

**Semi-probabilistisch  
toetsvoorschrift voor duinen  
ten behoeve van WTI2017**





**Semi-probabilistisch  
toetsvoorschrift voor duinen ten  
behoefte van WTI2017**

Ferdinand Diermanse  
Pieter van Geer

1220080-008



**Titel**

Semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen ten behoeve van WTI2017

<b>Opdrachtgever</b> Rijkswaterstaat	<b>Project</b> 1220080-008	<b>Kenmerk</b> 1220080-008-ZWS-0002	<b>Pagina's</b> 35
---	-------------------------------	--	-----------------------

**Trefwoorden**

Wettelijk toets instrumentarium 2017 (WTI2017), duinen, kalibratie, semi-probabilistisch toets voorschrift

**Samenvatting**

In het kader van het programma WTI2017 wordt gewerkt aan een nieuw toets instrumentarium voor de Nederlandse primaire waterkeringen. Eén van de toets sporen in het instrumentarium betreft het faalmechanisme 'duinafslag'. Voor dit spoor wordt in 2016 een semi-probabilistische toets opgeleverd. In dit rapport worden de volgende twee aspecten behandeld die relevant zijn voor het opstellen van de toets:

- 1 De vertaalslag van de toets norm van een dijktraject naar een faalkanseis per duinraai; en
- 2 De formulering van de semi-probabilistische rekenregel, uitgaande van de faalkanseis per duinraai.

In het eerste onderdeel zijn significante aanpassingen gedaan in vergelijking met voorgaande toets rondes. In voorgaande toets rondes was de faalkanseis van een duinraai een factor 10 kleiner dan de wettelijke toets norm. In WTI2017 zit hier voor de meeste duinraaien nog maar ongeveer een factor 3 tussen. De wijziging is een gevolg van de nieuwe filosofie van toetsen, "van overschrijdingskans naar overstromingskans". De genoemde factor 3 is een combinatie van de faalkansreservering voor het mechanisme duinafslag (70%) in de totale faalkansbegroting en het lengte-effect (factor 2):  $2/0,7 \approx 3$ . Voor duinen die onderdeel uitmaken van een traject dat grotendeels uit dijken bestaat is overigens maar 10% gereserveerd voor het mechanisme duinafslag in de totale faalkansbegroting. Voor die duinen zit er een factor 20 verschil in de vertaalslag van toets norm naar faalkanseis per duinraai. Dit zijn echter uitzonderingen.

Voor het tweede onderdeel, de formulering van de semi-probabilistische rekenregel, is besloten om het zelfde rekenrecept aan te houden als gehanteerd in vorige toets rondes. De uitkomsten van de semi-probabilistische toets kunnen desondanks significant verschillen in vergelijking met voorgaande toets rondes als gevolg van:

- Wijzigingen in de getalswaarde van de wettelijke toets norm;
- De gewijzigde vertaalslag van de norm van een dijktraject naar een faalkanseis per duinraai;
- Wijzigingen in de statistiek van de belasting, met name als gevolg van meenemen van kennisonzekerheden in de waterstandsstatistiek; en
- Wijzigingen in het duinprofiel.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	jun. 2015	P. van Geer F. Diermanse		Ruben Jongejan		Annemargreet de Leeuw	
2	dec 2015	F. Diermanse P. van Geer	FD	Ruben Jongejan	daSH	Annemargreet de Leeuw	AC

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Aanleiding	1
1.2 VTV2006	1
1.3 WTI2011	2
1.4 Nieuwe normen	2
1.5 Dit rapport	3
1.6 Relatie met WTI projecten	3
1.7 Leeswijzer	4
<b>2 Semi-probabilistisch toetsvoorschrift VTV2006</b>	<b>5</b>
2.1 Probabilistisch rekenmodel	5
2.1.1 Afslagmodel	5
2.1.2 Stochastische variabelen	5
2.2 Rekenresultaten	7
2.3 Afgeleide semi-probabilistische rekenregel	7
<b>3 Kalibratieprocedure WTI2017 op hoofdlijnen</b>	<b>9</b>
<b>4 Stap 1: Van trajectnorm naar faalkanseis per duinraai</b>	<b>11</b>
<b>5 Stap 2: De vorm van het semi-probabilistisch toetsvoorschrift</b>	<b>15</b>
5.1 Inleiding	15
5.2 Definitie van testcases	15
5.2.1 Locaties	15
5.2.2 Profiel invoer	17
5.3 Het probabilistische model	18
5.4 Betrouwbaarheidsindices en invloedscoëfficiënten	18
5.5 Keuze van het veiligheidsformat	19
<b>6 Stap 3: Vaststellen van veiligheidsfactoren</b>	<b>23</b>
6.1 Rekenwaarden voor niet beta-afhankelijke variabelen	23
6.2 Rekenwaarden voor de beta-afhankelijke variabele	23
6.2.1 Wiskundige afleiding	23
6.2.2 Overzicht rekenrecepten ter bepaling van het rekenpeil	26
6.3 Vergelijking van probabilistische en semi-probabilistische rekenresultaten	27
<b>7 Stap 4: Vergelijking voorgesteld semi-probabilistisch toetsvoorschrift met VTV200631</b>	
<b>8 Conclusies</b>	<b>33</b>
<b>9 Referenties</b>	<b>35</b>

### English summary

The project WTI2017 provides tools and guidelines for the safety assessment of the primary flood defences in the Netherlands for the period 2017-2023. One of the failure mechanisms to be considered is 'dune erosion'. For this failure mechanism, a semi-probabilistic assessment tool will be provided as part of WTI2017. This report describes the following two components of the semi-probabilistic assessment:

- 1 The translation of the safety standard for a dune segment to the safety requirement for a single dune transect; and
- 2 The formulation of a semi-probabilistic guideline rule, which computes the dune erosion length that corresponds to the safety requirement of the dune transect.

The first component differs in comparison with previous safety assessments. In previous safety assessments the safety requirement of the dune transect was a factor 10 (in probability) smaller than the safety standard for a dune segment. In WTI2017 the difference between the two is reduced to approximately a factor 3. The difference is the result of the change in definition of the safety standards of the Dutch primary flood defences. In previous assessments, the safety standard was expressed in terms of a "probability of exceedance of load conditions". In the upcoming safety assessments, the safety standard is expressed as an "allowable probability of flooding". The factor 3 is a combination of the percentage of the total failure mechanism budget that is reserved for dune erosion (70%) and the "length-effect" (factor 2):  $2/0,7 \approx 3$ . For some dunes the percentage of the total failure mechanism budget that is reserved for dune erosion is equal to 10% instead of 70%, but these are exceptions. For these exceptions, the difference between the safety requirement of the dune transect and the safety standard for a dune segment is a factor 20.

For the second component, the semi-probabilistic guideline rule, it was decided to leave things unchanged in comparison with previous safety assessments. Nevertheless, the outcomes of the guideline rule can be different in comparison with previous safety assessments, due to differences in:

- the value of the safety standard;
- the translation of the safety standard for a dune segment to the safety requirement for a single dune transect;
- load statistics, mainly due to the fact that "knowledge uncertainties" are now taken into account, which was not the case in previous assessments; and
- dune profiles.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In het kader van het programma WTI2017 wordt gewerkt aan een nieuw toets instrumentarium voor de Nederlandse waterkeringen. Het toets proces is ingedeeld in drie lagen:

- 1) Een eenvoudige toets, waarbij op basis van simpele regels een eerste oordeel wordt geveld over de veiligheid van een (stuk) waterkering.
- 2) Een gedetailleerde toets, waarin in meer detail en met een uitgebreider rekenmodel wordt gekeken naar de veiligheid van waterkeringen. De gedetailleerde toets is vormgegeven op twee niveaus, waarbij hetzelfde rekenmodel wordt gebruikt:
  - a) Per vak wordt een toets uitgevoerd. Dit kan een volledig probabilistische berekening zijn, maar in het geval van het faalmechanisme duinen is dat een semi-probabilistische toets. Tijdens een semi-probabilistische toets wordt op basis van één modelberekening een veiligheidsoordeel gevormd.
  - b) Een volledig probabilistische toets. Bij een probabilistische toets wordt ook de onzekerheid van de verschillende invoer parameters en de gevoeligheid van het sterktemodel daarvoor meegenomen.
- 3) Een toets op maat. Als met behulp van de eerste twee toetslagen geen oordeel kan worden gegeven over de veiligheid van een waterkering mag worden overgegaan op een toets op maat. In tegenstelling tot de andere twee toetslagen is hiervoor geen methode vastgesteld. De toetsers is vrij in het kiezen van een toets methode om toch tot een oordeel te komen (maar moet daarover natuurlijk wel verantwoording afleggen).

De doelstelling van de semi-probabilistische berekening op 2A niveau voor duinen is dat er met één enkele afslagberekening een toets resultaat wordt verkregen dat consistent is met het toets resultaat van een volledig probabilistische berekening (2B) met hetzelfde sterkte- en belastingmodel. De rekenwaarden (sterkte en belasting) die als invoer dienen voor een dergelijke semi-probabilistische toets worden daarom afgeleid op basis van rekenresultaten van probabilistische berekeningen voor een aantal strategisch gekozen testlocaties.

## 1.2 VTV2006

Voor toetsing van duinwaterkeringen is in 2006 in het kader van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV2006) eveneens een semi-probabilistisch model (ook "rekenregel" genoemd) afgeleid. Deze rekenregel is afgeleid met gebruik van hetzelfde afslagmodel (Duros+) en hetzelfde probabilistische model als wordt toegepast in het kader van WTI2017. In principe kan deze rekenregel gewoon overgenomen worden in WTI2017. Het is echter van belang de houdbaarheid van deze rekenregel te toetsen vanwege de volgende ontwikkelingen:

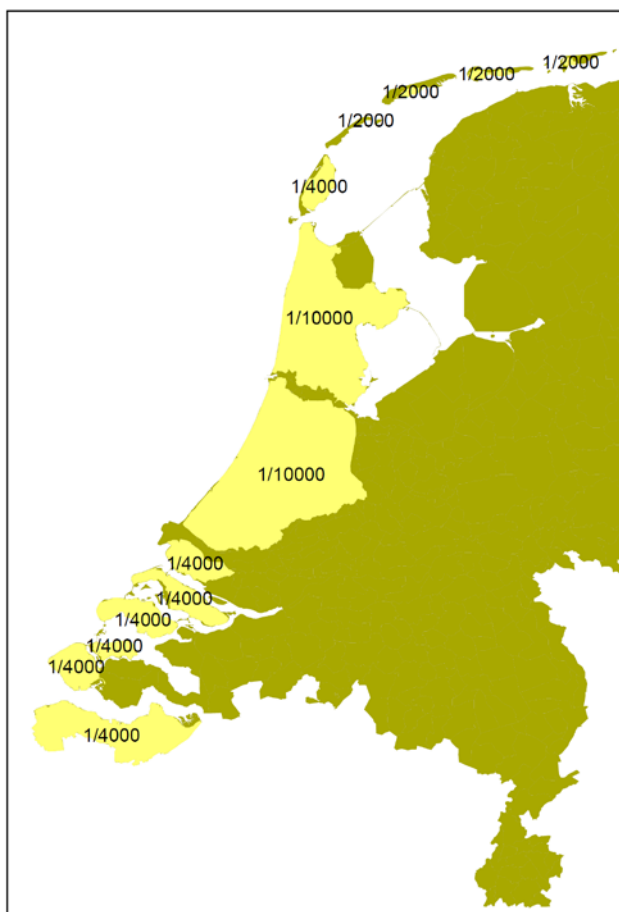
- 1 De getalsmatige waarden van de normen worden aangepast;
- 2 De betekenis van de norm verandert van overschrijdingskans naar overstromingskans;
- 3 In het kader van WTI2017 is een generieke procedure vastgesteld voor het afleiden van semi-probabilistische toets voorschriften; deze wijkt op onderdelen af van de procedure die is gehanteerd in het kader van VTV2006.

