoogd freatisch vlak in de dijk door versterkte infiltratie via het beschadigde buitentalud.

5.3.2 Beschrijving vervolproces na initieel mechanisme

Het vervolproces afschuiving na eerste afschuiving van het buitentalud betreft een afschuiving afhankelijk van (i) een grotere mate van infiltratie van water door het beschadigde buitentalud (leidend tot een verhoogd freatisch vlak) en (ii) de weerstand die de dijk kan mobiliseren tegen afschuiven.

De bepalende factoren voor deze knoop zijn:

- Het tijdsverloop van de hoge waterstand na falen van de grasbekleding in combinatie met de infiltratiecapaciteit van de onderlaag/kern, en
- de gevoeligheid van de dijk voor het optreden van glijcirkels door een verhoogd freatisch vlak.

Veel infiltratie leidt tot een verhoogd freatisch vlak en daarmee minder stabiliteit; dit geeft een grotere kans van optreden van dit vervolproces. Verwacht wordt dat voor dit vervolproces vooral het verhoogde freatische vlak bepalend zal zijn en daarmee de mate van infiltratie.

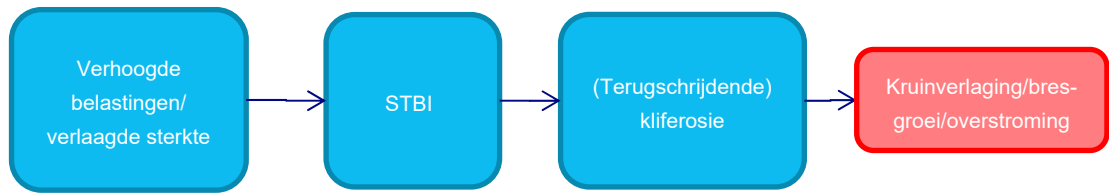
5.3.3 Beschikbare (reken)modellen

Voor de (verhoogde) infiltratie na optreden van een afschuiving van het buitentalud zijn op dit moment nog geen kant en klare rekenregels beschikbaar. Het is denkbaar dat dit op pragmatische wijze ingevuld kan worden, waarna in combinatie met de restduur van de hoge waterstand en de dijkopbouw met behulp van bestaande modellen voor stabiliteit van de dijk een orde grootte kansinschatting gemaakt kan worden van de bijdrage van dit vervolproces aan de overstromingskans. Het in meer detail beschouwen van het vervolproces afschuiving binnenwaarts na optreden afschuiving buitenwaarts is waarschijnlijk van beperkte toegevoegde waarde in gevallen waarbij sprake is van een zanddijk met kleibekleding: dan zal het meenemen van het vervolproces slechts een beperkte invloed hebben op de overstromingskans.

Naast rekenregels is het denkbaar dat er ook gedetailleerde (numerieke) modellen beschikbaar zijn om de mate van infiltratie na falen grasmat te beschrijven. Voor gebruik van dergelijke modellen is met name van modellering van infiltratie de grootste onzekerheid.

5.4 Faalpad initiatie STBI vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie

5.4.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van het initiële mechanisme Stabiliteitsverlies Binnenwaarts (STBI) zijn er tenminste twee vervolgprocessen denkbaar: (i) terugschrijdende kliferosie en (ii) afschuiving. Het vervolgproces (terugschrijdende) kliferosie betreft het eroderen van kruin en binnentalud als gevolg van golfoverslag of overloop.

5.4.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Terugschrijdende erosie van kruin en binnentalud is het transport van het dijksmateriaal als gevolg van overslag of overloop. Bepalende factoren voor het optreden van terugschrijdende erosie zijn:

- de aard en omvang van de initiële afschuiving, en
- de hoeveelheid en duur van overslag na optreden afschuiving, en
- de erosiebestendigheid van het dijksmateriaal.

