

WBI - Onzekerheden

Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in
het wettelijk beoordelingsinstrumentarium



Titel
WBI - Onzekerheden

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat - WVL

Project
1220080-001

Kenmerk
1220080-001-ZWS-0004

Pagina's
132

Samenvatting

In het kader van WBI-2017 wordt een instrumentarium ontwikkeld waarmee primaire waterkeringen kunnen worden beoordeeld op basis van overstromingskansen. In het project WBI-2017 wordt het uitgangspunt gehanteerd dat alle belangrijke onzekerheden zoveel mogelijk *expliciet* worden meegenomen in de beoordeling. De verschillende bronnen van onzekerheden kunnen onderverdeeld worden in twee typen:

- (i) aleatorische onzekerheden ('natuurlijke variabiliteit');
- (ii) epistemische onzekerheden (onzekerheid als gevolg van onvolledige kennis van het proces).

In voorgaande toetsronden is eveneens rekening gehouden met onzekerheden. In de meeste toetssporen is dat echter gedaan door "verborgen veiligheden" in te bouwen in de toetsregels, vooral aan de sterktekant. In de belastingmodellen werd alleen rekening gehouden met natuurlijke variabiliteit en werden kennisonzekerheden (epistemische onzekerheden) niet in rekening gebracht.

Het huidige document beschrijft de praktische kanten van het omgaan met onzekerheden in relatie tot de beoordeling. Het is geschreven voor iedereen die in de werkpraktijk enige relatie heeft met het beoordelen van waterkeringen. Het rapport is dus voor een relatief breed publiek geschreven. Het is echter ook relevant voor experts op het gebied van probabilistiek en onzekerheden, met name als naslagwerk/achtergronddocument.

In het document komen onder ander de volgende aspecten aan bod:

- Methoden om onzekerheden af te leiden;
- Afgeleide onzekerheden;
- (Semi-)probabilistische rekenmethoden om de vertaalslag te maken van onzekerheden naar faalkansen van waterkeringen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	feb 2016	Ferdinand Diermanse		Ruben Jongejan		Annemargreet De Leeuw	
2	apr 2016	Ferdinand Diermanse		Ruben Jongejan		Annemargreet De Leeuw	
3	Aug.2016	Ferdinand Diermanse	FD	Ruben Jongejan		Annemargreet De Leeuw	AL

Status
definitief

Titel
WBI - Onzekerheden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat - WVL	1220080-001	1220080-001-ZWS-0004	132

Summary

In the WBI-2017 project, a set of tools and guidelines is developed for the safety assessment of primary flood defences in The Netherlands. One of the objectives in WBI-2017 is to explicitly take all uncertainties into account that are relevant for the safety assessment. Two types of uncertainties can be distinguished:

- (i) Aleatoric uncertainties ('natural variability');
- (ii) Epistemic uncertainties ('uncertainties due to incomplete knowledge of the processes').

In previous assessments, uncertainties were also taken into account. Generally, this was done by using increased safety factors in the strength models, without a detailed assessment of potential impacts of the uncertainties on the safety assessment. In the load models, only aleatoric uncertainties have been taken into account in previous assessments, i.e. epistemic uncertainties generally have been ignored.

This report describes various practical issues related to dealing with uncertainties in flood safety assessments. The report is written for virtually everyone involved in the safety assessment of flood defences. This means the report is written for a relatively broad audience. Nevertheless, the report is also relevant for experts in the field of probabilities and uncertainties, as a reference work and/or as a background document.

The report discusses the following topics:

- Methods to quantify uncertainties;
- Resulting uncertainty quantifications;
- (Semi-)probabilistic computation methods to translate uncertainties to failure probabilities of flood defences.

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen	1
1.2 Van WTI-2011 naar WBI-2017	1
1.3 Waarom rekening houden met onzekerheden?	1
1.3.1 Een voorbeeld uit de dagelijkse praktijk	1
1.3.2 Onzekerheden bij het beoordelen van waterkeringen	2
1.4 Verschil in benadering met vorige toetsronden	3
1.5 Doelstelling	4
1.6 Scope	5
1.7 Plaats van het rapport in het WBI	5
1.8 Leeswijzer	6
1.9 Totstandkoming	7
2 Kansen en kansverdelingen	9
2.1 Kansen ter kwantificering van de mate van (on)zekerheid	9
2.2 Kansfuncties	10
2.2.1 Histogram	10
2.2.2 Kansdichtheidsfuncties	13
2.2.3 Kansverdelingsfuncties	15
2.2.4 Extreme waarde verdelingen	16
2.2.5 Veel gebruikte kansverdelingsfuncties	18
3 Afleiden van onzekerheden ten behoeve van WBI-2017	21
3.1 Typen onzekerheden in WBI-2017	21
3.2 Belangrijkste aannames en uitgangspunten	22
3.3 Methoden voor het kwantificeren van onzekerheden	23
3.3.1 Statistische extrapolatie	23
3.3.2 Statistische extrapolatie in combinatie met fysica	25
3.3.3 Vergelijking van modelresultaten met metingen	26
3.3.4 Expert beoordelingen	28
3.3.5 Scenario's	28
3.4 Statistische onzekerheden in hydraulische belastingen	29
3.4.1 Inleiding	29
3.4.2 Overzicht van de stochasten per belastingmodel en regio	30
3.4.3 Statistiek van basisstochasten (natuurlijke variabiliteit)	30
3.4.4 Statistische onzekerheden	42
3.4.5 Correlaties	51
3.5 Modelonzekerheden in hydraulische belastingen	51
3.5.1 Inleiding	51
3.5.2 Aanpak	51
3.5.3 Onzekerheden in de lokale waterstand	53
3.5.4 Onzekerheden in de lokale golven	54
3.6 Statistische onzekerheden in sterkte-parameters	55
3.7 Model-onzekerheden voor de sterkte van waterkeringen	56
3.7.1 Steenzettingen	56
3.7.2 Asfalt	57
3.8 Schematiseringonzekerheid en stochastisch ondergrondmodel	58

4 Probabilistische en semi-probabilistische toetsen	61
4.1 Doel	61
4.2 Essentie van probabilistische analyses	61
4.2.1 Onzekerheden in belasting en sterkte van de waterkering	61
4.2.2 De grenstoestandsfunctie	61
4.2.3 Probabilistische analyses	62
4.3 Probabilistische en semi-probabilistische beoordeling	64
4.3.1 Volledig probabilistische toets	64
4.3.2 Semi-probabilistische toets	66
4.3.3 Verschillen en overeenkomsten	67
4.4 Kalibratie van veiligheidsfactoren voor de semi-probabilistische toets	68
4.4.1 Doelstelling	68
4.4.2 Procedure op hoofdlijnen	69
4.5 Systeemanalyse: van overstromingskans per locatie, mechanisme en tijdstap naar jaarlijkse overstromingskans per dijktraject	71
4.5.1 Volledig probabilistische toets op trajectniveau	72
4.5.2 Toets op vakniveau	74
4.5.3 Combineren van faalkansen van verschillende tijdsperioden	77
4.6 Keuze van de (belangrijkste) stochasten	79
4.7 Probabilistische rekentechnieken	79
4.8 Uitintegreren van onzekerheden in de waterstand	81
4.9 Voorbeelden van (semi-)probabilistische toetsmodellen	84
4.9.1 Overloop en golfoverslag (dijken/kunstwerken)	84
4.9.2 Opbarsten en piping (dijken)	85
4.9.3 Macrostabieliteit binnenwaarts (dijken)	87
4.9.4 Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam (dijken)	89
4.9.5 Overloop en golfoverslag (kunstwerken)	94
4.9.6 Niet sluiten kunstwerken	95
4.9.7 Piping (kunstwerken)	96
4.9.8 Constructief falen kunstwerken	96
4.9.9 Duinafslag	97
4.9.10 Faalmechanismen voorland	98
4.9.11 Niet waterkerende projecten	99
4.9.12 Overzicht "afwijkende" keuzes	99
5 Verschillende typen toetsen in WBI-2017	103
5.1 Beschrijving	103
5.2 Assemblage van toetsoordelen	105
6 Conclusies en aandachtspunten	107
7 Referenties	109
Bijlage(n)	
A Overzicht stochasten belastingmodellen	113
B Overzicht onzekerheden sterktevariabelen	115
B.1 Macrostabieliteit	115
B.2 Microstabieliteit (STMI)	116

B.3	Piping (STPH)	116
B.4	Duinen (DA)	117
B.5	Steenbekledingen	117
B.6	Asfaltbekledingen	119
B.7	Grasbekledingen	119
B.8	Kunstwerken	120
B.9	Voorland	122
C	Lengte-effect voor erosie kruin en binnentalud	125
D	Formules voor het integreren van kennisonzekerheden in de statistiek van de waterstand	131

Begrippenlijst

Term	Omschrijving
Aleatorische onzekerheden	Onzekerheden die het gevolg zijn van natuurlijke variabiliteit
Belasting	Op een constructie (een waterkering) uitgeoefende in- en uitwendige krachten, ofwel de mate waarin een constructie door in- en uitwendige krachten wordt aangesproken, uitgedrukt in een fysische grootte.
Belastingmodel	Rekenmodel waarmee kansen op voorkomen en overschrijden van hydraulische belastingen worden berekend.
Betrouwbaarheidsindex	Waarde die de mate van 'betrouwbaarheid' van een waterkering weergeeft. Een hoge betrouwbaarheidsindex correspondeert met een kleine faalkans
Betrouwbaarheidseis	Eis die gesteld wordt aan de betrouwbaarheid (faalkans) van een waterkering. De wettelijke norm is een voorbeeld van een betrouwbaarheidseis
Betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau	Eis die wordt gesteld aan de kans van falen van een dijkdoorsnede (faalkanseis)
Correlatie in de tijd	Mate van samenhang tussen de waarde van een variabele op tijdstip t en de waarde van diezelfde variabele op een ander tijdstip
Correlatielengte	Lengtemaat die bepalend is voor de mate van ruimtelijke (auto-)correlatie van een parameter
Cumulatieve kansverdeling	Functie die de kans van onderschrijden beschrijft van alle (relevante) mogelijke uitkomsten van een stochastische variabele
Decimeringshoogte	Toename in de waterstand die correspondeert met een afname van een factor 10 in de jaarlijkse overschrijdingsfrequentie
Doorsnede	Dwarsdoorsnede van een dijklichaam, feitelijk een vlak, loodrecht op de lengterichting van de dijk
Epistemische onzekerheden	Onzekerheden als gevolg van onvolledige kennis van het proces
Faalkans	Kans dat een kering faalt. De exacte definitie van falen kan verschillen per toepassing.
Frequentie	Gemiddeld aantal keren dat een gebeurtenis voorkomt per tijdseenheid.
Frequentie lijn	Relatie tussen de mogelijke realisaties van een variabele en de corresponderende overschrijdingsfrequentie
Gemiddelde	Som van gemeten uitkomsten van een variabele, gedeeld door het aantal metingen
Grenstoestandfunctie	Wiskundige functie die voor alle mogelijke uitkomsten van de combinaties van betrokken stochastische variabelen beschrijft of de waterkering wel/niet faalt
HR2006	Hydraulische randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen, vastgesteld in 2006 en toegepast in de derde toets ronde (2006-2011).
Illustratiepunt	zie ontwerp punt
Invloed coëfficiënt	Indicator voor het relatieve belang van een stochastische variabele in de faalkansberekening, d.w.z. in vergelijking met

Term	Omschrijving
	de andere stochastische variabelen
Kalibratiecriterium	Criterium op basis waarvan veiligheidsfactoren worden vastgesteld. Het criterium heeft in de regel de vorm van een faalkanseis voor een doorsnede van een waterkering
Kans	Waarde in het interval $[0,1]$ die de mate van waarschijnlijkheid van een gebeurtenis kwantificeert
Kansdichtheidsfunctie	Functie die aangeeft welke mogelijke uitkomsten van een variabele de grootste kans van optreden heeft (formeel: de grootste kansdichtheid)
Karakteristieke waarde	Kenmerkende waarde voor een stochastische variabele, bijvoorbeeld het 5%-fractiel, 95%-fractiel of de nominale waarde
Kwantiel	Waarde van een parameter die correspondeert met een bepaalde kans. Bijvoorbeeld: er is een kans van 10% dat een 'willekeurige' korreldiameter kleiner is dan het 10%-kwantiel
Lengte-effect	Het relatieve verschil in de faalkans van een "uniform" dijksegment en de faalkans van een dwarsdoornede uit datzelfde segment
Modelfactor	Partiële veiligheidsfactor voor de modelonzekerheid
Modelonzekerheidsfactor	Stochast die de modelonzekerheid beschrijft
Norm	Wettelijk vastgestelde eis aan de overstromingskans van een dijktraject
Normtraject	Stelsel van waterkeringen waarvoor een norm is vastgesteld
Omni-directionele statistiek	Statistiek van een variabele die afhankelijk is van de windrichting, waarvoor de statistieken per windrichting zijn samengevoegd tot één overkoepelende (omni-directionele) statistiek. Voor elke drempelwaarde van de variabele geldt de volgende relatie: de omni-directionele overschrijdingsfrequentie is gelijk aan de som van de overschrijdingsfrequenties van de individuele windrichtingssectoren.
Ontwerppunt	Meest waarschijnlijke combinatie van realisaties van stochasten die tot falen van de kering leidt
Overschrijdingsfrequentie	Frequentie van overschrijden van een drempelwaarde
Overschrijdingskans	Kans dat de uitkomst van een stochastische variabele hoger is dan een gegeven (drempel-)waarde
Overstromingskans	Kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt dat dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade ontstaan.
Partiële (veiligheids)factor	Vermenigvuldigingsfactor die (mits >1) resulteert in een strengere toets
Probabilistische analyse/faalkansberekening	Analyse waarin de faalkans van een waterkering wordt bepaald, rekening houdend met alle relevante onzekerheden (natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheden)
Representatieve waarde	De aan te houden waarde van een stochastische variabele bij een semi-probabilistische toets (voorafgaand aan de toepassing

Term	Omschrijving
	van partiële veiligheidsfactoren); veelal een karakteristieke waarde
Ruimtelijke correlatie	Mate van samenhang tussen de waarde van een variabele op locatie x en de waarde van diezelfde variabele op naburige locaties
Ruimtelijke variabiliteit	Variatie van een stochastische variabele over een waterkering, in dwarsrichting en/of lengterichting
Semi-probabilistische analyse	Analyse of de kering voldoet aan een gestelde betrouwbaarheidseis op basis van representatieve waarden en veiligheidsfactoren
Semi-probabilistische toets	Toets op basis van een semi-probabilistische analyse
Statistische onzekerheid	Onzekerheid die het gevolg is van het feit dat statistiek is afgeleid van een meetreeks die per definitie niet oneindig van lengte is.
Standaarddeviatie / standaardafwijking	Maat voor de variatie van de waarde van een stochastische variabele
Stochast / stochastische variabele	variabele die een onzeker proces beschrijft
Vak	Segment van het dijktraject waarvoor de belastingcondities en de sterkte-eigenschappen min of meer uniform zijn
Variantie	Maat voor de variatie van de waarde van een stochastische variabele. De variantie is het kwadraat van de standaarddeviatie
Variatiecoëfficiënt	Quotiënt van de standaarddeviatie en de verwachtingswaarde
Veiligheidsfactor	Zie partiële veiligheidsfactor
Verwachtingswaarde	Verwachte uitkomst van het gemiddelde
VNK	“Veiligheid van Nederland in Kaart”. Project waarin voor alle dijkringen van Nederland overstromingskansen en overstromingsrisico's zijn berekend.
VTV2006	Het “Voorschrift Toetsen op Veiligheid” voor de primaire waterkeringen, vastgesteld in 2006 en toegepast in de derde toets ronde (2006-2011).
Werklijn	Zie frequentielijn
WBI	Wettelijk Beoordelings Instrumentarium
WTI-2011	Wettelijk Toets Instrumentarium, ontwikkeld voor de toets ronde na 2011
WBI-2017	Wettelijk Beoordelings Instrumentarium, ontwikkeld voor de beoordeling na 2017

1 Inleiding

1.1 Wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen beoordeeld moeten worden aan de gestelde veiligheidsnormen. In deze wet is voor de beheerder van een primaire waterkering de verplichting neergelegd iedere twaalf jaar aan de Minister van Infrastructuur en Milieu (I&M) verslag uit te brengen over de toestand van de primaire waterkeringen. De Minister van I&M houdt toezicht op primaire waterkeringen. De veiligheidsnormen waaraan de primaire waterkering moeten voldoen, zijn tot dusver uitgedrukt in normfrequenties van 1/250 tot 1/10.000 per jaar, of herhalings tijden variërend van 250 tot 10.000 jaar, afhankelijk van het watersysteem en het beschermde gebied.

De beoordeling wordt uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Beoordelings-Instrumentarium (WBI). Dit WBI bestaat uit een ministeriële regeling (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017) en drie bijlagen (zie paragraaf 1.7)

De eerstvolgende beoordelingsronde start vanaf 2017. Ten behoeve van die beoordelingsronde is het Wettelijk Beoordelings-Instrumentarium 2017 (WBI-2017) ontwikkeld. Dit is de opvolger van het WTI-2011. We merken daarbij op dat het WTI-2011 nooit is toegepast zoals oorspronkelijk beoogd. Het concept WTI-2011 is opgesteld in de periode 2006-2011 als Wettelijk Toetsinstrumentarium voor de vierde toets ronde (2011-2017). De vaststelling van het WTI-2011 voor de vierde toets ronde door de Staatssecretaris van het Ministerie van Infrastructuur & Milieu was oorspronkelijk gepland voor begin 2012. Als gevolg van de afspraken op bestuurlijk/beleidsmatig niveau, gemaakt in het kader van het Bestuursakkoord Water (april 2011), is de vierde toets ronde in 2011 niet van start gegaan. In zekere zin kan WBI-2017 daarom ook gezien worden als de opvolger van het VTV2006 (in combinatie met HR2006).

1.2 Van WTI-2011 naar WBI-2017

Vanaf 2017 worden de primaire waterkeringen van Nederland beoordeeld aan een norm die is uitgedrukt als een (toegestane) *overstromingskans*. In dit kader zijn recent nieuwe normen gedefinieerd voor de primaire waterkeringen. Deze nieuwe norm is uitgedrukt als een toegestane overstromingskans per traject.

In het project WBI-2017 wordt een instrumentarium ontwikkeld waarmee primaire waterkeringen kunnen worden beoordeeld op basis van overstromingskansen. In het project wordt het uitgangspunt gehanteerd dat alle belangrijke onzekerheden zoveel mogelijk *expliciet* worden meegenomen in de beoordeling (Deltares, 2012a).

1.3 Waarom rekening houden met onzekerheden?

1.3.1 Een voorbeeld uit de dagelijkse praktijk

Iedereen wordt, al dan niet onbewust, vrijwel dagelijks geconfronteerd met situaties waarin besluiten genomen moeten worden waarbij onzekerheden een rol spelen. We schetsen dit aan de hand van een alledaags voorbeeld.

Rijkswaterstaat organiseert een symposium over de nieuwe manier van beoordelen in Utrecht. Het symposium start 's ochtends om 9 uur. De volgende personen komen hiervoor met de auto uit hun woonplaats Den Haag:

- A. Een ervaren senior op het gebied van beoordelen en overstromingsrisico's, werkend bij RWS. Zij weet al veel over de nieuwe manier van beoordelen en woont het symposium vooral bij om te netwerken in de pauzes.
- B. Een junior medewerker bij een ingenieursbureau. Hij heeft met zijn baas afgesproken dat hij de komende jaren veel van zijn werktijd zal besteden aan het beoordelen van waterkeringen. De nieuwe manier van beoordelen is nog een mysterie voor hem en hij hoopt veel op te steken tijdens het symposium.
- C. Een medewerker van een kennisinstituut, die om 9.15 u de eerste inhoudelijke presentatie van de dag zal geven. Dit is voor hem een uitgelezen kans om zich te profileren voor een relatief grote groep mensen uit het vakgebied.
- D. Een medewerkster van DGRW die verantwoordelijk is voor de organisatie van het symposium. Zij zal ook het welkomstwoord verrichten. Zij heeft recent vernomen dat de minister een verrassingsbezoek komt brengen aan het symposium. Om die reden komen enkele van haar leidinggevenden ook een kijkje nemen.

Onder normale condities is de reistijd vanuit Den Haag naar Utrecht 50 minuten met de auto. Als alles mee zit kan de rit in 40 minuten voltooid worden. Bij drukte op de weg kan de reistijd zo maar een half uur langer zijn. Heel soms, bij een ernstige aanrijding, is de vertraging meer dan een uur. Er bestaat derhalve onzekerheid over de reistijd. Alle vier de personen willen om 9 uur aanwezig zijn en onder normale condities zou een vertrek om 8 uur dus ruim op tijd zijn. Echter, vanwege de onzekerheid in de reistijd bestaat er altijd de kans om te laat komen. De mate van onzekerheid in de reistijd is voor alle vier gelijk, maar de gevolgen van te laat komen zijn voor ieder verschillend. Voor A is het niet zo erg om te laat te komen en daarom vertrekt A om 8 uur van huis. B, C en D zullen naar verwachting vroeger vertrekken om het risico van te laat komen te reduceren. Vanwege de onderlinge verschillen in belangen is het waarschijnlijk dat D als eerste vertrekt, dan C en daarna B.

B heeft een collega die in Utrecht woont (E). E wandelt graag en gaat te voet naar het symposium. Ook voor E geldt onder gemiddelde condities een reistijd van 50 minuten. Als alle stoplichten mee zitten kan hij het in 45 minuten lopen, als de stoplichten tegen zitten en er ook een brug open staat kan hij in het ergste geval een uur doen over de wandeling. E is gelijk met B in dienst gekomen en zal de komende jaren ook werken aan het beoordelen van waterkeringen. B en E hechten dus gelijk belang aan het bijwonen van het symposium. Met andere woorden: de gevolgen van te laat komen zijn voor beiden gelijk. Echter, de onzekerheid in de reistijd is voor E veel kleiner; als hij 10 minuten eerder vertrekt is hij zeker op tijd. Het ligt dus in de lijn der verwachting dat B eerder van huis vertrekt dan E.

Dit eenvoudige voorbeeld geeft aan dat bij het nemen van besluiten onder invloed van onzekerheden het van belang is om zowel de mate van onzekerheid als de (mogelijke) impact van onzekerheden mee te wegen in de besluitvorming.

1.3.2 Onzekerheden bij het beoordelen van waterkeringen

De overstromingskans, of faalkans, van een waterkering is de kans dat in een willekeurig jaar de belasting op de kering op een zeker moment groter is dan de sterkte. Zowel de belasting als de daadwerkelijke sterkte van de kering zijn onzeker. Dat is ook de reden waarom normen worden uitgedrukt in een kans: zonder onzekerheden ten aanzien van de belastingen of de sterkte-eigenschappen van waterkeringen zou de faalkans steeds nul of één zijn. Door middel van onderzoek en meetcampagnes kunnen bepaalde onzekerheden gereduceerd worden. Het is echter een illusie te denken dat deze daadwerkelijk tot nul gereduceerd kunnen worden. Oorzaken daarvan zijn onder meer:

1. Een dijk kan niet 100% doorgemeten worden en dus kan de actuele sterkte van de kering kan nooit met volledige zekerheid worden vastgesteld;
2. Hetzelfde geldt voor de ondergrond, die voor enkele geotechnische faalmechanismen ook een significante invloed heeft of de faalkans;
3. De keringen worden beoordeeld op belastingen (waterstanden en golven) die zeer extreem zijn; doorgaans extremer dan gemeten hoogwaters en daardoor alleen zinvol in statistische termen te beschrijven. Er zijn in de regel nooit voldoende gegevens om de benodigde statistische verdelingen nauwkeurig vast te kunnen stellen.
4. Er worden rekenmodellen gebruikt om het gedrag van watersystemen en keringen te simuleren en een model is nooit een perfecte weergave van de werkelijkheid.

Bij het ontwerpen van waterkeringen spelen nog andere onzekerheden, zoals de variatie in de sterkte van de kering over de ontwerpperiode. Het onderhavige document richt zich echter alleen op de onzekerheden in de beoordeling van waterkeringen. De verschillende bronnen van onzekerheid kunnen onderverdeeld worden in twee typen:

- aleatorische onzekerheden ('natuurlijke variabiliteit');
- epistemische onzekerheden (onzekerheid als gevolg van onvolledige kennis van het proces).

Voorbeelden van aleatorische onzekerheid zijn de jaar-maximale afvoeren van de Rijn en Maas. Deze variëren van jaar tot jaar en dat is de voornaamste reden dat in de beoordeling van waterkeringen in het bovenrivierengebied rekening gehouden moet worden met (extreem) hoge waterstanden. Voorbeelden van epistemische onzekerheden zijn legio, bijvoorbeeld omdat we beschikken over een beperkt aantal metingen van geotechnische kenmerken van dijken en omdat we in de beoordeling gebruik maken van modellen die per definitie geen exacte weergave zijn van de werkelijkheid.

In probabilistische analyses, die ten grondslag liggen aan de belangrijkste rekeninstrumenten van WBI-2017, worden aan alle mogelijke sterktes en belastingen kansen van voorkomen toegekend. Vervolgens wordt de kans bepaald op een combinatie van belasting en sterkte waarbij de kering zal bezwijken. Onzekerheden staan dus aan de basis van faalkansberekeningen. Alle typen onzekerheden kunnen op gelijke wijze worden behandeld in faalkansberekeningen (Vrouwenvelder & Vrijling, 2001). De mogelijkheid om alle onzekerheden op een consistente wijze te behandelen is een belangrijk voordeel van de overstromingskansbenadering (TAW, 2000).

Het uitgangspunt van het project WBI-2017 is daarom dat alle *belangrijke* onzekerheden *expliciet* worden meegenomen in probabilistische analyses. Als dit niet zou worden gedaan, is het alternatief om overal conservatieve aannames te doen. In dat geval wordt het risico naar verwachting sterk overschat hetgeen extra kosten in versterking tot gevolg heeft.

1.4 Verschil in benadering met vorige toets ronden

In de vorige paragraaf is beargumenteerd waarom het doelmatig is om expliciet rekening te houden met onzekerheden. Dat roept wellicht de vraag op waarom dat in vorige toets ronden niet is gedaan. Daarbij is direct een nuancering op zijn plaats. In voorgaande toets ronden is wel degelijk ook rekening gehouden met onzekerheden. In de meeste toets sporen is dat echter gedaan door "verborgen veiligheden" in te bouwen in de toets regels, vooral aan de sterktekant. In de belastingen werd alleen rekening gehouden met natuurlijke variabiliteit en werden kennisonzekerheden (epistemische onzekerheden) niet in rekening gebracht. Het is

daardoor waarschijnlijk dat in voorgaande toets ronden de onzekerheden aan de belastingkant in de regel zijn onderschat en de onzekerheden aan de sterktekant in de regel zijn overschat. In een ideale wereld zijn deze respectievelijke onder- en overschatting perfect in balans, maar dat is onwaarschijnlijk en bovendien niet te achterhalen zolang de onzekerheden niet expliciet gemaakt worden. Vandaar dat de ambitie in WBI-2017 ten aanzien van het expliciet en evenwichtig rekening houden met onzekerheden.

Er is een aantal oorzaken waarom nu (pas) als ambitie is gekozen om in de komende beoordelingsronde expliciet en evenwichtig rekening houden met alle typen onzekerheden die relevant zijn voor de beoordeling van een waterkering:

- Er was veel voorbereidend technisch onderzoek voor nodig om een dergelijke ambitie te kunnen verwezenlijken. Het project VNK heeft aangetoond dat het mogelijk is om overstromingskansen te berekenen voor dijkringen (VNK, 2014).
- Er is nu voldoende draagvlak om de overstap te maken naar de overstromingskansenbenadering.
- De overstap op de overstromingskans biedt de mogelijkheid om tegelijk verschillende essentiële veranderingen in een keer aan te brengen, zoals het meer expliciet rekening houden met onzekerheden.

In het kader van WBI en onzekerheden zijn belangrijkste verschillen in vergelijking met voorgaande toets ronden:

- Expliciet in rekening brengen van kennisonzekerheden van hydraulische belastingen (paragraaf 3.4 en 3.5).
- Gebruik van kansverdelingen van sterktevariabelen (gemiddelde en standaarddeviatie, zie paragraaf 3.6 en 3.7) in plaats van “conservatieve” rekenwaarden.
- Opstellen van volledig probabilistische voorschriften voor een aantal toets sporen (paragraaf 4.3) waarmee het mogelijk wordt om onzekerheden volledig en consistent mee te nemen in de beoordeling.
- Afleiden van veiligheidsfactoren op basis van rekenresultaten van probabilistische berekeningen (zie paragraaf 4.4).

Merk op dat deze veranderingen nog niet voor alle toets sporen en voor alle variabelen zijn ingevoerd. Met het oog op een tijdige oplevering is besloten tot een “getrapte” aanpak, waarbij alleen voor de meest relevant geachte toets sporen de bovenstaande aanpassingen zijn doorgevoerd.

1.5 Doelstelling

Het huidige document heeft de volgende doelstellingen:

- Belichten van de relevantie van het expliciet en evenwichtig rekening houden met alle typen onzekerheden die relevant zijn voor de beoordeling van een waterkering;
- Inzichtelijk maken welke onzekerheden zijn meegenomen in de beoordeling en hoe dat in zijn werk is gegaan.
- Beschikbaar stellen van een overkoepelend achtergrondrapport voor al het onderzoek ten aanzien van onzekerheden dat is uitgevoerd in het kader van WBI-2017.
- Beschikbaar stellen van achtergrondinformatie voor cursussen op het gebied van onzekerheden en probabilistisch rekenen.

1.6 Scope

Het onderhavige document is geschreven voor iedereen die in de werkpraktijk enige relatie heeft met het beoordelen van waterkeringen. Het rapport is dus voor een relatief breed publiek geschreven. Het is echter ook relevant voor experts op het gebied van probabilistiek en onzekerheden, met name als naslagwerk/achtergronddocument.

Het document richt zich op onzekerheden in de beoordeling van waterkeringen en niet op onzekerheden in het ontwerp of het beheer & onderhoud. Hoewel er veel overlap is, met name met ontwerp, zijn er ook kleine verschillen zoals bijvoorbeeld onzekerheden over de variatie van de sterkte van de kering en de belasting op de kering over de ontwerpperiode.

In het document komen aan bod:

- Methoden om onzekerheden af te leiden en te beschrijven met kansverdelingen;
- Afgeleide onzekerheden;
- (Semi-)probabilistische rekenmethoden om de vertaalslag te maken van onzekerheden naar faalkansen van waterkeringen;

De focus van dit rapport ligt op de toets sporen waarvoor de nieuwe methode van beoordelen, met expliciet rekening houden met onzekerheden, wordt toegepast (zie Tabel 1.1).

Tabel 1.1 Toets sporen waarvoor de nieuwe methode van beoordelen wordt toegepast

Type kering	Toets spoor
Dijk	Overloop en golfoverslag (dijken/kunstwerken)
	Opbarsten en piping
	Macrostabieliteit binnenwaarts
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam
Kunstwerk	Niet sluiten
	Overslag/overloop
	Constructief falen
	Piping
Duin	Duinafslag

1.7 Plaats van het rapport in het WBI

Het Wettelijk Beoordelings-Instrumentarium (WBI 2017) bevat zowel de voorschriften voor het bepalen van de hydraulische belastingen en de sterkte, als de procedurele voorschriften voor de beoordeling van de veiligheid van de primaire waterkeringen. Het WBI bestaat uit een ministeriële regeling (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017) met de volgende bijlagen:

Bijlage I Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen (hierna: Bijlage I Procedure).

In deze bijlage staat de procedure die moet worden doorlopen voor de beoordeling en worden de rapportageverplichtingen beschreven. In deze bijlage is een begrippenlijst opgenomen met een uitleg van alle begrippen die in het WBI 2017 worden gebruikt.

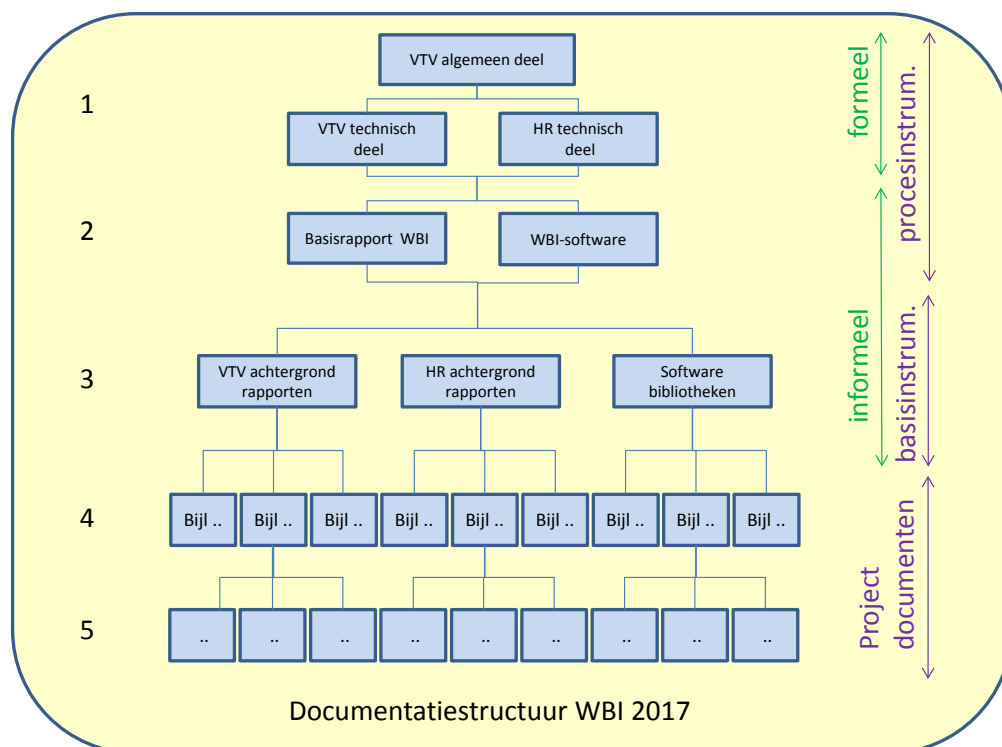
Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen (hierna: Bijlage II Hydraulische belastingen).

In deze bijlage wordt de methode beschreven om de hydraulische belastingen op de primaire waterkeringen te bepalen.

Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen (hierna: Bijlage III Sterkte en veiligheid).

In deze bijlage staat op welke manier de primaire waterkering moet worden beoordeeld om te komen tot een oordeel over de veiligheid van de gehele kering.

In Figuur 1.1 neemt het “basisrapport” een prominente rol in. Het basisrapport geeft op hoofdlijnen de technisch-inhoudelijke achtergronden bij het wettelijk beoordelings-instrumentarium als geheel en geeft concrete literatuurverwijzingen voor verdere achtergronden bij deelaspecten. De nadere beschrijving van de probabilistische methode binnen WBI-2017 is dermate belangrijk en vraagt zo uitgebreide aandacht, dat besloten is hierover een apart rapport op te stellen, met als resultaat het onderhavige rapport. Het onderhavige rapport is dus gepositioneerd náást het basisrapport, in laag 2 van Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Overzicht rapportstructuur WBI-2017

1.8 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft enkele begrippen op het gebied van kansrekenen. Dit hoofdstuk heeft als doel de wiskundig minder onderlegde lezer een beter begrip te geven van de terminologie die in het vervolg van het rapport wordt gebruikt.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de relevante onzekerheden voor het beoordelen van primaire waterkeringen in Nederland. De onzekerheden worden gekwantificeerd en methoden om onzekerheden te kwantificeren worden toegelicht.

Hoofdstuk 4 geeft een toelichting over het opstellen en toepassen van probabilistische en semi-probabilistische rekenmodellen. Het gebruik van dergelijke rekenmodellen is

noodzakelijk om de vertaalslag te kunnen maken van onzekerheden in belasting- en sterktevariabelen naar een faalkans (overstromingskans) van een waterkering.

Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de verschillende toetsen in WBI-2017. Binnen deze toetsen wordt op verschillende wijzen omgegaan met onzekerheden, op basis van het principe 'van grof naar fijn'.

Hoofdstuk 6 beschrijft de belangrijkste conclusies en aandachtspunten.

1.9 Totstandkoming

Dit document is tot stand gekomen op basis van deelrapportages geschreven door specialisten op het gebied van faalmechanismen, belastingen, statistiek en probabilistiek. Van deze deelrapportages is vervolgens een consistent overzichtsrapport gemaakt.

De inhoud van het rapport is samengesteld en geschreven door Ferdinand Diermanse (Deltares). De formele review conform het Deltares kwaliteitssysteem is uitgevoerd door Ruben Jongejan (Jongejan RMC).

Aanvullende inhoudelijke reviews op eerdere conceptversies zijn uitgevoerd door:

Marcel Bottema (RWS-WVL);
Robert Slomp (RWS-WVL); en
Ton Vrouwenvelder (ENW, TNO Bouw)

De projectleiding bij Deltares was in handen van Ferdinand Diermanse. De projectleiding bij RWS-WVL was in handen van Marcel Bottema.

2 Kansen en kansverdelingen

Dit rapport gaat over het beschrijven van onzekerheden door kansen en kansfuncties en het gebruik van kansen en kansfuncties in de beoordeling. Enige bekendheid met statistische basisbegrippen is nodig voor een goed begrip van het vervolg van dit rapport. Dit hoofdstuk geeft daarom een introductie over de begrippen 'kans' en 'kansfuncties'.

2.1 Kansen ter kwantificering van de mate van (on)zekerheid

Het belang van het kunnen kwantificeren van onzekerheden komt voort uit het feit dat de realisaties van processen die van belang zijn bij de beoordeling niet met volledige zekerheid zijn te voorspellen. Omdat er geen zekerheid bestaat over de uitkomsten, kan over de uitkomsten alleen in termen van kansen worden gesproken. Een kans is een waarde tussen de 0 en 1. Hoge waarden van de kans duiden op een grote waarschijnlijkheid van optreden, lage waarden op een kleine waarschijnlijkheid van optreden. Een kans van 0 is van toepassing op een gebeurtenis die zeker niet zal optreden; een kans van 1 is van toepassing op een gebeurtenis die zeker wel zal optreden.

Processen die relevant zijn in de beoordeling worden beschreven met variabelen zoals de waterstand, de golfhoogte, de korreldiameter of de dikte van een grondlaag. Al deze variabelen zijn behept met enige mate van onzekerheid. Dat betekent dat voor elke *realistische* uitkomst van een variabele geldt dat er een bepaalde kans is dat de realisatie van de variabele hoger of lager is.

Voorbeeld 1: De kans dat op een willekeurige dag in het winterhalfjaar de afvoer van de Rijn bij Lobith *hoger* is dan 2.000 m³/s is gelijk aan 0.5 (50%). De kans dat op een willekeurige dag in het winterhalfjaar de afvoer van de Rijn bij Lobith *hoger* is dan 4.000 m³/s is gelijk aan 0.12 (12%). De kans dat de afvoer hoger is dan 2.000 m³/s is dus groter dan de kans dat de afvoer hoger is dan 4.000 m³/s. Dit is een algemene wetmatigheid:

Hoe hoger de drempelwaarde, hoe kleiner de kans dat een variabele boven deze drempelwaarde uitkomt.

Voorbeeld 2: De kans dat op een willekeurige dag in het winterhalfjaar de afvoer van de Rijn bij Lobith *kleiner of gelijk* is aan 6.000 m³/s is 0.97 (97%). De kans dat op een willekeurige dag in het winterhalfjaar de afvoer van de Rijn bij Lobith *groter is dan* 6.000 m³/s is 0.03 (3%). De kans dat de afvoer *kleiner of gelijk* is aan 6.000 m³/s (0.97) en de kans dat de afvoer *groter is dan* 6.000 m³/s (0.03) zijn dus opgeteld gelijk aan 1. Ook dat is een wetmatigheid:

De kans dat de realisatie van een variabele *kleiner of gelijk* is aan een drempelwaarde, x , is gelijk aan 1 minus de kans dat de realisatie van deze variabele *groter is dan* x

Dit laatste is eenvoudig te verklaren: de realisatie van een variabele is òf *kleiner of gelijk* aan drempelwaarde x òf *groter dan* drempelwaarde x . Er bestaat dus volledige zekerheid dat voor de realisatie van de variabele één van deze opties van toepassing is. De som van de kansen van deze twee opties is dus per definitie gelijk aan 1, ongeacht de waarde van x .

Naast het vaststellen van over- en onderschrijdingskansen van drempelwaarden is in enkele gevallen ook de kans op optreden relevant. Voorbeelden:

- Wat is de kans dat de windrichting tussen 300 en 330 graden is?
- Wat is de kans dat de Maeslantkering niet functioneert bij een sluitvraag?

Het vaststellen van kansen op overschrijden of onderschrijden van bepaalde drempelwaarden en de kansen van optreden van bepaalde gebeurtenissen is een cruciale stap in de beoordeling van waterkeringen. Als deze kansen zijn bepaald voor alle relevante belastingvariabelen en sterktevariabelen, kan vervolgens de kans bepaald worden dat in een willekeurig jaar een waterkering zal falen. Deze kans kan vervolgens vergeleken worden met de norm die voor deze waterkering is vastgesteld. De norm is uitgedrukt in een (toegestane) faalkans (overstromingskans) per jaar. Als de berekende faalkans van een kering kleiner is dan de norm voldoet de kering.

2.2 Kansfuncties

De vorige paragraaf beschreef enkele voorbeelden van kansen van overschrijdingen van drempelwaarden voor de afvoer in de Rijn bij Lobith. Ten behoeve van WBI-2017 moeten dergelijke kanswaarden afgeleid worden voor alle relevante variabelen. Variabelen met onzekere uitkomsten, zoals bijvoorbeeld de afvoer van de Rijn, worden vaak aangeduid als “stochastische variabelen”. Voor elke individuele stochastische variabele moeten in principe alle kanswaarden beschikbaar zijn voor het hele bereik aan uitkomsten. De kans van optreden en/of de kans van overschrijden van de mogelijke realisaties worden beschreven door kansfuncties. De meest gebruikte typen kansfuncties zijn:

- 1 Kanshistogram;
- 2 Kansdichtheidsfunctie; en
- 3 Kansverdelingsfunctie

Het restant van deze paragraaf beschrijft de drie typen kans-functies.

2.2.1 Histogram

We lichten het principe van het histogram toe aan de hand van een eenvoudig voorbeeld van een dobbelspel waarbij de som van de “ogen” van de twee dobbelstenen bepalend is. Deze som is een typisch voorbeeld van een onzekere variabele. De uitkomst ligt tussen de waarde 2 (worp met twee enen) en twaalf (worp met twee zessen). Er zijn in totaal $6 \times 6 = 36$ combinaties van worpen mogelijk. Figuur 2.1 toont de resulterende som voor de 36 combinaties (gele vlakken).



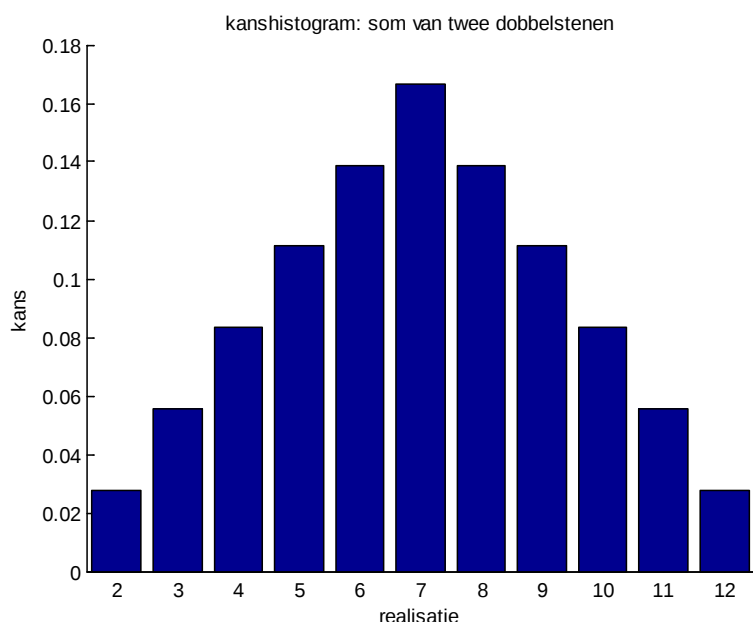
6	7	8	9	10	11	12
5	6	7	8	9	10	11
4	5	6	7	8	9	10
3	4	5	6	7	8	9
2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7
	1	2	3	4	5	6



Figuur 2.1 Mogelijke uitkomsten van de som van de ogen van twee dobbelstenen. De groene vlakken tonen de mogelijke uitkomsten van de individuele worpen, de gele vlakken tonen de uitkomsten van de som.

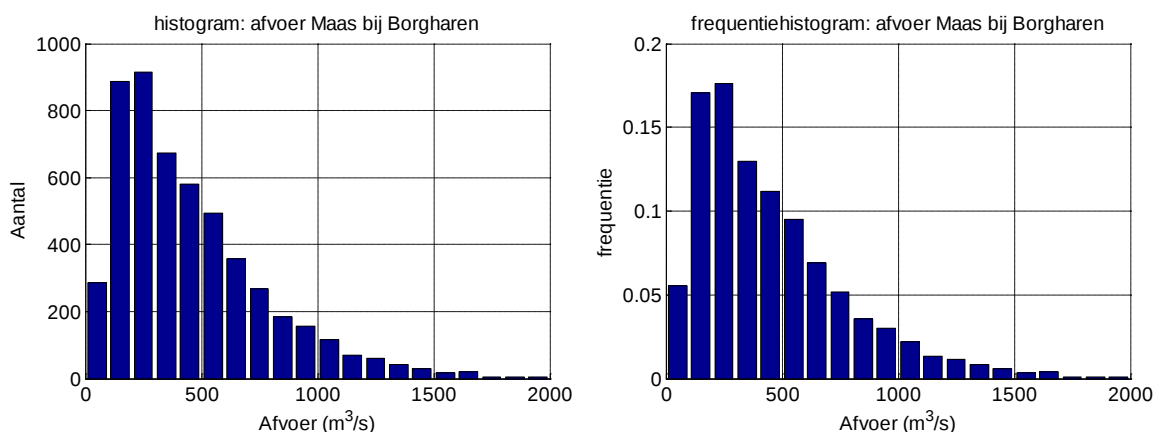
Uit Figuur 2.1 blijkt dat slechts één van de 36 combinaties resulteert in een uitkomst van 2. Dat betekent een kans van 1 op 36 ($1/36 \approx 0.03$) dat de som gelijk is aan 2. Er zijn twee combinaties die resulteren in een uitkomst van 3, dus is er een kans van 2 op 36 (= 1 op 18) dat de som van uitkomsten van twee dobbelstenen gelijk is aan 3. Op deze manier kan voor elke mogelijke uitkomst tussen 2 en 12 de kans worden afgeleid. De kans op een uitkomst van 7 is het grootst; deze kans is 6 op 36, ofwel 1 op 6.

Figuur 2.2 toont een diagram met alle mogelijke uitkomsten van de som van twee dobbelstenen en hun kansen. De horizontale as toont de mogelijke uitkomsten, de verticale as toont de bijbehorende kansen. Deze figuur maakt direct inzichtelijk welke uitkomst de grootste kans heeft (7) en welke de kleinste (2 en 12). Ook de onderlinge verhouding tussen de kansen is hiermee inzichtelijk gemaakt. Figuur 2.2 is een voorbeeld van een kanshistogram. Een kanshistogram geeft voor elke mogelijke realisatie, of in elk geval de mogelijke realisaties die relevant zijn, de kans van optreden. Voor een histogram geldt dat de som van de weergegeven kansen gelijk is aan 1, mits alle mogelijke uitkomsten zijn weergegeven op de horizontale as.



Figuur 2.2 Kanshistogram voor de som van twee dobbelsteen-worpen.

Voor het voorbeeld van de twee dobbelstenen kan het histogram afgeleid worden op basis van logisch redeneren en kansrekening. Voor natuurlijke variabelen als de afvoer en de korreldiameter is dat niet mogelijk. In plaats daarvan moet een schatting gemaakt worden op basis van metingen. Figuur 2.3 geeft hiervan een voorbeeld. Op basis van gemeten afvoeren van de Maas bij Borgharen zijn klassen gedefinieerd van mogelijke uitkomsten: 0-50 m³/s, 50-100 m³/s, 100-150 m³/s etc. Voor elke klasse is geturfd hoe vaak in de periode van meten de dag-afvoer tot de bewuste klasse behoorde, resulterend in het histogram ter linkerzijde van Figuur 2.3. Vervolgens is een frequentie-histogram afgeleid (rechterzijde van Figuur 2.3) door de aantallen van het histogram ter linkerzijde van Figuur 2.3 te delen door het totaal aantal dagen van meten. De grafieken ter linkerzijde en rechterzijde in van Figuur 2.3 hebben dus dezelfde vorm, alleen de waarden bij de verticale as zijn verschillend. De frequentiehistogram van Figuur 2.3 is een schatting, of benadering, van de “werkelijke” kanshistogram, op basis van metingen. Dat is dus een verschil met Figuur 2.2 waar de werkelijke kansen op analytische wijze kunnen worden afgeleid.



Figuur 2.3 Histogrammen voor dag-afvoeren van de Maas bij Borgharen. De figuur links toont aantallen bij de y-as, de figuur rechts toont de daaruit afgeleide frequenties.

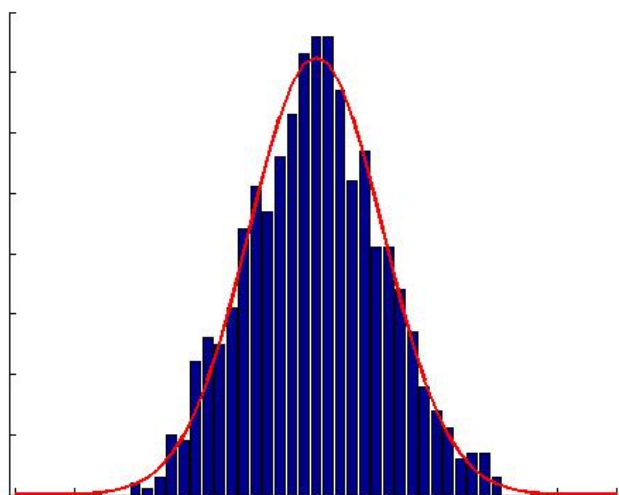
Wederom kan gesteld worden dat het histogram een goed beeld geeft van de onderlinge verhouding tussen de kansen van de mogelijke uitkomsten. Een histogram is (doorgaans) erg informatief en intuïtief. Uit Figuur 2.3 kan direct afgelezen worden dat de klassen 50-100 m³/s en 100-150 m³/s de grootste kans van optreden hebben. Voor hogere afvoeren geldt: hoe hoger de afvoerklasse, hoe kleiner de kans van optreden.