## 1.3 WTI2011

In het kader van het project WTI2011 is voor het faalmechanisme duinafslag een nieuw semi-probabilistisch model afgeleid voor duinwaterkeringen op de Waddeneilanden, gebruik makend van het afslagmodel D++. D++ verschilt van Duros+ (VTV2006) ten aanzien van de locatie van de hydraulische randvoorwaarden. De hydraulische randvoorwaarden van Duros+ representeren condities op relatief diep water (nl. waar de bodem op het niveau ~NAP-20m ligt), de hydraulische randvoorwaarden voor D++ hebben betrekking op locaties dicht bij de kust. Het semi-probabilistische model van WTI2011 heeft ten aanzien van de keuze van rekenwaarden grote overeenkomsten met het semi-probabilistische model van het VTV2006. Voor WTI2017 is echter besloten om geen gebruik te maken van D++, de relevantie van WTI2011 voor het huidige rapport vervalt daarmee.

## 1.4 Nieuwe normen

Zoals genoemd verandert de betekenis van de wettelijke toets norm: van overschrijdingskans naar overstromingskans. Verder veranderen ook de getalswaarden van de norm. Figuur 1.1 toont de oude normgetallen, opgesteld per dijkkringgebied. Figuur 1.2 toont de nieuwe normgetallen, opgesteld per dijktraject.



Figuur 1.1 Overzicht van de oude normering van duinwaterkeringen



Figuur 1.2 Overzicht van de nieuw voorgestelde signaleringnormen voor duinwaterkeringen

## 1.5 Dit rapport

Dit rapport beschrijft de semi-probabilistische rekenregel voor het faalmechanisme duinafslag ten behoeve van WTI2017. De belangrijkste keuzes die gemaakt zijn bij het opstellen van de rekenregel worden beargumenteerd. In een aantal gevallen moet een keuze gemaakt worden tussen de aanpak conform VTV2006 en de aanpak conform de generieke procedure die is opgesteld in het kader van WTI2017 (Deltares, 2013) en tevens is verwoord in het basisrapport van WTI2017 (Deltares, 2015). Dit rapport beschrijft daarom de beide procedures en geeft telkens de afwegingen bij de gemaakte keuzes.

## 1.6 Relatie met WTI projecten

De (her-)kalibratie van het semi-probabilistische toets model voor duinafslag is uitgevoerd binnen WTI-cluster C - probabilistisch en onzekerheden. Binnen het WTI programma wordt door verschillende projecten tegelijk gewerkt aan ontwikkeling van het toets instrumentarium voor duinen. Keuzes die in verschillende projecten worden gemaakt hebben verband met de afleiding van een nieuwe rekenregel voor het genereren van randvoorwaarden voor een semi-probabilistische toets.

### Cluster A – Raamwerk

Belangrijke randvoorwaarden voor de bepaling van een (her)nieuw(d) semi-probabilistische model voor de toetsing van duinen worden geschetst en bewaakt in cluster A van het WTI

project. Binnen cluster A is onder andere het rapport Deltares (2013) verschenen. Daarin wordt in algemene zin beschreven hoe een semi-probabilistisch toets model kan worden afgeleid. Daarnaast is er met de opdrachtgever afgesproken dat oplevering van de semi-probabilistische toets (2A) in 2016 plaatsvindt, waar oplevering van het volledig probabilistisch toets model (2B) in 2019 gepland staat. Keuzes die worden gemaakt in de afleiding van een semi-probabilistisch toets model kunnen echter wel consequenties hebben voor de ontwikkeling van het volledig probabilistisch model (en andersom). In dit cluster is ook de faalkansbegroting opgesteld. Voor trajecten met overwegend duinen is 70% van de totale faalkans voor het mechanisme duinafslag gereserveerd, voor trajecten met overwegend dijken en een enkele duinwaterkering is 10% gereserveerd voor het mechanisme duinafslag.

## **Cluster B - Software**

Uiteindelijk moet een gedetailleerde toets worden uitgevoerd met behulp van software. Deze software moet de randvoorwaarden voor de toets op 2A niveau kunnen produceren of gebruikt deze. Indirect is dit cluster dus gebruiker van het vast te stellen semi-probabilistisch toets model.

## **Cluster 4 - Duinen**

Het cluster 4 (Duinen) van het WTI programma is verantwoordelijk voor het ontwikkelen van verbeterde toets methoden voor duinafslag. Daarnaast worden in dit cluster het stroomschema en de schematiseringshandleiding voor de toetsing van duinen gerealiseerd. Keuzes die in het kader van met name de schematiseringshandleiding gemaakt worden moeten overeenstemmen met de keuzes die worden gemaakt bij de afleiding van een rekenregel voor de semi-probabilistische toets.

## **Cluster 1 – Hydraulische belastingen**

Binnen het cluster hydraulische belastingen ligt de verantwoordelijkheid voor het afleiden van randvoorwaarden voor een semi-probabilistische toets (2A) van duinen op basis van de rekenregel die nog moet worden vastgesteld. Ook dit project is dus gebruiker van het vast te stellen semi-probabilistisch toets model.

## **1.7 Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 beschrijft de procedure voor het afleiden van het semi-probabilistische toets voorschrift voor duinafslag in het kader van VTV2006. Hoofdstuk 3 beschrijft op hoofdlijnen de generieke procedure voor het afleiden van de semi-probabilistische toets voorschriften in het kader van WTI2017, zoals geformuleerd in Deltares (2013). De generieke procedure bevat drie stappen die in de hoofdstukken 4-6 nader worden uitgewerkt voor het mechanisme duinafslag:

- Vertaalslag van trajectnorm naar faalkanseis van een doorsnede/duinraai (hoofdstuk 4).
- Formulering van het veiligheidsformat, ofwel de generieke formulering van de semi-probabilistische rekenregel (hoofdstuk 5).
- Afleiden van veiligheidsfactoren (hoofdstuk 6).

In hoofdstuk 7 wordt een vergelijking gemaakt tussen het afgeleide voorschrift voor WTI2017 enerzijds en het vigerende voorschrift van VTV2006 anderzijds. In Hoofdstuk 8 worden de belangrijkste conclusies van dit rapport samengevat.

## 2 Semi-probabilistisch toets voorschrift VTV2006

### 2.1 Probabilistisch rekenmodel

Het semi-probabilistische model wordt afgeleid op basis van rekenresultaten van een probabilistisch model. Het probabilistische model voor duinafslag in WTI2017 is het model dat ten behoeve van de VTV2006 is ontwikkeld (Alkyon/Delft Hydraulics/TU Delft, 2007).

#### 2.1.1 Afslagmodel

Het probabilistische model van VTV2006 (en WTI2017) is als een probabilistische schil gebouwd om het duinafslagmodel Duros+. Duros+ heeft als invoer de volgende grootheden:

1. het duinprofiel;
2. de waterstand ( $H$ );
3. de golfhoogte ( $H_s$ );
4. de piekperiode ( $T_p$ ); en
5. de korreldiameter ( $D_{50}$ );

Op basis van deze invoer berekent Duros+ een afslagprofiel, op basis waarvan een afslagvolume en afslagpositie kan worden bepaald. Het duinprofiel is in het probabilistische model als deterministische grootheid beschouwd, de overige vier variabelen zijn als stochastische variabelen gemodelleerd. Voor  $H$ ,  $H_s$  en  $T_p$  geldt dat dit de maximale waarden gedurende een stormgebeurtenis zijn.

#### 2.1.2 Stochastische variabelen

Het probabilistische model heeft in totaal zes stochastische variabelen:

1. de waterstand ( $H$ );
2. de golfhoogte ( $H_s$ );
3. de piekperiode ( $T_p$ );
4. de korreldiameter ( $D_{50}$ );
5. een aanpassing op het afslagvolume voor effecten van stormduur ( $C_d$ ); en
6. een aanpassing op het afslagvolume voor effecten van modelfouten ( $C_m$ ).

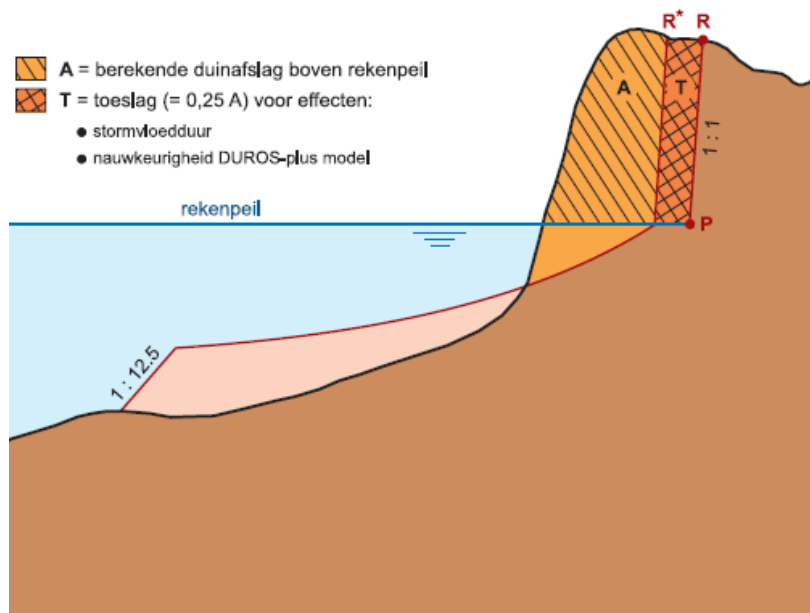
De realisaties van de eerste vier stochasten zijn invoer voor het model Duros+. Met Duros+ wordt de *initiële* waarde berekend van het afslagvolume en de afslagpositie. Vervolgens worden correcties toegepast op het initieel geschatte volume op basis van de realisaties van de stochasten  $C_d$  en  $C_m$ . De realisaties van de stochasten  $C_d$  en  $C_m$  worden opgeteld bij het initiële afslagvolume. Het resultaat is het definitieve afslagvolume, waar vervolgens weer een afslagpositie bij bepaaltbepaald kan worden.

Figuur 2.1 geeft een voorbeeld van het initieel berekende afslagprofiel met Duros+ (rode lijn), het berekend afslagvolume ( $A$ ) en het berekende toeslagvolume ( $T$ ). Het initieel berekende afslagvolume bestaat uit drie onderdelen (zie TU Delft/Alkyon/WL, 2007 en Figuur 2.1):

- 1 De duinvoet, dat is het punt waar het steile front van het afgeslagen duin overgaat in het veel flauwere profiel van het strand, ligt ná afslag op het stormvloedpeil. De helling van het afgeslagen duin is 1:1.
- 2 Vanaf de duinvoet verloopt het afslagprofiel parabolisch in zeewaartse richting

- 3 Zeewaarts van de parabool gaat het profiel over in een recht talud onder een helling van 1:12,5 tot het oorspronkelijke dwarsprofiel wordt gesneden.

Het toeslagvolume ligt aan landwaartse zijde van het initieel berekende afslagvolume.



Figuur 2.1 Berekende afslagprofiel met Duros+ (rode lijn), het berekende afslagvolume (A) en het toeslagvolume (T). Figuur overgenomen uit: TU Delft/Alkyon/WL (2007).