De erosiebestendigheid en de erodeerbaarheid van het dijksmateriaal zijn bepalende factoren voor de snelheid waarmee de terugschrijdende erosie op kan treden. In het kader van de knopenkaart wordt ervan uitgegaan dat in geval van niet-cohesief dijksmateriaal de erosiesnelheid zo hoog is dat dit geen significante bijdrage (reductie) levert aan de overstromingskans. Voor cohesief dijksmateriaal is de erosiebestendigheid zodanig dat redelijkerwijs een effect op de overstromingskans mag worden verwacht van het meenemen van het vervolgproces terugschrijdende erosie.

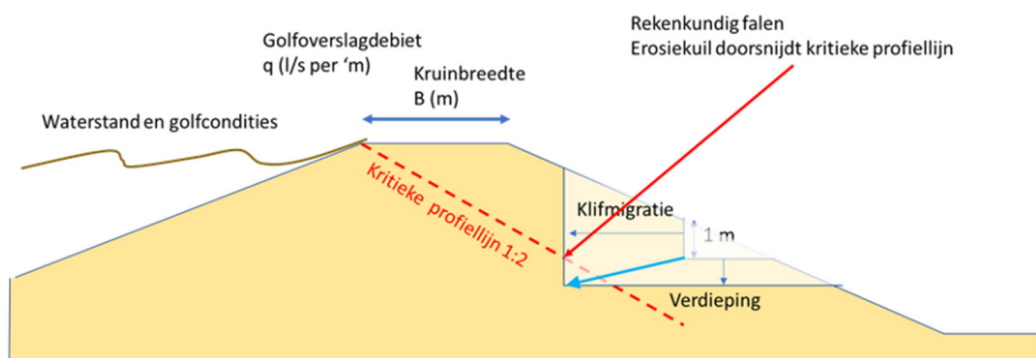
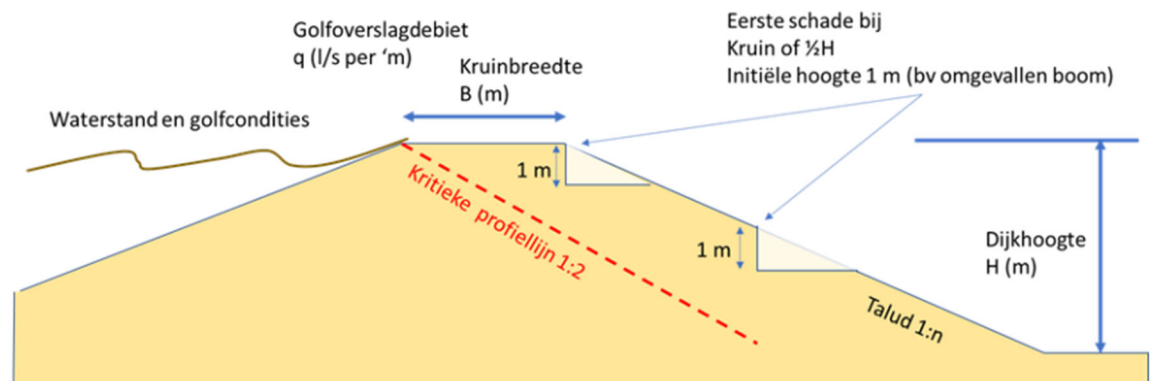
Als de afschuiving van het binnentalud pas aan het einde van de storm optreedt en als de onderlaag erosiebestendig is, dan zal de kans dat dit faalpad optreedt binnen de beschouwde storm klein zijn (conditionele kans van optreden van de knoop is klein). Omgekeerd, als de afschuiving aan het begin van de storm optreedt en de erosiebestendigheid van de onderlaag beperkt is, dan zal de kans dat dit faalpad optreedt groot zijn (conditionele kans van optreden van deze knoop is groot).

