



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

# ZANDIGE WATERKERINGEN

Handleiding Overstromingskansanalyse



Groene versie 2023



Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*

**RWS INFORMATIE**

## **Handleiding Overstromingskansanalyse**

### **Zandige waterkeringen**

## Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Informatie	<a href="http://www.iplo.nl">www.iplo.nl</a>
Versie	Juli 2023

*Het project 'BOI Zandige Waterkeringen' is gefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat, STOWA, Waterschap Scheldestromen, Waterschap Hollandse Delta, Hoogheemraadschap van Delfland, Hoogheemraadschap van Rijnland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en het Wetterskip Fryslân.*

## Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen 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.

Dit document is opgesteld in nauwe samenwerking tussen Arcadis, Deltares en Rijkswaterstaat, binnen het project '*BOI Zandige Waterkeringen*'. Bij de totstandkoming van dit document is veelvuldig afstemming geweest met het BOI-brede programmteam en de begeleidingsgroep.

Het BOI-team

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	6
1.1.1	Procesinstrumentarium	6
1.1.2	Basisinstrumentarium	7
1.1.2	Werkatelier	8
1.2	Verhaal van de kering	8
1.2	Totstandkoming handleiding	9
1.3	Inhoudelijke afbakening	9
1.4	Leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>Beschrijving faalpad duinafslag</b>	<b>11</b>
2.1	Faalpad duinafslag: van initiële afslag tot falen	11
2.1.1	Initieel mechanisme: duinafslag	12
2.1.2	Vervolprocessen	13
2.2	Van faalkans naar overstromingskans voor een duinwaterkering	16
<b>3</b>	<b>Basisinstrumenten voor faalkansanalyse duinafslag</b>	<b>18</b>
3.1	Sterktemodel voor duinafslag: XBeach	18
3.1.1	Benodigde invoer voor XBeach duinafslagberekening	19
3.1.2	Kwantitatieve indicatoren	22
3.2	Sterktemodel voor vervolprocessen: het grensprofiel	22
3.2.1	Basisgeometrie grensprofiel	23
3.2.2	Alternatieve geometrie grensprofiel	24
3.2.3	Vaststellen of het duin niet faalt door inpassen grensprofiel	26
3.3	Faalkansschatting op basis van iteratief proces	28
3.4	Semi-probabilistische aanpak	30
3.5	Omgaan met het lengte-effect	32
3.5.1	Lengte-effect binnen een vak	32
3.5.2	Lengte-effect tussen vakken	32
<b>4</b>	<b>Stappenplan faalkansanalyse duinafslag</b>	<b>34</b>
4.1	Algemene beslisregels en regulier toepassingsbereik stappenplan	34
4.1.1	Algemene beslisregel	34
4.1.2	Stappenplan met focus op beoordelen zandige waterkering	34
4.1.3	Toepassingsbereik	35
4.1.4	Aanvullende analyses voor situaties buiten toepassingsbereik	35
4.1.5	Leeswijzer	35
4.2	Stappenplan faalkansanalyse duinafslag op hoofdlijnen	37
4.3	Stap 0: Verhaal van de kering en verzamelen basisgegevens	40
4.4	Stap 1: Voorbereiding faalkansanalyse duinafslag	42
4.4.1	Stap 1a: Opstellen vakindeling	42
4.4.2	Stap 1b: Selectie profielen in ruimte en tijd	44
4.4.3	Stap 1c: Selectie te beschouwen overschrijdingskansen van het afslagpunt	46
4.5	Stap 2: Bepaal faalkansschatting per raai (iteratief)	49
4.5.1	Iteratieproces in stap 2	49
4.5.2	Stap 2a: Analyse wel of niet falen van duinwaterkering	51
4.5.3	Stap 2b: Selectie maatgevend jaar	61
4.5.4	Stap 2c: Vaststellen of de waterkering wel of niet faalt in maatgevend jaar	64
4.5.5	Stap 2d: Vaststellen faalkansschatting per raai	64
4.6	Stap 3: Bepaal faalkansschatting per vak	65

4.7	Stap 4: Bepaal gecombineerde faalkans op trajectniveau	66
4.8	Stap 5: Vaststellen veiligheidsoordeel traject	66
4.8.1	Mogelijke analyses voor aanscherping van veiligheidsoordeel	66
4.9	Optioneel: Reductie van aantal duinafslagberekeningen	69
4.10	Koppeling met categoriegrenzen voor beoordeling duinentraject	70
<b>5</b>	<b>Locatie-specifieke aanvullende analyses</b>	<b>71</b>
5.1	Situaties binnen en buiten regulier toepassingsbereik van het stappenplan	71
5.2	Ruimtelijk complexe gebieden	72
5.2.1	Brede duingebieden	72
5.2.2	Gekromde kustzones	73
5.3	Aanwezigheid harde constructies	74
5.3.1	NWO's in duinen	74
5.3.2	Aansluitingsconstructies	75
5.3.3	Hybride waterkeringen	75
<b>6</b>	<b>Ambities en doorontwikkeling BOI Zandige Waterkeringen</b>	<b>77</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>79</b>
	<b>Symbolenlijst</b>	<b>81</b>
	<b>Bijlage 1. Begrippenlijst</b>	<b>82</b>
	<b>Bijlage 2. Stappenplan beoordeling zandige waterkering BOI vs. WBI2017</b>	<b>84</b>
	<b>Bijlage 3. Voorbeelden van lokale kustlijnontwikkelingen</b>	<b>85</b>
	<b>Bijlage 4. Voorbeeldmethoden om aantal afslagberekeningen te reduceren</b>	<b>86</b>
	Bijlage 3.2. Optie 1: Reductie duinafslagberekeningen na Stap 1b	86
	Bijlage 3.3. Optie 2: Reductie van aantal berekeningen in Stap 2	87
	<b>Bijlage 5. Toeslag voor effecten kustlijnkromming</b>	<b>90</b>

# 1 Inleiding

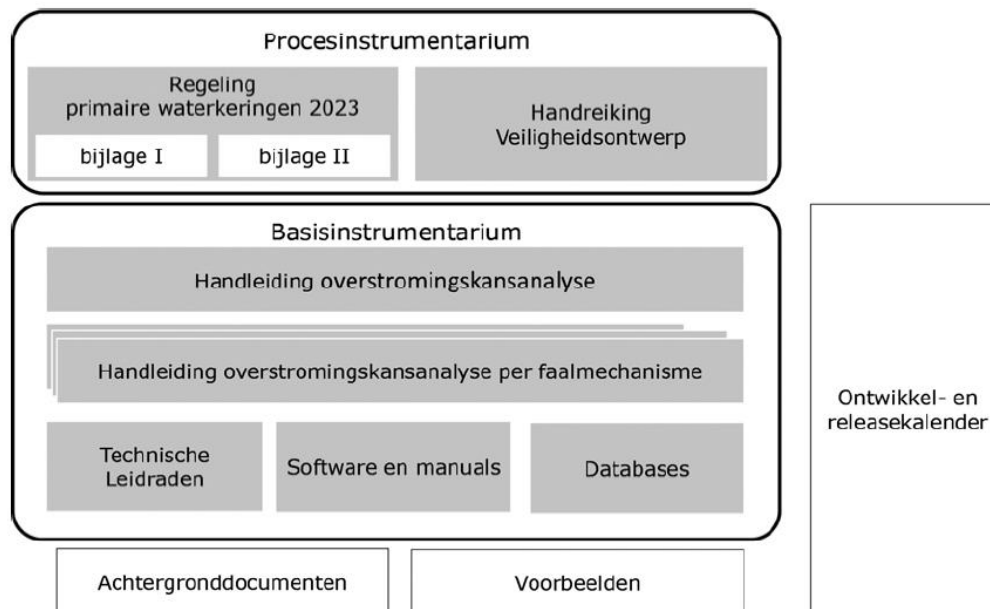
Voor u ligt de Handleiding Overstromingskansanalyse Zandige waterkeringen, welke onderdeel is van het BOI-basisinstrumentarium. Deze Handleiding beschrijft de wijze waarop de overstromingskans van zandige waterkeringen langs de Nederlandse kust kan worden bepaald. Het instrumentarium voor zandige waterkeringen is volledig vernieuwd ten opzichte van de voorgaande versies (WBI2017, VTV2006).

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023, zie Bijlage 1.

## 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 1-1.



Figuur 1-1: Overzicht BOI

### 1.1.1 **Procesinstrumentarium**

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

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

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

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

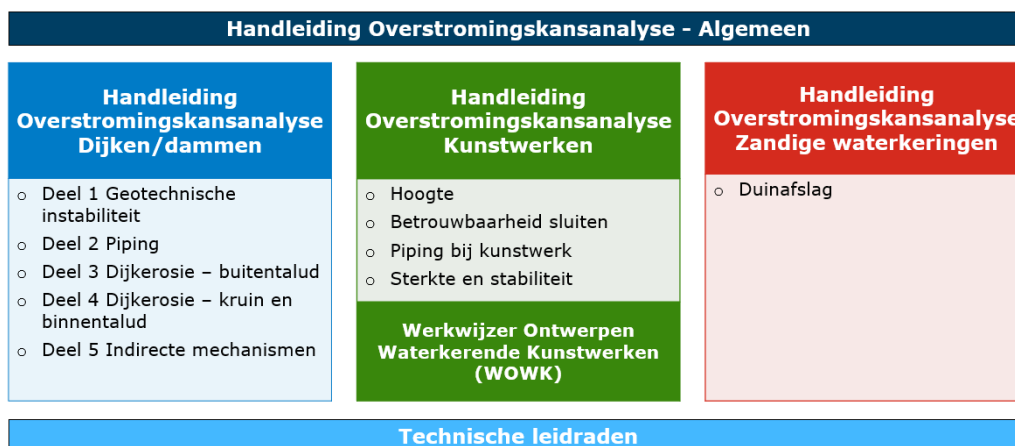
### 1.1.2 **Basisinstrumentarium**

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

#### 1.1.2.1 *Handleidingen*

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

Figuur 1-2 geeft een overzicht van de verschillende handleidingen.



*Figuur 1-2: 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 zandige waterkeringen en is een concrete uitwerking van de aanpak zoals beschreven in de handleiding overstromingskansanalyse.



### 1.1.2.2 Technische leidraden

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

### 1.1.1.1 Software en databases

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

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

### 1.1.2 Werkatelier

Deze handleiding is vooral gericht op de bepaling van de overstromingskans en *niet* op het proces. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage I en II van de Regeling en de afspraken die hierover zijn gemaakt in het draaiboek (Rijkswaterstaat, 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 analyseren van geologische tijdvakken en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van het ondergrondsysteem kwalitatief beschrijven.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het beschrijven van de hydraulische belasting van het dijktraject vanuit het watersysteem, waar nodig in combinatie met hydrologische gebeurtenissen, zoals extreme neerslag.
- **Kennis en ervaring van de keringbeheerder:** Inspecties van de waterkering hebben inzicht gegeven in het optreden van schade en vervormingen van de waterkering. Daarnaast heeft de keringbeheerder de waterkering eerder beoordeeld en mogelijk versterkt.

## 1.2 Totstandkoming handleiding

De voorliggende handleiding en de andere BOI-documentatie rondom zandige waterkeringen zijn opgesteld in nauwe samenwerking tussen experts van Arcadis, Deltares en Rijkswaterstaat binnen het project '*BOI Zandige Waterkeringen*'. Binnen dit ontwikkelingsproject is in de periode 2020–2023 het instrumentarium voor de faalkansanalyse van zandige waterkeringen vernieuwd. Hierbij is gewerkt aan de overstap van het empirische 1D duinafslagmodel Duros+ naar het proces-gebaseerde numerieke rekenmodel XBeach. Ook is de daarmee samenhangende wijziging van het semi-probabilistische rekenvoorschrift voor het uitvoeren van een faalkansanalyse doorgevoerd. Voor meer informatie over dit ontwikkelingstraject inclusief langere termijn ambities wordt verwezen naar Hoofdstuk 6.

De BOI-documentatie voor zandige waterkeringen vervangt de eerdere documenten gerelateerd aan duinafslag uit het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI) uit 2017 en eerder. Relevante teksten uit deze vervallen documenten zoals het TAW Leidraad uit 1984 (TAW, 1984), TRDA uit 2006 (ENW, 2007), de Schematiseringshandleiding Duinen 2014 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016) en de Fenomenologische beschrijving (Deltares, 2016) zijn overgenomen in de BOI-documentatie en waar nodig geüpdatet.

## 1.3 Inhoudelijke afbakening

De focus in deze handleiding ligt op het maken van een overstromingskansanalyse voor **duinwaterkeringen** (oftewel: volledig zandige delen van de waterkering) langs min of meer kustlangs uniforme, rechte delen van de Nederlandse Noordzeekust waar geen achterloopsheid optreedt. Voor dit type zandige waterkeringen kan het huidige BOI-duinafslagmodel XBeach namelijk op raainiveau tot een realistische inschatting van duinafslag komen ten behoeve van het bepalen van de overstromingskans.

Daarnaast wordt in de handleiding stil gestaan bij de mogelijke aanvullende analyses om te komen tot een overstromingskans voor complexere typen zandige waterkeringen, zoals ruimtelijk complexe gebieden met sterke kustlijnkromming of achterloopse duinrijen, of zandige waterkeringen waarin constructies aanwezig zijn zoals hybride keringen.

Deze handleiding biedt handvatten bij het uitvoeren van een overstromingskansanalyse voor zandige waterkeringen. Voor een toelichting op algemene principes binnen het BOI, wordt verwezen naar andere BOI-documenten zoals de overkoepelende handleiding voor het uitvoeren van een

overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a) en het katern 'Veiligheidsanalyse' binnen de technische leidraden (Rijkswaterstaat, 2023a). Voor verdere verdieping op bepaalde principes, modellen en software wordt in de tekst verwezen naar de relevante achtergronddocumenten, zoals de artikelen binnen het katern 'Zandige Waterkeringen' van de technische leidraden (Arcadis en Deltares, 2023c) en het rapport 'Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium' (Arcadis en Deltares, 2023a).

## 1.4 Leeswijzer


Hoofdstuk 2 beschrijft het **faalpad duinafslag** in relatie tot het bepalen van de overstromingskans. Eerst komt aan bod hoe het initieel mechanisme duinafslag en de vervolgmecanismen fysisch gezien kunnen leiden tot het falen van een zandige waterkering. Daarna wordt toegelicht hoe dit faalpad past binnen de overstromingskansbenadering binnen het BOI op basis van faalmechanismen en faalpaden en hoe falen en overstromen zich tot elkaar verhouden voor zandige waterkeringen.

Hoofdstuk 3 gaat aansluitend op de **basisinstrumenten** uit het BOI die van belang zijn voor het uitvoeren van een faalkansanalyse voor een zandige waterkering. Dit omvat zowel een toelichting op de binnen het BOI-basisinstrumentarium aangeboden **sterktemodellen** voor het initieel mechanisme duinafslag en de vervolgprocessen, als een beschrijving van relevante **methodes** en **principes** om een faalkansanalyse voor een duinwaterkering uit te voeren.

Hoofdstuk 4 beschrijft in detail het **stappenplan** waarmee – in lijn met de huidige BOI-systematiek – een faalkansanalyse kan worden uitgevoerd voor het faalpad duinafslag. Dit stappenplan richt zich primair op het uitvoeren van een faalkansanalyse ten behoeve van de beoordeling van duinwaterkeringen. Hierbij staat het 'verhaal van de kering' centraal. Aan de orde komen het maken van een faalkansschatting met het semi-probabilistische rekenvoorschrift en de stappen om te komen tot een veiligheidsoordeel op trajectniveau.

Hoofdstuk 5 geeft een toelichting op het toepassingsbereik van het stappenplan, en **locatie-specifieke aanvullende analyses** die nodig zijn voor ruimtelijk complexe gebieden en locaties waar constructies aanwezig zijn in de zandige waterkering (niet volledig zandige delen van de waterkering).

Tot slot gaat Hoofdstuk 6 in op **ambities en (door)ontwikkelingen** in relatie tot het instrumentarium voor zandige waterkeringen.

Het BOI-basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen is op een aantal punten substantieel gewijzigd ten opzichte van het voorgaande wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI) uit 2017. Voorbeelden zijn de BOI-brede overstap naar een *faalpadbenadering*, en de overstap van Duros+ naar XBeach als sterktemodel voor duinafslag. De hoofdtekst richt zich op de overstromingskansanalyse conform het BOI. Voor lezers die geïnteresseerd zijn in de belangrijkste verschillen tussen het WBI uit 2017 en het vigerende BOI in relatie tot faalpad duinafslag, zijn deze verschillen uitgelicht in *genummerde blauwe kaders (Kader #)* met het icoon . De kaders kunnen ook overgeslagen worden.

## 2 Beschrijving faalpad duinafslag

Met hulp van het BOI wordt de overstromingskans op trajectniveau bepaald en beoordeeld aan de hand van zogenaamde faalmechanismen en faalpaden. Zoals gedefinieerd in Bijlage II van de Regeling, is een faalmechanisme 'de verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme' en een faalpad 'een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering'. Een faalpad bestaat daarbij uit een initieel mechanisme en eventuele vervolgmecanismen. Voor zandige waterkeringen is het faalmechanisme 'duinafslag' relevant. Binnen dit faalmechanisme wordt in praktijk veelal slechts één gelijknamig faalpad onderscheiden.

In dit hoofdstuk wordt het faalpad duinafslag in relatie tot het bepalen van de overstromingskans nader toegelicht. Hierbij wordt gefocust op het falen van een duinwaterkering (volledig zandige waterkering). In §2.1 worden de fysische processen binnen het faalpad duinafslag beschreven – het initieel mechanisme duinafslag en de vervolgprocessen – en hoe deze kunnen leiden tot het falen van de waterkering. Vervolgens wordt in §2.2 de koppeling gelegd tussen dit faalpad en het bepalen van de faal- of overstromingskans, waarbij ook het onderscheid tussen de juridische en fysieke begrenzing van een duinwaterkering van belang is.

Voor basisbegrippen en -principes die relevant zijn voor het uitvoeren van een overstromingskansanalyse wordt verwezen naar enkele andere documenten in het BOI:

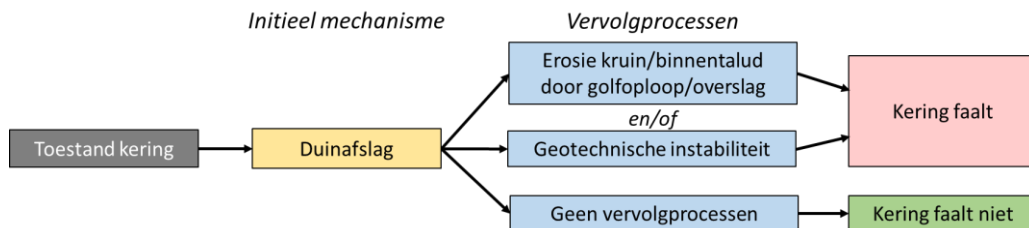
- Begrippen zoals overstromingskans, faalkans, faalpad, faalmechanisme, mechanisme, initieel mechanisme en vervolgmecanismen zijn gedefinieerd in Bijlage I van de Regeling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022).
- De algemene aanpak en principes van de overstromingskansbenadering en een toelichting op de bovenstaande relevante begrippen zijn opgenomen in Bijlagen van de Omgevingsregeling, de Handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a) en het katern Veiligheidsanalyse van de technische leidraden (Rijkswaterstaat, 2023a).

Daarnaast wordt in de technische leidraad katern Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023c) stilgestaan bij de termen 'falen', 'duindoorbraak' en 'overstromen' specifiek in relatie tot een duinwaterkering, en hoe deze termen met elkaar samenhangen.

### 2.1 Faalpad duinafslag: van initiële afslag tot falen

Het faalpad duinafslag omvat zowel het initieel mechanisme duinafslag als de vervolgmecanismen die uiteindelijk kunnen leiden tot het falen en doorbreken van een zandige waterkering en overstroming van het achterland. **Fout! V erwijzingsbron niet gevonden.** vat de gebeurtenissen en processen binnen faalmechanisme duinafslag schematisch samen. Binnen faalpad duinafslag worden de vervolgprocessen gezamenlijk beschouwd: het optreden van een van beide vervolgprocessen (of allebei) na duinafslag kan leiden tot het falen van de waterkering en overstroming van het achterland.

De vervolgprocessen kunnen ook optreden als door duinafslag het hele duin afslaat. In dat geval is de bijdrage van de vervolgprocessen aan het falen van de kering gering en is het initieel mechanisme voldoende om tot falen te leiden.

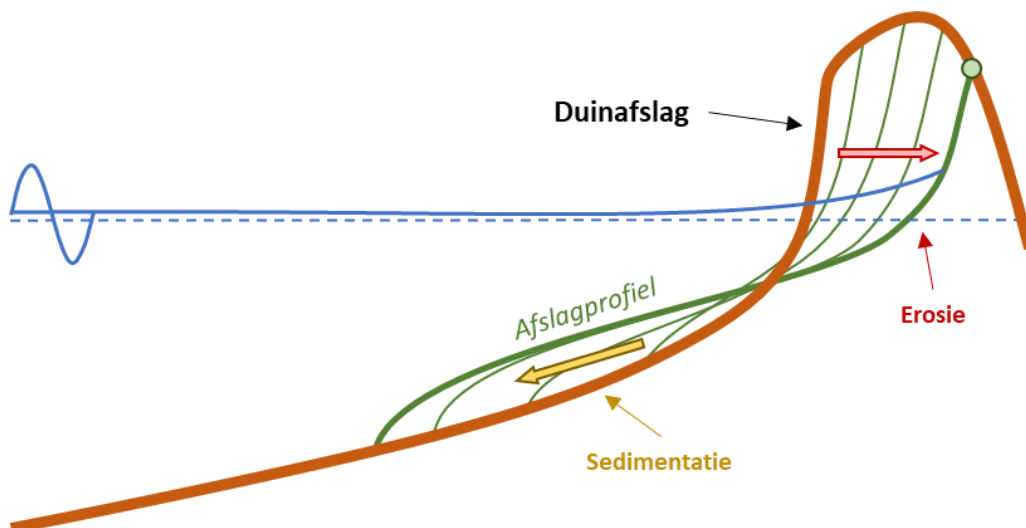


*Figuur 2-1 Boomweergave van de opeenvolgende gebeurtenissen en processen die kunnen optreden binnen faalmechanisme duinafslag en die leiden tot het wel of niet falen van een duinwaterkering. Merk op dat vervolgprocessen ook kunnen optreden als duinafslag het hele duin afslaat, al is de bijdrage van de vervolgprocessen aan het falen van de kering in dat geval gering en is het initieel mechanisme voldoende om tot falen te leiden.*

Het faalpad duinafslag wordt hieronder nader beschreven. De focus ligt hierbij op duinwaterkeringen (volledig zandige waterkeringen). Een uitgebreidere beschrijving van de processen (fenomenologische beschrijving) staat in de technische leidraad katern Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023c).

### 2.1.1 Initieel mechanisme: duinafslag

Het initieel mechanisme duinafslag leidt tot landwaartse verplaatsing van het duinfront door hoofdzakelijk zeewaarts gericht transport van het duinsediment tijdens een storm (in het zogenaamde 'collision-regime'). Tijdens een storm wordt het duin belast door een combinatie van hoge waterstanden – door (spring)tij al dan niet in combinatie met opzet door wind en golven – en korte en lange golven die op een relatief hoog niveau tegen het onbeschermd en steile duinfront slaan. Het duinfront wordt hierdoor aan de onderkant ondergraven. Zodra een instabiele situatie optreedt, stort veelal plaatselijk een deel van het duinfront in dat vervolgens zeewaarts en in langsrichting wordt uitgevlakt. Dit zand wordt zeewaarts afgevoerd door golfaanval en door de golf-genereerde retourstroom (onderstroom en mui-stromen), totdat er opnieuw aantasting van het duinprofiel optreedt en het proces zich herhaalt, zie Figuur 2-2.



*Figuur 2-2 Schematische weergave van het duinafslagproces. De dunne groene lijnen met rode en gele pijl tonen de ontwikkeling van het profiel over tijd*

*waarbij het afslagfront landwaarts schrijdt en de afzetting in zeewaartse richting uitbouwt.*

Dit proces zet zich voort tot het duin volledig afgeslagen is of tot de golven het duinfront niet meer kunnen bereiken aan het eind van de storm als het waterpeil weer zakt en de golven in sterkte afnemen.

### 2.1.2 Vervolgprocessen

De sterkte van een duinwaterkering tijdens en na het optreden van duinafslag (oftewel: tijdens en net na een storm die het duin belast) wordt volledig ontleend aan de stabiliteit van het resterende (zandige) duinprofiel. Naast duinafslag kunnen vervolgprocessen de sterkte van de resterende waterkering nadelig beïnvloeden en tot doorbraak leiden. Twee relevante vervolgprocessen zijn:

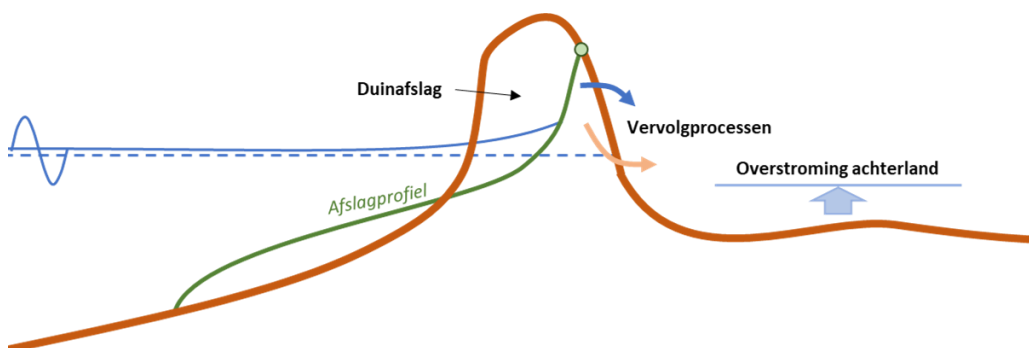
(1) Geotechnische instabiliteit

Een vervolgproces dat kan leiden tot een doorbraak van het restprofiel tijdens of na de storm is (geotechnische) instabiliteit in relatie tot grondwaterstandsvariaties en uittredend grondwater. Hierdoor kan het (binnen)talud afschuiven en voor doorbraak zorgen. Dit proces vindt niet plaats als het (rest)profiel voldoende breed of het (binnen)talud voldoende flauw is.

(2) Erosie kruin/binnentalud door golfoploop en -overslag

Een ander vervolgproces is erosie van de kruin en het binnentalud van het resterend duin door oploop en overslag van (korte) golven tijdens de storm. Dit is een zichzelf versterkend proces dat kan leiden tot het volledig eroderen van het resterend duin en daarmee ook doorbraak van de zandige waterkering. Dit proces vindt niet plaats als het (rest)profiel voldoende hoog is, waardoor geen of slechts beperkt overslag plaats kan vinden.

In Figuur 2-3 zijn het initiële mechanisme en de eventuele vervolgprocessen van het faalpad duinafslag schematisch weergegeven.



*Figuur 2-3 Schematische weergave van het initiële mechanisme (duinafslag) en eventuele vervolgprocessen (blauwe pijl: erosie kruin/binnentalud door golfoploop/-overslag; lichtoranje pijl: geotechnische instabiliteit) van het faalpad duinafslag.*

### Bijdrage vervolgprocessen aan falen waterkering

De hierboven beschreven vervolgprocessen zijn niet in alle situaties relevant om mee te nemen in een faalkansanalyse. Tijdens een storm die het duin belast kunnen zich in feite drie situaties voordoen waarin de bijdrage van de vervolgprocessen verschilt:

(A) vervolgprocessen vinden niet plaats (geen nadere analyse nodig);

- (B) vervolprocessen vinden mogelijk plaats en bepalen het wel/niet falen van de kering (nadere analyse nodig);
- (C) vervolprocessen vinden plaats maar zijn van ondergeschikt belang voor het falen van de kering (geen nadere analyse nodig).

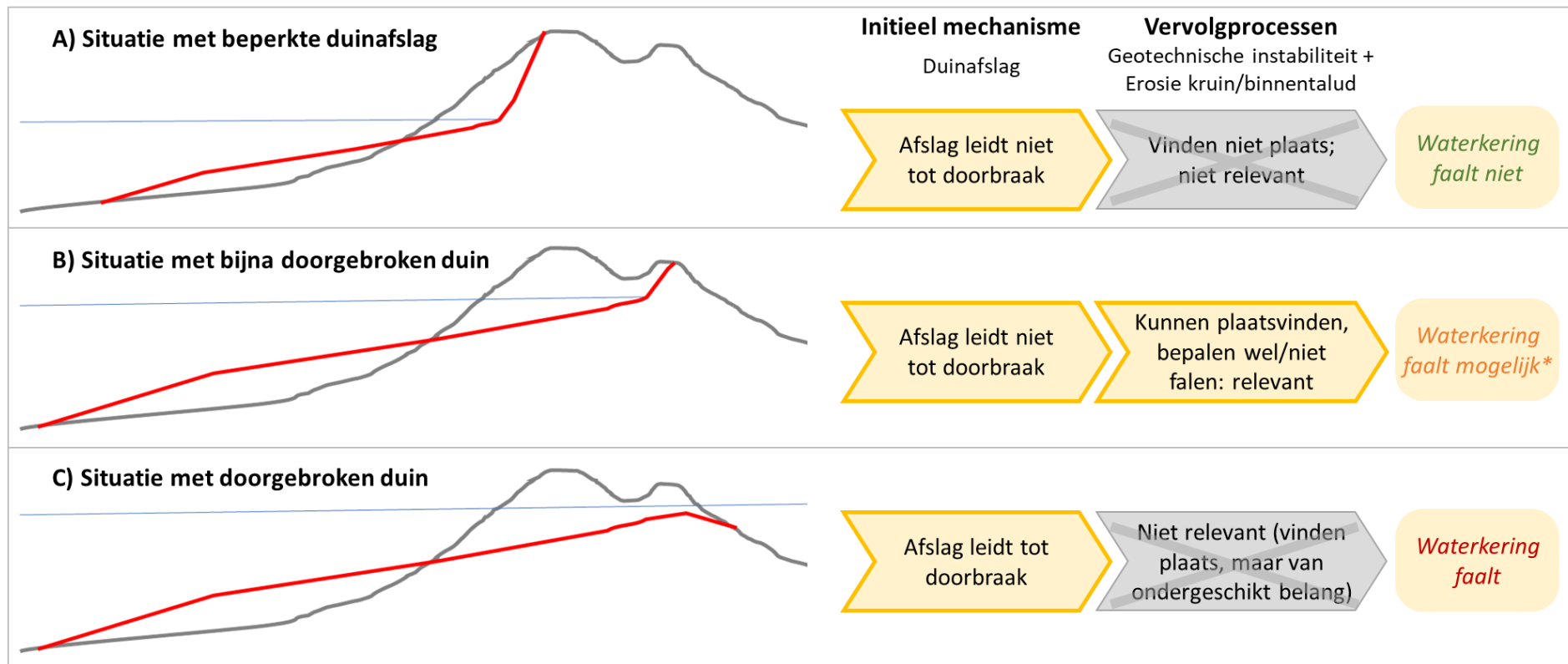
Deze situaties zijn weergegeven in Figuur 2-4. In dit figuur neemt de zwaarte van de hydraulische belasting op het duin toe van boven naar beneden, waardoor de mate van duinafslag ook toeneemt.

In situatie A leidt initieel mechanisme duinafslag tot terugschrijding van het duinfront, maar breekt het duin niet door. De totale afslag is beperkt van omvang en er resteert landwaarts van het afslagprofiel nog een breed duin. Vanwege de omvang van het resterend duin, kan op voorhand ingeschat worden dat vervolprocessen niet zullen optreden en dus ook niet tot een doorbraak leiden. Het resterend duin is breed genoeg om geotechnische instabiliteit te voorkomen, en hoog genoeg om (erosie door) golfoploop en -overslag te voorkomen. In deze situatie is een verdere analyse van de vervolprocessen niet nodig. De kans op doorbraak is in deze belastingsituatie verwaarloosbaar klein. Dit komt overeen met de onderste keten in Figuur 2-1 die eindigt bij 'kering faalt niet'.

In situatie B in Figuur 2-4 leidt het initieel mechanisme duinafslag door de hogere belasting tot een verdere terugschrijding van het duinfront. Landwaarts van het duinafslagfront is nog een deel van het duin aanwezig met een beperkte omvang. In dit geval zijn de vervolprocessen wel van belang: het wel of niet optreden van één of meer vervolprocessen is bepalend voor het wel of niet falen van de waterkering (zie ook Figuur 2-1). Op voorhand is – zonder verdere analyse – niet vast te stellen of de kering faalt. Om de faalkans van de kering in te schatten is in deze situatie naast de analyse van het initieel mechanisme dus ook een analyse van de vervolprocessen nodig. Het analyseren van de vervolprocessen is dus nodig op het moment dat er na duinafslag sprake is van een resterend duinprofiel met een beperkte omvang. De grootte van het te beschouwen restprofiel is mede afhankelijk van het initieel aanwezige duinprofiel en de hydraulische belasting tijdens de storm.

In situatie C in Figuur 2-4 heeft het initieel mechanisme duinafslag geleid tot het volledig afslaan van het duin. Vanaf het moment tijdens de storm dat er nog een zeer klein duin over is, zal ook het vervolgproces erosie van het kruin/binnentalud door golfoploop en -overloop plaats hebben gevonden en bij hebben gedragen aan het wegspoelen van de resten van het duin. Dit geldt mogelijk ook voor het vervolgproces geotechnische stabiliteit. Beide vervolprocessen leveren echter slechts een beperkte, niet dominante bijdrage aan de doorbraak. De vervolprocessen zijn in deze situatie niet relevant. Een analyse van initieel mechanisme duinafslag is dan voldoende om vast te stellen dat de waterkering faalt.

Voor het bepalen van de realistische overstromingskans van een waterkering met het BOI is juist de situatie dat de duinwaterkering *nét* doorbreekt van belang. De kans van voorkomen die bij deze situatie hoort, is namelijk de gezochte faalkans. Dit zal een situatie zijn die het meest vergelijkbaar is met situatie B in Figuur 2-4, waarbij het net wel/niet doorbreken ook afhankelijk is van de vervolprocessen. Deze vervolprocessen zullen daarom altijd meegenomen moeten worden in een BOI-faalkansanalyse.



Figuur 2-4 Schematische weergave van de bijdrage van het initieel mechanisme en de vervolgprocessen binnen faalpad duinafslag aan het wel of niet falen van een duinwaterkering in drie situaties met toenemende hydraulische belasting op het duin. Het figuur aan de linkzijde toont het profiel voor belasting (grijs) en na optreden van initieel mechanisme duinafslag (rood). \*In situatie B is een analyse van de vervolgprocessen nodig om vast te stellen of de kering wel of niet faalt.



## 2.2 Van faalkans naar overstromingskans voor een duinwaterkering

In een overstromingskans- of faalkansanalyse wordt voor elk relevant faalmechanisme binnen een traject op basis van de dominant geachte faalpaden de bijdrage aan de overstromings- of faalkans bepaald. Per faalmechanisme wordt eerst op vakniveau de faalkans bepaald en vervolgens worden deze faalkansen per vak gecombineerd tot de faalkans op trajectniveau voor dit faalmechanisme. Binnen een vak wordt vaak eerst de faalkans per raai bepaald, om op basis daarvan de faalkans van het vak te bepalen. Dit is ook het geval voor faalpad duinafslag. De aanpak hiervoor wordt nader uitgewerkt in het stappenplan in Hoofdstuk 4.

Als de bijdragen van alle relevante faalmechanismen bekend zijn, worden deze gecombineerd tot een overstromings- of faalkans van het traject. Bij een waterveiligheidsbeoordeling wordt vervolgens een vergelijking gemaakt tussen deze overstromingskans op trajectniveau en de wettelijk vastgestelde waterveiligheidsnorm. Daarbij wordt het dijktraject ingedeeld in één van de categorieën uit tabel 4.1 zoals opgenomen in Bijlage I van de Regeling.

Bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen wordt gekeken naar overstromingskansen, waarbij de overstromingskans in de Omgevingsregeling is gedefinieerd als: “*de kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt dat dodelijke slachtoffers zijn te verwachten of substantiële economische schade ontstaat*” (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022). Een duindoorkraak of het falen van een zandige waterkering zal echter niet per definitie in alle gevallen leiden tot een overstroming zoals hierboven gedefinieerd. In de technische leidraad katern Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023c) worden de termen ‘falen’, ‘doorbreken’ en ‘overstromen’ in relatie tot een duinwaterkering en de samenhang tussen deze termen nader toegelicht. Hierbij is onder andere het onderscheid tussen de fysieke begrenzing en de juridische begrenzing van de zandige waterkering van belang.

- De **fysieke begrenzingen** hebben betrekking op het volledig duingebied dat bijdraagt aan het voorkomen van een overstroming van het achterland.
- De **juridische begrenzingen** zijn gerelateerd aan de relevante waterkeringszones die zijn vastgelegd in een Legger, zoals het waterstaatswerk, waarbij veelal rekening is gehouden met een ‘doorgaand grensprofiel’.

Het is **afhankelijk van het doel** van een waterkeringsanalyse of er een inschatting gemaakt wordt van de *faalkans van de (juridische) waterkering* of van de *overstromingskans van het achterland*.

Er kunnen zich twee situaties voordoen:

### 1. De fysieke en juridische begrenzingen zijn gelijk

Deze situatie komt vaak voor. In dit geval geldt over het algemeen dat de faalkans van de waterkering = doorbraakkans van het duin(gebied)  $\approx$  overstromingskans van het achterland. In dit geval kan de juridische begrenzing aangehouden worden in zowel een faalkans- als overstromingskansanalyse.

### 2. De fysieke en juridische begrenzingen zijn niet gelijk

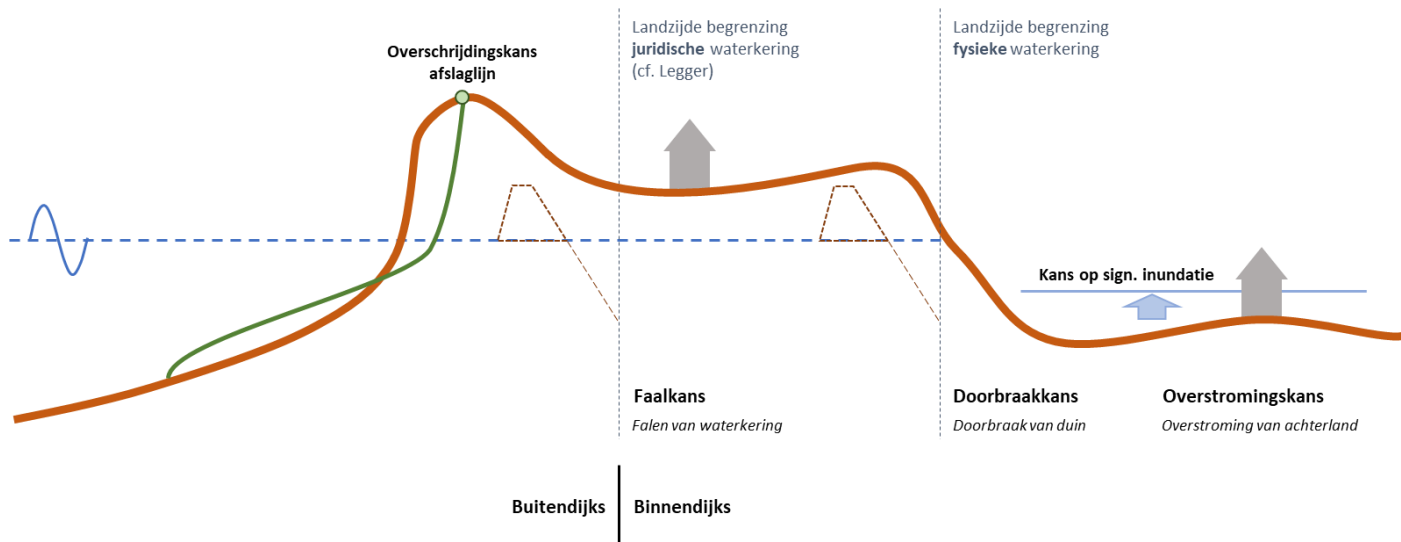
In enkele gevallen in met name brede duingebieden is de juridische waterkering smaller dan de fysieke waterkering, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2-5. De faalkans van de juridische waterkering is dan

niet gelijk aan de doorbraakkans (= falen van de fysieke waterkering) en ook niet gelijk aan de overstromingskans van het achterland.

Voor het uitvoeren van een *beoordeling* wordt geadviseerd om in eerste instantie een faalkansanalyse uit te voeren op basis van de juridische begrenzings van de waterkering. Als de faalkansschatting in de buurt van de norm ligt of de norm zelfs wordt overschreden, wordt aanbevolen om voor minimaal de dominante raaien en vakken een aanvullende faalkansanalyse uit te voeren waarbij de fysieke begrenzings als uitgangspunt dienen<sup>1</sup>. Houd er hierbij rekening mee dat de (waterkerende) hoogte in het gebied buiten de legger niet gegarandeerd is. Voor de actuele situatie in het veld is daarom een check nodig op uitgevoerde ontgravingen in de periode waar de overstromingskans voor bepaald wordt.



In het vervolg van deze handleiding is de term faalkansanalyse gebruikt in plaats van overstromingskansanalyse. Afhankelijk van de gemaakte keuze voor de te hanteren begrenzing is dit de faalkans van de juridische waterkering, of de overstromingskans van het achterland.



Figuur 2-5 Schematische weergave van een fictief profiel van een duinwaterkering, met relevante begrippen in relatie tot overstromingskans versus faalkans en juridische versus fysieke begrenzings van de waterkering.

<sup>1</sup> Dit is een pragmatische aanpak; deze situatie kan ook aanleiding zijn voor een herziening van de legger, wat buiten de scope van deze handleiding valt.

## 3 Basisinstrumenten voor faalkansanalyse duinafslag

In dit hoofdstuk worden de basisinstrumenten uit het BOI toegelicht die van belang zijn voor het uitvoeren van een faalkansanalyse voor een zandige waterkering. Dit vormt de basis om in Hoofdstuk 4 het stappenplan voor de faalkansanalyse mee uit te kunnen voeren. Allereerst worden de sterktemodellen beschreven die aangeboden worden om het initieel mechanisme duinafslag (§3.1) en de vervolgprocessen (§3.2) mee te analyseren. Vervolgens zijn enkele principes beschreven om voor een zandige waterkering de faalkans te kunnen bepalen: het **iteratief proces** om te komen tot de faalkansschatting op raainiveau (§3.3), de **semi-probabilistische aanpak** voor faalpad duinafslag (§3.4), en hoe omgegaan kan worden met 'het lengte-effect' om de faalkansschatting per raai te vertalen naar faalkans per traject (§3.5).

### 3.1 Sterktemodel voor duinafslag: XBeach

Voor de overstromingskansanalyse van een duinwaterkering (volledig zandige waterkering) kan het initieel mechanisme duinafslag geanalyseerd worden met een rekenkundig model. De mate van duinafslag en daarmee de positie van het afslagpunt kan bijvoorbeeld worden gekwantificeerd met de duinafslagmodellen Duros+, DurosTa of XBeach (Arcadis en Deltares, 2023c). Het BOI biedt het proces-gebaseerde duinafslagmodel XBeach aan als sterktemodel voor het analyseren van het initieel mechanisme duinafslag in een faalkansanalyse.

Met XBeach kunnen duinafslagsimulaties worden uitgevoerd met tijdsafhankelijke randvoorwaarden, zoals nader wordt toegelicht in §4.5.2. Hierbij worden de belangrijke hydrodynamische en morfologische fysische processen van diep water tot en met het duin expliciet berekend. Een belangrijk element in XBeach is hierbij dat de zogenaamde lange golven (of meer specifiek: infragravity waves) in de kustnabije zone expliciet worden berekend. Dit is van belang omdat lange golven een belangrijke bijdrage hebben op de hoeveelheid duinafslag. In andere modellen, zoals Duros+, worden de fysische processen (inclusief lange golven) niet expliciet berekend en is het effect ervan impliciet verwerkt in de locatie-specifieke afregeling van het model. Voor een nadere toelichting op XBeach en andere sterktemodellen wordt verwezen naar het rapport 'Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium' (Arcadis en Deltares, 2023a). In deze achtergrondrapportage is de ontwikkeling van de sinds 1984 ontwikkelde duinafslagmodellen iets uitgebreider beschreven en zijn ook de hierop gebaseerde rekenvoorschriften (leidraadmodellen) toegelicht.

Een meer uitgebreide toelichting op XBeach is opgenomen in de technische leidraad katern Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023c).

Er is een specifieke BOI-versie van XBeach (Arcadis en Deltares, 2023a) ontwikkeld en afgeregeld voor raaitoepassingen in het BOI. Daartoe is een vergelijking gemaakt met 57 veldwaarnemingen waaruit volgt dat XBeach een systematische onderschatting (bias) van de hoeveelheid afslag boven stormvloedpeil levert van 3 % met een relatieve foutspreiding van 24 % (Deltares, 2022a). In de semi-probabilistische uitwerking (zie §3.4) is rekening gehouden met zowel de systematische onderschatting als de standaardafwijking (Arcadis en Deltares, 2023b). De gebruiker hoeft hier dus niet voor te corrigeren als gebruik wordt gemaakt van de semi-probabilistische rekenwaarden.

Deze BOI-versie van het model is beschikbaar via de softwaretool MorphAn (Deltares, 2022d). MorphAn is een gebruikersschil die het mogelijk maakt om ten behoeve van

een faalkansanalyse voor duinafslag XBeach modelberekeningen op te zetten, uit te voeren en te analyseren.

MorphAn faciliteert het gebruik van de jaarlijkse ingemeten kustprofielen (JarKus data) als rekenprofiel in XBeach, en het gebruik van de instellingen en randvoorwaarden die horen bij de BOI-XBeach-versie. Voor meer informatie over MorphAn, zie onder andere de technische leidraad (Arcadis en Deltares, 2023c) en de MorphAn handleiding (Deltares, 2022d).

### 3.1.1 **Benodigde invoer voor XBeach duinafslagberekening**

XBeach is een rekenmodel met veel verschillende (aanpasbare) modelparameters, die stuk voor stuk invloed (kunnen) hebben op het modelresultaat. Ten behoeve van het BOI-basisinstrumentarium is een specifieke set met BOI-standaardinstellingen afgeleid op basis van een uitgebreide kalibratie- en validatiestudie (Arcadis en Deltares, 2022; Deltares en Arcadis, 2022a).

Om met XBeach duinafslagsimulaties uit te voeren zijn tijdsafhankelijke hydraulische modelrandvoorwaarden nodig. Dit is tegenstelling tot bij de berekeningen met Duros+, waarbij alleen piekcondities nodig zijn als invoer. Daarnaast moet er aandacht besteed worden aan de schematisering van de rekenprofielen voor XBeach. Ten behoeve van het BOI-basisinstrumentarium zijn onderbouwde basisinstellingen vastgelegd voor de verschillende onderdelen van de modelopzet (Arcadis en Deltares, 2023a) en hoeft de waterkeringbeheerder deze niet zelf in te stellen.

Bij gebruik van MorphAn worden de standaard parameterinstellingen en uitgangspunten voor modelopzet automatisch ('achter de schermen') toegepast bij de opzet van XBeach modellen. In de technische leidraad zijn de relevante in- en uitvoergegevens samengevat en in het achtergrondrapport (Arcadis en Deltares, 2023a) zijn alle relevante BOI-XBeach parameterinstellingen overgenomen. Als de waterkeringbeheerder toch (onderbouwd) wil afwijken van deze instellingen/uitgangspunten dan bestaat de mogelijkheid om losse XBeach modellen op te zetten.

Opgemerkt wordt dat de huidige BOI-versie van XBeach is afgeregeld voor raaitoepassingen (1D) voor duinen (volledig zandige waterkeringen). XBeach biedt ook mogelijkheden voor bijvoorbeeld gebiedsdekkende 2DH berekeningen. Dit is nader toegelicht in Hoofdstuk 5. Daarnaast licht **§Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** de eventuele toekomstige uitbreiding van de functionaliteiten van het BOI-sterktemodel toe.



#### **Kader 1. Sterktemodel BOI (XBeach) vs. WBI2017 (Duros+)**

In het BOI vervangt het proces-gebaseerde model XBeach het empirische model Duros+ als sterktemodel voor de 1D duinafslagberekeningen binnen de gebruikersschil MorphAn. Een overzicht van de eigenschappen en verschillen tussen deze duinafslagmodellen is gegeven in

---

Tabel 3-1.

Voor **Duros+** (WBI2017) is slechts een klein aantal invoergegevens nodig, namelijk de diepwatercondities tijdens de stormpiek, de korreldiameter van het zand ( $D_{50}$ ) en het rekenprofiel. Het proces-gebaseerde model **XBeach** (BOI) heeft daarentegen meer invoergegevens en modelinstellingen voor het berekenen van de hoeveelheid duinafslag tijdens een storm. Een verschil is bijvoorbeeld dat XBeach gebruik maakt van tijdsafhankelijke invoer voor de offshore hydraulische condities. Ook moet een rekenrooster worden gedefinieerd en het rekenprofiel vaak verder doorlopen tot diep water waar deze hydraulische condities opgelegd worden. Voor de 1D BOI-versie van XBeach zijn bijbehorende BOI-standaardinstellingen en standaardmethoden voor het genereren van modelinvoer (via MorphAn) afgeregeld, waardoor het aantal invoergegevens dat de gebruiker in moet voeren beperkt blijft.

Voor XBeach is dus meer invoer nodig, maar hierdoor kunnen wel de relevante fysische processen worden doorgerekend. Dit vergroot het toepassingsbereik van het model ten opzichte van het empirische model Duros+, al gaat dit wel gepaard met een toename in de rekentijd.

Voor meer informatie over de verschillende duinafslagmodellen wordt verwezen naar de technische leidraden (Arcadis en Deltares, 2023c) en de achtergrondrapportage (Arcadis en Deltares, 2023a).

Tabel 3-1 Overzicht eigenschappen en verschillen tussen XBeach in het BOI (1D-berekeningen) en Duros+ in het WBI2017.

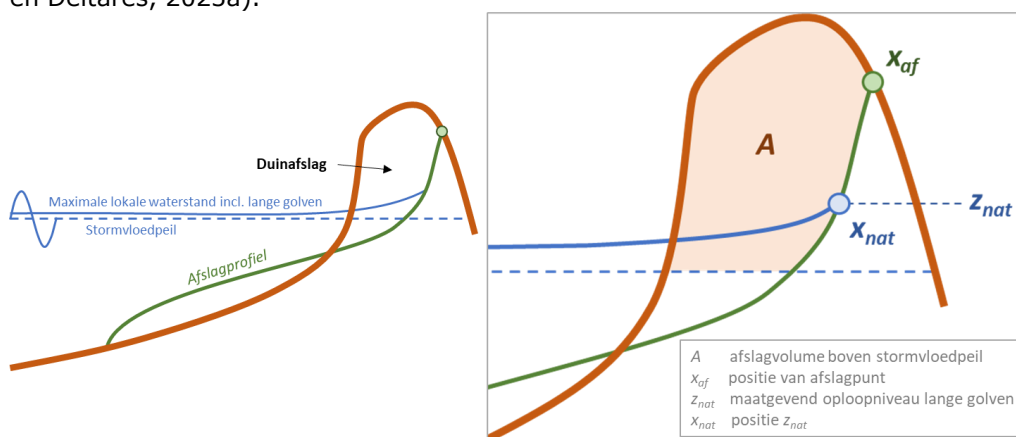
	<b>XBeach</b>	<b>Duros+</b>	<b>Vershil</b>
<b>Type model</b>	Numeriek model dat hydro- en morfodynamische kustprocessen doorrekent	Empirisch balansmodel voor duinafslagprofiel (balans erosie - depositie)	Ander type model
<b>Toepassingsbereik 1D-berekeningen</b>	Uitgebreid door het relateren van de afslag aan de daadwerkelijk inkomende golven	Geschikt voor toepassingen waar het balansmodel bruikbare resultaten geeft	XBeach groter toepassingsbereik, zie ook Kader 11.
<b>Model-onzekerheid</b> (o.b.v. afslagvolume 57 veldcases (Deltares, 2022a))	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatieve gemiddelde fout (relatieve bias) 3%</li> <li>• Relatieve foutspreiding (scatter index) 24%</li> <li>• 89% minder dan factor 2 afwijking</li> <li>• Bias geen trend met gemeten afslagvolume</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatieve gem. fout 33%</li> <li>• Relatieve foutspreiding 92%</li> <li>• 39% minder dan factor 2 afwijking</li> <li>• Overschatting bij veel afslag, onderschatting bij weinig afslag.</li> </ul> <p>Oorspronkelijke std. afwijking in TRDA2006 = 15% o.b.v. gootproeven.</p>	XBeach significant nauwkeuriger/minder spreiding
<b>Benodigde invoer algemeen</b>	Veel invoer-parameters nodig, waaronder de korrel-diameter van het zand ( $D_{50}$ ). Groot deel opgenomen in BOI-standaard-instellingen.	Beperkte invoer nodig, waaronder de korrel-diameter van het zand ( $D_{50}$ )	XBeach meer invoer nodig (maar groten-deels achter de schermen)
<b>Benodigde hydraulische belasting als invoer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tijdsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden op diep water tijdens storm</li> <li>• 4 variabelen*: waterstand, significante golfhoogte, piekperiode, getijamplitude</li> <li>• Gebruiker geeft waarde tijdens stormpiek op, wordt omgezet in stormverloop</li> </ul> <p>* 4 ruimtelijk variërende variabelen, daarnaast nog meer variabelen die constant (verondersteld) zijn.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulische randvoorwaarden op diep water tijdens de stormpiek</li> <li>• 3 variabelen: waterstand, significante golfhoogte en piekperiode</li> </ul>	Tijdsafhankelijk vs. alleen condities tijdens stormpiek  Xbeach neemt meer relevante hydraulische belastings-variabelen mee
<b>Benodigd rekenprofiel</b>	Profiel vanaf diep water om golf- en waterstands-veranderingen van diep naar ondiep water te berekenen	Profiel lang en diep genoeg om erosie- en depositieprofiel in te passen	XBeach vaak dieper/langer profiel nodig

### 3.1.2 Kwantitatieve indicatoren

Om de impact van initieel mechanisme duinafslag te kwantificeren in een faalkansanalyse, zijn hoofdzakelijk het **afslagvolume boven stormvloedpeil (A)** en de **positie van het afslagpunt ( $x_{af}$ )** van belang. Deze indicatoren zijn schematisch weergegeven in Figuur 3-1.

Bij gebruik van het proces-gebaseerde model XBeach is ook aanvullende informatie beschikbaar, bijvoorbeeld over de lokale hydraulische condities. Een nuttige extra indicator in relatie tot een overstromingskansanalyse is het **maatgevende oplooptniveau van de lange golven ( $z_{nat}$ )** en de bijbehorende positie daarvan ( $x_{nat}$ ) (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Gedurende een storm varieert het oplooptniveau van lange golven. Het oplooptniveau waarbij de lange golven het verst landwaarts komen beschouwen we als het maatgevende oplooptniveau tijdens de storm. Feitelijk geeft deze informatie aan wat het meest landwaartse punt is in het duinprofiel dat 'nat' is geweest in een XBeach simulatie. Een beschrijving van de berekening van  $x_{nat}$  en  $z_{nat}$  staat in de achtergrondrapportage (Arcadis en Deltares, 2023a). De indicatoren  $x_{af}$ ,  $x_{nat}$  en  $z_{nat}$  worden weergegeven bij de XBeach-resultaten binnen de gebruikersschil MorphAn.

Hierbij wordt opgemerkt dat de golfoploop door individuele stormgolven (de zogenaamde korte golven) niet meegenomen worden in  $x_{nat}$  en  $z_{nat}$ . Dit is in de XBeach-modus die binnen het BOI aangeboden wordt (surfbeat) ook niet mogelijk<sup>2</sup>. Feitelijk zou het maatgevende oplooptniveau inclusief korte golven dus nog hoger moeten liggen, iets waar in de uitwerking ook op een pragmatische wijze mee rekening is gehouden. Dit is nader toegelicht in de achtergrondrapportage (Arcadis en Deltares, 2023a).



Figuur 3-1 Schematische weergave van de relevante kwantitatieve indicatoren in relatie tot het duinafslagproces.

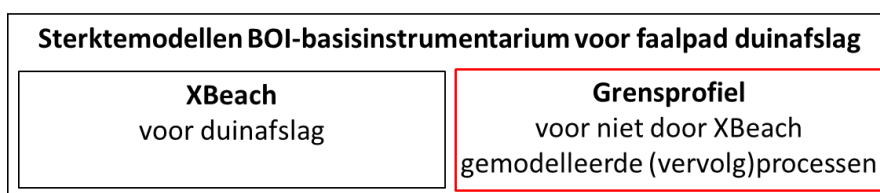
## 3.2 Sterktemodel voor vervolprocessen: het grensprofiel

Zoals toegelicht aan het eind van §2.1.2, zullen ook de vervolprocessen na het initieel mechanisme duinafslag meegenomen moeten worden om de faalkans van een duinwaterkering te kunnen bepalen. Voor een uitwerking van dit volledige faalpad is inzicht nodig in de processen die (kunnen) leiden tot plaatsvinden van deze vervolmechanismen en daarmee ook op een schatting van de kans dat een zandige waterkering als gevolg van het optreden van deze vervolprocessen faalt en tot overstroming van het achterland leidt.

<sup>2</sup> De voor het BOI gebruikte (surfbeat)versie van het XBeach-model simuleert geen individuele korte golven en de eventuele golfoploop of -overslag die daarmee gepaard gaat.

De BOI-versie van XBeach simuleert niet *alle* (mogelijk) relevante processen binnen het faalpad duinafslag die kunnen resulteren in het falen van een zandige waterkering. De niet-gemodelleerde vervolgprocessen zullen daarom op een andere manier meegenomen moeten worden.

Een manier om invulling te geven aan deze vervolgprocessen, is met behulp van het grensprofielconcept dat wordt aangeboden in het BOI-basisinstrumentarium. Het **grensprofiel** kan worden beschouwd als de sterkte die (naast duinafslag) voor niet-door-XBeach-gemodelleerde vervolgprocessen tezamen nodig is. Dit is weergegeven in Figuur 3-2. Net als XBeach wordt het grensprofiel ondersteund in het softwarepakket MorphAn.



Figuur 3-2 Sterktemodellen aangeboden binnen het BOI-basisinstrumentarium voor faalpad duinafslag.

Het grensprofielmodel is een pragmatische, functionele methode om aan te tonen dat de kans op doorbraak van de zandige waterkering door (niet door XBeach gemodelleerde) vervolgprocessen verwaarloosbaar klein is. Anders gezegd: Wanneer het grensprofiel landwaarts van het met XBeach berekende afslagfront kan worden ingepast, dan weet de gebruiker dat de kans op een doorbraak van de waterkering verwaarloosbaar klein is.



*Let op: als vanaf hier in deze handleiding wordt gesproken over 'de waterkering faalt niet', wordt in feite 'de kans dat de waterkering faalt is verwaarloosbaar klein' bedoeld, en met 'de waterkering faalt' 'falen is mogelijk'. Ten behoeve van de leesbaarheid is dit niet overal voluit geschreven.*



Het grensprofielconcept is nadrukkelijk geen ingebouwd conservatisme in de beoordelingsystematiek en is ook niet bedoeld om onzekerheden te ondervangen in relatie tot het duinafslagproces.



Net als voor de andere modellen en software die aangeboden worden binnen het BOI, is de waterkeringbeheerder **niet verplicht** om dit grensprofiel te gebruiken voor het meenemen van de vervolgprocessen. De gebruiker kan, indien gewenst, ook op een andere manier aantonen dat de kans op doorbraak van het na duinafslag resterende duinprofiel verwaarloosbaar klein is. Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van **andere modellen** waarin bijvoorbeeld de vervolgprocessen fysisch doorgerekend worden, maar ook een goed beargumenteerd **expertoordeel** behoort tot de mogelijkheden.

Hieronder wordt de belangrijkste informatie over het grensprofiel samengevat. De details en achtergronden over het grensprofiel zijn beschreven in het rapport 'Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium' (Arcadis en Deltares, 2023a).

### 3.2.1 Basisgeometrie grensprofiel

De dimensies van het grensprofiel zijn zodanig afgeleid dat het effect van eventuele vervolgprocessen (erosie van kruin en binnentalud door golfoploop en overslag,

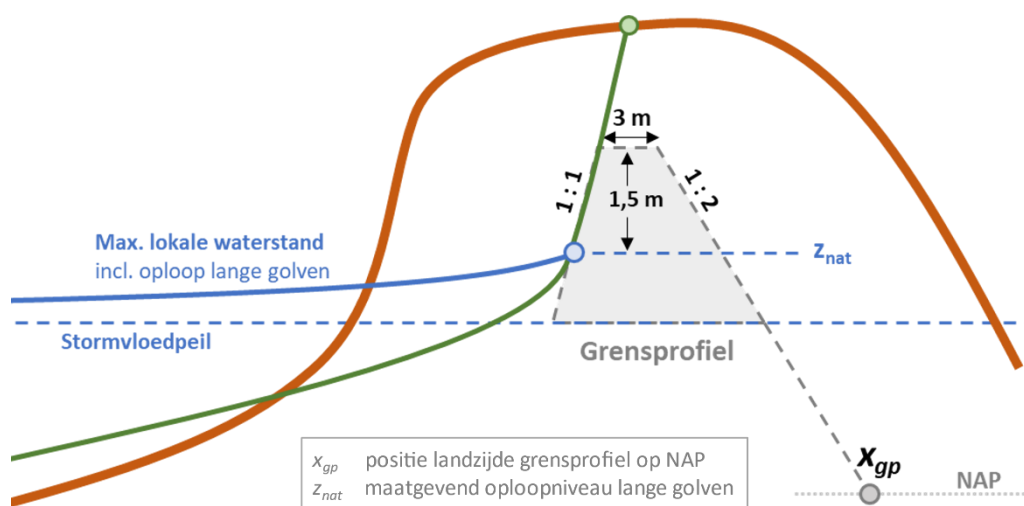


geotechnische instabiliteit) ook bij de maatgevende condities nog net resulteert in een verwaarloosbaar kleine kans op doorbraak. De basisgeometrie van het grensprofiel is samengevat in Tabel 3-2 en Figuur 3-3.

De basisgeometrie van het grensprofiel bestaat uit een vaste vorm, taludhellingen en kruinbreedte en een situatie-afhankelijke hoogte. De hoogte van het grensprofiel is een functie van de lokale hydraulische condities en is gedefinieerd als 1,5 m boven het maatgevend oploopniveau van de lange golven – het zogenaamde  $z_{nat}$ -niveau (zie §0) – om erosie door significante oploop en overslag door korte golven te voorkomen. Merk op dat de kruinhoogte van het grensprofiel hierdoor afhankelijk is van zowel het profiel als de gehanteerde hydraulische belasting.

Tabel 3-2 Basisgeometrie van het grensprofiel.

Geometrische parameter	Waarde
Vorm	Trapezium
Talud zeezijde [m/m]	1 : 1
Kruinniveau [m +NAP]	$z_{nat} + 1,5$ m
Kruinbreedte [m]	3 m
Talud landzijde [m/m]	1 : 2



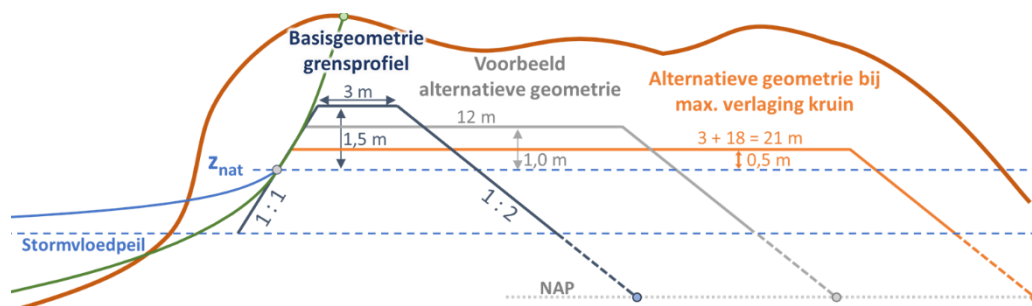
Figuur 3-3 Schematische weergave van de basisgeometrie van het grensprofiel.

### 3.2.2 Alternatieve geometrie grensprofiel

Er kunnen situaties voorkomen waarbij het grensprofiel met basisgeometrie niet landwaarts van het berekende afslagprofiel kan worden ingepast, terwijl het duin mogelijk toch voldoende robuust is om de kans op doorbraak verwaarloosbaar klein te maken. Dit kan bijvoorbeeld gelden voor een laag maar breed duin. Op basis van aanvullende analyses is vastgesteld dat het mogelijk is om in deze situaties het grensprofiel met andere afmetingen – maar met dezelfde uitgangspunten als voor het grensprofiel met de basisgeometrie – in te passen.

Dit is nader toegelicht in (Arcadis en Deltares, 2023a).

Op basis van de analyses kan de gebruiker het kruinniveau van het grensprofiel maximaal 1 meter verlagen. Een verlaging van 1 meter dient wel gecompenseerd te worden met een verbreding van de kruin met 18 meter om de belasting op de kruin van het binnentalud vergelijkbaar te houden met die van de basisgeometrie. Dit grensprofiel met alternatieve geometrie kan ook minder dan 1 meter verlaagd worden, waarbij de breedte naar rato aangepast wordt. Een verlaging van een halve meter betekent dus bijvoorbeeld een verbreding van de kruin met 9 meter. Dit is weergegeven in Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Schematische weergave van de dimensies van het grensprofiel met basisgeometrie en twee varianten met alternatieve geometrie.

Het grensprofiel met alternatieve geometrie bestaat uit een uitwisseling tussen breedte en hoogte van de kruin en niet uit het simpel inpassen van een vast volume waarbij de geometrie los wordt gelaten.



## Kader 2. Grensprofiel BOI vs. WBI2017

Het grensprofielconcept binnen het BOI-basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen is in lijn met het concept dat ook is gebruikt in eerdere versies van het instrumentarium (VTV2006, WBI2017). In het rapport 'Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium' worden de overeenkomsten en verschillen nader toegelicht. Samengevat, zijn de belangrijkste verschillen:

(1) In het BOI is meer expliciet duiding gegeven aan de rol en functie van het grensprofiel in relatie tot de faalpadbenadering voor overstromingskansanalyses. Het grensprofiel representeert hiermee de benodigde niet-gemodelleerde (rest)sterkte van het duinprofiel gerelateerd aan de vervolgprocessen.

(2) In het BOI-grensprofiel zijn de dimensies van het grensprofiel gebaseerd op de lokale (nearshore) hydraulische condities (vaste hoogte boven het oplooppniveau van de lange golven), terwijl de dimensies van het WBI2017-grensprofiel gebaseerd waren op de golfcondities in diep water. In het WBI2017 werd dus geen rekening gehouden met de golf-reducerende effecten van het tussenliggende gebied, de profielvorm en de bij de teen van het duin optredende golfcondities.

(3) De alternatieve geometrie van het grensprofiel is opnieuw afgeleid voor het BOI. Het gebruik van het oude WBI2017 volumetrisch grensprofiel (gelijk volume, afwijkende vorm) wordt sterk afgeraden en vervangen door een vaste relatie tussen kruinverlaging en kruinverbreding. Dit is omdat een volumetrisch ingepast grensprofiel (a) niet aansluit bij de opnieuw afgeleide relatie voor de breedte-hoogte-uitwisseling en (b) niet aansluit bij de overstromingskansfilosofie en de

*faalpadbenadering van het BOI aangezien de vervolgprocessen niet expliciet terugkomen in de (minimum) dimensies van het alternatieve WBI2017-grensprofiel.*

---

### **3.2.3 Vaststellen of het duin niet faalt door inpassen grensprofiel**

Het grensprofiel wordt ingepast in het duinprofiel dat nog aanwezig is landwaarts van het met XBeach berekende afslagprofiel aan het eind van de storm<sup>3</sup>. Zo kan worden bepaald of de kans dat de waterkering faalt op de locatie van het betreffende dwarsprofiel verwaarloosbaar klein is.

Inpassing van het grensprofiel gebeurt in praktijk landwaarts van het eerder benoemde maatgevende 'natte punt',  $x_{nat}$ . Dit punt kan met het duinafslagmodel XBeach berekend kan worden, zoals beschreven in §0. Uitgangspunt hierbij is dat het grensprofiel met de hierboven beschreven vorm en dimensies wordt ingepast.

#### **Afstand landzijde grensprofiel tot grens kering als faalcriterium**

Een belangrijke kwantitatieve indicator om te beoordelen of het grensprofiel inpasbaar is binnen de begrenzings van de zandige waterkering en daarmee of de waterkering niet faalt, is de positie van de landzijde van het grensprofiel ( $x_{gp}$ ) op het niveau NAP. Hiervoor wordt de helling van het binnentalud van het grensprofiel (fictief) doorgetrokken tot het NAP-niveau. Eventueel kan onderbouwd ook een ander niveau gehanteerd worden, bijvoorbeeld als de gehanteerde begrenzing van de waterkering op een ander niveau vastgesteld is.

Deze positie  $x_{gp}$  kan vervolgens worden vergeleken met de fysische of juridische begrenzing van de waterkering (zie §2.2) aan de landzijde op hetzelfde niveau. De afstand tussen  $x_{gp}$  (locatie landzijde grensprofiel) en  $x_{wk}$  (locatie landzijde waterkering) op hetzelfde referentieniveau dient in dit geval als faalcriterium. Deze afstand geeft aan *of* en *in welke mate* het grensprofiel wel of niet inpasbaar is in het resterende duinprofiel. Als  $x_{gp}$  zeewaarts ligt van  $x_{wk}$  of gelijk is aan  $x_{wk}$  (ofwel:  $x_{gp} \geq x_{wk}$ <sup>4</sup>), dan is de kans op falen nog verwaarloosbaar klein. Als  $x_{gp}$  landwaarts ligt van  $x_{wk}$  (ofwel:  $x_{gp} < x_{wk}$ ), dan is er sprake van mogelijk falen, of meer specifiek: dan is de kans op falen niet verwaarloosbaar klein. Dit principe is weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-6 (zie ook scenario A en B in Figuur 2-4 op pagina 15).

In relatie tot het bovenstaande faalcriterium wordt opgemerkt dat deze vrij generiek bruikbaar is om te bepalen of het grensprofiel inpasbaar is zeewaarts van een specifieke begrenzing of referentielijn. Dit is bijvoorbeeld relevant als ervoor gekozen wordt om de juridische begrenzing van de waterkering te beschouwen in plaats van de fysieke begrenzing.

