

Opdrachtgever:

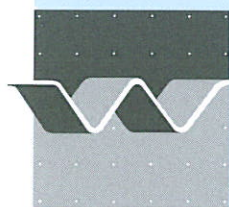
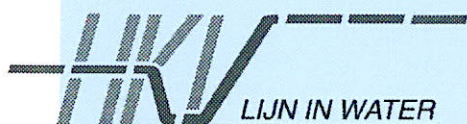
DG Rijkswaterstaat, RIZA

SBW - Statistiek basisvariabelen

Ferdinand Diermanse, Hanneke van der Klis, Chris Geerse, Jan van
Noortwijk, Herman Gerritsen en Jacco Groeneweg

rapport

Maart 2007



wL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

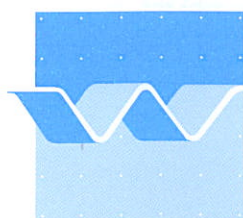
DG Rijkswaterstaat, RIZA

SBW - Statistiek basisvariabelen

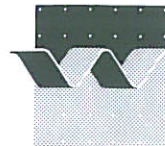
Ferdinand Diermanse, Hanneke van der Klis, Chris Geerse, Jan van
Noortwijk, Herman Gerritsen en Jacco Groeneweg

rapport

Maart 2007



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: DG Rijkswaterstaat, RIZA

TITEL: SBW - Statistiek basisvariabelen

SAMENVATTING:

De belangrijkste doelstelling van het project Sterkte en Belasting van Waterkeringen (SBW) is het invullen van de belangrijkste kennisleemtes ten behoeve van de toetsing van primaire waterkeringen. Een belangrijk onderdeel uit het project SBW-deelproject "randvoorwaarden" is de statistiek van de natuurlijke variabelen die, direct of indirect, tot falen van een waterkering kunnen leiden. De kennisontwikkeling op het gebied van deze statistiek is nog volop in ontwikkeling. Statistieken van extreme waarden zijn in de regel behept met relatief grote onzekerheden. Deze onzekerheden worden vooral veroorzaakt door het feit dat de statistiek gebaseerd is op meetreeksen met een lengte die veel korter is dan de herhalings tijden waarvoor de statistieken afgeleid worden.

Behalve grote onzekerheden speelt ook dat statistische extrapolatie van meetresultaten naar extreme situaties kan leiden tot fysisch onrealistische waarden. In de praktijk gaan onder extreme omstandigheden wellicht fysische begrenzingsen een rol spelen die op puur statistische basis niet uit de reeks van waarnemingen geïdentificeerd kunnen worden. Dat kan in sommige gevallen leiden tot een overschatting van hydraulische belastingen, en indirect dus tot een onnodige overdimensionering van dijken, duinen en kunstwerken.

In dit rapport staan de volgende vraagstukken centraal:

1. Welke methoden voor het schatten van statistieken van extreme waarden zijn bekend vanuit de literatuur?
2. Welke methoden worden momenteel gebruikt in het kader van de hydraulische randvoorwaarden (HR2006)?
3. Is het voor toekomstige randvoorwaarden zinvol om over te stappen op een andere (alternatieve) methode?
4. Zijn er nog knelpunten/verbeterpunten die aangepakt moeten worden [a] in de bestaande methoden en [b] bij potentiële alternatieven?

Deze vraagstukken worden behandeld voor de vijf basisvariabelen van de hydraulische belastingmodellen, te weten: rivierafvoer, meerpeil, wind, waterstand op zee en golven op zee.

REFERENTIES:

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
	F. Diermanse	13-12-2006		H. Ogink	C.A. Bons
	F. Diermanse	15-03-2007		H. Ogink	C.A. Bons