De zes stochasten hebben de volgende kansverdelingen:

- 1 Waterstand: De waterstand wordt beschreven met een conditionele Weibull-verdeling. Deze verdelingsfunctie is beschikbaar voor zes locaties langs de kust. Voor tussenvallende raaien wordt de waterstand bepaald op basis van interpolatie.
- 2 De golfhoogte is afhankelijk gemodelleerd van de waterstand. De *verwachtingswaarde* van de golfhoogte is een deterministische functie van de waterstand. Om deze verwachtingswaarde heen wordt de golfhoogte verondersteld normaal verdeeld te zijn met een standaarddeviatie van 0,6 m. De stochast 'golfhoogte' representeert in het probabilistische model de afwijking ten opzichte van de verwachtingswaarde.
- 3 De *verwachtingswaarde* van de piekperiode is een deterministische functie van de golfhoogte. Om deze verwachtingswaarde heen is de piekperiode verondersteld normaal verdeeld te zijn met een standaarddeviatie van 1 s. De stochast 'piekperiode' representeert in het probabilistische model de afwijking ten opzichte van de verwachtingswaarde.
- 4 De korreldiameter is normaal verdeeld. De gemiddelde waarde en de standaarddeviatie verschillen ruimtelijk en zijn bepaald op basis van veldmetingen.
- 5 De toeslag op het afslagvolume voor effecten van stormduur is normaal verdeeld met een gemiddelde van  $0 \text{ m}^3/\text{m}$  en een standaarddeviatie van  $0,1A \text{ m}^3/\text{m}$ , waarbij  $A$  gelijk is aan het initieel berekende afslagvolume.
- 6 De toeslag op het afslagvolume voor effecten van modelfouten ( $C_m$ ) is normaal verdeeld met een gemiddelde van  $0 \text{ m}^3/\text{m}$  en een standaarddeviatie van  $0,15A \text{ m}^3/\text{m}$ .

## 2.2 Rekenresultaten

In het rapport van Alkyon/Delft Hydraulics/TU Delft (2007) zijn probabilistische berekeningen uitgevoerd voor 10 raaien langs de Hollandse kust en 5 raaien op de Waddeneilanden. Probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met rekenmethode FORM. De rekenresultaten bestonden uit:

- 1 Een relatie tussen afslagpositie en overschrijdingskans;
- 2 De afslagpositie die correspondeert met de faalkanseis voor een duinraai (volgt direct uit 1);
- 3 Het ontwerp punt dat correspondeert met de afslagpositie uit 2.

Ad 2: Voor locaties langs de Hollandse kust was in VTV2006 een overschrijdingskansnorm van  $1/10.000^e$  per jaar van toepassing. Voor locaties in Zeeland en op Texel was dit  $1/4.000^e$  per jaar en voor de overige Waddeneilanden  $1/2.000^e$  per jaar. Deze normen waren van toepassing op de dijkringen waartoe de duinraaien behoorden. Voor individuele duinraaien werd uitgegaan van een faalkanseis, die een factor 10 strenger was dan de overschrijdingskansnorm van de dijkkring. Voor een raai langs de Hollandse kust betekende dit bijvoorbeeld een faalkanseis van  $1/100.000^e$  per jaar. Voor een raai langs de Hollandse kust werd in stap 2 en 3 van de bovenstaande procedure dus de afslagpositie gekozen die correspondeert met deze faalkanseis van  $1/100.000^e$  per jaar.

Ad 3: het ontwerp punt is een combinatie van realisaties van alle (6) de stochastische variabelen. Het betreft dié combinatie die voldoet aan de volgende twee voorwaarden:

- [a] het resulteert in een afslagpositie die correspondeert met de faalkanseis; en
- [b] van alle combinaties die voldoen aan voorwaarde [a] heeft het de grootste kans van voorkomen.

Uit de ontwerp punten kunnen onder andere invloedscoëfficiënten worden afgeleid voor elke stochastische variabele. Invloedscoëfficiënten zijn indicatoren voor het relatieve belang van de stochastische variabelen in de probabilistische berekening. De gekwadrateerde invloedscoëfficiënten tellen op tot 1. Variabelen die van groot belang zijn in het fysische proces van falen van de waterkering en die bovendien een grote mate van onzekerheid kennen krijgen relatief hoge invloedscoëfficiënten. Een hoge waarde van de invloedscoëfficiënt duidt erop dat een "tegenvaller" in de realisatie van de corresponderende stochastische variabele een sterke toename van de faalkans tot gevolg heeft. De invloedscoëfficiënten verschaffen veel informatie over doelmatige keuzes van rekenwaarden in het semi-probabilistische model.

## 2.3 Afgeleide semi-probabilistische rekenregel

Op basis van de berekende ontwerp punten voor de 10 duinraaien langs de Hollandse kust en de 5 duinraaien op de Waddeneilanden is een semi-probabilistische rekenregel afgeleid. Voor een willekeurige duinraai kan deze rekenregel als volgt samengevat worden:

- 1 Kies een gemeten duinprofiel uit een referentiejaar.
- 2 Neem als rekenpeil de waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 2,15 maal de faalkanseis van een duinraai.<sup>1</sup>
- 3 Kies de verwachtingswaarde van de golfhoogte, gegeven de waterstand uit stap 2.
- 4 Kies de verwachtingswaarde van de piekperiode, gegeven de golfhoogte uit stap 3.
- 5 Kies een korreldiameter die een fractie kleiner is dan de gemiddelde waarde. Voor de keuze van de korreldiameter is een tabel ter beschikking gesteld.

<sup>1</sup> Dit rekenpeil is in het verleden vaak als volgt geformuleerd: toets peil plus 2/3 decimeringshoogte

- 6 Bereken het afslagprofiel, het afslagvolume en de afslagpositie met Duros+ op basis van invoer uit stap 1-5.
- 7 Vermenigvuldig het berekende afslagvolume met een factor 1,25 en bepaal, op basis van het oorspronkelijke duinprofiel, welke afslagpositie correspondeert met dit afslagvolume.

In Alkyon/Delft Hydraulics/TU Delft (2007) is geverifieerd dat de aldus berekende afslagpositie goed overeen komt met de afslagpositie die op basis van een volledig probabilistische berekening wordt bepaald. De rekenregel voldoet daarmee aan de eisen van een semi-probabilistisch toets model: eenvoudig toe te passen en consistent met het volledig probabilistische model.



### 3 Kalibratieprocedure WT12017 op hoofdlijnen

Een belangrijke stap in het vaststellen van semi-probabilistische rekenregels is het afleiden van veiligheidsfactoren. Deze worden bepaald op basis van uitkomsten van volledige probabilistische berekeningen voor strategisch gekozen testcases. Het afleiden van het rekenvoorschrift en bijbehorende veiligheidsfactoren wordt aangeduid als 'kalibratie'. Voor WT12017 is een standaard kalibratie-procedure opgesteld (Deltares, 2013). Op hoofdlijnen bestaat het kalibratieproces uit de volgende onderdelen:

- 1 Het vaststellen van betrouwbaarheidseisen. Deze eisen zijn gedefinieerd als faalkansen voor het beschouwde faalmechanisme en het beschouwde dijkvak/doorsnede. Elke eis wordt afgeleid van de wettelijk vastgestelde overstromingskansnorm voor het dijk- of duintraject.
- 2 Het bepalen van de vorm van het semi-probabilistische toets voorschrift: het "veiligheidsformat". Deze stap behelst de volgende activiteiten:
  - 2.1 Definieer testcases. De testcases betreffen echte of fictieve dijkvakken, duinvakken of kunstwerken met statistisch homogene eigenschappen. Dit laatste impliceert dat er op voorhand geen zwakke of sterke plekken aan te wijzen zijn in het dijkvak. In de statistische analyses wordt wel rekening gehouden met het feit dat de sterkte varieert over het dijkvak, maar de locatie van de sterkte en zwakste doorsneden is onbekend. Elke locatie heeft dus een bepaalde kansverdeling ten aanzien van de werkelijke sterkte en de gemiddelde waarde en spreiding van deze kansverdeling is voor alle dwarsdoorsneden gelijk in het "statistisch homogene dijkvak".
  - 2.2 Implementeer de grenstoestandfunctie(s) van het beschouwde faalmechanisme en belastingmodel(len) van de dijkvakken en duinraaien in een probabilistische rekenomgeving.
  - 2.3 Bereken faalkansen en invloedscoëfficiënten voor alle testcases op basis van probabilistische berekeningen. Invloedscoëfficiënten worden bepaald voor elke stochastische variabele en zijn indicatoren voor het relatieve belang van de stochastische variabelen in de faalkansberekening. De gekwadrateerde invloedscoëfficiënten tellen op tot 1. Variabelen die van groot belang zijn in het fysische proces van falen van de waterkering en die bovendien een grote mate van onzekerheid kennen krijgen relatief hoge Invloedscoëfficiënten. Een hoge waarde van de invloedscoëfficiënt duidt erop dat een "tegevaller" in de realisatie van de corresponderende stochastische variabele een sterke toename van de faalkans tot gevolg heeft.
  - 2.4 Stel het veiligheidsformat vast. In de eerste plaats wordt daarbij de karakteristieke waarde voor elke stochastische variabele gekozen. Ten behoeve van de eenvoud en de reductie van de foutgevoeligheid van semi-probabilistische toetsingen is het wenselijk dat de karakteristieke waarden zo min mogelijk variatie kennen. Voor sterkteparameters wordt normaal gesproken uitgegaan van het 5%-kwantiel, of het 95%-kwantiel. Voor de waterstand wordt in de meeste toets sporen uitgegaan van een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm voor het dijktraject.

2.4 Vervolgens wordt gekozen welke veiligheidsfactoren in het semi-probabilistische toets voorschrift worden opgenomen. Deze keuzes berusten op zowel de berekende invloedscoëfficiënten als op praktische overwegingen. Er dient een balans gevonden te worden tussen eenvoud (beperkt aantal veiligheidsfactoren) en efficiëntie (zo min mogelijk conservatisme, doorgaans mede te realiseren door meerdere veiligheidsfactoren te kiezen).

3 Het vaststellen van de veiligheidsfactoren:

- 3.1 De meeste veiligheidsfactoren worden, met behulp van een betrekkelijk eenvoudige formule, afgeleid op basis van de gekozen karakteristieke waarden (stap 2.4) en de berekende faalkansen en invloedscoëfficiënten (stap 2.3). Indien zich duidelijke verschillen aftekenen tussen verschillende gebieden/situaties in de berekende faalkansen en/of invloedscoëfficiënten, kan het zinvol zijn om de dataset te splitsen en voor de verschillende gebieden/situaties afzonderlijke veiligheidsfactoren af te leiden. Deze activiteit wordt uitgevoerd voor alle veiligheidsfactoren, met uitzondering van één “betrouwbaarheidseis-afhankelijke” veiligheidsfactor. Het gebruik van een betrouwbaarheidseis-afhankelijke veiligheidsfactor zorgt ervoor dat rekenvoorschrift flexibeler is en rekening kan houden met verschillen in uitkomsten voor verschillende betrouwbaarheidseisen. De keuze om slechts één veiligheidsfactor te laten variëren met de betrouwbaarheidseis is gemaakt om het aantal vrijheidsgraden in de formulering van de semi-probabilistische rekenregel te beperken.
- 3.2 Bepaal voor elke testcase, voor een bereik aan waarden van de betrouwbaarheidseis-afhankelijke veiligheidsfactor, hoe de sterkte van de waterkering aangepast zou moeten worden om aan het semi-probabilistische toets voorschrift te voldoen. Bereken vervolgens voor elke aangepaste testcase (aangepast in de zin dat nu een berekening wordt gemaakt met de fictieve waterkering die net aan voldoet aan de semi-probabilistische toets) een faalkans op basis van volledig probabilistische berekeningen. Op deze wijze wordt een relatie verkregen tussen de waarde van de betrouwbaarheidseis enerzijds en de waarde van de betrouwbaarheidseis-afhankelijke veiligheidsfactor anderzijds. Deze relatie is overigens niet eenduidig, voor diverse faalmechanismen resulteert een “puntenwolk”.
- 3.3 Op basis van de afgeleide puntenwolk uit activiteit 3.2. wordt een wiskundige formulering afgeleid die de relatie aangeeft tussen de betrouwbaarheidseis enerzijds en de waarde van de betrouwbaarheidseis-afhankelijke veiligheidsfactor anderzijds. Bij deze formulering wordt “de veilige kant” gekozen, d.w.z. er wordt voor gekozen dat het voldoen aan de semi-probabilistische toets regel in het merendeel van de cases betekent dat de faalkans kleiner is dan de faalkanseis. Er wordt overigens bewust niet nagestreefd om voor 100% van de testcases aan dit laatste criterium te voldoen om te zorgen dat het toets voorschrift niet bovenmatig streng wordt. Om “gemiddeld” op de juiste faalkans uit te komen is beredeneerd dat het afdoende is als 80% van de testcases aan het criterium voldoet.