---

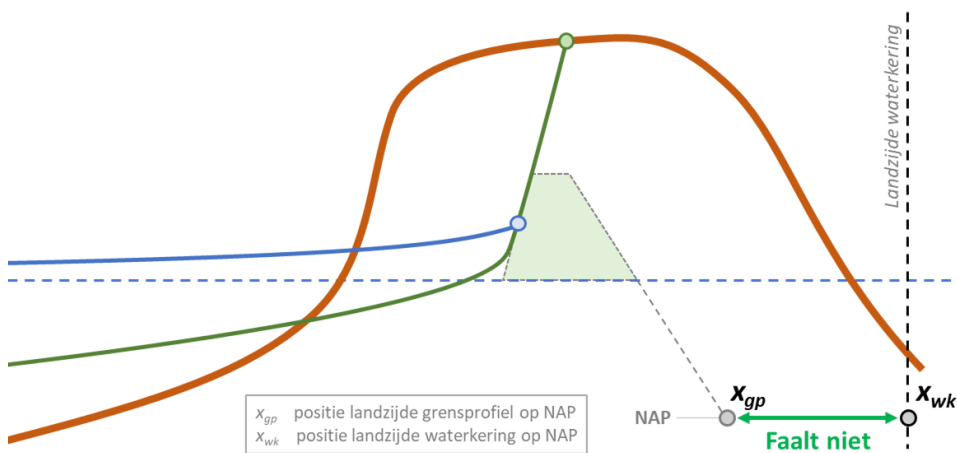
<sup>3</sup> Hierbij wordt gebruik gemaakt van een versimpeling van de werkelijke situatie. De beschouwde vervolgprocessen kunnen immers optreden tijdens de storm en het gebruik van het eindprofiel voor het beschouwen van de effecten van de vervolgprocessen is daarom feitelijk niet correct. Omdat het eindprofiel niet veel afwijkt van het dwarsprofiel dat behoort bij de maatgevende situatie tijdens de storm, is uit pragmatische overwegingen hier wel voor gekozen. Ook kan zo voor zowel het beoordelen van de mate van duinafslag als de vervolgprocessen hetzelfde dwarsprofiel worden gebruikt.

<sup>4</sup> Uitgangspunt:  $x$  loopt positief op in zeewaartse richting; net als de  $x$ -coördinaten van de Jarkus-metingen. Dit is dus afwijkend ten opzichte van de standaard bij dijken gehanteerde definitie.

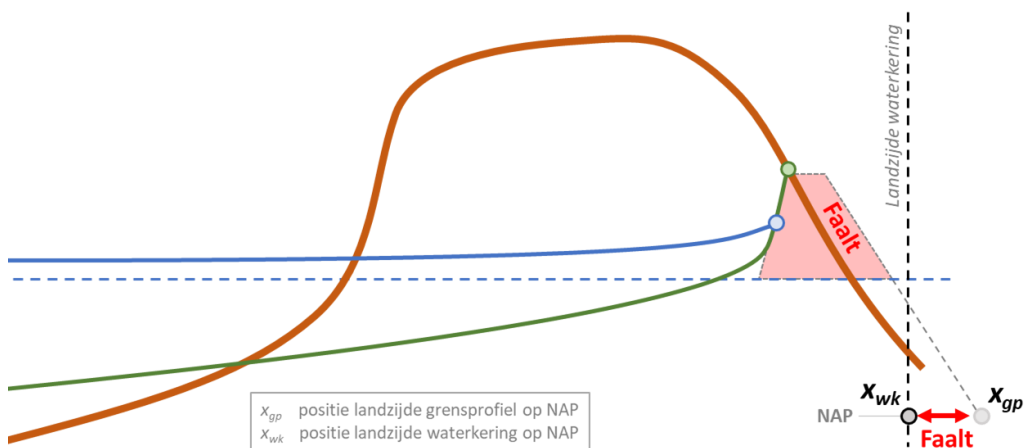
Het is in praktijk mogelijk dat er geen  $x_{gp}$  bepaald kan worden. Als het grensprofiel helemaal niet inpasbaar is in het resterende duinprofiel (ofwel direct achter het afslagprofiel ofwel verder landwaarts), dan is  $x_{gp}$  onbekend. Dit is bijvoorbeeld het geval als het duin vrijwel volledig is weggeslagen door het initieel mechanisme duinafslag (zie scenario C in Figuur 2-4 op pagina 15). Als  $x_{gp}$  niet bestaat, is er ook sprake van mogelijk falen van de waterkering.



Aanvullend op het bovenstaande faalcriterium op raainiveau is het ook van belang dat er in ruimtelijke zin een **doorlopend grensprofiel** inpasbaar is in de duinenrij(en) die na duinafslag nog aanwezig zijn in het duingebied. De aanwezigheid van een doorlopend grensprofiel borgt dat de waterkering een 'gesloten lijn' vormt.



Figuur 3-5 Voorbeeld van grensprofiel dat wel inpasbaar is in het resterende duinprofiel na duinafslag. Conclusie: de waterkering **faalt niet** op deze locatie (kans op falen verwaarloosbaar klein).



Figuur 3-6 Voorbeeld van grensprofiel dat niet inpasbaar is in het resterende duinprofiel na duinafslag. Conclusie: de waterkering **faalt** op deze locatie (kans op falen niet verwaarloosbaar klein).

### 3.3 Faalkansschatting op basis van iteratief proces

Om te komen tot een faalkansschatting voor het faalpad duinafslag op vak- en trajectniveau, wordt eerst per raai een faalkansschatting gemaakt. Dit betekent dat per raai gezocht wordt naar de kans die hoort bij de situatie waarin de waterkering op de grens van falen staat.

Met een duinafslagberekening - al dan niet gevolgd door een analyse die de effecten van vervolgprocessen meeneemt - kan echter niet in één berekening teruggerekend worden van de grens van falen naar de kans die bij deze situatie hoort. Andersom kan wel voor een bepaalde kans het effect bepaald worden: met de in §3.3 beschreven semi-probabilistische aanpak kan bepaald worden of voor een bepaalde kans (zijnde de overschrijdingskans van het afslagpunt:  $P_{afslag}$  of kortweg 'doelkans': zie §3.3) de waterkering waarschijnlijk wel, of waarschijnlijk niet faalt.

- Als de kering zeer waarschijnlijk niet faalt (i.e. na duinafslag en in rekening brengen van vervolgprocessen wordt de begrenzing van de kering niet overschreden), dan is de gezochte faalkans van de raai ( $P_f$ ) kleiner dan de gekozen overschrijdingskans van het afslagpunt:  $P_f < P_{afslag}$ .
- Als de kering mogelijk wel faalt (duinafslag tot voorbij de begrenzing van de kering of overschrijding van de begrenzing na in rekening brengen van vervolgprocessen), dan is de faalkans per definitie groter dan de gekozen overschrijdingskans van het afslagpunt:  $P_f > P_{afslag}$ .



Door iteratief voor verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt ('doelkansen') te bepalen of een raai wel of niet faalt, kan een inschatting gemaakt worden van de overschrijdingskans van het afslagpunt waarbij de waterkering op de grens van wel/niet falen staat. Er wordt hierbij dus doorgerekend 'tot de kering faalt' (of tot blijkt dat de faalkans van de waterkering zodanig klein is dat dit niet zinvol is). De overschrijdingskans van het afslagpunt die bij deze situatie hoort, is de gezochte faalkans van de raai.

Dit principe om iteratief tot een faalkansschatting te komen voor faalpaden waarbij semi-probabilistisch gerekend wordt, is ook beknopt in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse toegelicht (Rijkswaterstaat, 2022a). Dit iteratief proces wordt hieronder met behulp van een stroomschema nader toegelicht.

#### **Stroomschema iteratief faalkansschatting bepalen**

Figuur 3-7 toont een stroomschema van iteratieve berekeningen voor verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt om een schatting van de faalkans van een raai te bepalen. Start met een eerste set semi-probabilistische rekenwaarden behorend bij een bepaalde overschrijdingskans van het afslagpunt ( $P_{afslag,1}$ ) en bereken daarmee of de waterkering wel of niet faalt. De uitkomst van deze eerste berekening bepaalt welke overschrijdingskans in de volgende iteratieslag gebruikt wordt. Als de waterkering bij  $P_{afslag,1}$  faalt, zal de faalkans groter dan of gelijk zijn aan de doorgerekende kans ( $P_f > P_{afslag,1}$ ). Een extra berekening in de volgende iteratieslag voor een grotere overschrijdingskans van het afslagpunt zal in dit geval de bandbreedte waar de faalkans binnen valt kleiner maken. Daarentegen: als de waterkering bij  $P_{afslag,1}$  niet faalt, is de faalkans kleiner dan de doorgerekende overschrijdingskans ( $P_f < P_{afslag,1}$ ), en wordt in de volgende iteratieslag een berekening voor een kleinere kans uitgevoerd om de bandbreedte waar de faalkans binnen ligt te verkleinen.

Door deze exercitie voor meerdere sets rekenwaarden voor verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt uit te voeren, wordt de bandbreedte waar

de werkelijke faalkans van de waterkering binnen valt steeds kleiner, totdat deze bandbreedte voldoende klein wordt geacht of de kans dat de waterkering faalt zodanig klein is dat een verdere verfijning niet zinvol is. Op basis van deze bandbreedte (of 'klasse') wordt ten slotte een definitieve faalkansschatting van de raai gemaakt.

De keuzes omtrent de door te rekenen overschrijdingskansen van het afslagpunt, het aantal iteraties en hoe uiteindelijk de faalkansschatting op basis van de bandbreedte bepaald wordt, zijn nader toegelicht in Stap 1c en Stap 2 in het stappenplan in Hoofdstuk 4.



Figuur 3-7 Stroomschema van iteratieve berekeningen voor verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt ( $P_{afslag,i}$ ) om een schatting van de faalkans van een raai te bepalen.



### Kader 3. Faalkansschatting (BOI) vs. doorsnede-eis (WBI2017)

In het verleden werd de norm (/categoriegrens) per traject vertaald naar een faalkanseis per doorsnede per toetsspoor op basis van het lengte-effect en de faalkansbegroting. Voor deze doorsnede-eis werd berekend of de waterkering wel of niet faalt, wat direct een indicatie gaf voor het veiligheidsoordeel van het traject.

In de faalpadbenadering van het BOI worden faalpaden in plaats van toetssporen geanalyseerd: voor elke raai wordt per faalpad de faalkans bepaald, welke vervolgens per vak en daarna per traject worden geassembleerd. Pas in de laatste stap worden deze faalkansen per faalpad gecombineerd tot de totale faalkans om te komen tot een veiligheidsoordeel. In het BOI is de vaste faalkansbegroting voor beoordelen komen te vervallen en is geen sprake meer van een doorsnede-eis. In plaats van één berekening voor de doorsnede-eis, wordt binnen het BOI de faalkansschatting per raai bepaald door met meerdere berekeningen te itereren over verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt om zo de kans te bepalen voor de situatie waarin de waterkering op raainiveau op het punt van falen staat. Kort gezegd: binnen het BOI wordt doorgerekend tot het punt van falen daar waar vroeger alleen werd gecontroleerd of deze aan de norm voldeed.

Een uitgebreidere vergelijking van de beoordelingsmethode conform het BOI versus het WBI2017 is gegeven in Kader 6 in §4.2.

### 3.4 Semi-probabilistische aanpak

Voor het faalpad duinafslag kan in het BOI-basisinstrumentarium een semi-probabilistische rekenmethode voor duinafslag worden toegepast om te komen tot een faalkansschatting. Bij dit faalpad is de keuze voor een semi-probabilistische aanpak voor de hand liggend omdat een volledig probabilistische aanpak niet werkbaar is door de relatief lange rekentijd van individuele duinafslagberekeningen in combinatie met de benodigde iteratieve aanpak om de faalkans te bepalen.

Bij een semi-probabilistische aanpak volstaat het uitvoeren van één berekening met **specifiek afgeleide rekenwaarden** als vervanging voor het uitvoeren van een grote serie probabilistische berekeningen. Hierbij zijn de rekenwaarden zodanig afgeleid dat het resultaat van de semi-probabilistische aanpak gemiddeld genomen gelijk is aan het resultaat van een volledig probabilistische uitwerking, waarin expliciet rekening is gehouden met onzekerheden in de zowel de hydraulische belasting, de korreldiameter van het duinzand en de modelonzekerheid van het XBeach-model.



Rekenwaarden voor een semi-probabilistische aanpak zijn specifiek gekoppeld aan het rekenmodel waarvoor ze zijn afgeleid. Rekenwaarden voor XBeach zijn dus niet bruikbaar in combinatie met bijvoorbeeld Duros+, en andersom.



Daarnaast zijn de BOI-rekenwaarden voor XBeach (1D) specifiek gekoppeld aan een '**doelkans**'. Deze kans is in deze semi-probabilistische aanpak gedefinieerd als de **overschrijdingskans van (de berekende positie van) het afslagpunt ( $P_{afslag}$ )**. Het afslagpunt dat berekend wordt met een 1D XBeach-berekening met de semi-probabilistische rekenwaarden die zijn afgeleid voor een doelkans van 1:10.000 per jaar heeft dus een kans van één op 10.000 om binnen een jaar overschreden te worden. Deze overschrijdingskans van het afslagpunt is per definitie *niet* gelijk aan de overschrijdingskans van de hydraulische belasting zoals die van de maximale waterstand: het betreft de overschrijding van een heel andere parameter<sup>5</sup>.

De BOI-rekenwaarden voor de Nederlandse Noordzeekust zijn bepaald aan de hand van de afgeleide **rekenregels** zoals beschreven in Arcadis en Deltares (2023b). De modelonzekerheden van XBeach (zie ook

<sup>5</sup> Merk op dat in het verleden getoetst werd aan een 'overschrijdingskansnorm': de waterkering moest een hydraulische belasting (combinatie van waterstand en golven) met die overschrijdingskans aankunnen. Dit is nadrukkelijk anders dan de overschrijdingskans van het afslagpunt (een sterkte-indicator) dat binnen het BOI voor duinen gehanteerd wordt om iteratief te bepalen wat de faalkans en daarmee de overstromingskans van de waterkering is.



Tabel 3-1 op pagina 21) zijn hierbij verdisconteerd in de rekenwaarde voor de waterstand (het rekenpeil).

In Arcadis en Deltares (2023b) zijn de resultaten van de semi-probabilistische rekenregel vergeleken met de uitkomsten van een volledig probabilistische uitwerking voor 25 locaties langs de Nederlandse Noordzeekust en 5 verschillende doelkansen. Hieruit volgt dat de onzekerheid door het gebruik van de semi-probabilistische aanpak in plaats van de probabilistische aanpak beperkt blijft tot een standaardafwijking van afgerond 4 m.

Opgemerkt wordt dat onzekerheden in de sterkte ten aanzien van de vorm en ligging van het profiel niet zijn verwerkt in het semi-probabilistische rekenvoorschrift. Deze onzekerheden (in ruimte en tijd) in de 'toestand van de kering' (zie Figuur 2-1 op pagina 12) worden beschouwd bij de selectie van de maatgevende profielen voor het bepalen van de faalkans schatting; zie Hoofdstuk 4.

Voor meer gedetailleerde achtergrondinformatie over de opzet en toepassing van het probabilistische model, de definitie van het semi-probabilistische model en een eerste vergelijking met het 'oude' op Duros+ gebaseerde semi-probabilistische model wordt verwezen naar (Arcadis en Deltares, 2023b).



#### **Kader 4. Semi-probabilistische aanpak BOI vs. WBI2017**

*Zowel in het BOI als het WBI2017 is voor de beoordeling van zandige waterkeringen gebruik gemaakt van een semi-probabilistisch rekenvoorschrift. De rekenwaarden welke eerder van toepassing waren voor het Duros+ model zijn voor het BOI opnieuw afgeleid voor het gebruik van het 1D XBeach model.*



*Een **belangrijk verschil** tussen de semi-probabilistische voorschriften in het BOI en het WBI is hoe modelonzekerheden zijn verdisconteerd in de rekenwaarden. In het WBI2017 komen de modelonzekerheden van Duros+ expliciet terug in de formulering van het semi-probabilistische model in de vorm van een toeslag op het berekende duinafslagvolume. In het **BOI** zijn de effecten van de modelonzekerheden van XBeach verdisconteerd in de rekenwaarde van de maximale waterstand: er wordt daartoe een iets hogere waterstand gehanteerd als rekenwaarde. Er is dus **geen extra toeslag** nodig op het duinafslagvolume na het uitvoeren van een semi-probabilistische XBeach-berekening met de nieuwe vastgestelde rekenwaarden, zoals dat wel gebeurde bij Duros+. De positie van het afslagpunt en de benodigde gegevens voor het vaststellen van de dimensies van het grensprofiel volgen dus direct en zonder nabewerkingslagen uit de XBeach berekening.*

*Ook de rekenwaarde voor de korrelgrootte is veranderd: in het WBI2017 was deze rekenwaarde een functie van de gemiddelde  $D_{50}$  en de standaarddeviatie van de  $D_{50}$ . In het BOI is de rekenwaarde gelijk gesteld aan de gemiddelde  $D_{50}$ .*

*Voor meer informatie: zie (Arcadis en Deltares, 2023b).*



### 3.5 Omgaan met het lengte-effect

Met behulp van het BOI-basisinstrumentarium wordt de faalkansschatting per raai bepaald voor het faalpad duinafslag. Deze faalkansschattingen worden geassembleerd tot een faalkansschatting op vakniveau, en vervolgens worden de faalkansschattingen van de vakken geassembleerd tot een faalkansschatting op trajectniveau, zoals beschreven in respectievelijk Stap 3 (§4.6) en Stap 4 (§0) van het in het volgende hoofdstuk beschreven stappenplan. Hierbij dient rekening te worden gehouden met het lengte-effect. Het principe achter het lengte-effect wordt nader wordt toegelicht in de Technisch Leidraad Katern Veiligheidsanalyse (Rijkswaterstaat, 2023a).

De maat voor het lengte-effect wordt weergegeven met de factor  $N$ . Het lengte-effect wordt in de faalkansanalyse op twee niveaus meegenomen: in de assemblage van de faalkans van raaien naar de faalkans van een vak, en in de assemblage van de faalkans van vakken naar de faalkans van het traject. In de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a) staat hoe deze factor meegenomen wordt in deze twee assemblagestappen.

De lengte-effectfactor  $N$  is afhankelijk van de combinatie van de mate van invloed en de correlatielengte van verschillende relevante stochastische sterkte- en belastingvariabelen. De correlatielengte van een stochast is een maat voor de gemiddelde lengte waarover de stochast gecorreleerd is (al dan niet min of meer constant is). Daarmee is het ook een maat voor de variatie van de stochast langs de waterkering. Hoe kleiner de variatie in de dominante variabele is, hoe groter de correlatielengte in verhouding tot de lengte van het gebied dat je beschouwt en dus hoe kleiner het lengte-effect is. In het geval van duinafslag is de waterstand dominant: de invloed van de waterstand op de mate van duinafslag en daarmee de faalkans is zeer groot vergeleken met de andere variabelen.

#### 3.5.1 Lengte-effect binnen een vak

Voor het faalpad duinafslag is het lengte-effect binnen een vak verwaarloosbaar klein. Daarom kan **binnen een vak**  $N_{vak} = 1$  aangehouden worden (geen lengte-effect). Het lengte-effect binnen een vak is verwaarloosbaar klein, omdat de variatie in de waterstand binnen een vak per definitie (zeer) klein is (zie ook toelichting op de vakindeling in §4.4.1). In andere woorden: de correlatielengte van de dominante belastings- of sterktevariabele (de waterstand) heeft een zeer grote correlatielengte die (veel) groter is dan de lengte van een gemiddeld vak. Daardoor is  $N_{vak}$  veelal vrijwel gelijk aan 1.

#### 3.5.2 Lengte-effect tussen vakken

Het lengte-effect kan op grotere schaal, van vakken naar een traject, wel een rol spelen. De trajectlengte is immers niet per definitie veel kleiner dan de correlatielengte van de dominante variabele (de waterstand); de faalkansen van de vakken zijn veelal gedeeltelijk gecorreleerd.

Voor het faalpad duinafslag kan bij de assemblage **van vak naar traject** een lengte-effectfactor  $N_{traject} = 1,2$  aangehouden worden. Deze waarde is gebaseerd op een heranalyse van het lengte-effect van duintrajecten in het VNK2 onderzoek (HKV, 2015)<sup>6</sup>. Hieruit blijkt dat het lengte-effect voor duinafslag in de range van 1,0 – 1,3 ligt, met

<sup>6</sup> *Strikt genomen kunnen de lengte-effectfactoren uit voornoemd onderzoek overigens niet zondermeer overgenomen worden, aangezien de analyse gebaseerd is op faalkansen die bepaald zijn met Duros+ in plaats van XBeach, en de dominantie en correlatielengten van verschillende stochasten niet overeenkomen. Gezien de dominantie van de maximale waterstand lijkt de hiermee gemaakte fout verwaarloosbaar klein.*

een (theoretisch) grootste waarde van 3. Een waarde van  $N_{traject} = 1,2$  lijkt daarmee een realistische algemene inschatting van de lengte-effectfactor voor duinafslag.

Het staat de waterkeringbeheerder vrij om bij een faalkansanalyse te besluiten onderbouwd af te wijken van de geadviseerde lengte-effectfactoren van  $N_{vak} = 1$  en  $N_{traject} = 1,2$ .




---

#### **Kader 5. Lengte-effect BOI vs. WBI2017**

*In zowel het basisinstrumentarium van het BOI als het WBI2017 wordt het lengte-effect tussen vakken meegenomen. Er zijn echter twee verschillen tussen het BOI en WBI2017:*

*(1) In het BOI wordt het lengte-effect gebruikt om van faalkans op raainiveau naar faalkans op vakniveau naar faalkans op trajectniveau te komen. In het WBI2017 werd het lengte-effect vooral aan het begin gebruikt om van een faalkanseis op trajectniveau naar een faalkanseis op raainiveau te komen.*

*(2) In het BOI wordt  $N_{traject} = 1,2$  als basiswaarde aangehouden in de assemblage van vak naar traject (en  $N_{vak} = 1$ ) als een zo goed mogelijk inschatting van het daadwerkelijke lengte-effect. Deze waarde is kleiner dan in het WBI2017, waarin standaard  $N_{traject} = 2$  werd gehanteerd op basis van hetzelfde VNK2-onderzoek (HKV, 2015). Deze waarde was echter conservatief aangezien deze naar boven afgerond was. Binnen de overstromingskansbenadering is conservatisme niet wenselijk.*

---

## 4 Stappenplan faalkansanalyse duinafslag

In dit hoofdstuk is de faalkansanalyse voor het faalpad duinafslag toegelicht. Deze methodiek dient als ondersteuning voor de waterkeringbeheerder bij de beoordeling van een zandige waterkering, maar is geen voorschrift dat strikt gevolgd dient te worden.



Bij de beoordeling dient het verhaal van de kering centraal te staan. Bij het verhaal van de kering staat het expliciet maken en *onderbouwen van de keuzes* centraal. De keuzes in de aanpak van de beoordeling moeten passen bij de karakteristieken en gedrag van de te beschouwen waterkering. Dergelijke algemene principes en stappen om te komen tot een geloofwaardige overstromingskans zijn op hoofdlijnen beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a). In de voorliggende handleiding wordt dit voor het faalpad duinafslag binnen faalmechanisme duinafslag nader uitgewerkt.

Eerst zijn het regulier toepassingsbereik van het stappenplan en de algemene beslisregels voor zandige waterkeringen toegelicht in §4.1, waarin beknopt beschreven is welke analyse in welke situatie nodig is voor het faalpad duinafslag. Vervolgens is in §4.2 tot en met §4.8 het stappenplan om te komen tot een faalkansschatting toegelicht. Hierbij ligt de focus op het *beoordelen* van een zandige waterkering.

Ten slotte bieden §4.9 en §4.10 een handreiking voor specifieke situaties zoals nader toegelicht in de leeswijzer in §4.1.

### 4.1 Algemene beslisregels en regulier toepassingsbereik stappenplan

#### 4.1.1 Algemene beslisregel

Als algemene beslisregel geldt voor een zandige waterkering dat het faalpad duinafslag in alle gevallen beschouwd wordt als relevant faalmechanisme. Binnen dit faalmechanisme is vrijwel in alle gevallen het faalpad duinafslag dominant<sup>7</sup>. Om te komen tot een realistische inschatting van de faalkans moeten duinafslag-berekeningen worden uitgevoerd.

#### 4.1.2 Stappenplan met focus op beoordelen zandige waterkering

In de onderstaande paragrafen is aan de hand van een stappenplan toegelicht hoe de faalkansanalyse van het faalpad duinafslag met behulp van het BOI-basisinstrumentarium uitgevoerd kan worden. In het stappenplan ligt de focus op een faalkansanalyse ten behoeve van het *beoordelen* van een zandige waterkering, waarbij mogelijk ook andere faalmechanismen relevant of andere faalpaden dominant zijn voor de faalkans van het traject.

- De focus ligt hierbij op het bepalen van een zo realistisch mogelijke faalkansschatting voor het faalpad duinafslag in lijn met de BOI-gedachte om de overstromingskans van een traject zo goed mogelijk te bepalen.
- Deze opzet kan ook gebruikt worden voor een andere toepassingen, zoals bijvoorbeeld het ontwerpen van een zandige waterkering of specifieke beheer- of vergunningsvraagstukken.

<sup>7</sup> Voor definities, zie overkoepelende Handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a).

#### 4.1.3 Toepassingsbereik



De faalkansanalyse voor faalpad duinafslag die per vak uitgevoerd wordt zoals beschreven in het in §4.4–4.6 beschreven stappenplan is gebaseerd op duinafslagberekeningen voor dwarsprofielen<sup>8</sup>. Het toepassingsbereik voor deze berekeningen is **volledig zandige delen van de waterkering** (lees: *duinprofielen*) langs min of meer rechte en kustlangs uniforme delen van de Nederlandse kust waar geen achterloopsheid optreedt onder normatieve condities. Binnen dit toepassingsbereik kan de 1D BOI-versie van het duinafslagmodel XBeach voor een profiel tot een realistische inschatting van duinafslag komen (zie ook §5.1).

#### 4.1.4 Aanvullende analyses voor situaties buiten toepassingsbereik

Voor vakken met situaties die buiten het toepassingsbereik van het BOI-basisinstrumentarium vallen, zullen aanvullende analyses voor het faalpad of zelfs faalmechanisme duinafslag uitgevoerd moeten worden (zie ook Hoofdstuk 5). Deze analyses worden parallel uitgevoerd. Het is aan de waterkeringbeheerder om te bepalen welk detailniveau gewenst is voor de beoordeling (zie ook de toelichting bij de verschillende stappen) en welke aanvullende analyses uitgevoerd moeten worden.

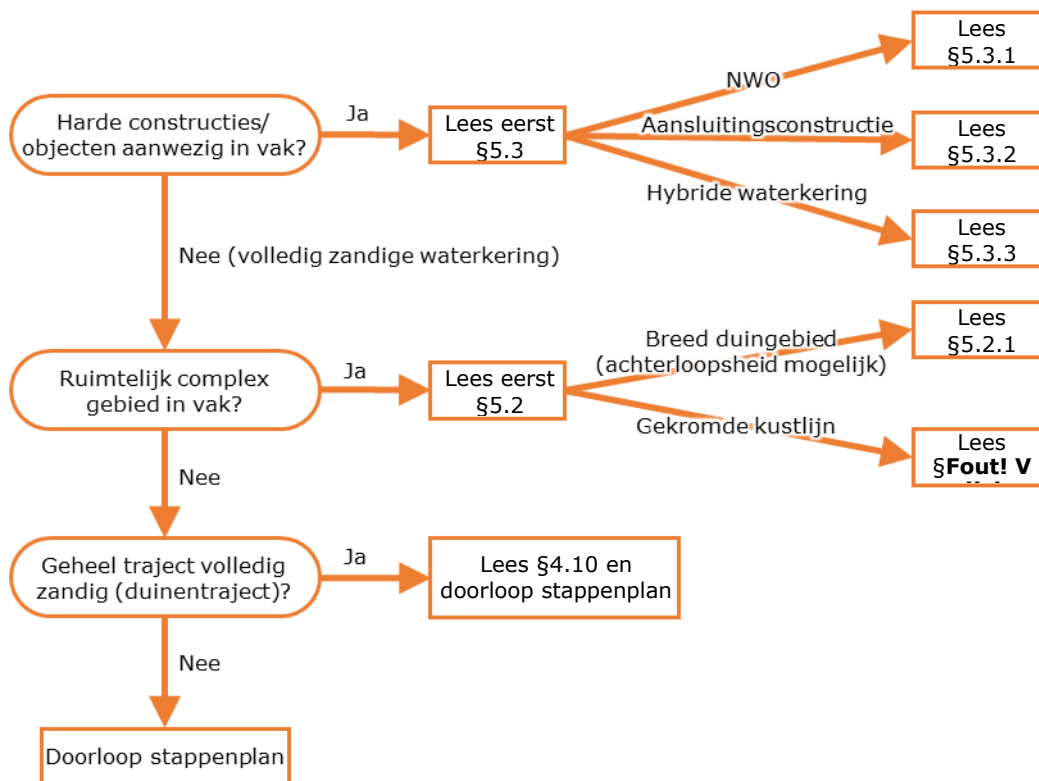
#### 4.1.5 Leeswijzer

Figuur 4-1 geeft schematisch weer waar in de voorliggende handleiding verdere uitleg staat over welke analyses minimaal nodig zijn voor een bepaalde karakteristieke situaties om tot een faalkansschatting van een zandige waterkering te komen<sup>9</sup>. In verschillende vakken binnen een traject kunnen verschillende situaties voorkomen en daarmee verschillende analyses nodig zijn. Uitgangspunt is daarbij het in §4.3 beschreven verhaal van de kering, zijnde de voorbereidende Stap 0 van de faalkansanalyse.

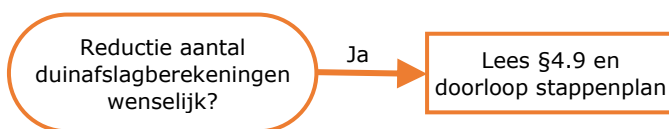
De laatste check 'geheel traject volledig zandig (duinentraject)' in Figuur 4-1 maakt hierbij onderscheid tussen een traject dat bijvoorbeeld deels hybride en deels uit duinen bestaat versus een traject dat volledig uit duinen bestaat waarvoor geen andere relevante faalmechanismen of dominante faalpaden zijn.

Naast de karakteristieken van de te analyseren zandige waterkering, bepaalt het doel van de faalkansanalyse in welk detailniveau de faalkans van individuele raaien bepaald hoeft te worden. Als niet voor alle raaien een volledige faalkansanalyse uitgevoerd hoeft te worden, kan een deel van de duinafslagberekeningen overgeslagen worden. De mogelijke redenen hiervoor en een handreiking voor hoe dit aangepakt kan worden, is opgenomen in §4.9 (Figuur 4-2).

<sup>8</sup> Dit betreft de analyses in of in plaats van Stap 1b t/m Stap 3, zie §4.2. Het begin (Stap 0 en 1a: opstellen verhaal van de kering en vakindeling) en het eind van het stappenplan (Stap 4 en 5: combineren faalkansschatting van alle vakken om veiligheidsoordeel van het traject te bepalen) is in alle situaties van toepassing om een zandige waterkering te beoordelen.



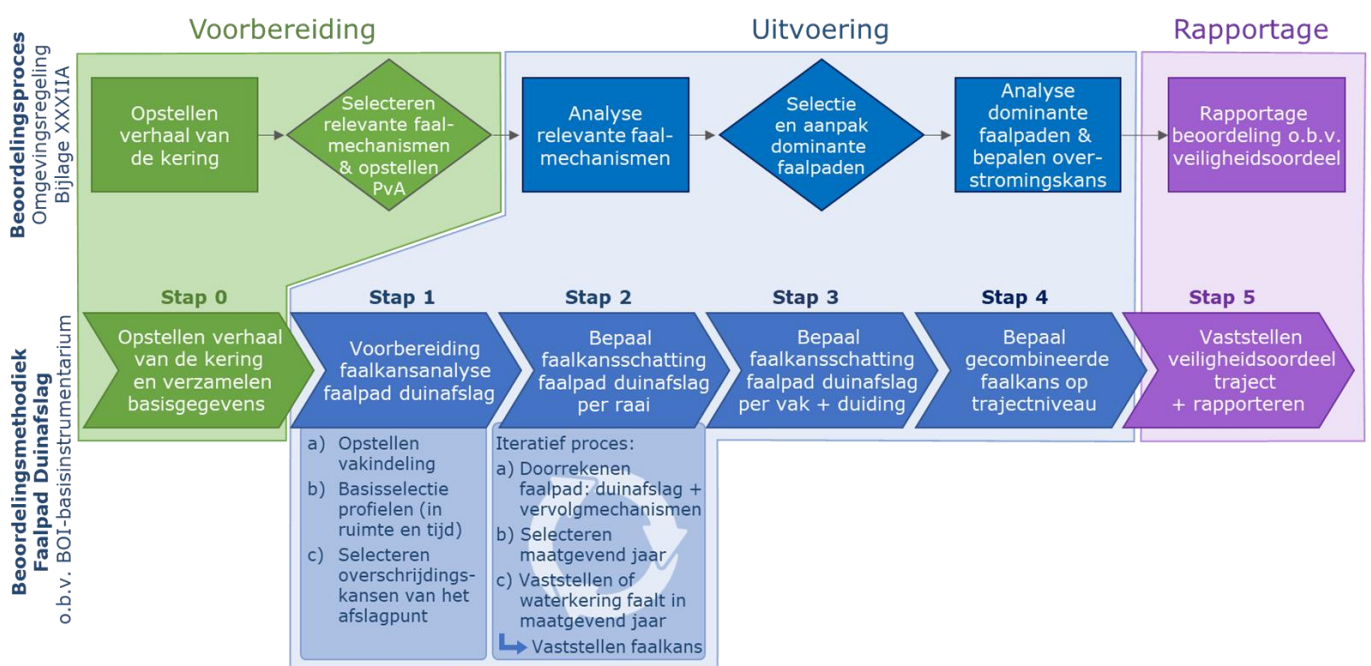
Figuur 4-1 Leeswijzer (deel 1/2) voor het uitvoeren van een faalkansanalyse van een zandige waterkering met verschillende karakteristieken waarvoor eventuele aanvullende analyses voor nodig zijn.



Figuur 4-2 Leeswijzer (deel 2/2) voor het uitvoeren van een faalkansanalyse van een zandige waterkering.

## 4.2 Stappenplan faalkansanalyse duinafslag op hoofdlijnen

Het stappenplan voor een faalkansanalyse van een zandige waterkering op het faalpad duinafslag met behulp van het BOI-basisinstrumentarium is weergegeven onderin Figuur 4-3, en wordt hieronder nader toegelicht. In Figuur 4-3 is ook de koppeling met de fasen van de beoordeling zoals beschreven in Bijlage I van de Regeling weergegeven (boven in Figuur 4-3). Dit beoordelingsproces wordt ook nader toegelicht in de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a). In deze overkoepelende handleiding wordt ook stilgestaan bij hoe omgegaan moet worden met nieuwe inzichten gedurende de beoordelingsperiode.




Figuur 4-3 Schematisch procesoverzicht beoordelingsmethodiek voor een zandige waterkering voor faalpad duinafslag op basis van het BOI-basisinstrumentarium (onder) in relatie tot de fasen van de beoordeling zoals beschreven in Bijlage I van de Regeling (boven).

Start voor de faalkansanalyse voor het faalpad duinafslag in Stap 0 met het opstellen van het verhaal van de kering. Verzamel in deze stap onder andere basisgegevens die in de faalkansanalyse gebruikt worden. Het verhaal van de kering vormt de basis voor het plan van aanpak waarin bepaald wordt (1) waar welke (aanvullende) analyses uitgevoerd moeten worden voor welke relevante faalmechanismen en dominante faalpaden en (2) welk detailniveau hierbij gewenst is.

Bereid vervolgens in **Stap 1** de faalkansanalyse van het faalpad duinafslag voor. Verdeel het waterkeringstraject in vakken (Stap 1a), selecteer voor vakken met een zandige waterkering de profielen die geanalyseerd moeten worden over ruimte en tijd (Stap 1b) en selecteer de te beschouwen overschrijdingskansen van het afslagpunt en stel daarmee de iteratiestrategie voor Stap 2 op (Stap 1c).