Een histogram zoals Figuur 2.3 geeft een beeld van de aleatorische onzekerheden (zie paragraaf 1.3.2), ofwel de natuurlijke variabiliteit van de Maasafvoer. Verderop in dit document worden ook voorbeelden gegeven van kansfuncties voor epistemische onzekerheden (onzekerheden als gevolg van onvolledige kennis van een proces).

2.2.2 Kansdichtheidsfuncties

Histogrammen, zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn toepasbaar als er sprake is van discrete uitkomsten, ofwel een telbaar aantal uitkomsten. Voor het voorbeeld van de twee dobbelstenen zijn er bijvoorbeeld 11 mogelijk uitkomsten (2 ... 12). In het voorbeeld van de Maasafvoeren zijn de uitkomsten discreet gemaakt door klassen te definiëren. De afvoer zelf is echter geen discrete variabele. Binnen het getoonde bereik van Figuur 2.3 kan de afvoer feitelijk elke mogelijke uitkomst aannemen. De afvoer is een voorbeeld van een *continue* variabele. Voor continue variabelen is het vaak doelmatig om te werken met *kansdichtheidsfuncties*.

Een kansdichtheidsfunctie kan beschouwd worden als de continue variant van het frequentiehistogram. Figuur 2.4 maakt een vergelijking tussen een frequentiehistogram, afgeleid op basis van metingen, en een kansdichtheidsfunctie. De kansdichtheidsfunctie is afgeleid uit het frequentiehistogram en is feitelijk een gladde "fit" door het histogram. Door een gladde fit worden oneffenheden uit het histogram weggewerkt die mogelijk een gevolg zijn van "toevalligheden". Overigens kunnen kansdichtheidsfuncties ook op andere wijzen afgeleid worden uit meetdata, het is niet noodzakelijk om eerst een histogram af te leiden.

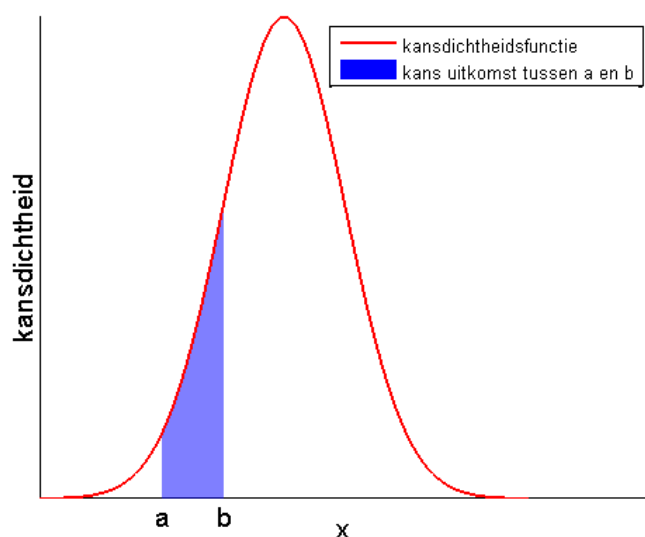


Figuur 2.4 Vergelijking van een kansdichtheidsfunctie en een frequentiehistogram.

Voor een kansdichtheidsfunctie geldt dat het oppervlak onder de functie gelijk is aan 1, mits het hele bereik van mogelijke uitkomsten is weergegeven op de horizontale as.

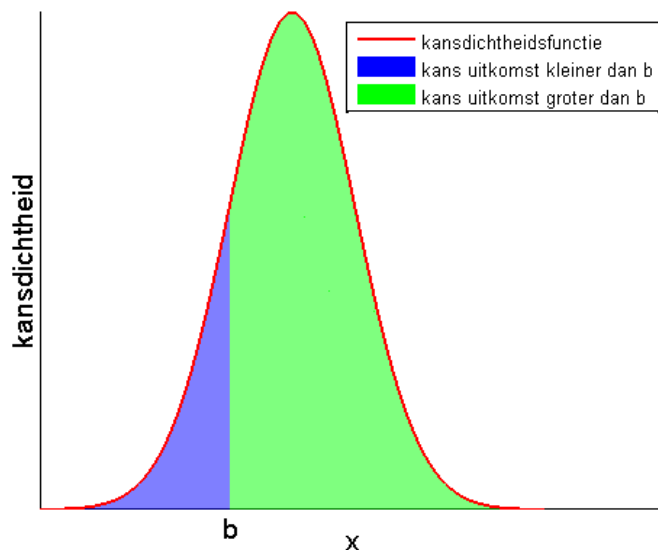
De kansdichtheidsfunctie is net als een histogram doorgaans zeer informatief over verschillen in onderlinge kansen van voorkomen en daarmee ook intuïtief. Hoge waarden van de grafiek duiden op hoge kansen en lage waarden duiden op evenredig lage kansen. Een belangrijk verschil met het kanshistogram is de betekenis van de waarden bij de verticale as. Een kanshistogram geeft de *kans van optreden* weer van de waarden bij de horizontale as, een kansdichtheidsfunctie geeft de *kansdichtheid*. De kansdichtheid laat zich minder eenvoudig uitleggen dan een kans van voorkomen. Formeel gezien is de kansdichtheid de kans per eenheid, waarbij de eenheid verwijst naar de eenheid van de variabele bij de horizontale as. Voor de minder ervaren gebruiker van dergelijke functies verschaft dat niet altijd voldoende duidelijkheid en leidt dit geregeld tot misinterpretaties.

De meest inzichtelijke uitleg van de kansdichtheidsfunctie is dat de oppervlakte onder de functie een weergave is van de kans van voorkomen. Stel bijvoorbeeld dat we de kans willen weten op een uitkomst tussen de waarden a en b die bij de horizontale as van Figuur 2.5 staan weergegeven. Deze kans is gelijk aan het oppervlak van het blauw gearceerde vlak, ofwel het vlak onder de kansdichtheidsfunctie dat ligt ingeklemd tussen de waarden a en b . Om dat oppervlak te kunnen bepalen moet de gebruiker bekend zijn met de wiskundige methode "integreren". Op deze wijze kan dus de kans bepaald worden op een uitkomst tussen de waarden a en b en daarmee kan direct de relatie gelegd worden met kanshistogrammen die voor dergelijke intervallen zijn afgeleid.



Figuur 2.5 Kansdichtheidsfunctie (rode lijn) en de kans dat de realisatie van de variabele ligt tussen de waarden a en b (blauwe oppervlakte).

Door het berekenen van de oppervlakte onder een kansdichtheidsfunctie kan ook de kans bepaald worden dat de uitkomst kleiner of groter is dan een door de gebruiker opgegeven drempelwaarde. Zoals beschreven in 2.1 zijn deze onder- en overschrijdingskansen zeer relevant in de beoordeling van waterkeringen. Figuur 2.6 geeft het voorbeeld van de wijze waarop de kans bepaald wordt dat de realisatie van de variabele kleiner is dan drempelwaarde b (blauwe oppervlakte) en de kans dat de realisatie van de variabele groter is dan drempelwaarde b (groene oppervlakte). De som van deze twee kansen is gelijk aan 1, hetgeen consistent is met de eerdere opmerking dat het totale oppervlak onder een kansdichtheidsfunctie gelijk is aan 1.

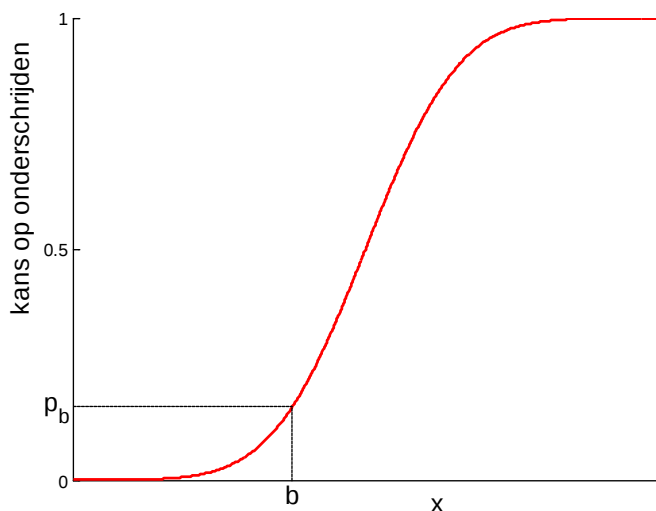


Figuur 2.6 Kansdichtheidsfunctie (rode lijn), kans dat de realisatie van de variabele kleiner is dan b (blauwe oppervlak) en de kans dat de realisatie van de variabele groter is dan b (groene oppervlak).

2.2.3 Kansverdelingsfuncties

In de vorige paragraaf is gedemonstreerd hoe op basis van een kansdichtheidsfunctie de kans berekend kan worden dat een realisatie kleiner is dan een bepaalde drempelwaarde, b . Deze berekening kan in principe uitgevoerd worden voor elke drempelwaarde. Het resultaat is dan een relatie tussen de drempelwaarde enerzijds en de kans op onderschrijden anderzijds. Deze relatie wordt beschreven met een *kansverdelingsfunctie*. Figuur 2.7 geeft een voorbeeld van een kansverdelingsfunctie. De waarde bij de verticale as is de onderschrijdingskans van de waarde bij de horizontale as. De waarde b in deze figuur heeft dus een onderschrijdingskans gelijk aan p_b .

Een kansverdelingsfunctie loopt per definitie van 0 tot 1. De laagst mogelijke realisatie van een variabele (de waarde ter linkerzijde van de horizontale as) heeft namelijk een kans van 0 om onderschreden te worden. Immers, als die kans groter dan 0 is, zijn er kennelijk nog lagere realisaties mogelijk, hetgeen in strijd is met de definitie van "laagst denkbare realisatie". Voor veel variabelen is deze ondergrens gelijk aan 0. Bijvoorbeeld een korreldiameter of een golfhoogte kan niet kleiner zijn dan 0. Op basis van dezelfde redenering heeft de hoogst mogelijke realisatie van een variabele (de waarde ter rechterzijde van de horizontale as) een kans van 0 om overschreden te worden en dus een kans van 1 om onderschreden te worden. Dat verklaart waarom de kansverdelingsfunctie oploopt van 0 tot 1.



Figuur 2.7 Voorbeeld van een kansverdelingsfunctie. De waarde bij de verticale as is de onderschrijdingskans van de waarde bij de horizontale as. De waarde b heeft dus een onderschrijdingskans gelijk aan p_b .

Zoals blijkt uit het voorbeeld van drempelwaarde b uit de vorige paragraaf kan een kansverdelingsfunctie afgeleid worden uit de kansdichtheidsfunctie. Omgekeerd kan de kansdichtheidsfunctie ook afgeleid worden uit de kansverdelingsfunctie. In feite zijn het twee alternatieven voor het beschrijven van dezelfde informatie. De kansverdelingsfunctie heeft als toegevoegde waarde ten opzichte van de kansdichtheidsfunctie dat de kans van onderschrijden van een drempelwaarde direct uit de grafiek afgelezen kan worden. Omgekeerd heeft de kansdichtheidsfunctie als voordeel dat de bijbehorende figuur direct inzicht verschaft over de onderlinge verhoudingen in kansen van voorkomen van bepaalde waarden/klassen. Beide functies hebben dus een duidelijke toegevoegde waarde, en beide worden daarom veelvuldig toegepast in de praktijk van de kansberekening.

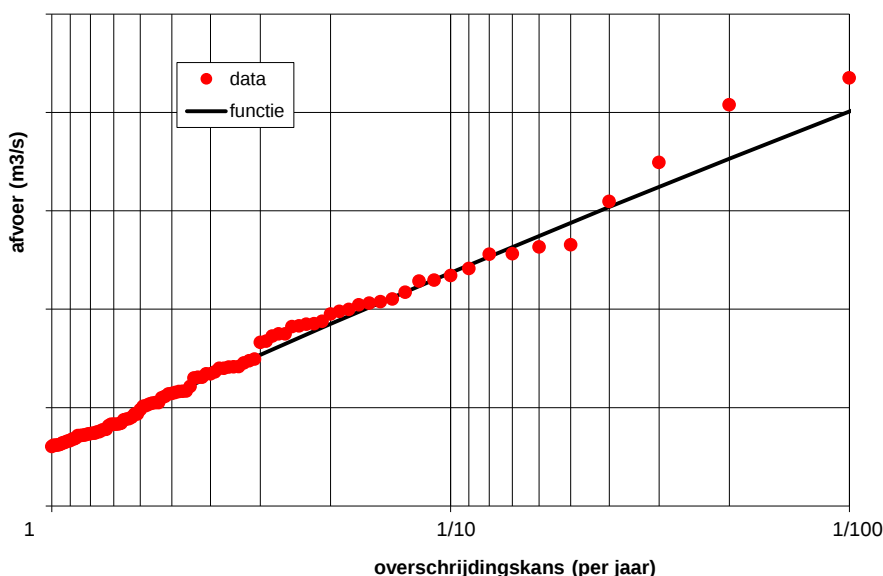
Het afleiden van de kansverdelingsfunctie uit de kansdichtheidsfunctie gebeurt door het berekenen van oppervlakten (wiskundige term: “integreren”) onder de grafiek van de kansdichtheidsfunctie. Het afleiden van de kansdichtheidsfunctie uit de kansverdelingsfunctie gebeurt door het berekenen van de steilheid van de grafiek van de kansverdelingsfunctie (wiskundige term: “differentiëren”).

2.2.4 Extreme waarde verdelingen

Waterkeringen zullen in de praktijk alleen falen bij relatief hoge (“extreme”) belastingen. Daarom gaat de interesse bij de beoordeling van waterkeringen doorgaans uit naar de relatief hoge (“extreme”) belastingen (waterstanden, afvoeren, golven, windsnelheden). Deze hoge belastingen hebben een relatief kleine kans om overschreden te worden. Bij het afleiden en toepassen van kansfuncties voor deze belastingen wordt daarom vaak ingezoomd op de hoge waarden, ofwel de waarden ter rechterzijde van Figuur 2.5 - Figuur 2.7. Deze verdelingen worden afgeleid op basis van de hoogste waarden in de meetreeks, bijvoorbeeld alle jaarmaxima of alle waarden boven een bepaalde drempelwaarde. Dat betekent dat de verdelingen geselecteerd worden die zo goed mogelijk de statistische kenmerken van de hoge waarnemingen beschrijven; er wordt in mindere mate of geheel niet bekeken of de verdelingen ook voor lagere waarden valide zijn. Om die reden worden dergelijke kansverdelingen vaak aangeduid als “extreme waarden verdelingen”.

Bij het inzoomen op de relatief lage overschrijdingskansen kan het doelmatig zijn een andere schaalverdeling te hanteren voor de kanswaarden dan de lineaire schaalverdeling van Figuur 2.7. Daarom wordt vaak een logaritmische schaalverdeling gebruikt. Het voordeel van de logaritmische schaal is dat het onderlinge onderscheid tussen relatief kleine kansen goed zichtbaar blijft. Op een lineaire schaal is er vrijwel geen verschil te zien tussen kansen van bijvoorbeeld 1 op 100 en 1 op 1.000, op een logaritmische schaal is dat verschil wel duidelijk zichtbaar.

Figuur 2.8 geeft een voorbeeld van een extreme waarden verdelingsfunctie voor de afvoer. Met gebruik van de logaritmische schaal is de functie van Figuur 2.8 in dit gestileerde voorbeeld een rechte lijn, maar dit is zeker niet altijd het geval voor extreme waarden verdelingen. Een opvallend verschil met Figuur 2.7 is dat de assen “gedraaid” zijn; de kansen staan nu op de horizontale as. Dat is een conventie die door velen wordt gehanteerd voor extreme waarden verdelingen, al zijn er ook voorstanders van het weergeven van de kans bij de verticale as. Verder merken we op dat als alternatief voor de “overschrijdingskansen” bij de horizontale as ook vaak de “overschrijdingsfrequentie” of de “herhalingstijd” staat weergegeven. Ook dat is vaak een kwestie van conventie, de essentie van de extreme waarden verdeling verandert er niet mee.



Figuur 2.8 Voorbeeld van een extreme-waarden verdelingsfunctie voor jaarmaxima van de afvoer.

Samenvattend zijn er de volgende (mogelijke) verschillen in weergave van een conventionele kansverdelingsfunctie (zoals het voorbeeld van Figuur 2.7) en extreme waarden verdelingen (zoals het voorbeeld van Figuur 2.8):

Tabel 2.1 Veel voorkomende verschillen in weergave tussen conventionele kansverdelingen en extreme waarden kansverdelingen.

Conventionele kansverdelingen	Extreme waarden verdelingen
Lineaire schaal	Logaritmische schaal
Kansen bij verticale as	Kansen bij horizontale as
Onderschrijdingskansen weergegeven	Overschrijdingskansen weergegeven
Kanswaarden	Frequenties of herhalingstijden
Gehele kansruimte getoond	Alleen kleine overschrijdingskansen

Ondanks de onderlinge verschillen, gaat het in beide gevallen om een weergave van de kansverdelingsfunctie. Het is dus feitelijk dezelfde informatie in een andere verpakking.

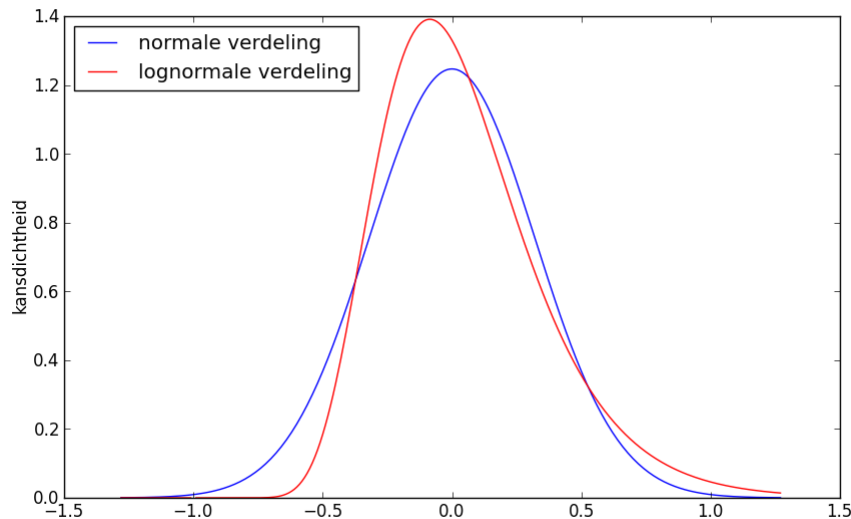
2.2.5 Veel gebruikte kansverdelingsfuncties

Zoals beschreven in de voorgaande paragrafen beschrijven kansverdelingen de relatie tussen enerzijds de mogelijke uitkomst van een onzekere variabele en anderzijds de kans op onderschrijding van deze uitkomst. Deze relatie wordt beschreven met wiskundige formuleringen: kansverdelingsfuncties. Een kansverdelingsfunctie is een combinatie van een kansverdelingstype en de geselecteerde parameterwaarden van dit kansverdelingstype.

Veel gebruikte kansverdelingstypes in WBI-2017 zijn de normale verdeling, de lognormale verdeling, de (conditionele) Weibull-verdeling, de Gumbelverdeling, de Paretoverdeling en de exponentiële verdeling. Een kansverdelingstype heeft doorgaans twee of drie parameters. De waarden van deze parameters worden afgeleid op basis van de beschikbare dataset. Bijvoorbeeld de jaarmaximale zeewaterstanden bij locaties Hoek van Holland en Delfzijl kunnen beide goed beschreven worden met een Weibullverdeling, maar de parameters van de Weibull-verdeling zijn verschillend voor de beide locaties. De statistieken van deze twee locaties worden dus beschreven met hetzelfde kansverdelingstype, maar met verschillende parameters. Het bepalen van parameters die resulteren in de statistiek die het beste overeen komt met de metingen wordt vaak “fitten van kansverdelingen” genoemd.

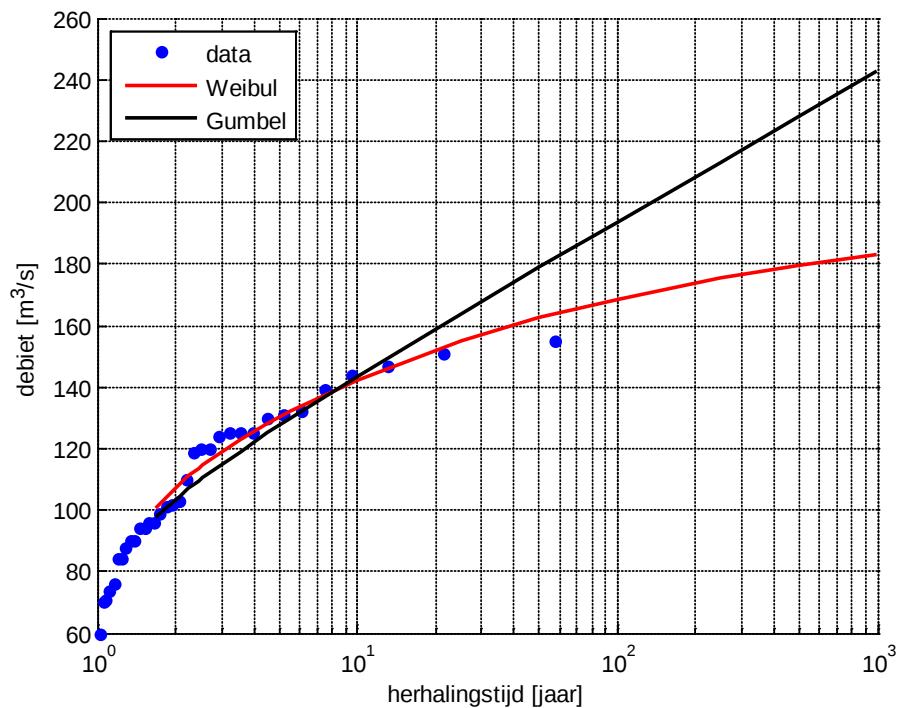
De keuze voor een geschikt kansverdelingstype is afhankelijk van het “gedrag” van de beschouwde stochastische variabele, maar ook van de beschouwde dataset. Bijvoorbeeld, een stochast waar een duidelijke fysische bovengrens aan zit vraagt om een ander kansverdelingstype dan een stochast waarbij geen sprake is van een fysische bovengrens. En het kansverdelingstype van de daggemiddelde waarde van een stochast kan verschillen van het kansverdelingstype waarmee het gedrag van jaarmaxima wordt beschreven.

Voor het beschrijven van “kennisonzekerheden” in WBI-2017 is in de meeste gevallen een normale verdeling of een lognormale verdeling gekozen. De normale verdeling wordt gebruikt als de onzekerheid symmetrisch is, ofwel als de kans op een “meevaller” even groot is als de kans op een “tegenvaller”. In gevallen waarbij de kans op grote “tegenvallers” groter is dan de kans op grote “meevallers” en/of situaties waarbij duidelijk sprake is van een ondergrens wordt een lognormale verdeling gebruikt. De lognormale verdeling is asymmetrisch en heeft een harde ondergrens, in tegenstelling tot de normale verdeling die symmetrisch is en waarbij theoretisch elke uitkomst een kans groter dan 0 heeft (maar niet-realistische uitkomsten in principe wel een verwaarloosbaar kleine kans). Figuur 2.9 toont een voorbeeld van een lognormale verdeling en een normale verdeling, beide met een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie van 0,3.



Figuur 2.9 Voorbeeld van een lognormale verdeling en een normale verdeling, beide met een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie van 0,3.

De keuze van de kansverdelingsfunctie voor extreme waarden wordt deels bepaald door de geselecteerde waarnemingen op basis waarvan de verdeling wordt gefit. Indien jaar-maximale waarden zijn geselecteerd uit de meetreeks wordt in de regel een Weibull-verdeling of Gumbelverdeling gebruikt. Indien alle waarden boven een drempel zijn geselecteerd wordt in principe een Paretoverdeling of exponentiële verdeling gebruikt. De Gumbelverdeling en exponentiële verdeling zijn geschikt voor situaties waarbij de relatie tussen de realisatie van een variabele en de *logaritme* van de corresponderende overschrijdingskans bij benadering lineair is (zoals bijvoorbeeld het geval is in Figuur 2.8). De Paretoverdeling en Weibull-verdeling zijn geschikte verdelingen voor situaties waarbij dat niet het geval is, bijvoorbeeld wanneer er sprake is van een fysische bovengrens. Figuur 2.10 toont een voorbeeld van een Weibull-verdeling en Gumbelverdeling, beide gefit op dezelfde data set.



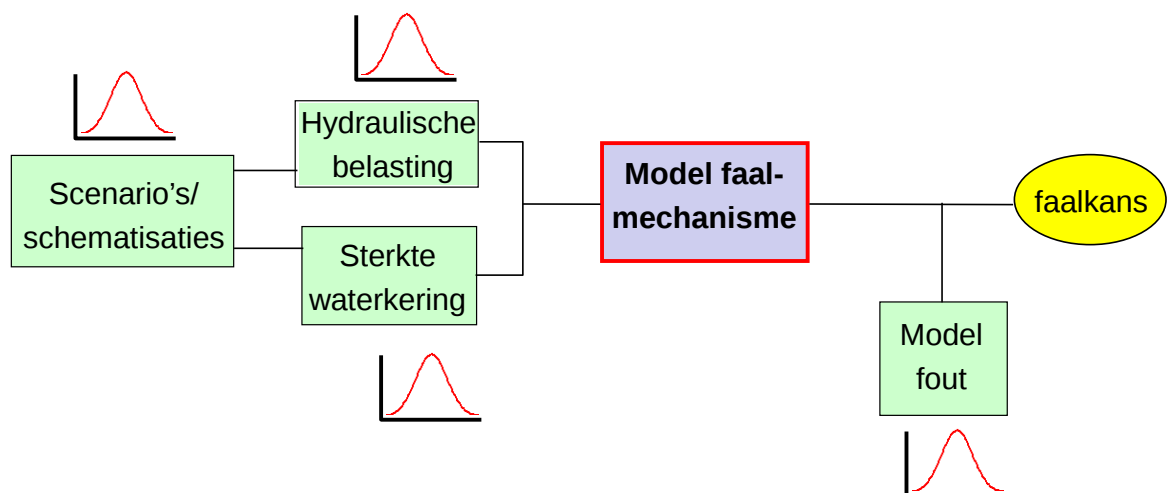
Figuur 2.10 Voorbeeld van een Weibull-verdeling en Gumbelverdeling, beide gefit op dezelfde data set.

3 Afleiden van onzekerheden ten behoeve van WBI-2017

3.1 Typen onzekerheden in WBI-2017

Wellicht het belangrijkste onderdeel van de technische beoordeling van een waterkering is het bepalen van de kans dat de kering faalt, ofwel de kans dat de belasting groter is dan de sterkte van de kering. Om dat te bepalen zijn modellen ontwikkeld waarmee kansen op belastingen en sterktes van de kering bepaald kunnen worden. De belasting en sterkte van de waterkering zijn beide afhankelijk van een aantal onzekere variabelen en dus onzeker. Verder worden modellen gebruikt om de belasting en sterkte te voorspellen, waarmee extra onzekerheid wordt geïntroduceerd (geen model is immers perfect). Kansverdelingen van belasting- en sterkte-eigenschappen kunnen doorgaans alleen gespecificeerd worden *gegeven* een bepaalde schematisatie. Dit betreft bijvoorbeeld de schematisatie van de opbouw van de ondergrond, de waterspanning in de kering, Ruimte voor de Riviermaatregelen etc. Als we onzeker zijn over die schematisatie, dan kunnen we onzekerheid mee nemen door aan alle mogelijke schematisaties kansen van voorkomen toe te kennen. Dit betreft een extra bron van onzekerheid.

Figuur 3.1 toont de vier genoemde bronnen van onzekerheden (groene vlakken)



Figuur 3.1 Bronnen van onzekerheden (groene vlakken) die van invloed zijn op de faalkans.

In dit hoofdstuk worden de bronnen van onzekerheid in detail besproken en wordt beschreven hoe deze in kansverdelingen worden uitgedrukt. De indeling van het hoofdstuk is als volgt:

Paragraaf 3.2 beschrijft de belangrijkste aannames die gedaan zijn bij het afleiden van onzekerheden en het toepassen van deze onzekerheden in de beoordeling. Paragraaf 3.3 beschrijft methoden op basis waarvan kansverdelingen van onzekerheden gekwantificeerd worden. Paragraaf 3.4 beschrijft de afgeleide kansverdelingen van de basisstochasten van het belastingmodel (rivierafvoer, zeewaterstand, wind, meerpeil). In deze paragraaf worden zowel de aleatorische onzekerheden als epistemische onzekerheden besproken. Paragraaf 3.5 beschrijft de modelonzekerheden in het belastingmodel, meer specifiek de mate van onzekerheid in uitkomsten van hydraulische simulatiemodellen.

Paragraaf 3.6 beschrijft de onzekerheden ten aanzien van sterkteparameters en paragraaf 3.7 beschrijft onzekerheden in uitkomsten van sterktemodellen.

3.2 Belangrijkste aannames en uitgangspunten

Uitgangspunten WBI algemeen:

- Onzekerheden in de bepaling van de Hydraulische Belastingen en sterkte waterkeringen in de berekening van de overstromingskansen worden systematisch betrokken. Faalmechanismen en watersystemen worden op een gelijkwaardige wijze betrokken.
- Een beoordeling op overstromingskansen wordt alleen gefaciliteerd voor de zogenaamde 'VNK mechanismen'. Dit zijn dus in principe ook de mechanismen waarvoor onzekerheden expliciet beschreven moeten worden:
 - o overloop en golfoverslag (dijken)
 - o opbarsten en piping (dijken)
 - o macrostabiliteit binnenwaarts (dijken)
 - o beschadiging bekleding en erosie dijklichaam (dijken)
 - steen
 - asfalt
 - gras
 - o overloop en golfoverslag (kunstwerken)
 - o niet sluiten kunstwerken
 - o piping (kunstwerken)
 - o constructief falen kunstwerken
 - o duinafslag
- Ten aanzien van onzekerheden in relatie tot scenario's wordt wel/niet rekening gehouden met onzekerheden in:
 - o Geologie (bodemopbouw): wel
 - o Geohydrologie (waterspanningen): het uitgangspunt was om hier wel rekening mee te houden, voor het toets spoor "macrostabiliteit" is recent besloten dit toch niet te doen omwille van de beperkte beschikbare tijd
 - o Maatregelen (bijv. verhogen slootpeil): niet
 - o Indirecte mechanismen (niet hoogwater-gecorrleerde gebeurtenissen) niet
 - o Niet waterkerende objecten: niet
 - o Zettingsvloeiing: wel

NB in dit geval verwijst "geen rekening houden met..." naar de activiteiten in het kader van het opstellen van de rekenregels van het WBI-2017. In de beoordeling is het in enkele gevallen mogelijk alsnog rekening te houden met aanvullende scenario's.

Keuzes en aannames:

- Onzekerheden van stochastische belastingvariabelen worden in de regel beschreven in termen van de piekwaarde.
- Onzekerheden in het tijdsverloop van belastingvariabelen worden niet expliciet meegenomen. Voor elke variabele wordt dus in principe één (dimensieloos) tijdsverloop aangenomen. In enkele gevallen wordt daarbij een verloop aangenomen dat breder is dan "gemiddeld" om zo impliciet toch rekening te houden met de invloed van de onzekerheid (variatie) in tijdsverlopen. Deze laatste strategie is toegepast voor de watersystemen "benedenrivieren", "IJsseldelta", "Vechtdelta" en "meren", voor de "bovenrivieren" is uitgegaan van het gemiddelde tijdsverloop.

- Onzekerheden in de transformatie van puntstatistiek van de windsnelheid naar een ruimtelijke windveldtransformatie wordt niet expliciet meegenomen.
- De mate van onzekerheid in modeluitkomsten in hydraulische belastingmodellen wordt in de regel gemodelleerd als “onafhankelijk van de herhalingstijd”.
- Modelonzekerheid in het belastingmodel is de onzekerheid in volledige transformatie van basisstochast naar de berekende hydraulische belasting van de uitvoerlocaties van het model. Dat betekent dat effecten van onzekerheden in de invoer van hydraulische modellen, zoals bijvoorbeeld onzekerheden in bodemschematisaties, worden meegenomen als onderdeel van de (totale) modelonzekerheid.
- Modelonzekerheden in het hydraulische belastingmodel worden alleen meegenomen in de hydraulische modellen waarmee de belasting “in de omgeving van” de kering wordt bepaald. Dit betreft modellen als WAQUA, SWAN en Bretschneider. In de belastingmodellen wordt de uitvoer van de hydraulische modellen nog vertaald naar de kering, rekening houdend met voorlanden etc. Onzekerheden in deze laatste stap zijn niet meegenomen.

3.3 Methoden voor het kwantificeren van onzekerheden

Deze paragraaf beschrijft de methoden die zijn toegepast in WBI-2017 ter bepaling van de onzekerheden.

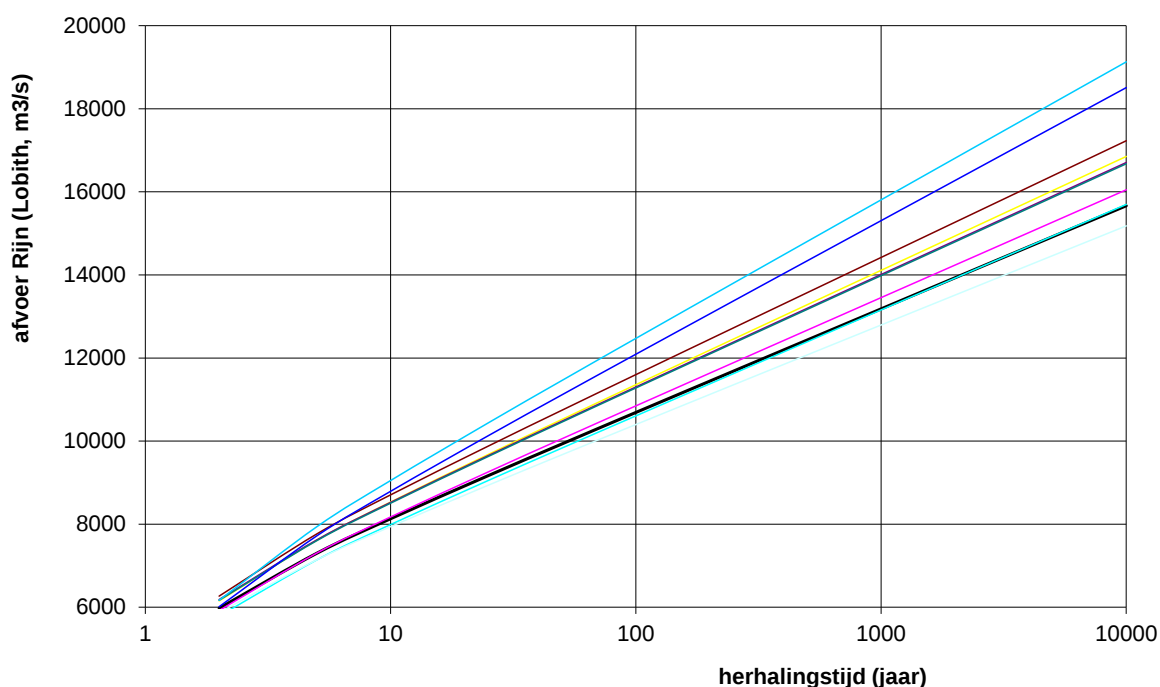
3.3.1 Statistische extrapolatie

Statistieken van belastingen zijn in de regel gebaseerd op meetreeksen bij een station of bij een combinatie van verschillende stations. Typisch zijn hiervoor in de orde van 50 – 100 jaar metingen beschikbaar. Deze resultaten geven een schat aan informatie, maar dat kan niet voorkomen dat de resulterende statistieken met significante onzekerheden behept zijn. Dat heeft vooral te maken met het feit dat voor de beoordeling van waterkeringen gegevens nodig zijn voor herhalingstijden die vaak vele malen groter zijn dan de lengte van de meetreeks. Voor dergelijke herhalingstijden moet noodgedwongen gebruik gemaakt worden van (statistische) extrapolatietechnieken en dat brengt extra onzekerheden met zich mee. De factor “toeval” speelt daarbij een belangrijke rol. Het is immers mogelijk dat de periode van meten “toevallig” een relatief natte of juist relatief droge periode is geweest met relatief veel/weinig hoogwaters. Dat weten we echter pas als we de beschikking hebben over meerdere meetperiodes van vergelijkbare lengte, maar dat is per definitie niet het geval.

Er zijn echter wel statistische methoden beschikbaar die de mogelijke invloed van de factor “toeval” kunnen kwantificeren. Dit laat zich het beste uitleggen aan de hand van een eenvoudig experiment. In dat experiment gebruiken we de statistiek van de (piek)afvoer van de Rijn, zoals afgeleid in voorgaande toets ronden. Deze statistiek, ook wel “werklijn” genoemd beschrijft de relatie tussen de piekafvoer enerzijds en de corresponderende herhalingstijd anderzijds. Voor de volledigheid: de herhalingstijd is de *gemiddelde* tijdsduur tussen twee overschrijdingen van het corresponderende afvoerniveau. In voorgaande toets ronden is bijvoorbeeld vastgesteld dat een Rijnafvoer van 16.000 m³/s een herhalingstijd heeft van 1250 jaar. In het experiment nemen we voor het gemak aan dat deze relatie tussen afvoeren en overschrijdingsfrequenties “de waarheid” beschrijft. Op basis van deze statistiek voeren we trekkingen uit waarmee we een nieuwe, synthetische, reeks van afvoeren wordt gegenereerd van 100 jaar lengte. Deze procedure is te vergelijken het 100 keer achter elkaar gooien van een dobbelsteen, alleen zijn de uitkomsten nu niet gehele getallen tussen 1 en 6, maar mogelijke uitkomsten van de hoogst gemeten afvoer in een jaar.

Deze procedure van 100 trekkingen herhalen we 10 keer, zodat we 10 synthetische afvoerreeksen hebben.

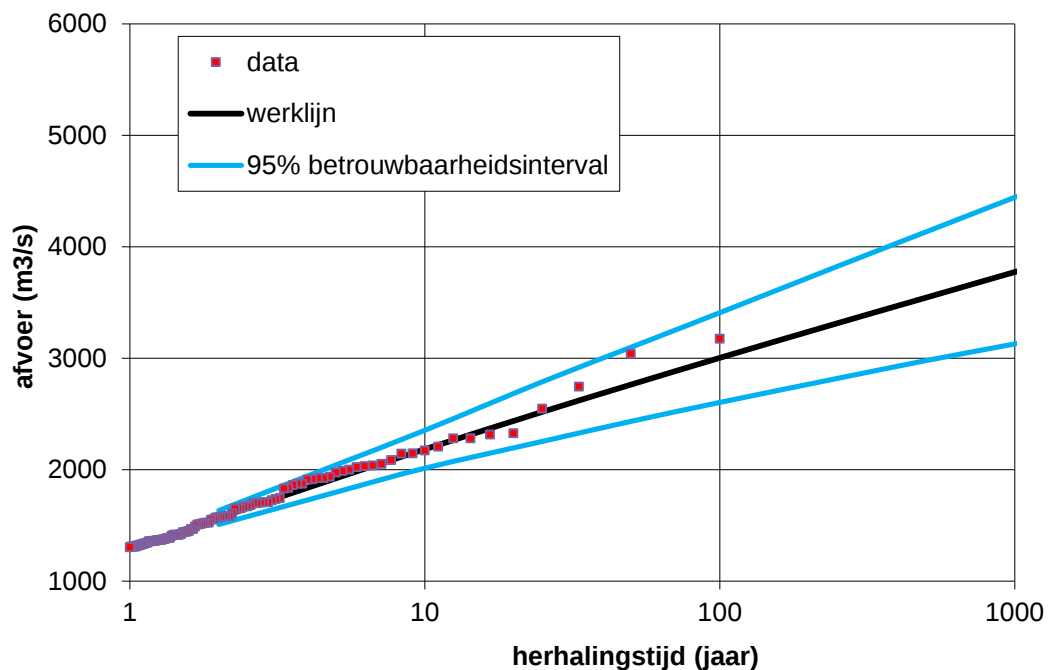
Globaal gezien zullen deze 10 reeksen dezelfde kenmerken hebben, omdat ze alle tien uit dezelfde kansverdeling getrokken zijn. Echter, vanwege het kans-element ("toeval") zijn de reeksen niet hetzelfde. Ook hier gaat weer de vergelijking op met de dobbelsteen: Laat 10 mensen elk 100 keer met een dobbelsteen gooien en de uitkomsten van hun worpen zullen onderling verschillend zijn. Voor elk van de 10 synthetische reeksen hebben we vervolgens gedaan alsof deze waargenomen reeksen van afvoeren voorstellen en op basis daarvan een statistiek afgeleid die is weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Tien werklijnen van de afvoer van de Rijn bij Lobith, afgeleid op basis van tien synthetische reeksen.

Uit deze figuur blijkt een significante mate van spreiding tussen de tien werklijnen. Deze spreiding kan volledig toegewezen worden aan de factor "toeval". Verder blijkt duidelijk uit deze figuur dat de mate van spreiding groter is voor langere herhalingstijden. Dat heeft te maken met het feit dat voor hoge herhalingstijden relatief weinig informatie beschikbaar is. De factor toeval speelt dan een grotere rol.

Zoals gezegd zijn er statistische technieken waarmee deze mate van onzekerheid als gevolg van de factor toeval gekwantificeerd kan worden (zie bijvoorbeeld Van den Boogaard and Diermanse, 2005, voor een overzicht). Voor het onderhavige rapport voert het te ver door om de technische details van dergelijke methoden te bespreken. Het voornaamste resultaat van dergelijke analyses is een werklijn in combinatie met betrouwbaarheidsintervallen. Figuur 3.3 geeft een voorbeeld van een werklijn met 95% betrouwbaarheidsinterval. De werklijn kan beschouwd worden als de beste schatting. Het betrouwbaarheidsinterval geeft aan binnen welke grenzen de "werkelijke" werklijn zich naar alle waarschijnlijkheid bevindt (95% "zekerheid").



Figuur 3.3 Voorbeeld van een werklijn met 95% betrouwbaarheidsinterval, afgeleid op basis van statistische extrapolatie-technieken.

3.3.2 Statistische extrapolatie in combinatie met fysica

De onzekerheden zoals afgeleid op basis van de methoden van de vorige paragraaf zijn louter gebaseerd op statistische methoden. Deze methoden houden geen rekening met mogelijke fysische begrenzings in het systeem. Met name bij extrapolatie naar grote herhalingsjijden kunnen dergelijke fysische begrenzings mogelijk een rol spelen. Dit kan zowel voor de afgeleide werklijn als voor de bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen gevolgen hebben. In het uiterste geval leveren de statistische analyses resultaten op die fysisch helemaal niet mogelijk zijn.

Mede ingegeven door het feit dat in WBI-2017 meer expliciet rekening gehouden wordt met onzekerheden, wordt in toenemende mate de fysica betrokken bij het afleiden van onzekerheden. Er zijn verschillende methoden beschikbaar om dit te doen, waarvan er hier drie besproken worden:

[1] De eerste methode worden de belangrijkste fysische processen in het systeem gesimuleerd met een numeriek simulatiemodel. Vervolgens worden statistieken van de belangrijkste invoervariabelen van het model afgeleid. De invoerstatistieken en modelberekeningen worden gecombineerd om een (nieuwe) statistiek af te leiden van de uitvoervariabelen. Er zijn verschillende methoden beschikbaar om deze laatste stap uit te voeren. Deze kunnen geschaard worden onder de noemer “probabilistische rekentechnieken” (zie paragraaf 4.7). Een sprekend voorbeeld van een dergelijke methode is GRADE (Deltares en KNMI, 2014a,b), waarmee statistieken van Rijn- en Maasafvoeren bepaald worden. Op basis van beschikbare neerslagstatistieken worden lange synthetische neerslagreeksen voor de stroomgebieden van Rijn en Maas gegenereerd. Dat wordt gerealiseerd met een “resampling” methode, ofwel het kunstmatig verlengen van een meetreeks door trekkingen uit te voeren van waargenomen weerpatronen uit de bestaande meetreeks.

Vervolgens worden deze reeksen gesimuleerd met een gecombineerd hydrologisch-hydrodynamisch model. Het resultaat is een lange reeks (duizenden jaren) van afvoeren, waar direct statistiek uit afgeleid kan worden zonder gebruik van extrapolatie. In deze reeksen kunnen, vanwege het gebruik van het hydrologisch/hydrodynamische model, de effecten van de belangrijke fysische processen worden meegenomen, zowel voor de werklijn als de bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen is dankzij het hydrologisch-hydrodynamisch de invloed van de fysica beperkingen ingebracht.

[2] De tweede methode is het vaststellen en opleggen van een fysisch maximum. Indien beperkingen van het fysische systeem zodanig zijn dat met een zekerheid grenzende waarschijnlijkheid een bovengrens opgelegd kan worden, dan kan deze eenvoudig ingebracht worden in de statistiek. Dit is bijvoorbeeld gedaan voor de afvoer van de Vecht (Deltares 2015a). Het fysisch maximum is daar vastgesteld op 800 m³/s. Door deze bovengrens op te leggen wordt de mate van onzekerheid gereduceerd.

[3] Een derde methode is het bepalen van karakteristieken van statistische parameters op basis van modelsimulaties. Kansverdelingen van extreme waarden worden doorgaans gekarakteriseerd door twee of drie parameters. Systeemkennis en/of modelsimulaties kunnen informatie verschaffen over deze parameters waardoor de mate van onzekerheid over deze parameters, en daarmee de mate van onzekerheid over de kansverdeling, gereduceerd kan worden. Dit is bijvoorbeeld gedaan voor onzekerheden in zeewaterstanden waar, op basis van simulaties, de onzekerheid in de “vormparameter” van de kansverdeling verkleind kon worden (HKV, 2015).

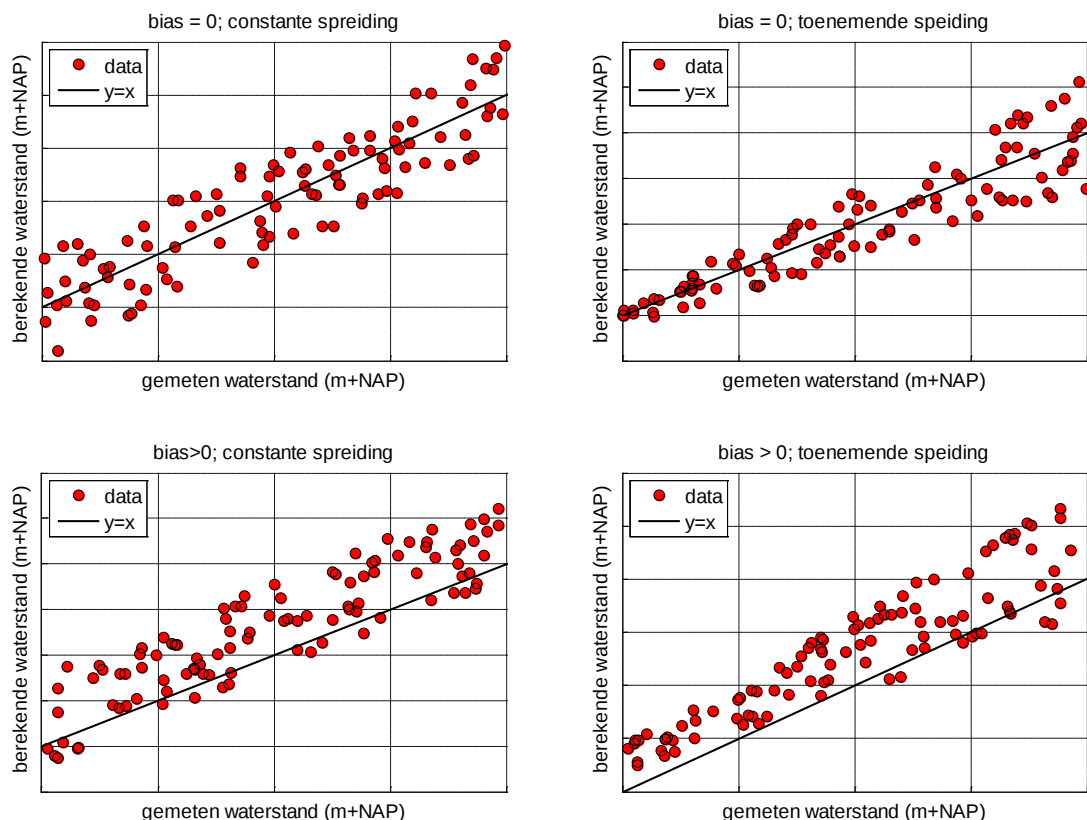
3.3.3 Vergelijking van modelresultaten met metingen

In de sterkte- en belastingmodellen van WBI-2017 wordt veelvuldig gebruik gemaakt van simulatiemodellen. Voorbeelden zijn het model WAQUA (waterstanden), SWAN (golven), DUROS+ (duinafslag) en Steentoets (stabiliteit steenzettingen). Waar mogelijk worden de uitkomsten van deze modellen vergeleken met metingen in het veld of in laboratorium-experimenten.

Een vergelijking van modelvoorspellingen met metingen geeft een indruk van de mogelijke fout die gemaakt wordt in de modelvoorspelling. Belangrijke karakteristieken die daarbij afgeleid worden zijn de gemiddelde modelfout (ook wel ‘bias’ genoemd) en de standaarddeviatie (‘spreiding’) van de modelfout. Als een model goed is afgestemd op de metingen is de bias (nagenoeg) gelijk aan 0. Sommige modellen zijn op historische gronden echter conservatief van aard waardoor mogelijk een bias wordt geïntroduceerd: het model “overschat” dan in de regel de mate van belasting en/of de hoeveelheid schade aan een waterkering bij een gegeven belasting. In de onzekerheidsanalyse van WBI-2017 wordt hier zoveel mogelijk rekening mee gehouden om te voorkomen dat het conservatisme in de modellen resulteert in een groot aantal onterecht afgekeurde waterkeringen. Elke modelvoorspelling in het belastingmodel wordt dan gecorrigeerd door de waarde van de bias ervan af te trekken.

Een model waarvoor de spreiding van de modelfout gelijk is aan 0 komt in de praktijk niet voor. Dat zou namelijk betekenen dat het model perfect in staat is om het gedrag van het watersysteem of de waterkering te beschrijven en dat is helaas een utopie.