5.4.3 Beschikbare (reken)modellen

De tools om terugschrijdende erosie door golfoverslag te voorspellen zijn op dit moment beperkt en/of er is nog geen algemene consensus over generiek gebruik voor Nederlandse dijken. Er zijn internationaal gezien procesmatige modellen beschikbaar (zie bijvoorbeeld <https://www.dambreach.org/tools/embrea>) om de erosie van het binnentalud als gevolg van overloop te modelleren. Deze zijn ontwikkeld in het kader van gronddammen voor onder meer stuwmeren en gaan uit van cohesief dijksmateriaal. De toepasbaarheid van deze relaties voor de Nederlandse waterkeringen (met andersoortige belasting en grotere variatie dijkopbouw) is enkel mogelijk met betrokkenheid van experts. De beschikbare tools kunnen gebruikt worden als gevoeligheidsanalyse met als doel om na te gaan in hoeverre het vervolgproces terugschrijdende erosie bijdraagt aan de overstromingskans. Een gedetailleerde aanpak is nog niet beschikbaar voor dit mechanisme.

In Deltares (2022b) is beschreven hoe de model componenten gegeven door Temple et al. (2005), die zijn ontwikkeld voor bresvorming door overloop, zijn toegepast om kansverdelingen voor het kritiek overslagdebiet af te leiden voor een fragmentarische zode en een vooraf gedefinieerde faaldefinitie. Deze modelcomponenten zijn ook verwerkt in het EMBREA model (<https://www.dambreach.org/tools/embrea>). De gehanteerde (rekenkundige) faaldefinitie is terugschrijdende erosie tot een kritieke profiellijn van 1:2 vanaf de buitenkruinlijn, zie sectie 4.2.3. Het bereiken van deze faaldefinitie betekent nog niet dat sprake is van een overstroming: daarvoor is nog kruinverlaging en bresgroei nodig. Dit model is gebaseerd op bestaande kennis over het erosieproces bij overloop van homogene kleidijken (NCRS, 1987), en beperkt gevalideerd en gekalibreerd aan 1 test waarbij golfoverslagproeven zijn uitgevoerd op kale klei.

Het model resulteert in een kansverdeling van het kritiek overslagdebiet voor het bereiken van het kritieke profiel. Dit kritieke overslagdebiet kan gebruikt worden om na te gaan of de dijk na afschuiven nog veel of beperkt overslag kan weerstaan. Het gaat dan om een overslagdebiet waarbij terugschrijdende erosie optreedt gegeven een bepaalde breedte van de kruin, verschillende initiële schades, verschillende golfcondities en verschillende erodeerbaarheid en kritieke erosieschuifspanning van klei. In een figuur ziet het er als volgt uit:



5.4.4 Relevantie vervolgproces terugschrijdende erosie

Met het hiervoor beschreven model zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de relevantie van het vervolgproces in te schatten voor verschillende archetypen van dijken en belastingen. Hierbij wordt het kritiek overslagdebiet dat door het model berekend wordt als maat voor relevantie van het vervolgproces terugschrijdende erosie gehanteerd: hoe hoger het kritieke overslagdebiet hoe groter de relevantie van het beschouwde vervolgproces. De gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd voor verschillende waarden van :

- Kruinbreedte
- Golfhoogte
- Diepte initiële klif
- Erosiebestendigheid klei
- Helling kritieke profiellijn

Hierbij zijn een aantal belangrijke aannames gedaan:

- De gevoeligheidsanalyses zijn alleen geldig voor een kleidijk: voor een zanddijk wordt aangenomen het vervolgproces terugschrijdende erosie zo snel zal gaan dat het geen substantiële bijdrage levert aan de (reductie van de) overstromingskans.
- De onzekerheden die er zijn over het proces van erosie van kale grond wordt in rekening gebracht door grote bandbreedtes en enkele conservatieve aannames. Met gevoeligheidsanalyses is daarnaast gerekend met uitersten.
- Er is in alle gevallen rekening gehouden met een stormduur van 3 uur.
- De formules in dit model bevatten een drempelwaardeparameter (kritieke schuifspanning) en een erosiesnelheidsparameter (erodeerbaarheid). In het kader van onderzoek naar reststerkte van de dijk na macro-instabiliteit bij golfoverslag is gekeken naar verschillende waarden van deze parameter voor klei. Hierbij is gebruik gemaakt van de relaties tussen grondeigenschappen en erosieparameters die worden gegeven in de literatuur en is een golfoverslagproef 'Delfzijl' en een overloopprouf op klei 'Bergambacht' nagerekend.