Werk daarna in Stap 2 tot en met Stap 5 stapsgewijs toe naar de faalkans op trajectniveau en het bijbehorend waterveiligheidsoordeel. De faalkansanalyse werkt 'bottom-up': van faalkans op raainiveau, naar de faalkans per vak, naar de faalkans per faalpad op trajectniveau, naar de gecombineerde faalkans op trajectniveau, waarna uiteindelijk het veiligheidsoordeel volgt:

- 
- Maak eerst per raai een faalkansschatting voor het faalpad duinafslag in **Stap 2**. Om in deze stap te komen tot een faalkansschatting per raai, kunnen iteratieve XBeach 1D duinafslagberekeningen uitgevoerd en een tijdsanalyse toegepast worden waarin ook de vervolprocessen (al dan niet in de vorm van een grensprofiel) meegenomen worden.
  - Assembleer vervolgens de faalkansschattingen per raai tot een faalkansschatting per vak voor dit faalpad in **Stap 3**.
  - Assembleer daarna de faalkansschattingen per vak tot een faalkansschatting op trajectniveau voor het faalpad duinafslag, en combineer deze met de faalkans(schatting)en van eventuele andere faalpaden en -mechanismen tot een totale faalkans in **Stap 4**.
  - Tenslotte wordt het veiligheidsoordeel opgesteld op basis van de totale faalkans in **Stap 5**. Kies eventueel voor aanvullende analyses om dit oordeel aan te scherpen.

Alle stappen uit het stappenplan in Figuur 4-3 zijn in de volgende paragrafen nader toegelicht. Stap 1 en 2 zijn het meest uitgebreid toegelicht, aangezien deze volledig focussen op het faalpad duinafslag. Per tussenstap is eerst een toelichting gegeven op wat de stap inhoudt, inclusief eventuele uitgangspunten. Vervolgens is een concreet voorstel (of voorstellen) gedaan voor de aanpak, al dan niet met te maken afwegingen.

Voer aan het eind van iedere stap een **plausibiliteitscontrole** uit: controleer of de invulling en resultaten van de stap logisch zijn en passen bij het verhaal van de kering. Als dit niet het geval is, dienen extra acties uitgevoerd te worden totdat de uitkomst van de stap wel goed te duiden is.



---

## **Kader 6.      Stappenplan BOI vs. WBI2017**

*In Bijlage 2 is een vergelijking gemaakt tussen de te doorlopen stappen voor de beoordeling van een duinentraject voor de twee recentste versies van het instrumentarium: BOI (vigerend) en WBI2017 (voormalig). De bijlage toont de stappenplannen volgens beide methoden.*

*In het WBI2017 werd de beoordeling 'top-down' uitgevoerd: op basis van de categoriegrenzen van een traject werd per toetsspoor de eis op doorsnedeniveau bepaald door rekening te houden met de faalkansbegroting en het lengte-effect. Op basis van afslagberekeningen in Duros+ voor deze doorsnede-eis werd per doorsnede een toetsoordeel bepaald. Ten slotte werd dit geassembleerd en gecombineerd met andere toetssporen om te komen tot een veiligheidsoordeel voor het traject.*

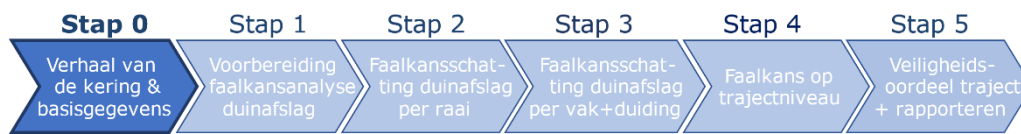
*Het BOI gaat uit van een faalpadbenadering, waarbij de beoordeling 'bottom-up' wordt uitgevoerd: per raai wordt de faalkansschatting bepaald, om vervolgens te worden geassembleerd per vak, en daarna op trajectniveau. In de assemblage wordt rekening gehouden met lengte-effecten. De gecombineerde kans van alle dominante faalpaden en relevante faalmechanismen wordt vergeleken met de trajectnorm om te komen tot een veiligheidsoordeel. Aangezien geen sprake is van een eis op raai- of vakniveau, kan niet per raai of vak bepaald worden of deze wel of niet voldoet aan de norm. Wel kan op basis van de duidingsklassen de bijdrage van de verschillende vakken aan de faalkans bepaald worden.*

*Samengevat zijn de belangrijkste verschillen tussen de vigerende en voormalige beoordelingsmethodiek:*

- (1) De faalpadbenadering in het BOI waarbij verschillende faalmechanismen en faalpaden worden geanalyseerd in plaats van toetssporen zoals in het WBI2017;*
  - (2) De vaste faalkansbegroting voor beoordelen is komen te vervallen in het BOI, waardoor er geen sprake meer is van een eis op doorsnede- en vakniveau.*
-



### 4.3 Stap 0: Verhaal van de kering en verzamelen basisgegevens



Stel, voordat de daadwerkelijke faalkansanalyse voor het faalpad duinafslag start, eerst in het algemene beoordelingsproces **het verhaal van de kering** op. Dit is nader beschreven in Bijlage I van de Regeling primaire waterkeringen (Ministeriële Regeling) en de handleiding Overstromingskansanalyse. Samengevat is het verhaal van de kering gericht op het begrijpen van de overstromingskans via de beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belasting. Door het verhaal van de kering centraal te stellen wordt benadrukt dat de overstromingskans niet het resultaat is van berekeningen, maar dat de berekeningen het verhaal ondersteunen dat vertelt hoe in het traject een doorbraak en daarmee een overstroming van het achterland kan optreden<sup>10</sup>.

Bepaal op basis van het verhaal van de kering welke analyses voor welke relevante faalmechanismen en dominante faalpaden uitgevoerd moeten worden, en stel hiervoor een plan van aanpak op. In het geval van een zandige waterkering zal altijd in ieder geval het faalpad duinafslag geanalyseerd worden.

Voor zandige waterkeringen is het belangrijk dat bij het opstellen van het verhaal van de kering specifieke basisgegevens verzameld worden die nodig zijn voor het bepalen van de benodigde stappen in – en de uitvoering van – de beoordeling de waterkering. Dit betreft:

- 1) Bodemhoogtegegevens: profielmetingen  
*Nodig voor:* duinafslagberekeningen  
*Beschikbare data:* jaarlijks door Rijkswaterstaat ingemeten JarKus-profielen (in .jrk-format) via [Servicedesk Data](#) van Rijkswaterstaat en eventueel aanvullende profielmetingen via bijvoorbeeld de waterkeringbeheerder.
- 2) Bodemhoogtegegevens: vlakdekkende datasets (combinatie topografie en bathymetrie)  
*Nodig voor:* o.a. identificatie van zwakke plekken (locatie tussenraaien)  
*Beschikbare data:* jaarlijkse kusthoogte laseraltimetrie datasets (via [Servicedesk Data](#)), verschillende jaargangen van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) (online vrij toegankelijk) en vaklodingen (via [Servicedesk Data](#)).
- 3) Morfologische ontwikkeling kustzone  
*Nodig voor:* o.a. opstellen vakindeling, vaststellen of aanvullende analyses nodig zijn en vaststellen analyseperiode in Stap 1b.  
*Beschikbare data:* de jaarlijkse kustlijnkaartenboeken, de beheerbibliotheek kust per kustvak en eventueel eigen analyses van bodemhoogtegegevens.
- 4) Suppleties (kustlijn zorg) en eenmalige ingrepen in het kuststelsel  
*Nodig voor:* Eenmalige ingrepen zoals een kustversterking en regelmatige ingrepen zoals suppleties kunnen invloed hebben op het tijdsbestek dat

<sup>10</sup> Of, als de juridische begrenzing wordt beschouwd en deze niet gelijk is aan de fysische begrenzing: 'hoe de juridische waterkering binnen het traject kan falen'.

geanalyseerd moet worden, en in hoeverre gegevens van de vorige Landelijke Beoordelingsronde Overstromingsrisico (LBO1; zie punt 9) overgenomen kunnen worden.

*Beschikbare data:* o.a. suppletiedatabase via [Servicedesk Data](#) van Rijkswaterstaat.

- 5) Korrelgroottegegevens (bij voorkeur van eerste duinenrij)  
*Nodig voor:* duinafslagberekeningen  
*Beschikbare data:* dataset van (Kohsiek, 1984) uit 1982 via het IPLO (Rijkswaterstaat, 2023b). Dit zijn de basisrekenwaarden voor de D<sub>50</sub> voor duinafslagberekeningen. De actuele korrelgrootte kan afwijken, bijvoorbeeld door uitgevoerde suppleties of kustversterkingen. In dat geval kan het nuttig zijn om aanvullende datasets met recentere data over de korreldiameter te beschouwen/verzamelen.
  
- 6) Legger met de begrenzing van de primaire waterkering (indien beschikbaar)  
*Nodig voor:* bepalen wanneer de waterkering faalt conform de juridische begrenzing (zie **§Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**).  
*Beschikbare data:* legger via beheerorganisatie van betreffende waterkering (als legger gedefinieerd is).
  
- 7) Aanwezigheid constructies en harde elementen  
De harde elementen betreffen zowel waterkerende objecten waarvoor andere faalmechanismen relevant kunnen zijn, als niet-waterkerende objecten (NWO's). *Nodig voor:* vaststellen of aanvullende analyses nodig zijn voor deze harde elementen en constructies.  
*Beschikbare data:* informatie over locatie en relevante eigenschappen van harde elementen uit eerdere beoordelingen, archieven en geodatabases van de waterkeringbeheerders.
  
- 8) Uitkomsten en bevindingen vorige beoordelingsronde (LBO1)  
*Nodig voor:* eerste indruk van sterke en zwakke plekken van de waterkering en bijbehorende faalkansen. Echter, vanwege de wijziging van het sterktemodel voor duinafslag tussen het WBI2017 en het vigerende BOI van Duros+ naar XBeach zijn deze resultaten slechts beperkt bruikbaar voor de tweede Landelijke Beoordeling op basis van Overstromingskansen (LBO2). Voor alle zandige waterkeringen zal daarom het faalpad duinafslag in LBO2 opnieuw geanalyseerd moeten worden op basis van de BOI-beoordelingsmethodiek.  
*Beschikbare data:* rapportage LBO1
  
- 9) Meetgegevens van opgetreden duinafslag in het gebied (indien beschikbaar)  
*Nodig voor:* plausibiliteitscontrole van duinafslagberekeningen

Naast de bovenstaande gegevens zijn de rekenwaarden van de belastingparameters ontsloten via de BOI-software Riskeer (groep 'Hydraulische belastingen')<sup>11</sup>. De hydraulische rekenwaarden zijn afhankelijk van de bijbehorende overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans). Daarom worden deze pas in Stap 2 opgevraagd via Riskeer, nadat in Stap 1c de te analyseren overschrijdingskansen van het afslagpunt zijn vastgesteld.

<sup>11</sup> De rekenwaarden zijn bij het vrijgeven van deze handleiding in 2023 nog niet direct via Riskeer beschikbaar; de rekenwaarden zijn daarom zolang nodig apart opvraagbaar.

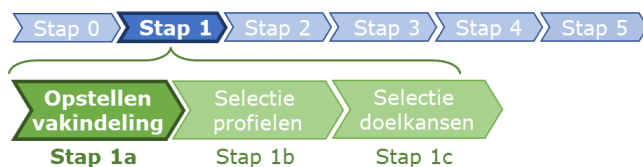
## 4.4 Stap 1: Voorbereiding faalkansanalyse duinafslag



In Stap 1 worden de voorbereidingen getroffen om duinafslagberekeningen uit te kunnen voeren waarmee in Stap 2 de faalkansschatting bepaald kan worden per raai. Er moeten keuzes gemaakt worden met betrekking tot de vakindeling (Stap 1a), de te analyseren profielen (Stap 1b) en de overschrijdingskansen van het afslagpunt ('doelkansen') waarover geïtereerd wordt om de faalkansschatting per raai te bepalen (Stap 1c). Deze stappen zijn hieronder toegelicht.

Het wordt hierbij aanbevolen om keuzes die veel invloed (kunnen) hebben op het resultaat van de faalkansanalyse te bespreken in het 'werkatelier' (voor toelichting werkatelier: zie de Omgevingsregeling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022) en de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a)).

### 4.4.1 Stap 1a: Opstellen vakindeling



#### Toelichting

Ten behoeve van het beoordelen van een zandige waterkering in zowel fysische als juridische zin, wordt het te analyseren traject opgedeeld in één of meer vakken. Het aantal en de grootte van deze vakken is niet op voorhand vastgelegd en dient door de waterkeringbeheerder zelf in lijn met hetgeen in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse is beschreven te worden gedefinieerd.

Een vak is een statistisch homogeen deel van het traject: de sterkte en belasting zijn binnen een vak vergelijkbaar. Hierbij is met name de (statistische) homogeniteit van de dominante parameters van belang. Dit gaat in eerste instantie om de waterstand. Ook de variatie in de daadwerkelijke golfaanval op de waterkering moet hierbij worden beschouwd. Dit laatste speelt met name bij de aanwezigheid van voor de waterkering gelegen ondiepten.

Variaties in het duinprofiel worden hierin nadrukkelijk niet als een stochastisch beschouwd. Deze worden beoordeeld door de selectie van de relevante en maatgevende profielen binnen een vak; zie ook §4.4.2.

Dit maakt dat een zandige waterkering veelal slechts in één of hooguit enkele vakken ingedeeld hoeft te worden. Het is dan ook zeker niet nodig om voor elke (JarKus-)raai een apart vak te definiëren.

In praktijk wordt de vakindeling niet alleen door de eis dat een vak statistisch homogeen moet zijn bepaald, maar ook door geografische kenmerken en het achterliggende te beschermen gebied, zoals geïdentificeerd tijdens het opstellen van het verhaal van de kering. Denk hierbij aan de morfologische kenmerken die bijvoorbeeld kunnen leiden tot achterloopsheid en eventuele andere (waterkerende)

elementen waarvoor een ander faalmechanisme relevant of een ander faalpad dominant is.

Zolang rekening wordt gehouden met de bovenstaande eisen met oog op statistisch homogeniteit en morfologie, heeft de exacte keuze voor het aantal vakken en de ligging van de vakgrenzen nauwelijks tot geen invloed op de uiteindelijke faalkansschatting voor het faalpad duinafslag op trajectniveau. Het is dan ook niet noodzakelijk om kleine vakken te definiëren met het oog op de bepaling van de overstromingskans van een traject.

Het gebruik van relatief grote vakken heeft bovendien twee praktische voordelen:

1. Voor elk vak wordt de faalkansschatting geregistreerd in de groep 'Registratie en assemblage' in Riskeer. Het invoeren van deze gegevens voor slechts één of enkele vakken is praktischer en overzichtelijker dan het invoeren van deze gegevens voor vele vakken en zeker voor individuele (JarKus-)raaien als vak. Bovendien zou één vak per (JarKus-)raai betekenen dat voor elke raai een faalkansschatting bepaald moet worden, waarvoor (veel) meer berekeningen nodig zijn.
2. Door de raaien die (volledig) afhankelijk zijn binnen hetzelfde vak te houden, heeft de waterkeringbeheerder meer grip op de assemblage van de verschillende raaien. Voor het vak bepaalt de beheerder de faalkansschatting in Stap 3 op basis van de zwakste schakel binnen een vak. Als gekozen zou worden voor één vak per (JarKus-)raai en daarmee dus heel veel vakken, assembleert Riskeer de kansen van deze vakken zonder fysieke kennis van het systeem en kan hier theoretisch een andere kans uitkomen.

Merk op dat het hanteren van relatief grote vakken niet ten koste hoeft te gaan van het detailniveau waarop de waterkeringbeheerder inzicht krijgt in de waterveiligheid van de betreffende waterkering. Voor grote vakken is het in sommige gevallen nog steeds wenselijk om meerdere (JarKus-)raaien door te rekenen als onderdeel van de faalkansanalyse omdat zo ook de effecten van de tijds- en langsvariatie in de duinprofielen in kaart kan worden gebracht.

Het detailniveau hangt vooral af van welke keuzes worden genomen met betrekking tot (1) de te analyseren profielen in Stap 1b en of het aantal berekeningen gereduceerd wordt (zie ook §4.9) en (2) de in Stap 1c gekozen overschrijdingskansen van het afslagpunt waarover per raai geïtereerd wordt.

### **Aanpak**

Start met één vak dat het gehele traject beslaat. Bekijk vervolgens met hulp van de in Stap 0 verzamelde informatie of het nodig is om het vak op te splitsen in twee of meer vakken op basis van:

1. *Waar de waterkering wel/niet uit een zandige waterkering bestaat*  
Definieer vakgrenzen op overgangen tussen de zandige waterkering en andere type waterkeringen als het traject niet geheel uit een zandige waterkering bestaat. Alleen voor de vakken met een zandige waterkering wordt het faalmechanisme en faalpad duinafslag beschouwd.
2. *Hydraulische belasting op diep water*  
Splits een vak op als de hydraulische belasting binnen het vak sterk varieert en tot significant andere duinafslagvolumes zou kunnen leiden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een Waddeneiland waarbij een deel van het traject vanaf de Noordzee en een ander deel vanaf de Waddenzee belast wordt. Hiervoor kunnen

de semi-probabilistische hydraulische randvoorwaarden uit de BOI-software Riskeer voor een (zelf gekozen) overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans) gebruikt worden.

### 3. *Morfologische gebiedskenmerken*

Het wordt aangeraden gebieden met sterk verschillende morfologische kenmerken in een apart vak in te delen. Denk hierbij aan gebieden met duidelijke verschillen in de kustlijnontwikkeling (natuurlijk of kunstmatig; zie verschillende mogelijke trends in Bijlage 3) of onderscheid tussen brede en smalle duingebieden.

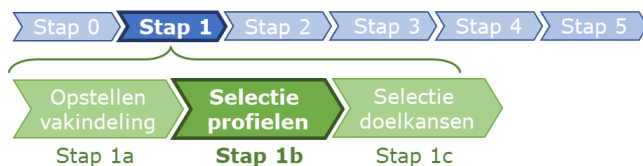
Als er meerdere duinenrijen aanwezig zijn binnen de waterkering en een duinenrij achterloops kan worden door het doorbreken van deze duinenrij, is het verstandig om het volledige gebied dat daardoor vol kan lopen binnen een enkel vak in te delen. De raaien binnen dit gebied zijn ten gevolge van achterloopsheid tenslotte afhankelijk van elkaar: de faalkansschatting van elke raai is afhankelijk van dit ruimtelijk (2D) effect.

### 4. *Andere vervolgmecanisme relevant*

Definieer een apart vak voor een gebied waar een (hard) element aanwezig is waarvoor een apart relevant vervolgmecanisme behandeld dient te worden na het plaatsvinden van duinafslag. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een duiker of harde kern van een hybride waterkering die pas belast wordt na een bepaalde mate van duinafslag.

Merk op dat voor elk parallel te beoordelen faalmecanisme en faalpad een verschillende vakindeling gemaakt wordt en deze parallelle faalpaden dus geen invloed hebben op de specifiek voor het faalpad duinafslag gedefinieerde vakindeling.

#### 4.4.2 **Stap 1b: Selectie profielen in ruimte en tijd**



#### **Toelichting**

Om een faalkansschatting te bepalen voor het faalpad duinafslag worden raaien geanalyseerd per vak. Binnen elk vak wordt voor een beoordeling de zwakste schakel – de raai met de grootste faalkansschatting – gezocht die voor het faalpad duinafslag representatief is voor de faalkansschatting van het vak voor de beoordelingstermijn. In Stap 1b worden de profielen in ruimte en tijd geselecteerd die mogelijk relevant zijn voor de faalkansschatting van elk vak.

De toestand van de kering aan het begin van de maatgevende storm – zie Figuur 2-1 – wordt met name beschreven door de profielligging. In de definitie van het semi-probabilistisch duinafslagmodel is de onzekerheid in ruimte en tijd in de profielligging vlak voor de maatgevende storm niet meegenomen, zoals reeds vermeld in §3.4. De onzekerheid (variatie) in toestand van de kering in de vorm van de profielligging binnen een vak en over tijd dient de waterkeringbeheerder zelf pragmatisch mee te nemen in de beoordeling.

Ruimtelijke variatie in de profielligging wordt ondervangen door het analyseren van meerdere raaien binnen elk vak. Variatie over tijd wordt ondervangen door de variatie

in de profielvorm over tijd binnen een relevante analyseperiode te analyseren en in Stap 2b per locatie een maatgevend jaar te selecteren. In de keuze van de analyseperiode dient rekening te worden gehouden met de dynamiek in de kustzone (kustlijnontwikkelingen; zie Bijlage 3 voor voorbeelden).

### **Aanpak**

Selecteer in Stap 1b alle relevante raaien en jaren voor de profielen. Dit resulteert dus in een set van geselecteerde raaien en jaren. Aansluitend op deze stap kan de waterkeringbeheerder er in bepaalde situaties voor kiezen om het aantal duinafslagberekeningen dat in Stap 2 uitgevoerd moet worden te reduceren, zoals nader toegelicht in §4.9 en Bijlage 3.2.

#### *Ruimtelijke variatie in de profielligging binnen een vak*

Neem ruimtelijke variatie in de profielligging (/profielvorm) mee door verschillende raaien binnen een vak te analyseren en daar uiteindelijk de 'slechtste' raai van te selecteren als maatgevend voor de faalkansschatting voor het vak. De gegevens van de JarKus-raaien vormen de basis voor deze analyse.

Wanneer een waterkeringbeheerder een kwetsbare plek vermoedt, kan de waterkeringbeheerder op basis van gebiedskennis een extra raai definiëren tussen twee JarKus-raaien. Denk hierbij aan een zwakke plek tussen twee JarKus-raaien, bijvoorbeeld bij een strandovergang, een (lokaal) smaller duin of een (lokaal) smaller gedefinieerde duinwaterkering. Ook op locaties waar een NWO binnen de waterkering ligt, of andere vervolgmecanismen een rol spelen, bijvoorbeeld bij een kunstwerk zoals een duiker, is het nodig een tussenraai te definiëren. De analyse van locaties met een NWO of kunstwerk valt echter buiten het toepassingsbereik van dit stappenplan, zie ook Hoofdstuk 5. Ten slotte kan ook naar aanleiding van de afslagberekeningen in Stap 2 besloten worden dat rondom de zwakste raai nog één of meerdere tussenraaien beschouwd moeten worden om lokale variatie rond de zwakke raai mee te nemen in de faalkansanalyse.

#### *Variatie in de profielligging over tijd binnen de relevante analyseperiode*

Neem de variatie in de profielligging over tijd mee door voor elke geselecteerde raai een duinafslaganalyse uit te voeren op basis van de profielligging in de afgelopen jaren<sup>12</sup>. Neem dit mee in de keuze van het maatgevend jaar in Stap 2b. Als basis wordt naar de afgelopen 15 jaar gekeken. Dit is in lijn met de beoordelingssystematiek voor duinen in het voormalige WBI2017. Deze periode is langer dan de 12-jarige beoordelingscyclus en de meeste (cyclische) trends in de kustlijnontwikkeling zullen binnen deze periode zichtbaar zijn.

De te beschouwen relevante analyseperiode dient de waterkeringbeheerder met verstand te kiezen. Hierbij staat het verhaal van de kering centraal, met een focus op kustlijnontwikkelingen die zowel natuurlijk als door menselijk ingrijpen plaatsvinden. Als op basis het verhaal van de kering (Stap 0) blijkt dat er sprake is van een sterke trendbreuk in de kustlijnontwikkeling die waarschijnlijk meer dan grofweg 10 jaar effect heeft, kan de analyseperiode teruggebracht worden tot de periode sinds de trendbreuk. Dit geldt bijvoorbeeld voor een trendbreuk door het aangroeien van een zandbank aan de kust of een grote versterking of suppletie, of door (grote) ingrepen

<sup>12</sup> Merk op dat JarKus-raaien jaarlijks rond dezelfde periode ingewonnen worden, veelal na het stormseizoen (wel kan er enkele maanden verschil in de opnamedatum boven- en onder water zitten). Dit geeft informatie over de variatie in de profielligging over de jaren, maar niet over de seizoensvariatie. Aangenomen wordt dat het profiel aan het einde van het stormseizoen het 'zwakst' is met oog op duinwaterveiligheid.

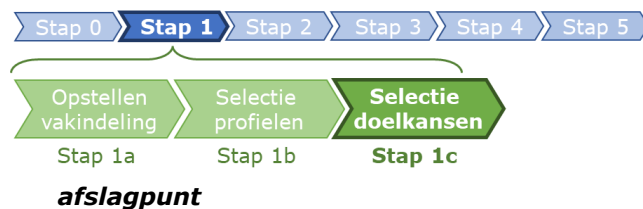
in (het zeewaartse deel van) het duin binnen de waterkering. Relatief kleine suppleties die na een periode van enkele jaren herhaald moeten worden, vallen hier niet onder.

#### *Optioneel toevoegen fictief dwarsprofiel aan eind beoordelingsperiode*

Houd hierbij ook rekening met hoeveel tijd er nog zit tussen het moment van uitvoeren van de analyse en het eind van de beoordelingsperiode: als er bijvoorbeeld sprake is van een duidelijke eroderende trend en er nog meerdere jaren te gaan zijn tot het eind van de beoordelingsperiode, kan het verstandig zijn om een extra fictief dwarsprofiel voor aan het eind van de beoordelingsperiode toe te voegen waarin rekening wordt gehouden met deze trend op het dwarsprofiel. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen over de aan het eind van de periode te verwachten faalkans voor de beschouwde raai.

Een dergelijk inzicht volgt ook uit het extrapoleren van de trend (zie Bijlage 3). Overigens wordt ook aanbevolen om de beoordeling van het vak te herhalen bij het beschikbaar komen van aanvullende gegevens.

#### **4.4.3 Stap 1c: Selectie te beschouwen overschrijdingskansen van het**



#### **Toelichting**

Met gebruik van de semi-probabilistische aanpak kan een realistische schatting van de faalkans van een raai iteratief bepaald worden, zoals is toegelicht in §**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** In Stap 1c wordt de iteratiestrategie bepaald, waarbij gekozen wordt voor welke overschrijdingskansen van het afslagpunt ('doelkansen') een afslagberekening per profiel (mogelijk) uitgevoerd wordt in de iteratie en in welke volgorde. Deze doelkansen zijn in feite *mogelijke* faalkansen die getoetst worden. Door met deze iteratiestrategie voor verschillende doelkansen ( $P_{afslag,i}$ ) te berekenen of de duinwaterkering wel of niet faalt, wordt de bandbreedte van kansen waarbinnen de daadwerkelijke faalkans ( $P_{faal}$ ) van de raai ligt steeds kleiner. De gekozen iteratiestrategie bepaalt mede hoeveel berekeningen nodig zijn om de faalkansschatting voldoende nauwkeurig te bepalen.

#### **Aanpak**

Het is aan de waterkeringbeheerder om de iteratiestrategie te bepalen. Kies in Stap 1c welke en hoeveel overschrijdingskansen van het afslagpunt ('doelkansen') maximaal iteratief doorgerekend worden per profiel.

De drie hierin te maken keuzes zijn:

1. Welke doelkansen (bovengrens van de gewenste 'klassen') doorgerekend worden;  
*Hierbij kan elke gewenste set doelkansen gekozen worden<sup>13</sup>. Het wordt sterk afgeraden om doelkansen te beschouwen die kleiner zijn dan 1:100.000 per jaar; dit valt buiten het toepassingsbereik van het semi-probabilistische rekenvoorschrift.*

<sup>13</sup> In Riskeer kan in principe voor elke gewenste overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans) een set met rekenwaarden afgeleid worden.

2. Met welke doelkans gestart wordt;
- Hoe dichterbij de startwaarde bij de daadwerkelijke faalkans ligt, hoe minder iteratieslagen nodig zullen zijn. Hierbij kan strategisch gestart worden met een kans aan de bovenkant van of gelijk aan de trajectnorm of in het midden van de gekozen set van te analyseren overschrijdingskansen van het afslagpunt. Eventueel kunnen ook de resultaten van een eerdere beoordelingsronde als eerste indicatie worden gebruikt van de mogelijke faalkans, mits er rekening wordt gehouden met veranderingen in het beoordelingsinstrumentarium.*
- Uit praktische overwegingen wordt het aanbevolen om één 'startkans' te kiezen voor alle raaien, ook al zal de verwachte faalkans van individuele raaien verschillen. Door één 'startkans' te kiezen kan namelijk de eerste ronde afslagberekeningen eenvoudig voor alle raaien gezamenlijk toegepast worden in één set (batch), zoals nader toegelicht wordt in Stap 2.*
3. Met welke sprong de klassen doorgerekend worden.
- Dit bepaalt hoeveel iteratieslagen/berekeningen minimaal en maximaal nodig zijn.*
- o *Als sprongen van 2 'klassen' genomen worden, zal het maximaal aantal benodigde iteratieslagen kleiner worden, maar zal vaker een tweede stap nodig zijn.*
  - o *Als sprongen van 1 'klasse' genomen worden, worden de condities in feite vanaf de 'startkans' consequent zwaarder (of lichter, afhankelijk van wel of niet falen in ronde 1) gemaakt totdat de duinwaterkering (niet meer) faalt. Hoe sterker de 'startkans' afwijkt van de faalkans, hoe meer iteratieslagen in dit geval nodig zullen zijn. Daarentegen kun je ook na 1 iteratieslag klaar zijn als de startkans goed gekozen is.*

De waterkeringbeheerder maakt deze keuzes op basis van het gewenste detailniveau in relatie tot het aantal benodigde berekeningen, en de beschikbare gebiedskennis van het betreffende traject. Het gewenste detailniveau heeft zowel betrekking op de geaccepteerde bandbreedte waarbinnen de faalkans ligt en de minimale en maximale doelkans die doorgerekend worden.

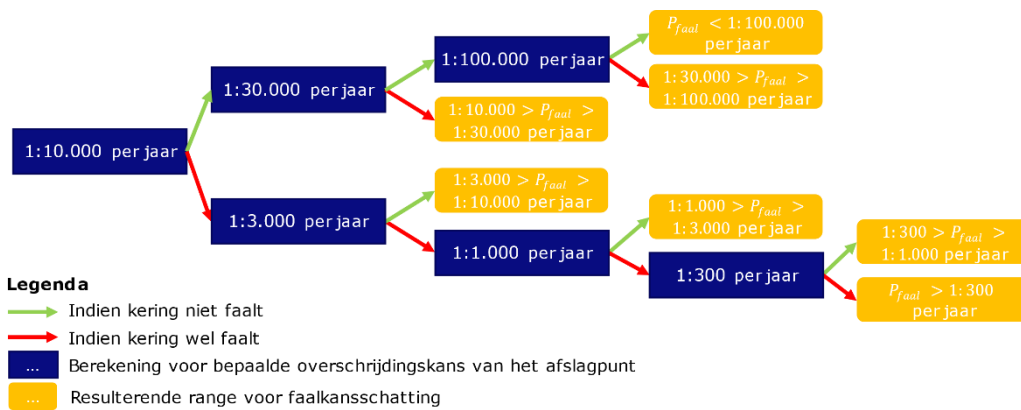
#### *Voorbeelden van iteratiestrategieën*

Figuur 4-4 en Figuur 4-5 tonen twee voorbeelden van een iteratiestrategie voor een set overschrijdingskansen van het afslagpunt van 1:100, 1:300, 1:1.000, 1:3.000, 1:10.000, 1:30.000 en 1:100.000 per jaar<sup>14</sup>. Met deze set kan in maximaal vier stappen een faalkansschatting gemaakt worden met een marge van een factor ~3. In de twee figuren is gevarieerd in de kans waarmee gestart wordt en de sprong die genomen wordt per iteratie, waardoor het aantal iteraties om tot een bepaalde 'klasse' te komen verschilt.

In plaats van de kansen in Figuur 4-4 en Figuur 4-5 kunnen bijvoorbeeld ook de bovengrenzen van de duidingsklassen op vakniveau gebruikt worden, zoals beschreven in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a) en Bijlage II van de Regeling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022).

<sup>14</sup> Merk op dat de overschrijdingskansen van het afslagpunt in deze set getalsmatig gelijk zijn aan de overstromingskansen van de grenzen van de normklassen, maar dat deze niet één-op-één aan elkaar gerelateerd zijn.



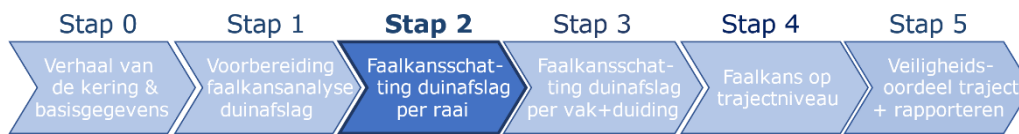


Figuur 4-4 Stroomschema van een voorbeeld van een iteratiestrategie om de schatting van de faalkans ( $P_{faal}$ ) van een raai te bepalen met een sprong van '1 klasse' en een startkans van 1:10.000 per jaar.



Figuur 4-5 Stroomschema van een voorbeeld van een iteratiestrategie om de schatting van de faalkans ( $P_{faal}$ ) van een raai te bepalen met een sprong van '2 klassen' en een startkans van 1:3.000 per jaar. De door te rekenen overschrijdingskansen van het afslagpunt zijn hetzelfde als in Figuur 4-4.

#### 4.5 Stap 2: Bepaal faalkansschatting per raai (iteratief)

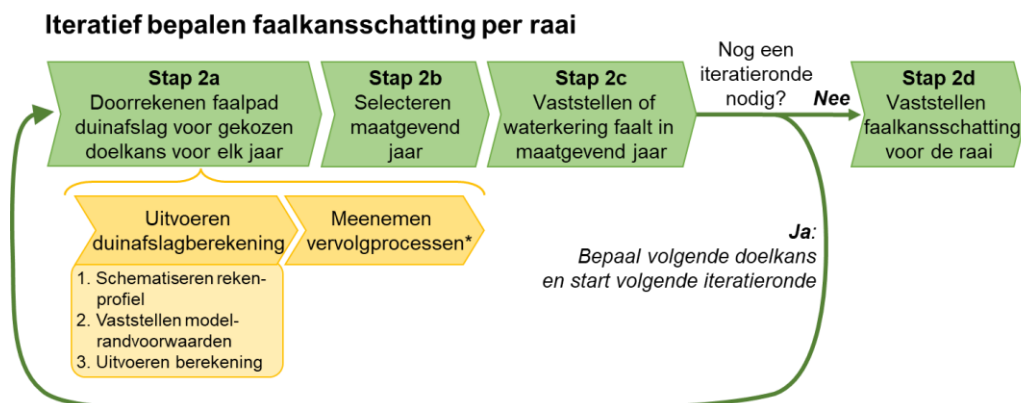


In Stap 2 wordt middels iteratieve berekeningen de faalkansschatting voor het faalpad duinafslag vastgesteld per raai. In §4.5.1 is dit proces beschreven, waarin verwezen wordt naar de activiteiten in §4.5.2 tot en met §4.5.5.

##### 4.5.1 Iteratieproces in stap 2

###### Toelichting

Het proces om te komen tot een faalkansschatting per raai is schematisch weergegeven in Figuur 4-6. De eerste stap (Stap 2a) is het doorrekenen van het faalpad duinafslag voor elk geselecteerd jaar (zie §4.5.2), waarbij zowel het initieel mechanisme als de vervolprocessen meegenomen worden. Vervolgens wordt op basis van de uitkomsten voor de verschillende jaren het maatgevend jaar vastgesteld (Stap 2b) en daarmee of de duinwaterkering wel of niet faalt in het maatgevend jaar (Stap 2c). Dit is nader toegelicht in respectievelijk §4.5.3 en §Kader 9.