Figuur 3.4 geeft enkele fictieve voorbeelden van vergelijkingen van modelvoorspellingen (verticale as) en metingen (horizontale as) van de waterstand. In elke sub-figuur is de lijn $y=x$ weergegeven. Hoe dichter de punten op deze lijn liggen, des te beter de modelvoorspelling. In de bovenste twee sub-figuren is de bias gelijk aan 0, d.w.z. gemiddeld gezien is er geen sprake van een over- of onderschatting van de waterstand door het model. In de onderste twee figuren is er sprake van een gemiddelde overschatting door het model. In de twee sub-figuren aan de linkerzijde is sprake van een constante spreiding, in de sub-figuren ter rechterzijde is de spreiding groter voor toenemende waterstanden.



Figuur 3.4 Vergelijking van metingen (horizontale as) en model-voorspellingen (verticale as) voor vier combinaties van bias en spreiding.

Op basis van vergelijkingen tussen metingen en modelvoorspellingen kan de modelfout ('modelonzekerheid') gekwantificeerd worden als stochastische variabele. Belangrijke karakteristieken als de bias, spreiding en de eventuele variatie in deze waarden als functie van de gemeten/gemodelleerde waarde kunnen allemaal meegenomen worden in de kansverdeling waarmee de modelfout wordt beschreven in de onzekerheidsanalyse.

Van de extreme condities die voor de beoordeling relevant zijn, zijn in de regel geen metingen beschikbaar. De prestaties van een model voor deze condities kunnen daardoor niet direct afgeleid worden uit vergelijkingen met metingen. De stochastische beschrijving van de modelfout moet in dat geval geëxtrapoleerd worden naar het bereik van de extreme condities die voor de beoordeling relevant zijn.

3.3.4 Expert beoordelingen

In veel gevallen is er niet of nauwelijks beschikking over de benodigde meetreeksen om direct een kansverdeling af te leiden. In dat geval is de voor de hand liggende optie om onzekerheden af te schatten op basis van expert beoordelingen. Het is voor veel experts op het gebied van de fysica niet eenvoudig in kanswaarden te denken. Het is daarom doelmatiger om kwalitatieve vragen te stellen tijdens een expertsessie. Het volgende voorbeeld van een dergelijke vraag is overgenomen uit Deltares (2009a):

Een analyse wordt gedaan naar het meest waarschijnlijke moment dat een bus arriveert bij een busstation, in de wetenschap dat eens per uur een bus langs komt. De volgende drie vragen worden gesteld:

- 1 De bus komt zeer waarschijnlijk niet voor tijdstip t_1 . Wat is naar uw mening tijdstip t_1 ?
- 2 Vanaf welk tijdstip, t_2 , heeft u het gevoel dat de bus elk moment kan komen?
- 3 De bus komt zeer waarschijnlijk niet na tijdstip t_3 . Wat is naar uw mening tijdstip t_3 ?

De waarden van tijdstippen t_1 , t_2 , en t_3 kunnen bijvoorbeeld beschouwd worden als de 5%, 50% en 95% kwantielen. Anders gezegd, er is naar verwachting 5% kans dat de bus eerder komt dan tijdstip t_1 , 50% kans dat deze eerder komt dan t_2 en 95% kans dat deze eerder komt dan t_3 . Uiteraard zal elke expert andere waarden invullen voor t_1 , t_2 , en t_3 , dus deze uitkomsten zullen op de correcte wijze moeten worden "gemiddeld".

Cooke (2001) beschrijft een wetenschappelijke aanpak van expert-sessies. De methoden in het boek dienen om een oordeel te krijgen dat zoveel mogelijk is ontdaan van 'vooroordelen' ('bias'). Er zijn diverse oorzaken voor het ontstaan van een bias, zoals expert-sessies waarbij één persoon dominant aanwezig is en daarmee mogelijk de inschatting van de andere experts kan beïnvloeden. De mening van één persoon krijgt dan een groot aandeel in de uitkomsten. Een methode om dit tegen te gaan is om de experts de vragen eerst schriftelijk te laten beantwoorden, zonder de kans te geven dat experts elkaar kunnen beïnvloeden.

In het kader van WBI-2017 zijn diverse expert sessies gehouden over onzekerheden van sterkte- en belastingparameters. Deels kon ook geput worden uit informatie van eerdere expert sessie in het kader van bijvoorbeeld het project 'De Veiligheid van Nederland in Kaart (VNK)'.

3.3.5 Scenario's

Onzekerheden worden vaak weergegeven als kansverdelingen en/of betrouwbaarheidsintervallen. Voor sommige toepassingen is een dergelijke weergave niet doelmatig en heeft het de voorkeur om onzekerheden te representeren door scenario's. Dit geldt bijvoorbeeld voor de onzekerheden in de opbouw van de ondergrond. Deze opbouw kan zo gevarieerd en complex zijn dat het zich moeilijk laat beschrijven door enkele parameters met bijbehorende kansverdelingen. Voor de beschrijving van de ondergrond worden daarom telkens enkele scenario's gedefinieerd met elk hun kans van voorkomen. De kansverdelingen van de parameters kunnen dan steeds voor een specifiek scenario worden bepaald. De combinaties van scenario's en hun kansen geven samen een kwantitatieve weergave van de onzekerheid. Paragraaf 3.7.1 geeft meer details over de ondergrondscenario's.

Scenario's die voor het beoordelen van waterkeringen relevant kunnen zijn:

- 1 Geologie (bodempopbouw);
- 2 Geohydrologie (waterspanningen);
- 3 Maatregelen (bijv. verhogen slootpeil);
- 4 Indirecte mechanismen (niet hoogwater-gecorrleerde gebeurtenissen).

Het uitgangspunt van WBI-2017 was om alleen rekening gehouden met scenario-type 1 en 2. Vanwege de hoge tijdsdruk is de ambitie om onzekerheden in waterspanningen mee te nemen in de methode voor het toets spoor macrostabiliteit gaandeweg komen te vervallen. Anderzijds is voor indirecte mechanismen uiteindelijk besloten om wel de mogelijkheid van het gebruik van scenario's te faciliteren.

3.4 Statistische onzekerheden in hydraulische belastingen

3.4.1 Inleiding

De hydraulische belasting van een (primaire) waterkering bestaat uit de heersende combinatie van de waterstand en golfkarakteristieken (golfhoogte, golfperiode en golfrichting) op een representatieve locatie voor de kering. Om (kansen op) hydraulische belastingen te bepalen zijn statistieken nodig voor alle dijkvakken en duinraaien langs de primaire waterkeringen in Nederland. Omdat het niet haalbaar is om op elke locatie op continue basis de waterstand en golven te meten, zijn voor dit doeleinde zogenoemde “belastingmodellen” ontwikkeld. Deze belastingmodellen bestaan uit de volgende onderdelen:

- 1 De statistiek van de basisstochasten die de belangrijkste variabiliteit van het watersysteem beschrijven;
- 2 Een vertaling van deze basisstochasten naar een hydraulische belasting op de waterkering bij de teen van de kering op basis van hydraulische modelsimulaties;
- 3 Een kansberekening voor overschrijding van maatgevende belastingen (waterstanden en/of golfcondities), en
- 4 Eventuele toeslagen voor effecten die nog niet zijn meegenomen in de vorige drie punten/berekeningen.

De huidige paragraaf beschrijft de onzekerheden in de basisstochasten (onderdeel 1), paragraaf 3.5 beschrijft de onzekerheden in de hydraulische modelsimulaties (stap 2).

De belangrijkste basisstochasten in de hydraulische belastingmodellen zijn:

- Rivierafvoeren (Rijn, Maas en Vecht);
- Zeewaterstand;
- Golven op “diep water” op zee;
- Meerpeil (IJsselmeer, Markermeer);
- Wind (snelheid en richting).

Deltares (2015a) beschrijft de kansverdelingen van de basisstochasten die de natuurlijke variabiliteit beschrijven (aleatorische onzekerheden) en de bijbehorende kennisonzekerheden (epistemische onzekerheden). De kansverdelingen van de basisstochasten moeten worden opgevat als beste schattingen van de “werkelijke” (maar ons onbekende) kansverdelingen van de natuurlijke variabiliteit.

3.4.2 Overzicht van de stochasten per belastingmodel en regio

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de belastingmodellen en Tabel A.1 uit bijlage A geeft een overzicht van de basisstochasten per regio.

Naast de genoemde stochasten van Tabel A.1 is overwogen om de volgende variabelen ook mee te nemen als stochastische variabelen:

- 1 Stormduur;
- 2 Stormopzetduur;
- 3 Getijfase;
- 4 Bodemvariatie;
- 5 Laterale toestromingen rivieren;
- 6 Splitsingspunten rivieren;
- 7 Strijklengte;
- 8 Golfvorm afvoer;
- 9 Seiches.

Variabelen 1 en 8 zijn uiteindelijk niet als stochast meegenomen, variabelen 2 en 3 zijn alleen voor de Oosterschelde als stochast meegenomen, variabele 9 is alleen voor de regio Europoort als stochast meegenomen en variabelen 4 t/m 7 zijn meegenomen in de bepaling van modelonzekerheden (zie paragraaf 3.5).

Tabel 3.1 De 18 verschillende regio's in de belastingmodel van WBI-2017

1. Bovenrivieren (Rijn)	7. IJsselmeer	13. Hollandse Kust Zuid
2. Bovenrivieren (Maas)	8. Markermeer	14. Oosterschelde
3. Benedenrivieren (Rijn)	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. Benedenrivieren (Maas)	10. Waddenzee West	16. Duinen
5. IJsseldelta	11. Hollandse Kust Noord	17. Europoort
6. Vechtdelta	12. Hollandse Kust Midden	18. Limburgse Maas

Tabel 3.2 Belastingmodellen

Belastingmodel	Regio's
Bovenrivierengebied	1, 2, 18
Benedenrivierengebied	3, 4, 17
Vecht en IJssel-delta	5, 6
Kustgebieden (dijken)	9, 10, 11, 12, 13, 15
Merengebied	7, 8
Oosterschelde (dijken)	14
Duinen	16

3.4.3 Statistiek van basisstochasten (natuurlijke variabiliteit)

3.4.3.1 Afvoerstatistiek

Afvoerstatistieken zijn afgeleid voor de Rijn (Lobith), de IJssel (Olst), de Maas (Borgharen en Lith) en de Vecht (Dalfsen).

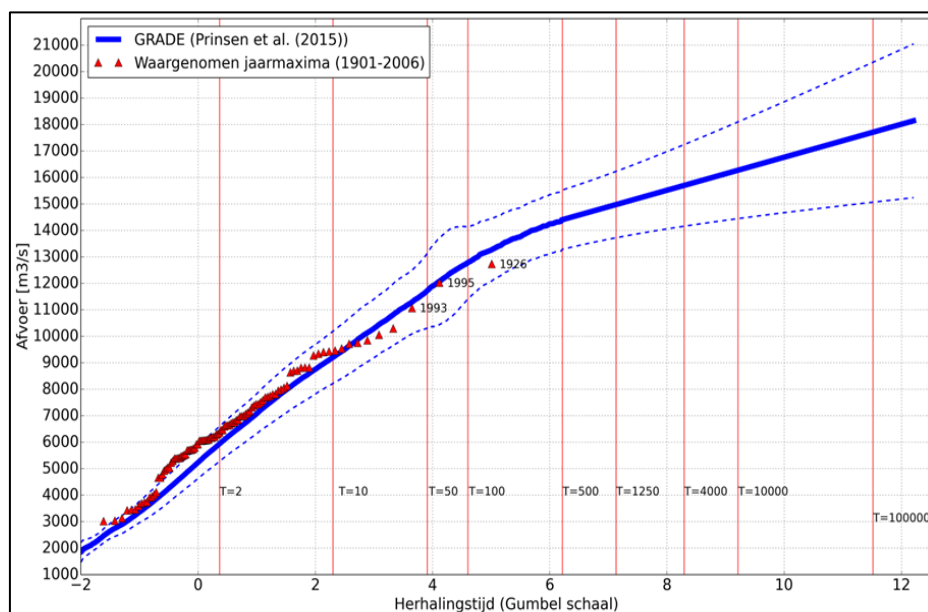
De afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith is uitvoerig beschreven in Deltares en KNMI (2014a) en Deltares (2015c). Deze is bepaald met het model GRADE¹, een combinatie van een stochastische neerslaggenerator en een hydraulisch/hydrologisch simulatiemodel van de Rijn. Met GRADE zijn verschillende varianten worden doorgerekend: de situatie waarbij wel/geen overstromingen in de bovenstroomse delen van het stroomgebied worden beschouwd al dan niet in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen te beperken. De variant waarbij geen rekening wordt gehouden met en noodmaatregelen in Duitsland zou een onderschatting van de waterstanden bij Lobith kunnen geven omdat verwacht wordt dat bij extreem hoogwater op de Rijn in Duitsland noodmaatregelen getroffen zullen worden. Dit wordt als onvoldoende conservatief beoordeeld. Voor toepassing binnen WBI-2017 is daarom gekozen voor de variant met overstromingen en eventuele inzet van noodmaatregelen. Deze variant wordt als voldoende conservatief beschouwd. Bij het vaststellen van de onzekerheden is rekening gehouden met onzekerheden in klimaat, hydrologie en hydraulica (SOBEK). Onzekerheden in het SOBEK-model omvatten het al dan niet treffen van noodmaatregelen om overstromingen in Duitsland, de dijkhoogtes, het bergend volume achter de dijken, het al dan niet bezwijken van de dijken en de bodemfrictie.

Tabel 3.3 en Figuur 3.5 beschrijven de uitkomsten van GRADE. Figuur 3.5 laat zien dat vanaf afvoeren van ca. 12.000 m³/s een afvlakking optreedt. Deze afvlakking is niet aanwezig in statistieken van voorgaande toets ronden. Dat heeft te maken met het feit dat in vorige toets ronden nog geen gebruik gemaakt kon worden van GRADE. Destijds zijn statistieken rechtstreeks afgeleid uit metingen van afvoeren bij Lobith. Verder valt op dat voor afvoeren met herhalingstijden tussen 50 en 100 jaar een knik te zien is in de onzekerheidsband. Dit heeft komt doordat rondom dit afvoerniveau (12.000 m³/s) de eerste overstromingen optreden in Duitsland. Hierdoor kunnen kleine aanpassingen van de modelparameters in GRADE er voor zorgen dat het net wel, of juist net niet gaat overstromen. De invloed van onzekerheden in parameterwaarden wordt daardoor extra groot rondom dit afvoerniveau. Voor lagere afvoeren doen dergelijke aanpassingen er feitelijk niet toe, want dan overstroomt het in ieder geval niet in Duitsland. Voor hogere afvoeren kunnen kleine aanpassingen er wel voor zorgen dat het lokaal niet (of wel) gaat overstromen, maar doordat de afvoer zo hoog is kan een dergelijke aanpassing worden gecompenseerd door een overstroming op een andere locatie.

Tabel 3.3 Afvoeren van de Rijn bij Lobith inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen. Bron: Deltares (2015c).

Herhalingstijd	Afvoer [m ³ /s]	95% betrouwbaarheidsinterval	
		ondergrens	bovengrens
2	5.940	5.280	6.600
5	7.970	7.110	8.840
10	9.130	8.160	10.100
30	10.910	9.730	12.080
100	12.770	11.400	14.150
300	14.000	12.910	15.100
1.000	14.840	13.620	16.050
1.250	14.970	13.720	16.230
3.000	15.520	14.060	16.980
10.000	16.270	14.450	18.100
30.000	16.960	14.750	19.160
100.000	17.710	15.060	20.350

¹ GRADE = Generator for Rainfall And Discharge Extremes



Figuur 3.5 Resultaten GRADE voor de Rijn bij Lobith rekening houdend met overstromingen in bovenstroomse delen van het stroomgebied en eventuele inzet van noodmaatregelen (Bron (Prinsen et al, 2015)).

Voor locatie Olst aan de IJssel is een werklijn met bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen afgeleid uit de statistieken van de Rijn bij Lobith. Hiertoe zijn 13 afvoergolven bij Lobith doorgerekend met het WAQUA-Rijntakken model, resulterend in 13 afvoergolven bij Olst. Tabel 3.4 beschrijft de resulterende relatie tussen herhalingsstijden en afvoeren.

Tabel 3.4 Afvoeren van de IJssel bij Olst inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen.

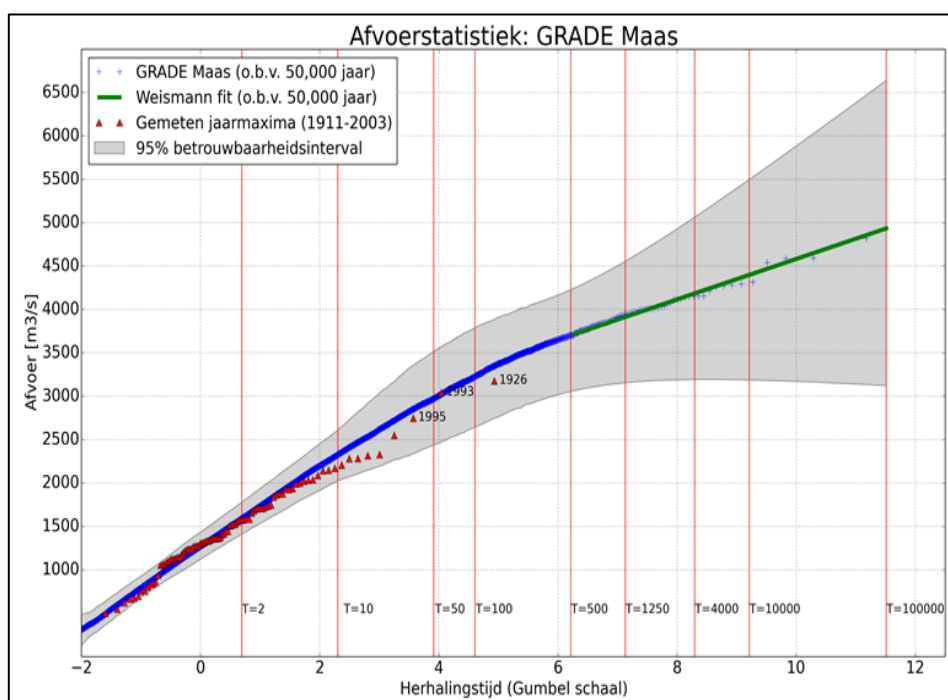
Herhalingsstijd	Afvoer [m ³ /s]	95% betrouwbaarheidsinterval	
		ondergrens	bovengrens
2	787	697	881
5	1.090	956	1.233
10	1.282	1.121	1.453
30	1.603	1.387	1.831
100	1.972	1.697	2.268
300	2.235	2.001	2.483
1.000	2.423	2.152	2.707
1.250	2.453	2.174	2.750
3.000	2.581	2.248	2.935
10.000	2.760	2.335	3.221
30.000	2.930	2.403	3.503
100.000	3.120	2.474	3.834

Net als voor de Rijn wordt de afvoerstatistiek voor de Maas geschat met GRADE. Details met betrekking tot de GRADE statistiek voor de Maas bij Borgharen zijn te vinden in Deltares en KNMI (2014). Voor de Maas wordt alleen de optie zonder dijkdoorbraken in bovenstroomse gebieden in België beschouwd. In opdracht van RWS-WVL is recentelijk door de Universiteit van Luik (ULG) onderzoek gedaan naar mogelijke demping van extreme hoogwatergolven door overstromingen rond Luik. Uit de berekeningen blijkt dat de demping relatief beperkt is, in de orde van 3 á 5%. Het is de bedoeling om deze kennis in de toekomst te verwerken in GRADE voor de Maas. Hiertoe is echter nader onderzoek nodig. Onder de aanname dat er voldoende neerslag kan vallen, lijkt er vooralsnog geen fysisch maximum te zijn in de

afvoercapaciteit van de Maas. Mede hierdoor is besloten om geen aftopping van de werklijn van de Maas bij Borgharen toe te passen. Figuur 3.6 en Tabel 3.5 tonen de resulterende werklijn en onzekerheidsbanden voor de Maas bij Borgharen.

Tabel 3.5 Afvoeren van de Maas bij Borgharen behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval	
		ondergrens	bovengrens
2	1.440	1.270	1.610
5	1.970	1.740	2.200
10	2.300	2.010	2.590
20	2.600	2.190	3.020
50	2.970	2.430	3.510
100	3.220	2.650	3.800
250	3.520	2.950	4.090
500	3.700	3.110	4.290
1.250	3.910	3.210	4.610
2.000	4.020	3.240	4.810
4.000	4.180	3.250	5.120
10.000	4.400	3.240	5.550
20.000	4.560	3.230	5.890
50.000	4.770	3.200	6.350
100.000	4.930	3.180	6.690



Figuur 3.6 Resultaten van GRADE voor de Maas bij Borgharen inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen.

Behalve voor Borgharen zijn ook statistieken afgeleid voor locatie Lith, ten behoeve van de belastingmodellen voor de benedenrivieren (Tabel 3.6). Hiertoe zijn 15 afvoergolven bij

Borgharen doorgerekend met het WAQUA model van de Maas schematisatie resulterend in 15 afvoergolven bij Lith. De resulterende werklijn en onzekerheden zijn in dezelfde orde van grootte als voor Borgharen. Het verschil bedraagt 30 m³/s voor een herhalingstijd van 2 jaar en loopt op tot ruim 300 m³/s voor een herhalingstijd van 100.000 jaar.

Tabel 3.6 Afvoeren van de Maas bij Lith behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval	
		ondergrens	bovengrens
2	1.409	1.259	1.559
5	1.880	1.675	2.086
10	2.177	1.916	2.439
20	2.448	2.077	2.831
50	2.785	2.294	3.282
100	3.014	2.493	3.551
250	3.291	2.767	3.822
500	3.458	2.913	4.009
1.250	3.653	3.005	4.312
2.000	3.756	3.032	4.502
4.000	3.906	3.042	4.797
10.000	4.113	3.032	5.211
20.000	4.264	3.023	5.541
50.000	4.463	2.996	5.990
100.000	4.616	2.977	6.325

De statistiek van de afvoer van de Vecht bij Dalfsen en de bijbehorende onzekerheidsbanden zijn rechte reeks bepaald uit metingen (Deltares, 2014c). Tabel 3.7 toont de resultaten. In deze Tabel zijn afvoeren > 800 m³/s gemarkeerd omdat deze fysisch onmogelijk worden geacht. In het vervolg worden deze waarden daarom gelijk gesteld aan 800 m³/s.

Tabel 3.7 Afvoeren van de Vecht bij Dalfsen behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen. Afvoeren > 800 m³/s zijn gemarkeerd omdat deze fysisch onmogelijk worden geacht.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval	
		ondergrens	bovengrens
2	216	203	227
5	263	230	284
10	299	250	328
20	335	265	407
50	383	283	478
100	419	303	550
250	466	328	655
500	502	348	744
1.250	550	367	835
2.000	574	374	876
4.000	610	393	987
10.000	658	413	1.090
20.000	694	432	1.145
50.000	741	450	1.235
100.000	777	472	1.302

3.4.3.2 Meerpeilstatistiek

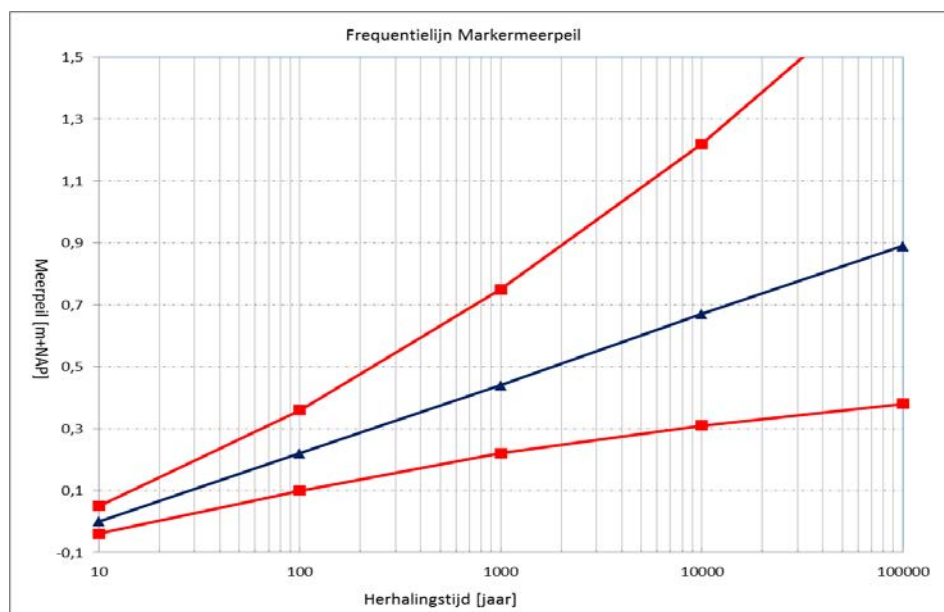
Voor WBI-2017 is besloten om de meerpeilstatistiek zoals van de vorige toets ronde(n) te handhaven. De werklijn van het *IJsselmeerpeil* bestaat uit drie lijnstukken. Deze statistiek is uitvoerig beschreven in HKV (2006), en is gebaseerd op statistische extrapolatie van meet- en modelgegevens. De gehanteerde meetreeksen omvatten de periode 1932 tot en met 2002. De boven- en ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval (respectievelijk het 2,5-kwantiel en het 97,5-kwantiel) zijn afgeleid met de bootstraphmethode HKV (2014). Tabel 3.8 toont de resultaten van de werklijn en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 3.8 Relatie IJsselmeerpeil en herhalingstijd, inclusief 95% betrouwbaarheidsbanden

Herhalingstijd [jaar]	Meerpeil [m +NAP]	2,5% kwantiel [m +NAP]	97,5% kwantiel [m +NAP]
10	0,40	0,33	0,45
100	0,62	0,50	0,77
1.000	0,85	0,62	1,16
10.000	1,07	0,71	1,63
100.000	1,29	0,78	2,19

Bij het bepalen van de frequentielijn en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen zijn geen fysische beperkingen betrokken.

De statistiek voor het *Markermeerpeil* dateert van 1996. Voor een nadere onderbouwing van de gebruikte statistiek wordt verwezen naar (WL | Delft Hydraulics, 1997) en (RIZA, 1999). Tabel 3.9 en Figuur 3.7 tonen de werklijn en 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor het Markermeerpeil. Tussen de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer bestaat een sterke fysische relatie. Mede om deze reden wordt net als voor het IJsselmeer geen fysisch maximum aangehouden voor het Markermeer.



Figuur 3.7 Frequentielijn Markermeerpeil (WL | Delft Hydraulics 1997)

Tabel 3.9 Relatie Markermeerpeil en herhalingstijd, inclusief 95% betrouwbaarheidsbanden

Herhalingstijd [jaar]	Meerpeil [m +NAP]	2,5%-kwantiel [m +NAP]	97,5% kwantiel [m +NAP]
10	0,00	-0,04	0,05
100	0,22	0,10	0,36
1.000	0,44	0,22	0,75
10.000	0,67	0,31	1,22
100.000	0,89	0,38	1,78

3.4.3.3 Zeewaterstand

De statistiek van de zeewaterstand is voor een belangrijk deel gebaseerd op de basispeilen die door RIKZ in de jaren negentig zijn afgeleid. De basispeilen zijn maatgevende hoogwaterstanden met een herhalingstijd van 10.000 jaar. De basispeilen zijn in 1993 afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust (RIKZ, 1993). Hierbij is gebruik gemaakt van hoogwatermetingen (HW) tot en met 1985; de afgeleide basispeilen gelden dan ook voor de situatie in het jaar 1985. Bij het bepalen van de basispeilen is in eerste instantie een statistisch onderzoek uitgevoerd op basis van individuele stations. Vervolgens is ook onderzoek gedaan naar de fysica waarbij voornamelijk de samenhang tussen verschillende hoofdstations is beschouwd. Op basis van het fysisch onderzoek zijn kleine aanpassingen gedaan in de initieel afgeleide statistieken, ten behoeve van onderlinge consistentie tussen stations. Vervolgens is het basispeil bepaald voor alle locaties langs de Nederlandse kust op basis van ruimtelijk interpolatie.

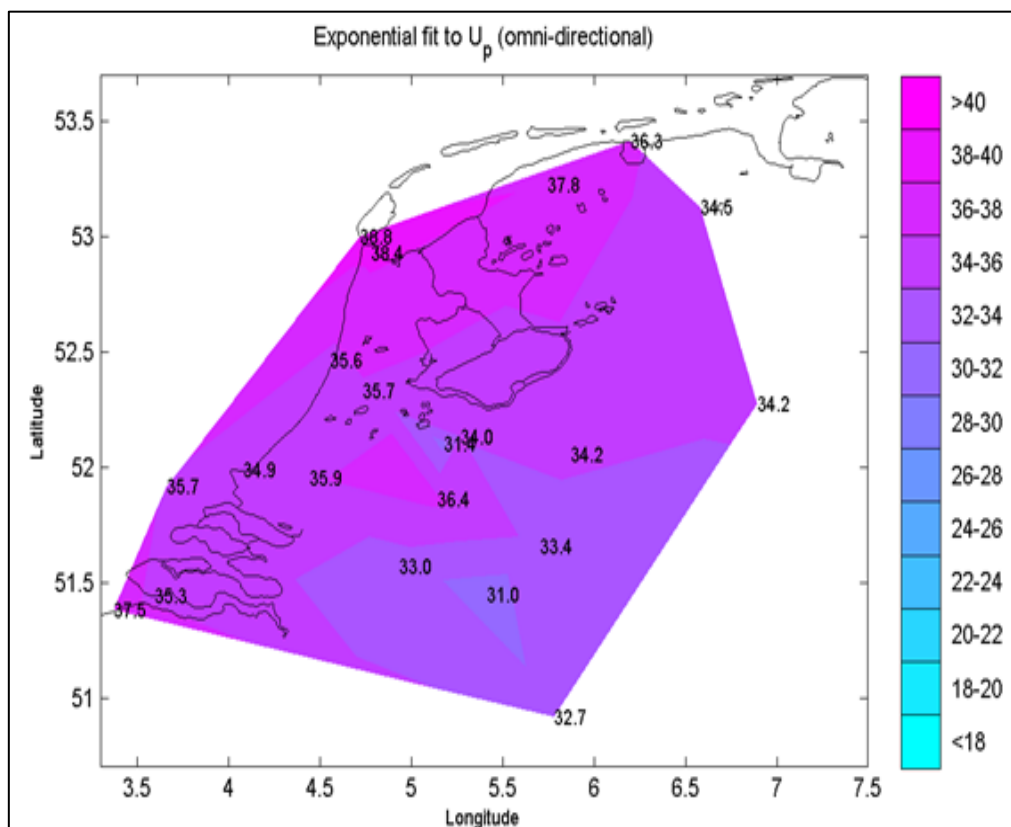
In verband met stijging van de hoogwaters (zeespiegelrijzing en lokale effecten) na 1985 zijn in het kader van WBI-2017 correcties toegepast op de afgeleide basispeilen. De trends in zeewaterstanden zijn berekend op basis van de tijdseries van gemiddeld hoogwater volgens een lineaire en niet-lineaire benadering van de trend (Deltares, 2014d).

Ter vergelijking is ook de trend in gemiddelde zeewaterstand berekend. Hierbij zijn meetgegevens gebruikt van 23 stations langs de Nederlandse kust. Uiteindelijk is besloten de volgende correcties toe te passen op de basispeilen:

- Voor Nederlandse kust met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid, de Waddenzee en de Westerschelde kust tot Hansweert geldt een toeslag van 0,08 m,
- Voor Hoek van Holland en Petten Zuid geldt een correctie van 0,10 m,
- Voor de Westerschelde kust na Hansweert wordt een lineaire toename van 8 tot 14 cm bij Bath aangehouden,
- Voor de Eems-Dollard is een gemiddelde toeslag van 7 cm toegepast.

3.4.3.4 Windstatistiek

Statistiek van windrichtingen en windsnelheden zijn opnieuw afgeleid ten behoeve van WBI-2017. Daarbij is gebruik gemaakt van nieuwe windmetingen van 21 windstations verspreid over heel Nederland uit de periode 1970-2008 (39 jaar). Op basis van de langere en betrouwbaardere meetreeksen zijn door Deltares in samenwerking met het KNMI statistische analyses uitgevoerd op potentiële windsnelheden voor een groot aantal windstations verspreid over heel Nederland (Deltares, 2009b). De kwantielschattingen van U_p met een herhalingsstijl van eens per 10.000 per jaar zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.8 en in tabelvorm in Tabel 3.11. Dit is het resultaat voor alle windrichtingen gecombineerd. Voor de afzonderlijke windrichtingen zijn ook statistieken afgeleid. Ook de kansen op optreden van individuele windrichtingen zijn opnieuw afgeleid (zie Tabel 3.10).



Figuur 3.8 Potentiële windsnelheden met herhalingsstijl 10.000 jaar (Deltares, 2009b).

Tabel 3.10 Kans op voorkomen van een windrichting voor relevante windstations, sectoren van 30 graden.

Windrichting	Kans op windrichting, P(r)						
[grad]	Vlissingen	Hoek van holland	IJmuiden	Texel	Terschelling	Lauwersoog	Schiphol
30	0,05712	0,04228	0,04391	0,03158	0,03278	0,02699	0,03968
60	0,09349	0,06455	0,05641	0,05753	0,04484	0,04577	0,06725
90	0,05571	0,08662	0,10492	0,08600	0,09253	0,08354	0,07281
120	0,04607	0,06137	0,06298	0,07473	0,07974	0,08996	0,06001
150	0,05754	0,06392	0,08344	0,07837	0,07625	0,07690	0,08322
180	0,11825	0,11730	0,11567	0,11558	0,11453	0,11552	0,12227
210	0,18043	0,16206	0,16477	0,14146	0,13473	0,17514	0,16152
240	0,15300	0,14389	0,12334	0,13649	0,13304	0,14994	0,14302
270	0,09215	0,09864	0,09988	0,11002	0,11601	0,09996	0,09975
300	0,06338	0,07014	0,05889	0,07636	0,07699	0,05755	0,05966
330	0,04706	0,04829	0,04954	0,05531	0,06187	0,05012	0,05107
360	0,03580	0,04094	0,03624	0,03655	0,03670	0,02863	0,03975

De overschrijdingsfrequenties van de windsnelheid zoals afgeleid in (Deltares, 2009) gelden uitsluitend voor de hoge/extreme waarden. De statistiek van frequenter voorkomende windsnelheden is echter ook relevant in de beoordeling. Deze is eenvoudigweg bepaald door te “turven” hoe vaak bepaalde windsnelheden worden overschreden bij een bepaalde windrichting.

Op dit moment wordt voor Kust, Oosterschelde en Markermeer nog met 12 sectoren van 30 graden gerekend. Het is echter de ambitie van Rijkswaterstaat om voor alle watersystemen te rekenen met 16 windsectoren van 22,5 graden breed. De (KNMI-)basisstatistiek met 30-graden-richtingsectoren moet daarbij geconverteerd worden naar een statistiek met 22,5-graden-richtingsectoren.

Tabel 3.11 Windsnelheden met herhalingsjijd 10,000 jaar volgens [1] de centrale schatting en [2] de onder- en bovengrens van de 95% betrouwbaarheidsintervallen (Bron: Deltares, 2009).

StatSector	345°N -15°N	15°N -45°N	45°N -75°N	75°N -105°N	105°N -135°N	135°N -165°N
IJmuiden	29.0 (26.5, 32.2)	26.2 (23.9, 28.6)	24.1 (21.5, 26.8)	25.2 (23.1, 27.7)	20.9 (19.2, 22.8)	26.5 (24.2, 29.0)
Texelhors	30.9 (27.5, 34.6)	32.1 (29.4, 35.0)	27.3 (24.4, 30.2)	29.9 (27.4, 32.5)	27.5 (25.1, 30.0)	31.6 (28.5, 34.9)
De Kooy	30.0 (26.2, 34.1)	29.8 (26.2, 33.6)	31.0 (27.9, 34.5)	27.4 (25.0, 30.0)	21.5 (19.2, 24.3)	24.4 (21.5, 27.3)
Schiphol	27.1 (25.0, 29.5)	22.2 (19.9, 24.7)	24.0 (22.0, 26.0)	21.8 (19.8, 24.0)	18.9 (17.5, 20.3)	20.7 (19.0, 22.8)
De Bilt	18.0 (15.9, 20.4)	20.2 (18.4, 22.1)	21.1 (19.0, 23.4)	20.4 (18.7, 22.2)	18.2 (16.5, 20.1)	17.6 (15.8, 19.6)
Soesterberg	19.7 (18.2, 21.3)	18.2 (16.6, 19.8)	16.1 (14.5, 17.7)	18.1 (16.3, 19.9)	15.1 (13.8, 16.4)	16.8 (15.7, 18.1)
Leeuwarden	28.1 (25.5, 30.9)	23.8 (21.5, 25.9)	28.7 (24.5, 33.5)	24.1 (21.7, 26.7)	19.0 (17.3, 20.8)	23.1 (21.3, 25.1)
Deelen	19.8 (17.8, 21.8)	19.9 (18.3, 21.7)	21.0 (18.9, 23.3)	20.3 (18.5, 22.2)	18.0 (15.6, 20.7)	19.7 (17.9, 21.8)
Lauwersoog	31.2 (28.7, 33.6)	26.1 (23.6, 28.8)	26.7 (24.1, 29.2)	24.8 (22.2, 27.5)	20.6 (18.5, 22.8)	22.9 (20.3, 25.7)
Eelde	22.4 (20.8, 24.0)	19.2 (17.5, 20.9)	21.5 (19.4, 23.8)	19.4 (17.7, 21.3)	17.6 (15.6, 19.5)	21.7 (19.8, 23.7)
Twenthe	18.4 (17.0, 20.0)	18.7 (17.1, 20.6)	17.7 (16.4, 19.0)	16.6 (15.3, 18.0)	16.0 (14.9, 17.1)	18.7 (16.7, 20.9)
Cadzand	32.7 (28.6, 36.9)	24.5 (22.5, 26.7)	25.7 (23.1, 28.4)	24.5 (21.6, 27.9)	20.1 (18.2, 22.1)	25.2 (23.0, 27.5)
Vlissingen	23.0 (21.0, 25.1)	19.3 (17.4, 21.5)	22.0 (20.1, 24.1)	22.3 (20.6, 24.1)	22.7 (20.6, 24.8)	24.3 (22.2, 26.6)
L.E. Goeree	30.6 (28.1, 33.2)	26.9 (24.1, 29.7)	29.0 (26.7, 31.2)	25.7 (22.3, 29.9)	25.0 (22.9, 27.3)	24.1 (21.9, 26.2)
Hoek van Holl.	28.7 (25.8, 31.7)	28.4 (25.5, 31.8)	25.1 (22.8, 27.5)	22.5 (20.6, 24.4)	22.1 (20.1, 24.2)	24.4 (22.3, 26.4)
Zestienhoven	26.2 (23.7, 28.4)	24.1 (22.1, 26.1)	18.2 (16.4, 20.0)	19.6 (17.9, 21.6)	18.5 (16.8, 20.2)	21.5 (19.8, 23.4)
Gilze-Rijen	21.9 (20.1, 23.8)	20.6 (18.7, 22.5)	20.2 (18.1, 22.3)	21.4 (19.7, 23.2)	17.9 (16.4, 19.5)	18.3 (16.9, 19.8)
Herwijnen	21.7 (19.6, 23.7)	22.1 (20.2, 23.9)	22.9 (20.8, 25.0)	21.9 (19.6, 24.4)	20.2 (18.3, 22.4)	19.7 (17.5, 21.8)
Eindhoven	21.2 (19.4, 22.9)	19.4 (18.1, 20.8)	20.3 (18.6, 22.2)	18.5 (17.1, 20.0)	17.2 (15.1, 19.4)	17.8 (16.3, 19.2)
Volkel	17.4 (16.0, 18.8)	18.0 (16.6, 19.4)	19.1 (17.3, 21.3)	19.5 (17.6, 21.4)	16.1 (14.2, 18.2)	19.0 (17.6, 20.5)
Beek	20.0 (18.5, 21.6)	19.9 (18.5, 21.3)	17.1 (15.3, 19.1)	20.3 (18.6, 22.1)	18.6 (16.1, 21.5)	21.2 (19.4, 23.1)
Stat l Sector	165°N -195°N	195°N -225°N	225°N -255°N	255°N -285°N	285°N -315°N	315°N -345°N
IJmuiden	29.8 (26.9, 32.9)	35.0 (32.6, 37.6)	37.3 (34.4, 40.7)	35.6 (32.3, 39.3)	33.5 (30.3, 36.8)	33.0 (30.1, 36.0)
Texelhors	32.0 (29.2, 35.1)	35.3 (32.8, 37.9)	39.1 (36.1, 42.2)	38.3 (34.9, 41.9)	37.0 (32.7, 42.1)	34.0 (30.7, 37.7)
De Kooy	30.2 (26.8, 33.7)	30.6 (27.2, 34.4)	32.6 (29.1, 36.4)	37.1 (33.1, 42.0)	34.0 (30.6, 38.0)	35.0 (31.3, 38.9)
Schiphol	25.6 (23.2, 28.2)	33.1 (30.2, 36.2)	34.6 (30.6, 39.1)	35.4 (31.7, 39.2)	33.2 (29.3, 37.3)	30.6 (27.0, 34.4)
De Bilt	21.7 (19.7, 23.8)	27.0 (24.6, 29.8)	32.6 (29.4, 35.5)	32.2 (29.4, 35.1)	26.6 (23.3, 30.4)	23.7 (21.5, 26.4)
Soesterberg	20.1 (18.2, 22.3)	25.9 (24.0, 28.0)	33.2 (29.5, 37.0)	32.8 (29.9, 35.9)	28.4 (25.7, 31.1)	23.8 (21.7, 26.2)
Leeuwarden	26.4 (23.9, 29.1)	34.2 (30.4, 38.4)	34.9 (31.4, 38.4)	35.9 (32.4, 39.9)	32.6 (28.3, 37.7)	32.9 (29.4, 36.8)
Deelen	22.7 (20.7, 24.7)	26.5 (24.7, 28.5)	34.0 (31.0, 37.2)	33.7 (30.8, 36.8)	30.5 (27.7, 33.4)	23.0 (20.7, 25.7)
Lauwersoog	29.0 (26.7, 31.5)	35.0 (32.1, 37.8)	35.3 (32.1, 38.8)	35.4 (32.2, 38.7)	34.6 (31.5, 37.9)	31.8 (28.8, 35.1)
Eelde	24.6 (22.6, 26.7)	30.3 (27.3, 33.2)	34.0 (31.1, 36.8)	32.8 (29.9, 35.9)	30.5 (27.7, 33.4)	25.0 (22.8, 27.5)
Twenthe	22.0 (19.9, 24.3)	24.3 (22.3, 26.5)	32.0 (28.3, 35.7)	32.4 (29.3, 35.6)	30.4 (27.5, 33.5)	21.8 (20.0, 23.7)
Cadzand	29.1 (27.1, 31.5)	31.9 (28.7, 35.1)	34.9 (31.5, 38.9)	36.9 (33.7, 40.5)	36.7 (34.0, 39.4)	33.1 (30.3, 36.0)
Vlissingen	28.4 (25.8, 31.2)	29.9 (27.5, 32.6)	35.5 (32.1, 39.2)	35.0 (31.5, 38.7)	30.5 (27.2, 34.1)	26.8 (24.1, 29.5)
L.E. Goeree	25.7 (23.2, 28.2)	33.1 (30.8, 35.4)	35.0 (32.0, 38.2)	35.8 (32.7, 38.8)	34.6 (31.5, 37.8)	35.0 (31.9, 38.1)
Hoek van Holl.	27.9 (25.5, 30.6)	28.4 (26.1, 30.8)	33.9 (30.7, 37.4)	34.8 (31.1, 38.7)	34.6 (31.7, 37.8)	29.9 (26.3, 34.0)
Zestienhoven	25.1 (23.4, 27.1)	28.1 (25.7, 30.6)	35.2 (32.5, 37.8)	35.8 (32.6, 39.3)	34.9 (30.4, 39.8)	31.8 (28.9, 34.8)
Gilze-Rijen	25.4 (23.0, 27.9)	28.3 (26.3, 30.5)	33.1 (29.3, 37.5)	33.0 (30.1, 35.9)	30.9 (27.7, 34.4)	22.5 (20.9, 24.4)
Herwijnen	24.9 (22.9, 27.0)	27.0 (23.9, 30.0)	34.9 (30.8, 38.9)	36.2 (31.5, 40.9)	34.0 (30.1, 38.0)	27.1 (25.0, 29.3)
Eindhoven	21.8 (20.0, 23.7)	27.8 (26.0, 29.7)	30.8 (28.2, 33.5)	30.1 (26.8, 33.7)	29.4 (26.1, 33.2)	23.7 (21.7, 25.8)
Volkel	23.4 (21.7, 25.3)	27.7 (25.2, 30.4)	32.9 (30.3, 35.5)	33.1 (29.2, 37.3)	29.2 (26.2, 32.4)	20.4 (18.5, 22.1)
Beek	25.1 (23.0, 27.4)	27.4 (25.6, 29.4)	30.5 (26.9, 34.1)	33.0 (30.1, 36.1)	27.0 (24.2, 30.0)	21.2 (19.2, 23.5)

3.4.3.5 Golfstatistiek op diep water

De golfstatistiek is onveranderd gebleven ten opzichte van WTI-2011. In WTI-2011 zijn Weibull-verdelingen afgeleid voor golfparameters als de golfhoogte H_{m0} , de gemiddelde periode $T_{m-1,0}$ en de piekperiode T_p (Deltares, 2012c). Er zijn negen golfmeetlocaties op de Noordzee met lange meetreeksen waarvoor de statistiek is bepaald. De statistieken van vijf daarvan, te weten Schiermonnikoog Noord, Eierlandse Gat, Scheur West, IJmuiden munitiestort en Europlatform worden gebruikt bij het afleiden van de Hydraulische Belastingen. De metingen van de andere vier stations hebben bijgedragen bij het zo goed mogelijk schatten van de parameters van de verdelingen. Voor de golven is zowel windrichtingsafhankelijke als omni-directionele statistiek opgesteld. Deze wordt voor alle locaties beschreven met de conditionele Weibull-verdeling. Tabel 3.12 toont ter illustratie de drempelwaarden van de golfparameters die, op basis van de omni-directionele statistiek, een herhalingstijd hebben van 10.000 jaar.

De golfstatistiek per richtingssector wordt alleen gebruikt om randvoorwaarden af te leiden voor SWAN-model waarmee golfrandvoorwaarden aan de kust worden afgeleid. Deze golfstatistiek wordt dus niet gebruikt voor de beschrijving van een stochastische variabele. Alleen in het belastingmodel voor duinen zijn golfhoogte en golfperiode een stochast, maar in dat model wordt alleen gebruik gemaakt van de omni-directionele statistiek. De richtingsafhankelijke statistiek wordt beschreven met de conditionele Weibull verdeling. Bij het afleiden van de richtingsafhankelijke statistieken wordt zorg gedragen voor consistentie met de omni-directionele statistiek. Dat betekent dat de eis wordt gesteld dat de som van overschrijdingsfrequenties van de afzonderlijke windrichtingssectoren gelijk is aan de overschrijdingsfrequentie van de omni-directionele statistiek.

Tabel 3.12 Extreme diepwatergolven met een herhalingstijd van 10.000 jaar, gebaseerd op meetreeksen 1979-2008.

Station	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	T_p [s]
SON	11.71	17.36	21.63
ELD	11.05	15.05	18.57
K13	10.67	15.31	18.30
YM6	9.34	14.53	17.39
MPN	7.81	12.91	15.96
EUR	7.77	11.30	13.14
LEG	7.72	11.18	13.39
SWB	6.77	10.72	12.56
SCW	5.46	10.50	12.20

3.4.3.6 Waterstandsvoorspellingen ten behoeve van sluiting stormvloedkeringen

Voor de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) en de Oosterscheldekering is de voorspelling van de waterstand relevant voor het sluiten van de kering. Dat betekent dat de eventuele fout die gemaakt wordt in de waterstandsvoorspelling ook relevant is. Voor de balgstuw bij Ramspol is dat niet het geval, deze sluit op basis van de waargenomen waterstand ter plaatse van de kering.

De nauwkeurigheid van de voorspelling bij Hoek van Holland wordt gemodelleerd door een normale verdeling. In RIKZ (1999) is op basis van een analyse van de waterstandsreeks bepaald dat de gemiddelde afwijking in de stormvloedvoorspelling bij Hoek van Holland $\mu = -0,09$ m en $\sigma = 0,18$ m bedraagt. Deze keuze is overgenomen in WTI-2011. De waterstandsvoorspellingen uit de periode vanaf 2004 tot heden geven geen aanleiding voor aanpassing van bovengenoemde kansverdeling en bijbehorende paramaters (persoonlijke communicatie met dhr. Kroos). De onnauwkeurigheid van waterstandsvoorspellingen ten behoeve van de sluiting van de Oosterschelde kering is normaal verdeeld met een standaardafwijking van 0,25 m, conform RIKZ (2006).

3.4.3.7 *Faalkansen van stormvloedkeringen bij sluitvraag*

De faalkans van de Maeslantkering wordt in WBI-2017 gelijk gesteld aan de maximaal toelaatbare faalkans in 2050. Deze faalkans bedraagt 1/100 per sluitgeval. Voor de Hartelkering geldt een relatief hoge maximale toelaatbare faalkans van 1/10. Echter, de faalkans van de Hartelkering heeft veel minder invloed op de waterstanden van achterliggende keringen, orde centimeters (RIZA, 2007). Om rekentechnische redenen is de faalkans de Hartelkering mede daarom altijd gelijk gesteld aan de faalkans van de Maeslantkering, en die is gelijk gesteld aan 1/200 per sluitgeval.

De Oosterscheldekering gaat dicht bij een verwachte zeewaterstand bij de kering van NAP+3,00 m of hoger. Als een waterstand van NAP+2,75 m wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting Oosterscheldekering bijeengeroepen. Op basis van de weersvoorspellingen, in combinatie met lokale gegevens en het te verwachten getij, beslist dit team of de Oosterscheldekering gesloten wordt. Als bij hoge waterstanden iets mis gaat met de alarmering of bediening, is er het noodsluitsysteem dat bij 3,00 m +NAP de schuiven automatisch sluit. Er is een kans van 1% per sluitvraag van de stormvloedkering dat de gewenste sluitstrategie faalt en dat de noodsluiting wordt toegepast.

Het ligt in de planning dat in 2016 een nieuw belastingmodel van de Oosterscheldekering wordt geïmplementeerd in het WBI-2017. In dat model wordt meer differentiatie aangebracht in de mogelijkheden van falen van de Oosterscheldekering.

Bij de Ramspolkering is sprake van falen indien de kering niet sluit als dit volgens de geldende sluitcriteria wel zou moeten. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten. De huidige faalkans, gebaseerd op basis van de MER Ramspol (Kors et al, 1994), is gesteld op 0,0035 per sluitvraag. In WBI-2017 zal worden uitgegaan van de wettelijke normering die uitgaat van een maximaal toelaatbare faalkans in 2050 en die bedraagt 1/100 per sluitvraag. Het effect van de aanpassing van de faalkans van de Ramspolkering van 0,0035 naar 0,01 per sluitvraag op de waterstanden is alleen significant op het Zwarte Meer en is minder dan 0,10 m.