In de volgende hoofdstukken worden de diverse stappen uitgewerkt voor het faalmechanisme duinafslag. Voor duinafslag is op enkele onderdelen bewust afgeweken van deze procedure. Dit zal telkens beargumenteerd worden.

## 4 Stap 1: Van trajectnorm naar faalkanseis per duinraai

De wettelijk vastgelegde veiligheidsnorm voor overstromen is gedefinieerd per dijktraject. Een dijktraject bestaat uit meerdere dijkvakken, kunstwerken en/of duinraaien. Indien ergens binnen het traject een overstroming plaats vindt is er sprake van “falen” van het dijktraject. Een doorbraak van een primaire waterkering kan veroorzaakt worden door verschillende faalmechanismen, zoals piping, instabiliteit, erosie van de bekleding, duinafslag of constructief falen. Overstromen kan dus plaatsvinden op verschillende locaties en door verschillende faalmechanismen en alle mogelijke combinaties daarvan dragen bij aan de overstromingskans. De kansen voor alle mechanismen en raaien/doorsneden moeten gecombineerd worden tot één overstromingskans voor het hele dijktraject. In een volledig probabilistische berekening worden de kansen van alle onderdelen van het dijktraject berekend, rekening houdend met alle relevante faalmechanismen. De kansen worden vervolgens gecombineerd tot één overstromingskans van het gehele traject. Het dijktraject voldoet indien de berekende faalkans kleiner is dan de toegestane faalkans (de norm).

In een semi-probabilistische toets is een dergelijke aanpak niet mogelijk omdat in deze toets geen *kansen* worden berekend. In de semi-probabilistische toets wordt alleen bepaald of een kering voldoet aan een betrouwbaarheidseis. Dat betekent dat alleen wordt bepaald of wel/niet met voldoende zekerheid gesteld kan worden of de werkelijke overstromingskans kleiner is dan de gestelde eis, maar de waarde van de overstromingskans zelf wordt niet bepaald. Er komt dus uit de semi-probabilistische toets in principe geen informatie beschikbaar over de overstromingskans op raai-, doorsnede-, vak- of trajectniveau. Om toch iets te kunnen zeggen over de mate van veiligheid van het traject wordt voor alle dwarsdoorsneden en raaien in het traject een faalkanseis gedefinieerd voor elk relevant faalmechanisme. De faalkanseisen worden zó gedefinieerd dat, indien op basis van de semi-probabilistische toets wordt vastgesteld dat alle dijkvakken/dwarsdoorsneden hieraan voldoen, met voldoende zekerheid gesteld kan worden dat het dijktraject als geheel ook voldoet. De afzonderlijke faalkanseisen per combinatie van raai/dwarsdoorsnede en mechanisme worden afgeleid uit de wettelijk vastgestelde veiligheidsnorm per dijktraject. Deze faalkanseisen dienen als uitgangspunt van de semi-probabilistische toets voor een doorsnede.

De vertaalslag van de eis op trajectniveau naar de eis per faalmechanisme op raai/doorsnedeniveau gebeurt in twee stappen:

**[1]** In de eerste stap wordt de normkans van het dijktraject verdeeld over de diverse faalmechanismen. Deze “faalkansbegroting” is binnen WTI2017 generiek opgesteld voor alle dijktrajecten, zie Tabel 4.1. Voor het faalmechanisme duinafslag zijn er twee faalkansbegrotingen opgesteld. Voor trajecten die overwegend uit duinen bestaan is 70% van het totale budget gereserveerd voor het mechanisme duinafslag. Indien een dergelijk duintraject een veiligheidsnorm van  $1/1.000^e$  per jaar heeft, betekent dit dat aan het mechanisme duinafslag een faalkanseis van  $0,7 \cdot 1/1.000 = 0,0007 \approx 1/1.430$  per jaar opgelegd wordt. Met andere woorden: de totale kans op een doorbraak in het traject als gevolg van het mechanisme “duinafslag” moet kleiner zijn dan  $1/1.430$  per jaar. Voor duinen die onderdeel uitmaken van trajecten die hoofdzakelijk zijn opgebouwd uit dijken is 10% van het totale budget gereserveerd voor het mechanisme duinafslag. Dit betreft echter de uitzonderingsgevallen, verreweg de meeste duinraaien maken onderdeel uit van een traject waarvoor 70% van het totale budget gereserveerd voor het mechanisme duinafslag.

Tabel 4.1 Faalkansbegroting (bron: Deltares, 2013)

Type kering	Faalmechanisme	Zandige kust	dijken
Dijk	Overloop en golfoverslag	0%	24%
	Opbarsten en piping	0%	24%
	Macrostabieliteit binnenwaarts	0%	4%
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	0%	10%
Kunstwerk	niet sluiten	0%	4%
	Piping	0%	2%
	constructief falen	0%	2%
Duin	duinafslag	70%	0/10% <sup>(*)</sup>
Overig		30%	20/30% <sup>(*)</sup>
<sup>(*)</sup> Voor de trajecten die voor een gedeelte uit duinen bestaan, zal duinafslag vaak een relatief kleine faalkansbijdrage leveren. Voorgesteld wordt om in dergelijke gevallen 10% van de post 'overig' toe te wijzen aan duinafslag. Dit voorkomt dat er voor dergelijke situaties een geheel nieuwe faalkansbegroting moet worden gehanteerd. Voor de eventuele kalibratie van semi-probabilistische toets voorschriften van duinafslag zijn dus alleen de percentages 10% en 70% relevant.			

[2] In de tweede stap wordt, per faalmechanisme, de faalkanseis van het dijktraject vertaald naar een faalkanseis per doorsnede. Ook deze vertaalslag wordt in het kader van het project WTI2017 voorafgaand aan de volgende toetsing generiek vastgesteld. De vertaalslag wordt vastgesteld op basis van ervaringen ten aanzien van het lengte-effect. Voor mechanismen waarvoor het lengte-effect klein is, betekent dit dat de faalkanseis op doorsnedeniveau relatief weinig verschilt van de faalkanseis op trajectniveau. Omgekeerd, voor mechanismen met een relatief groot lengte-effect zal dit verschil groter zijn, hetgeen aanleiding geeft tot relatief strenge faalkanseisen op doorsnedeniveau. Voor het mechanisme duinafslag is sprake van een relatief klein lengte-effect. In HKV (2015) zijn berekeningen voor diverse duintrajecten uitgevoerd met behulp van het rekenprogramma PC-Ring om het lengte-effect voor duinen te kunnen bepalen. Daaruit bleek dat voor realistische duintrajecten het lengte-effect in de orde van 1 tot 1,5 ligt. Dat sluit aan bij eerdere ervaringen in het kader van het project VNK. Op basis van deze uitkomsten is besloten voor WTI2017 uit te gaan van een lengte-effect factor gelijk aan 2. Deze keuze lijkt voldoende veilig, en niet bovenmatig conservatief. Merk op dat voor sommige andere faalmechanismen de lengte-effect factor afhankelijk is gesteld van de lengte van het traject. Voor duinafslag wordt dit niet gedaan op pragmatische gronden: de mogelijke "winst" in scherpte van de toets is beperkt en weegt niet op tegen de eenvoud van het gebruik van een enkele factor.

Samenvattend wordt de vertaalslag van trajectnorm naar faalkanseis per duinraai beschreven met de volgende formule:

$$f_{DR} = \frac{f_B f_N}{f_L} \quad (4.1)$$

Waarbij:

- $f_N$  = de wettelijk vastgestelde toets norm (trajectnorm)
- $f_{DR}$  = de faalkanseis voor een duinraai
- $f_B$  = de fractie van de faalkansbegroting gereserveerd voor duinafslag (70% of 10%)
- $f_L$  = de lengte-effect factor ( $f_L = 2$ )

Ten slotte nog een opmerking over het begrip “falen”. In de toetsing is sprake van falen (of overstromen) indien na duinafslag het resterende profiel niet voldoet aan de eisen van het in WTI2017 gedefinieerde “restprofiel”. In de toetsing speelt het restprofiel dus een belangrijke rol. In het huidige rapport is dat niet het geval. Hier hanteren we falen als een overschrijding van een bepaalde afslagpositie, ongeacht hoe deze gedefinieerd is (en dus: grensprofiel-onafhankelijk). De belangrijkste reden is dat we bij de kalibratie een vergelijking maken tussen de uitkomsten van het volledig probabilistische model en het semi-probabilistische model. Deze beide modellen berekenen de afslagpositie die correspondeert bij een gegeven faalkanseis. Of bij deze afslagpositie voldaan wordt aan de eisen van het grensprofiel is een activiteit die de toetsers uitvoert als vervolgstap van de berekeningen met het (semi-)probabilistische model. De werking van het (semi-)probabilistische model kan dus onafhankelijk beoordeeld worden van de definitie van het grensprofiel.



## 5 Stap 2: De vorm van het semi-probabilistisch toets voorschrift

### 5.1 Inleiding

Het bepalen van de vorm van het semi-probabilistische toets voorschrift: behelst de volgende activiteiten:

- Definieer testcases.
- Implementeer de grenstoestandfunctie(s) van het beschouwde faalmechanisme en belastingmodel(len) van de dijkvakken in een probabilistische rekenomgeving.
- Bereken faalkansen en invloedscoëfficiënten voor alle testcases op basis van probabilistische berekeningen.
- Stel het veiligheidsformat vast.

Deze vier stappen worden in het vervolg van dit hoofdstuk uitgewerkt.

### 5.2 Definitie van testcases

#### 5.2.1 Locaties

Het vergelijken van de resultaten van het probabilistisch model met de uitkomsten van de verschillende semi-probabilistische modellen is gedaan voor 45 duinraaien verspreid over de kust. Voor de Hollandse kust en Wadden eilanden is een vergelijking gemaakt voor de locaties die ook zijn gebruikt bij afleiding van het semi-probabilistische model voor het VTV2006 (WL | Delft Hydraulics, 2007) en concept VTV2011 (Deltares, 2011), aangevuld met een aantal locaties voor de Zeeuwse kust. Figuur 5.1 en Tabel 5.1 geven een overzicht van de 45 raaien die zijn gebruikt tijdens deze studie.



Figuur 5.1 Overzicht van locaties waarvoor het resultaat van een probabilistische berekening vergeleken is met de verschillende semi-probabilistische modellen.

Tabel 5.1 Overzicht van gebruikte locaties.