Figuur 4-6 Schematische weergave van het iteratieproces om per raai een faalkansschatting te maken voor het faalpad duinafslag (Stap 2 in het stappenplan). \*Strikt genomen is meenemen vervolprocessen niet nodig als het duin reeds faalt door alleen duinafslag.

Daarna start de iteratie (lange groene pijl in Figuur 4-6): op basis van de uitkomst of de waterkering wel/niet faalt, wordt een volgende door te rekenen overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans) geselecteerd, en een volgende ronde afslagberekeningen uitgevoerd. Dit is hieronder in de huidige paragraaf nader toegelicht. Eventueel kan de waterkeringbeheerder er voor kiezen om het aantal duinafslagberekeningen in de volgende iteratiestap te reduceren als duidelijk is dat bepaalde locaties en jaren niet relevant zijn voor de faalkansschatting op vak- en trajectniveau en het hoger detailniveau niet opweegt tegen de (extra) rekentijd. Dit wordt nader toegelicht in §4.9 en Bijlage 3.3.

Deze stappen herhalen zich tot aan het eind van het gekozen iteratieschema waarmee de faalkansschatting van de raai voldoende nauwkeurig vastgesteld kan worden. In feite wordt doorgerekend 'tot de kering faalt', of tot blijkt dat de faalkans van de waterkering zodanig klein is dat verder verfijnen niet zinvol is. De keuze hoe op basis

van de bandbreedte aan doelkansen de faalkansschatting bepaald wordt, is toegelicht in Stap 2d in §4.5.5.

Dit proces wordt voor alle in Stap 1b geselecteerde raaien uitgevoerd, gebruik makend van de in Stap 1c vastgestelde iteratiestrategie. In praktijk zullen daarom sets (batches) van duinafslagberekeningen voor meerdere raailocaties en jaren voor dezelfde doelkans gecombineerd uitgevoerd worden binnen een duinveiligheidsmodel in MorphAn.

### **Aanpak**

Reken in de eerste iteratieronde alle in Stap 1b geselecteerde raailocaties en geselecteerde jaren door voor de in Stap 1c geselecteerde 'startkans' (eerste door te rekenen overschrijdingskans van het afslagpunt). Per set raaien met dezelfde startkans kunnen per vak alle berekeningen in MorphAn in één of meer sets (batches) doorgerekend worden door de gewenste set rekenwaarden in te laden en de gewenste raaien en jaren te selecteren<sup>15</sup>. In Stap 2a in §4.5.2 is uitgelegd hoe de duinafslagberekeningen opgezet en uitgevoerd kunnen worden en hoe daarna vervolprocessen meegenomen kunnen worden zodat vervolgens bepaald kan worden of de waterkering in het betreffende profiel waarschijnlijk wel of niet faalt.

Uit de eerste ronde berekeningen volgt onder andere op welke raailocaties in welke jaren de duinwaterkering faalt. Bepaal hiermee voor alle raaien het maatgevend jaar voor de doorgerekende overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans), zoals beschreven is in Stap 2b in §4.5.3. Stel vervolgens vast welke raaien in het maatgevend jaar falen in Stap 2c in §Kader 9. Dit vormt de basis om te bepalen voor welke overschrijdingskans(en) van het afslagpunt de volgende iteratieslag uitgevoerd moet worden conform de in Stap 1c opgezette iteratiestrategie.

Als de waterkeringbeheerder gekozen heeft voor het reduceren van het aantal duinafslagberekeningen (zie §4.9), kan voor de volgende iteratieronde start op basis van de uitgevoerde berekeningen besloten worden of en welke raailocaties en jaren per vak in de volgende iteratieslag niet verder meegenomen worden.

Voer vervolgens de volgende iteratieslag uit voor alle (overgebleven) raailocaties en jaren. Voer dit op dezelfde manier uit als de eerste stap, inclusief een eventuele verdere selectie van de verder te analyseren raailocaties en jaren. Herhaal dit totdat het eind van het iteratieschema is behaald.

Bepaal ten slotte voor de (overgebleven) raaien de bandbreedte waar de faalkans per raai binnen valt en bepaal daarmee de faalkansschatting per raai. De methode hiervoor is beschreven in Stap 2d in §4.5.5.

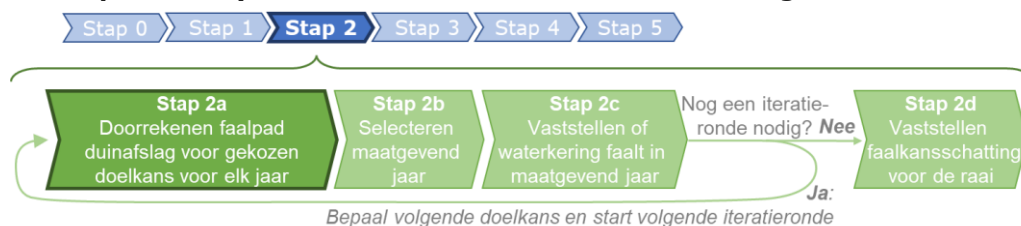
Merk op dat het bij het analyseren van een breed duingebied (een duingebied met meerdere duinregels) belangrijk is om als onderdeel van de *plausibiliteitscontrole* van Stap 2 te controleren of er situaties voorkomen waarbij (mogelijk) achterloopsheid optreedt. In dat geval moet hier namelijk beter naar gekeken worden, zoals nader toegelicht is in §5.2.1.

---

<sup>15</sup> Het uitvoeren van een set duinafslagberekeningen is een praktische keuze; het is echter ook mogelijk om kleinere sets of individuele berekeningen uit te voeren. Om voor een bepaalde locatie en een bepaalde overschrijdingskans van het afslagpunt (doelkans) een maatgevend jaar vast te stellen, is het wel sterk aan te raden de verschillende jaren in één set door te rekenen in MorphAn zodat hiermee een tijdsanalyzediagram (zie Stap 2b) opgesteld kan worden.

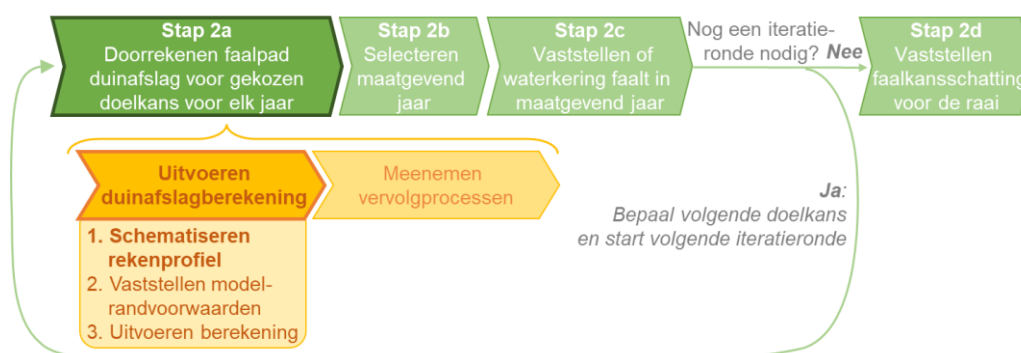
Een andere plausibiliteitscontrole in Stap 2 heeft betrekking op het eventueel reduceren van het aantal duinafslagberekeningen (zie §4.9) in Stap 1. Als hiervoor gekozen is, kan de beheerder bepalen of de eerder gemaakte selectie plausibel is geweest op basis van resultaten van een iteratieronde voor een bepaalde doelkans (afslagpunten/licging grensprofiel in het maatgevend jaar), of daarna op basis van de vastgestelde faalkansschattingen per raai. Dit kan door te controleren of dezelfde zwakste raaien op basis van de berekeningen naar voren komen als uit de analyse van de waterveiligheidsindicator waarmee het aantal raaien gereduceerd is. Als dit sterk afwijkt, zal mogelijk de selectie moeten worden herzien en Stap 2 voor deze raaien alsnog doorlopen moeten worden.

#### 4.5.2 Stap 2a: Analyse wel of niet falen van duinwaterkering



In de volgende paragrafen is het proces toegelicht hoe bepaald kan worden of een duinwaterkering op een bepaalde locatie en in een bepaald jaar faalt bij een gekozen doelkans aan de hand van het initieel mechanisme duinafslag en de vervolprocessen. Dit betreft het opstellen en uitvoeren van een semi-probabilistische duinafslagberekening met XBeach (§4.5.2.1 - §4.5.2.3) en het meenemen van vervolprocessen al dan niet met hulp van het grensprofiel (§4.5.2.4). Dit is in het geel weergegeven in Figuur 4-6.

##### 4.5.2.1 Duinafslagberekening: schematiseren rekenprofiel



#### Toelichting

Voor de te analyseren raaien is een hoogteprofiel nodig voor de XBeach-duinafslagberekeningen. Elk rekenprofiel moet starten op een diepte die past bij de offshore (diep water) randvoorwaarden die opgelegd worden om tot een realistisch afslagprofiel te komen, en minstens doorlopen tot de landwaartse grens van de duinwaterkering. De positie is in elk rekenprofiel gedefinieerd ten opzichte van de Rijksstrandpalenlijn. De JarKus-data vormen de basis voor deze profielen en zal in veel gevallen voldoende zijn.

De hoogte langs het volledige natte rekenprofiel in XBeach heeft invloed op de mate van duinafslag en daarmee de faalkansschatting. Het rekenprofiel onder water bepaalt namelijk de groei en breking van de korte en lange golven en de waterstandsozpet

(ook in XBeach) en daarmee de belasting op het duin. Het is daarom belangrijk om het rekenprofiel tot en met diep water correct te schematiseren.

Als het (JarKus-)profiel land- of zeewaarts niet ver genoeg doorloopt, zal het profiel verlengd moeten worden om voldoende nauwkeurige afslagresultaten te krijgen. Aan de landzijde kan het rekenprofiel met topografische gegevens (e.g., AHN) worden aangevuld. Aan de zeewaartse zijde kan het rekenprofiel zowel met aanvullende bathymetrische gegevens als kunstmatig worden verlengd tot en met diep water.

*Rekenprofiel (kunstmatig) verlengen naar voldoende diep water*

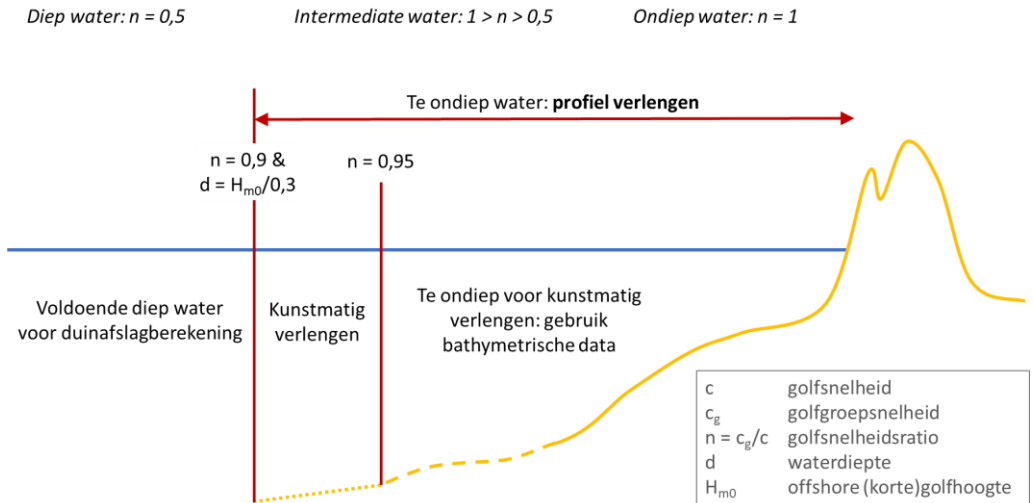
Een kunstmatige verlenging met een steile, rechte helling tot voldoende diep water wordt bereikt, wordt standaard door MorphAn uitgevoerd in het XBeach-model onder het duinveiligheidsmodel, zodat het rekenprofiel altijd op voldoende diep water start<sup>16</sup>. Deze kunstmatige verlenging heeft als voordeel dat de rekentijd beperkt wordt (minder rekencellen nodig dan een langer werkelijk profiel).

Echter, hoe ondieper het punt waarvandaan het rekenprofiel kunstmatig verlengd wordt en hoe steiler de helling van het kunstmatig profieldeel, hoe groter de onderschatting van de lange-golfhoogte en daarmee duinafslag. Om deze onderschatting tot een minimum te beperken is het nodig dat het profiel dat kunstmatig verlengd wordt minimaal tot een bepaalde diepte reikt. Als deze diepte niet in het (JarKus-)profiel bereikt wordt, wordt aangeraden het profiel eerst te verlengen met aanvullende bathymetrische data tot deze diepte wel bereikt wordt<sup>17</sup>.

In Figuur 4-7 is schematisch weergegeven in welke situatie verlengen met aanvullende bathymetrische data aanbevolen wordt, wanneer de kunstmatige verlenging volstaat en wanneer het profiel in voldoende diep water start. Daarnaast wordt in Tabel 4-1 aangegeven welke combinatie van waterdiepte (inclusief getij en opzet) en de rekenwaarde voor de golfperiode op de rand van het rekenprofiel hoort bij welke situatie.

<sup>16</sup> Deltares (2021) geeft aan dat er is sprake van voldoende diep water als de waterdiepte op de offshore modelrand maximaal ongeveer drie keer de korte golfhoogte op diep water is:  $d > H_{m0}/0,3$  én de golfsnelheidsverhouding kleiner is dan 0,9 ( $n = c_g/c < 0,9$ , met  $c_g$  = golfgroepvoortplantingssnelheid en  $c$  = golfvoortplantingssnelheid). Als het profiel niet diep genoeg reikt, dan wordt het profiel kunstmatig verlengd. Dit wordt in MorphAn automatisch gecontroleerd voor de piek van de storm en toegepast. De taludhelling hiervoor is 1:10 als op de profielrand geldt dat  $d > H_{m0}/0,3$  óf  $n < 0,9$ ; of de helling is 1:50 als  $n \geq 0,9$  én  $d \leq H_{m0}/0,3$ .

<sup>17</sup> Het gebruik van bathymetrische data wordt aanbevolen als  $n = c_g/c$  op de zeewaartse rand van het profiel groter is dan 0,95. Vanaf het punt waar na verlenging  $n = 0,95$  geldt, kan vervolgens wel kunstmatig verlengd worden.



Figuur 4-7 Schematisch overzicht van wanneer op welke wijze aanbevolen wordt om het (JarKus-)profiel te verlengen tot voldoende diep water: met een kunstmatig profieldeel (gestippelde gele lijn) en als het rekenprofiel nog ondieper komt eerst ook met bathymetrische data (onderbroken gele lijn).

$T_p$ (s)	Waterdiepte (m)																													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
6	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,72	0,69	0,67	0,65	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	
7	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	
8	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,84	0,83	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58	0,58	
9	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,64	0,63	
10	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,68		
11	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,73	0,72	
12	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,79	0,78	0,78	0,77	0,76	0,77	0,76	0,76	
13	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,79	0,79	
14	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,82	0,81	
15	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	
16	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	
17	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	
18	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	0,88	
19	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	
20	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	
21	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	
22	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	
23	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	
24	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	
25	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	

## profielrand is te ondiep voor kunstmatig verlengen ( $n \geq 0,95$ )

## profielrand kan kunstmatig verlengd worden ( $0,9 \leq n < 0,95$ )

## profielrand is voldoende diep om een XBeach duinafslagberekening mee uit te voeren ( $n < 0,9$ ) (mits de waterdiepte ook groter is dan  $H_{m0}/0,3$ , zie voetnoot 16).

Tabel 4-1 Golfsnelheidsverhouding ( $n = c_g/c$  met  $c =$  voortplantingssnelheid golf en  $c_g =$  voortplantingssnelheid golfgroep) voor combinaties van de golfperiode ( $T_p$ ) en waterdiepte op de rand van het rekenprofiel, waarmee bepaald kan worden of het rekenprofiel diep genoeg start. De  $n$ -waarden zijn berekend o.b.v. lineaire golftheorie.

De waterkeringbeheerder kan er eventueel voor kiezen om het rekenprofiel aan te vullen met meetdata tot aan de waterdiepte waar de offshore randvoorwaarden bij horen, of tot waar gegevens beschikbaar zijn. In dat geval wordt er geen – of beperkt – gebruik gemaakt van de kunstmatige verlenging. Aangezien dit vrijwel altijd

gepaard gaat met een langer profiel met meer rekenroostercellen, moet wel rekening worden gehouden met langere rekentijden.

Een dergelijke verlenging met meetdata is met name geschikt voor dwarsprofielen langs de open kust en expliciet niet van toepassing bij gekromde kusten waar door de profielverlenging mogelijk weer een ondiepe zone (bij een ander eiland) in beeld komt.

#### *Rekenprofiel verlengen bij ondiepte zeewaarts van geul*

Ten slotte zijn er ook situaties waarbij de waterdiepte niet continue toeneemt met afstand tot de kust door de aanwezigheid van geulen en ondiepten. Als zeewaarts van een (diepe) geul nog een ondiepte ligt, kan deze ondiepte de mate van duinafslag significant beïnvloeden. Over de ondiepte breekt een deel van de korte golven en neemt de golfhoogte van de lange golven toe.

Als de offshore hydraulische belasting in de diepe geul als modelrandvoorwaarden op wordt gelegd, wordt deze verandering in de golfhoogtes over de ondiepte niet meegenomen in de XBeach-berekeningen<sup>18</sup>. Hierdoor wordt de golfhoogte van de lange golven bij het duin onderschat, en daarmee ook de mate van duinafslag. Dit principe is schematisch weergegeven in Figuur 4-8 en is nader toegelicht in de technische leidraad (Arcadis en Deltares, 2023c).

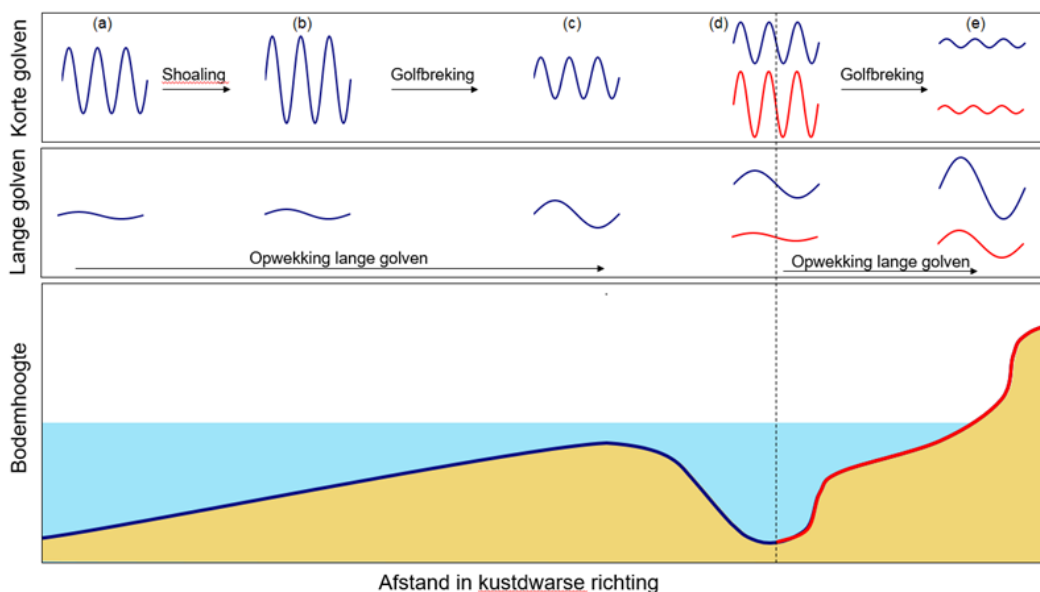
Om bovenstaande reden wordt voor raaien met een geul en een ondiepte voor de kust aangeraden om de rekenprofielen voor de XBeach duinafslagberekeningen zeewaarts van de ondiepte te starten. Dit wordt in de technische leidraad (Arcadis en Deltares, 2023c) nader toegelicht en onderbouwd. Als vuistregel kan aangehouden worden dat alleen ondieptes meegenomen hoeven te worden waarvoor de golfsnelheidsverhouding ( $n = c_g/c$ ) groter dan of gelijk aan 0,95 is. In een dergelijke situaties is de golfperiode (en dus de golflengte) relatief groot ten opzichte van de waterdiepte. Er moet dan een grotere waterdiepte worden gehanteerd welke kan worden verkregen door het dwarsprofiel in zeewaartse richting te verlengen.

Of een ondiepte hieraan voldoet en of het dus nodig is een ondiepte mee te nemen, kan ingeschat worden met Tabel 4-1 door de waarde voor  $n$  af te lezen voor de rekenwaarde voor de golfperiode op diep water en de waterdiepte boven de ondiepte bij een waterstand gelijk aan de rekenwaarde voor het stormvloedpeil (het rekenpeil).

Indien nodig zal het rekenprofiel hiervoor met bathymetrische data verlengd moeten worden. Dit geldt dus ook in het geval dat de geul op basis van de bovenstaande paragrafen tot diep genoeg water reikt om het rekenprofiel te starten. Het starten van het rekenprofiel in de geul landwaarts van de ondiepte wordt afgeraden.

Merk op dat de controle of een ondiepte meegenomen moet worden *niet* automatisch door MorphAn uitgevoerd wordt: deze controle zal de gebruiker zelf uit moeten voeren.

<sup>18</sup> Dit geldt voor de hydraulische rekenwaarden die zijn verkregen via Riskeer. Deze rekenwaarden representeren diepwaterrandvoorwaarden rond de doorlopende NAP -20 m contourlijn. Dit is zeewaarts van de buitendelta-systemen.



Figuur 4-8 Schematische golfhoogteverloop in XBeach voor een simulatie die zeewaarts van een ondiepte start (blauw) en in de geul landwaarts van een ondiepte (rood) start met dezelfde hydraulische belasting.

Samengevat geldt dat het zeewaarts verlengen van het rekenprofiel met aanvullende bathymetrische gegevens

- ... *sterk aanbevolen wordt* als de zeewaartse rand van het rekenprofiel nog te ondiep is voor de kunstmatige verlenging die standaard in MorphAn uitgevoerd wordt;
- ... *sterk aanbevolen wordt* als het rekenprofiel begint in/nabij een geul en zeewaarts van de geul nog een ondiepte aanwezig is;
- ... *mogelijk is* tot voldoende diep water wordt bereikt waardoor kunstmatige verlenging wordt voorkomen/beperkt.

### Aanpak

De rekenprofielen van de te analyseren jaren per raai kunnen worden geschematiseerd in de invoermodule in het duinveiligheidsmodel in de BOI-software MorphAn. De JarKus-profielen per jaar uit het .jrk-invoerbestand vormen hiervoor de basis en kunnen ingeladen worden in het duinveiligheidsmodel; zie MorphAn handleiding (Deltares, 2022d).

#### *Rekenprofielen schematiseren: Jarkus-raaien + eventueel handmatig verlengen*

Als het JarKus-profiel in een bepaald jaar niet ver genoeg land- of zeewaarts reikt conform de toelichting hierboven, kan het rekenprofiel in MorphAn verlengd worden met gemeten data. Voor het verlengen kan rasterdata geïnterpoleerd worden naar het profiel, of kunnen gegevens van een ander profiel (bijvoorbeeld een voorgaand jaar) geprojecteerd worden op het rekenprofiel. Voor de uitvoering hiervan in MorphAn, zie de handleiding van MorphAn (Deltares, 2022d). Voor de verlenging wordt de hoogtedata gebruikt die in Stap 0 verzameld is. Boven water kan voor het verlengen tot aan minimaal de landwaartse grens van de duinwaterkering de jaarlijkse kusthoogtedata en de verschillende jaargangen van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) gebruikt worden. Onder water kunnen bathymetrische data zoals de vaklodingen gebruikt worden.



De waterkeringbeheerder bepaalt zelf op basis van de lokale geometrie en beschikbare data welke data uit welk jaar en welke methode het meest geschikt is om een realistisch verlengd rekenprofiel te schematiseren. Daarnaast dient de beheerder het rekenprofiel zelf te controleren op correcte overgangen tussen verschillende databronnen (*plausibiliteitscontrole*).

#### *Rekenprofielen schematiseren: tussenraaien*

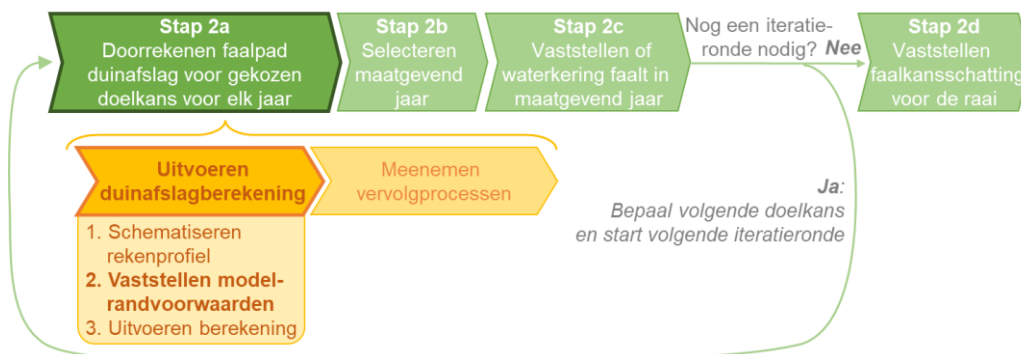
Naast de standaard Jarkus-raaien, zullen soms ook tussenraaien geschematiseerd moeten worden. Dit is het geval als de zwakste plaatsen niet op, maar tussen de Jarkus-raaien zijn gelegen. De locatie en oriëntatie van tussenraaien kan handmatig ingevoerd worden in MorphAn. De hoogte langs deze raaien kan vervolgens geïnterpoleerd worden op basis van de beschikbare rasterbestanden (net als voor het verlengen van Jarkus-raaien) of gebaseerd worden op de nabijgelegen Jarkus-raai(en). Voor de handelingen die nodig zijn in MorphAn om deze rekenprofielen aan te maken wordt verwezen naar de handleiding van MorphAn (Deltares, 2022d).

#### *Rekenprofielen verlengen: kunstmatige verlenging (geautomatiseerd in MorphAn)*

Nadat de waterkeringbeheerder de rekenprofielen geschematiseerd heeft in de invoermodule van het duinveiligheidsmodel in MorphAn, vindt nog een laatste aanpassing van het rekenprofiel plaats in het XBeach Erosiemodel in MorphAn voor de berekeningen worden gestart. Voor elke berekening – dus per raai per jaar en per set hydraulische modelrandvoorwaarden – wordt het rekenprofiel automatisch verlengd naar voldoende diep water met een steile rechte helling als het profiel niet tot voldoende diep water reikt, zoals hierboven toegelicht. MorphAn gebruikt hierbij de offshore randvoorwaarden die horen bij de betreffende duinafslagberekening. De diepte tot waar de verlenging plaatsvindt is afhankelijk van de offshore randvoorwaarden en dus van de raailocatie en de doelkans die doorgerekend worden.

*Let op:* de waterkeringbeheerder dient als onderdeel van de *plausibiliteitscontrole* zelf te controleren of (1) het meest zeewaartse punt van het oorspronkelijke profiel vóór kunstmatige verlenging diep genoeg ligt en (2) eventuele ondieptes verder zeewaarts meegenomen moeten worden; zie toelichting hierboven.

#### 4.5.2.2 Duinafslagberekening: vaststellen modelrandvoorwaarden



#### **Toelichting**

Elke XBeach-duinafslagberekening vereist naast het rekenprofiel de volgende modelrandvoorwaarden: de rekenwaarden van de diepwater hydraulische belastingen en de rekenwaarde voor de lokale korrelgrootte (sterkteparameter). Deze belastingen-sterkterekenwaarden zijn voor het BOI afgeleid voor de semi-probabilistische aanpak met XBeach, zoals toegelicht in §3.4.

*Rekenwaarden hydraulische belasting*

De rekenwaarden van de volgende **hydraulische belastingparameters** in diep water moeten worden opgegeven voor een XBeach duinafslagberekening in MorphAn:

- Waterstand tijdens de stormpiek (stormvloedpeil) (m +NAP)
- Significante golfhoogte ( $H_s$ ) tijdens de stormpiek (m)
- Piekperiode ( $T_p$ ) tijdens de stormpiek (s)
- Gemiddelde getijdeamplitude (m)
- Faseverschuiving (dt) van de piek van de stormopzet ten opzichte van de piek van het astronomisch getij (s)

De semi-probabilistische rekenwaarde voor het stormvloedpeil wordt ook wel het rekenpeil genoemd.

De semi-probabilistische rekenwaarden voor de belasting zijn ontsloten via de BOI-software Riskeer en kunnen vervolgens ingeladen worden in MorphAn. MorphAn zet de rekenwaarden voor de hydraulische condities om naar een tijdsafhankelijk stormverloop voor waterstand en golven (zie achtergrondrapport (Arcadis en Deltares, 2023a) voor meer details). Deze tijdseries worden gebruikt als hydraulische modelrandvoorwaarden voor de XBeach berekening. In de technische leidraad katern Zandige Waterkeringen (Arcadis en Deltares, 2023c) is de statistiek die gebruikt is om de rekenwaarden mee af te leiden beschreven.

*Rekenwaarden korrelgrootte (sterkteparameter)*

XBeach gebruikt de mediane **korrelgrootte** ( $D_{50}$ ) als sterkteparameter voor een duinafslagberekening. Dit betreft een representatieve waarde voor de  $D_{50}$  van het sediment dat aanwezig is in het duin. De sedimenteigenschappen op het strand en vooroever zijn voor een XBeach berekening minder van belang.

De rekenwaarden voor de  $D_{50}$  ( $D_{50, \text{reken}}$ ) variëren langs de Nederlandse kust en deze is in het BOI gelijk aan de lokaal gemiddelde  $D_{50}$  ( $\mu D_{50}$ ). De rekenwaarden voor de  $D_{50}$  worden beschikbaar gesteld via het IPLO. Zoals toegelicht in (Rijkswaterstaat, 2023b), zijn deze waarden gebaseerd op de database die is opgesteld en gerapporteerd door Kohsiek (Kohsiek, 1984). Dit is dezelfde basisdataset die ook is opgenomen in Bijlage 1 in het TRDA2006 (ENW, 2007)<sup>19</sup>.

In bepaalde delen van de Nederlandse kust is sinds de jaren '80 dusdanig veel gewijzigd in de kustzone dat de korreldiameterdataset in Kohsiek (1984) niet meer representatief is, of geen waarden bevat voor nieuwe zandige waterkeringen. Als in Stap 0 vastgesteld is dat dit het geval is, kan afgeweken worden van deze basisdataset.

**Aanpak**

De database met de rekenwaarden voor de hydraulische belasting – de modelrandvoorwaarden als functie van de gewenste doelkans – is ontsloten via de BOI-software Riskeer (onder de groep 'Hydraulische belastingen') voor alle locaties langs de Nederlandse kust. Selecteer de gewenste locaties en overschrijdingskansen van het afslagpunt (zoals bepaald in Stap 1c) in Riskeer om een bestand aan te maken in .bnd-format. De waterkeringbeheerder kan hierbij elke gewenste doelkans opgeven om de rekenwaarden voor op te vragen: achter de schermen wordt geïnterpoleerd tussen de randvoorwaardensets voor verschillende kansen waarvoor het semi-probabilistische model afgeleid is.

<sup>19</sup> Opgemerkt wordt dat de rekenwaarden van  $D_{50}$  in het TRDA2006, voor Duros+ (gebaseerd op de gemiddelde  $D_{50}$  én de standaarddeviatie), niet gelijk zijn aan de rekenwaarden voor XBeach in het BOI (gelijk aan gemiddelde  $D_{50}$ ).

De database met de rekenwaarden voor de sterkte – de representatieve korrelgrootte ( $D_{50}$ ) – is op te vragen via het [IPLO](#), al dan niet samen met de meest recente MorphAn-versie.

Laad het .bnd-bestand en korrelgrootte-bestand vervolgens als input in in het duinveiligheidsmodel in MorphAn voor de XBeach-duinafslagberekeningen. Voor een verdere toelichting op de werking van Riskeer en MorphAn wordt verwezen naar de handleiding van respectievelijk Riskeer (Deltares, 2022c) en MorphAn (Deltares, 2022d).



### **Kader 7. Rekenwaarde $D_{50}$ : BOI vs. WBI2017**

*In het BOI is de rekenregel om de rekenwaarde voor de korrelgrootte te bepalen gewijzigd ten opzichte van het WBI2017 (en voorgangers daarvan).*

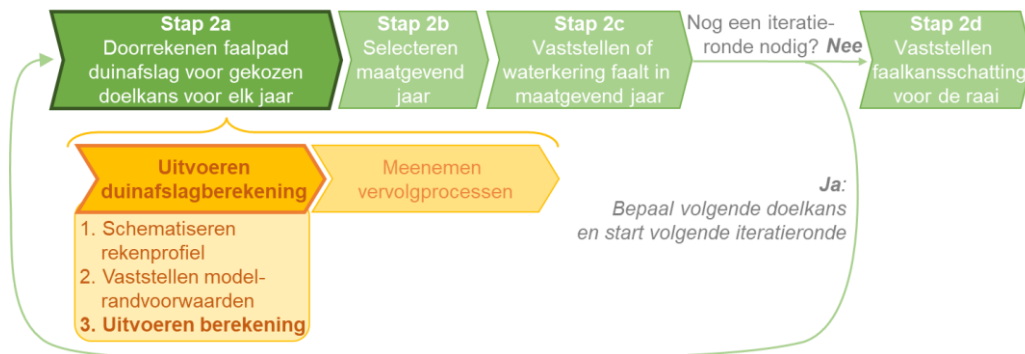
*De rekenwaarde voor XBeach (BOI) is gelijk aan de lokale gemiddelde  $D_{50}$ , zoals gerapporteerd in Kohsiek (1984), terwijl de rekenwaarde voor Duros+ (WBI2017) bepaald werd met een rekenregel waarin zowel de lokale gemiddelde  $D_{50}$  als de standaarddeviatie van de lokale  $D_{50}$  meegenomen werd. De rekenwaarde was daardoor effectief lager dan het gemiddelde. De afwijkende rekenregel voor XBeach is een gevolg van het feit dat de korreldiameter in XBeach minder invloed heeft op de mate van duinafslag, dan dat het geval was bij Duros+.*



**Via Riskeer zijn de vigerende BOI-rekenwaarden voor XBeach ontsloten. Deze dienen alleen in combinatie met XBeach gebruikt te worden;** dat geldt zowel voor de rekenwaarde voor de  $D_{50}$  als voor de rekenwaarden van de hydraulische condities. Meer informatie over de BOI-rekenwaarden is te vinden in (Arcadis en Deltares, 2023b). Voor het uitvoeren van berekeningen met Duros+ wordt aanbevolen om de rekenregels voor de rekenwaarden uit het WBI2017 te blijven hanteren; deze blijven beschikbaar via (een oude versie van) Riskeer.

---

#### 4.5.2.3 Duinafslagberekening uitvoeren



#### Toelichting

Zodra het rekenprofiel en de modelrandvoorwaarden (hydraulische belasting en  $D_{50}$ ) voor de duinafslagberekening(en) klaar staan, kan hiermee een semi-probabilistische XBeach-duinafslagberekening uitgevoerd worden. De overige instellingen en gekalibreerde BOI-parameters voor XBeach zijn reeds vastgezet en stelt de waterkeringbeheerder voor een beoordeling niet zelf in<sup>20</sup>.

Ook enkele verwerkingsslagen van de door de waterkeringbeheerder geselecteerde invoer vinden automatisch plaats binnen MorphAn, waaronder het opstellen van het rekengrid op basis van het opgegeven rekenprofiel en het genereren van tijdseries met het stormverloop van de hydraulische belasting. Dit is nader toegelicht in Arcadis en Deltares (2023a).