De Hollandse IJsselkering sluit wanneer de waterstand ter plaatse van de kering hoger komt dan NAP+2,25 m. In WTI-2011 is aangenomen dat de Hollandse IJsselkering niet kan falen (faalkans = 0). In WBI-2017 zal uitgegaan worden van de wettelijke normering die uitgaat van een maximaal toelaatbare faalkans in 2050; deze faalkans is gesteld op 1/100 per sluitvraag.

De Haringvlietsluizen liggen in de monding van het Haringvliet en vormen met de Haringvlietdam een (verbindende) waterkering. In de huidige aanpak is aangenomen dat de Haringvlietsluizen niet falen, de faalkans is gelijk aan nul gesteld. De eisen aan de Haringvlietsluizen volgens de nieuwe normering zijn dusdanig (zie, IenM, 2015), dat deze aanname gehandhaafd kan worden in het WBI-2017.

3.4.4 Statistische onzekerheden

Paragraaf 3.4.3 beschrijft de statistiek van de basisstochasten. Met die statistiek wordt de “natuurlijke variabiliteit” van relevante hydraulische belastingvariabelen beschreven. Aanvullend daarop wordt in WBI-2017 ook rekening gehouden met statistische onzekerheden van deze basisstochasten. Statistische onzekerheden zijn een weergave van de mate van betrouwbaarheid van de schatting/keuze van kansverdelingen en bijbehorende verdelingsparameters van de basisstochasten. Dit type onzekerheid is het gevolg van het feit dat de natuurlijke variabiliteit is geschat op basis van metingen van beperkte lengte. Voor een aantal variabelen wordt de statistische onzekerheid expliciet beschreven met een kansverdeling. Voor een aantal andere variabelen (bijv. stormduur) wordt de variabiliteit vanuit praktisch oogpunt niet expliciet beschouwd maar verdisconteerd in een geschatte rekenwaarde. Tabel 3.13 beschrijft de basisstochasten waarvoor statistische onzekerheid expliciet wordt meegenomen in WBI-2017.

Tabel 3.13 Basisstochasten waarvoor de statistische onzekerheid bepaald en geïmplementeerd wordt in Hydra Ring (bron: Deltares 2015a)(zie Tabel 3.1 voor een overzicht van de regionummers).

Basisstochast	Station	Relevant voor regio
Afvoer Rijn	Lobith	1, 3, 4
Afvoer Maas	Borgharen	2
Afvoer Maas	Lith	3, 4
Afvoer IJssel	Olst	5, 6
Afvoer Vecht	Dalfsen	5, 6
Windsnelheid	Deelen	1, 2
Windsnelheid	Schiphol	3 t/m 8 en 17
Windsnelheid	Terschelling West	9, 10
Windsnelheid	De Kooy	11
Windsnelheid	IJmuiden	12
Windsnelheid	Hoek van Holland	13
Windsnelheid	Vlissingen	14, 15
Zeewaterstand	Hoek van Holland/Maasmond	3, 4, 13, 16 en 17
Zeewaterstand	Lauwersoog	9
Zeewaterstand	Harlingen	10
Zeewaterstand	Den Helder	11, 16
Zeewaterstand	IJmuiden	12, 16
Zeewaterstand	OS11	14
Zeewaterstand	Vlissingen	15, 16
Zeewaterstand	Huibertgat	16
Zeewaterstand	Texel Noordzee	16
Zeewaterstand	Delfzijl	
IJsselmeerpeil	-	7
Markermeerpeil	-	8

3.4.4.1 Wijze van modelleren

Voor de implementatie van statistische onzekerheid in het beoordelingsinstrumentarium is een volledige beschrijving van de statistische onzekerheid nodig voor het hele relevante bereik van herhalingstijden.

De statistische onzekerheid behorende bij een basisstochast wordt als extra stochast toegevoegd aan de probabilistische modellen van het beoordelingsinstrumentarium. De wijze van modelleren van de statistische onzekerheid is niet voor alle basisstochasten gelijk. Waarden van basisstochasten als zeewaterstanden en meerpeilen worden gekwantificeerd in relatie tot het referentieniveau NAP. Dit niveau heeft geen eenduidige fysieke betekenis. Voor andere basisstochasten zoals de windsnelheid is er een eenduidige fysieke betekenis van het nul-niveau (0 m/s). Het is namelijk de laagste fysieke waarde die deze basisstochast kan aannemen. Bij het modelleren van de statistische onzekerheid dient hier rekening mee te worden gehouden. Voor basisstochasten met een eenduidige fysieke ondergrens wordt een multiplicatief model toegepast (zie onder) voor het modelleren van de statistische onzekerheid, terwijl voor de overige basisstochasten (zeewaterstanden, meerpeilen, e.d.) een additief model wordt toegepast. Afvoeren vormen in dit opzicht een uitzondering. Het nul-niveau (0 m³/s) is weliswaar de laagst mogelijke waarde maar dit niveau wordt in de praktijk nooit bereikt.

De volgende vier modellen worden toegepast in de probabilistische modellen:

Model 1: additief

$$S_{incl} = S_{excl} + S_{onzekerheid}$$

Model 2: multiplicatief

$$S_{incl} = S_{excl} * S_{onzekerheid}$$

Model 3: begrensd additief

$$S_{incl} = \max(0, S_{excl} + S_{onzekerheid})$$

Model 4: begrensd multiplicatief

$$S_{incl} = \max(0, S_{excl} * S_{onzekerheid})$$

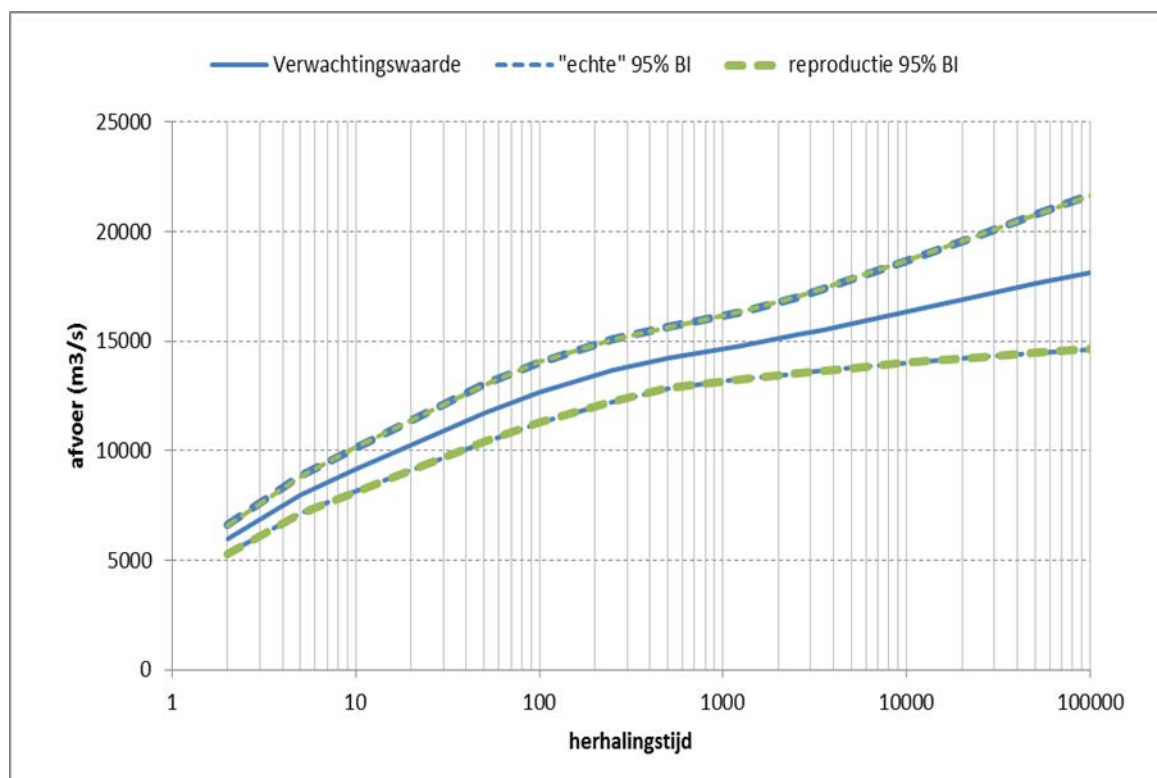
Hierin geldt:

- S_{incl} = basisstochast inclusief statistische onzekerheid
- S_{excl} = basisstochast zonder statistische onzekerheid
- $S_{onzekerheid}$ = een random variabele die de statistische onzekerheid behorende bij de basisstochast S hoort. Deze variabele kan in principe elke willekeurige kansverdeling hebben.

De kansverdeling van $S_{onzekerheid}$ wordt geschat met behulp van de beschikbare informatie met betrekking tot de betrouwbaarheidsintervallen en/of kwantielen van de basisstochasten. Dit komt erop neer dat een geschikte kansverdeling gekozen dient te worden die de statistische onzekerheid beschrijft, waarna de bijbehorende parameters geschat dienen te worden; zie ook paragraaf 3.4.4.2. De parameters van de onzekerheids-kansverdeling zijn afhankelijk van de herhalingsstijd van de basisstochast.

3.4.4.2 Betrouwbaarheidsbanden afvoerstatistiek

De statistiek van de Rijn bij Lobith is beschreven in paragraaf 3.4.3.1. De statistische onzekerheid van de afvoer van de Rijn wordt beschreven als functie van de waarde van de afvoer. Het additieve model van paragraaf 3.4.4.1 wordt toegepast. Op basis van de beschikbare 95% betrouwbaarheidsintervallen is een schatting gemaakt van de statistische onzekerheid van de afvoerstatistiek bij Lobith. De betrouwsintervallen blijken goed te worden beschreven door een normale kansverdeling met gemiddelde nul en een sigma die afhankelijk is van de terugkeertijd; zie ook Tabel 3.14. Een grafische weergave van de (gemodelleerde) statistische onzekerheid van de Rijn bij Lobith is gegeven in Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Statistische onzekerheid van de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith.

Tabel 3.14 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith: normale verdeling met gemiddelde ("mu") 0 m³/s en standaarddeviatie ("sigma") afhankelijk van de afvoer (zie kolom 6).

Herhalings- tijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	2,5% grens [m ³ /s]	97,5% grens [m ³ /s]	onzekerheid	
				gemiddelde [m ³ /s]	st. dev [m ³ /s]
2	5.940	5.280	6.600	0	340
5	7.970	7.110	8.840	0	440
10	9.130	8.160	10.100	0	500
30	10.910	9.730	12.080	0	600
100	12.770	11.400	14.150	0	700
300	14.000	12.910	15.100	0	560
1.000	14.840	13.620	16.050	0	620
1.250	14.970	13.720	16.230	0	640
3.000	15.520	14.060	16.980	0	750
10.000	16.270	14.450	18.100	0	930
30.000	16.960	14.750	19.160	0	1.120
100.000	17.710	15.060	20.350	0	1.350

Vergelijkbare tabellen zijn afgeleid voor de IJssel bij Olst (Tabel 3.15), de Maas bij Borgharen (Tabel 3.16), de Vecht bij Dalfsen (Tabel 3.17) en de Maas bij Lith (Tabel 3.18). In alle gevallen wordt het additieve model van paragraaf 3.4.4.1 toegepast.

Tabel 3.15 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst: normale verdeling met gemiddelde ("mu") 0 m³/s en standaarddeviatie ("sigma") afhankelijk van de afvoer (zie kolom 6).

Herhalingstijd [jaar]	Q-Olst [m ³ /s]	2,5%- kwantiel. [m ³ /s]	97,5%- kwantiel. [m ³ /s]	onzekerheid	
				gemiddelde [m ³ /s]	st. dev [m ³ /s]
2	787	697	881	0	46
5	1.090	956	1.233	0	69
10	1.282	1.121	1.453	0	83
30	1.603	1.387	1.831	0	111
100	1.972	1.697	2.268	0	142
300	2.235	2.001	2.483	0	120
1.000	2.423	2.152	2.707	0	138
1.250	2.453	2.174	2.750	0	144
3.000	2.581	2.248	2.935	0	171
10.000	2.760	2.335	3.221	0	221
30.000	2.930	2.403	3.503	0	275
100.000	3.120	2.474	3.834	0	340

Tabel 3.16 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Maas bij Borgharen: normale verdeling met gemiddelde ("mu") = 0,0 m³/s en standaarddeviatie ("sigma") afhankelijk van de afvoer (zie kolom 6).

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer [m³/s]	2,5%-kwantiel.. [m³/s]	97,5%-kwantiel. [m³/s]	onzekerheid	
				gemiddelde [m³/s]	St. dev. [m³/s]
2	1.440	1.270	1.610	0	85
5	1.970	1.740	2.200	0	115
10	2.300	2.010	2.590	0	145
20	2.600	2.190	3.020	0	208
50	2.970	2.430	3.510	0	270
100	3.220	2.650	3.800	0	288
250	3.520	2.950	4.090	0	285
500	3.700	3.110	4.290	0	295
1.250	3.910	3.210	4.610	0	350
2.000	4.020	3.240	4.810	0	393
4.000	4.180	3.250	5.120	0	468
10.000	4.400	3.240	5.550	0	578
20.000	4.560	3.230	5.890	0	665
50.000	4.770	3.200	6.350	0	788
100.000	4.930	3.180	6.690	0	878

In het geval van de Vecht is gekozen voor een lognormale verdeling, en dus geen normale verdeling, omdat de betrouwbaarheidsintervallen van de Vecht niet symmetrisch zijn.

Tabel 3.17 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen: 3-parameter lognormale verdeling

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer [m³/s]	Parameters onzekerheid		
		Schaal [m³/s]	Locatie [m³/s]	Vorm [-]
2	216	-116	4.752	0.05
5	263	-163	5.092	0.063
10	299	-199	5.291	0.071
20	335	-235	5.448	0.151
50	383	-283	5.632	0.163
100	419	-319	5.746	0.197
250	466	-366	5.877	0.227
500	502	-402	5.968	0.24
1.250	550	-450	6.077	0.256
2.000	574	-474	6.126	0.265
4.000	610	-510	6.198	0.271
10.000	658	-558	6.285	0.28
20.000	694	-594	6.347	0.283
50.000	741	-641	6.419	0.295
100.000	777	-677	6.475	0.293

Tabel 3.18 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Maas bij Lith: normale verdeling met gemiddelde ("mu") = 0,0 m³/s en standaarddeviatie ("sigma") afhankelijk van de afvoer (zie kolom 6).

Herhalingsjijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	2,5% grens [m ³ /s]	97,5% grens [m ³ /s]	onzekerheid	
				gemiddelde [m ³ /s]	st. dev [m ³ /s]
2	1.409	1.259	1.559	0	75
5	1.880	1.675	2.086	0	102
10	2.177	1.916	2.439	0	130
20	2.448	2.077	2.831	0	188
50	2.785	2.294	3.282	0	247
100	3.014	2.493	3.551	0	264
250	3.291	2.767	3.822	0	263
500	3.458	2.913	4.009	0	274
1.250	3.653	3.005	4.312	0	326
2.000	3.756	3.032	4.502	0	367
4.000	3.906	3.042	4.797	0	438
10.000	4.113	3.032	5.211	0	544
20.000	4.264	3.023	5.541	0	629
50.000	4.463	2.996	5.990	0	748
100.000	4.616	2.977	6.325	0	837

3.4.4.3 Statistische onzekerheid meerpeil

De meerpeilstatistiek van het IJsselmeer is beschreven in paragraaf 3.4.3.2. Voor deze statistiek zijn de betrouwbaarheidsbanden afgeleid door middel van een bootstrap methode (HKV, 2014). Tabel 3.19 toont de resultaten.

Tabel 3.19 Betrouwbaarheidsintervallen meerpeilstatistiek IJsselmeer, verschillende kwantielen (HKV, 2014) .

			Grenzen betrouwbaarheidsintervallen [m+NAP] bij gegeven percentages [%]													
T [jaar]	Exp. [m+NAP]	Gem. TR [m+NAP]	2,5%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	97,5%	
10	0,40	0,39	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	
100	0,62	0,62	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60	0,61	0,63	0,65	0,67	0,71	0,74	0,77	
1000	0,85	0,84	0,62	0,65	0,68	0,72	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90	0,95	1,02	1,09	1,16	
10000	1,07	1,07	0,71	0,75	0,80	0,87	0,93	0,98	1,03	1,09	1,16	1,24	1,38	1,50	1,63	
100000	1,29	1,30	0,78	0,84	0,91	1,00	1,08	1,16	1,24	1,32	1,43	1,56	1,78	1,99	2,19	

De statistische onzekerheid van de basisstochast meerpeil IJsselmeer wordt, analoog aan de statistische onzekerheid van de afvoerstatistiek, beschreven als functie van de waarde van het meerpeil. Het additieve model van paragraaf 3.4.4.1 wordt toegepast. De meerpeilstatistiek heeft niet-symmetrische betrouwbaarheidsintervallen en zijn daarom niet goed te beschrijven met een normale verdeling. De lognormale kansverdeling is uiteindelijk gekozen omdat deze visueel de beste fit geeft op de afgeleide betrouwbaarheidsintervallen.

De onzekerheden van het Markermeerpeil zijn eveneens bepaald door middel van een bootstrap methode (HKV, 2014). De meerpeilstatistiek met de afgeleide betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven in Tabel 3.20.

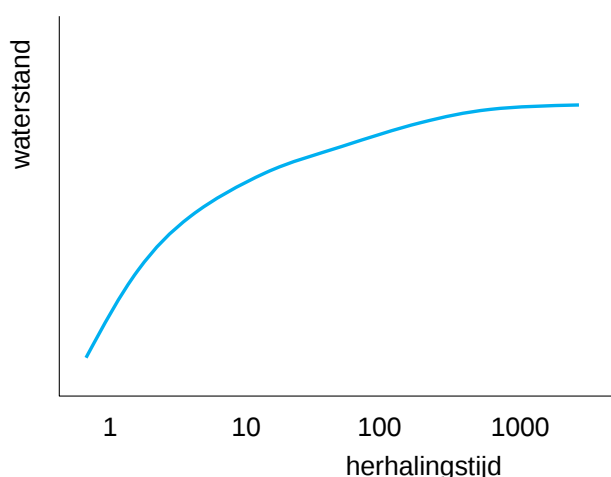
Tabel 3.20 Betrouwbaarheidsintervallen meerpeilstatistiek Markermeer, verschillende kwantielen

T [jaar]	Exp. [m+NAP]	Gem. TR [m+NAP]	Grenzen betrouwbaarheidsintervallen [m+NAP] bij gegeven percentages [%]												
			2,5%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	97,5%
10	0,00	0,00	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
100	0,22	0,22	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,31	0,34	0,36
1000	0,44	0,44	0,22	0,24	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,46	0,49	0,54	0,62	0,69	0,75
10000	0,67	0,66	0,31	0,35	0,40	0,47	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,84	0,97	1,09	1,22
100000	0,89	0,89	0,38	0,43	0,50	0,60	0,68	0,75	0,83	0,92	1,02	1,15	1,36	1,57	1,78

De statistische onzekerheid van de basisstochast meerpeil Markermeer wordt, analoog aan het IJsselmeer, beschreven als functie van de basisstochast en additief ten opzichte van de basisstochast. Evenals voor het IJsselmeer is een lognormale verdeling gebruikt om de betrouwbaarheidsbanden te beschrijven.

3.4.4.4 Statistische onzekerheid zeewaterstand

De statistische onzekerheid van de basisstochast zeewaterstand wordt, evenals de statistische onzekerheid behorende bij de afvoerstatistiek, beschreven als functie van de basisstochast en additief ten opzichte van de basisstochast. De betrouwbaarheidsintervallen zijn afgeleid in twee etappes. In HKV (2014) zijn deze voor acht kuststations, per windrichtingssector en omni-directioneel, *zonder daarbij fysische overwegingen te betrekken*. De resulterende betrouwbaarheidsintervallen bleken erg breed te zijn. Vervolgens is geanalyseerd of dergelijke brede betrouwbaarheidsintervallen wel fysisch reëel zijn. Voor deze analyse is gebruik gemaakt van langjarige reeksen van waterstanden die zijn afgeleid door KNMI (2015) met WAQUA. De voornaamste invoer van het WAQUA-model bestond uit langjarige synthetische tijdreeksen van de wind, afgeleid van seizoensverwachtingen van het European Centre for Medium range Weather Forecasts (ECMWF). Vervolgens zijn statistieken afgeleid op basis van de gesimuleerde waterstanden. De voornaamste conclusie is dat voor alle stations sprake is van een neerwaartse “kromming” in de extreme waarden statistiek. Dat betekent dat de waterstand in steeds mindere mate toeneemt bij toenemende herhalingstijd (op logaritmische schaal). Dit is conceptueel weergegeven in Figuur 3.10.



Figuur 3.10 Schematische weergave van frequentielijn met neerwaartse kromming

De mate van kromming neemt toe in noordelijke richting langs de Nederlandse kust en is maximaal voor locaties in het Waddengebied. Hiervoor zijn duidelijk fysische oorzaken aan te wijzen. Door KNMI (2015) wordt gesteld dat de kromming voor de kuststations min of meer gefixeerd kan worden. De mate van kromming in de statistische verdelingsfuncties wordt

gekwantificeerd door de krommingsparameter. Door deze te fixeren draagt deze niet bij aan de onzekerheden in de waterstanden.

Ten behoeve van WBI-2017 is besloten de mate van kromming niet volledig te fixeren, omdat volledige zekerheid over de mate van kromming onrealistisch is. Wel is de mate van onzekerheid in deze parameter op realistische wijze bijgesteld, zodat de bijdrage aan de totale onzekerheid afneemt in vergelijking met de oorspronkelijke schatting van HKV (2014). Tabel 3.21 (werklijn) en Tabel 3.22 (standaarddeviaties) tonen de resultaten van deze onzekerheidsanalyse voor 12 kustlocaties. De onzekerheden rondom de werklijn zijn normaal verdeeld met een gemiddelde van 0 (geen bias).

Tabel 3.21 Werklijnen voor zeewaterstanden in 13 kustlocaties (m +NAP)

locatie	Herhalingstijd (jaar)				
	10	100	1.000	10.000	100.000
Delfzijl	4,09	4,87	5,54	6,15	6,71
Den Oever	3,20	3,86	4,43	4,95	5,42
Harlingen	3,48	4,06	4,56	5,00	5,40
Huibertgat	2,94	3,53	4,10	4,65	5,18
Den Helder	2,71	3,33	3,89	4,40	4,88
Hansweert	4,29	4,93	5,59	6,25	6,92
Hoek van Holland	2,93	3,57	4,26	5,00	5,78
Lauwersoog	3,49	4,10	4,65	5,15	5,61
Oosterschelde buiten	3,29	3,86	4,43	5,00	5,57
Terschelling-West	2,97	3,49	3,92	4,30	4,64
Vlissingen	3,79	4,35	4,90	5,45	6,00
IJmuiden buiten	2,86	3,55	4,30	5,10	5,95

Tabel 3.22 Standaarddeviaties voor zeewaterstanden in 13 kustlocaties (m)

locatie	Herhalingstijd (jaar)				
	10	100	1.000	10.000	100.000
Delfzijl	0,033	0,085	0,150	0,230	0,320
Den Oever	0,033	0,083	0,148	0,223	0,310
Harlingen	0,028	0,073	0,128	0,190	0,263
Huibertgat	0,025	0,075	0,145	0,238	0,350
Den Helder	0,028	0,068	0,125	0,195	0,278
Hansweert	0,025	0,075	0,153	0,263	0,405
Hoek van Holland	0,020	0,065	0,143	0,258	0,418
Lauwersoog	0,025	0,068	0,123	0,188	0,265
Oosterschelde buiten	0,023	0,075	0,148	0,250	0,383
Terschelling-West	0,030	0,073	0,123	0,185	0,253
Vlissingen	0,025	0,073	0,145	0,243	0,368
IJmuiden buiten	0,023	0,073	0,155	0,280	0,448

3.4.4.5 Statistische onzekerheid windstatistiek

De statistische onzekerheid van de statistiek van de windsnelheid wordt beschreven multiplicatief/relatief ten opzichte van de oorspronkelijke werklijn. De windstatistiek zoals in paragraaf 3.4.3.4 beschreven is afkomstig uit Deltares (2009).

De werklijn is beschreven met een exponentiële verdeling. De betrouwbaarheidsintervallen zijn afgeleid met behulp van een 'adjusted percentile bootstrap' methode. Voor meer informatie wordt verwezen naar Deltares (2009).

De betrouwbaarheidsintervallen voor statistische onzekerheid van extreme windsnelheden zijn nagenoeg symmetrisch. Daarom is gekozen voor de normale verdeling om de statistische onzekerheid te beschrijven. De statistische onzekerheid wordt beschreven als relatief ten opzichte van de verwachtingswaarde. De mediaan van de kansverdeling (parameter μ) is gelijk aan 1 (geen bias). De standaarddeviatie (σ), is geschat met behulp van de 'maximum likelihood' methode. Bijlage B van Deltares (2015a) geeft een overzicht van de afgeleide parameters voor 20 windstations. Tabel 3.23 toont de afgeleide "omni-directionele" parameters voor station Schiphol, dat voor een groot aantal belastingmodellen als representatieve windstation wordt toegepast.

Tabel 3.23 Modelparameters van de statistische onzekerheid bij Schiphol, omni-directioneel. Mu en sigma zijn parameters van de kansverdeling van de dimensieloze vermenigvuldigingsfactor.

Herhalingstijd [jaren]	Windsnelheid [m/s]	mu [-]	Sigma [-]
2	19,9	1	0,015
10	22,9	1	0,024
50	25,9	1	0,031
100	27,2	1	0,034
500	30,1	1	0,039
1000	31,4	1	0,041
10000	35,7	1	0,047

Naast de omni-directionele statistiek wordt ook de richtingsafhankelijke windstatistiek en bijbehorende onzekerheden toegepast in WTI-2011. Verkennende testberekeningen hebben aangetoond dat het toepassen van een richtingsafhankelijke statistische onzekerheid tot dezelfde resultaten leidt als de omni-directionele statistische onzekerheid toegepast voor alle richtingssectoren. Daarom is besloten om de omni-directionele statistische onzekerheid te gebruiken voor de richtingsafhankelijke windstatistiek.

3.4.4.6 Statistische onzekerheid golfstatistiek voor duinen

Golfstatistiek is alleen een basisstochast voor het toets spoor duinen. De onzekerheid in deze golfstatistiek is ongewijzigd gelaten in vergelijking met de onzekerheid in het kader van het VTV2006 (Alkyon/TU Delft/WL, 2007). De onzekerheden in de golfhoogte en piekperiode zijn beide normaal verdeeld met een gemiddelde van 0m respectievelijk 0s en een standaarddeviatie van 0,6m respectievelijk 1,0s.

3.4.4.7 Statistische onzekerheid seiches

Seiches zijn golven in half afgesloten havenbekkens die ontstaan door opslinging van binnenkomende lange golven. In WBI-2017 worden seiches alleen meegenomen in het Europoort gebied. Voor het meenemen van seiche-effecten in de belastingmodellen van Hydra-Ring zijn nieuwe berekeningen uitgevoerd door Deltares, 2014f. Voor 41 waterstanden tussen NAP +2,40 m en NAP +6,40 m zijn de netto seiche-effecten berekend voor 449 oeverlocaties en 42 as-locaties in het westelijk Rotterdamse havengebied.

De onzekerheid in deze berekende waarden worden in WBI-2017 beschreven met een stochast die afhankelijk is van de waterstand. De onzekerheid is daarbij uitgedrukt als een vermenigvuldigingsfactor op het berekende seiche-effect.

De waarde van deze vermenigvuldigingsfactor is een stochast, met een normale verdeling met gemiddelde 1,0 en standaard afwijking 0,3.

3.4.5 Correlaties

Voor sommige combinaties van belastingvariabelen is sprake van een, doorgaans positieve, correlatie. Dit komt doordat beide door dezelfde fysische processen worden beïnvloed. Het gevolg is dat verhoogde waarden van de ene variabele in de regel gepaard gaan met verhoogde waarden van de andere variabele. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de combinatie van golven en waterstand op zee die beide sterk worden beïnvloed door de wind (snelheid en richting). Correlatie zorgt dus voor een toename in de kans dat beide variabelen hoog (extreem) zijn en daarmee een toename in de kans op extreme belastingen. Het is dus van belang dat relevante correlaties op correcte wijze worden beschreven in het belastingmodel. De volgende correlaties zijn opgenomen in de diverse belastingmodellen:

- 1 Correlatie meerpeil afvoer: het correlatiemodel als beschreven in HKV (2006).
- 2 Correlatie IJssel- en Vechtafvoer: voor deze correlatie wordt hetzelfde correlatiemodel gehanteerd als voor de correlatie tussen meerpeil en afvoer.
- 3 Correlatie Rijn en Maas: er wordt geen expliciete correlatie beschreven tussen de stochastische variabelen 'Rijnafvoer' en 'Maasafvoer'. Bij de hydraulische modelsimulaties voor het benedenrivierengebied wordt "onder de motorkap" wel rekening gehouden met een grote mate van correlatie.
- 4 Wind-waterstandstatistiek kustgebieden: Hier is het correlatiemodel gebruikt uit het VNK model van WL | Delft Hydraulics en HKV (2003). De parameters van dit correlatiemodel zijn ten behoeve van WBI-2017 opnieuw afgeleid (Deltares, 2015a).
- 5 Wind-waterstandstatistiek Maasmond (Benedenrivieren): hier is het correlatiemodel gehanteerd van Volker (1987). De parameters van dit correlatiemodel zijn ten behoeve van WBI-2017 opnieuw afgeleid (HKV, 2010).
- 6 Correlatie waterstand en seiches: zie paragraaf 3.4.4.7
- 7 Correlatie golven en waterstand voor het toets spoor duinen: Analooq aan VTV2006 is de golfhoogte beschreven als deterministische functie van de waterstand, met daarop gesuperponeerd een normaal verdeelde onzekerheid. De golfperiode is beschreven als een deterministische functie van de golfhoogte, met daarop eveneens gesuperponeerd een onzekerheid.

3.5 Modelonzekerheden in hydraulische belastingen

3.5.1 Inleiding

Paragraaf 3.4 beschrijft de relevante onzekerheden van de basisstochasten. In het belastingmodel worden de realisaties van deze basisstochasten vertaald naar een hydraulische belasting voor de waterkering. In deze vertaalslag wordt gebruik gemaakt van simulaties met hydrodynamische modellen zoals WAQUA (waterstanden) en SWAN (golven). In WBI-2017 wordt rekening gehouden met deze onzekerheden.

3.5.2 Aanpak

Tabel 3.24 geeft het overzicht van de parameters waarvoor, als weergave van modelonzekerheid, een aanvullende stochastische variabele wordt geïmplementeerd in WBI-2017.

Tabel 3.24 Parameters waarvoor een extra stochast wordt geïmplementeerd in WBI-2017 om rekening te houden met modelonzekerheden.

Model	Onzekerheidsparameter	Relevant voor regio
WAQUA	waterstand h	1 t/m 8 en 17
IMPLIC	waterstand h	14
SWAN	golfhoogte H_{m0} golfperiode $T_{m-1,0}$ golfrichting θ	7 t/m 17 en delen van 3, 4 en 6
Bretschneider	golfhoogte H_s golfperiode T_p	1 en 2 en delen van 3 en 4

Voor het kwantificeren van modelonzekerheid in de lokale waterstand is gebruik gemaakt van enerzijds de resultaten van een aantal uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen en anderzijds expert judgement. De hydraulische eigenschappen van de verschillende watersystemen zijn hierbij bepalend. De mate van onzekerheid verschilt per regio/watersysteem en soms ook per locatie binnen een regiowatersysteem (zie Tabel 3.1 en Tabel 3.2). Per watersysteem zijn de belangrijkste onzekerheidsbronnen geïdentificeerd. Hierbij is onderscheid gemaakt in drie onzekerheidsbronnen:

- 1 Modelrandvoorwaarden of forcering/invoer;
- 2 Modelleren van fysische processen, schematisaties en kalibratie van het model zelf; en
- 3 Niet-gemodelleerde aspecten en/of grootheden.

Voor elk type onzekerheidsbron zijn de belangrijkste bijdragende factoren/bronnen geïdentificeerd en vervolgens is de bijbehorende onzekerheid geschat. Waar nodig is het beschouwde watersysteem opgesplitst in deelgebieden. Deze splitsing is voornamelijk gebaseerd op de resultaten van analyses in het kader van voorgaande toets ronden. Daarbij is gekeken naar berekende ontwerppunten, omdat deze informatie leveren over de onderlinge relevantie van de betrokken stochastische variabelen voor berekende faalkansen. Deze informatie is gebruikt om de voor de waterstanden relevante stochasten en derhalve de belangrijke onzekerheidsbronnen te identificeren. Deze illustratiepunten zijn ook gebruikt bij het onderverdelen in deelgebieden, waarbij in dit geval een deelgebied een verzameling van locaties met gelijke mate van onzekerheden is. Bij het schatten van modelonzekerheid is waar nodig in verband met nieuwe normen rekening gehouden met nog extremere situaties.

Met betrekking tot implementatie in WBI-2017 gelden de volgende uitgangspunten:

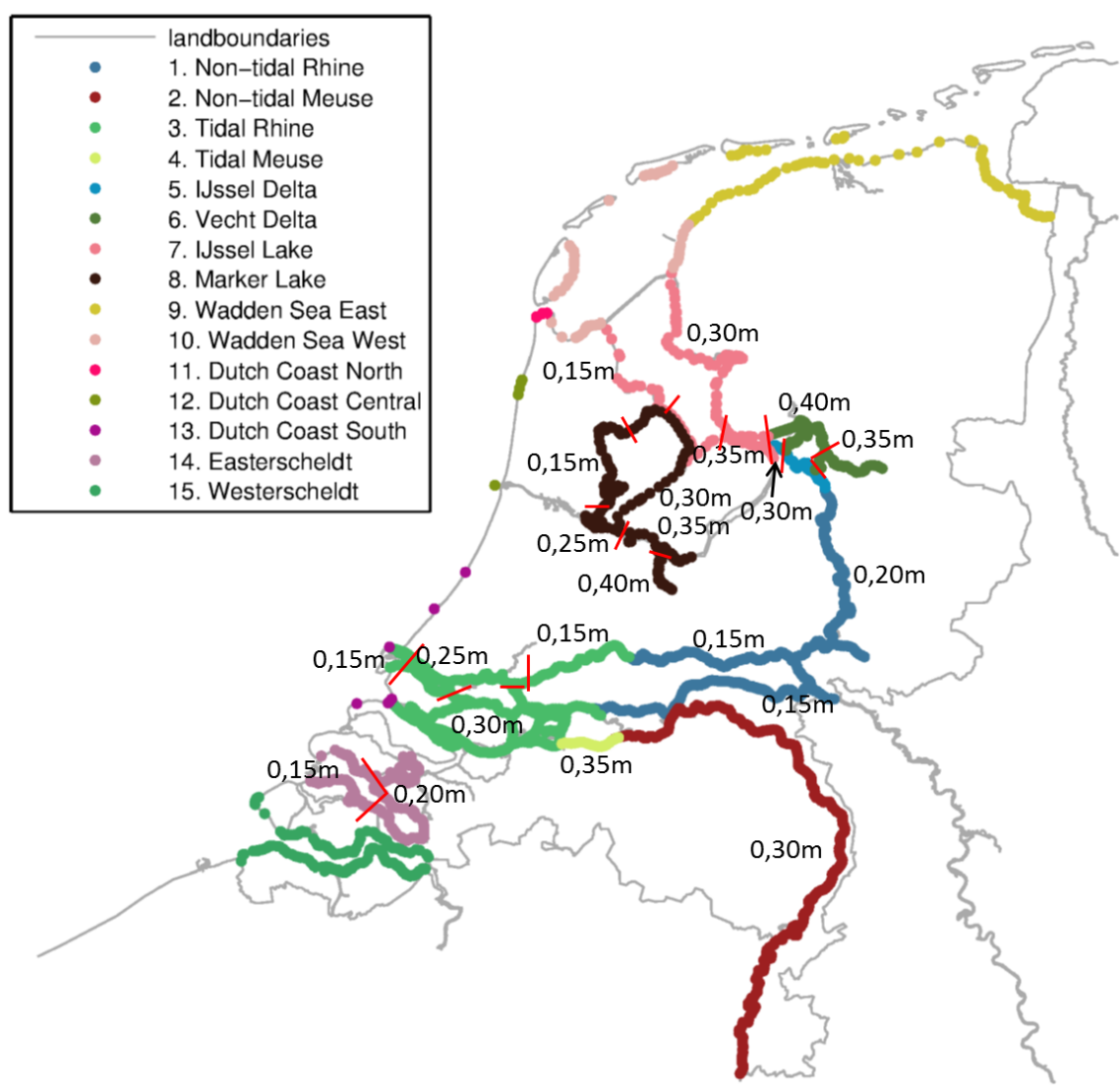
- De modelonzekerheid in de *lokale waterstand* is normaal verdeeld met een bias (μ) en een standaardafwijking (σ). Voor de meeste systemen is de bias gelijk aan 0 m, uitzondering hierop vormt de Oosterschelde, waar expliciet een bias in rekening wordt gebracht (0,15 m).
- De modelonzekerheid in de lokale waterstand wordt beschreven met een additief model, de modelonzekerheid in de lokale golven wordt beschreven met een multiplicatief model. Met andere woorden, voor de waterstand wordt de realisatie van de stochast 'onzekerheid' opgeteld bij de initiële schatting, voor de golven wordt de realisatie van de stochast 'onzekerheid' vermenigvuldigd met de initiële schatting. Daarbij wordt tevens een controle gedaan in hoeverre de golfsteilheid nog realistisch is. Indien dat niet het geval is wordt de berekende golfperiode aangepast.
- De gekozen waarden van μ en σ zijn voor elke locatie constant over het hele bereik aan waterstanden en/of golven. Bij de vaststelling van de keuze voor μ en σ wordt met name rekening gehouden met extreme situaties. Voor lage herhalingstijden kan er daardoor

sprake zijn van een overschatting van de modelonzekerheid, maar dit bereik is minder relevant voor WBI-2017.

3.5.3 Onzekerheden in de lokale waterstand

In Deltares (2015b) staat in detail beschreven hoe per regio de modelonzekerheden in de lokale waterstand zijn afgeleid en welke waarden voor de bias en standaarddeviatie zijn gekozen. Figuur 3.11 geeft een overzicht van de gekozen waarden van de standaarddeviatie van de modelonzekerheid van de waterstand. In deze figuur zijn voor het benedenrivierengebied alleen de resultaten voor de situatie met gesloten Europoortkeringen weergegeven. De modelonzekerheden voor de situatie met open keringen zijn in de regel iets kleiner. Merk op dat Figuur 3.11 geen melding maakt van onzekerheden langs de kustsystemen en in de Westerschelde. Voor deze gebieden is namelijk geen gebruik gemaakt van een hydrodynamisch model om lokale waterstanden te berekenen. De lokale waterstand voor die systemen is bepaald op basis van interpolatie en daaruit voortvloeiende fout/onzekerheid is relatief klein.

De standaardafwijkingen liggen tussen 0,15 m en 0,40 m. Over het algemeen kunnen we stellen dat in het afvoer gedomineerde deel van de Rijntakken de standaardafwijking 0,15 – 0,20 m is. Voor de Maas, de Vechtdelta en het benedenrivierengebied zijn de standaardafwijkingen groter, in de orde van 0,30 – 0,35 m. Waar de invloed van de zeewaterstand in het benedenrivierengebied dominant wordt, is de onzekerheid kleiner met een standaardafwijking van 0,15 - 0,20 m. Voor riviertakken waar de windsnelheid dominant wordt ten opzichte van de afvoer is de standaardafwijking iets hoger, tot 0,40 m. Deze maximale waarden treden op in de benedenstroomse delen van de Vecht- en IJsseldelta en de Eemvallei. In de (rand)meren ligt de standaardafwijking typisch rond de 0,30 - 0,35 m voor die delen waarbij de wind dominant is ten opzichte van het meerpeil.



Figuur 3.11 Standaardafwijkingen in lokale waterstanden voor de situatie van gesloten keringen. De gekleurde bollen geven uitvoerlocaties per regio weer. In een aantal regio's is met een rode lijn een onderverdeling gemaakt.

3.5.4 Onzekerheden in de lokale golven

In Deltares (2015b) staat in detail beschreven hoe per regio de modelonzekerheden in de lokale golven zijn afgeleid en welke waarden voor de bias en standaarddeviatie zijn gekozen

Onderstaande Tabel 3.25 geeft voor de vijf hoofdsystemen de resulterende schattingen weer van modelonzekerheden in termen van μ en σ voor de lokale golfbelastingparameters H_{m0} , $T_{m-1,0}$ en T_p . De parameters in deze tabel geven de afwijking aan ten opzichte van de waarde van 1 (een waarde 1 geeft aan een perfecte modelvoorspelling). Een μ -waarde van -0,05 betekent dat het model de golfhoogte gemiddeld 5% onderschat. We merken op dat deze waarden dimensieloos zijn, vanwege het gebruik van het multiplicatieve onzekerheidsmodel.

Een aantal cellen voor de onzekerheidsparameters voor golfperiodematen in Tabel 3.25 is niet gevuld. Indien om welke reden dan ook gewenst is een onzekerheidsschatting voor deze parameters te verkrijgen, stellen we voor dezelfde waarden te hanteren als voor de periodemaat waarvoor deze wel beschikbaar is. Dit is een redelijk veilige keuze, omdat de bias en standaardafwijking klein zijn en we geen reden hebben aan te nemen waarom de waarde voor de andere parameter groot zou zijn.

Tabel 3.25 Modelonzekerheden significante golfhoogte H_{m0} en periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p voor drie gedefinieerde hoofdsystemen: gemiddelde (μ) en standaardafwijking (σ) van de relatieve verschillen. Een negatieve waarde van het gemiddelde geeft een onderschatting van de werkelijkheid door het gehanteerde model weer.

Hoofdsysteem	H_{m0}		$T_{m-1,0}$		T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
I. Kust, IJsselmeer	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
II. Brede wateren in rivierengebied/randmeren	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
III. Smalle wateren in rivierengebied, Eemvallei	-0,04	0,27	-	-	0,03	0,13
IV. Markermeer - IJburg	-0,05	0,11	0,04	0,08	-0,04	0,05
V. Markermeer - overig (excl. IJburg)	-0,02	0,20	-	-	0,16	0,11

3.6 Statistische onzekerheden in sterkte-parameters

Er zijn ongeveer 400 parameters die worden toegepast in de diverse toets sporen samen. Voor een aantal van deze parameters geldt dat ze in de beoordelingssoftware worden behandeld als “deterministische” parameters. Dat betekent dat de onzekerheid in deze parameters onvoldoende relevant wordt geacht om mee te nemen in de (semi-)probabilistische toets. Voor de overige parameters geldt dat deze als stochastisch gemodelleerd worden. Voor al deze stochasten is aangenomen dat ze onderling ongecorrleerd zijn. Voor de stochastische variabelen moet minimaal de volgende informatie worden ingevoerd in de beoordelingssoftware:

- [I] Kansverdelingstype;
- [II] Gemiddelde waarde (μ);
- [III] Standaarddeviatie (σ);
- [IV] Correlatielengte van de autocorrelatie functie;
- [V] Restcorrelatie van de autocorrelatie functie.

De keuze van [I] is in principe als “default” opgenomen in het instrumentarium en het verdelingstype kan niet aangepast worden. Voor [IV] en [V] is in de regel ook een default waarde opgenomen. De keuzes voor de default waarden van deze autocorrelatie-parameters zijn bepaald tijdens expert sessies voor de diverse toets sporen en/of overgenomen uit VNK. Voor [II] en [III] geldt dat voor een aantal stochastische variabelen ook de voorkeur is gegeven voor een defaultwaarde die niet kan worden aangepast door de gebruiker. Voor de overige stochastische variabelen is het in principe de bedoeling dat tijdens de beoordeling de waarden van [II] en [III] bepaald worden op basis van metingen.

Bijlage B geeft een overzicht van de belangrijkste (in termen van onzekerheid) parameters voor een aantal toets sporen. De tabellen bevatten geschatte waarden voor het gemiddelde en de standaarddeviatie. Deze waarden zijn leidend geweest bij het uitvoeren van de kalibraties, zoals beschreven in paragraaf 4.4. Dit zijn nadrukkelijk geen waarden die opgelegd zijn voor de beoordeling. In de beoordeling worden bij voorkeur waarden gebruikt die zijn afgeleid uit lokale metingen.

3.7 Model-onzekerheden voor de sterkte van waterkeringen

Modelfactoren kwantificeren de mate van nauwkeurigheid waarmee een (sterkte-)model geacht wordt de werkelijke sterkte van een kering te kunnen voorspellen. Deze paragraaf geeft twee voorbeelden van modelfactoren en de wijze waarop deze zijn afgeleid.

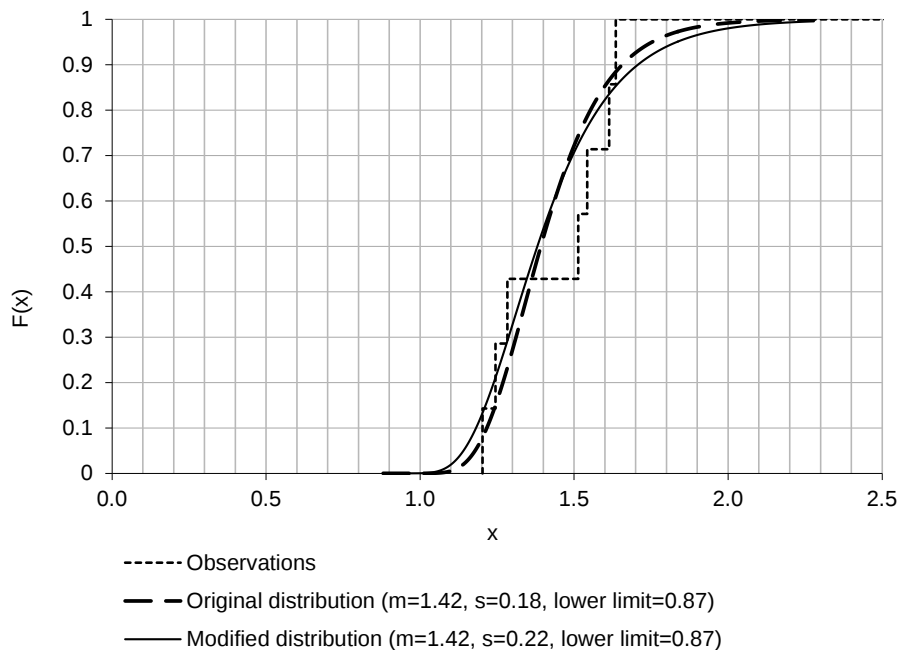
3.7.1 Steenzettingen

De beoordeling van steenzettingen in de gedetailleerde toets per vak wordt uitgevoerd met behulp van het rekenprogramma "SteenToets". Een belangrijke uitvoerwaarde van SteenToets is het quotiënt van de kritieke waarde van de golfhoogte en de dikte van de steenzetting. De modeluitkomst van deze quotiënt kan vergeleken worden met de waarde van dezelfde quotiënt die is vastgesteld op basis van een grootschalige proef met steenzettingen. De verhouding tussen het resultaat van de proef ten opzichte van het modelresultaat is een indicatie van de gezochte waarde van de modelfactor, m_{BR} . Op deze wijze is de waarde van de modelfactor afgeleid voor een bereik aan condities. Uit deze verzameling van uitkomsten kan vervolgens een kansverdeling afgeleid worden voor de waarde van m_{BR} .

De modelfactor (m_{BR}) voor het beoordelen van steenzettingen onder aanval van golven is voor het eerst afgeleid in Deltares (2012d). Vervolgens is in Deltares (2012e) een nieuwe waarde afgeleid op basis van de meest recente proeven. In beide gevallen zijn "gemiddelde" waarden afgeleid. In het kader van WBI-2017 is op basis van dezelfde gegevens vervolgens een kansverdeling afgeleid.

De voorgestelde kansverdeling voor het steentype 'zuilen met klemming' is 'lognormaal' met een gemiddelde van 1.42, een standaarddeviatie van 0.18 en een ondergrens van 0.87. De ondergrens werd noodzakelijk geacht omdat lagere waarden als fysisch onmogelijk worden gezien.

Deze kansverdeling kwantificeert het verschil tussen het model en proeven. Maar in de beoordeling moet ook rekening gehouden worden met het verschil tussen proeven en de werkelijkheid. Daarom is besloten de standaarddeviatie met 20% te verhogen tot 0.22. Figuur 3.12 toont de resulterende kansverdelingen voor de oorspronkelijk schatting van de standaarddeviatie (label 'original distribution') en standaarddeviatie met 20% opgehoogd (label 'modified distribution').



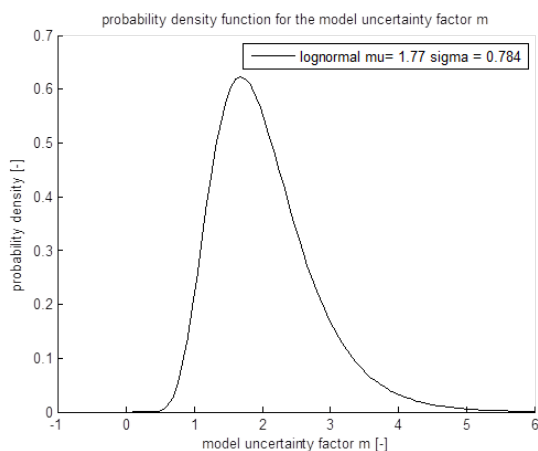
Figuur 3.12 Empirische kansverdeling van waargenomen verschillen tussen SteenToets en proeven ('original distribution') en de aangepaste kansverdeling die rekening houdt met verschillen met de werkelijkheid ('modified distribution').

3.7.2 Asfalt

Voor asfaltbekleding is niet een verzameling golfgootproeven beschikbaar zoals voor steenbekledingen. De modelfactor voor asfalt is daarom grotendeels gebaseerd op de vergelijking van uitkomsten van het relatief eenvoudige toets model 'GolfKlap' met uitkomsten van een meer geavanceerd eindig elementen model. Het afleiden van de modelfactor voor asfalt staat beschreven in Deltares (2014e). In essentie komt de aanpak op het volgende neer:

- Voor veel verschillende praktijkcases is een simulatie uitgevoerd met de beide modellen, voor het mechanisme 'falen van asfaltbekledingen door golfaanval'
- Het verschil in uitkomst (de 'Miner som') van elke case levert een 'modelfactor' op. De modelfactor is het quotiënt van de berekende Miner sommen.
- Door de berekende waarden is vervolgens een lognormale kansverdelingsfunctie geplot.