Een eerste gevoeligheidsanalyse met dit model geeft de volgende inzichten waarmee ingeschat kan worden of de bijdrage van het vervolgproces kliferosie na STBI relevant is voor de overstromingskans:

- Voor een zanddijk of dijk met zandkern en kleibekleding wordt aangenomen dat het vervolgproces terugschrijdende erosie (zeer) snel zal verlopen. Het nader beschouwen van het vervolgproces terugschrijdende zal in voorkomende gevallen dan ook niet leiden tot een significante bijdrage aan de overstromingskans.
- Omdat kleidijken vooral voorkomen als rivierdijk is rekening gehouden met een golfhoogte van een halve meter na de eerste afschuiving. Dit is een conservatief uitgangspunt, omdat dit tot het laagste kritieke overslagdebiet leidt t.o.v. grotere golfhoogtes: lagere golven leiden in het algemeen tot een sneller erosieproces dan de hogere golven. Dit kan worden verklaard door de relatief lage drempelwaarden voor erosie van kale grond, ten opzichte van bijvoorbeeld gras. Bij klei zullen ook kleine golven leiden tot enige erosie, terwijl dat bij gras niet zo is. De optelsom van erosie door veel kleine golven is voor kale grond doorslaggevend ten opzichte van enkele hele grote golven
- Het maakt uit hoe groot de initiële schade is na afschuiving. Indien sprake is van een flinke initiële schade door een diepe afschuiving (een klifhoogte van 2 a 3 meter) heeft het bij een kleidijk met een kruin van 6 meter breedte mogelijk nog wel nut om naar vervolgprocessen te kijken, maar bij kleinere kruinbreedtes is dit minder relevant. In geval van een brede kruin (6 meter) wordt bij grote erosiebestendigheid (zie hiervoor ook volgende punt) nog geen falen berekend en worden kritieke overslagdebieten in een zeer grote range berekend van 1 l/s/m tot aan 5 , of zelfs nog hoger. Bij dergelijke kritieke overslagdebieten kan de bijdrage van het vervolgproces relevant zijn voor de overstromingskans. Hierbij wordt op gemerkt dat de grenzen van het model opgezocht. Bij een kleidijk met een kruinbreedte van 3 meter wordt een beperkte bijdrage van het vervolgproces gevonden: meestal zal meteen bezwijken optreden en dragen vervolgprocessen niet of nauwelijks bij.
- De gevoeligheidsanalyse laat (conform verwachting) zien dat met name de variabele erodeerbaarheid belangrijk is bij het vervolgproces kliferosie. Helaas is hier nog sprake van een kennisleemte. Er is nog maar beperkt (generieke) kennis over de erodeerbaarheid van de Nederlandse klei op het binnentalud. Om toch iets over de

relevantie van het vervolgproces te kunnen zeggen is naar de volgende parameters gekeken: erosiesnelheid, effectieve schuifspanning, een belasting parameter met daarin het debiet (m³/s) en de hoogte van het klif. Hierbij is gebruik gemaakt van de relaties tussen grondeigenschappen en erosieparameters die worden gegeven in de literatuur en is een golfoverslagproef 'Delfzijl' en een overloopproof op klei 'Bergambacht' nagerekend. Indien er sprake is van

- o (i) een initiële afschuiving die niet in de kruin insnijdt,
- o (ii) de klif niet groter is dan 1 meter,
- o (iii) een golfhoogte van 0,5 meter en
- o (iv) een erodeerbaarheid berekend vanuit eerder genoemde proeven (met een grote spreiding),

dan worden de volgende kritieke overslagdebieten berekend: van een 5% ondergrenswaarde van 5,6 l/s/m tot wel 10 en 20 l/s/m en nog hoger voor grote erosiebestendigheid. Dan is het relevant om naar vervolgprocessen te kijken, de kans dat het vervolgproces optreedt is dan relatief klein.