Nadat de invoer geselecteerd is, wordt de XBeach-berekening uitgevoerd. Dit resulteert in een tijdsafhankelijk afslagprofiel. Op basis van het afslagprofiel aan het eind van de simulatie berekent MorphAn onder andere het afslagpunt, het maximale ophoophoogte van lange golven ( $x_{nat}$ ) en het afslagvolume. Deze worden gebruikt in de verdere analyses.

Merk op dat na het uitvoeren van een duinafslagberekening geen toeslag meer toegepast hoeft te worden op het afslagprofiel om onzekerheden te ondervangen, aangezien deze onzekerheden reeds ondervangen zijn in de rekenwaarden. Dit is nader toegelicht in §3.4.

#### Aanpak

Voer de XBeach duinafslagberekeningen uit in het duinveiligheidsmodel in MorphAn. Selecteer per berekening in MorphAn de invoer:

- Het gewenste profiel voor een specifiek jaar zoals geschematiseerd conform §4.5.2.1<sup>21</sup>;
- De rekenwaarde voor de mediane korrelgrootte ( $D_{50}$ ) en offshore hydraulische rekenwaarden horend bij de gewenste doelkans uit de database die in conform §4.5.2.2 gegenereerd is.

<sup>20</sup> MorphAn biedt wel de mogelijkheid om buiten het duinveiligheidsmodel om een XBeach-model op te zetten en te draaien waarin de waterkeringbeheerder de vrijheid heeft om de BOI-parameters en instellingen van de XBeach-berekening aan te passen. Voor een beoordeling van een zandige waterkering wordt dit sterk afgeraden.

<sup>21</sup> Merk op dat de kunstmatige verlenging in MorphAn plaatsvindt na het selecteren van alle invoer, in de XBeach invoermodule, omdat voor deze procedure informatie nodig is over de door te rekenen offshore condities.

Start vervolgens de berekening. Controleer ten slotte visueel of de resultaten er plausibel uit zien (*plausibiliteitscontrole*), bijvoorbeeld op basis van de tijdsafhankelijke weergave van de modeluitvoer zoals de profielvorm en waterstanden in MorphAn. De resultaten van meerdere raailocaties kunnen ook samen weergegeven worden op een kaart in MorphAn via 'overzicht duinveiligheid'.

#### 4.5.2.4 Meenemen vervolgprocessen



#### Toelichting

Nadat het initieel mechanisme duinafslag doorgerekend is, kan bepaald worden of de waterkering reeds faalt. Als dit niet het geval is, wordt bepaald of de vervolgprocessen mogelijk wel tot falen leiden.

In dit stappenplan wordt uitgegaan van het gebruik van het in MorphAn gefaciliteerde grensprofiel om de vervolgmechanismen te verdisconteren, maar het staat de waterkeringbeheerder vrij om de vervolgprocessen op een andere wijze mee te nemen (zie ook §3.2), bijvoorbeeld met een beargumenteerd expertoordeel of met hulp van andere modellen waarin de vervolgprocessen bijvoorbeeld fysisch doorgerekend worden. In dat geval kan in hierna '*landzijde grensprofiel*' geïnterpreteerd worden als '*ligging duinfront na meenemen vervolgprocessen*'.

#### Aanpak

In theorie hoeft het grensprofiel alleen ingepast te worden als er slechts een beperkt restprofiel over is na duinafslag (zie §0). In praktijk is het eenvoudiger en sneller om ongeacht het restprofiel het grensprofiel in elk profiel in te passen dan om eerst voor elk profiel te bepalen of dat echt nodig is. Als het duin reeds gefaald is door alleen duinafslag, zal alsnog de conclusie zijn dat de waterkering faalt, aangezien het grensprofiel niet inpasbaar is.

Het inpassen van het grensprofiel kan worden uitgevoerd in MorphAn in het 'grensprofielmodel' onder het duinveiligheidsmodel zoals nader toegelicht in de handleiding van MorphAn (Deltares, 2022d). Op deze manier kan het volledige faalpad in MorphAn geanalyseerd worden. In MorphAn worden de afmetingen van het grensprofiel bepaald op basis van de lokale hydraulische condities uit de XBeach-berekening, zoals toegelicht in §**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Merk op dat de grootte van het grensprofiel dus automatisch verschilt per profiel en gehanteerde doelkans.

Controleer na het inpassen van het grensprofiel of het grensprofiel op een plausibele wijze is ingepast, bijvoorbeeld door het dwarsprofiel met daarin het grensprofiel te bekijken via de 'uitvoer' in het 'grensprofielmodel' in MorphAn, of de ligging van het grensprofiel voor verschillende raaien met elkaar te vergelijken op een kaart via 'overzicht duinveiligheid'. Dit geeft ook direct een beeld van of de faalkans voor de doorgerekende situatie verwaarloosbaar klein is (landzijde grensprofiel ligt zeewaarts van begrenzing waterkering, uitgaande van inpassen van het grensprofiel vanaf het afslagprofiel) of niet.

Als de basisgeometrie van het grensprofiel niet ingepast kan worden terwijl het resterend duin er robuust uit ziet, kan de waterkeringbeheerder er ook voor kiezen om het grensprofiel met de alternatieve geometrie zoals beschreven in §**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** in te passen. Dit wordt ook ondersteund in MorphAn, zoals beschreven in de handleiding van MorphAn (Deltares, 2022d). Kies hierbij – door verschillende hoogte-breedte-combinaties te proberen – een alternatieve geometrie waarbij de landzijde van het grensprofiel zo ver mogelijk zeewaarts ligt, met oog op de selectie van het maatgevend jaar (Stap 2b). Controleer ook in dit geval de resultaten op plausibiliteit.

#### 4.5.3 Stap 2b: Selectie maatgevend jaar



#### Toelichting

Het maatgevend jaar is het jaar binnen de analyseperiode waarin de resultaten van de faalanalyse uit Stap 2a als representatief voor de gehele beoordelingstermijn (die meestal nog deels in de toekomst ligt) worden beschouwd voor een raai. Om deze te definiëren is een analyse nodig van het effect van de tijdsvariatie in de profielligging op zowel de positie van het afslagpunt als de landzijde van het grensprofiel.

Het maatgevende jaar betreft het jaar met het zogenaamde 'K-na-slechtste' profiel met oog op de faalkans binnen de analyseperiode.

De landzijde van het grensprofiel (op bijvoorbeeld NAP-niveau) kan hierbij als indicator worden gebruikt, aangezien deze de meest directe link heeft met de faalkans van de raai. Het maatgevend jaar is dan het jaar met de K-na-meest landwaarts gelegen landzijde van het grensprofiel. De 'K' is een hulpvariabele die wordt gebruikt om uit een gesorteerde reeks met indicatorwaarden de maatgevende waarde en het bijbehorende jaar te selecteren.

Aangezien het maatgevend jaar per raai en voor verschillende stormcondities (horend bij verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt) kan verschillen, wordt het maatgevend jaar voor elke raai opnieuw bepaald in elke iteratieronde.

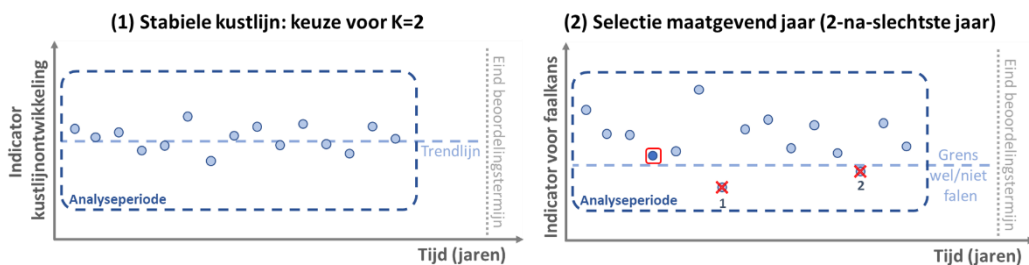
#### Keuze waarde voor 'K'

De waarde K hoeft per raai maar éénmaal vastgesteld te worden, aangezien deze niet afhankelijk is van de stormcondities horend bij een bepaalde doelkans. De waarde voor K dient de waterkeringbeheerder met verstand te kiezen. Hierbij is de dynamiek in de kustzone (kustlijnontwikkelingen) bepalend. Gebruik hierbij ook de analyses uit Stap 0 (Verhaal van de kering opstellen) en Stap 1b (Selectie van analyseperiode in relatie tot kustlijnontwikkelingen).

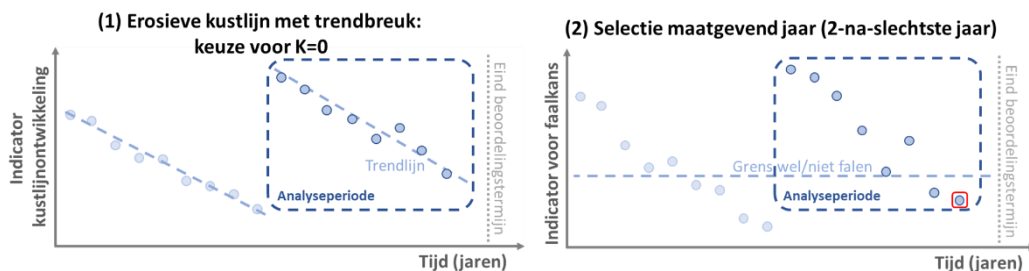
Als basis kan het 2-na-slechtste profiel ( $K = 2$ ) in de analyseperiode als maatgevend profiel beschouwd worden, in lijn met het WBI2017 en met oog op het herstellend vermogen van de kust.  $K = 2$  is representatief in een situatie met een 15-jarige analyseperiode waarin de kustlijn relatief stabiel is gebleven – zoals weergegeven in het voorbeeld in Figuur 4-9 – of sprake was van cyclisch gedrag van de kustzone op de tijdschaal van enkele jaren.

$K = 2$  is echter niet in alle situaties een logische keuze. Daarom kan de waterkeringbeheerder op basis van de (lokale) kustlijnontwikkelingen zelf een (pragmatische) keuze maken welke waarde voor  $K$  gehanteerd wordt voor het maatgevend profiel. Deze waarde kan verschillen tussen de te analyseren profielen. Hierbij zijn bijvoorbeeld de volgende situaties denkbaar:

- Als bijvoorbeeld door een trendbreuk een kortere analyseperiode gehanteerd wordt, kan ook  $K = 1$  of  $K = 0$  gekozen worden.
- Als er sprake is van structurele erosie van de kustlijn en het duinfront en het einde van de analyseperiode valt samen met het einde van de beoordelingsperiode, kan bijvoorbeeld  $K = 0$  gekozen worden, aangezien het slechtste (en waarschijnlijk het meest recente) jaar in dat geval de beste indicatie van de situatie aan het einde van deze beoordelingstermijn geeft. Een voorbeeld van deze situatie – met een trendbreuk in het verleden – is weergegeven in Figuur 4-10.
- Indien er sprake is van structurele erosie en het einde van de beoordelingsperiode verder weg ligt, kan de op vergelijkbare wijze het resultaat worden beschouwd voor een fictief dwarsprofiel aan het einde van de beoordelingsperiode.
- Als er sprake is van structurele aanzanding, is een van de recentere jaren in veel gevallen het meest representatief. In dit geval kan de analyseperiode en  $K$  zo gekozen worden dat deze jaren als maatgevend aangemerkt worden.



Figuur 4-9 Voorbeeld van het vaststellen van 'K' (links) en het maatgevende jaar (rechts) met hulp van een tijdsanalyse-diagram voor één raai voor condities met één bepaalde doelkans. Situatie met een stabiele kustzone gedurende de (in Stap 1b) geselecteerde analyseperiode. In dit geval is  $K=2$  gekozen, dus is het maatgevende jaar het op-2-na-slechtste resultaat in de geselecteerde set (rood vierkantje).



Figuur 4-10 Voorbeeld van het vaststellen van 'K' (links) en het maatgevende jaar (rechts) met hulp van een tijdsanalyse-diagram voor één raai voor condities met één bepaalde doelkans. Situatie met een erosieve kustzone met een trendbreuk – bijvoorbeeld door een grote suppletie – waar de analyseperiode op aangepast is (in Stap 1b). In dit geval is als voorbeeld  $K=0$  gekozen, dus is het maatgevende jaar het slechtste resultaat in de geselecteerde set (rood vierkantje).



De verschillende mogelijke trends in de kustlijnontwikkeling voorafgaand aan het eind van de beoordelingsperiode zijn in Bijlage 3 schematisch weergegeven.

In het geval van een eroderende trend volgt een indicatie van de maatgevende positie van de gebruikte indicator uit de extrapolatie van de gevonden trend conform Bijlage 2 of uit het resultaat voor deze situatie speciaal geconstrueerd fictief profiel.

### Aanpak

Voor zowel het vaststellen van de waarde van 'K' als het vaststellen van het maatgevend jaar zelf voor een raai, kan een tijdsanalyse-diagram worden gebruikt, zoals in de voorbeelden in Figuur 4-9 en Figuur 4-10. In een tijdsanalyse-diagram wordt voor een raai een indicator op de y-as uitgezet tegen de jaren op de x-as.

- Voor het eenmalig vaststellen van de waarde van 'K' voor een raai is de indicator op de y-as in het tijdsanalyse-diagram een indicator die betrekking heeft op de kustlijnontwikkelingen, zoals bijvoorbeeld het volume van het duin (en strand/vooroever), het met XBeach berekende afslagpunt of eventueel de ligging van het berekende 'natte punt'. In dit geval is de landzijde van het grensprofiel minder geschikt, omdat deze ook afhankelijk is van andere factoren dan de kustlijnontwikkelingen<sup>22</sup> en daardoor een meer 'springerig' tijdsverloop kan hebben. Kies op basis van de kustlijntrend – zoals weergegeven in bijvoorbeeld het tijdsanalyse-diagram – de waarde voor K.
- Voor het vaststellen van het maatgevend jaar per raai per doelkans is de indicator op de y-as van het tijdsanalyse-diagram een indicator die betrekking heeft op de faalkans van de raai. In dit geval is de berekende ligging van de landzijde van het grensprofiel t.o.v. RSP of de begrenzing van de waterkering voor elk doorgerekend jaar geschikt als indicator. Selecteer op basis van dit tijdsanalyse-diagram (of bijvoorbeeld dezelfde gegevens in tabelvorm) het K-na-slechtste jaar.

Een tijdsanalyse-diagram met één of meer indicatoren op de y-as om 'K' en daarmee het maatgevend jaar visueel vast te stellen, kan bijvoorbeeld worden gemaakt met het tijdsanalyse-model onder het duinwaterveiligheidsmodel in MorphAn. Voor meer informatie over de werking van het tijdsanalyse-model in MorphAn wordt verwezen naar de handleiding van MorphAn (Deltares, 2022d).



#### Kader 8. Tijdsanalyse-model in BOI vs. R-T model in WBI2017

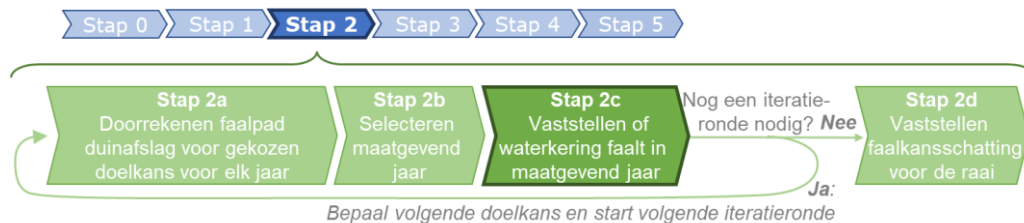
*Het tijdsanalyse-model in MorphAn is de opvolger van het voormalige R-t model waarin de locatie Duros+ afslagpunt na toepassen toeslag ('R') voor een raai in verschillende jaren werd uitgezet tegen de tijd ('t'), al dan niet aangevuld met bijvoorbeeld de ligging van de landwaartse grens van de waterkering (zie o.a. het TRDA uit 2006 (ENW, 2007)). In het tijdsanalyse-diagram in MorphAn is het mogelijk om in plaats van het Duros+ afslagpunt verschillende XBeach-resultaten als veiligheidsindicator over tijd uit te zetten, zoals de locatie van het 'natte punt' (maximaal oploophoogte van de lange golven) en de landzijde*

<sup>22</sup> Bijvoorbeeld: verschil in toegepaste geometrie (basis of alternatief), verschil in afmetingen grensprofiel door verschil in lange-golfoploop, en grensprofiel wel/niet in een bepaalde duinregel inpasbaar door kleine hoogteverschillen in profiel.



van het grensprofiel op verschillende niveaus. De nadruk ligt dus niet meer op het afslagpunt 'R'.

#### 4.5.4 Stap 2c: Vaststellen of de waterkering wel of niet faalt in maatgevend jaar



##### Toelichting

Zodra het maatgevend jaar bepaald is, kan voor dit maatgevend jaar bepaald worden of de duinwaterkering waarschijnlijk faalt of niet op de locatie van de raai onder de doorgerekende condities. Als het grensprofiel volledig zeewaarts ligt van de kering, is de kans dat het duin doorbreekt verwaarloosbaar klein, en als het (deels) landwaarts ligt of niet ingepast kan worden, is de kans op doorbraak aannemelijk, zoals toegelicht in §2.2.

##### Aanpak

Vergelijk de ligging van de landzijde van het grensprofiel in het maatgevend jaar met de ligging van de begrenzing van de waterkering op hetzelfde referentieniveau (bijvoorbeeld NAP) en bepaal hiermee of de kering waarschijnlijk faalt of niet. Dit kan bijvoorbeeld gedaan worden met behulp van het tijdsanalyse-diagram (of -tabel) in MorphAn dat gebruikt is om het maatgevend jaar te bepalen (ligging landzijde grensprofiel op y-as). Hier kan de begrenzing van de waterkering aan toegevoegd worden om (visueel) te bepalen of het grensprofiel nog binnen de waterkering past of niet.

#### 4.5.5 Stap 2d: Vaststellen faalkansschatting per raai



##### Toelichting

Op basis van de iteratieve berekeningen in Stap 2 wordt een faalkans binnen een geselecteerde onzekerheidsbandbreedte (boven- en ondergrens) per relevante raai bepaald. Deze bandbreedte per raai wordt vervolgens omgezet naar een faalkansschatting per raai voor in de verdere assemblage.

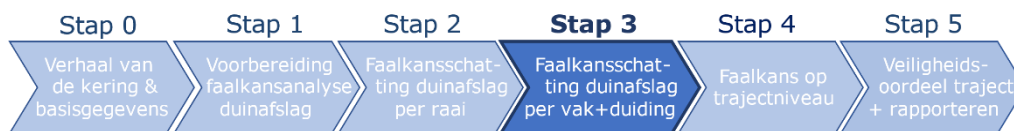
##### Aanpak

In de meeste gevallen volstaat het om de bovengrens (grootste kans) van de vastgestelde bandbreedte van overschrijdingskansen van het afslagpunt te gebruiken als faalkansschatting voor een raai: de doelkans waarbij de duinwaterkering net níet faalt. De daadwerkelijke faalkans zal in praktijk iets kleiner zijn, waardoor het

uiteindelijke veiligheidsoordeel van het traject mogelijk iets ongunstiger uitkomt dan deze werkelijk is. Dit heeft de voorkeur boven het gebruik van de ondergrens (kleinste kans) van de bandbreedte waarbij de kering wél faalt, omdat in dat geval het traject ongewenst als veiliger beoordeeld kan worden dan deze werkelijk is.

Als een nauwkeurigere inschatting van de faalkans wenselijk is, kan 1) een extra berekening uitgevoerd worden om de bandbreedte te verkleinen en 2) een interpolatie uitgevoerd worden tussen de doelkans waarbij de duinwaterkering net wel en net niet faalt. Hierbij kan bijvoorbeeld de afstand van het afslagpunt tot de grens van de waterkering of het resterend duinvolume na inpassen grensprofiel als veiligheidsindicator meegewogen worden. Een voorbeeld van een scenario waarin een extra slag wenselijk kan zijn, is als uit Stap 5 (§4.8) blijkt dat de duinwaterkering nét in een lagere veiligheids categorie terecht komt vanwege het faalpad duinafslag, terwijl dit niet het geval zou zijn als de faalkansschatting bepaald zou zijn op basis van de ondergrens van de bandbreedte voor één of enkele dominante raaien.

#### 4.6 Stap 3: Bepaal faalkansschatting per vak



##### Toelichting

De faalkansschatting per vak ( $P_{f,vak}$ ) voor het faalpad duinafslag wordt bepaald door de faalkansschatting van de zwakste schakel ( $P_{f,doorsnede}$ ): de raai met de grootste faalkansschatting in het maatgevend jaar, ervan uitgaande dat binnen een vak sprake is van volledig afhankelijke raaien. Binnen een vak wordt standaard het lengte-effect niet meegenomen voor het faalpad duinafslag ( $N_{vak} = 1$ ) (zie §3.5). Deze assemblage ziet er als volgt uit in formulevorm:

$$P_{f,vak} = \max(P_{f,doorsneden}) \quad (4-1)$$

Vervolgens kan de faalkansbijdrage van de verschillende vakken vergeleken en geduid worden met behulp van de duidingsklassen. Aan elk vak wordt een duidingsklasse toegekend op basis van de faalkansschatting van het vak. Dit wordt nader toegelicht in de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a).

##### Aanpak

Bepaal op basis van de faalkansschatting per raai uit Stap 2 en formule (4-1) de faalkansschatting voor elk vak. Registreer vervolgens de resultaten – de faalkansschattingen per vak – in het softwareprogramma Riskeer (groep 'Registratie en assemblage'), zoals nader toegelicht in de handleiding van Riskeer (Deltares, 2022c). Riskeer kent op basis van de faalkansschatting per vak ook een duidingsklasse toe aan elk vak, die tussen vakken onderling vergeleken kan worden.

## 4.7 Stap 4: Bepaal gecombineerde faalkans op trajectniveau



Op basis van de faalkansschattingen per vak voor het faalpad duinafslag wordt in de groep 'Registratie en assemblage' in Riskeer de faalkansschatting geassembleerd naar een faalkansschatting op trajectniveau. De waterkeringbeheerder geeft hierbij de lengte-effectfactor  $N$  voor tussen de vakken op:  $N_{traject} = 1,2$  (zie §3.5). Vervolgens wordt deze faalkansschatting gecombineerd met de faalkansen van eventuele andere dominante faalpaden en relevante faalmechanismen op trajectniveau. Deze stappen en daarbij horende keuzes worden nader toegelicht in de handleiding van Riskeer (Deltares, 2022c) en de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a).

## 4.8 Stap 5: Vaststellen veiligheidsoordeel traject



Op basis van de resultaten van Stap 1 tot en met 4 is de totale faalkans – en daarmee de overstromingskans<sup>23</sup> – op trajectniveau bepaald. Op basis van deze overstromingskans wordt in Stap 5 het traject ingedeeld in één van de veiligheidscategorieën uit Tabel 4.1. zoals opgenomen in Bijlage I van de Regeling. Hiermee wordt het veiligheidsoordeel vastgesteld en gerapporteerd. Deze stap en daarbij horende keuzes zijn nader toegelicht in de handleiding van Riskeer (Deltares, 2022c) en de overkoepelende handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a).

Controleer bij de *plausibiliteitscontrole* van deze stap naast de algemene plausibiliteit van de uitkomst ook hoe ruim de totale faalkans op trajectniveau binnen de bijbehorende veiligheidscategorie valt. Indien gewenst – bijvoorbeeld als het traject rond de grens van wel/niet afkeuren uitkomt – kan besloten worden om nadere analyses uit te voeren om het veiligheidsoordeel nog verder aan te scherpen. In hoeverre en welke aanscherping wenselijk is, kan overlegd worden in het werkatelier. Een aanscherping kan bijdragen aan een stabielere eindresultaat – een van de leidende principes die centraal staat bij een overstromingskansanalyse (zie de handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022a)). Enkele voorbeelden van mogelijke vervolganalyses worden hieronder (§4.8.1) toegelicht.

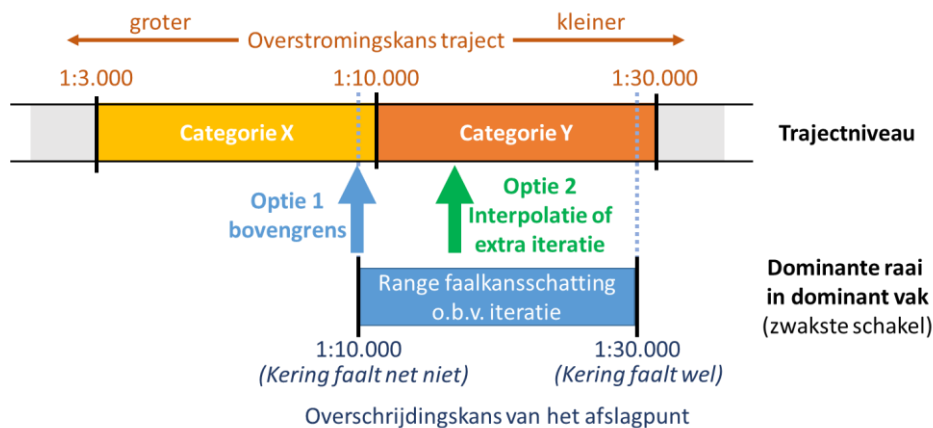
### 4.8.1 Mogelijke analyses voor aanscherping van veiligheidsoordeel

#### 4.8.1.1 Verfijnen faalkansschatting

Het kan voorkomen dat de faalkans nét binnen de categorie valt – dat wil zeggen: aan de ondergrens met de kleinste faalkans van de categorie zit – én dat faalpad duinafslag dominant is. Dit is als 'Optie 1' weergegeven in Figuur 4-11. In dit geval

<sup>23</sup> Mits de fysieke begrenzing van het duin beschouwd is, of de beschouwde juridische begrenzing gelijk is aan de fysieke begrenzing: zie §Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..

wordt aanbevolen om te bepalen welke raai(en) van welk vak (/welke vakken) dominant is (/zijn) voor het faalpad duinafslag. De faalkansschatting van elke raai is bepaald binnen een bepaalde bandbreedte die zo klein mogelijk is gemaakt op basis van de iteratie over verschillende overschrijdingskansen van het afslagpunt. Het kan voorkomen dat het hanteren van een andere waarde binnen deze bandbreedte als faalkansschatting net tot een ander veiligheidsoordeel leidt. In dat geval kan het wenselijk zijn om de faalkansschatting van deze raai(en) nauwkeuriger te bepalen door een extra iteratieslag of interpolatie (zoals reeds toegelicht in Stap 2 in §4.5.5). Zo wordt vastgesteld of de faalkans op trajectniveau terecht net in de betreffende veiligheids categorie uitkomt, of dat de veiligheid eigenlijk groter is (hogere veiligheids categorie met kleinere overstromingskans). Dit is als 'Optie 2' weergegeven in Figuur 4-11.



Figuur 4-11 Schematisch overzicht van een situatie waarin extra verfijning van de faalkansschatting wenselijk kan zijn in een situatie waarin faalpad duinafslag dominant is. NB: de verschuiving tussen de doelkans (raai) en de overstromingskans (traject) komt door het meenemen van het lengte-effect.

#### 4.8.1.2 Aanscherpen hydraulische belasting (golfperiode)

Mogelijk kan de rekenwaarde voor de golfperiode die gebruikt wordt in de duinafslagberekeningen naar beneden bijgesteld worden voor zware stormcondities. Een lagere golfperiode kan resulteren in minder afslag, een kleinere faalkans voor faalpad duinafslag en daarmee mogelijk een gunstiger aangescherpt veiligheidsoordeel.

De aanleiding hiervoor is beschreven in de technische leidraad (Arcadis en Deltares, 2023c): het lijkt erop dat de aan de verwachtingswaarde van de golfhoogte gekoppelde golfperiode op sommige (noordelijke) locaties relatief groot is tijdens extreme omstandigheden. Dit geldt dus ook voor de rekenwaarde van de golfperiode die in het semi-probabilistische model wordt gehanteerd. De huidige waarden resulteren in onrealistisch geachte lage waarden voor de steilheid van de golven tijdens deze extreme omstandigheden. Mogelijk is de relatie tussen de golfhoogte en golfperiode onder extreme omstandigheden in praktijk minder sterk dan in het WBI2017 werd aangenomen (Arcadis en Deltares, 2023b).

Om de golfperiode voor extreme condities naar beneden bij te stellen, zal de waterkeringbeheerder nader (data)onderzoek moeten uitvoeren om dit goed te onderbouwen. Hierbij kan advies gevraagd worden aan het werkatelier en golvenexperts. Als hieruit blijkt dat een kleinere golfperiode inderdaad realistisch is voor het beschouwde traject, kunnen vervolgens aanvullende duinafslagberekeningen

uitgevoerd worden met de aangescherpte rekenwaarden, al dan niet rekening houdend met een onzekerheidsband. Hierin ligt de focus op de locaties die bepalend zijn voor het veiligheidsoordeel, om zo het oordeel aan te scherpen.

#### 4.8.1.3 *Probabilistisch i.p.v. semi-probabilistisch rekenen*

Het semi-probabilistische model is ontwikkeld om de gebruiker in staat te stellen om een op een eenvoudige wijze de positie van het afslagpunt voor een bepaalde doelkans (overschrijdingskans van de positie van dit afslagpunt) te kwantificeren. In plaats van het uitvoeren van een grote hoeveelheid XBeach-berekeningen binnen een probabilistische schil voldoet nu een enkele XBeach-berekening met een specifieke invoer. De voor de modelinvoer te gebruiken rekenwaarden zijn zodanig afgeleid dat het resultaat van de enkele som zo goed mogelijk het per definitie meer correcte resultaat van een probabilistische exercitie benadert.

Vergelijking tussen de semi-probabilistische en probabilistische uitkomsten laat zien dat er gemiddeld genomen een vergelijkbaar resultaat wordt gevonden (Arcadis en Deltares, 2023b). Hierbij is wel sprake van een zekere spreiding, waardoor het semi-probabilistische model in sommige gevallen de correcte probabilistische waarden enigszins overschat of juist onderschat.

Het alsnog uitvoeren van een volledig probabilistische uitwerking kan worden overwogen voor de situaties waarbij het semi-probabilistische model gemiddeld genomen een te ver landwaarts gelegen afslagpunt als resultaat geeft. Dit is met name het geval in situaties met hoge voorlanden of stranden. Hierbij kan gefocust worden op de locaties die bepalend zijn voor het veiligheidsoordeel op basis van de semi-probabilistische uitwerking. In deze situaties kan het resultaat van een volledig probabilistische uitwerking leiden tot minder duinafslag, een kleinere faalkans voor faalpad duinafslag en daarmee mogelijk een gunstiger aangescherpt veiligheidsoordeel.

## 4.9 Optioneel: Reductie van aantal duinafslagberekeningen

In Stap 1b worden alle relevante profielen in ruimte en tijd geselecteerd waarvoor vervolgens in Stap 2 een faalkansschatting wordt bepaald. Het iteratief vaststellen van de faalkansschatting voor elke raai op basis van ieder jaar in de analyseperiode vergt veel duinafslagberekeningen en daarmee relatief veel rekentijd.

Het is van het doel van de faalkansanalyse afhankelijk of het nodig is om al deze berekeningen uit te voeren. Met oog op het beoordelen van een zandige waterkering met het BOI-basisinstrumentarium is strikt genomen alleen de faalkansschatting van de 'zwakste' raai in het maatgevend jaar per vak belangrijk, aangezien die de faalkansschatting op vakniveau en uiteindelijk trajectniveau bepaalt. Voor bijvoorbeeld het beheer van de waterkering kan het echter wel wenselijk zijn om voor alle raaien nauwkeurig de faalkansschatting te bepalen.

Afhankelijk van het detailniveau waarop de waterkeringbeheerder inzicht wil in de faalkans binnen elk vak, kan de beheerder ervoor kiezen om een deel van de profielen in ruimte en tijd uit de in Stap 1b gemaakte basisselectie buiten beschouwing te laten in de verdere analyses. Dit betreft locaties en jaren waarvan duidelijk is dat deze geen invloed zullen hebben op de faalkansschatting van het bijbehorende vak. Dit betreft een '**van-grof-naar-fijn**' aanpak.



Als de waterkeringbeheerder besluit om een deel van de locaties en jaren buiten beschouwing te laten, is de beheerder verantwoordelijk om deze keuze onderbouwd te maken op basis van onder andere gebiedskennis en in lijn met het verhaal van de kering. Zo voorkomt de beheerder dat de zwakste locatie gemist wordt of de faalkans van deze locatie onvoldoende nauwkeurig wordt berekend.

Het reduceren van het aantal berekeningen kan op twee momenten in het stappenplan worden uitgevoerd:

1. Direct na Stap 1b, dus voor de duinafslagberekeningen gestart worden;
2. Tijdens het iteratief proces in Stap 2 op basis van de reeds uitgevoerde duinafslagberekeningen aan het eind van een iteratiestap.

Als handreiking beschrijft Bijlage 4 voor beide opties voorbeelden van methoden om een selectie in de profielen te maken. De waterkeringbeheerder kan dit als basis gebruiken om een strategie op te stellen als reductie van het aantal berekeningen wenselijk is.

#### 4.10 Koppeling met categoriegrenzen voor beoordeling duinentraject

Het hierboven beschreven stappenplan is toepasbaar op een zandige waterkering waar mogelijk ook andere faalmechanismen relevant of andere faalpaden dominant zijn voor de beoordeling van het volledige traject. Echter, in veel gevallen bestaat het traject volledig uit duinen en zal *alleen* het faalpad duinafslag binnen het faalmechanisme duinafslag van belang zijn.

Voor een dergelijk duinentraject kan de waterkeringbeheerder indien gewenst besluiten om – onder de aanname van (deels) afhankelijke vakken – een directe koppeling te leggen tussen de categoriegrenzen op trajectniveau en de door te rekenen doelkansen voor een raai. De aanpak hiervoor is hetzelfde als beschreven in de hoofdtekst van het stappenplan, behalve dat in Stap 1c de categoriegrenzen gebruikt worden om de door te rekenen overschrijdingskansen van het afslagpunt per raai te bepalen. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het lengte-effect: deel de faalkans horend bij elke categoriegrens door de lengte-effectfactor tussen vakken (veelal 1,2: zie §3.5) en tussen raaien in een vak (1,0: zie §3.5), en houd deze kansen aan als door te rekenen doelkansen. Een categoriegrens van bijvoorbeeld 1:10.000 per jaar op trajectniveau komt dan dus overeen met een doelkans van  $1:10.000/1.2/1.0 = 1:12.000$  per jaar op raainiveau. Op deze manier zijn de resultaten van de zwakste raai direct te koppelen aan de uiteindelijke beoordeling op trajectniveau.




---

#### **Kader 10. Koppeling met categoriegrenzen in het BOI vs. WBI2017**

*De hierboven beschreven aanpak om de door te rekenen overschrijdingskansen van het afslagpunt op doorsnedeniveau te koppelen aan de categoriegrenzen op trajectniveau voor een duinentraject lijkt op de aanpak met het WBI2017. Met het WBI2017 werd op basis van de trajectnorm een eis op doorsnedeniveau bepaald (zie Kader 2). De onderliggende methodiek is echter anders. Zo wordt er binnen de methodiek met het BOI geen rekening gehouden met een faalkansbegroting en is er geen sprake van een 'toets op doorsnedeniveau'. Met het BOI worden tenslotte meer(dere) kansen doorgerekend om de faalkans zo goed mogelijk in te schatten, in plaats van hoofdzakelijk een toetsing of de kering wel of niet faalt bij de ondergrens of signaleringswaarde zoals met het WBI2017.*

---

## 5 Locatie-specifieke aanvullende analyses

Niet voor alle duintrajecten langs de Nederlandse kust kan zondermeer een faalkansanalyse worden uitgevoerd op basis van het reguliere stappenplan voor het faalpad duinafslag (zoals beschreven in Hoofdstuk 4). Voor complexere situaties zijn veelal aanvullende analyses nodig om tot een betrouwbaar veiligheidsoordeel te komen. Het toepassingsbereik van het stappenplan is nader toegelicht in §5.1. In §5.2 en §5.3 is voor enkele situaties op hoofdlijnen aangegeven welke aanvullende analyses uitgevoerd kunnen worden.