<b>Kustvak</b>	<b>Raainummer (RSP)</b>
<b>Schiermonnikoog</b>	301
<b>Schiermonnikoog</b>	600
<b>Schiermonnikoog</b>	700
<b>Ameland</b>	100
<b>Ameland</b>	1000
<b>Ameland</b>	1400
<b>Ameland</b>	4840
<b>Ameland</b>	4900
<b>Terschelling</b>	100
<b>Terschelling</b>	1000
<b>Terschelling</b>	1500
<b>Terschelling</b>	1700
<b>Vlieland</b>	4098
<b>Vlieland</b>	4377
<b>Vlieland</b>	5005
<b>Vlieland</b>	5200



<b>Kustvak</b>	<b>Raainummer (RSP)</b>
<b>Vlieland</b>	5400
<b>Vlieland</b>	5460
<b>Texel</b>	880
<b>Texel</b>	1853
<b>Texel</b>	1912
<b>Texel</b>	3081
<b>Noord-Holland</b>	308
<b>Noord-Holland</b>	928
<b>Noord-Holland</b>	1483
<b>Noord-Holland</b>	1955
<b>Noord-Holland</b>	3775
<b>Rijnland</b>	6625
<b>Rijnland</b>	8175
<b>Delfland</b>	9975
<b>Delfland</b>	11196
<b>Delfland</b>	11825
<b>Goeree</b>	1000
<b>Goeree</b>	1625
<b>Schouwen</b>	357
<b>Schouwen</b>	939
<b>Schouwen</b>	1465
<b>Noord-Beveland</b>	300
<b>Walcheren</b>	820
<b>Walcheren</b>	1795
<b>Walcheren</b>	2408
<b>Walcheren</b>	2930
<b>Zeeuws-Vlaanderen</b>	251
<b>Zeeuws-Vlaanderen</b>	663
<b>Zeeuws-Vlaanderen</b>	1401

### 5.2.2 Profiel invoer

Bij alle berekeningen is gerekend met referentieprofielen in plaats van de werkelijk gemeten profielen. In het algemeen geldt dat de gevoeligheid van de berekende ontwerpapunten niet sterk afhankelijk is van het ingevoerde profiel. De gevonden afslagposities zijn in dit geval echter niet representatief voor de werkelijke situatie. Daarom moet de uiteindelijke semi-probabilistische toets wel met werkelijk gemeten profielen worden uitgevoerd.

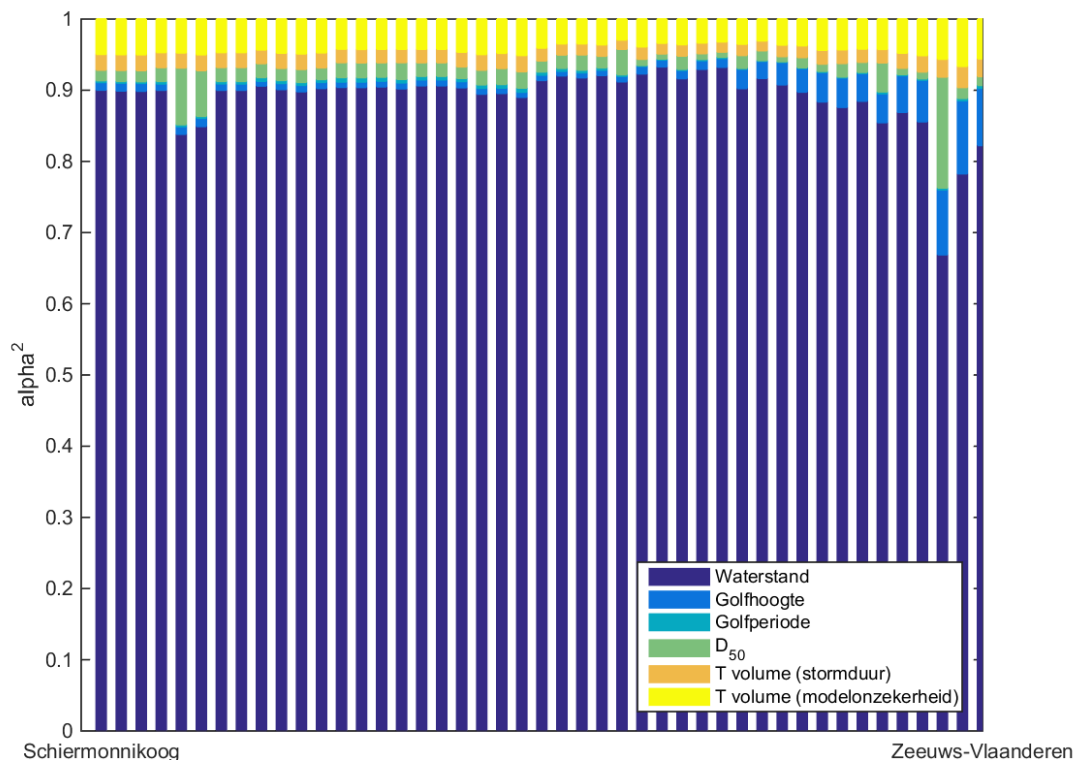
### 5.3 Het probabilistische model

Het probabilistische model dat wordt toegepast in het kader van WT12017 is nagenoeg hetzelfde model als het probabilistische model dat is toegepast in het kader van VTV2006 (zie paragraaf 2.1). Het enige verschil is dat in het probabilistische model van WT12017 een extra stochast wordt toegevoegd: de onzekerheid in de waterstand. Deze extra stochast wordt meegenomen in probabilistische en semi-probabilistische berekeningen door de stochasten “waterstand” en “onzekerheid in de waterstand” te combineren. Het resultaat is een nieuwe kansverdeling van de waterstand waar het effect van onzekerheden in is verdisconteerd. Deze nieuwe kansverdeling wordt gebruikt om de waterstand (het rekenpeil) te bepalen die wordt gebruikt in de semi-probabilistische toets. Op deze wijze wordt in de semi-probabilistische toets rekening gehouden met het effect van onzekerheden in de waterstand, zonder dat daarbij een extra variabele geïntroduceerd wordt. Het in rekening brengen van de onzekerheid leidt tot een verhoging van het rekenpeil van in de orde 1 tot 2 dm.

In het vervolg van het huidige rapport wordt verder geen onderscheid gemaakt tussen de stochasten “waterstand” en “onzekerheid in de waterstand”. Waar in het vervolg gesproken wordt over de stochast “waterstand”, wordt aangenomen dat in de onderliggende statistiek rekening is gehouden met (kennis-)onzekerheden.

### 5.4 Betrouwbaarheidsindices en invloedscoëfficiënten

Figuur 5.2 toont de gekwadrateerde waarden van de berekende invloedscoëfficiënten voor de 6 stochasten op basis van probabilistische afslagberekeningen voor de 45 testlocaties. Uit de figuur blijkt duidelijk dat de waterstand verreweg de meest invloedrijke stochastische variabele is. De gekwadrateerde waarde van de invloedscoëfficiënt van de waterstand is voor de meeste locaties ongeveer gelijk aan 0,9. Dit is in lijn met de bevindingen van Alkyon/Delft Hydraulics/TU Delft (2007) waar hetzelfde probabilistische model is toegepast. Het is belangrijk te realiseren dat de invloed van de beide golfparameters relatief klein zijn vanwege het feit dat deze in het probabilistische model conditioneel zijn gemodelleerd op de waterstand. De invloed van golven op het proces van duinafslag komt daardoor grotendeels tot uitdrukking in de invloedscoëfficiënt van de waterstand. De getoonde invloedscoëfficiënten van de golfparameters hebben feitelijk alleen betrekking op de stochast die de afwijking van de verwachtingswaarde bij een gegeven waterstand representeert, waarbij de verwachtingswaarde een deterministische functie is van de waterstand.



Figuur 5.2 Gekwadrateerde waarden van invloedscoëfficiënten voor de 6 stochastische variabelen

### 5.5 Keuze van het veiligheidsformat

Het veiligheidsformat legt vast met welke karakteristieke waarden en met welke veiligheidsfactor(en) de semi-probabilistische toetsing moet worden uitgevoerd. Voor elke stochast moet worden aangegeven wat de karakteristieke waarde is, zoals de 5%-ondergrens of de 95%-bovengrens. Ook moet worden aangegeven met welke veiligheidsfactoren moet worden gerekend, zoals modelfactoren, materiaalfactoren en schematiseringfactoren. De berekende waarden van de invloedscoëfficiënten, zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn een belangrijke bron van informatie over de mogelijke doelmatige keuzen die hierin gemaakt kunnen worden. De relatie tussen rekenwaarden, karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren is als volgt:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}; \quad S_d = \gamma_S S_k \quad (5.1)$$

Waarin:

- $R_d$  = rekenwaarde van een sterkteparameter
- $R_k$  = karakteristieke waarde van een sterkteparameter
- $\gamma_R$  = veiligheidsfactor van een sterkteparameter
- $S_d$  = rekenwaarde van een belastingparameter
- $S_k$  = karakteristieke waarde van een belastingparameter
- $\gamma_S$  = veiligheidsfactor van een belastingparameter

De rekenwaarde wordt uiteindelijk toegepast in het semi-probabilistische toets voorschrift. In het vervolg van dit rapport wordt voornamelijk gesproken over rekenwaarden omdat het werken met veiligheidsfactoren in het rekenvoorschrift voor duinafslag niet doelmatig is.

Een voor de hand liggende keuze van de rekenwaarde is om deze gelijk te kiezen aan de waarde die correspondeert met berekende ontwerppuntwaarden. Voor normaal verdeelde variabelen betekent dit:

$$X_d = \mu_X - \alpha_X \beta \sigma_X \quad (5.2)$$

Waarin:

- $X$  = stochastische variabele
- $\alpha_X$  = berekende invloedscoefficiënt van variabele  $X$
- $\beta$  = betrouwbaarheidseis voor een raai in termen van een betrouwbaarheidsindex
- $\mu_X$  = gemiddelde waarde van de variabele
- $\sigma_X$  = standaarddeviatie van de variabele

In voorgaande toetsronden zijn de rekenwaarden van de variabelen zoveel mogelijk conform de berekende waarden in het ontwerppunt gekozen. Dat heeft geresulteerd in de volgende keuzes voor de zes stochasten van paragraaf 2.1.2<sup>[FD1]</sup>:

Tabel 5.2 Keuze van rekenwaarden in het semi-probabilistische model voor de VTV2006

- [1]** De rekenwaarde van de *waterstand* (rekenpeil) wordt gelijk gekozen aan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de doorsnede-eis, minus 1/3 decimeringshoogte. In het verleden is dit ook vaak als volgt geformuleerd: het rekenpeil is gelijk aan het toets peil plus 2/3 decimeringshoogte.
- [2]** De rekenwaarde van de *golfhoogte* is gelijk aan de verwachtingswaarde, gegeven de gekozen waterstand.
- [3]** De rekenwaarde van de *piekperiode* is gelijk aan de verwachtingswaarde, gegeven de gekozen golfhoogte.
- [4]** De rekenwaarde van de *korreldiameter* is een waarde die iets onder het gemiddelde ligt. Deze waarde is gegeven in een tabel voor een aantal locaties langs de kust. Voor overige locaties wordt de waarde bepaald op basis van interpolatie.
- [5+6]** De toeslag op het afslagvolume voor effecten van *stormduur* en *modelfouten* worden samengevoegd in het semi-probabilistische model. Het gecombineerde effect is een toeslag op het afslagvolume met 25%. Anders gezegd, het initieel berekende afslagvolume met Duros+, op basis van de rekenwaarden stochastwaarden [1] t/m [4], wordt vermenigvuldigd met 1,25

Het probabilistische model en het afslagmodel dat wordt toegepast in het kader van WT12017 zijn onveranderd in vergelijking met VTV2006 (NB: invoerstatistieken van de belasting zijn wel gewijzigd). Dat betekent dat de bovenstaande keuzes voor de rekenwaarden overgenomen kunnen worden in het kader van WT12017. De rekenwaarden zijn daarmee consistent met de berekende ontwerppunten. Er zijn echter ook argumenten aan te dragen om hier van af te wijken. Bijvoorbeeld voor variabelen met een kleine absolute waarde van de

invloedscoëfficiënt kan het omwille van uitlegbaarheid doelmatig zijn om deze gelijk te kiezen aan de gemiddelde waarde ( $\mu$ ) in plaats van een kleine afwijking van het gemiddelde conform vergelijking (5.2).