Figuur 3.13 toont de resulterende kansdichtheidsfunctie van de lognormale verdeling van de modelfactor voor asfaltbekledingen.



Figuur 3.13 Kansdichtheidsfunctie voor de modelfactor

3.8 Schematiseringonzekerheid en stochastisch ondergrondmodel

Uiteindelijk is besloten om alleen voor de geologie en indirecte mechanismen (zettingsvloeiing) daadwerkelijk de mogelijkheid te introduceren om schematiseringonzekerheid mee te nemen via scenario's met bijbehorende scenariokansen. In de huidige paragraaf beschrijven we het voorbeeld van het modelleren van scenario's voor de geologie: het stochastische ondergrondmodel.

De onderstaande tekst is voor een belangrijk deel gebaseerd op Deltares (2014a).

Voor het beoordelen van een waterkering is het van groot belang om de opbouw van de ondergrond onder en nabij het dijklichaam in beschouwing te nemen. Er is echter bijna altijd onvoldoende informatie over de ondergrond om met voldoende zekerheid een dekkend beeld te verkrijgen over de opbouw van de ondergrond.

In ENW (2012) is een werkwijze geïntroduceerd om met de onzekerheid ten aanzien van de ondergrondopbouw om te gaan. De kern van deze werkwijze is dat er aan de verschillende mogelijke ondergrond opbouwen kansen van voorkomen worden toegekend. In de praktijk is dit moeilijk uitvoerbaar. Daarom is, ter ondersteuning van dit proces, in het kader van het WBI-2017 een stochastische ondergrondschematisatie (WBI-SOS) ontwikkeld (Deltares 2014a, b).

In het WBI-SOS wordt voor vastgestelde dijkstrekkings de ondergrond weergegeven met grondopbouw-scenario's. Elk van deze scenario's heeft een kans van aantreffen gekregen, dit is de kans dat het betreffende scenario wordt aangetroffen indien bijvoorbeeld een sondering wordt uitgevoerd in de bijbehorende dijkstrekking. De toegekende kansen zijn gebaseerd op directe waarnemingen en op kennis van het ondergrondsysteem in het gebied. Bij het opstellen van WBI-SOS is ook rekening gehouden met de vereisten van een ondergrond-schematisatie tijdens het beoordelen. Dit houdt in dat voor het opstellen van WBI-SOS zowel voldoende inzicht in de systematiek van de ondergrond als in de achtergronden van grondeigenschappen noodzakelijk is.

De WBI-SOS grondopbouw-scenario's die in een dijksegment kunnen worden aangetroffen geven de opbouw van de ondergrond in WBI-SOS eenheden. Deze WBI-SOS eenheden omvatten de globaal gekarakteriseerde lagen die voor de beoordeling van een dijkstrekking gespecificeerd moeten zijn. De karakterisering van de eenheden is van belang voor het opstellen en gebruiken van proevenverzamelingen van grondeigenschappen. De

proevenverzamelingen kunnen hierbij gekoppeld worden aan een WBI-SOS eenheid. In totaal zijn binnen WBI-SOS 43 globale eenheden onderscheiden. De onderscheiden WBI-SOS eenheden zijn ingedeeld op vier niveaus die van belang zijn voor het opstellen van een consistente landelijke ondergrondkarakterisering voor geotechnische doeleinden:

Stratigrafie: Niveau 1 onderscheidt Holocene van Pleistocene (en oudere) afzettingen. Dit is van belang omdat de oudere afzettingen door leeftijdseffecten vrijwel altijd vaster zijn dan de Holocene afzettingen, ook als ze in hetzelfde afzettingsmilieu zijn afgezet (dezelfde oorsprong hebben).

Regionaal: Niveau 2 geeft op een regionale schaal aan in welk afzettingsmilieu de afzettingen zijn afgezet. De hoofdtypen zijn 'Marien', 'Rivier', 'Wind', 'Veen', 'Estuariën', 'Glaciaal' en 'Aangebracht'.

Lokaal: Niveau 3 geeft binnen een 'regionaal' afzettingsmilieu als 'Rivier' aan in welk 'lokaal' afzettingsmilieu het materiaal is afgezet, bijvoorbeeld 'geul' of 'oever'.

Materiaal eigenschappen: Dit niveau beschrijft de materiaaleigenschappen. In vrijwel alle gevallen zijn dit lithologische en andere materiaalkarakteristieken.

Per dijksegment worden gemiddeld ongeveer 10 scenario's onderscheiden. In sommige gevallen zijn slechts 2 scenario's onderscheiden, maar soms ook 26. Elk scenario heeft een kans van aantreffen toegewezen gekregen, dit is de kans dat dit scenario wordt aangetroffen in een uit te voeren boring of sondering. Het vaststellen van de kans van aantreffen van een eenheid berust op:

- de relatieve frequentie van aantreffen van de eenheid in sondeer- en boorstaten;
- de karakteristieke afmetingen van een eenheid (bijvoorbeeld een riviergeul met een bepaalde breedte) ten opzichte van de lengte van het segment;
- hoe vaak een bepaalde eenheid met een bepaalde karakteristieke afmeting voor kan komen binnen een segment van een zekere lengte.

Bij het toekennen van kansen voor de scenario's is gewerkt met globale klassen. Deze klassen zijn ingedeeld in termen van "zeer geringe kans" tot "overal aanwezig", waarvoor indicatieve kansen zijn vastgesteld. Tevens is voor het aangeven van zeer weinig voorkomende eenheden de relevantie van die eenheden met betrekking tot de toepassing (invloed op faalmechanismen) beschouwd, teneinde het aantal scenario's niet te groot te laten zijn. De mogelijkheid van een zeer dunne deklaag op een zandeenheid is bijvoorbeeld belangrijke informatie bij het beoordelen voor het toets spoor piping. Indien deze dunne deklaag een relatief kleine kans van aantreffen heeft van minder dan 5% dan wordt deze toch opgenomen in WBI-SOS. Immers, dit scenario met relatief kleine kans kan vanwege de mogelijk grote gevolgen significant zijn voor het overstromingsrisico. Echter, als een eenheid bijvoorbeeld vrijwel altijd een dikte heeft van 6 m, maar in minder dan 5% van de gevallen een dikte van 7 m, dan kan het zijn dat dit geen relevant verschil is. In dat geval wordt geen apart scenario opgesteld.

4 Probabilistische en semi-probabilistische toetsen

4.1 Doel

Vanwege de vele onzekerheden zijn de normen van de primaire waterkeringen in Nederland uitgedrukt in kansen. Bij de beoordeling wordt geverifieerd of de kans dat een waterkering zijn waterkerend vermogen verliest kleiner is dan deze norm. Als deze kans groter is dan de gestelde norm, wordt de kering afgekeurd. Om deze kansen te kunnen bepalen worden *probabilistische* berekeningen uitgevoerd ("probability" is Engels voor "kans"). In de dagelijkse praktijk wordt daarin onderscheid gemaakt tussen volledig probabilistisch beoordelen en semi-probabilistisch beoordelen.

In dit hoofdstuk worden diverse rekentechnische aspecten besproken die gerelateerd zijn aan probabilistisch beoordelen. Paragraaf 4.2 beschrijft de essentie van een probabilistische analyse. In paragraaf 4.3 wordt het onderscheid tussen semi-probabilistisch en volledig probabilistisch beoordelen toegelicht. Paragraaf 4.4 beschrijft het afleiden van veiligheidsfactoren voor de semi-probabilistische toets. Paragraaf 4.5 beschrijft de systeemanalyse waarin kansen van verschillende keringen en faalmechanismen (en tijdperioden) worden gecombineerd tot de jaarlijkse overstromingskans van een dijktraject. Paragraaf 4.6 beschrijft de keuze van de (belangrijkste) stochastische variabelen. Paragraaf 4.7 beschrijft rekentechnieken voor de volledig probabilistische beoordeling en paragraaf 4.8 beschrijft hoe kansverdelingen van kennisonzekerheden en natuurlijke onzekerheden gecombineerd kunnen worden tot één kansverdeling. Paragraaf 4.9 geeft enkele voorbeelden van probabilistische en semi-probabilistische toetsmodellen die zijn opgesteld in het kader van WBI-2017.

4.2 Essentie van probabilistische analyses

4.2.1 Onzekerheden in belasting en sterkte van de waterkering

Zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken hebben we bij de beoordeling van waterkeringen te maken met diverse grootheden waarvan de exacte waarde onbekend is. De meest relevante daarvan worden expliciet gemodelleerd door variabelen met onzekere uitkomst. Deze variabelen worden aangeduid als "stochastische variabelen", of kortweg "stochasten". Elke variabele heeft een bepaald bereik van fysisch realistische uitkomsten. Binnen dit bereik kan de stochastische variabele elke waarde aannemen, maar niet elke waarde is even waarschijnlijk. De mate van waarschijnlijk van mogelijke uitkomsten van stochastische variabelen wordt weergegeven met kansfuncties (zie paragraaf 2.2).

4.2.2 De grenstoestandsfunctie

De belasting en sterkte van de waterkering worden gekarakteriseerd door meerdere onzekere (stochastische) variabelen. De sterkte en belasting zijn daardoor zelf ook onzekere (stochastische) variabelen. Deze variabelen worden aangeduid met het symbool 'S' (belasting) en het symbool 'R' (sterkte). De kans dat de (onzekere) belasting groter is dan de (onzekere) sterkte van een waterkering is een maat voor de overstromingskans. De grenstoestandsfunctie, Z, is gedefinieerd als het verschil tussen belasting en sterkte:

$$Z = R - S$$

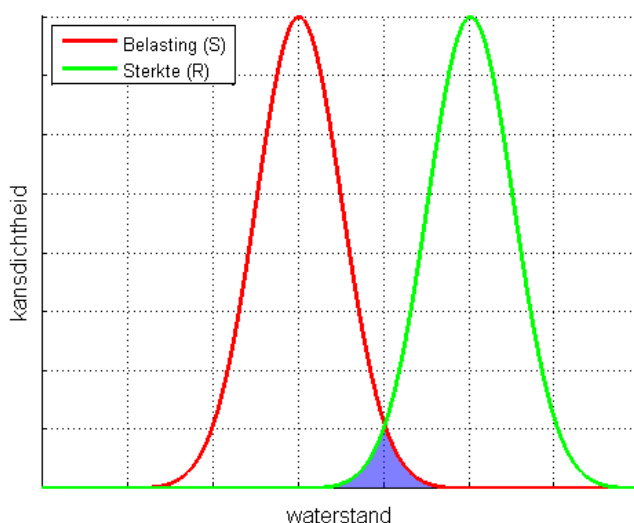
Grenstoestandsfunctie Z geeft aan waar de grens ligt tussen 'falen' en niet falen². Als $Z < 0$ betekent dit dat de belasting (S) groter is dan de sterkte (R). Z is net als R en S ook een stochastische variabele en kan daarom beschreven worden met een kansdichtheidsfunctie. In de beoordeling is het van belang te weten wat de kans is dat $Z < 0$, ofwel de kans dat de belasting groter is dan de sterkte van de kering, ofwel de kans op falen van een waterkering.

4.2.3 Probabilistische analyses

De grote uitdaging bij het bepalen van de faalkans is dat de kansdichtheidsfunctie van grenstoestand Z doorgaans niet expliciet beschikbaar is. Daarom worden *probabilistische analyses* uitgevoerd om de kans te schatten dat $Z < 0$. In een dergelijke analyse moeten de onderliggende variabelen en hun onzekerheden beschouwd worden.

Figuur 4.1 geeft een voorbeeld van kansverdelingen van twee onderliggende variabelen S (belasting) en R (sterkte). Bij de horizontale as in Figuur 4.1 staat de waterstand weergegeven. Dat betekent dat de belasting in dit voorbeeld volledig gekarakteriseerd wordt door de waterstand (golfbelasting speelt geen rol) en dat de sterkte weergegeven is als: "de kering faalt bij deze waterstand". De kansverdeling van de belasting geeft aan welke waterstanden de grootste kans van optreden hebben. De kansverdeling van de sterkte geeft aan bij welke waterstand de kering het meest waarschijnlijk zal falen. In principe geldt: hoe hoger de waterstand, hoe zwaarder de belasting en dus hoe groter de kans op falen. Desondanks neemt de kansdichtheidsfunctie van de sterkte boven een bepaalde drempel weer af. Dat heeft te maken met het feit dat voor dergelijke (extreem) hoge waterstanden de kans groot is dat kering al gefaald is bij een lagere waterstand.

In Figuur 4.1 is het gebied blauw gearceerd waar de belasting relatief hoog is en de sterkte relatief laag. Dit is voor de beoordeling het meest relevante bereik van mogelijke uitkomsten, omdat dit het bereik is waar de belasting (mogelijk) groter is dan de sterkte.



Figuur 4.1 Voorbeelden van kansdichtheidsfuncties van de sterkte en belasting.

² Het 'falen' van een waterkeringen is niet per definitie hetzelfde als 'overstromen' of 'doorbreken' van een waterkering. Het onderscheid tussen deze drie termen is relevant, maar niet voor het huidige hoofdstuk dat vooral als doelstelling heeft om het principe van probabilistisch toetsen toe te lichten.

Indien de kansdichtheidsfuncties van Figuur 4.1 bekend zijn kan de faalkans berekend worden. In veel toepassingen is dat echter niet het geval en moet een analyse uitgevoerd worden naar de onderliggende belasting- en sterktevariabelen. Dit wordt toegelicht aan de hand van een eenvoudig voorbeeld waarin de sterkte als bekend (dus niet onzeker) wordt verondersteld en de analyse zich derhalve kan beperken tot de onzekere belastingvariabelen.

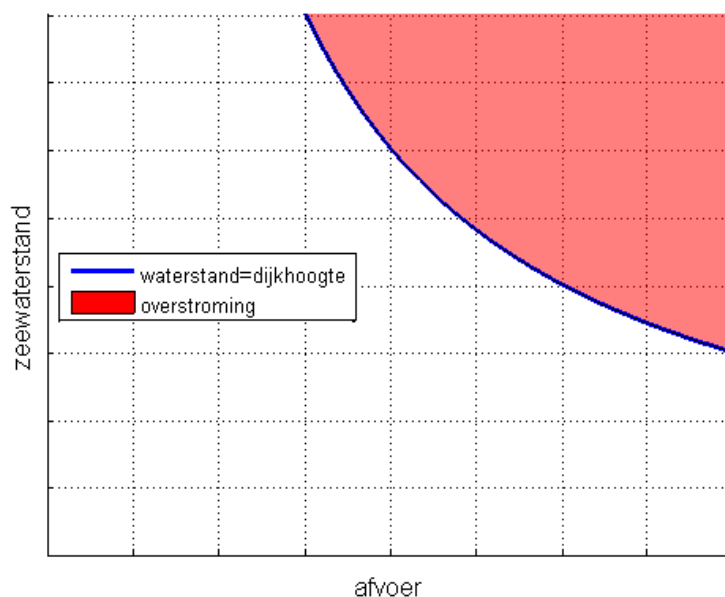
In dit voorbeeld wordt de dijk verondersteld te 'falen' zodra de waterstand hoger is dan de kruinhoogte van de waterkering. De waterkering ligt in het benedenrivierengebied waar waterstanden in de rivier beïnvloed worden door de zeewaterstand en rivierafvoer. Figuur 4.2 toont een fictief voorbeeld van combinaties van zeewaterstand en rivierafvoer die resulteren in een lokale waterstand die gelijk is aan de kruinhoogte van de waterkering (blauwe lijn). In dezelfde figuur zijn ook combinaties van afvoer en waterstanden weergegeven die resulteren in hogere waterstanden (rood gearceerd gebied). Deze laatste groep van potentiële hoogwatergebeurtenissen is hier bij uitstek relevant omdat dit de gebeurtenissen zijn waarbij sprake is van een belasting (waterstand) die hoger is dan de sterkte (kruinhoogte) en dus sprake is van falen van de kering. Het doel van een probabilistische analyse is om de faalkans van de kering vast te stellen. In dit voorbeeld betekent dit dat een probabilistische analyse zich focust op de volgende twee vraagstukken:

- 1 Bij welke combinaties van afvoeren en zeewaterstanden is de lokale waterstand hoger dan de kruinhoogte?
- 2 Wat is de totale kans van optreden van deze gebeurtenissen?

Meer generiek kan deze probleemstelling als volgt omschreven worden:

- 1 Bij welke combinaties van uitkomsten van alle stochastische belasting- en sterktevariabelen is er sprake van falen van het beschouwde systeem van waterkeringen?
- 2 Wat is de totale kans van optreden van deze gebeurtenissen?

Sectie 4.3 beschrijft hoe dergelijke analyses uitgevoerd worden.



Figuur 4.2 Fictief voorbeeld van combinaties van zeewaterstand en rivierafvoer die resulteren in een lokale waterstand die gelijk is aan de kruinhoogte van de waterkering.

4.3 Probabilistische en semi-probabilistische beoordeling

Vanaf 2017 worden de waterkeringen beoordeeld op basis van de overstromingskans. Dat betekent dat beoordeeld wordt of de overstromingskans van een dijktraject kleiner is dan de gestelde norm. Indien niet wordt voldaan aan deze norm komt de kering in aanmerking voor versterking. Om te kunnen bepalen of aan deze norm wordt voldaan, moet een probabilistische analyse van de waterkering uitgevoerd worden. In het WBI-2017 worden twee methoden van probabilistisch beoordelen toegepast:

- 1 Volledig probabilistische toets;
- 2 Semi-probabilistische toets.

In een volledig probabilistische toets wordt de actuele overstromingskans van een waterkering expliciet gekwantificeerd en vervolgens vergeleken met de norm. In een semi-probabilistische toets wordt beoordeeld of met voldoende vertrouwen vastgesteld kan worden dat de actuele overstromingskans kleiner is dan de norm. In een semi-probabilistische toets wordt de actuele overstromingskans van een waterkering niet expliciet gekwantificeerd. Het resultaat van een semi-probabilistische toets is dus alleen een oordeel of de kering voldoet of niet, maar er komt niet uit hoe ver de actuele overstromingskans af ligt van de norm (en daarmee hoe urgent het probleem is bij afkeuring). Een volledig probabilistische toets levert wél de actuele overstromingskans. Bovendien zijn veiligheidsfactoren die breed toepasbaar moeten zijn, soms noodgedwongen relatief streng. Dit betekent dat een semi-probabilistische toets een minder nauwkeurig beeld van de betrouwbaarheid van een kering oplevert dan een probabilistische toets.

Een volledig probabilistische toets verschaft dus meer informatie en is nauwkeuriger en kan mede daarom beschouwd worden als de 'Koninklijke route'. Het heeft echter ook een aantal praktische nadelen:

- het is alleen uit te voeren door een beperkte groep experts;
- de methoden zijn moeilijk uitlegbaar en worden vaak als "black-box" ervaren;
- in sommige gevallen zijn probabilistische analyses zeer rekenintensief, hetgeen grenzen stelt aan de praktische uitvoerbaarheid.

Een semi-probabilistische toets heeft als voordeel dat deze doorgaans eenvoudiger uitlegbaar is en ook eenvoudiger overdraagbaar is van experts naar een bredere gemeenschap. Bovendien wordt met het gebruik van de semi-probabilistische toets de link met het verleden behouden, omdat de toetsmethoden van de voorgaande toets ronden in essentie semi-probabilistisch waren. Het behoud van de semi-probabilistische toetsvorm maakt dat de overstap naar de nieuwe manier van beoordelen minder groot is.

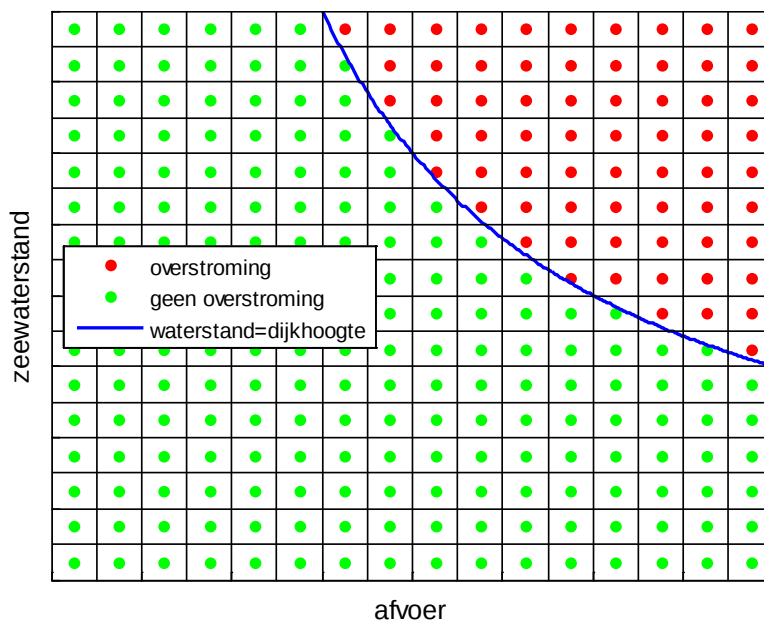
4.3.1 Volledig probabilistische toets

De belangrijkste stap in het uitvoeren van de probabilistische toets is het berekenen van de actuele overstromingskans. Dit wordt toegelicht aan de hand van het voorbeeld van sectie 4.2.3 van een fictieve locatie in het benedenrivierengebied. In dit voorbeeld wordt de overstromingskans bepaald door beantwoording van de volgende twee vragen:

- 1 Bij welke combinaties van afvoeren en zeewaterstanden is de lokale waterstand hoger dan de kruinhoogte?
- 2 Wat is de totale kans van optreden van deze gebeurtenissen?

Er zijn verschillende rekenmethoden beschikbaar om deze kans uit te rekenen. Een relatief eenvoudig uitlegbare methode is “numerieke integratie”. Deze methode is schematisch weergegeven in Figuur 4.3. In deze methode wordt een rooster gedefinieerd van alle mogelijke combinaties van afvoer en zeewaterstand. Van elke individuele roostercel, wordt vervolgens bepaald:

- (i) De kans van voorkomen, d.w.z. de kans dat een combinatie van afvoer en zeewaterstand wordt waargenomen die behoort tot de beschouwde roostercel.
- (ii) Of er sprake is van overstromen bij deze combinatie van waterstand en afvoer.



Figuur 4.3 Schematische weergave van de rekenmethode “numerieke integratie” ter bepaling van de overstromingskans in een fictief voorbeeld

De kans van stap (i) wordt bepaald op basis van statistische analyses van de variabelen afvoer en zeewaterstand. Van deze variabelen kunnen de benodigde statistieken afgeleid worden uit langjarige meetreeksen bij locaties zoals Lobith (Rijnafvoer), Lith (Maasafvoer) of Hoek van Holland (zeewaterstand). De uitkomst van stap (ii) is schematisch weergegeven in Figuur 4.3 met de kleur groen (geen overstroming) en rood (wel overstroming). De overgang van groen naar rood ligt bij de blauwe scheidslijn. Het is echter van belang te realiseren dat de exacte ligging van de blauwe lijn in de praktijk niet bekend is voorafgaande aan de berekening. Om die reden worden de combinaties van afvoer en zeewaterstand systematisch doorlopen en wordt met behulp van een hydrodynamisch model voor iedere combinatie van afvoer en zeewaterstand bepaald of de lokale waterstand boven de kruinhoogte uitkomt.

Vervolgens wordt voor alle “rode” combinaties de kans op voorkomen, zoals bepaald in stap (i), opgeteld om de totale overstromingskans te bepalen. Immers, deze som betreft de totale kans van voorkomen van alle combinaties van afvoer en zeewaterstand die tot overstroming leiden.

Meer generiek geformuleerd worden bij de rekenmethode “numerieke integratie” de volgende stappen doorlopen:

- (1) Formeer een n -dimensionaal rekenrooster voor de n stochastische variabelen die relevant zijn voor de sterkte en belasting van waterkeringen.
- (2) Doorloop het rekenrooster systematisch en bepaal voor elke roostercel/combinatie:
 - a) de kans van optreden van deze combinatie op basis van statistische analyses;
 - b) met gebruik van hydrodynamische modellen en faalmechanismemodellen of deze combinatie resulteert in een overstrooming van de dijk;
- (3) Bepaal de som van kansen van alle combinaties die tot overstromen leiden.

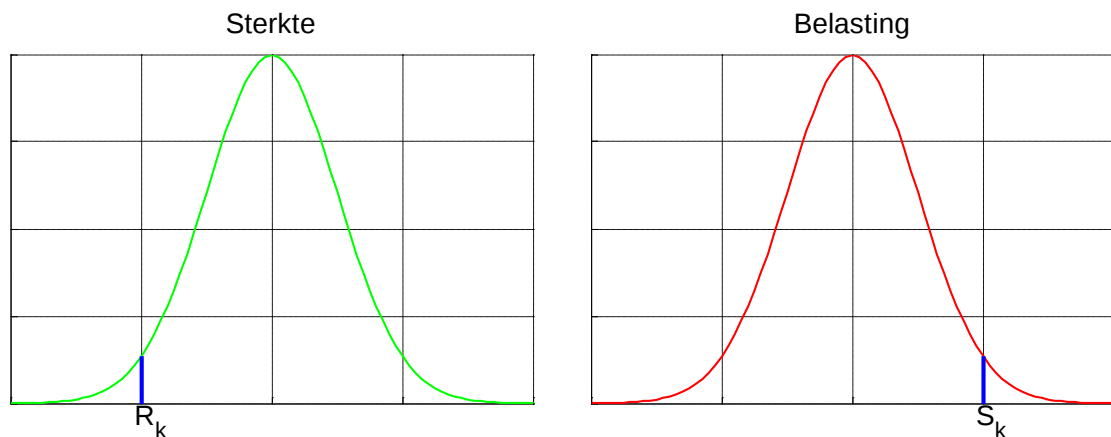
De methode numerieke integratie is relatief eenvoudig toe te passen, maar heeft als nadeel dat de benodigde rekentijd sterk toeneemt met toenemend aantal onzekere variabelen. Mede om die reden zijn er alternatieve probabilistische rekentechnieken beschikbaar die beter geschikt zijn om berekeningen met grote aantallen onzekere variabelen uit te voeren. Deze worden toegelicht in paragraaf 4.7. Elk van deze methoden heeft specifieke voor- en nadelen ten aanzien van de criteria nauwkeurigheid, benodigde rekentijd en robuustheid. De keuze van een "optimale" methode is afhankelijk van het beschouwde probleem.

4.3.2 Semi-probabilistische toets

In een semi-probabilistische toets wordt in principe slechts één combinatie van realisaties van de onzekere variabelen doorgerekend met hydraulische modellen en/of faalmechanismemodellen. In sommige toepassingen worden meerdere combinaties doorgerekend, bijvoorbeeld bij meerdere ondergrondscenario's. In de beschrijving in de huidige sectie gaan we uit van het doorrekenen van één combinatie.

Voor elke stochastische variabele wordt één representatieve waarde gekozen. Voor een sterkte-variabele wordt doorgaans een relatief lage waarde, met onderschrijdingskansen van 0,05, of juist een relatief hoge waarde, met onderschrijdingskansen van 0,95. De keuze is afhankelijk van de impact van deze variabele op de sterkte van de kering; representatieve waarden voor sterktevariabelen worden zó gekozen dat de waterkering bij deze waarde minder sterk is dan bij de gemiddelde waarde. Met andere woorden: er wordt in de beoordeling rekening gehouden met mogelijke tegenvallers in de sterkte van de kering. Indien de stochastische variabele als relatief onbelangrijk wordt beschouwd wordt ook vaak de gemiddelde waarde gekozen.

Een representatieve waarde die is gedefinieerd aan de hand van een bepaalde kans op over- of onderschrijding wordt een karakteristieke waarde genoemd. De karakteristieke waarden van belastingvariabelen zijn hoger dan gemiddeld; de waterkering wordt immers beoordeeld op hoogwatergebeurtenissen. De toetswaterstand wordt in de regel gelijk gekozen aan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de wettelijke veiligheidsnorm voor het beschouwde dijktraject. Voor situaties waar golven ook relevant zijn worden maatgevende golfcondities bepaald bij de gekozen toetswaterstand.



Figuur 4.4 Karakteristieke waarden van de sterkte en belasting

Figuur 4.4 geeft een schematische weergave voor de karakteristieke waarde voor de sterkte, R_k , en de karakteristieke waarde voor de belasting, S_k . Deze karakteristieke waarden zijn te herleiden uit de karakteristieke waarden van de onderliggende sterkte- en belastingvariabelen. De figuur geeft aan dat R_k lager is dan de gemiddelde waarde van de sterkte, terwijl S_k juist hoger is dan de gemiddelde waarde. De karakteristieke waarden van sterkte en belasting kunnen onderling vergeleken worden om te verifiëren of de kering op orde is. In deze vergelijking kunnen ook extra veiligheidsfactoren in rekening gebracht worden:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}; \quad S_d = \gamma_s S_k$$

Waarin R_d en S_d rekenwaarden zijn van sterkte respectievelijk belasting, en γ_R en γ_s veiligheidsfactoren voor de sterkte respectievelijk belasting. De kering wordt goedgekeurd in de semi-probabilistische toets indien de rekenwaarde van de sterkte groter is dan de rekenwaarde van de belasting. Door invoering van veiligheidsfactoren, die in de regel een waarde groter dan 1 hebben, wordt een extra strenge eis gesteld aan de kering in de semi-probabilistische toets. De toepassing van veiligheidsfactoren is nodig om extra vertrouwen te geven in het toetsoordeel indien de kering voldoet aan het semi-probabilistische rekenvoorschrift. Op basis van zorgvuldig gekozen karakteristieke waarden alleen wordt weliswaar in de regel al een relatief strenge eis geformuleerd, maar vaak nog niet dusdanig streng dat voldoende zekerheid bestaat dat de kering bij goedkeuren ook écht voldoet voor het betreffende toets spoor. Dat heeft vooral te maken met de relatief strenge veiligheidseisen die gesteld worden aan de keringen. Vandaar dat veiligheidsfactoren met, in de regel, waarden groter dan 1 worden ingevoerd om de semi-probabilistische toets voldoende streng te maken. De toets mag echter ook weer niet té streng worden omdat dan mogelijk veel keringen ten onrechte worden afgekeurd. De keuze van de juiste veiligheidsfactoren is dus een delicate kwestie. Sectie 4.4 beschrijft de procedure voor de keuze van veiligheidsfactoren.

4.3.3 Verschillen en overeenkomsten

Een semi-probabilistische toets is een vereenvoudigde vorm van een volledig probabilistische toets. Omdat in de semi-probabilistische toets doorgaans slechts één gebeurtenis wordt gesimuleerd, wordt deze weleens aangeduid als een deterministische benadering.

Een semi-probabilistische toets is echter gebaseerd op de veiligheidseis, in tegenstelling tot een deterministische benadering. De semi-probabilistische toets heeft de volgende overeenkomsten met de volledig probabilistische toets:

- beide methoden zijn hebben dezelfde faalkanseis/norm als uitgangspunt;
- beide methoden maken gebruik van hetzelfde faalmechanismemodel;
- beide methoden gebruiken dezelfde kansverdelingen van de belastingen en sterkte-eigenschappen.

De volledig probabilistische toets wordt vaak als complexer en arbeidsintensiever ervaren dan de semi-probabilistische toets. Uit de bovenstaande opsomming blijkt echter dat in termen van gegevensverzameling en gebiedsmodellering er geen feitelijke verschillen zijn tussen de beide benaderingen. Er zijn wel verschillen tussen de rekenmethoden van beide toetsvormen:

- de volledig probabilistische toets rekent met kansverdelingen van stochastische variabelen, de semi-probabilistische toets gebruikt rekenwaarden van stochastische variabelen;
- de uitvoer van een volledig probabilistische toets is een berekende faalkans (overstromingskans) van de kering, de uitvoer van een semi-probabilistische toets is in principe alleen een oordeel: 'voldoet' of 'voldoet niet'. Indien gewenst kan echter wel een verdere gradatie aangebracht worden in de uitvoer van semi-probabilistische toetsen op basis van het verschil of quotiënt van de rekenwaarde van de sterkte en de rekenwaarde van de belasting.
- de volledig probabilistische toets berekent faalkansen voor alle faalmechanismen en combineert deze tot een totale faalkans voor het dijktraject; voor de semi-probabilistische toets moet vooraf een faalkansbegroting gemaakt worden voor de relatieve bijdragen van de diverse mechanismen aan de totale faalkans ('vrije faalkansbegroting' tegen 'vast faalkansbegroting'). Het concept van de faalkansbegroting wordt in paragraaf 4.5.2 nader toegelicht.

4.4 Kalibratie van veiligheidsfactoren voor de semi-probabilistische toets

4.4.1 Doelstelling

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. Bij de keuze van de veiligheidsfactoren worden de volgende doelstellingen nagestreefd:

- De semi-probabilistische toets moet zo veel mogelijk consistentie vertonen met de volledig probabilistische toets. Dit betekent dat het aantal situaties waarbij de ene toets tot afkeuring leidt en de andere tot goedkeuren geminimaliseerd moet worden. Daarbij moet gerealiseerd worden dat volledige consistentie niet realistisch is, de semi-probabilistische toets is immers een vereenvoudiging en kan niet altijd consistent zijn met de volledig probabilistische toets.
- Daar waar inconsistentie onvermijdelijk is dient de semi-probabilistische toets in principe conservatiever te zijn dan de probabilistische toets. Met andere woorden: situaties waarbij de semi-probabilistische toets tot afkeuren leidt terwijl de probabilistische toets tot goedkeuren leidt zijn minder problematisch dan de omgekeerde situatie. De gedachte hierachter is dat de volledig probabilistische toets fungeert als 'terugvaloptie' voor situaties waarbij de semi-probabilistische toets tot afkeuren leidt en waarbij het beeld bestaat dat afkeuren mogelijk onterecht is.

Voor situaties waarbij de semi-probabilistische toets tot goedkeuren leidt wordt in principe geconcludeerd dat de kering op orde is en dat een probabilistische toets niet meer nodig is. Om die reden is het onwenselijk dat er situaties zijn waarbij de semi-probabilistische toets tot goedkeuren leidt en de volledig probabilistische toets tot afkeuren. In de praktijk wordt de semi-probabilistische methode zó gekalibreerd dat de faalkans *gemiddeld over de dijkvakken* voldoet aan de doelstelling. Het gevolg is dat in de meeste gevallen waar de semi-probabilistische methode regel ten onrechte goed keurt, de fout klein is.

- De semi-probabilistische toets mag niet té conservatief zijn. Indien vrijwel alle keringen worden afgekeurd in de semi-probabilistische toets is deze toets niet efficiënt.

4.4.2 Procedure op hoofdlijnen

De tekst uit deze paragraaf is deels overgenomen uit het rapport van Deltares (2013).

Op hoofdlijnen bestaat het kalibratieproces uit de volgende onderdelen:

- 1 Het vaststellen van betrouwbaarheidseisen. Deze eisen zijn gedefinieerd als faalkanseisen (per jaar) voor het beschouwde toets spoor en het beschouwde dijkvak/doorsnede. Deze eis wordt afgeleid van de wettelijk vastgestelde overstromingskansnorm voor het dijktraject. Sectie 4.5 geeft meer details over de vertaalslag van de norm voor het traject naar een faalkanseis per toets spoor en dijkvak/doorsnede.
- 2 Het bepalen van de vorm van het semi-probabilistische toetsvoorschrift: 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 in een probabilistische rekenomgeving, zoals beschreven in secties 4.2 en 4.3.
 - 2.3 Bereken jaarlijkse faalkansen en invloed coëfficiënten voor alle testcases op basis van probabilistische berekeningen. Invloed coëfficiënten worden bepaald voor elke stochastische variabele en zijn indicatoren voor het relatieve belang van de stochastische variabelen in de faalkansberekening. De gekwadrateerde invloed coëfficiënten 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 Invloed coëfficiënten. Een hoge waarde van de invloed coëfficiënt duidt erop dat een “tegenvaller” 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 toetsen 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. Uitzondering hierop vormen de toets sporen voor duinen en “hoogte”, waarvoor de waterstand dusdanig dominant is dat een afwijkende waterstand gekozen moet worden om consistentie met de probabilistische toets te kunnen waarborgen. Vervolgens wordt gekozen welke veiligheidsfactoren in het semi-probabilistische toetsvoorschrift worden opgenomen. Deze keuzes berusten op zowel de berekende invloed coëfficiënten 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:

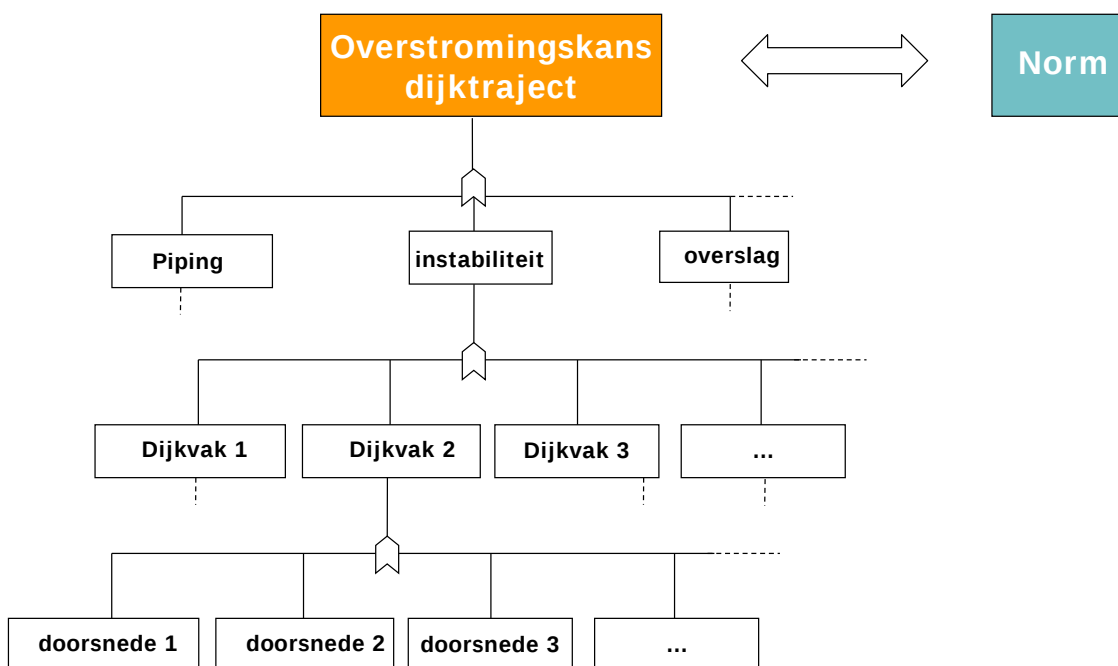
- 3.1 De meeste veiligheidsfactoren worden, met behulp van een betrekkelijk eenvoudige formule, afgeleid op basis van de gekozen karakteristieke waarden (stap 2.4) en de berekende jaarlijkse faalkansen en invloed coëfficiënten (stap 2.3). Indien zich duidelijke verschillen aftekenen tussen verschillende gebieden/situaties in de berekende jaarlijkse faalkansen en/of invloed coëfficiënten, 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 toetsvoorschrift 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 jaarlijkse 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, doorgaans 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 jaarlijkse 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 toetsvoorschrift niet bovenmatig streng wordt.

4.5 Systeemanalyse: van overstromingskans per locatie, mechanisme en tijdstap naar jaarlijkse overstromingskans per dijktraject

De wettelijk vastgelegde veiligheidsnorm voor overstromen is gedefinieerd per dijktraject. Een dijktraject bestaat uit meerdere dijkvakken en/of kunstwerken. Indien in één van deze dijkvakken een doorbraak plaats vindt is er sprake van “overstromen” van het dijktraject. Binnen een dijkvak geldt weer dat een doorbraak op verschillende locaties (dwarsdoorsneden) plaats kan vinden. 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. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 4.5. Figuur 4.5 is overigens niet compleet, er moet ook rekening gehouden worden met verschillende condities van de windrichting en afsluitbare stormvloedkeringen. Omwille van de overzichtelijkheid zijn deze niet in de figuur opgenomen.

De kansen voor alle toets sporen en dijkvakken/doorsneden moeten gecombineerd worden tot één overstromingskans voor het hele dijktraject. De toegepaste methode van combineren is verschillend voor de probabilistische en semi-probabilistische toets.



Figuur 4.5 Schematische weergave van het combineren van overstromingskansen van doorsneden, dijkvakken en faalmechanismen ter bepaling van de overstromingskans van een dijktraject.

4.5.1 Volledig probabilistische toets op trajectniveau

Eén van de vormen van beoordelen is de probabilistische toets op trajectniveau. In die toets worden faalkansen van alle relevante mechanismen en dijkvakken gecombineerd tot één faalkans op trajectniveau.

Voor elk relevant toets spoor worden de volgende activiteiten uitgevoerd:

- [i] Opdelen van het dijktraject in dijkvakken;
- [ii] Keuze van een representatieve doorsnede per dijkvak;
- [iii] Berekenen van de overstromingskansen van de doorsnede;
- [iv] Opschalen van de overstromingskansen van de doorsnede naar de overstromingskansen van het hele dijkvak;
- [v] Combineren van overstromingskansen van alle dijkvakken in het dijktraject.

Het resultaat is een overstromingskans per traject als gevolg van één toets spoor. De laatste stap in de systeemanalyse is:

- [vi] Combineren van overstromingskansen van alle toets sporen tot de overstromingskansen voor het hele dijktraject.

[i] Opdelen van het dijktraject in dijkvakken

Dijkvakken worden bij voorkeur zo gekozen dat deze statistisch zoveel mogelijk homogeen zijn. De indeling in dijkvakken kan verschillend zijn voor verschillende toets sporen. Voor het toets spoor “instabiliteit van de bekleding” wordt de indeling gebaseerd op de mate van uniformiteit van de aangelegde dijkbekleding. Voor macro-instabiliteit en piping zijn geotechnische condities vaak maatgevend voor de indeling.

[ii] Keuze van een representatief dwarsprofiel per dijkvak

Voor elk dijkvak dient een “representatief” dwarsprofiel gekozen te worden waarvoor de overstromingskans wordt berekend. Het gekozen dwarsprofiel moet representatief zijn voor het hele dijkvak. Zolang aspecten zoals de eigenschappen van de bekleding, de taludhelling, de ondergrond, het dijklichaam, het voorland, de waterstand en de golfrandvoorwaarden bij benadering constant zijn langs het beschouwde dijkgedeelte, kan het dijkgedeelte geschematiseerd worden tot één vak en kan dus volstaan worden met één dwarsprofiel. Indien één van deze aspecten significant varieert en bovendien een relevante bijdrage levert aan de faalkans van het toets spoor, heeft men de volgende keuze:

- het vak opsplitsen in meerdere vakken;
- het vak desondanks als één vak beschouwen, maar de ongunstigste doorsnede aanhouden.

Indien gekozen wordt voor de laatste optie en vervolgens de dijk wordt afgekeurd in de toets, loont het wellicht de moeite alsnog te kiezen voor kleinere, meer homogene, vakken.

[iii] Berekenen van de overstromingskansen van de doorsnede

In deze stap wordt de analyse uitgevoerd zoals beschreven in sectie 4.3.1.

De overstromingskans van een doorsnede wordt hierbij berekend op basis van alle mogelijke realisaties van de stochastische variabelen, de bijbehorende kansen van voorkomen en de modellen die de fysica van belastingen en sterkte beschrijven.

[iv] Opschalen van de overstromingskans: van doorsnede naar dijkvak

De kans dat ergens in een dijkvak een overstroming plaats vindt, is groter dan de kans dat bij één specifieke locatie (doorsnede) in het dijkvak een overstroming plaats vindt. Het verschil tussen de overstromingskans van de gekozen doorsnede en de overstromingskans van het dijkvak is een voorbeeld van een “lengte-effect”: hoe groter de lengte van de dijk, hoe groter de kans dat er ergens een overstroming plaats vindt. Sterk bepalend voor het lengte-effect is de ruimtelijke correlatie van de relevante stochastische variabelen. Voor bijvoorbeeld de waterstand geldt dat de ruimtelijke correlatie groot is. Immers, als het ergens op een locatie hoogwater is, dan is er normaal gesproken langs het hele dijkvak sprake van hoogwater. Voor de meeste sterkte-variabelen is de ruimtelijke correlatie significant kleiner dan voor de waterstand, d.w.z. de waarden van sterkte-variabelen kunnen significant fluctueren binnen een dijkvak.

Over het algemeen geldt: hoe groter de ruimtelijke correlatie, des te kleiner het lengte-effect. Voor een toets spoor waarbij de waterstand zeer dominant is, is het lengte-effect dus klein. Dit geldt bijvoorbeeld het toets spoor “hoogte”, de sterkte van de kering wordt daarin immers vertegenwoordigd door de hoogte van de dijk en die kent relatief weinig onzekerheid. Informatie over de overstromingskans op één locatie geeft dan direct veel informatie over de overstromingskans op andere locaties in het dijkvak. Daardoor is er in die situatie relatief weinig verschil in de overstromingskans van het dijkvak en de overstromingskans van de zwakste doorsnede binnen het dijkvak. Omgekeerd geldt voor toets sporen waarbij sterk ruimtelijk fluctuerende sterktevariabelen meer dominant zijn (zoals bij piping en macrostabiliteit) het lengte-effect relatief groot is.

Het berekenen van het lengte-effect en, daarmee samenhangend, de opschaling van de faalkans van een doorsnede naar een dijkvak, wordt uitgevoerd op basis van wiskundige formuleringen die zijn opgebouwd uit de volgende elementen:

- De berekende faalkans van de doorsnede;
- De lengte van het dijkvak;
- De ruimtelijke correlatie van elke individuele stochastische variabele;
- De berekende invloed coëfficiënten per stochastische variabele (zoals beschreven in sectie 4.4.2 zijn dit indicatoren voor het relatieve belang van de stochastische variabelen onderling in de berekening van de overstromingskans van de doorsnede).

[v] Combineren van overstromingskansen van alle dijkvakken in het dijktraject.

Zodra de kansen per dijkvak zijn berekend kan de overstromingskans van het hele traject bepaald worden. Dit is net als de vorige stap een ruimtelijke opschaling van de overstromingskans. In deze opschaling spelen ook min of meer dezelfde factoren een rol:

- De berekende overstromingskans van elk dijkvak;
- Het aantal dijkvakken in het dijktraject;
- De ruimtelijke correlatie van elke individuele stochastische variabele;
- De berekende invloed coëfficiënten per stochastische variabele (per dijkvak vastgesteld).

[vi] Combineren van overstromingskansen van toets sporen.

Berekende overstromingskansen van de diverse toets sporen worden gecombineerd om de totale overstromingskans van het dijktraject te bepalen. Dit gebeurt op vergelijkbare wijze als het combineren van kansen van dijkvakken. Dat betekent dat wederom de correlatie een belangrijke rol speelt. De correlatie komt voort uit het feit dat dezelfde variabelen een rol spelen in verschillende faalmechanismemodellen. De waterstand is relevant bij vrijwel elk faalmechanisme, maar ook bijvoorbeeld een sterkteparameter als de korreldiameter is relevant voor meerdere faalmechanismen. Bij het combineren van kansen van faalmechanismen spelen de volgende factoren een rol:

- De berekende overstromingskans voor elk faalmechanisme;
- Het aantal faalmechanismen dat relevant is voor het dijktraject;
- De onderlinge correlatie van elke individuele stochastische variabele tussen de diverse mechanismen;
- De berekende invloed coëfficiënten per stochastische variabele (per faalmechanisme vastgesteld).

4.5.2 Toets op vakniveau

De probabilistische toets op trajectniveau komt beschikbaar in 2019 en bovendien niet voor alle toets sporen. In de periode 2017-2019 kan daarom alleen een toets per vak worden uitgevoerd. Afhankelijk van het faalmechanisme wordt deze toets op probabilistische of semi-probabilistische wijze uitgevoerd.

Zoals toegelicht in de vorige sectie worden in de volledig probabilistische toets de overstromingskansen van alle individuele componenten van de faal-boom van Figuur 4.5 berekend, en deze worden vervolgens gecombineerd om de totale overstromingskans van het dijktraject te bepalen. In een semi-probabilistische toets is een dergelijke aanpak niet mogelijk omdat in deze toets geen *kansen* worden berekend. Ter herinnering: 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 in principe geen informatie beschikbaar over de overstromingskans op doorsnede-, vak- of trajectniveau. Om toch iets te kunnen zeggen over de mate van veiligheid van het dijktraject wordt voor alle dijkvakken/dwarsdoorsneden 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 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.

Voor de toets sporen waarvoor een *probabilistische* toets op vakniveau wordt uitgevoerd is een vergelijkbare vertaalslag nodig in de faalkanseis. Het enige verschil is dat voor de probabilistische toetsen een eis per *vak* wordt vastgesteld, terwijl voor de semi-probabilistische toetsen een eis per *doorsnede* wordt vastgesteld.

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

[1] In de eerste stap wordt de normkans van het dijktraject verdeeld over de diverse toets sporen. Deze “faalkansbegroting” is binnen WBI-2017 generiek opgesteld voor alle dijktrajecten, zie Tabel 4.1. Bijvoorbeeld voor het toets spoor “opbarsten en piping” is 24% gereserveerd voor dijktrajecten. Indien het dijktraject een veiligheidsnorm van $1/1.000^e$ per jaar heeft, betekent dit dat aan het toets spoor “opbarsten en piping” een faalkanseis van $0,24 \cdot 1/1.000 = 0,00024 \approx 1/4.000^e$ opgelegd wordt. Met andere woorden: de totale kans op een dijkdoorbraak in het traject als gevolg van het toets spoor “opbarsten en piping” moet kleiner zijn dan $1/4.000$, anders wordt het dijktraject afgekeurd op dit toets spoor. De faalkansbegroting is gebaseerd op ervaringen uit het verleden ten aanzien van het relatieve belang van mechanismen, en pragmatische keuzes. Met name het project “de veiligheid van Nederland in kaart” is een belangrijke bron van informatie geweest.