### 5.1 Situaties binnen en buiten regulier toepassingsbereik van het stappenplan

Zoals reeds is toegelicht in §4.1, is de faalkansanalyse voor het faalpad duinafslag op basis van Stap 1 tot en met Stap 3 in het stappenplan met behulp van het duinerosiemodel XBeach (het BOI-basisinstrumentarium) toepasbaar op **volledig zandige delen van de waterkering** (lees: *duinprofielen*) langs min of meer rechte en kustlangs uniforme delen van de Nederlandse kust waar geen achterloopsheid optreedt onder normatieve condities. Binnen dit toepassingsbereik kan het gehanteerde duinafslagmodel XBeach voor een profiel tot een realistische inschatting van duinafslag komen.

De methodiek in het stappenplan om de faalkansschatting van een vak te bepalen voor duinafslag betreft een raai benadering en is toepasbaar voor een grote variëteit aan profielvormen. Zo kunnen bijvoorbeeld profielen met een brede en hoge strandvlakte, een diepe getijdegeul, lage duinen of meerdere duinregels doorgerekend worden. Het proces-gebaseerde model XBeach is in deze situaties in staat om duinafslag op correcte wijze te berekenen, omdat het model de relevante fysische processen (waterstandsverloop, golfhoogteverloop, etc.) in de kustnabije zone simuleert. De huidige methodiek is daarmee breder toepasbaar en heeft een grotere nauwkeurigheid dan het empirische model Duros+, zoals nader is toegelicht in Kader 11.



#### **Kader 11. Toepassingsbereik XBeach in BOI vs. Duros+ in WBI2017**

*In het BOI is de overstap gemaakt van Duros+ naar XBeach als sterktemodel. Het toepassingsbereik van de raai benadering met XBeach in het BOI is groter dan dat het geval was met Duros+ in het WBI2017. Achter het empirische model Duros+ zat de aanname dat de beschouwde kustprofielen geleidelijk oplopend zijn van diep water tot het duin, waardoor dit model slechts beperkt geschikt was voor meer complexe profielvormen met bijvoorbeeld een brede en hoge strandvlakte, een diepe getijdegeul, lage duinen of meerdere duinregels. In deze situaties is het proces-gebaseerde model XBeach veel beter in staat om duinafslag op correcte wijze te berekenen, omdat het model de relevante fysische processen simuleert.*

*Daarnaast biedt XBeach de functionaliteit om afslagberekeningen voor een gebied (2DH) in plaats van alleen per raai (1D) uit te voeren. Deze 2DH modus van XBeach is geen onderdeel van het BOI-basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen, maar is wel bruikbaar voor aanvullende analyses in meer complexe situaties waar een raai benadering niet volstaat; zie ook §5.2.*



---

*De overstap van Duros+ naar XBeach maakt het mogelijk om met één model een breed scala aan situaties door te rekenen, van eenvoudige kustlangs uniforme duinprofielen tot complexe ruimtelijk variërende kustzones met constructies.*

---

Het huidige BOI-instrumentarium voor het faalpad duinafslag is echter vanwege de raai benadering nog onvoldoende geschikt voor meer complexe (niet-uniforme) situaties die een ruimtelijke (2DH) benadering behoeven. §5.2 gaat nader in op hoe aanvullende analyses kunnen worden uitgevoerd voor ruimtelijk complexe gebieden om te komen tot een faalkansschatting voor de zandige waterkering.

Het sterktemodel XBeach biedt naast de raai benadering in het BOI-basisinstrumentarium ook de mogelijkheid om op consistente wijze met hetzelfde model, aanvullende rekenkundige analyses uit te voeren voor complexe situaties die buiten het reguliere toepassingsbereik vallen. Er is echter nog geen consistente en gevalideerde beoordelingsmethodiek en bijbehorende semi-probabilistische aanpak beschikbaar voor het uitvoeren van een faalkansanalyse met 2DH XBeach berekeningen. De ambitie is om het instrumentarium zodanig verder te ontwikkelen dat het toepassingsbereik op termijn toeneemt (zie §**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Hier is in de afregeling van de 1D-BOI-versie van het model reeds rekening mee gehouden.

Naast ruimtelijk complexe gebieden, valt ook het beoordelen van het effect van eventuele constructies of elementen in een zandige kustzone niet binnen het reguliere toepassingsbereik van het stappenplan in Hoofdstuk 4. Een belangrijke reden hiervoor is dat het faalpad in dergelijke situaties anders verloopt, en er dus aanvullende analyses nodig zijn. Ook hier geldt dat het sterktemodel XBeach in principe wel voor geschikt is om te rekenen met constructies, maar dat hier nog geen consistente en gevalideerde methodiek beschikbaar is binnen het BOI-basisinstrumentarium. §5.3 gaat nader in op aanvullende analyses voor zandige waterkeringen met constructies.

## 5.2 Ruimtelijk complexe gebieden

In gebieden met sterke ruimtelijke variatie in de hoogteligging boven of onder water moet bekeken worden of de reguliere 1D raai benadering toereikend is om tot een goede faalkansschatting te komen. In complexe kustzones zal dit veelal niet het geval zijn: ruimtelijke effecten zijn veelal moeilijk te ondervangen met een 1D raai benadering. In dergelijke gevallen zijn aanvullende analyses nodig naast, of in plaats van, de reguliere aanpak die momenteel gefaciliteerd wordt in het BOI-basisinstrumentarium.

Voorbeelden van ruimtelijk complexe gebieden zijn (1) kustzones met brede duingebieden waarin achterloopsheid kan optreden, of (2) gekromde kusten zoals bij eilandkoppen. Het verschilt per situatie welke aanpak geschikt is. Hieronder is voor beide typen complexe kustzones op hoofdlijnen aangegeven welke aanvullende analyses mogelijk zijn om te komen tot een bruikbare faalkansschatting.

### 5.2.1 Brede duingebieden

Kustgebieden met brede duingebieden die bestaan uit meerdere duinenrijen en tussenliggende duinvalleien zijn in de meeste gevallen verre van kustlangs uniform. Met name als er sprake kan zijn van achterloopsheid, bijvoorbeeld door een doorbraak van de eerste duinenrij, volstaat een raai benadering niet om te komen tot een

betrouwbare faalkansschatting. De faalkans van de ene raai is in zo'n geval afhankelijk van wat er in een andere raai gebeurt.

In dergelijke situaties is dus een bredere gebiedsbeschouwing nodig.

Met aanvullende analyses moeten (minimaal) twee aspecten worden bekeken. Allereerst is een inschatting nodig van de lokale belasting en de hoeveelheid duinafslag langs de duinenrijen die verder landinwaarts liggen. Afhankelijk van de situatie kan dit een kwalitatieve (beschouwende) of een kwantitatieve (rekenkundige) analyse zijn.

Daarnaast is een zogenaamde continuïteitscheck nodig. Er moet daarbij worden gecontroleerd of er – in langsricting – ná optreden van duinafslag nog een doorlopende duinenrij aanwezig waarbinnen het grensprofiel (langs de gehele strekking) inpasbaar is. Daartoe kan gebruik worden gemaakt van hoogtekaarten van het te beschouwen gebied in combinatie met GIS-analyses. Het actuele maaiveld kan zo worden vergeleken met de benodigde kruinhoogte van het grensprofiel. Ook kan zo worden gecontroleerd of de benodigde breedte van het grensprofiel hier aanwezig is.

Voor eventuele rekenkundige analyses in een complex breed duingebied zijn meerdere methoden te volgen. Eén van de mogelijkheden is het gebruik van XBeach in 2DH modus, waarin een gehele kustzone in één modelschematisatie wordt gevat. Met name in niet-uniforme duingebieden waarbij achterloopsheid kan optreden geeft een 2DH benadering bruikbaar inzicht in ruimtelijke variaties in zowel belasting als mate van duinafslag.

### **5.2.2 Gekromde kustzones**

Op diverse locaties langs de Nederlandse kust zijn gekromde kustzones aanwezig. Met name in het Waddengebied, in de buurt van de eilandkoppen, en langs de Zuidwestelijke Delta zijn gebieden te vinden met zeer sterke kustlijnkromming. Aangenomen wordt dat in dergelijke gebieden sprake kan zijn van extra duinafslag ten gevolge van gradiënten in het langstransport tijdens extreme stormcondities. Over de mate van extra duinafslag door kustlijnkromming is relatief weinig bekend, maar desalniettemin is het gebruikelijk om bij het beoordelen van volledig zandige (duin)waterkeringen rekening te houden met toeslagen voor dit extra zandverlies.

Bij de ontwikkeling van het BOI-basisinstrumentarium op basis van XBeach zijn, mede vanwege de beperkte kennis over dit onderwerp, vooralsnog geen nieuwe rekenmethoden ontwikkeld om kustkrommingseffecten op kwantitatieve (en procesgebaseerde wijze) in rekening brengen. Dit komt omdat de huidige raabenadering (1D) per definitie niet geschikt is om kustlangse gradiënten in het langstransport door kustkromming (2D) fysisch correct in rekening te brengen en dat hiervoor beter 2DH duinafslagsimulaties kunnen worden uitgevoerd. 2DH berekeningen met XBeach worden op dit moment nog niet gefaciliteerd binnen het BOI-basisinstrumentarium, maar zijn wel voorzien in de lange termijn ontwikkelingsambitie (zie Hoofdstuk 6). Het is afhankelijk van de situatie of een complexe 2DH modelbenadering wenselijk is om te komen tot een faalkansschatting: dit is niet altijd nodig, bijvoorbeeld als de faalkansschatting naar verwachting niet sterk wijzigt.

In de voorgaande versies van het duineninstrumentarium waren enkele pragmatische rekenregels opgenomen om een extra volumetoeslag voor kustkrommingseffecten in rekening te kunnen brengen bij een duinafslagresultaat zoals beschreven in het TRDA2006 (ENW, 2007). Deze oude, sterk aan Duros+ gerelateerde methode met behulp van een extra toeslag op de afslag die in het WBI2017 toegepast werd, kan – indien gewenst – toegepast worden als nabewerkingslag bovenop het in Hoofdstuk 4 beschreven stappenplan voor het BOI. Dit wordt echter niet aanbevolen. Als de waterkeringbeheerder toch deze toeslag toe wil passen, wordt aangeraden om

in dat geval een vereenvoudigde versie toe te passen. Een nadere toelichting op mogelijkheden om de effecten van kustlijnkromming op duinafslag mee te nemen en deze vereenvoudigde tussenoplossing is opgenomen in Bijlage 5.

Het is in MorphAn mogelijk om een 'gebruikerstoetslag' op het XBeach-afslagprofiel toe te passen<sup>24</sup>, wat in dit geval gebruikt kan worden als een toetslag gerelateerd aan kustlijnkromming. De gebruiker kan de door XBeach berekende hoeveelheid afslag met een zelf te definiëren volumehoeveelheid vergroten of het berekende afslagpunt over een zelf te definiëren afstand in landwaartse richting verschuiven. Hiermee kan het geschatte effect van de kustlijnkromming op de positie van het landwaartse talud van het grensprofiel inzichtelijk worden gemaakt en zo worden meegenomen in het zogenaamde tijdsanalysesdiagram en de kwantificering van de faalkans.

Deze optionele nabewerking kan worden gebruikt voor andere doeleinden zoals het in rekening brengen van het effect van niet-waterkerende objecten (NWO's) of aansluitingsconstructies zoals nader toegelicht in de volgende paragraaf.

### 5.3 Aanwezigheid harde constructies

Op diverse locaties langs de zandige Nederlandse kust zijn ook harde elementen of constructies aanwezig. Dit kan variëren van kleinschalige objecten in of op een volledig zandige (duin)waterkering tot volledig hybride waterkeringen waarin harde en zachte elementen zijn verwerkt. Op overgangen tussen 'hard' en 'zacht' treedt over het algemeen meer erosie of duinafslag op. Dit geldt voor overgangen in zowel dwarsrichting als kustlangse richting. Dergelijke hard-zacht-overgangen behoeven extra aandacht bij het uitvoeren van een faalkansanalyse.

Hieronder zijn een aantal verschillende typen harde elementen beschouwd die in duintrajecten voorkomen: NWO's in duinen, aansluitingsconstructies en hybride waterkeringen. Bij elk type is toegelicht wat de belangrijkste aandachtspunten zijn in relatie tot een faalkansanalyse en welke aanvullende analysemethoden mogelijk zijn om de invloed van deze constructies te duiden.

Daar waar gewenst bestaat de mogelijkheid om de met de aanwezigheid van een NWO of aansluitingsconstructie samenhangende extra afslag via de in §Fout! V  
**erwijzingsbron niet gevonden.** beschreven 'gebruikerstoetslag' in rekening te brengen en deze zo te vertalen naar een effect op de faalkans van de beschouwde raai.

#### 5.3.1 NWO's in duinen

Niet-waterkerende objecten (NWO's) kunnen lokaal resulteren in extra duinafslag. Enerzijds kan dit komen doordat een deels ingegraven object 'faalt' (instort, wegspoelt, etc.) tijdens stormcondities, waardoor er ter plaatse van het object meer afslag optreedt; het ontgravingseffect. Anderzijds kan een stabiel object juist zorgen voor meer afslag rondom het object; het onthoudingseffect. Meer informatie hierover is te vinden in de schematiseringshandleiding en het achtergrondrapport 'Handreiking NWO's in duinen' (Deltares en Arcadis, 2014a; Deltares en Arcadis, 2014b).

Voorbeelden van NWO's die potentieel invloed hebben op de hoeveelheid duinafslag zijn bunkers, gebouwen met kelders en parkeergarages. Typen NWO's waarvan wordt aangenomen dat ze geen negatief effect hebben op duinafslag zijn stelconplaten of ander losverband wegdek, straatmeubilair, kabels en leidingen en vegetatie. Ook van strandpaviljoens (zonder kelder) die tijdens extreme stormen 'in kleine stukken

<sup>24</sup> De implementatie van de 'gebruikerstoetslag' in MorphAn is voorzien voor de MorphAn-release medio 2023.

uiteenvallen' wordt aangenomen dat deze geen negatieve invloed hebben op het afslagproces.

Om het effect van potentieel relevante NWO's – binnen de begrenzingen van de waterkering – nader te analyseren kan de methodiek uit de 'Handreiking NWO's in duinen' gevolgd worden. Deze aanpak is deels uitgewerkt vanuit de Duros+ benadering conform het WBI2017, maar de achterliggende principes zijn ook toe te passen in combinatie met de huidige XBeach benadering in het BOI.

Een alternatieve aanpak is om de aanwezigheid van (ingegraven) NWO's te schematiseren in XBeach. Bij objecten die kunnen bezwijken tijdens een storm kunnen (1D of 2DH) berekeningen worden uitgevoerd waarbij het object als 'gat' wordt geschematiseerd. Bij stabiele objecten die niet bezwijken kunnen 2DH XBeach berekeningen worden uitgevoerd waarin het object als constructie is geschematiseerd. *Er zijn echter nog weinig tot geen validatiecases voor dit type modelberekeningen, daarom is verdere ontwikkeling en onderbouwing van deze aanpak onderdeel van het ontwikkelplan voor het BOI-basisinstrumentarium; zie §Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..*

### 5.3.2 Aansluitingsconstructies

Overgangen (in langsrichting) tussen 'harde' en 'zachte' waterkeringstypes kunnen ook resulteren in lokale extra afslag. De mate van extra afslag is vooral afhankelijk van de mate waarin de aansluitingsconstructie in de afslagzone ligt en daarmee de lokale profielontwikkeling beïnvloedt.

In WL | Waterloopkundig Laboratorium (1995) zijn rekenregels beschreven waarmee het effect van een hard-zacht-overgang (empirisch) ingeschat kan worden. Een andere mogelijkheid is om het gehele overgangsgebied door te rekenen met XBeach 2DH; waarbij de aansluitingsconstructie als hard object wordt geschematiseerd. *Er zijn echter nog weinig tot geen validatiecases voor dit type modelberekeningen, daarom is verdere ontwikkeling en onderbouwing van deze aanpak onderdeel van het ontwikkelplan voor het BOI-basisinstrumentarium; zie §Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..*

### 5.3.3 Hybride waterkeringen

Op diverse locaties langs de Nederlandse kust komen zogenaamde hybride waterkeringen voor. Dit zijn waterkeringen die deels zandig zijn. Voorbeelden hiervan zijn de dijk-in-duin-constructies in diverse badplaatsen (Scheveningen, Katwijk, Noordwijk). Dit zijn zandige waterkeringen, maar door de aanwezigheid van harde waterkerende constructies zijn deze waterkeringen niet als reguliere (volledig) zandige waterkeringen te beoordelen.

Het belangrijkste verschil tussen een volledig zandige (duin)waterkering en een deels zandige, hybride waterkering is dat de vervolgmecanismen na duinafslag niet gelijk zijn. In het laatste geval speelt golfoverslag en bekleding een prominentere rol in het faalpad. De vervolgmecanismen in het faalpad (na optreden van het initieel mechanisme duinafslag) moeten bij een hybride waterkering daarom op een andere wijze worden beschouwd dan bij het faalpad voor een volledig zandige waterkering.

Het beoordelen van hybride waterkeringen is (net als in de voorgaande versies van het beoordelingsinstrumentarium voor duinen) nog niet gefaciliteerd in het huidige BOI-basisinstrumentarium. Er is echter wel de ambitie uitgesproken om het instrumentarium op dit onderdeel door te ontwikkelen (zie Hoofdstuk 6). De overstap

van Duros+ in het WBI2017 naar XBeach als sterktemodel voor duinafslag in het BOI is mede doorgevoerd zodat op termijn ook dit type waterkeringen kan worden beoordeeld met een vergelijkbare rekenmethodiek als voor duinwaterkeringen. Hiervoor moet echter eerst een robuuste nieuwe beoordelings- en ontwerpmethodiek worden ontwikkeld die passend is bij hybride waterkeringen.

Tot die tijd is het advies om de oorspronkelijke ontwerpmethodieken te gebruiken voor het beoordelen van hybride keringen (dijk-in-duin e.d.). Deze aanpak bestaat in de meeste gevallen uit een combinatie van een duinafslagberekening, een golfoverslagberekening (met bijvoorbeeld PC-Overslag) en eventueel berekeningen in relatie tot de bekleding en stabiliteit van de constructie.

## 6 Ambities en doorontwikkeling BOI Zandige Waterkeringen

De lange termijn ambitie voor zandige waterkeringen is om een gedragen en consistent instrumentarium te ontwikkelen waarmee het mogelijk is om voor alle zandige waterkeringen langs de Nederlandse kust én langs de grote wateren een nauwkeurige inschatting te kunnen maken van de overstromingskans per normtraject. Het instrumentarium moet daarmee nadrukkelijk ook beter toepasbaar worden in complexe kustzones met sterke kustkromming, brede duingebieden en de aanwezigheid van constructies. Ook moet het instrumentarium niet alleen het beoordelingsproces ondersteunen, maar ook op consistente wijze bruikbaar zijn voor het ontwerp en het beheer en onderhoud van zandige en hybride waterkeringen.

De ambities zijn verdeeld over een gefaseerd **ontwikkelingstraject 'BOI Zandige Waterkeringen'**, waarbij een viertal ambitieniveaus is gedefinieerd om te komen tot een volledig vernieuwd instrumentarium voor zandige waterkeringen, namelijk:

- **Ambitieniveau 1**  
Ontwikkeling van vernieuwd instrumentarium voor duinwaterkeringen
- **Ambitieniveau 2**  
Verbreding toepasbaarheid instrumentarium: 2DH toepassingen voor duinwaterkeringen
- **Ambitieniveau 3**  
Verbreding toepasbaarheid instrumentarium: complexe zandige waterkeringen
- **Ambitieniveau 4**  
Volledig probabilistische faalkansbenadering voor zandige waterkeringen

Het huidige BOI-basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen – waaronder de voorliggende handleiding - is het resultaat van het uitwerken van **ambitieniveau 1** in de periode 2020–2023. In deze periode is de overstap gemaakt van het empirische 1D-model Duros+ naar het proces-gebaseerde morfologische model XBeach om de mate van duinafslag te berekenen ten behoeve van een faalkansanalyse voor zandige waterkeringen. De beoordelingsmethodiek is hierop aangepast, alsmede het semi-probabilistische rekenvoorschrift. Hierbij is aangesloten op het bredere ontwikkelingsplan BOI '20–'23. De focus lag hierbij op het ontwikkelen van een solide basisinstrument dat geschikt is voor een raaienadering voor duinen langs de Noordzeekust. Het resulterende stappenplan is gepresenteerd in Hoofdstuk 4 van deze handleiding.

De invulling en volgorde van de **ambitieniveaus 2, 3 en 4** is afhankelijk van de staat van de kennis en de behoefte van waterkeringbeheerders. In ambitieniveau 2 en 3 ligt de focus op het verder verbreden van het toepassingsbereik van het instrumentarium. Enerzijds betreft dit een uitbreiding van het instrumentarium voor meer complexe ruimtelijke 2DH toepassingen voor duinwaterkeringen in **ambitieniveau 2** (o.a. kustlijnkromming, kustlangse bodemvariaties, brede duingebieden met achterloopsheid). Een ruimtelijke benadering biedt ook mogelijkheden om hele kustvakken of normtrajecten in zijn geheel door te rekenen in plaats van per raai. Anderzijds is een uitbreiding voor meer complexe zandige waterkeringen voorzien in **ambitieniveau 3** (o.a. profielen met harde elementen, hybride waterkeringen en zandige profielen in een meeromgeving).

**Ambitieniveau 4** betreft een overstap van de huidige semi-probabilistische aanpak naar een volledig probabilistische benadering. Dit vereist wel een flinke sprong voorwaarts in rekentechnieken om de rekentijd van (grote hoeveelheden) duinafslagberekeningen werkbaar te houden.

De bovengenoemde ambitieniveaus voor de doorontwikkeling van het instrumentarium zijn *uitgesproken ambities*: het staat niet vast of, en zo ja in welke volgorde, de volgende fasen daadwerkelijk uitgevoerd worden. Voor een overzicht met lopende en geplande ontwikkelingsprojecten binnen het BOI-programma wordt verwezen naar de **releasekalender van het BOI**.

Daarnaast zijn kennisleemtes die effect kunnen hebben op de uitkomst van een overstromingskansanalyse voor zandige waterkeringen samengevat in de **Kennisagenda Zandige Waterkeringen** (Deltares en Arcadis, 2022b). Deze is opgesteld ten behoeve van het programma 'Kennis voor Keringen'. Dit betreft zowel kennisleemtes en -vragen die geïdentificeerd zijn tijdens het uitwerken van ambitieniveau 1, als kennisleemtes en -vragen die nader onderzocht moeten worden om de volgende ambitieniveaus uit te kunnen werken. Deze kennisagenda draagt daarmee bij aan het coördineren en programmeren van (toekomstig) onderzoek op het gebied van zandige waterkeringen en het verbeteren van het BOI-basis-instrumentarium.

Zodra er belangrijke nieuwe kennis, inzichten of methodes beschikbaar komen die invloed hebben op het uitvoeren van een overstromingskansanalyse voor zandige waterkeringen, kan besloten worden tot het aanpassen van het BOI-basisinstrumentarium voor zandige waterkeringen. Deze update betreft dan ook de voorliggende handleiding.

## Literatuur

- Arcadis en Deltares. (2022). *Validation of dune erosion model XBeach - Development of 'BOI Sandy Coasts'*. Auteurs: Coumou, L., Van Santen, R., Van der Baan, J., McCall, R., De Bakker, A., Quataert, E. en De Goede, R. Definitieve versie 3.0, 21 maart 2022. Achtergrondrapport bij het BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023a). *Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium. Definitieve versie 2.1, 26 januari 2023*. Auteurs: Steetzel, H., Van Santen, R., Coumou, L., McCall, R., De Goede, R., De Bakker, A. Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023b). *Semi-probabilistic model for XBeach - Definition of a semi-probabilistic method for 'BOI Sandy Flood Defences'*. Auteurs: Steetzel, H., Lenstra, K., Velhorst, R. en Van der Baan, J. Definitieve versie 3.1, 3 januari 2023. Achtergrondrapport basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Arcadis en Deltares. (2023c). *Technische Leidraad Katern Zandige Waterkeringen. Definitieve versie 1.0, 7 februari 2023. Definitieve versie vanaf juli 2023 online te raadplegen via tl.iplo.nl. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.*
- De Winter, R., & Ruessink, B. (2017). Sensitivity analysis of climate change impacts on dune erosion: case study for the Dutch Holland Coast. *Climatic Change*, (pp. 685-701).
- Deltares. (2016). *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WTI*. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL. Kenmerk 1220078-000-GEO-0010-gbh, Versie 3, definitief.
- Deltares. (2021). *Boundary condition guidelines for XBeach simulations - methodology for the representation of infragravity waves in varying water depth and wave conditions*. Auteurs: De Ridder, M., De Bakker, A., McCall, R. en Van Dongeren, A. Kenmerk 11205758-029-GEO-0003. Definitieve versie 0.2, 19 maart 2021. Achtergrondrapport bij het BOI.
- Deltares. (2022a). *Memo: Korte rekenkundige vergelijking rekenkernels DUROS+ en XBeach*. Auteur: McCall, R. Kenmerk 11206818-018-GEO-0003. Definitieve versie 1.0, 23 maart 2022. Achtergronddocument bij het BOI.
- Deltares. (2022b). *Technical Design Hydra-Ring 22.1.1. - Probabilistic toolbox for the BOI*. Definitieve versie v7.0, 23 november 2022. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI.
- Deltares. (2022c). *Gebruikershandleiding Riskeer - Software voor de veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen. Versie 22.1.2., 5 december 2022. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI.*
- Deltares. (2022d). *Gebruikershandleiding MorphAn - Analysetool voor zandige kusten. Versie 22.1.1., 19 december 2022.*
- Deltares en Arcadis. (2014a). *Handreiking NWO's in Duinen 2014 - Achtergrondrapport*. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL. Kenmerk 1208163-001-HYE-0012. Definitief.
- Deltares en Arcadis. (2014b). *Handreiking NWO's in Duinen 2014 - Schematiseringshandleiding*. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL. Kenmerk 1208163-001-HYE-0009. Definitief.
- Deltares en Arcadis. (2022a). *BOI Standaard instellingen - Kalibratie van de XBeach model parameters*. Auteurs: McCall, R., De Bakker, A., Quataert, E., De Goede, R., De Vet, L., De Ridder, M., Van Der Lugt, M., Roelvink, D., Van Santen, R., Steetzel, H en Coumou, L. Kenmerk: 11206818-018-GEO-0006.



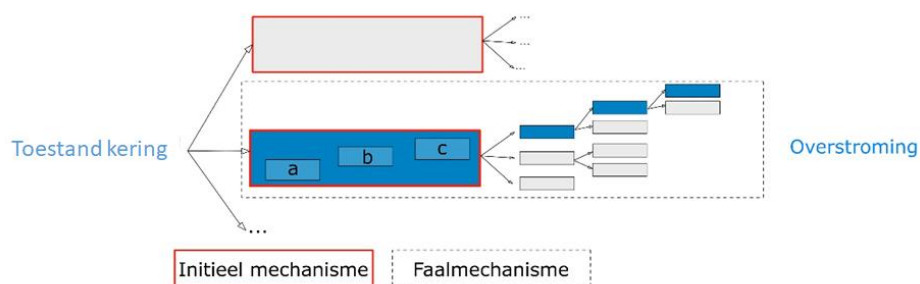
- Definitieve versie 1.0, 3 maart 2022. Achtergrondrapport bij het BOI. Gepubliceerd door Rijkswaterstaat.
- Deltares en Arcadis. (2022b). *Kennisagenda Zandige Waterkeringen - Inventarisatie van kennisleemtes*. Auteurs: De Bakker, A., McCall, R., Steetzel, H., Coumou, L. Conceptversie 0.1, 21 december 2022. Kenmerk 11208057-048-GEO-0002. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL.
- Den Heijer, C. (2013). *The role of bathymetry, wave obliquity and coastal curvature in dune erosion prediction*. PhD thesis; Deltares, Delft University of Technology.
- ENW. (2007). *Technisch Rapport Duinafslag - Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006 (TRDA2006)*.
- HKV. (2015). *Afleiden lengtefactoren (N-waarden) golfoverslag en duinafslag. Memo PR3085-10, juni 2015*.
- Hoonhout, B. (2009). *Dune erosion along curved coastlines - The influence of coastal curvatures and oblique wave attack on the probability of failure of dunes along the Dutch coast*. MSc thesis Technical University of Delft.
- Kohsiek, L. (1984). *De korrelgrootte karakteristiek van de zeereep (stuifdijk) langs de Nederlandse kust*. KWR-rapport KWR 2010.048.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Schematiseringshandleiding duinafslag WBI 2017*. Definitieve versie 2.0.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022). *Omgevingsregeling inclusief bijlage XXXIIA (Procedure beoordeling primaire waterkeringen) en XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen)*. Onderdeel van procesinstrumentarium BOI.
- Rijkswaterstaat. (2022a). *Handleiding Overstromingskansanalyse*. Conceptversie 0.9, december 2022. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI.
- Rijkswaterstaat. (2022b). *Memo: Uitvoer HR Zandige Waterkeringen*. Auteurs: Pluis, S. en Van Kuik, N. Definitieve versie, 30 november 2022. Achtergronddocument bij het BOI.
- Rijkswaterstaat. (2023a). *Technische Leidraad Katern Veiligheidsanalyse*. Versie 13 januari 2023. Definitieve versie vanaf juli 2023 online te raadplegen via tl.iplo.nl. Onderdeel van basisinstrumentarium BOI.
- Rijkswaterstaat. (2023b). *Memo: Uitlevering sterkteparameters BOI Zandige Waterkeringen*. Auteur: Pluis, S. Versie 25 februari 2023. Achtergronddocument bij het BOI.
- Steetzel, H.J. (1993). *Cross-shore transport during storm surges*. PhD Thesis Technical University Delft.
- TAW. (1984). *Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering*.
- WL | Waterloopkundig Laboratorium. (1995). *Toetsing aansluitingsconstructies - advies formulering toetsingsregels*. TAW - werkgroep C.

## Symbolenlijst

$A$	Afslagvolume boven offshore stormvloedpeil (i.e. boven maximale waterstand tijdens stormpiek) [ $\text{m}^3/\text{m}^1$ ]
$c$	Golfvoortplantingssnelheid [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$c_g$	Voortplantingssnelheid golfgroep [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$d$	Waterdiepte [ $\text{m}$ ]
$D_{50}$	Mediane korrelgrootte (50% van het gewicht van het monster heeft een kleinere korrelgrootte) [ $\mu\text{m}$ of $\text{m}$ ]
$H_{m0}$	Significante golfhoogte [ $\text{m}$ ] gebaseerd op de variantie in de waterstand (zero-order spectral moment: $m_0$ ) op basis van het golfdichtheidspectrum, waarbij $H_{m0} \approx H_s$ .
$H_s$	Significante golfhoogte [ $\text{m}$ ]: de gemiddelde golfhoogte van de 1/3 <sup>e</sup> hoogste golven, waarbij $H_s \approx H_{m0}$ .
$N$	Lengte-effectfactor [-]
$n$	Golfsnelheidsratio ( $c_g/c$ ) [-]
$K$	Index t.b.v. bepaling maatgevend jaar: <i>het op-K-na-slechtste</i> jaar
$P_{afslag}$	Overschrijdingskans van het afslagpunt (=doelkans) [per jaar]
$P_f$	Faalkans [per jaar]
<b>RSP</b>	Rijksstrandpaal
$T_p$	Golfperiode bij de piek in het energiedichtheidspectrum [ $\text{s}$ ]
$x_{afslag}$	Positie van het afslagpunt [ $\text{m}$ t.o.v. RSP]
$x_{gp}$	Positie van de landzijde van het grensprofiel op NAP-niveau [ $\text{m}$ t.o.v. RSP]
$x_{nat}$	Positie van het maatgevend oplooppniveau van de lange golven [ $\text{m}$ t.o.v. RSP]
$x_{wk}$	Positie van de landzijde van de waterkering [ $\text{m}$ t.o.v. RSP]
$z_{nat}$	Maatgevend oplooppniveau van de lange golven [ $\text{m}$ t.o.v. NAP]

## Bijlage 1. Begrippenlijst

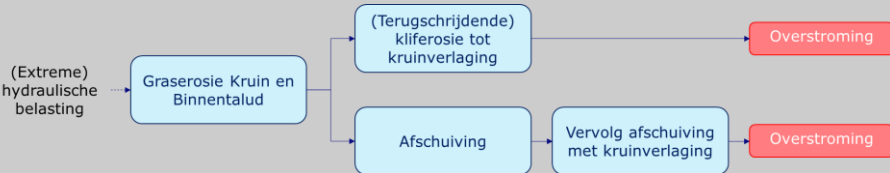
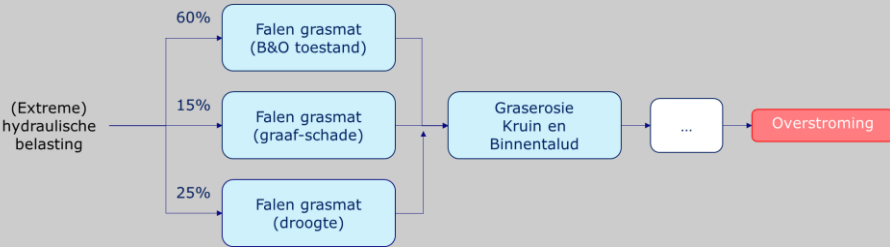
Deze begrippenlijst is hetzelfde als in bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023.