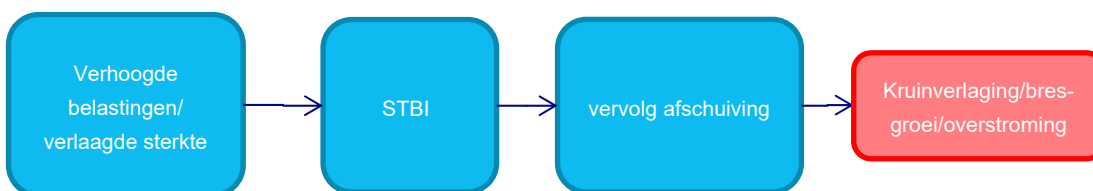
- De komende jaren zal kennis ontwikkeld gaan worden op het gebied van erodeerbaarheid van klei op het binnen talud en zodra deze kennis beschikbaar is, kan hier voor vervolgprocessen gebruik van gemaakt worden.

Bovengenoemde conclusies zijn samengevat in onderstaande tabel. Uit de tabel kan afgelezen worden tot welk kritiek overslagdebiet verwacht zou mogen worden dat het vervolgproces niet tot falen leidt en dat dus zeker naar vervolgprocessen gekeken kan worden, omdat ze een grote bijdrage hebben aan de overstromingskans.

	Golven na schade 0,5 m	
Zanddijk	n.v.t.	
Kleidijk kruin 6 m		
Initiele afschuiving klein goede klei	5,6 l/s/m tot ...	
Initiele afschuiving klein slechte klei	5,6 l/s/m	
Initiele afschuiving groot goede klei	1 tot 5 l/s/m	
Initiele afschuiving groot slechte klei	n.v.t.	
Kleidijk kruin 3 m		
Initiele afschuiving klein goede klei	5,6 l/s/m tot ...	
Initiele afschuiving klein slechte klei	5,6 l/s/m	
Initiele afschuiving groot goede klei	n.v.t.	
Initiele afschuiving groot slechte klei	n.v.t.	

5.5 Faalpad initiatie STBI vervolgproces afschuiving

5.5.1 Beschrijving faalpad



Na het optreden van de initiële mechanisme STBI is het ook mogelijk dat er een vervolgschuiving optreedt leidend tot achtereenvolgens kruinverlaging, bresgroei en uiteindelijk een overstroming. Voornaamste oorzaak/drijver voor het optreden van dit vervolgproces is een verhoogd freatisch vlak, leidend tot instabiliteit.

5.5.2 Beschrijving vervolgproces na initieel mechanisme

Het vervolgproces afschuiving na eerste afschuiving van het binnentalud betreft een afschuiving welke het gevolg is van een grotere mate van infiltratie van overslaand water (leidend tot een verhoogd freatisch vlak) al dan niet in combinatie met het verlies van gewicht in het passieve deel van een afschuifvlak. De bepalende factoren voor het optreden van dit mechanisme zijn (i) de mate waarin sprake is van infiltratie van overslaand water leidend tot de verhoging van het freatisch vlak, (ii) de omvang van de initiële schade na falen van de grasmat (en onderlaag) en (iii) de weerstand die de dijk kan mobiliseren tegen afschuiven. Afgeleide factoren zijn daarmee:

- de mate van overslag, en
- de duur waarover dit overslagdebiet aanhoudt
- Gewijzigde doorlatendheid van oppervlak
- Sterkte-eigenschappen kernmateriaal en ondergrond.

Veel infiltratie (bijvoorbeeld als gevolg veel overslag of verhoogde doorlatendheid) leidt tot een verhoogd freatisch vlak en daarmee minder stabiliteit; dit geeft een grotere conditionele kans van optreden van dit vervolgproces.