Tabel 4.1 Faalkansbegroting (bron: Jongejan, 2013)

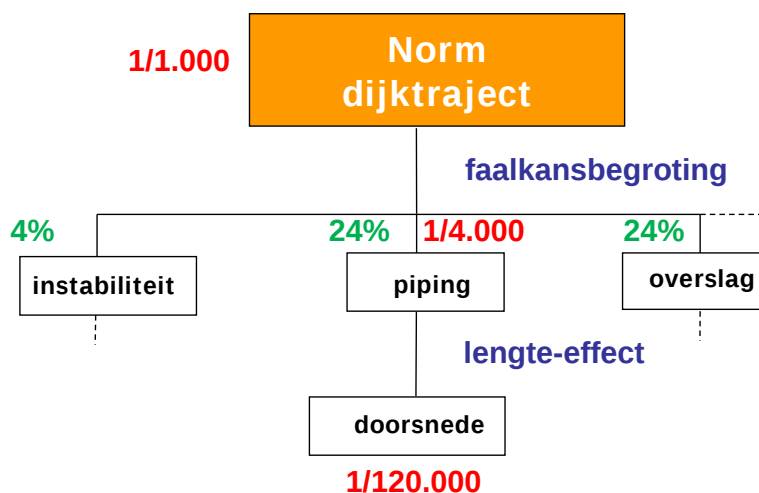
Type kering	Toets spoor	Zandige kust	dijken
Dijk	Overloop en golfoverslag (dijken/kunstwerken)	0%	24%
	Opbarsten en piping	0%	24%
	Macrostabiliteit binnenwaarts	0%	4%
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	0%	10%
Kunstwerk	niet sluiten	0%	4%
	Piping	0%	2%
	constructief falen	0%	2%
Duin	duinafslag	70%	0/10% ^(*)
Overig		30%	20/30% ^(*)
^(*) 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.			

De vaste faalkansbegroting van Tabel 4.1 is opgesteld voor de toets op vakniveau (semi-probabilistisch en probabilistisch). Voor de probabilistische toets op *trajectniveau* is deze Tabel niet van toepassing, omdat in een dergelijke toets de percentages van Tabel 4.1 in principe worden uitgerekend. Daarom wordt ook wel gesproken over een ‘vrije faalkansbegroting’ (probabilistische toets op trajectniveau) versus een ‘vaste faalkansbegroting’ (semi-probabilistische of probabilistische toets per vak).

In de komende toets ronde zullen echter niet voor alle toets sporen de volledig probabilistische toets op trajectniveau opgeleverd worden. Dit geldt bijvoorbeeld voor steenbekledingen en asfaltbekledingen. Ook in de probabilistische toets op trajectniveau zal rekening gehouden moeten worden met de vaste faalkansbegroting voor steen en asfaltbekledingen. Om dezelfde reden moet ook nog steeds rekening gehouden worden met

de 30% faalkansbegroting die is gereserveerd voor de categorie 'overig'. Dat laatste heeft tot gevolg dat de berekende faalkans voor het trajectniveau kleiner moet zijn dan 70% van de norm om het traject goed te keuren.

[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 WBI-2017 voorafgaand aan de volgende beoordeling generiek vastgesteld. De vertaalslag wordt vastgesteld op basis van ervaringen ten aanzien van het lengte-effect (zie vorige paragraaf). 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. In de vertaalslag van traject naar doorsnede wordt ook rekening gehouden met het feit dat sommige mechanismen normaal gesproken niet over het hele traject kunnen plaatsvinden. Het lengte-effect wordt dan alleen toegepast op het "effectieve deel" van het dijktraject, d.w.z. het deel van het dijktraject waar het faalmechanisme mogelijk kan optreden.



Figuur 4.6 Voorbeeld van omrekening van veiligheidseis op trajectniveau (norm) naar faalkanseis per doorsnede en mechanisme.

In de semi-probabilistische toets wordt dus een vaste faalkansbegroting toegepast, zoals beschreven in Tabel 4.1. Dit is een belangrijk verschil met de "vrije" faalkansbegroting van de volledig probabilistische toets. In de vrije faalkansbegroting worden de relatieve kansbijdragen per mechanisme uitgerekend en vervolgens gecombineerd tot één overstromingskans van het dijktraject. Deze berekende kansbijdragen verschillen per dijktraject en kunnen afwijken van de kansbijdragen van de vaste faalkansbegroting. Het toepassen van de vaste faalkansbegroting is per definitie een conservatieve benadering in vergelijking met de "vrije" faalkansbegroting van de probabilistische toets. Dat geldt dus ongeacht de keuze van de vaste faalkansbegroting. Dat betekent dat een "ongelukkige keuze" van de vaste faalkansbegroting kan resulteren in het ten onrechte afkeuren van de kering, maar nooit in het ten onrechte goedkeuren van de kering. Dit wordt toegelicht aan de hand van het volgende voorbeeld.

Stel, we hebben 3 toets sporen A, B en C die respectievelijk 10%, 30% en 60 % van de vaste faalkansbegroting toegewezen hebben gekregen.

Dat levert de volgende faalkanseisen op per mechanisme:

- Faalkans A $\leq 0,1 \cdot \text{norm}$;
- Faalkans B $\leq 0,3 \cdot \text{norm}$;
- Faalkans C $\leq 0,6 \cdot \text{norm}$.

In de vaste faalkansbegroting moet aan alle drie deze eisen worden voldaan. Stel dat de kering wordt goedgekeurd op basis van deze vaste faalkansbegroting, ofwel dat aan alle drie de eisen wordt voldaan. De totale faalkans van een kering is per definitie ten hoogste gelijk aan de som van de afzonderlijke kansen per mechanisme:

- Faalkans kering $\leq \text{Faalkans A} + \text{Faalkans B} + \text{Faalkans C}$.

Omdat voldaan wordt aan de eisen van de vaste faalkansbegroting betekent dit:

- Faalkans kering $\leq 0,1 \cdot \text{norm} + 0,3 \cdot \text{norm} + 0,6 \cdot \text{norm}$.

En dus:

- Faalkans kering $\leq \text{norm}$.

Met andere woorden: uit het feit dat de kering voldoet aan de eisen van de vaste faalkansbegroting volgt automatisch ook dat voldaan wordt aan de eis van de vrije faalkansbegroting, namelijk dat de totale faalkans van de kering kleiner is dan de norm. Dit is hier bewezen voor een enkel getallenvoorbeeld, maar dezelfde redeneerlijn kan gebruikt worden voor elk willekeurig getallenvoorbeeld. Daarmee is aangetoond dat een “ongelukkige keuze” van de vaste faalkansbegroting kan resulteren in het ten onrechte afkeuren van de kering, maar nooit in het ten onrechte goedkeuren van de kering.

4.5.3 Combineren van faalkansen van verschillende tijdsperioden

Naast het combineren van faalkansen voor verschillende mechanismen en dijkvakken, worden ook faalkansen van verschillende tijdstappen gecombineerd. In de software van WBI-2017 wordt de faalkans van een waterkering in eerste instantie berekend voor een getijdeperiode. Dit is de “basistijdstap” in de probabilistische berekeningen. Vervolgens wordt op basis van deze uitkomst berekend wat de jaarlijkse faalkans van deze waterkering is. De faalkans van een waterkering in een getijperiode is kleiner dan de faalkans in een jaar. De faalkans van de getijperiode wordt daarom als het ware “opgeschaald” naar een jaar.

In het proces van opschalen in de tijd wordt aangenomen dat falen van een primaire waterkering alleen plaats kan vinden in het winterhalfjaar (oktober t/m maart). Het winterhalfjaar bestaat uit ongeveer 350 getijperioden, die elk ongeveer 12 uur en 25 minuten duren. De faalkans in elk van deze getijperioden wordt verondersteld even groot te zijn, er is dus geen grotere kans op falen in bijvoorbeeld januari dan in oktober. Dat betekent echter niet dat de jaarlijkse faalkans 350 keer zo groot is als de faalkans in een willekeurige getijperiode. Dat komt doordat faalprocessen van opeenvolgende getijperioden niet onafhankelijk zijn. Dat is weer het gevolg van het feit dat realisaties van de bepalende factoren voor faalkansberekeningen (lees: de stochastische variabelen) in de regel ook niet onafhankelijk zijn tussen twee opeenvolgende getijperioden. De mate van fluctuatie in de tijd van de belangrijkste processen voor het falen van een waterkering zijn dus bepalend voor het verschil tussen de faalkans in een getijperiode en de jaarlijkse faalkans.

Met betrekking tot de fluctuatie in de tijd worden drie groepen stochastische variabelen onderscheiden:

- 1 “Snelle” belastingstochasten, zoals de windsnelheid en de zeewaterstand. Deze fluctueren relatief snel in de tijd. De (maximale) waarde van deze stochastische perioden in twee opeenvolgende getijperioden worden verondersteld onafhankelijk te zijn. De karakteristieke tijdsduur van deze groep stochasten is dus één getijperiode.
- 2 “Trage” belastingstochasten, zoals rivierafvoer en meerpeil. Deze fluctueren relatief traag in de tijd en de (maximale) waarde van deze stochastische variabelen in twee opeenvolgende getijperioden zijn dus niet onafhankelijk van elkaar. De karakteristieke tijdsperiode van deze stochasten is in de rekenprogrammatuur gesteld op één maand (rivierafvoer, IJsselmeerpeil) of twee maanden (Markermeerpeil).
- 3 Sterkte-variabelen, modelonzekerheden. Deze worden verondersteld niet te variëren binnen de periode van één jaar. De sterkte van een waterkering is onzeker omdat er onvoldoende kennis beschikbaar is om de sterkte exact te kunnen bepalen. Daarom wordt de sterkte van de waterkering gemodelleerd met gebruik van stochasten. Echter, de realisaties van deze stochasten verschillen niet per getijperiode.

De mate waarin de faalkans van een getijperiode verschilt van de faalkans in een jaar is afhankelijk van welk type variabele(n) dominant zijn in de faalkansberekening. Indien de snelle belastingstochasten dominant zijn is het verschil relatief groot, indien de trage belastingstochasten of sterktevariabelen dominant zijn is dat verschil juist klein. Om hier enig inzicht in te krijgen beschouwen we twee hypothetische situaties.

De eerste (hypothetische) situatie is die waarin de sterkte van de keringen exact bekend is. Met andere woorden: er is geen onzekerheid in de sterkte van de kering. Dit is bijvoorbeeld bij benadering het geval voor het faalmechanisme “overloop”. De sterkte (hoogte) kan vrij nauwkeurig bepaald kan worden en heeft dus relatief weinig invloed op de faalkans. Indien dit mechanisme doorgerekend wordt voor dijken langs de kust, wordt de belasting gedomineerd door snelle stochasten als de windsnelheid en de zeewaterstand. Ten behoeve van de eenvoud nemen we in dit hypothetische voorbeeld aan dat er geen sprake is van “kennisonzekerheden” in de belasting, er is alleen sprake van “natuurlijke variabiliteit”. De hydraulische belastingen in opeenvolgende getijperioden kunnen dan als onafhankelijke gebeurtenissen beschouwd worden. Elke volgende getijperiode is dus weer een geheel nieuwe gebeurtenis met een “nieuwe” kans van falen. De faalkans in een (winterhalf-)jaar is dan *bij benadering* een optelsom van de faalkansen van de afzonderlijke getijperioden³. De faalkans in een (winterhalf-)jaar is dan *bij benadering* 350 keer zo groot als de faalkans in een getijperiode.

De tweede (hypothetische) situatie is die waarin de belasting niet bepalend is en de faalkans volledig wordt bepaald door de onzekerheid in de sterkte. Omdat de sterkte niet fluctueert in de tijd is de jaarlijkse faalkans gelijk aan de faalkans in een getijperiode. Deze situatie is weliswaar niet realistisch, de belasting is immers altijd van invloed, maar voor een aantal toets sporen zoals piping en macro-instabiliteit geldt wel dat de onzekerheid in de sterkte van groot belang is in de faalkansberekening.

³ In werkelijkheid mogen faalkansen van keringen in verschillende getijperioden niet zo maar opgeteld worden, vandaar de toevoeging “bij benadering”.

Samenvattend kan gesteld worden dat het verschil in faalkans tussen een getijperiode en een (winterhalf-)jaar gelijk is aan maximaal een factor 350 (= aantal getijden in een winterhalfjaar) en minimaal een factor 1.

4.6 Keuze van de (belangrijkste) stochasten

Voor alle sterkte- en belastingvariabelen geldt dat ze een zekere mate van onzekerheid bevatten. In een probabilistische analyse dient daarom in principe van elke variabele de modelonzekerheid meegenomen te worden. Echter, in de regel kan volstaan worden met de onzekerheid van de belangrijkste stochastische variabelen. Dit zijn de variabelen die van groot belang zijn in het fysische proces van falen van de waterkering en die bovendien een grote mate van onzekerheid kennen. Voor deze variabelen geldt dat een “tegenvaller” in de realisatie van de corresponderende stochastische variabele een relatief sterke toename van de faalkans tot gevolg heeft.

Waar de grens getrokken moet worden tussen belangrijke en minder belangrijke variabelen is een kwestie van ervaring. Om op zeker te spelen heeft het de voorkeur om van zo veel mogelijk variabelen de onzekerheid mee te nemen in het probabilistische rekenmodel. Rekenexercities met het probabilistische rekenmodel kunnen vervolgens aanvullende inzichten geven in de mate van relevantie van de diverse stochasten. Op basis daarvan kan een rangorde worden aangebracht en kan er toe besloten worden dat een aantal variabelen die initieel als stochast zijn aangewezen evengoed ook als deterministische parameter behandeld kunnen worden. Het reduceren van het aantal stochasten kan doelmatig zijn met het oog op eenvoud, uitlegbaarheid en rekentijd. Er moet echter wel voldoende zekerheid zijn dat deze vereenvoudiging geen significante invloed heeft op de uitkomsten van probabilistische berekeningen. In dat kader is het van belang een breed bereik van testcases door te rekenen, voordat het besluit genomen wordt tot een dergelijke vereenvoudiging.

4.7 Probabilistische rekentechnieken

De diverse faalmechanismen van waterkeringen worden beschreven met numerieke simulatiemodellen. De complexiteit van deze modellen maakt dat het niet mogelijk is om op exacte en analytische wijze de faalkans te berekenen op basis van de beschikbare kansverdelingen van de relevante onzekerheden. Daarom worden probabilistische rekentechnieken toegepast waarmee de faalkans geschat kan worden. Met dergelijke technieken worden verschillende combinaties doorgerekend van mogelijke uitkomsten van de stochastische variabelen. Voor elke combinatie worden de belasting en sterkte van de waterkeringen bepaald op basis van simulaties van hydrodynamische modellen en modellen die de sterkte van de waterkeringen beschrijven. Op basis van uitkomsten van de modellen en de kansverdelingen van de stochasten wordt de faalkans berekend. In paragraaf 4.3.1 is een voorbeeld gegeven van een probabilistische rekenmethode (numerieke integratie) waarmee de faalkans bepaald kan worden. Er zijn verschillende probabilistische bekend in de literatuur. In de software van WBI-2017 zijn de volgende probabilistische rekentechnieken geïmplementeerd:

- Numerieke integratie;
- First Order Reliability Method (FORM);
- Crude Monte Carlo sampling;
- Monte Carlo met importance sampling;
- Directional sampling.

De methoden verschillen onderling in de wijze waarop gebeurtenissen worden geselecteerd om te simuleren en in de wijze waarop vervolgens de faalkans wordt geschat.

Elke methode heeft voor- en nadelen ten aanzien van de relevante criteria rekensnelheid, robuustheid, nauwkeurigheid en uitlegbaarheid.

In voorgaande toets ronden is gebruik gemaakt van de rekenmethode *numerieke integratie* om maatgevende hoogwaterstanden (MHWs) en hydraulische belastingniveaus (HBNs) te bepalen (zie bijvoorbeeld Geerse, 2005). Numerieke integratie is een robuuste rekenmethode die, mits het rekenrooster “fijn” genoeg gekozen wordt, ook relatief nauwkeurig is. Een groot nadeel van de methode is de rekentijd die sterk toeneemt met het aantal stochastische variabelen. Bij het bepalen van MHWs en HBNs is het aantal stochastische variabelen beperkt en om die reden is numerieke integratie een aantrekkelijk alternatief. Echter, bij het bepalen van de overstromingskans worden ook stochastische variabelen aan de sterktekant relevant en is het gebruik van numerieke integratie geen reële optie meer.

Bij een relatief groot aantal variabelen is de rekenmethode *FORM* (Rackwitz en Fiessler, 1978) een aantrekkelijk alternatief. FORM staat bekend als een “snelle” probabilistische rekenmethode. Om die reden is FORM de voorkeursmethode in de probabilistische software van WBI-2017. Het nadeel van FORM is dat het gebruik maakt van een iteratieve procedure die niet onder alle omstandigheden convergeert. Bovendien maakt FORM gebruik van linearisaties waarmee fouten geïntroduceerd kunnen worden indien niet-lineaire elementen in de faalkansberekening relevant zijn. Voor een aantal (deel-)watersystemen in Nederland wordt in de WBI-software daarom gebruik gemaakt van andere rekentechnieken dan FORM. In de praktijk heeft dat een significante toename van de rekentijd tot gevolg.

De rekenmethode “*Monte Carlo simulatie*” is een veel gebruikte methode in de internationale hydrologische literatuur. De methode is robuuster dan *FORM* en heeft als groot voordeel ten opzichte van numerieke integratie dat een toename van het aantal stochasten niet leidt tot een toename van de rekentijd. Voor “standaard” Monte Carlo simulatie (“crude” Monte Carlo simulation) geldt dat de benodigde rekentijd omgekeerd evenredig is met de te berekenen faalkans. Dat betekent dat voor relatief kleine faalkansen, zoals gebruikelijk bij waterkeringen, de rekentijd relatief lang is. Een reductie in het aantal berekeningen leidt automatisch tot een afname in de nauwkeurigheid. De standaarddeviatie van de onzekerheid die een direct gevolg is van de gebruikte rekentechniek “Monte Carlo” is daarbij evenredig met de wortel van het aantal uitgevoerde simulaties. Dat betekent dat een toename van een factor 4 in het aantal uitgevoerde simulaties resulteert in een afname van de standaarddeviatie van de onzekerheid met een factor 2 (omdat 2 gelijk is aan de wortel uit 4).

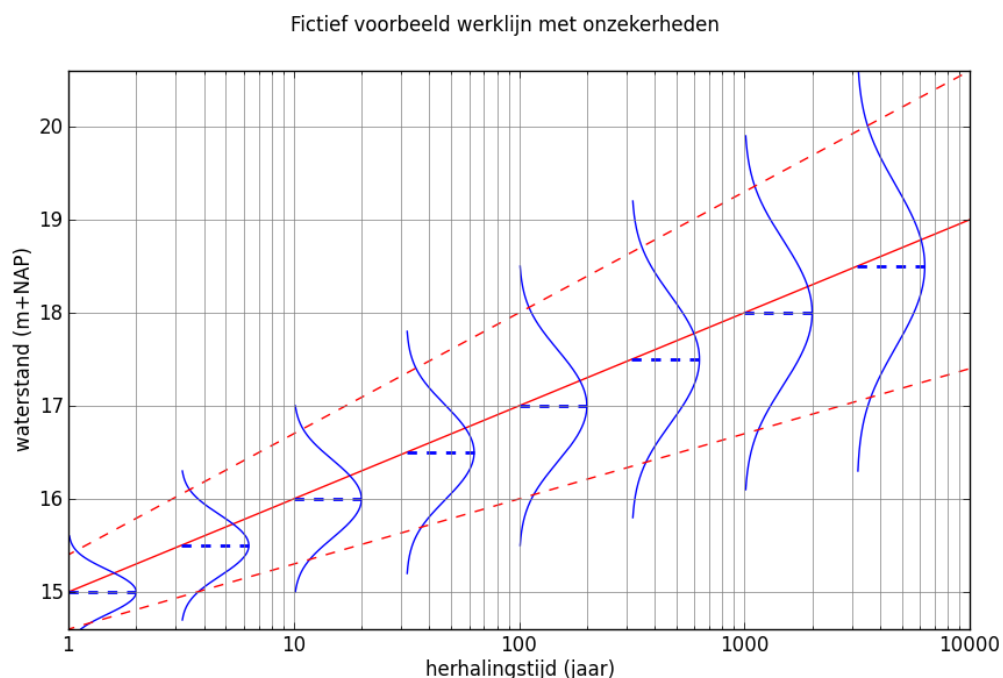
Er zijn ook geavanceerde varianten van Monte Carlo simulatie waarmee de rekentijd voor veel toepassingen gereduceerd kan worden. Voorbeelden van dergelijke methoden zijn *Latin hypercube sampling* (Georgiou 2009; HSU et al 2011; Olssen et al 2003; Owen 1994; Ye 1998), *directional sampling* (Bjerager 1988; Ditlevsen et al. 1990; Grooteman, 2011; Melchers 2002), *stratified sampling* (May et al. 2010; Keskinürk and Er, 2007; Christofides, 2003) en *importance sampling* (Engelund and Rackwitz, 1993; Koopman et al., 2009; Sezer, 2009; Yuan and Druzdzel, 2006). De effectiviteit van Latin Hypercube sampling is relatief beperkt in vergelijking met andere methoden in situaties waarin “extreme” gebeurtenissen relevant zijn. Deze methode maakt mede daarom geen onderdeel uit van de WBI-software. De andere drie geavanceerde methoden, *directional sampling*, *stratified sampling* en *importance sampling*, zijn wel opgenomen in de WBI-software. Met name *directional sampling* wordt veelvuldig toegepast als terugvaloptie voor locaties waar de uitkomsten van FORM onbetrouwbaar worden geacht.

Directional sampling is een robuuste rekenmethode in vergelijking met FORM. In de regel vergt het meer rekentijd dan FORM, maar minder rekentijd dan numerieke integratie en crude Monte Carlo.

4.8 Uitintegreren van onzekerheden in de waterstand

In de probabilistische modellen van WBI-2017 worden de statistische en kennisonzekerheden beschreven met aparte stochastische variabelen. In het semi-probabilistische toetsvoorschrift worden deze variabelen niet (expliciet) opgenomen. De impact van de onzekerheden op de waterstand dient wel te worden meegenomen in het semi-probabilistische toetsvoorschrift om consistentie met het probabilistische model te waarborgen. Dat wordt gedaan door op basis van probabilistische berekeningen de stochasten “waterstand” en “onzekerheden 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 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.

De natuurlijke variabiliteit wordt weergegeven met een werklijn, of frequentielijn, die de relatie aangeeft tussen de waarde van de basisstochast enerzijds en de beste schatting van de overschrijdingsfrequentie, of herhalingsstijd, anderzijds. De kennisonzekerheid wordt gekwantificeerd door middel van een kansverdeling van mogelijke uitkomsten rondom de werklijn. Deze twee bronnen van onzekerheden kunnen, indien gewenst, samengevoegd worden tot een nieuwe werklijn waarin het effect van kennisonzekerheden is verdisconteerd. In deze paragraaf wordt toegelicht aan de hand van een rekenvoorbeeld hoe dat te werk gaat. Figuur 4.7 toont een fictief, doch realistisch, voorbeeld van een werklijn (rode doorgetrokken lijn) met 95%-betrouwbaarheidsintervallen (rode stippellijn). De blauwe grafieken zijn kansdichtheidsfuncties van de onzekerheid.



Figuur 4.7 Voorbeeld van een werklijn (rode doorgetrokken lijn) met 95%-betrouwbaarheidsintervallen (rode stippellijn). De blauwe grafieken zijn kansdichtheidsfuncties van de onzekerheid.

Hoe groot is nu, op basis van deze informatie, de kans dat een waterstand van NAP+17m, wordt overschreden? Die kans kan stapsgewijs bepaald worden voor elke herhalingstijd die op de horizontale as staat weergegeven. Stel dat we een herhalingstijd beschouwen van 100 jaar. Volgens de werklijn (rode lijn) correspondeert deze herhalingstijd met een waterstand van NAP+17m. De onzekerheid rond deze waarde (blauwe grafiek) is in dit geval symmetrisch. Dat betekent dat er een kans van 50% is dat de 100-jaar waterstand hoger is dan NAP+17m. Een herhalingstijd van 1000 jaar correspondeert volgens de werklijn (rode lijn) met een waterstand van NAP+18m. Dit betreft dus de “beste schatting” van de 1000 jaar herhalingstijd, vanwege kennisonzekerheden kan de 1000-jaar waterstand ook hoger of lager zijn. Uit de blauwe kansdichtheidsfunctie blijkt echter dat de kans klein is dat de 1000-jaar waterstand lager is dan NAP+17m. Omgekeerd kan voor de 10-jaar waterstand met nagenoeg 100% zekerheid gesteld worden dat deze lager is dan NAP+17m. Op deze wijze kan voor alle herhalingstijden bepaald worden wat de kans is dat, rekening houdend met onzekerheden, de corresponderende waterstand hoger is dan NAP+17m.

De overschrijdingskans van een gegeven waterstand wordt bepaald op basis van een probabilistische berekening. In deze berekening worden twee stochastische variabelen gebruikt, één voor de natuurlijke variabiliteit en een voor kennisonzekerheden. De probabilistische berekening kan uitgevoerd worden met elk van de rekentechnieken van sectie 4.7. Vanwege het kleine aantal variabelen (2) wordt in de regel gebruik gemaakt van de rekentechniek “numerieke integratie”. Bijlage D geeft de wiskundige details van de rekenmethode.

Het resultaat van de probabilistische rekenmethode is een overschrijdingskans van één waterstand, bijvoorbeeld NAP+17m. Dezelfde procedure kan ook toegepast worden om de overschrijdingskans te bepalen van NAP+16m, NAP+18m of willekeurig elke andere waterstand. Door deze berekening uit te voeren voor een breed bereik aan waterstanden wordt een (nieuwe) relatie afgeleid tussen de waterstand en de corresponderende overschrijdingskans. De overschrijdingskans kan omgerekend worden naar een herhalingstijd en op deze wijze wordt dus een nieuwe werklijn verkregen waarbij rekening is gehouden met kennisonzekerheden.

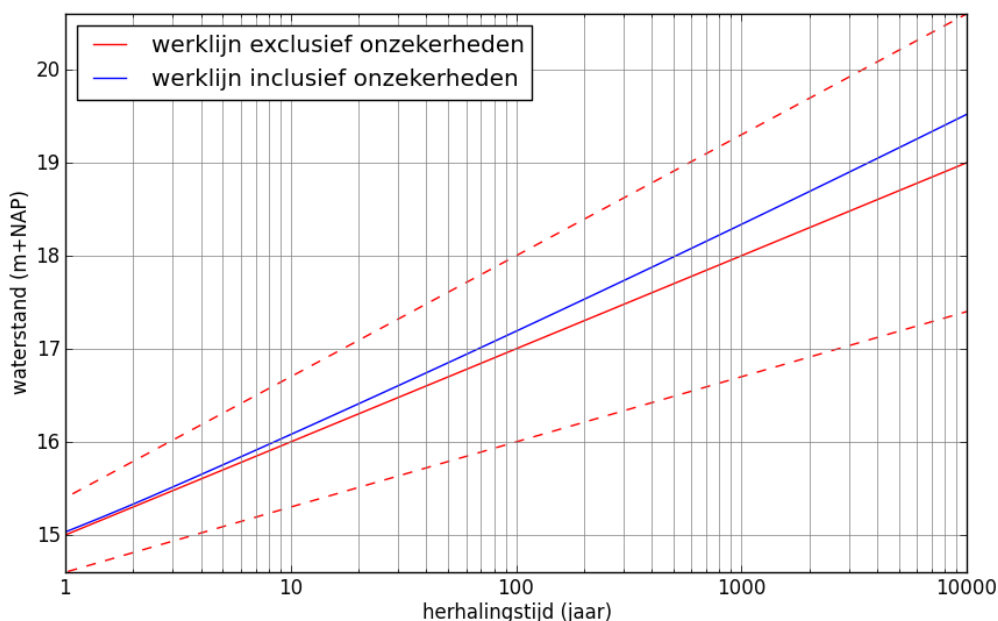
Figuur 4.8 toont het resultaat van een dergelijke exercitie voor het rekenvoorbeeld van Figuur 4.7. De blauwe lijn is de nieuwe berekende werklijn en deze ligt hoger dan de oorspronkelijke werklijn (rode lijn). Dit is in de regel het geval: de werklijn inclusief onzekerheden geeft bij dezelfde herhalingstijden hogere waterstanden dan de werklijn exclusief onzekerheden, zelfs als de onzekerheden “symmetrisch” zijn en er dus even grote kans is op “meevallers” als op “tegenvallers”.

De mate waarin de “uitgeïntegreerde” werklijn hoger ligt dan de oorspronkelijke werklijn wordt bepaald door de verhouding tussen:

- de grootte van de onzekerheid; en
- de steilheid van de werklijn (‘de decimeringshoogte’).

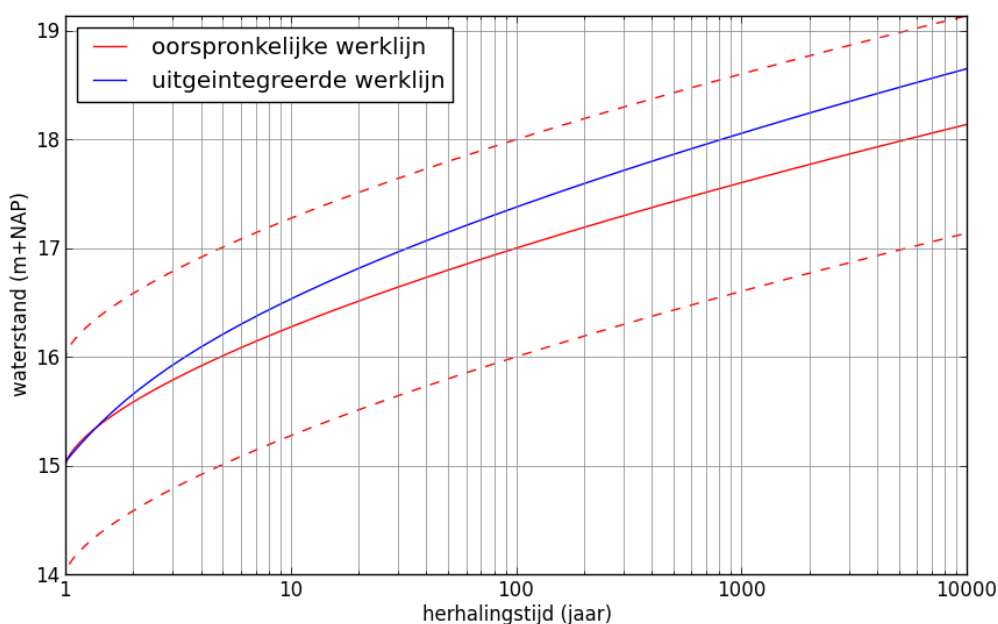
Hoe groter de mate van onzekerheid, des te groter het verschil tussen de oorspronkelijke en de uitgeïntegreerde werklijn. Dit is goed te zien in Figuur 4.8, waar de mate van onzekerheid toeneemt met de grootte van de herhalingstijd. Het gevolg is dat het verschil tussen de oorspronkelijke en de uitgeïntegreerde werklijn eveneens toeneemt met de grootte van de herhalingstijd. Ten aanzien van de steilheid van de werklijn geldt: hoe steiler de werklijn, des te kleiner het verschil tussen de oorspronkelijke en de uitgeïntegreerde werklijn.

Dit is goed te zien in het voorbeeld van Figuur 4.9, waar een fictieve werklijn is weergegeven waarvan de steilheid afneemt met toenemende herhalingstijd, terwijl de mate van onzekerheid voor alle herhalingstijden gelijk is. Vanwege de afname van de steilheid neemt het verschil tussen de oorspronkelijke en de uitgeïntegreerde werklijn juist toe met de grootte van de herhalingstijd.



Figuur 4.8 De werklijn en 95%-betrouwbaarheidsintervallen van Figuur 4.7 (rode lijnen) en de gecombineerde werklijn waarbij rekening is gehouden met kennisonzekerheden (blauwe lijn).

Fictief voorbeeld werklijn met onzekerheden



Figuur 4.9 Fictief voorbeeld van een werklijn en 95%-betrouwbaarheidsintervallen (rode lijnen) en de gecombineerde werklijn waarbij rekening is gehouden met kennisonzekerheden (blauwe lijn).

4.9 Voorbeelden van (semi-)probabilistische toetsmodellen

In de voorgaande paragrafen van dit hoofdstuk is toegelicht hoe met gebruik van probabilistische en semi-probabilistische rekenmodellen de vertaalslag gemaakt kan worden van onzekerheden in belasting- en sterktevariabelen naar een faalkans (overstromingskans) van een waterkering. In de huidige paragraaf geven we een overzicht van (semi-)probabilistische toetsmodellen die zijn opgesteld in het kader van WBI-2017. We beperken ons daarbij hoofdzakelijk tot de toets sporen waarvoor in het kader van WBI-2017 de overstap is gemaakt naar de overstromingskansbenadering:

- overloop en golfoverslag (dijken)
- opbarsten en piping (dijken)
- macrostabiliteit binnenwaarts (dijken)
- beschadiging bekleding en erosie dijklichaam (dijken)
 - o steen
 - o asfalt
 - o gras
- overloop en golfoverslag (kunstwerken)
- niet sluiten kunstwerken
- piping (kunstwerken)
- constructief falen kunstwerken
- duinafslag

Ten slotte gaat deze paragraaf ook kort in op:

- Faalmechanismen voorland
 - o afslag
 - o zettingsvloeiing
- Niet waterkerende objecten

We maken de lezer er op attent dat bijlage B een overzicht bevat van de belangrijkste variabelen van de toets sporen en een schatting van de onzekerheden. Deze lijst is een belangrijk onderdeel van de probabilistische en semi-probabilistische modellen die in het restant van deze paragraaf worden besproken.

4.9.1 Overloop en golfoverslag (dijken/kunstwerken)

Voor het toets spoor 'overloop en golfoverslag' is een volledig probabilistisch toets model opgenomen in de WBI-software. Er is geen semi-probabilistisch model beschikbaar gesteld. In het probabilistische model wordt op basis van het belastingmodel (dat per watersysteem verschilt, zie paragraaf 3.4.3) en het dijkprofiel de relatie berekend tussen het golfoverslagdebiet en de corresponderende overschrijdingskans. Uit deze relatie wordt vervolgens bepaald hoe groot de kans is dat het *kritieke* overslagdebiet wordt overschreden. Het kritieke overslagdebiet is de drempelwaarde waarboven de bekleding van het binnentalud verwacht wordt niet meer bestand te zijn tegen de belasting van het overslaande water. In WBI-2017 wordt het kritieke overslagdebiet beschreven door een stochastische variabele, waar het in voorgaande toets ronden nog een deterministische parameter was. Deze stochast wordt kwantitatief beschreven met een lognormale verdeling. De parameters van deze kansverdeling zijn gerelateerd aan de kwaliteit van het gras en aan de golfhoogte bij de teen van de dijk, zie bijlage B.7 voor een overzicht van combinaties van graskwaliteit en golfhoogte.

Voor het evalueren van de faalkans wordt gebruik gemaakt van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde probabilistische software.

Als hieruit blijkt dat de kans op falen van de waterkering door dit toets spoor kleiner is dan de gestelde faalkanseis, dan is het oordeel 'voldoet' voor dit toets spoor. Is de berekende faalkans groter dan de gestelde faalkanseis, dan moet verder worden gegaan met de toets op maat. De faalkanseis wordt gedefinieerd per dijkvak. De faalkanseis van een dijkvak wordt afgeleid uit de faalkanseis van het traject (NB: de faalkanseis van het traject is het product van de trajectnorm en de in Tabel 4.1 opgenomen faalkansbegroting van 24%). De faalkanseis van een dijkvak is een factor N kleiner dan de faalkanseis van het traject. De waarde van N verschilt per traject en is minimaal gelijk aan 1 en maximaal gelijk aan 3. Bijlage C geeft een overzicht van N -waarden van alle trajecten in Nederland. Deze N -waarden zijn gekozen op basis van expert judgment.

4.9.2 Opbarsten en piping (dijken)

Voor het toets spoor 'opbarsten en piping' is een semi-probabilistisch toets model opgenomen in de WBI-software. Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar gesteld, naar verwachting wordt dat in 2019 toegevoegd aan de WBI-software. Het semi-probabilistische toets model is wel gebaseerd op probabilistische berekeningen voor het pipingmodel (Deltares, 2015g).

Het toets spoor piping is opgebouwd uit drie sub-mechanismen: uplift (opbarsten), heave en erosie (piping). Voor elk van deze drie sub-mechanismen zijn semi-probabilistische rekenmodellen ontwikkeld, alle gebaseerd op berekeningen met volledig probabilistische modellen. In deze modellen is rekening gehouden met variaties in de ondergrond. Dat betekent dat verschillende ondergrondscenario's worden beschouwd, zoals beschreven in paragraaf 3.7.1.

Voor elk van de drie sub-mechanismen zijn betrouwbaarheidsfuncties, of Z-functies (zie paragraaf 4.2.2), opgesteld op basis van beschrijvingen van processen die tot 'falen' leiden. In deze Z-functies zijn de belangrijkste variabelen en hun onzekerheden opgenomen. Het sub-mechanisme '*uplift*' is het doorbreken van de deklaag als gevolg van overmatige opwaartse druk vanuit de onderliggende aquifer. In de Z-functie wordt de opwaartse druk vergeleken met de neerwaartse druk van de deklaag, als gevolg van de zwaartekracht. Uit probabilistische analyses is gebleken dat de (onzekerheden in de) effectieve dikte van de deklaag en het verzadigde volumetrische gewicht van de deklaag de belangrijkste stochastische variabelen zijn voor dit sub-mechanisme.

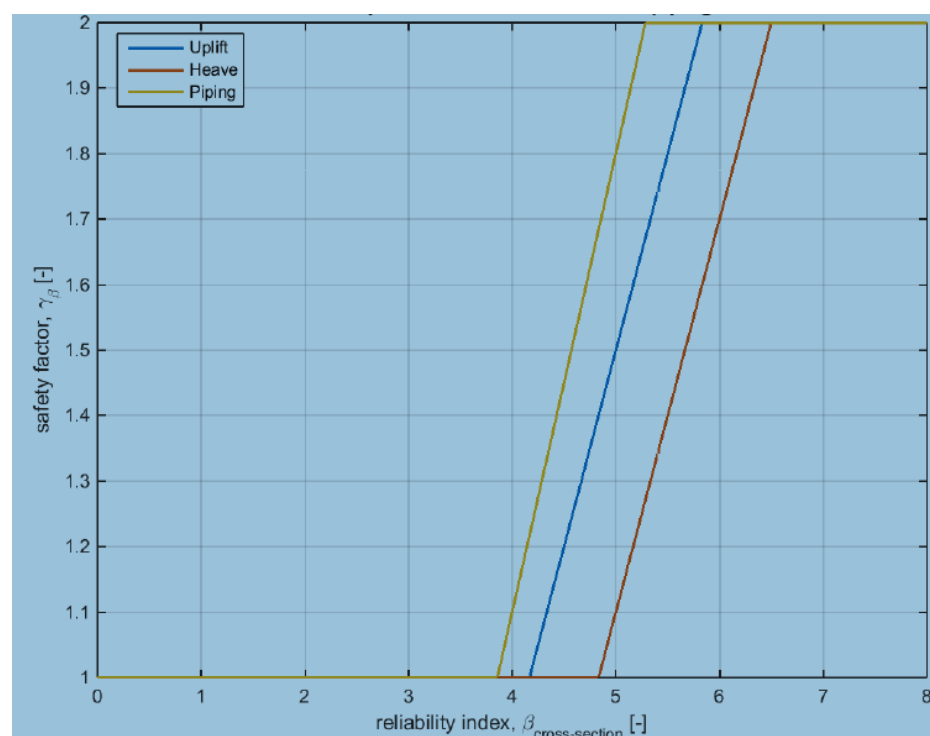
Uplift geeft aanleiding tot grondwaterstroming bij het uittredepunt een van de deklaag. Indien de stroming voldoende groot is zal '*heave*' plaatsvinden, ofwel transport van zanddeeltjes. Dit zal optreden als bij het uittredepunt een kritieke drempel van de verticale uitstroomgradiënt wordt overschreden. De uitstroomgradiënt wordt met name bepaald door het verschil tussen de stijghoogte van het watervoerende pakket en het niveau van de freatische lijn, in relatie tot de dikte van de deklaag. Uit probabilistische analyses is gebleken dat de effectieve dikte van de deklaag en de kritieke heave-gradiënt de belangrijkste stochastische variabelen zijn voor dit sub-mechanisme.

Het sub-mechanisme '*piping*' is de terugwaartse interne erosie van de ondergrond onder de dijk. In het model wordt aangenomen dat deze in horizontale richting plaats vindt. Piping vindt plaats zodra een kritiek stijghoogteverschil wordt overschreden. Het stijghoogteverschil wordt bepaald door het verschil tussen de waterstanden bij het intredepunt en uittredepunt van de kwelweg, in relatie tot de kwelweglengte. Uit probabilistische analyses is gebleken dat de doorlatendheid van de bodem en de buitenwaterstand belangrijke stochastische variabelen zijn voor dit sub-mechanisme.

Voor de sub-mechanismen 'uplift' en 'piping' zijn in de Z-functies ook modelfactoren opgenomen om rekening te houden met het feit dat modellen geen exacte weergave van de werkelijkheid zijn.

Op basis van de procedure van paragraaf 4.4.2 zijn semi-probabilistische rekenmodellen afgeleid voor de drie sub-mechanismen. Bij het afleiden van deze rekenmodellen zijn de drie deelmechanismen afzonderlijk beschouwd, dus als drie faalmechanismen die afzonderlijk aan de faalkanseis van de doorsnede moeten voldoen. Het belangrijkste resultaat van deze exercitie is een relatie tussen de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau en de veiligheidsfactor, die moet worden toegepast in de semi-probabilistische beoordeling. In het onderstaande figuur zijn de relaties tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidseis voor de drie sub-mechanismen weergegeven. Een strengere betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau leidt tot een toename van de veiligheidsfactor. Een hogere veiligheidsfactor correspondeert met een toename in de benodigde deklaagdikte (uplift en heave) en benodigde kwelweglengte (piping). Figuur 4.10 geeft de afgeleide relaties weer voor de drie sub-mechanismen

(@deze relatie wordt naar verwachting nog aangepast op basis van nieuwe probabilistische berekeningen).



Figuur 4.10 Relaties tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau voor de drie sub-mechanismen 'uplift', 'heave' en 'piping'.

Om de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau af te leiden moet rekening gehouden worden met het lengte-effect. Dit lengte-effect wordt gekarakteriseerd door twee parameters:

- α : de fractie van het dijktraject waar het faalmechanisme zou kunnen optreden. Hoe groter de waarde van deze dimensieloze parameter α , des te groter het lengte-effect.

b: een maat voor de ruimtelijke correlatie. Deze waarde, met eenheid [m], kan geïnterpreteerd worden als de lengte van een onafhankelijk deel van het dijktraject. Hoe kleiner de waarde van *b*, des te groter het lengte-effect.

Voor het toets spoor piping is *a* in principe gelijk aan 1 en *b* is gelijk aan 350 m. De gebruiker wordt de mogelijk geboden om de waarde van *a* te reduceren in de WBI-software, als daar voor het te beoordelen dijktraject gerede aanleiding toe is.

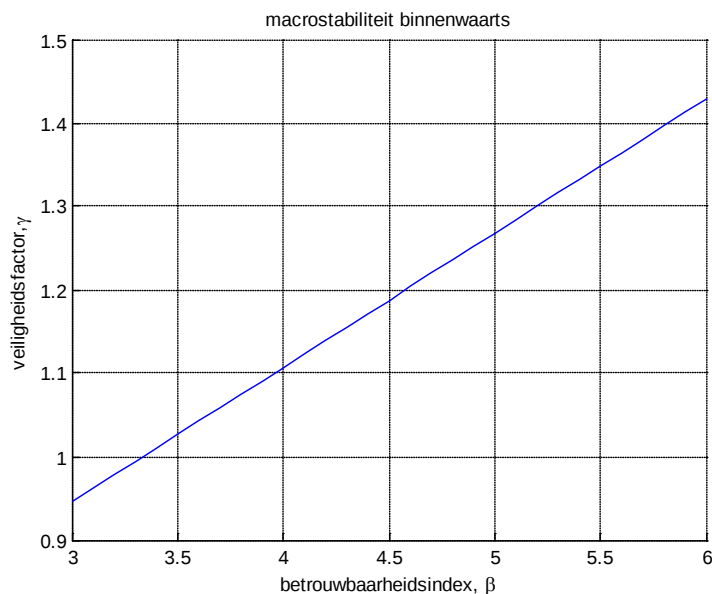
4.9.3 Macrostabiliteit binnenwaarts (dijken)

Voor het toets spoor 'macrostabiliteit binnenwaarts' is een semi-probabilistisch toets model opgenomen in de WBI-software. Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar gesteld, naar verwachting wordt dat in 2019 toegevoegd aan de WBI-software. Het semi-probabilistische rekenmodel is gebaseerd op berekeningen met een volledig probabilistisch model (Deltares, 2015f).

De stabiliteitsberekeningen in het (semi)probabilistische model zijn gebaseerd op een ongedraineerd materiaalmodel voor slecht doorlatende materialen (veen en klei) en een gedraineerd materiaalmodel voor zand. Uplift-Van is de gebruikte zoekmethode voor het kritieke schuifvlak. Effecten door overslag zijn niet beschouwd in deze kalibratie. De afgeleide veiligheidsfactoren zijn dan ook alleen geldig voor situaties waarbij overslag geen rol van betekenis speelt.

Voor de bepaling van partiële veiligheidsfactoren van het semi-probabilistische model zijn probabilistische berekeningen uitgevoerd voor een verzameling testcases. Voor iedere case zijn de stabiliteitsfactor, betrouwbaarheidsindex en invloedcoëfficiënten berekend. Op basis van deze resultaten is het veiligheidsformat vastgesteld: de stabiliteitsfactor (bepaald met Uplift-Van) wordt berekend met karakteristieke (5%) waarden voor de sterkteparameters; verder is voorzien in een modelfactor (1.06 voor Uplift Van), de waterstand met een overschrijdingskans die getalswaardig gelijk is aan de overstromingskans en een betrouwbaarheidsindex-afhankelijke veiligheidsfactor (schadefactor). De afgeleide betrouwbaarheidsindex-afhankelijke veiligheidsfactor staat weergegeven in Figuur 4.11.

(@de relatie van Figuur 4.11 wordt naar verwachting in de loop van 2016 aangepast op basis van nieuwe probabilistische berekeningen).



Figuur 4.11 Relatie tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau voor het toets spoor 'macrostabiliteit binnenwaarts'.

Een verschil met het veiligheidsformat van voorgaande toets ronden is de afwezigheid van materiaalfactoren.

De onzekerheden ten aanzien van materiaalparameters wordt namelijk al voldoende verdisconteerd door het gebruik van karakteristieke waarden. De relatie uit Figuur 4.11 is alleen geldig voor berekeningen met Uplift Van.

Om de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau af te leiden moet rekening gehouden worden met het lengte-effect, analoog aan de wijze waarop dit voor het toets spoor 'opbarsten en piping' wordt gedaan met parameters a en b . Voor het toets spoor 'macrostabiliteit binnenwaarts' is a in principe gelijk aan $1/30$ en b is gelijk aan 50 m. De gebruiker wordt de mogelijk geboden om de waarde van a aan te passen in de WBI-software, als daar voor het te beoordelen dijktraject gereede aanleiding toe is.

Het afleiden van het semi-probabilistische toets model voor macrostabiliteit heeft noodgedwongen onder grote tijdsdruk plaatsgevonden. Belangrijke aandachtspunten die daaruit voortvloeien zijn:

- *Beperkt aantal cases.* Doordat slechts een beperkt aantal cases voor de kalibratie zijn gebruikt, kan niet worden bepaald of de afgeleide veiligheidsfactoren representatief zijn voor heel Nederland en in welke mate deze voldoende veilig zijn. Daarnaast is het niet mogelijk om de veiligheidsfactoren te optimaliseren (bijv. per regio) Het wordt aanbevolen om de kalibratie uit te breiden met meer cases.
- *Een beperkte afhankelijkheid van de buitenwaterstand* leidt tot opmerkelijke resultaten en mogelijk een conservatieve set van veiligheidsfactoren. De beperkte invloed van de waterstand kan het gevolg zijn van het ongedraineerde materiaalmodel of omdat de waterspanning niet probabilistisch is meegenomen in de kalibratie. Het wordt aanbevolen om eerst verder te onderzoeken wat het effect is wanneer waterspanningen probabilistisch worden meegenomen. Dit leidt mogelijk ook tot lagere benodigde veiligheidsfactoren. Als de afhankelijkheid van de waterstand op de stabiliteitsfactor en

betrouwbaarheid dan nog steeds beperkt is, kan bewezen sterkte mogelijk worden meegenomen in stabiliteitsberekeningen.

4.9.4 Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam (dijken)

4.9.4.1 Steenbekleding

Voor het mechanisme 'falen van steenbekleding door golfaanval' is een semi-probabilistisch toets model opgenomen in de WBI-software. Voor steenbekledingen is dit het enige mechanisme waarvoor een semi-probabilistisch toets model is opgesteld. Voor overige mechanismen, die naar verwachting minder relevant zijn, zijn de toets regels uit de vorige toets ronde overgenomen (conform WTI-2011 uitgangspunt).

Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar gesteld in het WBI-2017. Het model 'SteenToets', waarmee het faalproces wordt beschreven, is dusdanig complex dat het opstellen van een robuuste probabilistische schil rondom dit model een majeure inspanning is. Het semi-probabilistische rekenmodel is gebaseerd op probabilistische berekeningen met een 'proxymodel', dat wil zeggen een vereenvoudigde versie van SteenToets (Deltares, 2015e). Ook is gerekend met een vereenvoudigd belastingmodel omdat het WTI-2011-belastingmodel niet geschikt is voor probabilistische berekeningen waarin het verloop van de belasting tijdens stormgebeurtenissen is meegenomen.

Voor dijkbekledingen is 10% (factor 0,1) van de totale faalkansbegroting gereserveerd, zie Tabel 4.1. Slechts een deel daarvan is beschikbaar voor steenbekleding, er is beredeneerd dat dit de helft is van de genoemde 10% (factor 0,5).

Verder moet rekening gehouden worden met andere faalmechanismen voor steenbekledingen, hetgeen leidt tot verdere reductiefactoren van 0,9 en 0,7. Dat betekent een verdere verscherping van de faalkanseis. De trajectnorm moet dus vermenigvuldigd worden met $0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \approx 0,032$ om te komen tot de faalkanseis op trajectniveau voor dit faalmechanisme. Vervolgens moet het lengte-effect in rekening gebracht worden om een faalkanseis voor een doorsnede af te leiden. Voor het lengte-effect is een waarde van 4 aangenomen. Met andere woorden: de faalkanseis voor steenbekleding van een doorsnede is een factor 4 kleiner dan de faalkanseis voor steenbekleding van een geheel dijktraject. De factor 4 is het product van een factor 2 voor het lengte-effect binnen homogene dijkvakken en een factor 2 om rekening te houden met variaties in bekledingstypen en dijkoriëntaties. Voor steenbekleding is de faalkanseis versoepeld door de correlatie tussen de faalsporen overslag en bekleding te verdisconteren. Daarmee wordt vermeden dat een bekleding wordt geacht te blijven functioneren onder condities waarin de dijk door overslag zal falen.