*Figuur A 1 Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen*

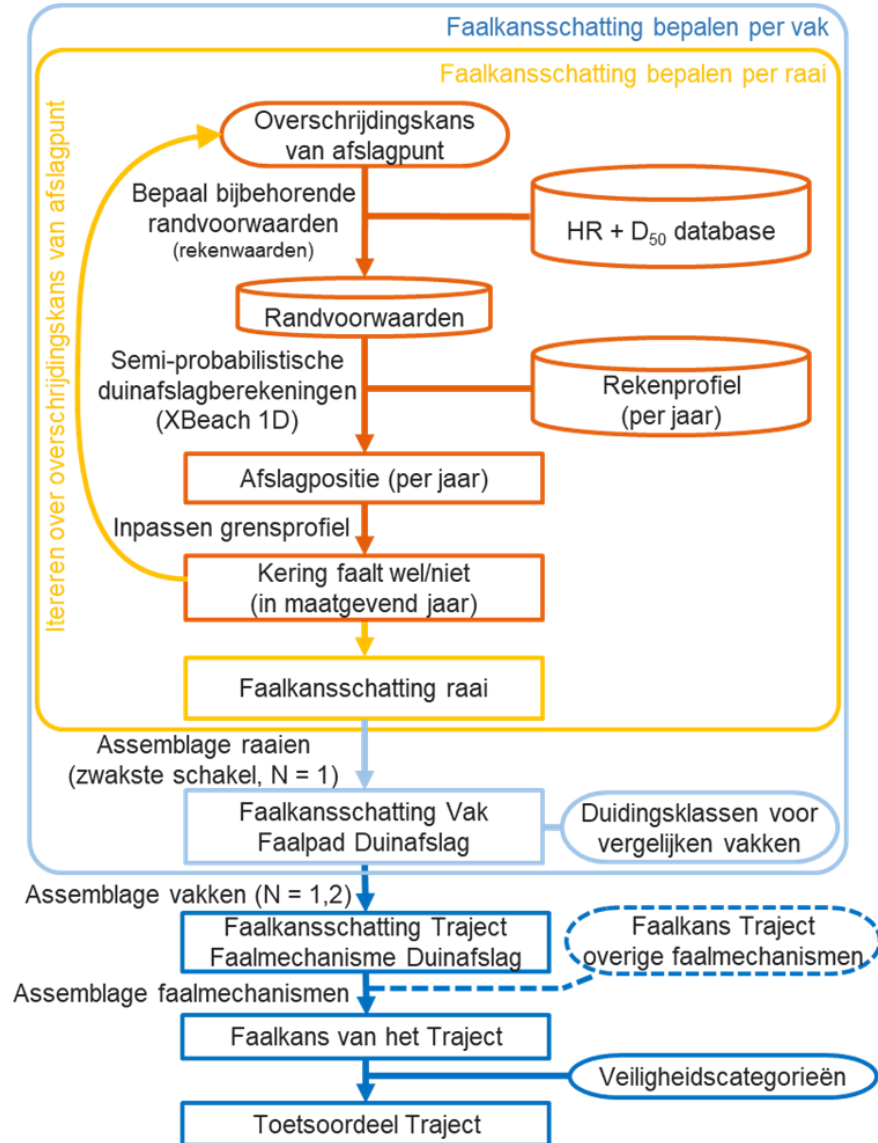
*Tabel A 1 Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie contextafhankelijk, geen absoluut begrip. Het betekent dat binnen het beoordelingsproces de term wordt gebruikt met de betreffende definitie. De definities van deze termen zijn uitgewerkt in bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling)*

Naam	Omschrijving en voorbeelden
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme. <i>Voorbeeld: gestippelde kader in Figuur A 1</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 A 1 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 A 1 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 Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur A 1 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur A 1 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 A 1 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>

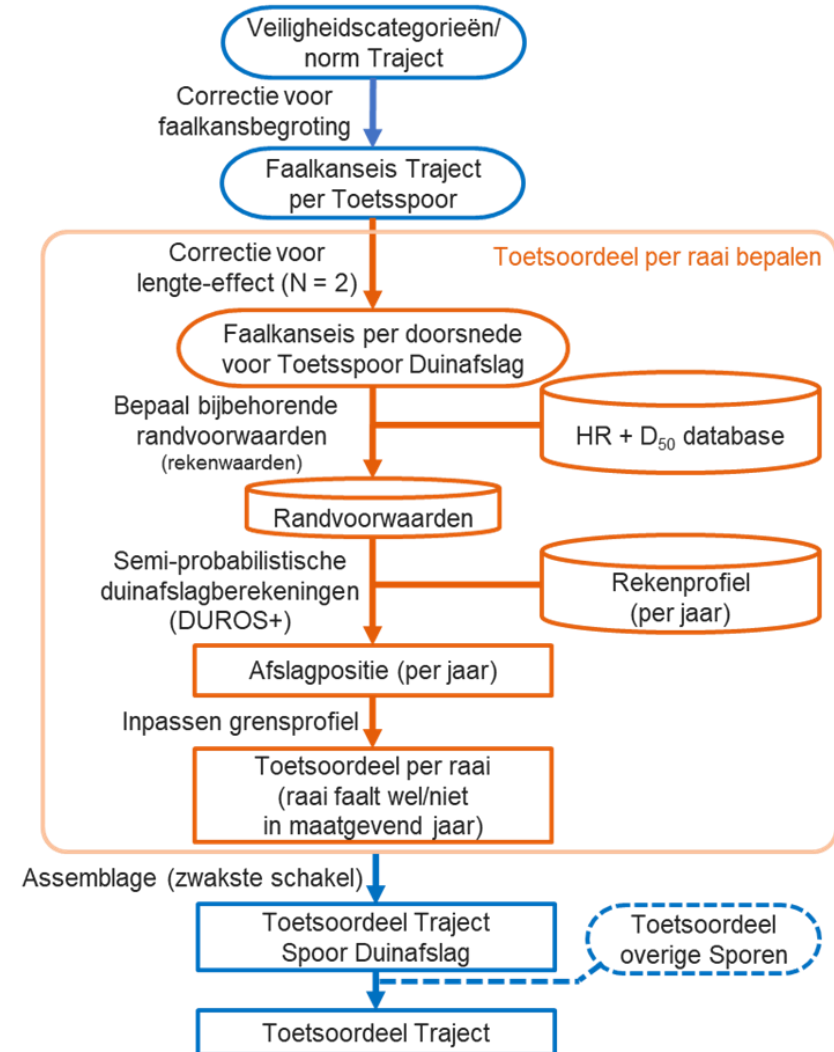
<p>Directe mechanismen</p>	<p>Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van 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> 
<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 gebruik als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</i></p> 

## Bijlage 2. Stappenplan beoordeling zandige waterkering BOI vs. WBI2017

### BOI – “bottom-up”

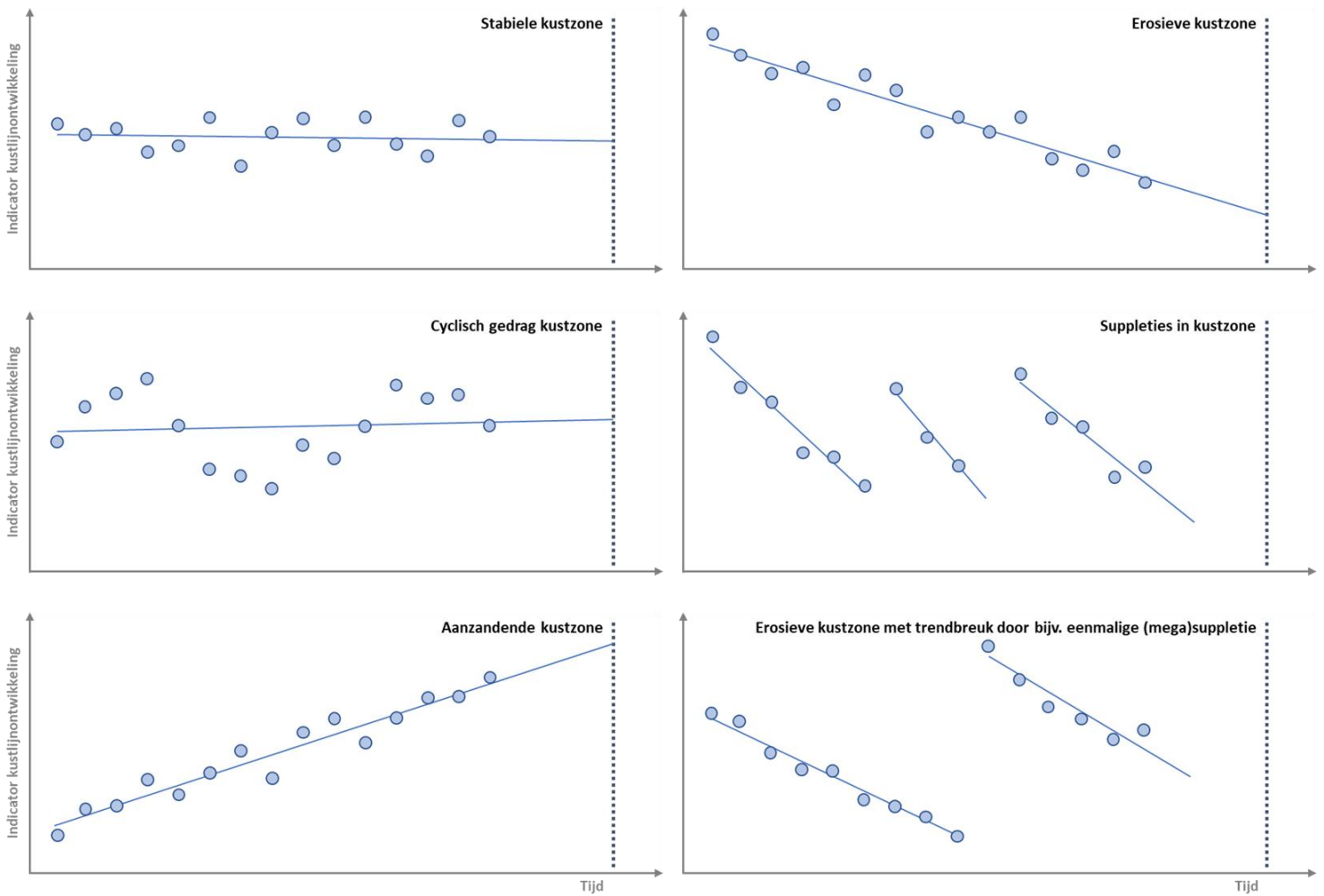


### WBI2017 – “top-down”



### Bijlage 3. Voorbeelden van lokale kustlijnontwikkelingen

De onderstaande figuren tonen schematisch verschillende mogelijke trends in de kustlijnontwikkeling, in een periode voorafgaand aan en tijdens de beoordeling van een zandige waterkering. De verticale stippellijn rechts in het figuur symboliseert het zichtjaar van de beoordeling.



## Bijlage 4. Voorbeedmethoden om aantal afslagberekeningen te reduceren

Zoals toegelicht in §4.9 van de handleiding kan de waterkeringbeheerder op twee momenten in het stappenplan voor het uitvoeren van een faalkansanalyse voor een zandige waterkering besluiten om – indien gewenst – het aantal afslagberekeningen te reduceren:

1. Direct na Stap 1b (§4.4.2 op pagina 44), dus voor de duinafslagberekeningen gestart worden;
2. Tijdens het iteratief proces in Stap 2 (§4.5 op pagina 49) op basis van de reeds uitgevoerde duinafslagberekeningen aan het eind van een iteratiestap.

Deze bijlage beschrijft voor beide opties voorbeelden van methoden om een selectie in de raaien te maken.

### **Bijlage 3.2. Optie 1: Reductie duinafslagberekeningen na Stap 1b**

In sommige gevallen kan voorafgaand aan de duinafslagberekeningen voor een deel van de profielen in ruimte en tijd al vastgesteld worden dat een deel niet bepalend zal zijn voor de uiteindelijke faalkansschatting. Aangezien op dit moment nog geen duinafslagberekeningen uitgevoerd zijn, wordt dit bepaald op basis van aanvullende analyses of kennis. Hieronder zijn twee mogelijke methoden beschreven.

#### **(A) Selectie op basis van trends in een duinveiligheidsindicator**

Een manier om te bepalen welke jaren en locaties potentieel maatgevend zijn binnen een vak, is door de variatie in ruimte en tijd van één of meer duinveiligheidsindicator(en) inzichtelijk te maken. Aangezien de faalkansschatting op voorhand nog niet bekend is, kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van beschikbare data over de ligging van de duinvoet of het aanwezige zandvolume in het duin, de vooroever en het strand. Deze parameters zijn indirect te relateren aan duinveiligheid, waarbij wordt aangenomen dat deze een voldoende bruikbare indicator zijn voor de (relatieve verschillen in) de faalkans van de raai. Het is aan de waterkeringbeheerder om de indicator te kiezen die het best past bij een specifiek vak.

Op basis van de trends in bijvoorbeeld een grafiek van deze duinveiligheidsindicator (y-as) versus de locaties (x-as) voor de verschillende jaren uit de basisselectie uit Stap 1b volgt welke jaren en locaties buiten beschouwing kunnen worden gelaten:

- Als de variatie in de ruimte een structurele trend laat zien binnen een vak, kunnen de locaties die op basis van duinveiligheidsindicatoren evident veilig zijn buiten beschouwing worden gelaten: deze zullen in ruimtelijke zin niet bepalend zijn voor de faalkansschatting op vakniveau.
- De analyseperiode kan verder aangescherpt worden op basis van het extra inzicht dat de duinveiligheidsindicator geeft in de kustlijnontwikkelingen. Enkele jaren die geen invloed hebben op het bepalen van het maatgevend jaar (zie §4.5.3) kunnen buiten beschouwing worden gelaten (per vak):
  - Als sprake is van een relatief stabiele kust of cyclisch gedrag over enkele jaren, zal een van de jaren met de laagste duinveiligheid volgens de indicator(en) waarschijnlijk maatgevend zijn. In dit geval kunnen evident 'veilige' jaren buiten beschouwing worden gelaten.

- o Als sprake is van een structureel aanzandende of erosieve kust, zal een van de laatste jaren het maatgevend jaar zijn, en kunnen eerdere jaren buiten beschouwing blijven.

Voorbeelden hiervan zijn opgenomen in Bijlage 3 van deze handleiding.

### **(B) Selectie relevante locaties o.b.v. eerste set duinafslagberekeningen**

Als op basis van de bovenstaande methode niet voldoende locaties met voldoende zekerheid uitgesloten kunnen worden van verdere analyse, en de selectie aan locaties en jaren nog te groot lijkt om de eerste set berekeningen in Stap 2 mee te starten, kan een verkennende set duinafslagberekeningen uitgevoerd worden om alsnog enkele raaien (locaties) af te laten vallen.

In feite is deze analyse hetzelfde als de methode om het aantal raailocaties te reduceren in Stap 2 zoals in Bijlage 3.3 is beschreven. Alleen in dit geval wordt een aanname gedaan voor het maatgevend jaar en worden alleen voor dit jaar duinafslagberekeningen uitgevoerd. Hiermee wordt potentieel wel een extra risico geïntroduceerd dat het daadwerkelijk maatgevend jaar van de zwakste schakel gemist wordt. Het is dan ook belangrijk nog voldoende raaien per vak over te houden (bijvoorbeeld een stuk of 10) om dit risico beperkt te houden.

Voor de set uit te voeren afslagberekeningen moet per locatie een representatief jaar en een representatieve doelkans gekozen worden om alle raaien door te rekenen. Het representatief jaar kan gebaseerd worden op een inschatting van het maatgevend jaar op basis van de analyse van de duinveiligheidsindicatoren uit methode (A) hierboven. Houd hierbij rekening met de kustlijontwikkelingen voor het bepalen van het K-na-slechtste profiel (zie §4.5.3), waarbij *K* ruimtelijk variabel gekozen kan worden. Voor de doelkans kan de 'startkans' aangehouden worden die in Stap 1c gekozen is.

Zet vervolgens – bijvoorbeeld binnen MorphAn – een set duinafslagberekeningen op voor alle raaien voor het gekozen jaar en de gekozen doelkans. Gebruik hiervoor de instructies uit §4.5.2. Bepaal op basis van de uitkomsten van deze berekeningen welke raaien buiten beschouwing kunnen worden gelaten op eenzelfde manier als in Bijlage 3.3 beschreven is om het aantal raaien te reduceren in elke iteratieslag in Stap 2.

### **Bijlage 3.3. Optie 2: Reductie van aantal berekeningen in Stap 2**

De waterkeringbeheerder kan het aantal duinafslagberekeningen ook reduceren aan het eind van een iteratieronde in Stap 2 voor de volgende iteratieronde gestart wordt. Op basis van de uitgevoerde berekeningen kan namelijk bepaald worden welke raailocaties en jaren (waarschijnlijk) niet bepalend zullen zijn voor de uiteindelijke faalkansschatting van het vak. Deze zijn met oog op het bepalen van de faalkansschatting op vak- en trajectniveau niet verder nodig. Hieronder worden enkele methoden beschreven om het aantal duinafslagberekeningen per iteratiestap te reduceren.

#### **Reductie aantal raaien binnen een vak**

De 'zwakste schakel' van de raaien bepaalt de faalkans op vakniveau. De uitkomsten van een iteratieslag geven een indruk van welke raaien mogelijk wel en welke niet de zwakste schakel in een vak zullen zijn. Voor raaien die niet bepalend zullen zijn op vakniveau hoeft de faalkansschatting in principe niet nader bepaald te worden en zijn geen aanvullende iteratieslagen nodig. Deze raaien kunnen als 'niet dominant' geclassificeerd worden.



Raaien die buiten beschouwing kunnen worden gelaten, kunnen op twee manieren worden geselecteerd:

1. *Op basis van wel/niet falen*  
Als een deel van de raaien in een vak niet faalt in het maatgevend jaar, terwijl de rest wel faalt, zullen de raaien die niet falen niet maatgevend zijn voor het vak. Deze kunnen verder buiten beschouwing worden gelaten.
2. *Op basis van de relatieve afwijking ten opzichte van faalcriterium*  
Raaien die in het maatgevend jaar ten opzichte van de andere raaien het verst van falen afzitten – of de grens van falen het minst overschreden hebben – hebben zeer waarschijnlijk een kleinere faalkans dan de andere raaien binnen hetzelfde vak. Deze raaien kunnen eventueel buiten beschouwing worden gelaten. Een voorbeeld van een duinveiligheidsindicator die hiervoor beschouwd kan worden is de afstand tussen  $X_{gp}$  (landzijde grensprofiel) en  $X_{wk}$  (landzijde waterkering).

Er bestaat een klein theoretisch risico dat er met deze aanpak onbedoeld raaien worden uitgefilterd die bij een andere overschrijdingskans-klasse dichterbij de gezochte faalkans toch maatgevend blijken te zijn. Dit risico is beperkt als de raaien in het maatgevend jaar in de buurt van wel/niet falen zitten.

Het is verstandig om per situatie te bekeken of het uitsluiten van raaien (locaties) wenselijk is; daarbij is het belangrijk om (1) een visuele controle uit te voeren voor de betreffende raaien, en (2) altijd meerdere raaien per vak over te houden na filtering.

Een reductie van het aantal profielen heeft in de volgende iteratieronde invloed op het aantal berekeningen en soms ook op het aantal uit te rekenen sets met een bepaalde doelkans, afhankelijk van de situatie:

1. *Een deel van de raaien per vak faalt in het maatgevend jaar*  
In dit geval kunnen op basis van selectiemethode (1) alle raaien die niet falen verder buiten beschouwing worden gelaten, en eventueel op basis van selectiemethode (2) nog een aantal extra. Dit betekent dat in de volgende iteratieronde alleen voor de overgebleven raaien een set berekeningen voor een grotere doelkans uitgevoerd hoeft te worden. Hiermee wordt een set berekeningen voor een kleinere overschrijdingskans bespaard.
2. *Geen enkele raai binnen een vak faalt in het maatgevend jaar*  
In dit geval hoeft in de volgende iteratieslag voor de betreffende vakken alleen een set berekeningen uitgevoerd te worden met een kleinere doelkans (zwaardere condities) conform de gekozen iteratiestrategie in Stap 1c. Als op basis van selectiemethode (2) een deel van de raaien buiten beschouwing wordt gelaten, hoeven minder berekeningen in deze set uitgevoerd te worden.
3. *Alle raaien binnen een vak falen in het maatgevend jaar*  
In dit geval hoeft in de volgende iteratieslag voor de betreffende vakken alleen een set berekeningen uitgevoerd te worden met een grotere doelkans (minder zware condities) conform de gekozen iteratiestrategie in Stap 1c. Als op basis van selectiemethode (2) een deel van de raaien buiten beschouwing wordt gelaten, hoeven minder berekeningen in deze set uitgevoerd te worden.

**Reductie aantal profielen in de tijd**

Jaren die niet maatgevend zijn per raai in de uitkomsten van een iteratieslag kunnen eventueel in de volgende iteratieslag buiten beschouwing gelaten worden. Dit kan met name voor een situatie met een eenduidige morfologische trend. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat voor de andere nog door te rekenen overschrijdingskansen van het afslagpunt hetzelfde jaar maatgevend is. Dit reduceert het aantal afslagberekeningen in een set. Hierbij kan per raai gekozen worden welke jaren wel/niet meegenomen worden. In dit geval kan gebruik worden gemaakt van het tijdsanalysediagram waarin de veiligheidsindicator uitgezet is tegen de tijd (zie §4.5.3).

Ook voor het (tussentijds) uitfilteren van relevante jaren geldt dat er een theoretisch risico is dat voor een andere overschrijdingskansklasse een ander jaar maatgevend is, door een verschil in de profielvorm. Bij kleine profielverschillen is de kans hierop klein, maar bij grote profielvariaties in de tijd moet een goede afweging gemaakt worden of het wenselijk is om specifieke jaren in volgende iteratieslagen uit te filteren.

Als besloten wordt om een deel van de jaren niet verder mee te nemen in de iteratie, moet gecontroleerd worden of de  $K$ -waarde in de bepaling van het maatgevend jaar (zie §4.5.3) aangepast moet worden voor de volgende set berekeningen. Als bijvoorbeeld initieel met  $K = 2$  gewerkt wordt, zal dit in de volgende ronde  $K = 0$  moeten zijn als alleen het maatgevend jaar nog meegenomen wordt.

## Bijlage 5. Toeslag voor effecten kustlijnkromming

Zoals toegelicht in §Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. van de handleiding kunnen (sterk) gekromde kusten resulteren in extra duinafslag door gradiënten in het langstransport tijdens extreme condities. Een overzicht van sterk gekromde kustsecties langs de Nederlandse kust is gegeven in Tabel B4-1 (ENW, 2007).

Hieronder worden de mogelijkheden om de effecten van kustlijnkromming op duinafslag mee te nemen uiteengezet. Eerst worden, nog niet in het BOI-basisinstrumentarium ondersteunde ruimtelijke analyses besproken. Hierin worden deze effecten op fysisch onderbouwde wijze meegenomen. Vervolgens wordt de 1D-aanpak met toeslagvolume die voor Duros+ in het WBI2017 gehanteerd werd toegelicht. Ten slotte wordt een mogelijke tussenoplossing beschreven voor het meenemen van effecten van kustlijnkromming middels een vereenvoudigde aanpak. Deze is gebaseerd op de oude, sterk aan Duros+ gerelateerde toeslagmethode uit het WBI2017. Deze loopt daarmee vooruit op een toekomstige aanpak waarbij het effect van een gekromde kust met behulp van een 2DH-aanpak zal kunnen worden beschouwd.

Tabel B4-1 Tabel met kustsecties met sterke kustlijnkromming (>24 graden per 1000 m). Bron: TRDA2006 (ENW, 2007).

kustsectie	RSP paal - RSP paal	lengte kustgedeelte [km]
2 Schiermonnikoog	1.00 - 5.50	4,5
3 Ameland	48.00 - 5.00	6,5
4 Terschelling	59.00 - 2.00	3,0
	5.00 - 6.50	1,5
5 Vlieland	51.00 - 54.00	3,0
6 Texel	4.00 - 8.00	4,0
	31.00 - 32.00	1,0
11 Voorne	9.00 - 11.00	2,0
12 Goeree	13.00 - 19.00	6,0
13 Schouwen	8.00 - 12.00	4,0
	2.00 - 5.00	3,0
16 Walcheren	5.40 - 8.00	2,6

### **Ruimtelijke analyse effect kustkromming**

De invloed van kustkromming op de hoeveelheid duinafslag kan tegenwoordig rekenkundig met behulp van verschillende methoden ingeschat worden. Het belangrijkste voorbeeld is de ontwikkeling van het sterktemodel XBeach. Met dit model is het mogelijk om ruimtelijke 2DH-simulaties uit te voeren waarin de impact van stormen op het kustprofiel wordt berekend. Hierdoor is het mogelijk om de mate van duinafslag te berekenen inclusief de effecten van (onder andere) kustlijnkromming of complexe bodemhoogtevariëaties in de kustzone.

Naast XBeach is ook het model DurosTA geschikt om extra zandverliezen ten gevolge van kustlijnkromming te berekenen (Steetzel, H.J., 1993). Ondanks dat DurosTA een 1D raaimodel is, is deze in staat om het extra volumeverlies te bepalen door het simultaan uitvoeren van twee raai berekeningen waarbij golven met verschillende golfvalshoeken worden beschouwd. Het verschil in golfvalshoek is daarbij

afhankelijk van de mate van kustlijnkromming. Het verschil in langtransport wordt per rekencel meegenomen in de berekening van de nieuwe bodemligging waardoor het afslagprofiel uiteindelijk in landwaartse richting verplaatst.

Uit diverse studies, zoals (Hoonhout, 2009), (Den Heijer, 2013) en (De Winter & Ruessink, 2017) blijkt dat er vooral nog veel kennisvragen bestaan rondom de modellering van kustkrommingseffecten en daaraan gerelateerd ook het kwantitatieve effect van schuine golfval op het duinafslagproces. Door het ontbreken van goede (veld)validatiecases voor dergelijke situaties is het vooralsnog lastig om te beoordelen wat de nauwkeurigheid van XBeach - in 2DH modus - is in relatie tot kustkrommingseffecten. Er bleek onder andere dat de in de TRDA2006 opgenomen formule (zie volgende paragraaf) maar in beperkte mate toepasbaar was of nut had. Bij kleinere kustkromming heeft het nagenoeg geen effect, daarna wordt het effect snel onrealistisch groot. Er is dus maar een klein gebied waarvoor geldt dat toepassing van de formule realistisch en significant is (Hoonhout, 2009).

Op dit moment is er – mede daarom – nog *geen standaardmethodiek* ontwikkeld ten behoeve van het BOI-instrumentarium om de meer geavanceerde functionaliteit van een 2DH XBeach model op een eenduidige en consistente manier toe te passen voor faalkansanalyses. De huidige versie van het instrumentarium biedt daarom (nog) geen ondersteuning – documentatie, richtlijnen/handvatten, standaardinstellingen – voor het gebruik van XBeach in 2DH modus voor beoordeling, ontwerp of beheervraagstukken. Hierbij wordt wel benadrukt dat er wel degelijk de vrijheid bestaat (binnen het BOI) om een 2DH XBeach model te gebruiken voor specifieke maatwerkstudies; mits de gehanteerde uitgangspunten en de rekenkundige aanpak goed onderbouwd worden. Daarnaast is de ambitie om het BOI-instrumentarium op termijn wel geschikt te maken voor het analyseren van duinafslag in complexe, sterk gekromde kustzones.

### **Toeslag kustkromming in WBI2017 (TRDA2006)**

Als onderdeel van het voorgaande WBI is in het TRDA uit 2006 een eenvoudige rekenmethode beschreven om een kwantitatieve inschatting te maken van het effect van kustkromming op duinafslag, op basis van het resultaat van een 1D duinafslagberekening met Duros+, zijnde het sterktemodel binnen WBI2017 (ENW, 2007). Het gaat hierbij om een *volumetoeslag* ( $G$ ) boven op het berekende *duinafslagvolume*. Een dergelijke raai benadering (1D) is per definitie niet geschikt om kustlangse gradiënten in het langtransport door kustkromming (2D) op een fysisch correcte wijze in rekening te brengen. Deze toeslag is dan ook een impliciete, empirische representatie van het *niet-in-1D-te-berekenen* effect van kustkromming.

In het TRDA2006 is de volgende formulering gegeven om de volumetoeslag ( $G$ ) te berekenen:

$$G = \frac{A^*}{300} \left( \frac{H_{0,s}}{7,6} \right)^{0,72} \left( \frac{w}{0,0268} \right)^{0,56} G_0 \quad (\text{m}^3/\text{m})$$

waarbij:

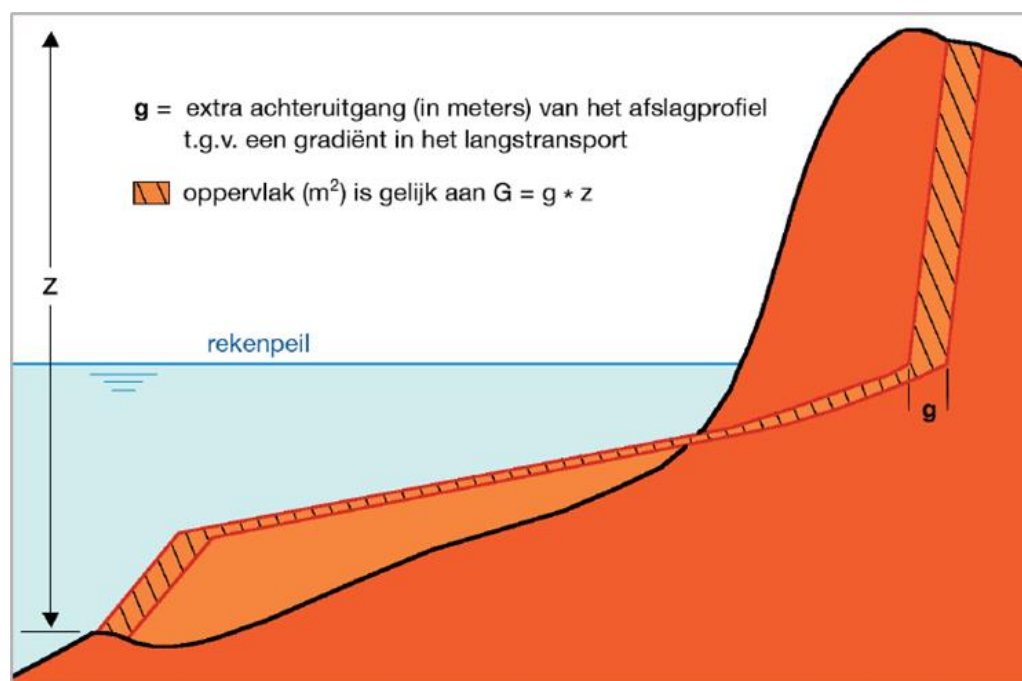
- $A^*$  = het met Duros+ berekende duinafslagvolume incl. onzekerheidstoelag
- $H_{0,s}$  = offshore significante golfhoogte
- $w$  = sedimentvalsnelheid = functie van de korreldiameter  $D_{50}$
- $G_0$  = referentiewaarde voor mate van kustkromming (zie Tabel B4-2).

Tabel B4-2 Referentiewaarden ( $G_0$ ) t.b.v. de bepaling van een volumetoeslag ( $G$ ) voor kustlijnkromming. Bron: TRDA2006 (ENW, 2007).

klasse	kromming interval graden / 1000 m	$G_0$ [ $m^3 / m$ ]
1	0 – 6	0
2	6 – 12	50
3	12 – 18	75
4	18 – 24	100
5	> 24	nader onderzoek vereist

De berekende toeslagmaat voor kustlijnkromming wordt verdisconteerd in het resultaat van de duinafslagberekening met Duros+ door middel van een landwaartse verschuiving van het berekende afslagprofiel. Dit is schematisch weergegeven in Figuur B4-1.

De in het TRDA beschreven verschuiving van het afslagprofiel op basis van het berekende toeslagvolume representeert feitelijk de extra achteruitgang (erosie) die te verwachten is doordat de kromming van de kust zorgt voor langstransport-gradiënten, wat resulteert in netto sedimentverlies in langsrichting.



Figuur B4-1 Schematische weergave van de wijze waarop een volumetoeslag ( $G$ ) kan worden verdisconteerd op basis van het resultaat van een duinafslagberekening met het empirische model Duros+. Bron: TRDA2006 (ENW, 2007).

Opgemerkt wordt dat de rekenmethode uit het TRDA *in praktijk* vooral werd toegepast in situaties met extreme kustkromming (klasse 5; zie Tabel B4-2 en Figuur B4-1). In dergelijke gevallen wordt dan de referentiewaarde  $G_0 = 100 \text{ m}^3/\text{m}$  gehanteerd als input voor de berekening van de volumetoeslag  $G$ .

Daarnaast wordt opgemerkt dat de formulering voor volumetoeslag  $G$  een sterke relatie heeft met de formuleringen van het Duros+ model. De formulering is afgeleid in 'Duros+ stijl', waarbij voor enkele termen in de formule geldt dat parameterafhankelijkheid is toegevoegd op basis van de mate van afwijking van een referentiewaarde; bijvoorbeeld  $(H_s/7,6)^{0,72}$ . Als  $H_s = 7,6$  m, dan is de factor gelijk aan 1.

De rekenmethode uit het TRDA was in de voorgaande versies van het beoordelingsinstrumentarium voor duinen geïmplementeerd in de gebruikersomgeving MorphAn. De verrekking van de volumetoeslag en de verschuiving van het duinprofiel werden binnen MorphAn (automatisch) meegenomen.

### **Tussenoplossing voor analyse kustkromming in het BOI**

Samengevat zijn er twee uitersten om een inschatting te kunnen maken van de hoeveelheid duinafslag tijdens stormcondities in situaties met sterke kustkromming: de originele empirische 1D TRDA-aanpak voor Duros+ of 2DH modelberekeningen waarin de relevante processen en gradiënten meegenomen worden.

Er is bij de ontwikkeling van de huidige versie van het BOI-basisinstrumentarium bewust voor gekozen om *géén nieuw (tussentijds) rekenrecept* te ontwikkelen om een kwantitatieve inschatting te maken van de kustkrommingseffecten in relatie tot de huidige (1D) raai benadering met XBeach. In toekomstige ontwikkelfases wordt ingezet op de verdere ontwikkeling, afregeling en validatie van de 2DH aanpak met XBeach voor dergelijke toepassingen.

Om in de tussentijd *toch* inzicht te kunnen krijgen in de mogelijke effecten van kustkromming op duinafslag, kan een *tijdelijke tussenoplossing* worden beschouwd die analoog is aan de (oude) TRDA-aanpak voor Duros+. Hierbij ligt de focus *niet* op het netjes inpassen van een toeslagvolume door middel van een profielverschuiving (zoals schematisch weergegeven in Figuur B4-1), maar *wel* op het maken van een (meer pragmatische) inschatting van de verschuiving van de posities van veiligheids...indicatoren zoals het afslagpunt of het grensprofiel.

Een dergelijke verschuiving van de posities van de veiligheidsindicatoren kan worden toegepast als een relatief eenvoudige nabewerkingsslag ná het uitvoeren van de reguliere analysestappen rondom een duinafslagberekening in het stappenplan in Hoofdstuk 4 van deze handleiding.

Voor de gebruiker betekent dit concreet dat de – op basis van het BOI-instrumentarium – berekende posities van de maatgevende indicatoren, die worden beschouwd om te bepalen of een doorsnede *faalt*, worden gebruikt als basis voor een 'handmatige' nabewerkingsslag. Deze handmatige verschuiving van de rekenresultaten wordt daarbij gebaseerd op de verschuivingsmaat  $g$  (zie Figuur B4-1 en de bijbehorende formulering).

Een nadere blik op de TRDA-formulering leert dat de mate van achteruitgang van het afslagpunt ( $g$ ) in de basis een relatief eenvoudige functie is van het afslagvolume ( $A$ ), de actieve hoogte van het profiel ( $z$ ) en een referentiewaarde voor de mate van kromming ( $G_0$ ):

$$g = f(A, z, G_0)$$

De actieve hoogte van het profiel ( $z$ ) is het niveauverschil tussen de top van het duin en de onderzijde van de depositiezone.

$$G = \frac{A^*}{300} \left( \frac{H_{0s}}{7,6} \right)^{0,72} \left( \frac{w}{0,0268} \right)^{0,56} G_0 \text{ (m}^3\text{/m)}$$

Als de beschouwde situatie enigszins lijkt op 'de referentiesituatie' waarvoor de formulering is afgeleid dan kunnen enkele termen in de formulering voor  $G$  worden weggestreept (zie hieronder).

In dat geval blijft de volgende eenvoudige formulering over:

$$G = 1/300 * G_0 * A$$

waarbij  $G_0 = 100 \text{ m}^3\text{/m}$  (bij sterke kustkromming). Het toeslagvolume  $G$  is dan ongeveer 30% van het berekende afslagvolume  $A$ .

Een schatting van de extra achteruitgang van het afslagpunt  $g$  kan gemaakt worden door  $g = G / z$ . Bij een actieve hoogte van het afslagprofiel ( $z$ ) van 10 á 15 m en een afslagvolume van orde grootte  $100 \text{ m}^3\text{/m}$ , dan geldt – op basis van de oude TRDA-formulering – een extra achteruitgang van het afslagpunt van enkele meters.

De sterke indruk bestaat verder dat bovenstaande inschatting minder realistisch is in het geval van zeer sterke kustkromming (Hoonhout, 2009). Om hier definitief uitsluitsel over te geven zijn nadere analyses nodig met meer geavanceerde, gevalideerde rekenmethoden.







Foto voorzijde: <https://stock.adobe.com/nl/Images>

Foto achterzijde: <https://beeldbank.rws.nl>; Rijkswaterstaat / Jan van den Broeke



Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*



**Deltares**