Een andere praktische reden om af te wijken van een keuze conform de berekende ontwerppunten is beschreven in punt 2.4 van de procedure van hoofdstuk 3. Daarin is geformuleerd dat de strategie in WT12017 is om de rekenwaarde van de waterstand gelijk te kiezen aan de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm voor het dijktraject. Het voordeel van die keuze is dat de rekenwaarde van de waterstand dan voor alle toets sporen gelijk is. In de regel zal deze keuze in enige mate afwijken van de waarde die volgt uit de berekende ontwerppunten (vgl. (5.2)). Dat kan doorgaans gecompenseerd in het semi-probabilistische model door voor één of meerdere sterkte-variabelen ook rekenwaarden te kiezen die afwijken van de waarden die volgen uit vgl. (5.2). In die zin werkt het kiezen van rekenwaarden in het semi-probabilistische model enigszins als 'communicerende vaten'. Voor het faalmechanisme duinafslag is dit echter niet vanzelfsprekend. Zoals blijkt uit Figuur 5.2 is de waterstand zeer dominant in faalkansberekeningen. Dat betekent dat een aanpassing in de keuze van de rekenwaarde van de waterstand niet zonder meer gecompenseerd kan worden door een aanpassing in de rekenwaarde van een andere variabele, zonder dat daarbij de fysica geweld wordt aangedaan. Het is daarom van belang om na te gaan welke consequenties deze keuze van de waterstand heeft voor de rekenwaarden van de overige variabelen. In het vervolg van deze paragraaf zullen daarom twee mogelijke keuzes van de waterstand overwogen worden:

- 1 Waterstand conform het ontwerp punt.
- 2 Waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskansnorm voor het dijktraject;

De eerste optie is consistent met het semi-probabilistische toets voorschrift van de voorgaande toets rond, de tweede optie is consistent is met de overige toets sporen in het kader van WT12017. Uit consistentie-overwegingen is voor beide opties dus iets te zeggen.

De rekenwaarde van de waterstand is in de eerste optie iets hoger dan de rekenwaarde van de waterstand in de tweede optie. De lagere waterstand in de tweede optie moet daarom gecompenseerd worden door een 'nieuwe' keuze van één van de andere variabelen om op min of meer dezelfde rekenresultaten uit te komen. De meest voor de hand liggende rekenwaarde om aan te passen is de 'toeslag op het afslagvolume', omdat deze na de waterstand de hoogste invloedscoëfficiënt heeft, zie paragraaf 5.4. Op basis van testsommen met de 45 testlocaties van paragraaf 5.2 is voor de beide keuze-opties van de waterstand afgeleid welke waarde van de toeslagvolume leidt tot resultaten die zo goed mogelijk overeenkomen met de resultaten van probabilistische afslagberekeningen (Tabel 5.3).

Tabel 5.3 Berekende toeslagvolumes voor de twee opties van het rekenpeil

Optie	Rekenpeil	toeslagvolume
1	Conform VTV2006	24%
2	trajectnorm	31%

Hier uit kan worden geconcludeerd dat:

- Het resultaat voor optie 1 aansluit bij de oorspronkelijke 25% waarde uit VTV2006
- Een lagere rekenwaarde van de waterstand (optie 2) gecompenseerd moet worden met een toename van het toeslagvolume van 7%. Dit is een relatieve toename van  $7/24 \approx 30\%$ .

De beide opties van Tabel 5.3 leiden tot min of meer dezelfde resultaten in termen van afslagpositie. Op rekenkundige gronden is er dus geen voorkeur voor één van beide opties. Uit oogpunt van consistentie zijn, zoals eerder gemeld, ook voor beide opties argumenten aan te dragen. De keuze is daarom gemaakt op basis van fysische afwegingen. Uit dat oogpunt verdient optie 1 de voorkeur. Het hogere toeslagvolume in optie 2 zal namelijk leiden tot een toename in het aantal duinraaien waarvoor het toeslagvolume resulteert in fysische artefacten. Dit lichten we onderstaand toe, met verwijzing naar de eerder uitleg van het afslagmodel en het toeslagvolume in paragraaf 2.1.2.

Het toeslagvolume is geïntroduceerd om onzekerheden in de afslagberekeningen 'af te vangen'. Het toeslagvolume ligt aan landwaartse zijde van het initieel berekende afslagvolume. Na toevoeging van het afslagvolume verliest het totale profiel zijn oorspronkelijke 'natuurlijke' profiel. Vooral voor relatief lage duinen resulteert het toeslagvolume in een relatief grote landinwaartse verschuiving van het totale afslagprofiel en daarmee een relatief grote afwijking van het natuurlijke afslagprofiel. Een toename in de rekenwaarde van het toeslagvolume zal dit effect versterken. Daarom heeft een dergelijke toename op fysische gronden niet de voorkeur. We geven er daarom de voorkeur aan om het semi-probabilistische rekenvoorschrift niet te wijzigen op dit onderdeel.

Het gevolg is dat de keuze van de rekenwaarde van de waterstand, net als de keuze van de rekenwaarden van de overige variabelen, ongewijzigd blijft in vergelijking met het bestaande rekenvoorschrift uit VTV2006. Benadrukt moet worden dat dit de keuze van de waterstand betreft *gegeven de faalkanseis van het duinraai*. Voor veel duinraaien verandert de faalkanseis in vergelijking met voorgaande toets ronden als gevolg van de nieuwe normen en als gevolg van een gewijzigde vertaalslag van de norm naar de faalkanseis per duinraai (zie hoofdstuk 4). Bovendien verandert ook de statistiek van de waterstand, voornamelijk als gevolg van het feit dat kennisonzekerheden in WTI2017 worden meegenomen in de statistiek, waar dat in vorige toets ronden niet het geval was. Kortom, in absolute zin zullen rekenpeilen voor de meeste duinraaien veranderen in vergelijking met voorgaande toets ronden. Wat ongewijzigd blijft is de relatie tussen de faalkanseis van het duinraai enerzijds en de overschrijdingskans van het gekozen rekenpeil anderzijds.

## 6 Stap 3: Vaststellen van veiligheidsfactoren

### 6.1 Rekenwaarden voor niet beta-afhankelijke variabelen

De generieke aanpak voor het opstellen van semi-probabilistische modellen in WTI2017 voorziet in de keuze van één variabele waarvan de waarde varieert als functie van de betrouwbaarheidseis. Deze variabele wordt de “beta-afhankelijke” variabele genoemd, daarmee verwijzend naar de Griekse letter  $\beta$  die wordt gebruikt als aanduiding van de betrouwbaarheidseis, ook wel aangeduid als faalkanseis. Voor de overige variabelen wordt dus een waarde gekozen die voor het hele bereik aan betrouwbaarheidseisen wordt toegepast. Deze variabelen worden aangeduid als “niet beta-afhankelijke variabelen”.

In het voorgestelde toets voorschrift is de waterstand de beta-afhankelijke variabele. Belangrijk daarbij is te realiseren dat de stochastische variabelen “golfhoogte” en “piekperiode” afhankelijk zijn van de waterstand en dus automatisch “meebewegen” met de waterstand. Indirect zijn de gekozen waarden van de golfhoogte en piekperiode dus ook beta-afhankelijk. Hetzelfde geldt voor het toeslagvolume, deze neemt in absolute zin ook toe als de waterstand toeneemt.

De keuze voor de waterstand als beta-afhankelijke variabele in het semi-probabilistische model voor duinafslag is ingegeven door het feit dat deze variabele veruit de meest bepalende stochastische variabele is in de probabilistische berekeningen (zie paragraaf 5.4). Indien gekozen zou zijn voor een andere beta-afhankelijke variabele, zou deze dusdanig sterk moeten variëren voor de verschillende relevante waarden van beta dat dit resulteert in fysisch onrealistische/ongewenste waarden.

Voor de “niet beta-afhankelijke variabelen” worden in het semi-probabilistische toets voorschrift dezelfde rekenwaarden gehanteerd als destijds in het VTV 2006. De keuzes destijds waren gebaseerd op resultaten van probabilistische berekeningen en gaven destijds goede resultaten voor verschillende betrouwbaarheidseisen. Mede omdat het achterliggende probabilistische model niet is veranderd en deze rekenwaarden bij gebruikers bekend zijn, is er geen reden om de keuzes aan te passen, waarbij uiteraard wordt gecontroleerd (in paragraaf 6.3) dat de resultaten van het semi-probabilistische model nog steeds stroken met de uitkomsten van het volledig probabilistische model. De gekozen waarden van de niet beta-afhankelijke variabelen staat vermeld in Tabel 5.2 (variabelen [2] t/m [6]).

### 6.2 Rekenwaarden voor de beta-afhankelijke variabele

#### 6.2.1 Wiskundige afleiding

Zoals aangegeven in de vorige paragraaf is de waterstand “beta-afhankelijk”. Met andere woorden: de keuze van de waterstand in het semi-probabilistische model is afhankelijk van de betrouwbaarheidseis op raai-niveau. Dat is op zich niet nieuw, ook in het VTV2006 was de waterstand afhankelijk van de betrouwbaarheidseis. Omdat de keuze van de waterstand destijds gebaseerd was op probabilistische berekeningen met hetzelfde probabilistische model ligt het voor de hand om voor de waterstand dezelfde keuze aan te houden als in het VTV2006. Dat wil zeggen: dezelfde keuze voor een gegeven betrouwbaarheidseis. De formulering van de betrouwbaarheidseis per raai in WTI2017 verschilt echter van die van het VTV2006. Dat moet dus consistent verwerkt worden in de formulering van de keuze van de waterstand. Dat wordt uitgewerkt in het vervolg van deze paragraaf.

Definieer:

- $f_N$  = de wettelijk vastgestelde toets norm (of feitelijk de trajectnorm)
- $f_{DR}$  = de faalkanseis voor een duinraai
- $f_B$  = de fractie van de faalkansbegroting gereserveerd voor duinafslag (70% of 10%)
- $f_L$  = de lengte-effect factor ( $f_L = 2$ , zie hoofdstuk 4)
- $h_R$  = rekenwaarde voor de waterstand in het semi-probabilistische model
- $h(f)$  = de waterstand als functie van de overschrijdingsfrequentie,  $f$
- $h_d$  = decimeringshoogte

In de systematiek van het VTV2006 werd een duinraai getoetst aan de volgende faalkanseis:

$$f_{DR} = \frac{f_N}{10} \quad (6.1)$$

Dus, bijvoorbeeld, voor de Hollandse kust was de norm gelijk aan  $1/10.000^e$  per jaar en dat betekende een faalkanseis van  $1/100.000^e$  per jaar voor een duinraai. De rekenwaarde van de waterstand, het "rekenpeil", werd gelijk gekozen aan de waterstand bij de norm plus  $2/3$  decimeringshoogte:

$$h_R = h(f_N) + \frac{2}{3}h_d \quad (6.2)$$

Per definitie betekent een toename van de waterstand met één decimeringshoogte een reductie van een factor 10 in overschrijdingsfrequentie:

$$h(f_N) + h_d = h\left(\frac{f_N}{10}\right) \Rightarrow h(f_N) = h\left(\frac{f_N}{10}\right) - h_d \quad (6.3)$$

Substitutie van (6.3) in (6.2) geeft:

$$h_R = h(f_N) + \frac{2}{3}h_d = h\left(\frac{f_N}{10}\right) - h_d + \frac{2}{3}h_d = h\left(\frac{f_N}{10}\right) - \frac{1}{3}h_d \quad (6.4)$$

Substitutie van (6.1) in (6.4) geeft:

$$h_R = h(f_{DR}) - \frac{1}{3}h_d \quad (6.5)$$

In woorden: de systematiek van het VTV2006 is in het semi-probabilistische model voor duinen de waterstand (het rekenpeil) gelijk gekozen aan de waterstand die correspondeert met de faalkanseis voor een duinraai minus  $1/3$ \*decimeringshoogte. Per definitie betekent een afname in de waterstand met één decimeringshoogte een toename van een factor 10 in overschrijdingsfrequentie. Een afname van  $1/3$ \*decimeringshoogte correspondeert dan met een toename van de overschrijdingsfrequentie met een factor die gelijk is aan de derdemachtswortel van 10:

$$h(f_{DR}) - \frac{1}{3}h_d = h(c * f_{DR}); c = \sqrt[3]{10} \approx 2,15 \quad (6.6)$$



In woorden: in de voorgaande toets ronden is in het semi-probabilistische model voor duinen de waterstand (het rekenpeil) gelijk gekozen aan de waterstand die een overschrijdingsfrequentie heeft van 2,15 keer de faalkanseis voor het duinraai:

$$h_R = h(2,15 f_{DR}) \quad (6.7)$$

Vergelijking (6.7) geeft een alternatief rekenrecept voor de keuze van de waterstand conform de methode van VTV2006:

1. Bepaal de faalkanseis voor een duinraai,  $f_{DR}$
2. Kies als rekenwaarde de waterstand die correspondeert met een overschrijdingsfrequentie van  $2,15 \cdot f_{DR}$ .