De probabilistische analyses zijn uitgevoerd voor de twee meest voorkomende typen steenbekleding (zuilen en blokken op hun kant) evenals een studie naar het effect van reststerkte op de kans op een dijkdoorbraak (Deltares, 2015e). Voor beide bekledingstypen bevatte het probabilistische model een relatief groot aantal stochastische variabelen (zie bijlage B). Uit de probabilistische berekeningen bleek dat voor vrijwel alle stochasten de invloedsfactor nagenoeg gelijk was aan nul. Uitzonderingen waren de belastingvariabelen (wind, golven, waterstand), de dichtheid van de zetsteen en de modelonzekerheid. In het semi-probabilistische model is voor alle sterkte-variabelen, met uitzondering van de dichtheid van de zetsteen, de gemiddelde waarde gekozen. Een dergelijke keuze is doorgaans gerechtvaardigd voor variabelen met lage invloedsfactor. Een bijkomend voordeel is dat een bepaalde kwantiel-waarde sterk schaalafhankelijk is, terwijl dat niet geldt voor de gemiddelde waarde. De keuze voor de gemiddelde waarde neemt de noodzaak weg om variabiliteit in metingen te "schalen". Ter illustratie: stel dat de kwantielwaarde van de korreldiameter moet

worden vastgesteld. Deze kan worden afgeleid uit de gemiddelde waarde en spreiding van gemeten korreldiameters. De mate van spreiding van de korreldiameter wordt sterk beïnvloed door de grootte van de monsters. Hoe groter de omvang van het monster, hoe meer de waarden zich “uitmiddelen” en dus hoe kleiner de variatie. Als de schaal van de meting en de schaal van de toepassing (het “faalproces”) onderling verschillen, kunnen daarmee inconsistenties worden geïntroduceerd. Bij toepassing van de gemiddelde waarde speelt dit probleem niet.

Voor beide typen bekleding is een betrouwbaarheidsindex-afhankelijke veiligheidsfactor afgeleid. In vergelijking met geotechnische toets sporen vertoont de afgeleide relaties tussen betrouwbaarheidsindex en veiligheidsfactor voor steenbekledingen een relatief systematische variatie over de doorgerekende cases. Om die reden zijn meerdere relaties afgeleid voor verschillende watersystemen, normen en bekledingstypen. Vervolgens is een analyse uitgevoerd naar de mogelijke reducerende invloed van reststerkte op faalkansen. Op basis van die analyse zijn de afgeleide relaties tussen betrouwbaarheidseis en veiligheidsfactor sterk vereenvoudigd, zelfs zó vereenvoudigd dat de veiligheidsfactor onafhankelijk is van de betrouwbaarheidseis.

Als de kans op een overstroming gegeven het falen van de toplaag klein is (grote reststerkte), dan mag de doelbetrouwbaarheid voor de toplaag worden verkleind. In dat geval volstaat een kleine partiële veiligheidsfactor voor de toplaagdikte. Een dergelijke geïntegreerde beoordeling van de toplaag en de aanwezige reststerkte is minder conservatief dan de stapsgewijze beoordelingsmethode uit het VTV2006 en het WTI-2011 waarin de stabiliteit van de toplaag en de reststerkte onafhankelijk van elkaar worden beoordeeld.

Voor de dikte van de bekleding dient een partiële veiligheidsfactor van 0,9, 1,0 of 1,1 te worden aangehouden, afhankelijk van de reststerkteclassificatie (respectievelijk ‘groot’, ‘gemiddeld’ en ‘klein’). Deze partiële veiligheidsfactoren zijn breed toepasbaar: ze zijn onafhankelijk van de overstromingskansnorm, het watersysteem of het steenbekledingstype.

4.9.4.2 Asfaltbekleding

Voor het mechanisme ‘falen van asfaltbekleding door golfaanval’ is een semi-probabilistisch toets model opgenomen in de WBI-software. Voor asfaltbekledingen is dit het enige mechanisme waarvoor een semi-probabilistisch toets model is opgesteld. Voor overige mechanismen, die naar verwachting minder relevant zijn, zijn de toets regels uit de vorige toets ronde overgenomen (conform WTI-2011 uitgangspunt).

Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar voor het WBI-2017. Het semi-probabilistische rekenmodel is gebaseerd op probabilistische berekeningen met het model ‘GolfKlap’ waarmee het faalproces wordt beschreven en een vereenvoudigd belastingmodel (Deltares, 2014g). Deze probabilistische modellen zijn geïmplementeerd in een Matlab-omgeving. Ze maken geen onderdeel uit van de formele WBI-programmatuur.

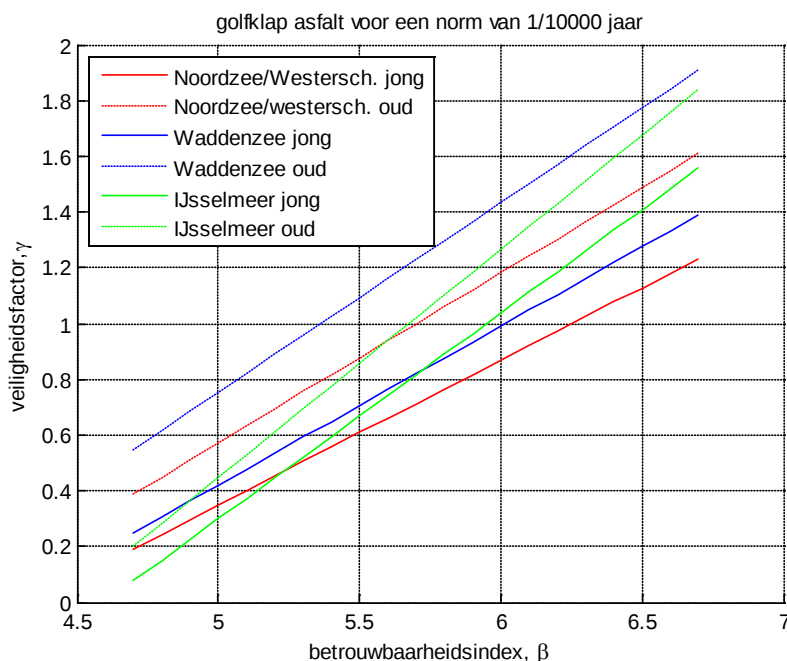
Voor dijkbekledingen is 10% (factor 0,1) van de totale faalkansbegroting gereserveerd, zie Tabel 4.1. Slechts een deel daarvan is beschikbaar voor asfaltbekleding, er is beredeneerd dat dit 1/3 deel is van de genoemde 10% (factor 0,33). Verder moet rekening gehouden worden met andere faalmechanismen voor asfaltbekledingen, hetgeen leidt tot verdere reductiefactoren van 0,7 en 0,5. Dat betekent een verdere verscherping van de faalkanseis. De trajectnorm moet dus vermenigvuldigd worden met $0,1 \cdot 0,33 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \approx 0,012$ om te komen tot de faalkanseis op trajectniveau voor dit faalmechanisme. Vervolgens moet het lengte-effect in rekening gebracht worden om een faalkanseis voor een doorsnede af te leiden. Hiervoor is bepaald dat gerekend kan worden met onafhankelijke dijkstrekkings van 1000 m.

Voor een dijktraject met $N \cdot 1000$ m asfaltbekledingen (in lengte-richting) betekent dit dat de faalkanseis voor een doorsnede voor dit mechanisme een factor N kleiner is dan de faalkanseis voor het dijktraject.

Op basis van de probabilistische berekeningen is vastgesteld dat de stochastische variabelen 'waterstand (belasting)', 'breuksterkte van het asfalt' en de 'elasticiteitsmodulus' de grootste invloed coëfficiënten hebben; De overige variabelen hebben wel invloed maar de onzekerheden ten aanzien van deze variabelen zijn relatief onbelangrijk.. De waarden van de invloed coëfficiënten van de drie relevante stochasten variëren significant over de verzameling doorgerkende testcases. Bijvoorbeeld voor het IJsselmeer heeft de waterstand een hogere invloed coëfficiënten dan voor de Waddenzee en Noordzeekust. Voor relatief oude asfaltbekledingen in combinatie met relatief strenge normen is de invloed coëfficiënt van de breuksterkte significant groter dan voor andere testcases. Dergelijke onderlinge verschillen vergroten de uitdaging om een efficiënte generieke semi-probabilistische toets op te stellen. In het opstellen van de rekenregel is daarom onderscheid gemaakt tussen verschillende watersystemen, kwaliteiten van het asfalt (oud/jong) en trajectnormen. Deze verschillen komen tot uiting in de afgeleide relatie tussen betrouwbaarheidseis en veiligheidsfactor.

Voor de relevante sterkte-variabelen zijn, conform de standaardprocedure, 5% en 95%-waarden gekozen. De rekenwaarde van de waterstand is gelijk gekozen aan de waterstand met overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de overstromingsfrequentie. Verder is rekening gehouden met een modelfactor, zie paragraaf 3.7.2. De rekenwaarde van de modelfactor is gelijk gekozen aan het gemiddelde (1,77).

De afgeleide betrouwbaarheidsindex-afhankelijke veiligheidsfactor staat weergegeven in Figuur 4.12. De getoonde relaties zijn geldig voor een trajectnorm van 1/10.000 per jaar, voor andere normen gelden andere relaties. Figuur 4.12 dient dus vooral ter illustratie om verschillen te tonen tussen de verschillende regio's en kwaliteit van het asfalt. Uit deze figuur blijkt dat veiligheidsfactoren (fors) kleiner kunnen zijn dan 1, hetgeen ongebruikelijk is bij het beoordelen van waterkeringen. Dit heeft te maken met het feit dat asfalt wordt beoordeeld op basis van 'Miner-sommen'. Uitkomsten van Miner-sommen kunnen sterk verschillen voor verschillende cases, soms wel enkele ordes van grootte. Om een doelmatige grenstoestandsfunctie te formuleren is daarom het logaritme van de uitkomst van de Miner-som genomen. Voor de probabilistische berekeningen heeft dat goed gewerkt, er zijn zinnige uitkomsten verkregen, hetgeen zonder gebruik van de logaritmische waarden niet zou zijn gelukt. Echter, het heeft wel mede tot gevolg dat veiligheidsfactoren soms veel kleiner zijn dan 1. Rekentechnisch is dat geen probleem, maar mogelijk is dit wel 'onwennig' voor de gebruiker van de WBI-software.



Figuur 4.12 Relatie tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidseis op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme 'falen van asfaltbekleding door golfaanval' bij een norm van 1/10.000 per jaar.

In tegenstelling tot steenbekledingen is geen rekening gehouden met reststerkte. Dat betekent dat de semi-probabilistische toets op dat onderdeel enigszins conservatief is.

4.9.4.3 Grasbekleding

De eenvoudige en gedetailleerde toetsen voor grasbekledingen in het WBI-2017 bestaan uit vier sporen:

- 1 erosie buitentalud (GEBU);
- 2 erosie kruin en binnentalud (GEKB);
- 3 afschuiven grasbekleding buitentalud (GABU); en
- 4 afschuiven grasbekleding binnentalud (GABI).

In deze paragraaf bespreken we alleen het onderdeel GEBU. Het onderdeel GEKB is feitelijk al aan bod gekomen in paragraaf 4.9.1 ('overloop en golfoverslag') en voor de onderdelen GABU en GABI wordt zoveel mogelijk aangesloten op bestaande toets regels van WTI-2011. Met betrekking tot de faalkansbegroting (zie Tabel 4.1) geldt dat:

- GEBU onderdeel uitmaakt van de 10% die gereserveerd is voor 'erosie van bekledingen';
- GEKB onderdeel uitmaakt van de 24% die gereserveerd is voor 'overloop en golfoverslag'; en
- GABU en GABI onderdeel uitmaken van de 30% 'overig'.

Voor het onderdeel GEBU (erosie buitentalud) zijn twee mechanismen relevant: falen door golfoploop en golfklap. Voor beide mechanismen zijn vernieuwde modellen beschikbaar en worden in het kader van WBI-2017 semi-probabilistische toetsmodellen opgeleverd. Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar gesteld in het kader van WBI-2017. Voor het mechanisme 'golfoploop' is het semi-probabilistische rekenmodel gebaseerd op volledig probabilistische berekeningen (Deltares, 2015h). Dit probabilistische model is

geïmplementeerd in een Matlab-omgeving en maakt geen onderdeel uit van de formele WBI-programmatuur. Voor het mechanisme 'golfklap' is een beperkt aantal probabilistische berekeningen uitgevoerd, het semi-probabilistische model is grotendeels opgesteld op basis van beredeneren.

Voor dijkbekledingen is 10% (factor 0,1) van de totale faalkansbegroting gereserveerd, zie Tabel 4.1. Slechts een deel daarvan is beschikbaar voor grasbekleding, er is beredeneerd dat dit de helft is van de genoemde 10% (factor 0,5). Merk op dat voor steenbekleding ook de helft was gereserveerd en voor asfalt 1/3 deel. Dat betekent dat voor de drie bekledingstypen in totaal 133% van het beschikbare faalkansbudget voor bekledingen is ondergebracht bij de drie bekledingstypen. De reden is dat deze bekledingen niet altijd overal tegelijk voorkomen en het pessimistisch zou zijn om aan te nemen dat sprake is van volledige onafhankelijkheid.

Verder moet rekening gehouden worden met andere faalmechanismen voor grasbekledingen, hetgeen leidt tot een verdere reductiefactor van 0,9. Dat betekent een verdere verscherping van de faalkanseis. De trajectnorm moet dus vermenigvuldigd worden met $0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \approx 0,045$ om te komen tot de faalkanseis op trajectniveau voor dit faalmechanisme. Vervolgens moet het lengte-effect in rekening gebracht worden om een faalkanseis voor een doorsnede af te leiden. Voor het lengte-effect is een waarde van 3 aangenomen. Met andere woorden: de faalkanseis voor grasbekleding van een doorsnede is een factor 3 kleiner dan de faalkanseis voor grasbekleding van een geheel dijktraject. De factor 3 is vooral het gevolg van mogelijke variaties in dijkoriëntaties. Voor grasbekleding is de faalkanseis versoepeld door de correlatie tussen de faalsporen overslag en bekleding te verdisconteren. Daarmee wordt vermeden dat simultaan falen door overslag en grasbekleding dubbel mee telt in de faalkansbegroting.

Uit de probabilistische analyses voor golfoploop kwam naar voren dat er twee stochasten zijn met relatief hoge invloed coëfficiënten: de waterstand en de 'kritieke oploopsnelheid van het golffront'. Voor de laatste variabele is, conform de standaardprocedure, een 5%-waarden als rekenwaarde gekozen in het semi-probabilistische toetsvoorschrift. De rekenwaarde van de waterstand is gelijk gekozen aan de waterstand met overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de overstromingsfrequentie. Voor de overige sterkte-parameters is de gemiddelde waarde gekozen. Uit testberekeningen is gebleken dat met toepassing van een overall veiligheidsfactor van 1.3 een voldoende veilig maar niet bovenmatig conservatieve toets kan worden uitgevoerd. Deze veiligheidsfactor is dus niet afhankelijk van de betrouwbaarheidseis.

Voor het mechanisme 'golfklap' is een andere benadering gekozen, met name omdat de sterkte voor gras in gebieden met relatief hoge golven (kust en meren) niet bestand is tegen golfklappen. In de toets voor grasbekleding op het buitentalud wordt onderscheid gemaakt tussen de klapzone en de oploopzone, met het toetspeil als grens tussen deze twee zones. Golfklapbelastingen worden alleen beoordeeld in de zone beneden het toetspeil. Dit kan leiden levert het probleem op dat grasbekledingen die net boven toetspeil beginnen niet worden beoordeeld op klap, maar dat deze wel een faalkans kunnen hebben die significant groter is dan de toegestane faalkans op doorsnedeniveau.

De vaste aanpak in het kader van WBI-2017 is om in de semi-probabilistische toets de waterstand conform de norm te kiezen en de strengere faalkanseis tot uiting te laten komen in strengere veiligheidsfactoren. Voor het mechanisme 'golfklap' voor grasbekleding werkt deze aanpak echter niet. Bij een golfhoogte van meer dan 1 à 1,5 m is het gras niet bestand tegen golfklappen. Het rekenen met wel/ geen strengere veiligheidsfactoren heeft dus geen

impact op het oordeel. De kans op het optreden van het mechanisme wordt in die gevallen volledig gedomineerd door de kans op een hoge waterstand. Een strengere faalkanseis kan in de semi-probabilistische toets dus alleen worden doorgevoerd via de waterstand. Dat betekent dat we voor dit mechanisme een rekenwaarde van de waterstand kiezen die afwijkt van de gebruikelijke keuze voor overige toets sporen. In plaats van een rekenwaarde die correspondeert met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de overstromingsfrequentie, kiezen we een rekenwaarde die correspondeert met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan 2 maal de faalkanseis op doorsnedeniveau. De genoemde factor 2 is een reductie vanwege de sterke correlatie van golfklap met het mechanisme golfoverslag. De afwijkende keuze van de waterstand betekent een verhoging van de bovenzijde van de klapzone met ongeveer 1,5 keer de decimeringshoogte van de waterstand.

Indien geen gras aanwezig is in de klapzone is de bekleding op golfklap goedgekeurd. Indien wel gras aanwezig is, moet de toets conform de gedetailleerde toets op vakniveau uitgevoerd worden. In de praktijk zal deze laatste situatie voor de meeste dijken langs de kust en meren resulteren in afkeuren, voor de meeste dijken langs de rivieren zal de grasbekleding doorgaans goedgekeurd worden (vanwege de lage golfbelasting).

@ Op het moment van schrijven worden nog aanvullende werkzaamheden voorzien voor dit toets spoor. Bovenstaande tekst moet op basis daarvan mogelijk aangepast worden.

4.9.5 Overloop en golfoverslag (kunstwerken)

Falen als gevolg van tekort aan hoogte vindt plaats indien er door golfoverslag en/of overloop zoveel water over het hoogwaterkerend gesloten kunstwerk of de aansluitconstructie gaat, dat het faalcriterium (optreden significante gevolgen) wordt overschreden. Dit kan enerzijds optreden bij een standzeker kunstwerk, waar door overschrijding van het bergend vermogen aan de binnenzijde van het kunstwerk significante gevolgen ontstaan. Anderzijds kan het kunstwerk zelf bezwijken als gevolg van bezwijken van de bodembescherming aan de binnenzijde van het kunstwerk, waarna erosie van de ondergrond optreedt waardoor het kunstwerk als geheel bezwijkt met een bres in de waterkering als gevolg. In het kader van WBI-2017 wordt een volledig probabilistisch model opgeleverd voor dit toets spoor. Er is geen semi-probabilistisch model beschikbaar. De volgende sub-mechanismen zijn opgenomen in het toets model:

- 1 Bezwijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het overslaande of overlopende water, dat uiteindelijk leidt tot het ontstaan van erosiekuilen.
- 2 Bezwijken van het kunstwerk (onderuit gaan) als gevolg van ontgrondingskuilen ontstaan na bezwijken bodembescherming.
- 3 Falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland doordat er te veel water overslaat/overloopt gedurende een hoogwatergolf.

Deltares (2014h) beschrijft verdere achtergronden van deze sub-mechanismen. Van al deze sub-mechanismen is een betrouwbaarheidsfunctie opgesteld en deze betrouwbaarheidsfuncties worden gecombineerd volgens het principe van een 'foutenboom'. Bijlage B.8 bevat een overzicht van de sterktevariabelen en bijbehorende kansverdelingen.

Voor het evalueren van de faalkans wordt gebruik gemaakt van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde probabilistische software. Als hieruit blijkt dat de kans op falen van de waterkering door dit mechanisme kleiner is dan de gestelde faalkanseis, dan is het oordeel 'voldoet' voor dit mechanisme. Is de berekende faalkans groter dan de gestelde faalkanseis, dan is het een optie om de beoordeling te vervolgen met een toets op maat. De

faalkanseis wordt gedefinieerd per dijkvak. De faalkanseis van een dijkvak wordt afgeleid uit de faalkanseis van het traject (NB: de faalkanseis van het traject is het product van de trajectnorm en de in Tabel 4.1 opgenomen faalkansbegroting van 24%). De faalkanseis van een dijkvak is een factor N kleiner dan de faalkanseis van het traject. De waarde van N verschilt per traject en is minimaal gelijk aan 1 en maximaal gelijk aan 3. Bijlage C bevat een Tabel N -waarden van alle trajecten in Nederland. Deze Tabel is gebaseerd op ervaringen binnen het project VNK2.

4.9.6 Niet sluiten kunstwerken

Falen ten gevolge van niet-sluiten treedt op indien zoveel water door het niet gesloten kunstwerk gaat, dat dit tot dusdanige gevolgen aan de binnenzijde van de waterkering leidt dat het faalcriterium (optreden significante gevolgen⁴) wordt overschreden. Voorafgaand aan de instroming van water faalde de sluiting van het kunstwerk. Voor de gedetailleerde toets van *betrouwbaarheid sluiting* wordt in het WBI-2017 een probabilistische toets met een faalkanseis op objectniveau uitgevoerd met behulp van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde software. Er wordt geen semi-probabilistische toets opgeleverd.

De volgende sub-mechanismen zijn opgenomen in het toets model:

- Bezijken van het kunstwerk als geheel (onderuit gaan) gegeven het feit dat bezijken van de bodembescherming heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op het eroderen van de onbeschermd bodem, het ontstaan van ontgrondingskuilen en hiermee op de reststerkte van het kunstwerk na bezijken bodembescherming.
- Falen van het kunstwerk als gevolg van onvoldoende waterbergend vermogen in het achterland, doordat er te veel water instroomt gedurende een hoogwatergolf.
- Bezijken van de bodembescherming achter het kunstwerk als gevolg van het instromende water.
- Falen van het sluitproces van de (hoog)waterkerende keermiddelen, waardoor het kunstwerk niet gesloten is.
- Falen van het herstel van een falende sluiting.

Deltares (2014i) beschrijft verdere achtergronden van deze sub-mechanismen. Van al deze sub-mechanismen is een betrouwbaarheidsfunctie opgesteld en deze betrouwbaarheidsfuncties worden gecombineerd volgens het principe van een 'foutenboom'. Bijlage B.8 bevat een overzicht van de sterktevariabelen en bijbehorende kansverdelingen.

Voor het evalueren van de faalkans wordt gebruik gemaakt van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde probabilistische software.

Als hieruit blijkt dat de kans op falen van de waterkering door dit mechanisme kleiner is dan de gestelde faalkanseis, dan is het oordeel 'voldoet' voor dit mechanisme. Is de berekende faalkans groter dan de gestelde faalkanseis, dan moet verder worden gegaan met de toets op maat. De faalkanseis wordt gedefinieerd per dijkvak. De faalkanseis van een dijkvak wordt afgeleid uit de faalkanseis van het traject (NB: de faalkanseis van het traject is het product van de trajectnorm en de in Tabel 4.1 opgenomen faalkansbegroting van 4%). De faalkanseis van een dijkvak is een factor N kleiner dan de faalkanseis van het traject. Voor dit mechanisme is N gelijk aan de helft van het aantal kunstwerken waarvan de faalkans niet verwaarloosbaar klein is volgens de eenvoudige toets, met een minimum van 1. Deze keuze is gebaseerd op ervaringen binnen het project VNK2. Vanaf 2019 zal de probabilistische toets

⁴ Wat significante gevolgen zijn verschilt per kunstwerk. Bij een coupure in stedelijk gebied treden sneller significante gevolgen op als bij eenzelfde coupure in landelijk gebied. In de achtergrondrapporten wordt hier nader op ingegaan.

op trajectniveau worden uitgevoerd, zodat deze benadering dan niet langer van belang zal zijn.

4.9.7 Piping (kunstwerken)

Falen door onder- of achterloopsheid is gedefinieerd als het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom, waardoor holle ruimten ontstaan onder (onderloopsheid) of naast (achterloopsheid) een kunstwerk.

De volgende sub-mechanismen zijn opgenomen in het toets model:

- Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder het kunstwerk.
- Het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die uitsluitend horizontaal gericht is, waardoor holle ruimten ontstaan onder of naast het kunstwerk. Dit leidt tot een proces van terugschrijdende (interne) erosie, waarbij uiteindelijk een doorgaande pipe ontstaat onder of naast het kunstwerk.
- Bezijken van het kunstwerk (volledig onderuit gaan) gegeven het feit dat onder- of achterloopsheid heeft plaatsgevonden. Heeft betrekking op reststerkte van het kunstwerk (inclusief aanliggende grondlichaam) na het ontstaan van een doorgaande pipe onder of naast het kunstwerk.

Deltares (2015j) beschrijft verdere achtergronden van deze sub-mechanismen. Van al deze sub-mechanismen is een betrouwbaarheidsfunctie opgesteld en deze betrouwbaarheidsfuncties worden gecombineerd volgens het principe van een 'foutenboom'. Voor het bepalen van de kans op het uitspoelen van gronddeeltjes ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom die (deels) verticaal gericht is, zijn de modellen van Lane en heave beschikbaar. Voor een horizontale kwelweg zijn ook de modellen van Bligh en Sellmeijer beschikbaar.

4.9.8 Constructief falen kunstwerken

Voor de gedetailleerde toets van *sterkte en stabiliteit van puntconstructie* wordt in het WBI-2017 een probabilistische toets met een faalkanseis op objectniveau uitgevoerd behulp van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde software. Er wordt geen semi-probabilistische toets opgeleverd. Voor *langsconstructies* wordt geen gedetailleerde toets opgeleverd, dit laatste spoor wordt daarom hier verder niet meer besproken.

De volgende sub-mechanismen zijn opgenomen in het toets model:

1. Falen door bezwijken constructieonderdelen. Het gaat hier om het bezwijken van de keermiddelen van het kunstwerk, waardoor een grote hoeveelheid water naar binnen kan stromen.
2. Falen door instabiliteit constructie en grondlichaam. Als gevolg van instabiliteit bezwijkt het kunstwerk (puntconstructie) of het aanpalende grondlichaam, waardoor een grote hoeveelheid water naar binnen kan stromen. Hierbij kan worden gedacht aan bijvoorbeeld het bezwijken van de fundatie van het kunstwerk. Indien dit plaatsvindt, dan is herstel niet meer mogelijk en dus zijn er ook geen andere sub-mechanismen meer mogelijk.
3. Falen door aanvaring van het 2^{de} keermiddel. Dit is een deelspoor dat geheel gericht is op schutsluizen. Omdat het alleen op één type puntconstructie van toepassing is, wordt het niet als apart toets spoor gezien, maar als één van de deelsporen bij sterkte en stabiliteit. Bezwijken vindt plaats indien de deuren in het ene sluishoofd open staan en een schip de deuren in het andere sluishoofd eruit vaart.

Deltares (2015j) beschrijft verdere achtergronden van deze sub-mechanismen. Voor het evalueren van de faalkans wordt gebruik gemaakt van de door het WBI-2017 programma beschikbaar gestelde probabilistische software. Als hieruit blijkt dat de kans op falen van de waterkering door dit mechanisme kleiner is dan de gestelde faalkanseis, dan is het oordeel 'voldoet' voor dit mechanisme. Is de berekende faalkans groter dan de gestelde faalkanseis, dan moet verder worden gegaan met de toets op maat. De faalkanseis wordt gedefinieerd per dijkvak. De faalkanseis van een dijkvak wordt afgeleid uit de faalkanseis van het traject (NB: de faalkanseis van het traject is het product van de trajectnorm en de in Tabel 4.1 opgenomen faalkansbegroting van 2%). De faalkanseis van een dijkvak is een factor N kleiner dan de faalkanseis van het traject. Voor dit mechanisme is N gelijk aan 3 op basis van ervaringen uit VNK2. Vanaf 2019 zal de probabilistische toets op trajectniveau worden uitgevoerd, zodat deze benadering dan niet langer van belang zal zijn.

4.9.9 Duinafslag

Voor dit spoor wordt in 2016 een semi-probabilistische toets opgeleverd. Er is geen volledig probabilistisch model beschikbaar gesteld, naar verwachting wordt dat in 2019 toegevoegd aan de WBI-software. Het semi-probabilistische toets model is wel gebaseerd op probabilistische berekeningen met het duinafslagmodel Duros+. De afleiding van het semi-probabilistische toets model staat beschreven in Deltares (2015i). In dat rapport worden de volgende twee aspecten behandeld die relevant zijn voor het opstellen van de toets:

- 1 De vertaalslag van de toetsnorm 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 veranderingen opgetreden in vergelijking met voorgaande toets ronden. In voorgaande toets ronden was de faalkanseis van een duinraai een factor 10 kleiner dan de wettelijke toetsnorm (overschrijdingskans). In WBI-2017 zit er tussen de overstromingskans en de faalkanseis voor een duinraai meestal nog maar ongeveer een factor 3. De wijziging is een gevolg van de nieuwe filosofie van beoordelen, "van overschrijdingskans naar overstromingskans". De genoemde factor 3 is een combinatie van de faalkansreservering voor het toets spoor duinafslag (70%, zie Tabel 4.1) 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 toetsnorm naar faalkanseis per duinraai. Dit zijn echter uitzonderingen.

Voor het tweede onderdeel, de formulering van de semi-probabilistische rekenregel, is besloten om hetzelfde rekenrecept aan te houden als gehanteerd in vorige toets rondes. De reden is dat [a] bij aanvang van WBI-2017 besloten is om geen nieuw afslagmodel toe te passen in vergelijking met voorgaande toets rondes en [b] het semi-probabilistische toets model uit voorgaande toets rondes al gebaseerd is op probabilistische analyses. Voor een willekeurige duinraai kan de semi-probabilistische 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.⁵
- 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.
- 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 Deltares (2015i) 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.

Ondanks het feit dat in WBI-2017 hetzelfde rekenrecept gebruikt wordt als in het kader van vorige toets rondes, kunnen in de komende toets ronde mogelijk significante verschillen in toetsresultaten gevonden worden in vergelijking met het verleden als gevolg van:

- Wijzigingen in de getalswaarde van de wettelijke 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.

4.9.10 Faalmechanismen voorland

4.9.10.1 Afschuiving voorland

In de gedetailleerde toets wordt een geotechnische analyse van de stabiliteit uitgevoerd. Falen is gedefinieerd als een dusdanige afschuiving van het voorland dat deze van invloed is op de directe mechanismen, zoals overloop-overslag, Piping en macro-stabiliteit. Dit betekent dat de invloedzone niet doorsneden mag worden.

⁵ Dit rekenpeil is in het verleden vaak als volgt geformuleerd: toets peil plus 2/3 decimeringshoogte

Indien niet wordt voldaan dient kan de beoordeling vervolgd worden met een toets op maat. In het kader van WTI2017 zijn er geen expliciete analyses naar onzekerheden uitgevoerd voor dit toets spoor.

4.9.10.2 Zettingsvloeiing

In de gedetailleerde toets voor zettingsvloeiing wordt beoordeeld of de kans dat het verstoringsprofiel door een zettingsvloeiing de grens van de invloedszone overschrijdt voldoende klein is. In de toets worden naast geometrische kenmerken van de vooroever en waterkering ook grondeigenschappen meegenomen. Daarbij worden ondergrondscenario's met een kans van voorkomen meegenomen (zie paragraaf 3.7.1).

De beoordeling vindt plaats op dijkvakniveau. Om tot een oordeel te komen moeten per vak de volgende berekeningsstappen worden uitgevoerd:

Stap A	Bepaal per ondergrondscenario de kans op optreden
Stap B	Combineer de kansen van alle ondergrondscenario's en bereken aldus de kans op optreden van zettingsvloeiing.
Stap C	Bepaal de overschrijdingskans van de toelaatbare inscharringslengte, gegeven het optreden van zettingsvloeiing.
Stap D	Schaal het resultaat van stap c op naar het niveau van een dijkvak
Stap E	Controleer of de berekende kans van stap D kleiner is dan de toelaatbare kans op vakniveau.

Bij stap D en E moet rekening gehouden worden met het lengte-effect.

4.9.11 Niet waterkerende projecten

Het beoordelingsspoor Niet Waterkerende Objecten (NWO) betreft geen zuiver faalmechanisme, al kan bezwijken van een Niet waterkerend Object wel leiden tot schade aan de waterkering. Het ontwortelen van een boom kan het dijkprofiel dusdanig aantasten dat de veiligheid van de kering daardoor wordt gereduceerd. De toets op Niet Waterkerende Objecten (NWO) betreft het bepalen van de invloed van niet waterkerende objecten op de faalmechanismen van de waterkering. Afhankelijk van het type NWO wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende beoordelingssporen op basis van de verschillende typen objecten. Voor het meenemen van niet waterkerende projecten in de gedetailleerde toetsen voor de verschillende toets sporen zijn geen instrumenten beschikbaar. Daarom is het aan te bevelen om direct naar een toets op maat over te stappen als het onzeker is of welke wijze het NWO meegenomen moet worden in de toets. In het kader van WBI-2017 zijn er geen expliciete analyses naar onzekerheden uitgevoerd.

4.9.12 Overzicht "afwijkende" keuzes

Zoals beschreven in paragraaf 4.4 is een zoveel mogelijk uniforme aanpak nagestreefd bij het afleiden van de semi-probabilistische toets regels. In deze paragraaf wordt beschreven op welke onderdelen bewust is afgeweken van de uniforme methode.

4.9.12.1. Belangrijke onzekerheden bewust niet meegenomen

In de (semi-)probabilistische modellen worden de belangrijkste onzekerheden beschreven als stochastische variabelen. Voor het toets spoor 'macrostabiliteit' is daar bewust van afgeweken. De onzekerheid, of variatie, in de waterspanningen is bewust niet als stochastische variabele meegenomen. Deze keuze is vooral om praktische redenen gedaan.

De kalibratie van het semi-probabilistische toetsvoorschrift moest uitgevoerd worden in een relatief kort tijdsbestek. De extra complexiteit van het stochastisch modelleren van de waterspanning zou aanleiding gegeven hebben tot extra doorlooptijd en deze was niet beschikbaar.

Overigens is er op het moment van schrijven sprake van het opstarten van een nieuw project waarin extra berekeningen voor macrostabiliteit worden uitgevoerd en waarin de waterspanning naar verwachting wel als stochastische variabele meegenomen kan worden. Dat zal naar verwachting ook tot gevolg hebben dat de semi-probabilistische toets regel wordt aangepast.

4.9.12.2 *Cosmetische aanpassingen*

In enkele gevallen is in de semi-probabilistische rekenregel gekozen voor 'cosmetische aanpassingen' op praktische gronden.

In het geval van asfaltbekledingen is gekozen voor een veiligheidsfactor op de logaritme van de uitkomst van het sterktemodel van asfaltbekledingen. De reden is dat met deze keuze de veiligheidsfactoren meer in lijn zijn met het verloop van de Minersom die zich logaritmisches gedraagt.

Bij macrostabiliteit is ervoor gekozen om geen materiaalfactoren toe te passen, in tegenstelling tot het verleden. Dit is gedaan omdat de representatieve waarden van de materiaaleigenschappen volgens de probabilistische berekeningen al voldoende veilige rekenwaarden zijn. Toepassing van partiële veiligheidsfactoren op de materiaaleigenschappen is dan vanuit inhoudelijk oogpunt ongewenst. Een bijkomend praktisch voordeel is dat hiermee voorkomen wordt dat gebruikers bij de materiaaleigenschappen voor verschillende ondergrondeigenschappen verschillende partiële factoren moeten toepassen.

4.9.12.3 *Keuze van de rekenwaarde van de waterstand*

Om zoveel mogelijk consistentie tussen de toets voorschriften van de verschillende toets sporen te krijgen is ervoor gekozen om in de semi-probabilistische toets regels gebruik te maken van dezelfde rekenwaarde van de waterstand. De gekozen rekenwaarde heeft een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de trajectnorm. Met deze keuze is de waterstand dus geen variabele in de kalibratie. Het 'afregelen' van het semi-probabilistische toetsvoorschrift op probabilistische rekenresultaten wordt gedaan met veiligheidsfactoren van sterktevariabelen.

Deze aanpak werkt goed voor de meeste toets sporen. Echter, voor enkele mechanismen is de waterstand zó dominant, dat een keuze voor een lagere waterstand niet gecompenseerd kan worden door het ophogen van veiligheidsfactoren aan de sterktekant. Voor deze mechanismen moet noodgedwongen een hogere rekenwaarde van de waterstand gekozen worden om tot fysisch realistische semi-probabilistische rekenvoorschriften te komen. Het betreft de toets sporen 'Duinafslag' en 'Gras-erosie buitentalud' (@Deze laatste keuze wordt mogelijk nog aangepast).

4.9.12.4 *Differentiatie naar watersysteem*

Omwille van de eenvoud was het streven om zoveel mogelijk landelijk uniforme semi-probabilistische toets regels af te leiden. Alleen voor het toets spoor 'graserosie buitentalud' is hiervan afgeweken.

Voor dit toets spoor is onderscheid gemaakt tussen het kustgebied en merengebied enerzijds en het rivierengebied anderzijds. (@Ook deze keuze staat nog steeds ter discussie

5 Verschillende typen toetsen in WBI-2017

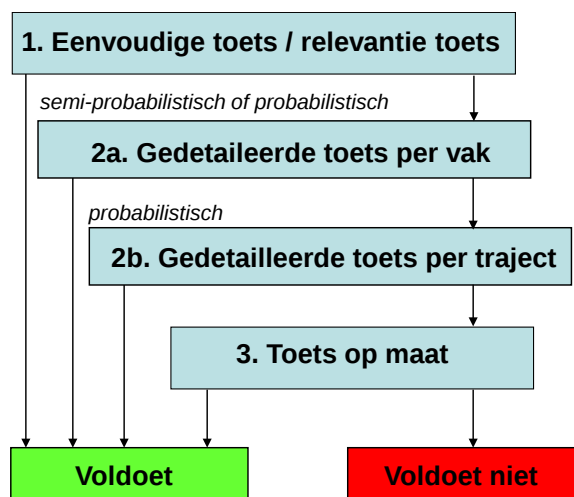
5.1 Beschrijving

Het beoordelingsproces is tijdrovend en legt daarmee een grote claim op degenen die de beoordeling moeten uitvoeren. Het is daarom van belang de beoordeling efficiënt in te richten, zonder daarbij de beoogde kwaliteit geweld aan te doen. Om die reden zijn verschillende typen toetsen opgesteld volgens het principe “van grof naar fijn”. Figuur 5.1 toont de toetsen,. De beoordeling begint bij de eenvoudige toets. Het kernprincipe van het doorlopen van de toetsen is als volgt:

Indien een kering wordt goedgekeurd in een bepaalde toets, dan is de beoordeling voor deze kering afgerond: de kering krijgt het stempel ‘voldoet’. Indien de kering niet kan worden goedgekeurd, dan wordt de beoordeling voortgezet met de volgende toets. Zo wordt van grof naar fijn en van een conservatief naar een scherp oordeel toegewerkt. Indien de kering wordt afgekeurd in de laatste toets, “de toets op maat”, komt de kering in aanmerking voor versterking.

Nadat voor een dijkvak de relevante toetssporen zijn vastgesteld, wordt in de eenvoudige toets met beslisregels gecontroleerd of (“nagenoeg zeker”) aan de veiligheidseisen wordt voldaan. Als dit niet het geval is, wordt de waterstaatkundige toestand van de waterkering in de gedetailleerde toets beoordeeld volgens generieke voorgeschreven rekenregels en op basis van specifieke/lokale eigenschappen van de waterkering. Indien dit niet leidt tot een oordeel ‘voldoet’ is het mogelijk de waterkering in een toets op maat te beoordelen op basis van methoden die zijn gericht op een specifieke situatie of locatie. Laatstgenoemde methoden zijn niet voorgeschreven. De waterkeringbeheerder zal bij de toets op maat moeten aangeven waarom de gekozen methode toepasbaar is.

Toetsen kunnen soms overgeslagen worden, bijvoorbeeld omdat deze voor een specifiek toetsspoor niet zijn uitgewerkt of omdat op basis van een voorgaande toets evident duidelijk is dat de kering ook in een volgende toets afgekeurd zal worden. Verder is het mogelijk dat de gedetailleerde toets en de toets op maat iteratief worden uitgevoerd, bijvoorbeeld als aanvullende gegevens worden verzameld.



Figuur 5.1 Schematische weergave van toetsen

De gedachte achter deze opzet is dat een fors percentage van de keringen ruimschoots voldoet aan de toetseisen, en dat dit met een relatief eenvoudige toets moet kunnen worden vastgesteld. De inspanning die daarmee bespaard wordt, kan dan zinvoller besteed worden aan keringen waarvoor het oordeel minder evident is.

De eenvoudige toets wordt zó ingericht dat deze in de regel conservatiever is dan de andere toetsen (gedetailleerde toets en toets op maat). De gedetailleerde toets (laag 2) is weer conservatiever dan de toets op maat (laag 3). De gedachte hierachter is dat een kering die in een bepaalde toets wordt goedgekeurd niet in een volgende toets zal worden afgekeurd. Dat maakt dat het toegestaan is om te stoppen met beoordelen als de kering in een bepaalde toets wordt goedgekeurd: het is dan zeker dat deze in de volgende toetsen ook het oordeel “voldoet” krijgt. Andersom is het voordeel dat het extra conservatisme van de eenvoudige toets niet tot onnodige dijkversterking leidt. Immers, als een kering wordt afgekeurd in de eenvoudige toets, wordt deze automatisch aan een scherpere toets onderworpen in de gedetailleerde toets en/of de toets op maat.

Nieuw in WBI-2017 in vergelijking met vorige toestronden is dat de gedetailleerde toets is onderverdeeld in twee deel-toetsen: de gedetailleerde toets per vak en de gedetailleerde toets per dijktraject.. De toets per vak kan qua vorm zowel semi-probabilistisch als volledig probabilistisch zijn, de gedetailleerde toets per dijktraject is per definitie volledig probabilistisch. In de gedetailleerde toets per dijktraject is sprake van een “vrije faalkansbegroting” waarbij voor elk dijktraject wordt uitgerekend wat de procentuele bijdrage is van elk faalmechanisme aan de berekende overstromingskans van het dijktraject. De gedetailleerde toets per vak werkt met een “vaste faalkansbegroting” waarbij voorafgaand aan de berekeningen een percentage van de norm wordt toegewezen aan elk faalmechanisme als “maximaal toelaatbare overstromingskans” ten gevolge van het bewuste mechanisme. In de gedetailleerde toets per vak wordt gewerkt met een vast recept voor de schatting van het lengte-effect in de vertaalslag van de norm per dijktraject naar de faalkanseis per doorsnede/dijkvak. In gedetailleerde toets per dijktraject worden de faalkansen van de vakken gecombineerd tot een faalkans op trajectniveau door de toetssoftware, rekening houdend met onderlinge correlaties tussen de verschillende vakken en mechanismen.

In elke toets wordt op verschillende manieren omgegaan met de relevante onzekerheden. In de eenvoudige toets wordt op basis van een bovengrensbepaaling bepaald welke waterkeringen evident goedgekeurd kunnen worden zonder uitvoering van een gedetailleerde toets of toets op maat. In de gedetailleerde toets worden onzekerheden expliciet meegenomen, waarbij onzekerheden zijn afgeleid op landelijke of regionale schaal. In de gedetailleerde toets per vak gebeurt dat op pragmatische wijze met gebruik van een vaste faalkansbegroting, een afschatting van het lengte-effect en, in geval van een semi-probabilistische toets, met gebruik van veiligheidsfactoren en karakteristieke rekenwaarden. In de gedetailleerde toets per dijktraject worden de onzekerheden volledig probabilistisch doorgerekend, zodat deze toets *in principe* tot een scherpere beoordeling leidt. In de toets op maat kunnen onzekerheden locatie-specifiek beschouwd worden.

Naast de diverse toetsen, die onderdeel uitmaken van de technische beoordeling van een waterkering, is er ook nog sprake van een beheerdersoordeel (zie par. 2.3.2 van Bijlage I - Procedure). De beschrijving daarvan valt buiten de scope van dit rapport.

5.2 Assemblage van toetsoordelen

Met behulp van het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI) gaan beheerders beoordelen in hoeverre de waterkeringen voldoen aan de (nieuwe) waterveiligheidsnormen. Voor een efficiënte inrichting van het proces zijn verschillende typen toetsen opgesteld, uiteenlopend van een 'eenvoudige toets' tot een 'toets op maat' en een 'probabilistische toets per dijktraject'. Verschillende toetssporen en aspecten van de waterkering worden beoordeeld. De aard van het toetsoordeel en de daarmee verbonden informatie is afhankelijk van hoe het beoordelingsproces is doorlopen. Het toetsoordeel kan daardoor verschillende vormen aannemen:

- Algemeen Filter op trajectniveau: toetsoordeel voor een heel traject op basis van ervaringen uit het recente verleden
- Eenvoudige toets: Mechanismevak voldoet wel/niet aan beslisregel
- Gedetailleerde toets semi-probabilistisch op vakniveau: Veiligheidsfactor per mechanismevak
- Gedetailleerde toets probabilistisch op vakniveau: faalkans per mechanismevak
- Gedetailleerde toets probabilistisch op trajectniveau: faalkans per traject en per toetsspoor op trajectniveau.
- Toets op Maat: alle voorgaande soorten toetsoordelen op vakniveau zijn mogelijk.

Voor het bepalen van een veiligheidsoordeel per dijktraject moet de verscheidenheid aan informatie over toetsoordelen (verstandig) worden gecombineerd. Dit proces van combineren wordt binnen WBI 'assemblage' genoemd.

Om te proces van assembleren te begeleiden is een assemblageprotocol opgesteld. Het protocol dient om de toetsresultaten uit het WBI op eenduidige manier samen te vatten tot één veiligheidsoordeel per dijktraject. De werking is daarmee vergelijkbaar met de ToetsRap applicatie uit het oude instrumentarium. Het assembleren resulteert uiteindelijk in:

- een veiligheidsoordeel per dijktraject; en
- een duiding van de bijdrage aan dit oordeel van de verschillende combinaties van vakken en toetssporen.

Behalve een oordeel in termen van 'voldoet' of 'voldoet niet' moet tevens inzicht beschikbaar gemaakt worden over de mate van (niet) voldoen ("afstand tot de norm").

De toetsoordelen worden geleverd in onderling verschillende formats. In meerdere toetssporen is bovendien geen sprake van een schatting van de faalkans van de kering. Om toch de verschillende toetsoordelen te kunnen combineren wordt voor diverse toetssporen, waar mogelijk, een grove faalkansschatting afgeleid. Bijvoorbeeld in de semi-probabilistische (gedetailleerde) toets op vak-niveau kan deze schatting worden afgeleid door de faalkanseis van het vak te variëren totdat de kering *exact* aan de faalkanseis voldoet. Voor sommige toetssporen kan de faalkans zelfs direct geschat worden op basis van de berekende veiligheidsfactor. De aldus bepaalde kans is een *indicatie* van de faalkans, maar ten aanzien van de nauwkeurigheid niet vergelijkbaar met een resultaat zoals verkregen in een probabilistische toets.

Om het grove karakter van deze kansschattingen te benadrukken, worden de berekende waarden niet gepresenteerd in het assemblageprotocol. In plaats daarvan wordt op basis van het resultaat het dijktraject ingedeeld in één van de vijf onderstaande beoordelingscategorieën.

Tabel 5.1 Categorieën van toetsoordelen per dijktraject

Cat.	Aanduiding categorie veiligheidsoordeel	Begrenzing categorie
		P_{traject} Overstromingskans van het dijktraject [1/jaar]. $P_{\text{eis;sig}}$ Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar]. $P_{\text{eis;ond}}$ Ondergrens van het dijktraject [1/jaar].
A+	Overstromingskans van het dijktraject is veel kleiner dan de signaleringswaarde. <i>Dijktraject voldoet ruim aan de signaleringswaarde</i>	$P_{\text{traject}} < 1/30 * P_{\text{eis;sig}}$
A	Overstromingskans van het dijktraject is kleiner dan de signaleringswaarde. <i>Dijktraject voldoet aan de signaleringswaarde.</i>	$1/30 P_{\text{eis;sig}} < P_{\text{traject}} < P_{\text{eis;sig}}$
B	Overstromingskans van het dijktraject is groter dan de signaleringswaarde, maar kleiner dan ondergrens. <i>Dijktraject voldoet aan de ondergrens, maar niet aan de signaleringswaarde.</i>	$P_{\text{eis;sig}} < P_{\text{traject}} < P_{\text{eis;ond}}$
C	Overstromingskans van het dijktraject is groter dan de signaleringswaarde en de ondergrens. <i>Dijktraject voldoet niet aan de signaleringswaarde en ook niet aan de ondergrens</i>	$P_{\text{eis;ond}} < P_{\text{traject}} < 30 * P_{\text{eis;ond}}$
D	Overstromingskans het dijktraject is veel groter dan de signaleringswaarde en de ondergrens. <i>Dijktraject voldoet ruim niet aan de signaleringswaarde en aan de ondergrens.</i>	$P_{\text{traject}} > 30 * P_{\text{eis;ond}}$

6 Conclusies en aandachtspunten

In het project WBI-2017 wordt het uitgangspunt gehanteerd dat alle belangrijke onzekerheden zoveel mogelijk *expliciet* worden meegenomen in de beoordeling. De belangrijkste onzekerheden in de sterkte en belasting zijn afgeleid, waarbij onderscheid is gemaakt in aleatorische onzekerheden (natuurlijke variabiliteit) en epistemische onzekerheden (kennisonzekerheden).

Aleatorische onzekerheden in de belasting zijn grotendeels gebaseerd op statistische technieken, waarbij de mate van onzekerheid sterk wordt bepaald door de verhouding tussen de lengte van de beschikbare meetreeks en de herhalingsstijd(en) waarvoor statistieken zijn afgeleid. Waar mogelijk is daarbij ook rekening gehouden met fysische begrenzingen in het systeem. Epistemische onzekerheden in de belasting zijn deels gebaseerd op inschattingen beoordelingen van hydraulische experts, en deels op basis van vergelijkingen tussen modellen en metingen.

Aleatorische onzekerheden in de sterkte dienen zoveel mogelijk afgeleid te worden op basis van veldmetingen. De schematiseringshandleidingen zijn hierin leidend. Ter ondersteuning van het beoordelingsproces zijn “default” waarden afgegeven in het onderhavige rapport. Deze zijn gebaseerd op expert judgement. Epistemische onzekerheden in de sterkte zijn, net als bij belastingen, deels gebaseerd op inschattingen beoordelingen van hydraulische experts, en deels op basis van vergelijkingen tussen modellen en metingen.

De faalmechanismemodellen die worden gebruikt, beschrijven vaak alleen een deel van het faalproces. Daarmee wordt feitelijk verondersteld dat de kans dat de daarop volgende processen zich ook zullen voltrekken, gelijk is aan 1. Dit is een conservatieve aanname en mogelijk iets om in de komende jaren verder aan te werken om tot een (nog) scherper toetsoordeel te komen.