Verwacht wordt dat voor dit vervolgproces vooral het verhoogde freatische vlak bepalend zal zijn, de afname van het gewicht in de passieve deel van de afschuiving zal van ondergeschikt belang zijn (vanwege de beperkte omvang van de erosie van de grasmat).

5.5.3 Beschikbare (reken)modellen

De relevantie van vervolgproces afschuiving na eerste afschuiving van het binnentalud wordt, naar verwachting, veelal bepaald door de verandering van het freatische vlak door verhoogde infiltratie. Een eerste inschatting van de mate van infiltratie gegeven golfhoogte en gemiddeld overslagdebiet (maat voor vrijboord) kan verkregen worden op basis van hoofdstuk 6 uit RWS (2012). Naast deze inschattingen kan ook gebruik gemaakt worden van de meer geavanceerdere modellen zoals ook genoemd in RWS (2012).

De mate van infiltratie kan vervolgens vertaald worden naar een gewijzigde ligging van het freatisch vlak en hiermee geassocieerde waterspanningen. Met behulp van deze informatie kan vervolgens met reguliere stabiliteitsanalyses nagegaan worden of sprake is van een afschuiving. Indien de stabiliteitsanalyse laat zien dat er bij gewijzigde waterspanningen geen afschuiving optreedt, dan is het meenemen van dit vervolgproces relevant: het heeft een grote invloed op de overstromingskans.

Het is ook mogelijk om de kans op afschuiving te kwantificeren door enerzijds de kans op overslag in rekening te brengen (bijvoorbeeld middels een fragility curve voor overslag) en anderzijds door de onzekerheid in de stabiliteitsanalyse in rekening te brengen. Hierbij kan een semi-probabilistische analyse worden gehanteerd, maar inmiddels zijn er ook mogelijkheden om dit volledig probabilistisch te analyseren Deltares (2020a).

6 Knopenkaart Interne Erosie

Voor het spoor Interne Erosie is nog geen uitwerking van de knopenkaart gemaakt omdat de beschrijving van het initiële mechanisme ook al (delen van) vervolprocessen beschrijft. In het kader van kennis voor Keringen wordt gewerkt aan een nadere uitwerking van het faalpad. In afwachting van de resultaten van betreffende onderzoeken wordt de knopenkaart voor Interne Erosie nog niet ingevuld in deze versie van de knopenkaart.

Referenties

Deltares (2020a). Faalpadenanalyse macrostabiliteit binnenwaarts. Deltares rapport 11203719-027-GEO-0001. G. van den Ham.

Deltares (2020b). Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack – WTI2017, Deltares, rapport 1209437-017, versie 4, juli 2020.

Deltares (2022a). Werken met faalpaden, Deel 1: naar een beter beeld van de overstromingskans. Deltares rapport 11206817-005-GEO-0002, A. Smale, R. Jongejan en B. van der Kolk. Juli 2022.

Deltares (2022b). GEKB Overgangen en objecten. Deltares rapport 11206817-021-GEO-0001-versie 1.0. André van Hoven en Ligaya Wopereis. April 2022.

Deltares (2022c). Gebruikershandleiding en documentatie GEBU Faalkans-tool. Faalkans kleibekleding met gras van rivierdijk door erosie door golven. Deltares rapport 11204753-002-HYE-0005.

LievensCSO (2018). Reststerkte bij erosie van het buitentalud. Rapport nummer 17M3041-R-013-v03.

NRCS (1997). National Engineering Handbook part 628 Dams. chapter 51 Earth Spillway Erosion Model and Chapter 52 Field Procedures Guide for the Headcut Erodability Index. Natural Resources Conservation Service. 210-vi-NEH. August 1997.

Rijkswaterstaat (2012). Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde, 25 oktober 2012.

Temple, D.M., Hanson, G.J., Nielsen, M.L., Cook, K.R. (2005) Simplified breach analysis for homogeneous embankments: Part 1, Background and model components, USSD Proceedings: Technologies to Enhance Dam Safety and the Environment 25th Annual USSD Conference, Salt Lake City, Utah,

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

Deltares

www.deltares.nl