Dit resultaat wordt ook al genoemd in de oorspronkelijke Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering uit 1984. Daar staat op pagina 24: 'De overschrijdingsfrequentie van het rekenpeil is 0,215 maar de overschrijdingsfrequentie van het ontwerppeil, en dus 2,15 zo groot als de betreffende maximaal toelaatbare doorbreekkans'. In WTI2017 geldt dat de faalkanseis van een duinraai gelijk is aan (zie hoofdstuk 4):

$$f_{DR} = \frac{f_B f_N}{f_L} \quad (6.8)$$

Invullen in vergelijking (6.7) geeft:

$$h_R = h\left(2,15 \frac{f_B f_N}{f_L}\right) \quad (6.9)$$

Dit is een generieke formulering voor de keuze van de waterstand. In hoofdstuk 4 is beargumenteerd dat de waarde van de lengte-effect-factor  $f_L$  in WTI2017 gelijk gekozen wordt aan 2:

$$h_R = h\left(2,15 \frac{f_B f_N}{2}\right) = h(1,075 f_B f_N) \quad (6.10)$$

Een factor 1,075 in overschrijdingsfrequentie correspondeert met een toe/afname van de waterstand met 0,03\*decimeringshoogte. Langs de kust is de decimeringshoogte maximaal in de orde van 1 meter, dus het effect van de factor 1,075 in vergelijking (6.10) is maximaal 3 centimeter. Voor de rekenwaarde van de waterstand is een dergelijk verschil verwaarloosbaar. De volgende vereenvoudiging van de formulering is dus aanvaardbaar:

$$h_R = h(f_B f_N) \quad (6.11)$$

Het is belangrijk te realiseren dat deze formulering correspondeert met een waarde van 2 voor de lengte-effect-factor  $f_L$ . Indien in de toekomst een andere keuze gemaakt wordt voor deze factor vervalt de validiteit van formule (6.11) en moet gebruik gemaakt worden van de meer generieke formule (6.9). Uit formule (6.11) blijkt dat de keuze van de waterstand

afhankelijk is van de trajectnorm,  $f_N$ , en de fractie,  $f_B$ , van de faalkansbegroting die gereserveerd is voor het faalmechanisme duinafslag. Deze laatste waarde is voor vrijwel alle duinraaien gelijk aan 70% (0,7) voor enkele uitzonderingen is deze gelijk aan 10% (0,1).

### 6.2.2 Overzicht rekenrecepten ter bepaling van het rekenpeil

Uit de vorige paragraaf blijkt dat er meerdere wiskundige formuleringen (rekenrecepten) zijn om de waarde van het rekenpeil uit te rekenen op basis van de trajectnorm,  $f_N$ , en de statistiek van de waterstand. We geven hier een overzicht:

#### *Variant 1*

Stap 1: Leid de faalkanseis voor een duinraai,  $f_{DR}$ , af uit de norm op basis van vgl (6.8)

Stap 2: Bepaal de waterstand,  $h^*$ , met een overschrijdingskans gelijk aan  $f_{DR}$ .

Stap 3: Kies het rekenpeil gelijk aan  $h^*$  minus 1/3 decimeringshoogte

#### *Variant 2*

Stap 1: Leid de faalkanseis voor een duinraai,  $f_{DR}$ , af uit de norm op basis van vgl (6.8).

Stap 2: Bepaal frequentie,  $f^*$ , =  $2,15 \cdot f_{DR}$ .

Stap 3: Kies het rekenpeil gelijk aan de waterstand met overschrijdingskans  $f^*$

#### *Variant 3*

Kies het rekenpeil volgens formule (6.9)

#### *Variant 4*

Kies het rekenpeil volgens formule (6.11)

Varianten 1 t/m 3 zijn drie formuleringen die elk tot *exact* dezelfde rekenpeilen leiden. Variant 4 leidt tot *nagenoeg* dezelfde rekenpeilen, de verschillen zijn hooguit enkele centimeters. Variant 4 is alleen geldig bij het huidige voorstel van de lengte-effect factor (lengte-effect factor = 2).

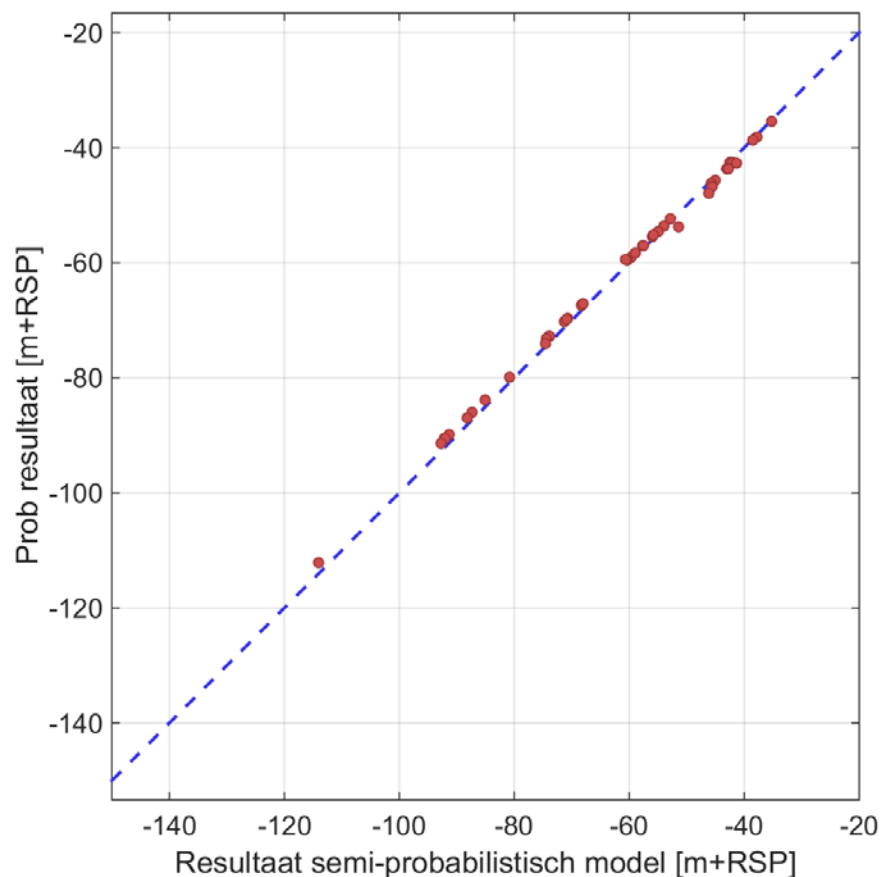
Varianten 1 en 2 hebben als voordeel dat deze herkenbaar zijn voor gebruikers die ervaring hebben met het toetsen van duinwaterkeringen in voorgaande toets rondes. Variant 3 en 4 hebben als voordeel dat het rekenpeil geformuleerd is op een manier die direct de relatie toont met de norm voor het dijktraject en zijn in die zin consistent met overige toets sporen in het kader van WTI2017. Optie 4 heeft als extra voordeel de grote mate van eenvoud. Het nadeel van optie 4 is de beperkte geldigheid, indien wordt besloten tot een andere waarde voor het lengte-effect is deze formulering niet meer geldig.

Voor het succesvol uitvoeren van de toetsing is het overigens niet van belang om de bovenstaande formuleringen uit te werken. De rekenpeilen worden namelijk uitgeleverd als onderdeel van het toets instrumentarium. Het bovenstaande is dus vooral van belang als achtergrondinformatie.

### 6.3 Vergelijking van probabilistische en semi-probabilistische rekenresultaten

Figuur 6.1 maakt een vergelijking tussen berekende afslagposities met het semi-probabilistische en volledig probabilistische model voor alle locaties van Tabel 5.1 (rode punten). De afslagposities corresponderen met de trajectnorm. De afslagposities van het probabilistische model is de afslagposities met een overschrijdingskans die gelijk is aan de faalkanseis op doorsnedeniveau. De faalkanseis op doorsnedeniveau wordt berekend uit de trajectnorm conform hoofdstuk 4.

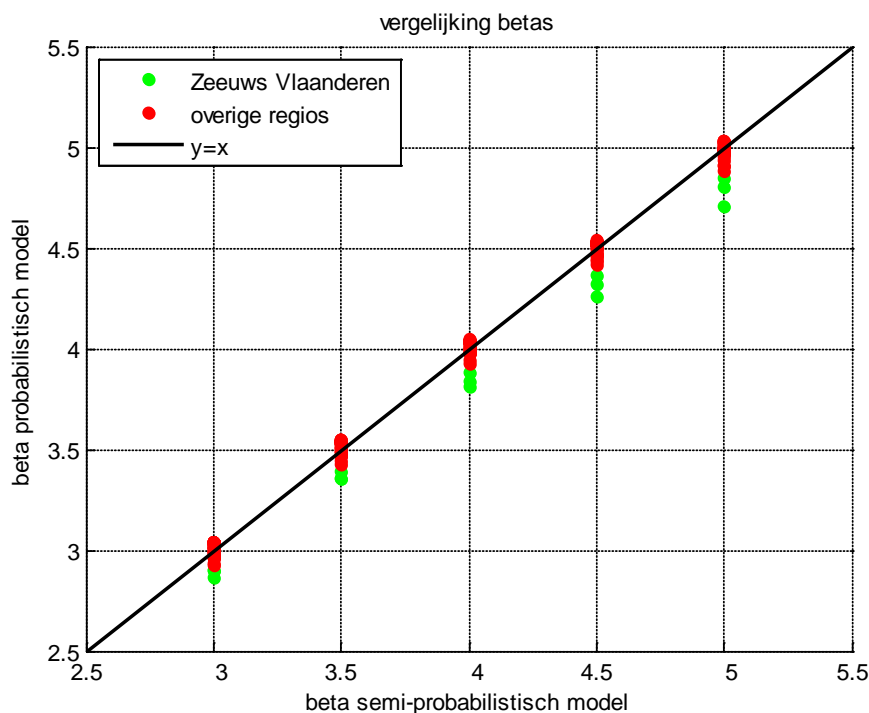
De afslagposities liggen zeer dicht bij de lijn  $y=x$  (blauwe stippellijn) waaruit blijkt dat de afslagposities van de twee typen modellen zeer goed overeenkomen. Dit geeft aan dat het semi-probabilistische model een zeer goede benadering is van het volledig probabilistische model.