WBI-2017 is de eerste beoordelingsronde waarin voor een dusdanig grote aantal sterkte- en belastingvariabelen een schatting is gemaakt van de onzekerheid. Het is te voorzien dat in de komende jaren verbeterlagen mogelijk zijn om tot scherpere en meer gefundeerde schattingen te komen. Voor hydraulische belastingen is het bijvoorbeeld aan te bevelen om nog meer dan nu gedaan is rekening te houden met fysische begrenzingen bij het bepalen van de kansverdelingen van onzekere grootheden. Voor hydraulische modellen is naar verwachting een verbeterlag te maken door onzekerheden in bodemprofielen meer expliciet af te leiden en mee te nemen in de probabilistische analyses.

Het huidige document heeft mede als doel om te dienen als achtergrondinformatie voor cursussen op het gebied van onzekerheden en probabilistisch rekenen. Het is aan te bevelen om het geven van cursussen op grote schaal op te pakken de komende jaren. Het werken met onzekerheden en het uitvoeren van (semi-)probabilistische berekeningen is voor veel betrokken nog relatief onbekend terrein. Dat zou een mogelijke belemmering kunnen zijn bij het uitvoeren van de beoordeling.

7 Referenties

- Alkyon/TU Delft/WL, 2007: Dune erosion, Product 3: Probabilistic dune erosion prediction method. Report H4357/A1414, February 2007.
- Bjerager P (1988) On computation methods for structural reliability analysis. In: Frangopol DM, editor. New directions, in structural system reliability. Boulder (CO): University of Colorado, 1988. pp. 52-67.
- Cooke, 1991: Experts in Uncertainty : Opinion and Subjective Probability in Science (Environmental Ethics and Science Policy Series). Oxford University Press, June 1991
- Christofides TC (2003) Randomized response in stratified sampling, J Statist Plann Inference 128 (2005) 303 – 310
- Deltares, 2009a: Expert session and expert judgement analysis Expert judgement from theory to practice, Maart 2009. Auteur: J. López De La Cruz
- Deltares, 2009b: Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares rapport 1200264-005, Auteur: Caires, S. 2009.
- Deltares, 2012a: masterplan WTI 2017, versie 2.0, Deltares rapport 1206004-002-GEO-0004, September 2012. Auteurs: Han Knoeff, Frans Hamer, Frank den Heijer.
- Deltares, 2012b: Uitgangspunten voor het WTI, juni, 2012. Deltares rapport 1206004-002-GEO-0001, Auteur: Han Knoeff.
- Deltares, 2012c: Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria; WTI - HR2011, Deltares rapport 1204143-002-HYE-0037, januari 2012. Auteurs: Caroline Gautier en Jacco Groeneweg
- Deltares, 2012d. Veiligheid Steentoets 2010 - Aanbeveling betreffende veiligheidscoëfficiënten voor het ontwerp. Deltares, project no. 1202551-006. Auteur: Robert 't Hart
- Deltares, 2012e: Safety factor for block revetments including residual strength. SBW Residual Strength. Deltares, project no. 1206012-015. Auteurs: Dorothea Kaste en Mark Klein Breteler.
- Deltares, 2013: Kalibratie van semi-probabilistische toetsvoorschriften, R.B. Jongejan, Deltares rapport 1207803-003. Auteur: Ruben Jongejan
- Deltares, 2014a: WTI 2017: Stochastische Ondergrondschematisatie, WTI-SOS, Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006, November 2014, Auteurs: Mark Hijma en Gerard Kruze
- Deltares, 2014b: WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS, Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, januari 2015. Auteurs: Gerard Kruze, Mark Hijma en Raymond van der Meij
- Deltares, 2014c: Analyse betrouwbaarheid en verlenging van meetreeks van de afvoer van de Overijsselse Vecht. Deltares memo 1209433-012-HYE-0005. Auteur: Wouter-Jan Klerk.
- Deltares, 2014d: Herberekening basispeilen in het kader van WTI-2017. Deltares memo 1209431-003-ZWS-0002. Auteur: Dirk Eilander.
- Deltares, 2014e: Definition and quantification of a model factor for the WAVE IMPACT model for asphalt on dikes WTI-2017 product 5.15 (in concept). Deltares project no. 1209437-021-HYE. Auteur: Bernadette Wichman.
- Deltares, 2014f: *Actualisatie seiches Rotterdam WTI2017 Waterstandsafhankelijke seiche-waarden*, Deltares report 1209433-006-HYE-0002. Auteurs: Reijmerink SP and de Jong M PC 2014
- Deltares, 2014g: Calibration of Safety Factors for wave impact on Hydraulic Asphalt Concrete Revetments, Deltares report 1209431-01 0-ZWS-0002. Auteurs: Wouter-Jan Klerk en Wim Kanning.
- Deltares, 2014h: Achtergrondrapportage toetsspoor hoogte, Deltares rapport 1209438-000-GEO-000x.

- Deltares, 2014i: Achtergrondrapport toetsspoor Betrouwbaarheid Sluiting, Deltares rapport 1209438-000-GEO-0007. Auteur: Rob Delhez.
- Deltares, 2014j: Achtergrondenrapport toetsen onderloopsheid, achterloopsheid en heave, deltares, rapport 1209438-000-GEO-0002. Auteur: Henri Havinga.
- Deltares 2015a: Basisstochasten WTI-2017; Statistiek en statistische onzekerheid, Deltares rapport 1209433-012. Auteurs: Houcine Chbab en Dirk Eilander
- Deltares 2015b: Modelonzekerheid belastingen, Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017, Deltares rapport 1209433-008. Auteurs: Houcine Chbab en Jacco Groeneweg.
- Deltares 2015c: Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-ZWS-0001. Auteurs: Geert Prinsen, Henk van den Boogaard en Mark Hegnauer.
- Deltares 2015d: Strength uncertainties WTI 2017, Deltares rapport 1220080-007-ZWS-0002. Auteurs: Ana Teixeira en Wim Kanning.
- Deltares, 2015e: A semi-probabilistic assessment rule for the stability of block revetments under wave attack, Deltares rapport 1220080-004-ZWS-0002. Auteur: Ruben Jongejan.
- Deltares, 2015f: Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability, Deltares rapport 1220080-003-ZWS-0018. Auteurs: Wim Kanning, Maximilian Huber, Mark van der Krogt, Timo Schweckendiek en Ana Martins Teixeira.
- Deltares, 2015g: Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping, Deltares report 1220080-002-ZWS-0006. Auteurs: A. Teixeira, K. Wojciechowska, W.L.A. ter Horst.
- Deltares, 2015h: Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments, Deltares rapport 1220080-005-ZWS-0003. Auteur: Wouter-Jan Klerk.
- Deltares, 2015i: Semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen ten behoeve van WTI2017, Deltares rapport 1220080-008-ZWS-0002. Auteurs: Ferdinand Diermanse en Pieter van Geer
- Deltares, 2015j: WTI 2017 - Cluster Toetsregels Kunstwerken, deltares rapport 1209438-000-GEO-0007. Auteur: Joost Bredevelt.
- Deltares en KNMI, 2014a: Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares rapport 1209424-004-ZWS-0018, Hegnauer, M., Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A., Passchier, R.H.
- Deltares en KNMI 2014b: GRADE final report, Deltares rapport, Delft Nederland. Auteurs: Ron Passchier, Henk van den Boogaard, Adri Buishand, Jules Beersma en Mark Hegnauer.
- Ditlevsen O, Melchers R, Gluwer H (1990) General multi-dimensional probability integration by directional simulation, Comput Struct 1990;36(2):355-368.
- Engelund S, Rackwitz R (1993) A benchmark study on importance sampling techniques in structural reliability, Struct Saf, 12 (1993) 255-276.
- ENW, 2012: Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. Rapport Expertise-netwerk waterveiligheid, Oktober, 2012.
- Geerse CPM (2005) Probabilistic model to assess dike heights in part of the Netherlands, International Symposium on Stochastic Hydraulics, Nijmegen the Netherlands.
- Georgiou SD (2009) Orthogonal latin hypercube designs from generalized orthogonal designs, J Statist Plann Inference 139 (2009) 1530 – 1540.
- Grooteman F (2011) An adaptive directional importance sampling method for structural reliability, Probabilist Eng Mech 26 (2011) 134–141.
- HKV, 2006, Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS RIZA werkdocument 2006.036x, Lelystad 2006. Auteur: Chris Geerse.
- HKV, 2010. Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10. Februari 2010. Auteurs: Chris Geerse en Job Verkaik.
- HKV, 2014: Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water. PR2829.20, Auteurs: Chris Geerse en Karolina Wojciechowska

- HKV, 2015: Onzekerheden kuststations; Voorstel aanpassing betrouwbaarheidsintervallen op basis van nieuwe inzichten, memorandum HKV, Augustus 2015. Auteur: Chris Geerse.
- Hsu Y-C, Tung Y-K, Kuo J-T (2011) Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind, Stoch Environ Res Risk Assess 25(1) 35-49
- IenM, 2015: De normering van primaire waterkeringen van de (voormalige) categorie B keringen; achtergrondrapport. Rapport van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Ruimte en Water, Directie Algemeen Waterbeleid en Veiligheid, Augustus 2015. Auteur: Ruben Jongejan.
- Keskintürk T, Er S (2007) A genetic algorithm approach to determine stratum boundaries and sample sizes of each stratum in stratified sampling, Comput Stat Data An 52 (2007) 53 – 67.
- Koopman SJ, Shephard N, Creal D (2009) Testing the assumptions behind importance sampling, J Economet 149 (2009) 2-11
- Kors, A.G., Zwol, J.H. van, Franken, A., 1994. Projectnota/MER Ramspol, Hydraulische Randvoorwaarden, Deelrapport van de werkgroep Hydraulica, november 1994.
- KNMI, 2015: Extrapolatie van de waterstand in het Waddengebied. Memo (concept). KNMI, 8 juli 2015 (versie B). Auteur: Henk van den Brink
- May RJ, Maier HR, Dandy GC (2010) Data splitting for artificial neural networks using SOM-based stratified sampling, Neural Networks 23 (2010) 283-294
- Melchers (2002) Structural reliability analysis and prediction, Robert E. Melchers, John Wiley and sons, ISBN0471983241
- Olsson A, Sandberg G, Dahlblom O (2003) On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis, Struct Saf 25 (2003) 47–68
- Owen A (1994) Controlling correlations in Latin hypercube samples. J Amer Statist Assoc 1994; 89(428):1517–22.
- Rackwitz R, Fiessler B (1978) Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences, Comput Struct, Vol. 9, 489-494.
- RIKZ, 1993: De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Report DGW-93,023. Auteurs: Dillingh, D., de Haan, L., Helmers, R., Können, G.P., en van Malde J.
- RIKZ, 2006: Achtergrondrapport HR 2006 voor de Zee en Estuaria. Hydraulische Randvoorwaarden 2006. RWS RIKZ rapport 2006.029. Den Haag 2006. Auteurs: F. den Heijer, R.J. Vos, F.L.M. Diermanse, J. Groeneweg, R. Tönis.
- RIKZ, 1999: Nauwkeurigheid waterstandsverwachtingen SVSD voor Hoek van Holland. Memo door J. Kroos, gedateerd 16 september 1999, van RIKZ aan Rijkswaterstaat, directie Zuid-Holland t.a.v. dhr. ir. A. van der Wekken
- RIZA, 1999: Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 1 t/m 10. RIZA rapport 99.047. Lelystad 1999
- RIZA, 2007: Waterloopkundige berekeningen TMR2006 Benedenrivierengebied. RWS RIZA rapport 2007.017. Lelystad 2010. Auteur: Henk de Deugd
- RIZA, 2006: Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS RIZA werkdocument 2006.036x. Auteur: Chris Geerse.
- TAW, 2000: Van overschrijdingskans naar overstromingskans. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Juni 2000
- Sezer AD, 2009: Importance sampling for a Markov modulated queuing network, Stoch Proc Appl 119) 491–517
- Van den Boogaard, H.F.P. and Diermanse, F.L.M., 2005: Confidence intervals for extreme value analysis, contribution of the International Symposium on Stochastic Hydraulics (ISSH), Nijmegen, the Netherlands, In: Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics, IAHR, Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, Spain, First published 2005 ISBN: 90-805649-9-0, Editors: Vrijling JK et al
- VNK, 2014: de veiligheid van Nederland in kaart, eindrapportage project VNK2, 2014

- Volker, W.F., 1987. Statistiek van wind en waterstanden in Hoek van Holland. Tweede concept. W.F. Volker. 20 mei 1987.
- Vrouwenvelder, A.C.W.M. en Vrijling, J.K. 2001: Kansen, onzekerheden en hun interpretatie. Memorandum 2000-CON-DYN/M2107. TNO en TUDelft. 31-01-2001
- WL | Delft Hydraulics 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en integrerende studie, verslagen fasen 1 t/m 5. H3211
- WL | Delft Hydraulics en HKV, 2003: De veiligheid van Nederland in Kaart - Hydraulische randvoorwaarden; Fase 1 - Inventarisatie en gegevensverzameling. Rapport Q3028, auteurs: Ferdinand Diermanse, Bart Thonus, Ingrid Lammers en Frank den Heijer;
- Ye KQ (1998) Orthogonal column Latin hypercubes and their application in computer experiments, J Amer Statist Assoc 93, 1430–1439.
- Yuan C, Druzzdel MJ (2006) Importance sampling algorithms for Bayesian networks: Principles and performance, Math Comp Model 43 (2006) 1189–1207.

A Overzicht stochasten belastingmodellen

Tabel A.1 geeft een overzicht van de basisstochasten per regio. Ter referentie: Tabel 3.1 uit de hoofdtekst geeft een overzicht van de belastingmodelregio's.

Tabel A.1 Basisstochasten per belastingmodel-regio.

Regio	Naam basisstochast	Regio	Naam basisstochast
1	Windrichting	11	Windrichting
	Rijnaafvoer Lobith		Waterstand Harlingen
	Windsnelheid Deelen		Waterstand Den Helder
2	Windrichting		Waterstand IJmuiden
	Maasafvoer Lith		Waterstand Den Oever
	Maasafvoer Borgharen		Waterstand West Terschelling
	Windsnelheid Deelen		Waterstand IJmuiden extra
3	Windrichting		Windsnelheid De Kooy (DH)
	Rijnaafvoer Lobith	12	Windrichting
	Waterstand Maasmond (MM)		Waterstand Den Helder
	Windsnelheid Schiphol		Waterstand IJmuiden
	Fout in waterstandsvoorspelling MM		Waterstand Hoek van Holland
4	Windrichting		Waterstand IJmuiden extra
	Maasafvoer Lith		Windsnelheid IJmuiden
	Waterstand Maasmond (MM)	13	Windrichting
	Windsnelheid Schiphol		Waterstand Den Helder
5	Windrichting		Waterstand IJmuiden
	IJsselafvoer Olst		Waterstand <i>Hoek van Holland*</i>
	Waterstand IJsselmeer		Waterstand Vlissingen
	Windsnelheid Schiphol		Waterstand Oosterschelde buiten
6	Windrichting		Windsnelheid Hoek van Holland
	Discharge Dalfsen	14	Windrichting
	IJsselmeerpeil		Waterstand OS11
	Windsnelheid Schiphol		Windsnelheid Vlissingen
7	Windrichting		Fout in waterstandsvoorspelling OSK
	IJsselmeerpeil		Duur van de opzet
	Windsnelheid Schiphol		Faseverschil tussen opzet en getij
8	Windrichting	15	Windrichting
	Markermeerpeil		Waterstand Vlissingen
	Windsnelheid Schiphol		Waterstand Hansweert
9	Windrichting		Waterstand Vlissingen extra
	Waterstand Lauwersoog		Windsnelheid Vlissingen
	Waterstand Harlingen	16	Windrichting
	Waterstand Delfzijl		Waterstand duinen
	Waterstand Huibersgat		Golfhoogte H_s duinen
	Waterstand West Terschelling		Golfperiode T_p duinen
	Windsnelheid West Terschelling	17	Windrichting
10	Windrichting		Rijnaafvoer Lobith
	Waterstand Lauwersoog		Waterstand Maasmond (MM)
	Waterstand Harlingen		Windsnelheid Schiphol
	Waterstand Den Helder		Seiches
	Waterstand Den Oever	18	Windrichting
	Waterstand Huibersgat		Maasafvoer Borgharen
	Waterstand West Terschelling		Windsnelheid Deelen
	Windsnelheid West Terschelling		

B Overzicht onzekerheden sterktevariabelen

Deze bijlage geeft een overzicht van de belangrijkste (in termen van onzekerheid) sterkteparameters voor een aantal toetsproeven. De tabellen bevatten geschatte waarden voor het gemiddelde, de standaarddeviatie en de autocorrelatie. Deze waarden zijn leidend geweest bij het uitvoeren van de kalibraties, zoals beschreven in paragraaf 4.4. Dit zijn nadrukkelijk geen waarden die opgelegd zijn voor de beoordeling. In de beoordeling worden bij voorkeur waarden gebruikt die zijn afgeleid uit lokale metingen.

Voor meer gedetailleerde informatie en referenties van de informatie uit deze bijlage verwijzen we de lezer naar het rapport van bronnen nadere Deltares [2015d].

B.1 Macrostabieliteit

Onzekerheden in sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
c'	kN/m ²	effective cohesion	effectieve cohesie	5%	logn.	Nom.	cov = 0.275-0.4	0	50, 0.25
$\tan(\phi')$	-	effective friction angle	effectieve hoek van inwendige wrijving	5%	logn.	Nom.	cov = 0.15	0	50, 0.25
S	-	undrained shear strength ratio (nc)	ratio ongedraineerde schuifsterkte (nc)	5%	logn.	Nom.	cov 0.10 siltige klei 0.1 - 0.15 veen 0.1 - 0.28 organische klei 0.33 dijksmateriaal	0	50, 0.25
m	-	strength increase exponent	Sterkte toename exponent	5%	logn.	Nom.	cov = 0.05	0	50, 0.25
σ'_{vy}	kN/m ²	vertical yield stress	verticale grensspanning	5%	logn.	Nom.	Cov = 0.3-0.4	0	50, 0.25
m_s	-	model uncertainty UpliftVan or Spencer	modelfactor UpliftVan of Spencer	See tabel below				0	Section length,-

Modelonzekerheden

Sym.	Model	γ_d partial factor for model unc.	Dist.	μ	σ or CoV
$m_{s,UpliftVan}$	UpliftVan undrained	1.07	logn.	1.005	$\sigma = 0.033$
	UpliftVan drained	1.05 (with uplift) 0.95 (no uplift)	logn.	0.97 (with uplift) 0.87 (no uplift)	$\sigma = 0.04$ (with uplift) $\sigma = 0.05$ (no uplift)
$m_{s,Spencer}$	Spencer undrained	1.07	logn.	1.008	$\sigma = 0.035$
	Spencer drained	1.05 (with uplift) 0.95 (no uplift)	logn.	0.97 (with uplift) 0.87 (no uplift)	$\sigma = 0.04$ (with uplift) $\sigma = 0.05$ (no uplift)

B.2 Microstabiliteit (STMI)

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
c'	kN/m ²	Cohesion clay layer	Cohesie kleilaag	5%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.
ϕ'	°	Friction angle clay layer	Hoek van inwendige wrijving kleilaag	5%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.

N.N. = niet nodig voor de beoordeling

B.3 Piping (STPH)

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
$\gamma_{sat,cover}$	kN/m ³	saturated volumetric weight of the cover layer	verzadigd volumiekgewicht van sublaag	5%	Shifted logn. shift=10	Nom.	cov ⁶ = 0.05	0	300
r_{exit}	-	damping factor at exit	dempingsfactor bij uitredepunt	95%	logn.	Nom.	cov = 0.1	0	∞
D_{cover}	m	total thickness of the cover	deklaagdikte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.3	0	200,-
L	m	seepage length	Kwelweglengte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1	0	3000,-
D	m	thickness of the aquifer	dikte watervoerend pakket	95%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1 – 0.6	0	1500,-
h_{exit}	m [NAP]	phreatic level at the exit point	freatische waterstand bij uitredepunt	5%	norm.	Nom.	σ = 0.1	1	Section length,-
$m_{...}$	-	model uncertainty	modelfactor	Zie onderstaande tabel				1	-
$i_{c,h}$	-	critical heave gradient	kritiek verhang m.b.t heave	0.3 ⁷	logn.	0.5	σ = 0.1	0	300,-
d_{70}	m	70%-quantile of the grain size of the aquifer	70%-fraktil van de korreldiameter in de aquifer	5%	logn.	Nom.	cov = 0.12	0	180,-
k	m/s	permeability of the aquifer	doorlatendheid aquifer	95%	logn.	Nom.	cov = 0.50	0	600,-

Modelonzekerheden

Sym.	Model	Dist.	μ	σ or CoV
m_p	piping	logn.	1.0	σ = 0.12
m_u	uplift	logn.	1.0	σ = 0.10

⁶ Onzekerheid in deze parameter is vaak ondergebracht in het stochastische ondergrondmodel. Het stochastische ondergrondmodel levert de variatiecoëfficiënt. Als gevolg daarvan kunnen de waarden voor deze parameter variëren.

⁷ Indien de getoonde waarde voor een kwantiel niet staat aangeduid als percentage, dan duidt dat er op dat de karakteristieke waarde zelf staat weergegeven en niet de kwantielwaarde.

B.4 Duinen (DA)*Onzekerheden van sterkte-parameters.*

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.
		EN	NL		
D_{50}	m	50%-quantile of the grain size of the dune sand	50%-fraktiel van de korreldiameter in dunezand	-	norm
C_d	-	Due to assumption of constant duration in dune erosion mode	-	10%*	norm
C_m	-	Model error	modelfactor	15%**	norm
T	m ³	Additional dune erosion volume	-	25%***	-

*10% van initieel berekend afslagvolume.

**15% van initieel berekend afslagvolume.

***25% van initieel berekend afslagvolume.

B.5 Steenbekledingen*Onzekerheden van sterkte-parameters.*

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
B	m	width of blocks	Breedte van de zetsteen	50%	norm.	Nom. > 0.1	Concrete: $\sigma = 0.001$ Natural stone: $\sigma = 0.008$	0	5,-
d_i	m	thickness of filter layer i	dikte van de filter laag i	50%	norm.	Nom. >0.03	cov= 0.1	0	135,-
$\cot(\alpha)$	-	cotangent of the slope of the revetment	cotangent van de helling van de bekleding	50%	norm.	Nom. *	cov= 0.04	0	540,-
d_{klei}	m	thickness of clay layer	dikte van de kleilaag	50%	Trunc. Norm.	Nom. ≥ 0	$\sigma = 0.05$	0	135,-
D	m	thickness of top layer	dikte van de toplaag	50%	norm.	Nom. **	Concrete: $\sigma = 0.0013$ Natural stone: $\sigma = 0.0052$	0	5,-
$D_{\beta 15}$	m	15%-quantile of the grain size of the filter layer	15%-fraktiel van de korreldiameter van de bovenste filter laag	50%	norm.	Nom. >3e-3	cov= 0.06	0	135,-
D_{50}	m	50%-quantile of the grain size of the filter layer	50%-fraktiel van de korreldiameter van de bovenste filter laag	50%	norm.	Nom. > $D_{\beta 15}$	cov= 0.06	0	135,-
D_{i15}	m	grain size of the infilling material	korrelgrootte van het inwas-	50%	norm.	Nom. >5e-3	cov= 0.17	0	135,-

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
			materiaal						
L	m	length of blocks	lengte van de stenen	50%	norm.	Nom.	Concrete: $\sigma = 0.001$ Natural stone: $\sigma = 0.008$	0	5,-
n_{f1}^8	-	porosity of the filter material	porositeit filter laag (uitvoerlaag)	50%	norm.	Nom. > 0.2 < 0.4	cov= 0.09	0	5400,-
S_l	-	width of the horizontal joints	spleetbreedte langsvoegen	50%	norm.	Nom. >1e-3	cov= 0.15	0	5,-
S_s	-	width of the vertical joints	spleetbreedte stootvoegen	50%	norm.	Nom. >1e-3	cov= 0.15	0	5,-
$\tan(\alpha)$	-	tangent of the outer slope ⁹	tangent van onderwatertalud	50%	norm.	Nom.	Cov= 0.04	0	540,-
$\tan(\alpha_{bottom})$	-	tangent of the slope of the foreland	tangent van de helling van het voorland	50%	norm.	Nom. >0	cov= 0.10	0	540,-
Z_b	m [NAP]	upper boundary of the block revetment	hoogste punt van de steenbekleding	50%	norm.	Nom.	$\Sigma = 0.05$	-	270,-
h_{berm}	m [NAP]	level of the berm	niveau van de berm	50%	norm.	Nom.	$\Sigma = 0.05$	-	270,-
$Z_{voorland}$	m [NAP]	level of the toe of the dike	niveau van de teen van de dijk	50%	norm.	Nom.	$\Sigma = 0.20$	-	540,-
Z_o	m [NAP]	lower boundary of the block revetment	laagste punt van de steenbekleding	50%	norm.	Nom.	$\Sigma = 0.05$	-	270,-
ρ_s	kg/m ³	Density of the blocks	Soortelijke massa van de stenen in de toplaag	5%	norm.	Nom.	Cov= 0.01	0	135,-
Ω	-	Relative open surface of the revetment	Aandeel open oppervlak in de bekleding	50%	norm.	Nom. ***	cov= 0.14	0	5400,-
Model fac.	-	model uncertainty	modelfactor	Zie onderstaande tabel Error! Reference source not found.				1	-

* buitentaludhelling: $2 < \cot(\alpha) < 100$; binnentalud van break-water: $-100 < \cot(\alpha) < -2$

** $D > 0.05$ m betonnen blokken, maximale afwijking van het gemiddelde = 0.01m per block (idem voor een verzameling van blokken)

*** $\Omega_{basalt} > 0.08$; $\Omega_{Basalton} > 0.12$; $\Omega_{Hydroblocks} > 0.10$; $\Omega_{Ronaton} > 0.12$; $\Omega_{Hillblocks} > 0.08$; $\Omega_{anders} > 0.01$

Modelonzekerheden

Sym.	description	Dist.	μ	σ or CoV
------	-------------	-------	-------	-----------------

⁸ De porositeit moet geschat worden aan de hand van de breedte van de gradering van het filter. Voor een smal gegradeerd filter ($d_{15}/d_{190} < ca 2$) geldt dat de porositeit ongeveer 0.4 is, terwijl dit voor een breed gegradeerd filter veel kleiner is (als schatting voor $d_{15}/d_{190} \approx 10$ geldt: $n \approx 0.3$).

⁹ Gemiddeld, in geval van verschillen in helling.

Sym.	description	Dist.	μ	σ or CoV
m_{br}	Model factor for Steentoets	logn.		Differs per block type
m_F	Model factor for the residual strength of a block revetment and the filter layer	norm.	1.0	$\sigma = 0.051$
m_G	Model factor for the initial gap size of a block revetment	norm.	1.0	$\sigma = 0.33$
C_{m1}	Model factor for the residual strength of the clay layer (erosion volume)	norm.	1.0	$\sigma = 0.20$
C_{m2}	Model factor for the residual strength of the sand core (erosion volume)	norm.	1.0	$\sigma = 0.19$
C_{m3}	Model factor for the calculated erosion depth	norm.	1.0	$\sigma = 0.15$

B.6 Asfaltbekledingen

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation
		EN	NL					
c	MPa/m	modulus of subgrade reaction	veerconstant ondergrond	5%	logn.	Nom.	cov= 0.25	N.N.
d_1	m	thickness of the asphalt layer	dikte asfalttoplaag	5%	logn.	Nom.	cov= 0.1	N.N.
E_1	MPa	stiffness of the asphalt top layer	stijfheidsmodulus asfalttoplaag	95%	logn.	Nom.	cov= 0.2-0.4	N.N.
$\sigma_{b,1}$	MPa	strength in bending of asphalt top layer	breuksterkte asfalttoplaag	5%	logn. / student-t	Nom.	cov= 0.2-0.35	N.N.
m	-	model uncertainty	modelfactor	-	logn.	1.77	0.784	N.N.

N.N. = niet nodig voor de semi-probabilistische beoordeling

B.7 Grasbekledingen

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
c'	kN/m ²	Cohesion clay layer	Cohesie kleilaag	5%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.
ϕ'	°	Friction angle clay layer	Hoek van inwendige wrijving kleilaag	5%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.
k_{zand}	m/s	Doorlatendheid zandkern	Permeability of the sand core	95%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.
α_M	-	Factor for increased load at transitions and objects	Invloedsfactor overgangen voor belasting	=1 ¹⁰				N.N.	N.N.
α_S	-	Factor for decreased strength at transitions	Invloedsfactor overgangen voor sterkte	=1				N.N.	N.N.

¹⁰. Voor parameters α_S en α_m wordt in de software van WTI2017 de 'deterministische' waarde van 1 gebruikt en geen kansverdeling of karakteristieke waarde.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
		and objects							
U_c	m/s	Critical wave runup front velocity along the slope	Kritische stroomsnelheid gras	5%	logn.	7.9	$\sigma = 0.8$	N.N.	N.N.
D_{crit}	m ² /s ²	Critical value of cumulative overload	Kritische cumulatieve overbelasting	50%	logn.	7000	$\sigma = 700$	N.N.	N.N.
a	m	Constant in relation between wave height and strength duration	Constance in de standtijdlijn	5%	logn.	1.82	$\sigma = 0.62$	N.N.	N.N.
F_{sand}	-	Sand fraction in the clay	Zandgehalte reststerkte	50% ¹¹	logn.	0.35	$\sigma = 0.07$	N.N.	N.N.

Kritische overslagdebieten.

Sym.	Unit	Description		Dist.	μ	σ or cov
		EN	NL			
q_{c_open} (Hs=1)	l/s/m	Critical overtopping discharge, open Hs=1	kritisch overslagdebiet, open zode, Hs=1	logn.	100	$\sigma = 120$
q_{c_open} (Hs=2)	l/s/m	Critical overtopping discharge, open Hs=2	kritisch overslagdebiet, open zode, Hs=2	logn.	70	$\sigma = 80$
q_{c_open} (Hs=3)	l/s/m	Critical overtopping discharge, open Hs=3	kritisch overslagdebiet, open zode, Hs=3	logn.	40	$\sigma = 50$
$q_{c_gesloten}$ (Hs=1)	l/s/m	Critical overtopping discharge, closed Hs=1	kritisch overslagdebiet, gesloten zode, Hs=1	logn.	225	$\sigma = 250$
$q_{c_gesloten}$ (Hs=2)	l/s/m	Critical overtopping discharge, closed Hs=2	kritisch overslagdebiet, gesloten zode, Hs=2	logn.	100	$\sigma = 120$
$q_{c_gesloten}$ (Hs=3)	l/s/m	Critical overtopping discharge, closed Hs=3	kritisch overslagdebiet, gesloten zode, Hs=3	logn.	70	$\sigma = 80$

B.8 Kunstwerken

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation		Ref.
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]	
D	m	thickness of the aquifer	dikte watervoerend pakket	95%	logn.	Nom.	cov = 0.1 – 0.6	-	Kw length	VNK [2]
d_{70}	m	70%-quantile of the grain size of the aquifer	70%-fraktil van de korreldiameter in de aquifer	5%	logn.	Nom.	cov = 0.12	-	Kw length	VNK [2]

¹¹ Voor de volledigheid: dit betreft de mediane waarde; het betekent niet dat het zandgehalte zelf gelijk is aan 50%.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation		Ref.
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]	
d	m	total thickness of the cover	deklaagdikte	5%	logn.	Nom.	cov= 0.3	-	Kw length	VNK [2]
k	m/s	permeability of the aquifer	doorlatendheid aquifer	95%	logn.	Nom.	cov = 0.50	-	Kw length	VNK [2]
h_{kr}	m [NAP]	Level of crest of structure	Kerende hoogte van het kunstwerk	-	norm.	Nom.	$\sigma = 0.05$	-	Kw length	[12, 13, 14]
h_{bi}	m [NAP]	Inside water level	Binnenwaterstand	Nom.	norm.	Nom.	$\sigma = 0.1$	-	Kw length	[12, 13, 14] VNK [2]
h_{dr}	m [NAP]	Threshold height unclosed structure or Bottom of the upright section	Drempelhoogte niet gesloten kering of Hoogte van de onderkant van de wand/drempel	-	norm.	Nom.	$\sigma = 0.1$	-	Kw length	[13]
B_{sv}	m	Flow width at bottom protection	Stroomvoerende breedte bodembescherming	-	Trunc. norm./ logn. *	Nom. >0	$\sigma = 0.05$	-	Kw length	[12, 13, 14]
B_{open}	m	Width of opening of structure	Breedte van doorstroopening(en)	-	norm.	Nom. >0	$\sigma = 0.05$	-	Kw length	[12, 13, 14]
B	m	Width of crest of structure	Breedte van de kruin van het kunstwerk	-	Trunc. norm.	Nom. >0	$\sigma = 0.05$	-	Kw length	[12, 13, 14]
q_c	m ³ /s/m	Critical overtopping / overflowing discharge	kritieke instromend debiet directe invoer	-	Trunc. norm./ logn. *	Nom. >0	cov= 0.15	-	Kw length	[12, 13, 14]
A_{kom}	m ²	Storage area hinterland of structure	kombergend oppervlak	-	logn	Nom. >0	cov= 0.1	-	Kw length	[12, 13, 14]
Δh_{kom}	m	Allowable increase of level for storage	toegestane peilverhoging komberging	-	Trunc. logn	Nom. ***	$\sigma = 0.1$	-	Kw length	[12, 13, 14]
μ	-	Discharge coefficient	Afvoercoëfficiënt	-	norm.	1	$\sigma = 0.2$	-	Kw length	[12, 13, 14]
R_{lin}	kN/m ²	Structural strength linear load model	constructieve sterkte lineair belastingmodel	-	logn.	Nom.	▲ e.g. cov= 0.1	-	Kw length	[13]
R_{kwad}	kN/m ²	Structural strength quadratic load model	constructieve sterkte kwadratisch belastingmodel	-	logn.	Nom.	▲ e.g. cov= 0.1	-	Kw length	[13]
E_c	kN.m	Critical impact energy, closure structure	bezwijkwaarde aanvaarenergie	-	logn.	Nom.	▲ e.g. cov= 0.3	-	Kw length	[13]
$V_{c,sluit}$	m/s	Critical flow velocity, closure structure/gate	stroomsnelheid waarbij na aanvaring het eerste keermiddel nog net kan worden gesloten	-	Trunc. norm.	Nom. [0,10]	$\sigma = 1.0$	-	Kw length	[13]
$R_{stab.verlies,lin}$	kN/m ²	Structural strength (stability) linear load model	constructieve sterkte lineair belastingmodel stabiliteit	-	logn.	Nom.	▲ e.g. cov= 0.1	-	Kw length	[13]
$R_{stab.verlies}$	kN/m ²	Structural	constructieve	-	logn.	Nom.	▲ e.g.	-	Kw	[13]

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation		Ref.
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]	
<i>k_{quad}</i>		strength (stability) quadratic load model	sterkte kwadratisch belastingmodel stabiliteit				cov= 0.1		length	
A	m ²	Cross-sectional area of the culvert(s)	Doorstroomoppervlak van doorstroomopeningen	-	logn.	Nom.	$\sigma = 0.01$	-	Kw length	[13, 14]
<i>m</i> ...	-	model uncertainty	modelfactor	Zie onderstaande tabel				-	Kw length	[12, 13, 14]

* getrunceerde normale verdeling voor HTkw and BSkw, lognormal verdeling voor STCOkw

*** >0 for HTkw, [0,10] voor STCOkw en BSkw

▲ moet worden bepaald door degene die de beoordeling uitvoert, hangt sterk af van het materiaal

Modelonzekerheden

Sym.	Description	Dist.	μ	σ or CoV	Ref.	Note to user
<i>m_{kom}</i>	Model factor for storage volume	logn.	1.0	$\sigma = 0.2$	[12, 13, 14]	(class 1)
<i>m_{ol}</i>	Model factor overflowing supercritical flow	Trunc. norm.	1.1 / 1.2 **	$\sigma = 0.03$		(class 2) μ (class 1) σ
<i>m_{onv}</i>	Modelfactor voor onvolkomen stroming	norm.	1.0	cov= 0.1	[13,14]	(class 2)

** 1.1 voor HTkw en BSkw, 1.2 voor STCOkw

B.9 Voorland

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation		Ref.
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]	
<i>d₅₀</i>	m	Mean of the 50%-quantile of the grain size of all sand layers	Gemiddeld van 50%-fraktil van de korrel diameter in alle zand lagen	5%	logn.	Nom.	-	-	-	[43]
<i>d₁₅</i>	m	Mean of the 15%-quantile of the grain size of all sand layers	Gemiddeld van 15%-fraktil van de korrel diameter in alle zand lagen	5%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.	[43]
<i>k</i>	m/s	permeability	doorlatendheid	95%	logn.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.	[43]
<i>Ψ_{5m}</i>	-	* see below	** see below	95%	norm.	Nom.	Nom.	N.N.	N.N.	[43]
<i>c'</i>	kN/m ²	effective cohesion	effectieve cohesie	5%	logn.	Nom.	cov = 0.275-0.4	0	50, 0.25	VNK [2]
<i>tan(ϕ')</i>	-	effective friction angle	effectieve hoek van inwendige wrijving	5%	logn.	Nom.	cov = 0.15	0	50, 0.25	VNK [2]
<i>S</i>	-	undrained shear strength ratio (nc)	ratio ongedraineerde schuifsterkte (nc)	5%	logn.	Nom.	cov 0.10 siltige klei 0.1 - 0.15 veen 0.1 - 0.28 organische klei 0.33 dijksmateriaal	0	50, 0.25	[16]
<i>m</i>	-	strength increase	Sterkte toename	5%	logn.	Nom.	cov = 0.05	0	50, 0.25	[16]

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation		Ref.
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]	
		exponent	exponent							
σ'_{vy}	kN/m ²	vertical yield stress	verticale grensspanning	5%	logn.	Nom.	cov = 0.3-0.4	0	50, 0.25	[16]

* Gemiddelde waarde van state parameter van (cumulatief) 5 m zand- en sliedlagen met de hoogste waarde van de state parameter, bepaald tussen de waterlijn en een niveau 0,5 H_R onder de teen van de onderwaterhelling.

N.N. = *niet nodig voor een semi-probabilistische toets*.

C Lengte-effect voor erosie kruin en binnentalud

De onderstaande tabel geeft een overzicht van “*N*-waarden” voor het toetsspoor “erosie kruin en binnentalud” voor dijken en kunstwerken. De waarde van *N* geeft het verschil aan tussen de faalkanseis op trajectniveau en de faalkanseis op vakniveau. Voor zover het geen duintrajecten betreft kunnen deze *N*-waarden dus zowel op dijken (spoor grasbekleding kruin-binnentalud) als op kunstwerken (spoor overslag/overloop) worden toegepast.

Lengte-effectfactoren HT per dijktraject.

Dijktraject	Onderdeel van dijkkring	N _{HT} [-]
1-1	Schiermonnikoog (1)	3
1-2	Schiermonnikoog (1)	2
2-1	Ameland (2)	Duin
2-2	Ameland (2)	2
3-1	Terschelling (3)	Duin
3-2	Terschelling (3)	2
4-1	Vlieland (4)	Duin
4-2	Vlieland (4)	2
5-1	Texel (5)	Duin
5-2	Texel (5)	2
6-1	Friesland en Groningen (6)	3
6-2	Friesland en Groningen (6)	3
6-3	Friesland en Groningen (6)	3
6-4	Friesland en Groningen (6)	3
6-5	Friesland en Groningen (6)	3
6-6	Friesland en Groningen (6)	3
6-7	Friesland en Groningen (6)	3
7-1	Noordoostpolder (7)	3
7-2	Noordoostpolder (7)	3
8-1	Flevoland (8)	3
8-2	Flevoland (8)	3
8-3	Flevoland (8)	3
8-4	Flevoland (8)	3
9-1	Vollenhove (9)	2
9-2	Vollenhove (9)	2
10-1	Mastenbroek (10)	2
10-2	Mastenbroek (10)	2
10-3	Mastenbroek (10)	2
11-1	IJsseldelta (11)	2
11-2	IJsseldelta (11)	2
12-1	Wieringen (12)	3
12-2	Wieringen (12)	2
13a-1	IJburg (13-a)	2

Dijktraject	Onderdeel van dijkkring	N _{HT} [-]
13b-1	Marken (13-b)	2
13-1	Noord-Holland (13)	Duin
13-2	Noord-Holland (13)	3
13-3	Noord-Holland (13)	Duin
13-4	Noord-Holland (13)	3
13-5	Noord-Holland (13)	3
13-6	Noord-Holland (13)	2
13-7	Noord-Holland (13)	2
13-8	Noord-Holland (13)	2
13-9	Noord-Holland (13)	2
14-0	Zuid-Holland (14)	2
14-1	Zuid-Holland (14)	2
14-2	Zuid-Holland (14)	2
14-3	Zuid-Holland (14)	2
14-4	Zuid-Holland (14)	Duin
14-5	Zuid-Holland (14)	3
14-6	Zuid-Holland (14)	Duin
14-7	Zuid-Holland (14)	3
14-8	Zuid-Holland (14)	Duin
14-9	Zuid-Holland (14)	3
15-1	Lopiker- en Krimpenerwaard (15)	1
15-2	Lopiker- en Krimpenerwaard (15)	2
15-3	Lopiker- en Krimpenerwaard (15)	2
16-1	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden (16)	1
16-2	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden (16)	2
16-3	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden (16)	1
16-4	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden (16)	1
17-1	IJsselmonde (17)	2
17-2	IJsselmonde (17)	2
17-3	IJsselmonde (17)	2
18-1	Pernis (18)	2
19-1	Rozenburg (19)	2
20-1	Voorne-Putten (20)	Duin
20-2	Voorne-Putten (20)	2
20-3	Voorne-Putten (20)	2
20-4	Voorne-Putten (20)	2
21-1	Hoekse Waard (21)	2
21-2	Hoekse Waard (21)	2
22-1	Eiland van Dordrecht (22)	2
22-2	Eiland van Dordrecht (22)	2
23-1	Biesbosch (23)	n.v.t.
24-1	Land van Altena (24)	1
24-2	Land van Altena (24)	1

Dijktraject	Onderdeel van dijkkring	N _{HT} [-]
24-3	Land van Altena (24)	1
25-1	Goeree-Overflakkee (25)	Duin
25-2	Goeree-Overflakkee (25)	2
26-1	Schouwen Duiveland (26)	Duin
26-2	Schouwen Duiveland (26)	2
26-3	Schouwen Duiveland (26)	2
27-1	Tholen en St. Philipsland (27)	2
27-2	Tholen en St. Philipsland (27)	2
28-1	Noord-Beveland (28)	2
29-1	Walcheren (29)	Duin
29-2	Walcheren (29)	3
29-3	Walcheren (29)	3
30-1	Zuid-Beveland west (30)	2
30-2	Zuid-Beveland west (30)	2
30-3	Zuid-Beveland west (30)	2
30-4	Zuid-Beveland west (30)	2
31-1	Zuid-Beveland oost (31)	2
31-2	Zuid-Beveland oost (31)	2
32-1	Zeeuwsch Vlaanderen (32)	2
32-2	Zeeuwsch Vlaanderen (32)	2
32-3	Zeeuwsch Vlaanderen (32)	2
32-4	Zeeuwsch Vlaanderen (32)	2
34-1	West-Brabant (34)	2
34-2	West-Brabant (34)	2
34a-1	Geertruidenberg (34-a)	2
35-1	Donge (35)	2
35-2	Donge (35)	2
36-1	Land van Heusden/de Maaskant (36)	1
36-2	Land van Heusden/de Maaskant (36)	1
36-3	Land van Heusden/de Maaskant (36)	1
36-4	Land van Heusden/de Maaskant (36)	1
36-5	Land van Heusden/de Maaskant (36)	1
36a-1	Keent (36-a)	1
37-1	Nederhemert (37)	1
38-1	Bommelerwaard (38)	1
38-2	Bommelerwaard (38)	1
39-1	Alem (39)	1
40-1	Heerewaarden (40)	1
40-2	Heerewaarden (40)	1
41-1	Land van Maas en Waal (41)	1
41-2	Land van Maas en Waal (41)	1
41-3	Land van Maas en Waal (41)	1
41-4	Land van Maas en Waal (41)	1

Dijktraject	Onderdeel van dijkkring	N _{HT} [-]
42-1	Ooij en Millingen (42)	1
43-1	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
43-2	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
43-3	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
43-4	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
43-5	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
43-6	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (43)	1
44-1	Kromme Rijn (44)	1
44-2	Kromme Rijn (44)	2
45-1	Gelderse Vallei (45)	1
45-2	Gelderse Vallei (45)	2
46-1	Eempolder (46)	2
47-1	Arnhemse- en Velpsebroek (47)	1
48-1	Rijn en IJssel (48)	1
48-2	Rijn en IJssel (48)	1
48-3	Rijn en IJssel (48)	1
49-1	IJsselland (49)	1
49-2	IJsselland (49)	1
50-1	Zutphen (50)	1
50-2	Zutphen (50)	1
51-1	Gorssel (51)	1
52-1	Oost Veluwe (52)	1
52-2	Oost Veluwe (52)	1
52-3	Oost Veluwe (52)	1
52-4	Oost Veluwe (52)	1
52a-1	Veessen-Wapenveld	1
53-1	Salland (53)	1
53-2	Salland (53)	1
53-3	Salland (53)	1
54-1	Ottersum-Mook (54)	1
55-1	Gennep (55)	1
56-1	Afferden (56)	1
57-1	Nieuw Bergen (57)	1
58-1	Groeningen (58)	1
59-1	Bergen (59)	1
60-1	Well (60)	1
61-1	Wanssum (61+62)	1
63-1	Blitterswijck (63)	1
64-1	Broekhuizenvorst (64)	1
65-1	Arcen (65)	1
66-1	Lottum (66)	1
67-1	Grubbenvorst (67)	1
68-1	Venlo-Velden (68)	1

Dijktraject	Onderdeel van dijkkring	N _{HT} [-]
68-2	Venlo-Velden (68)	1
69-1	Blerick (69)	1
70-1	Baarlo (70)	1
71-1	Belfeld (71)	1
72-1	Kessel (72)	1
73-1	Beesel (73)	1
74-1	Neer (74)	1
75-1	Buggenum (75)	1
76-1	Roermond (76)	1
76-2	Roermond (76)	1
76a-1	Roermond (76)	1
77-1	Roermond (77)	1
78-1	Heel (78)	1
79-1	Thorn-Wessem (79)	1
80-1	Maasbracht (80)	1
81-1	Stevensweert (81)	1
82-1	Aasterberg (82)	1
83-1	Grevenbicht_Visserweert (83+84)	1
85-1	Urmond (85)	1
86-1	Meers_Maasband (86+87)	1
87-1	Meers_Maasband (86+87)	1
88-1	Aan de Maas (88)	1
89-1	Voulwames (89)	1
90-1	Maastricht (90)	1
91-1	Itteren (91)	1
92-1	Borgharen (92)	1
93-1	Bossherveld (93)	1
94-1	Maastricht west (94)	1
95-1	Eijsden (95)	1

D Formules voor het integreren van kennisonzekerheden in de statistiek van de waterstand

Sectie 4.8 beschrijft in woorden hoe kennisonzekerheid en natuurlijke variabiliteit in de gecombineerd worden in een “nieuwe” statistische verdelingsfunctie (werklijn) voor de waterstand. Deze bijlage geeft de wiskundige formulering voor het berekenen van deze statistische verdelingsfunctie waarin beide bronnen van onzekerheid zijn verdisconteerd.

Definieer:

H_{exc} = stochastische variabele waterstand, exclusief kennisonzekerheden
 H_{inc} = stochastische variabele waterstand, inclusief kennisonzekerheden
 H^+ = stochastische variabele die de kennisonzekerheid representeert

Tussen deze drie stochasten geldt de volgende relatie:

$$H_{\text{inc}} = H_{\text{exc}} + H^+ \quad (\text{D.1})$$

De kansverdelingen van de stochasten H_{exc} en H_{inc} worden beschreven in de vorm van een frequentielijn:

$f_{\text{Hex}}(h_{\text{ex}})$ = overschrijdingsfrequentie, f , van waterstand, h , exclusief kennisonzekerheid
 $f_{\text{Hinc}}(h_{\text{inc}})$ = overschrijdingsfrequentie, f , van waterstand, h , inclusief kennisonzekerheid

In deze bijlage gaan we er van uit dat $f_{\text{Hex}}(h_{\text{ex}})$ bekend is en dat $f_{\text{Hinc}}(h_{\text{ex}})$ berekend moet worden. Voor de volledigheid definiëren we ook de inverse relaties van deze frequentie-lijnen:

$h_{\text{exc}}(f)$ = waterstand, h , als functie van overschrijdingsfrequentie, f , exclusief kennisonzekerheid
 $h_{\text{inc}}(f)$ = waterstand, h , als functie van overschrijdingsfrequentie, f , inclusief kennisonzekerheid

De kansverdeling van stochast H^+ is in een aantal toepassingen constant verondersteld. Echter, er zijn ook toepassingen waarin deze kansverdeling afhankelijk is van de beschouwde herhalingstijd en daarmee dus een functie van de overschrijdingsfrequentie:

$G_{H^+}(h^+|f)$ = kansverdelingsfunctie van H^+ , conditioneel op overschrijdingsfrequentie f

Vaak is voor G_{H^+} een normale verdelingsfunctie aangenomen met een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie die een functie is van f .

Met gebruik van de bovenstaande definities en van het theorema van de totale waarschijnlijkheid kan de frequentielijn voor h_{inc} als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned}
 f_{Hinc}(h_{inc}) &= \int_0^{\infty} P(H_{inc} > h_{inc} | f) df = \int_0^{\infty} P[h_{exc}(f) + H^+ > h_{inc} | f] df \\
 &= \int_0^{\infty} P[H^+ > h_{inc} - h_{exc}(f) | f] df = \int_0^{\infty} [1 - G_{H^+}(h_{inc} - h_{exc}(f) | f)] df
 \end{aligned}
 \tag{D.2}$$

Deze integraal wordt voor het relevante bereik aan waarden van h_{inc} uitgerekend. In de laatste integraal van vergelijking (D.2) wordt de natuurlijke variabiliteit van de waterstand beschreven met functie $H_{exc}(f)$ en de kennisonzekerheid met functie G_{H^+} . De combinatie van deze twee onzekerheden resulteert in een frequentieverdeling, f_{Hinc} , voor de waterstand waarin de twee typen onzekerheden zijn verdisconteerd. Deze integraal kan doorgaans niet analytisch uitgerekend worden, maar is met een numerieke rekenmethode eenvoudig en met weinig rekentijd heel goed te benaderen.