Figuur 6.1 Vergelijking tussen berekende afslagposities met het semi-probabilistische en volledig probabilistische model (rode punten) voor alle locaties van Tabel 5.1. De afslaglengtes corresponderen met de trajectnorm. De blauwe stippellijn is de lijn  $y=x$ .

In Figuur 6.1 corresponderen de berekende afslagposities met de trajectnorm. Voor de volledigheid is gecontroleerd of voor andere betrouwbaarheidseisen eveneens een goede overeenkomst wordt gevonden tussen het semi-probabilistische en volledig probabilistische model. Figuur 6.2 maakt een vergelijking berekende betrouwbaarheidsindices met het semi-probabilistische en volledig probabilistische model voor alle locaties van Tabel 5.1. Deze Figuur is het resultaat van de volgende rekenprocedure:

- 1 Varieer de waarde van de betrouwbaarheidsindex van 3 tot 5 in stappen van 0,5.
- 2 Voor elke waarde van de betrouwbaarheidsindex voer de volgende stappen uit:
  - a. Beschouw de geselecteerde betrouwbaarheidsindex als de norm van een traject;
  - b. Bereken voor de locaties van Tabel 5.1 de afslagposities op basis van het semi-probabilistische toets voorschrift;
  - c. Bereken met het volledig probabilistische model de overschrijdingskans op van de afslagposities uit stap 2b;
  - d. Reken de overschrijdingskans uit stap c om in een betrouwbaarheidsindex
- 3 Plot alle berekende combinaties van betrouwbaarheidsindices.



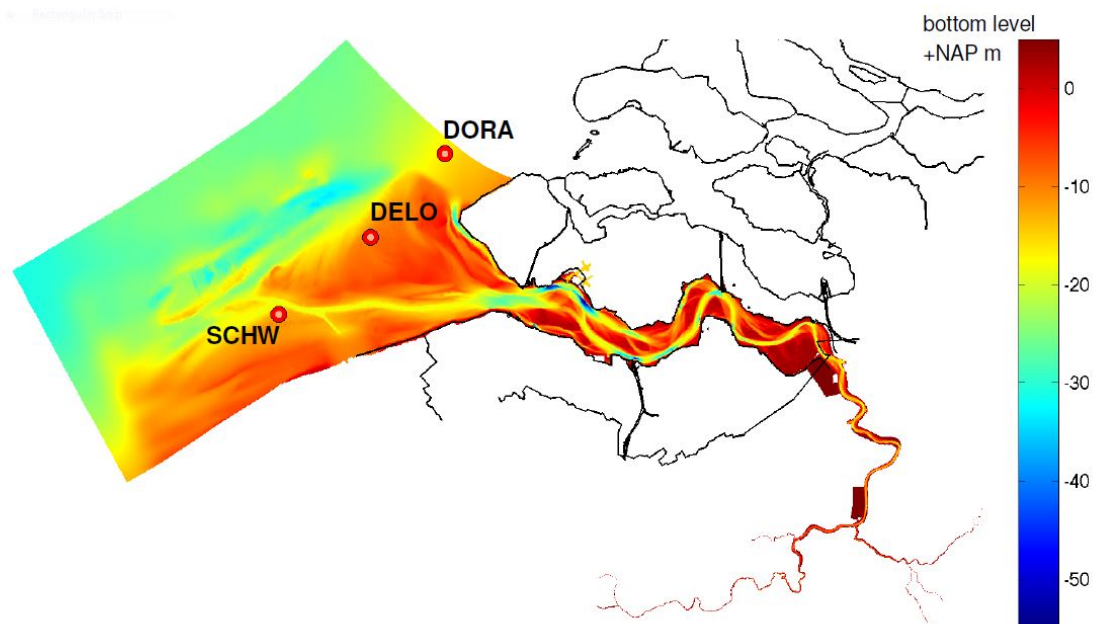
Figuur 6.2 Vergelijking tussen berekende betrouwbaarheidsindices met het semi-probabilistische en volledig probabilistische model voor alle locaties van Tabel 5.1 en het bereik van betrouwbaarheidsindices van 3 tot 5.

Uit de figuur blijkt dat de berekende betrouwbaarheidsindices met het semi-probabilistische en het volledig probabilistische model goed met elkaar overeen komen. De grootste verschillen worden geconstateerd voor de drie locaties op Zeeuws Vlaanderen (groene punten in Figuur 6.2). Voor deze locaties geldt dat het semi-probabilistische model aan de "onveilige kant" zit in vergelijking met de resultaten van het volledig probabilistische model.

Dit 'afwijkende gedrag' voor locaties op Zeeuws Vlaanderen kan verklaard worden door het feit dat de invloedscoëfficiënt van de stochast 'golfhoogte' voor deze locaties hoger is dan voor de andere locaties (zie Figuur 5.2; de drie meest rechtste locaties liggen op Zeeuws Vlaanderen). In het semi-probabilistische rekenvoorschrift wordt de verwachtingswaarde van de stochast 'golfhoogte' toegepast. Als het relatieve belang, uitgedrukt in een invloedscoëfficiënt, van een stochast klein is, is een dergelijke keuze gerechtvaardigd. Hoe groter de invloedscoëfficiënt, des te groter wordt 'de noodzaak' om in het semi-probabilistische model een waarde te kiezen die afwijkt van het gemiddelde. Het feit dat voor

de golfhoogte niet wordt afgeweken van het gemiddelde heeft dus vooral voor locaties op Zeeuws Vlaanderen tot gevolg dat het semi-probabilistische model tot een lichte onderschatting van de berekende afslaglengte leidt, in vergelijking met het volledig probabilistische model.

Uit het oogpunt van consistentie in de gelaagde toetsing is het wenselijk dat de resultaten van het semi-probabilistische model aan de “veilige kant” zitten in vergelijking met de resultaten van het volledig probabilistische model. De mate waarin hieraan niet voldaan wordt is echter beperkt. Voor locaties op Zeeuws Vlaanderen geldt als norm een toegestane oversstromingskans van 1/1.000 per jaar. Bij deze norm zijn de verschillen in uitkomsten tussen het semi-probabilistische model en het probabilistische model in de orde van 2m duinafslag voor de locaties op Zeeuws Vlaanderen. In termen van betrouwbaarheidsindex is dat een verschil van ongeveer 0,1. Dergelijke verschillen zijn dusdanig beperkt dat het niet gerechtvaardigd is om voor dit gebied een uitzonderingsregel te introduceren in het VTV. Bovendien zijn de berekende afslaglengtes voor deze regio naar verwachting een overschatting van werkelijke afslaglengtes omdat gerekend wordt met golfstatistiek die gebaseerd is op metingen in station Scheur West (locatie ‘SCHW’ in Figuur 6.3). Tussen dit station en de kust van Zeeuws Vlaanderen ligt een relatief ondiepe bodem die een reducerende werking heeft op de golfbelasting. De werkelijke golfbelasting op de duinen van Zeeuws Vlaanderen zal dus lager zijn dan de golfbelasting waar in het probabilistische model wordt gerekend. Dat betekent dat het semi-probabilistische model, waar met dezelfde golfbelasting wordt gerekend, ook aan de ‘veilige’ kant zit voor deze locaties.



Figuur 6.3 Bodemdiepte in het zuidelijke deel van de Zeeuwse delta. De locatie van golfstation Scheur West is aangeduid met ‘SCHW’.



## **7 Stap 4: Vergelijking voorgesteld semi-probabilistisch toets voorschrift met VTV2006**

De laatste stap in het kalibratiestap is een vergelijking met resultaten op basis van het voorgaande semi-probabilistische toets voorschrift. Deze vergelijking heeft de functie van een 'sanity-check'. Voor de huidige toepassing is een dergelijke sanity check echter overbodig omdat het concept van de semi-probabilistische toets regel niet is veranderd. Dat betekent overigens niet dat de uitkomsten niet veranderen. Er zijn namelijk nieuwe normen, er is een nieuwe vertaalslag van de norm naar een faalkanseis voor een duinraai en de statistiek van de waterstand is gewijzigd. Dit zijn echter allemaal aspecten die niet ingrijpen op het *concept* van het semi-probabilistische model (maar wel op de uitkomst).





## 8 Conclusies

In dit rapport zijn twee aspecten besproken die een rol spelen in de toetsing voor duinwaterkeringen:

- 1 De vertaalslag van de norm van een dijktraject naar een faalkanseis per duinraai; en
- 2 De formulering van de semi-probabilistische rekenregel, uitgaande van de faalkanseis per duinraai.

In het eerste onderdeel zijn significante aanpassingen gedaan in vergelijking met voorgaande toets rondes. In voorgaande toets rondes was de faalkanseis van een duinraai een factor 10 kleiner dan de wettelijke toets norm. In WTI2017 zit hier voor de meeste duinraaien nog maar ongeveer een factor 3 tussen. De wijziging is een gevolg van de nieuwe filosofie van toetsen: “*van overschrijdingskans naar overstromingskans*”. De factor 3 in de vertaalslag van toetsnorm naar faalkanseis per duinraai is een combinatie van de faalkansreservering voor het mechanisme duinafslag (70%) in de totale faalkansbegroting en het lengte-effect (factor 2). Voor duinen die onderdeel uitmaken van een traject dat grotendeels uit dijken bestaat is overigens maar 10% gereserveerd voor het mechanisme duinafslag in de totale faalkansbegroting. Voor die duinen zit er een factor 20 verschil in de vertaalslag van toets norm naar faalkanseis per duinraai. Dit zijn echter uitzonderingen.

Voor het tweede onderdeel, de formulering van de semi-probabilistische rekenregel is besloten om het rekenrecept aan te houden van vorige toets rondes. Er is overwogen om een ander recept te kiezen voor de keuze van de rekenwaarde van de waterstand dan men gewend is (het rekenpeil), uit oogpunt van consistentie met andere toets sporen van WTI2017. Dat zou betekend hebben dat het rekenpeil gelijk is aan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskans. Deze aangepaste keuze zou echter leiden tot een toename van het benodigde toeslagvolume en dat is op fysische gronden onwenselijk.

Samenvattend zijn de grondslagen van de semi-probabilistische rekenregel ongewijzigd in vergelijking met voorgaande toetsrondes. De uitkomsten van de semi-probabilistische toets kunnen desondanks significant veranderen als gevolg van:

- Wijzigingen in de getalswaarde van de norm;
- De gewijzigde vertaalslag van de norm van een dijktraject naar een faalkanseis per duinraai;
- Wijzigingen in de statistiek van de belasting, met name als gevolg van meenemen van kennisonzekerheden in de waterstandsstatistiek; en
- Wijzigingen in het duinprofiel.



## 9 Referenties

- Alkyon, WL | Delft Hydraulics en TU Delft, 2007. *Dune erosion. Product 3: Probabilistic dune erosion prediction method*. H4357 / A1414.
- Deltares 2011. *Detailtoets voor duinafslag. Afleiden van de rekenregel voor duinen op Waddeneilanden ten behoeve van WTI 2011*. 1202124-003.
- Deltares 2013. *Kalibratie van semi-probabilistische toets voorschriften*. 1207803-003
- Deltares, 2015. *Basisrapport WTI2017*. Rapport 1220078.001-0002, concept versie december 2015.
- HKV 2012. *Overstromingskansen voor de Nederlandse kust*. PR2334.10
- HKV, 2015: *Afleiden lengtefactoren (N-waarden) golfoverslag en duinafslag, memorandum HKV, PR3085.10*
- TAW 1984. *Leidraad duinafslag*.
- TU Delft/Alkyon/WL, 2007: *Technisch Rapport Duinafslag, Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006*, TU Delft, Alkyon en WL | Delft Hydraulics en in opdracht van RIKZ Mei, 2007