PROJECTNUMMER Q4228

TREFWOORDEN: Statistiek, hydraulische randvoorwaarden, belastingmodellen, SBW

AANTAL BLADZIJDEN 110

VERTROUWELIJK ☐ JA, tot (datum) ☒ NEESTATUS: ☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Project SBW	1—1
1.2	Project statistiek basisvariabelen	1—1
1.3	Auteurs en organisatie	1—2
2	Aanleiding voor deze studie.....	2—1
2.1	Hydraulische randvoorwaarden	2—1
2.2	Belastingmodellen.....	2—1
2.3	Overzicht van basisvariabelen per gebied	2—3
2.4	Probleemstelling	2—4
2.5	Doel van dit project.....	2—5
3	Inventarisatie van statistische methoden	3—1
3.1	De klassieke methode: directe extrapolatie	3—1
3.1.1	Inleiding.....	3—1
3.1.2	Procedure	3—1
3.1.3	Selectie van maxima	3—2
3.1.4	Keuze van de verdelingsfunctie	3—3
3.1.5	Parameterschatting bij verdelingstype	3—3
3.1.6	Toetsen.....	3—4
3.1.7	Bayesiaanse statistiek	3—7
3.2	Probabilistische rekentechnieken	3—8
3.2.1	Inleiding.....	3—8
3.2.2	Numerieke integratie	3—8
3.2.3	Klassieke Monte Carlo analyse (crude Monte Carlo).....	3—9
3.2.4	Varianten van de klassieke Monte Carlo methode.....	3—10

3.3	Overige methoden.....	3—11
3.3.1	Inleiding.....	3—11
3.3.2	Regionale frequentie analyse	3—11
3.3.3	Resampling	3—12
3.3.4	Samengestelde verdelingsfuncties.....	3—13
3.3.5	Principal Component Analysis.....	3—14
4	Statistiek voor de HR2006.....	4—1
4.1	Inleiding	4—1
4.2	Afvoer Rijn en Maas.....	4—1
4.2.1	Homogenisatie van de meetreeks.....	4—1
4.2.2	Frequentieanalyse van piekafvoeren	4—2
4.2.3	Golfvormen.....	4—3
4.3	Windstatistiek	4—3
4.3.1	Het Rijkoort Weibull model van het KNMI.....	4—3
4.3.2	Formules RW-model voor de momentane kansverdelingen	4—4
4.3.3	Formules RW-model voor extreme-waarden verdelingen	4—5
4.3.4	Formules RW-model voor herhalingstijden	4—8
4.3.5	Opmerkingen RW-model.....	4—8
4.3.6	Hydra-project van het KNMI.....	4—9
4.4	Meerpeilstatistiek IJsselmeer	4—10
4.4.1	Gegevens	4—10
4.4.2	Frequentielijn.....	4—10
4.4.3	Dagenlijn en duur per top	4—11
4.4.4	Opmerkingen	4—11
4.5	Waterstand op zee	4—12
4.5.1	Basispeilen.....	4—12

	4.5.2	Windrichtingsafhankelijke statistiek.....	4—13
4.6		Golven op zee	4—13
	4.6.1	Omni-directionele statistiek	4—13
	4.6.2	Windrichtingsafhankelijke statistiek.....	4—15
5		Fysische begrenzingen in de statistiek.....	5—1
	5.1	Inleiding	5—1
	5.2	Methode algemeen	5—1
	5.2.1	Principe van oorzaak en gevolg.....	5—1
	5.2.2	Opzet procedure	5—2
	5.3	Rivierafvoeren: Neerslaggeneratormethode	5—3
	5.4	Meerpeil	5—6
	5.5	Waterstand op zee en windsnelheid	5—10
	5.6	Golven op zee	5—16
6		Bestaande kennishiaten en knelpunten	6—1
	6.1	Inleiding	6—1
	6.2	Algemeen: klimaatverandering en homogeniteit	6—1
	6.3	Afvoerverdeling Rijn/Maas	6—1
	6.3.1	Extrapolatiemethode.....	6—1
	6.3.2	Neerslaggenerator.....	6—2
	6.4	Meerpeil	6—2
	6.5	Waterstand op zee en wind	6—3
	6.6	Golven op zee	6—4
7		Case studie: golfstatistiek op diep water	7—1
	7.1	Inleiding	7—1
	7.2	Procedure.....	7—1
	7.3	Opzet modelberekeningen	7—3

7.3.1	Uitvoerlocaties	7—3
7.3.2	Modelconcept Hydra-K.....	7—4
7.3.3	Implementatie van fysische bovengrenzen in Hydra-K.....	7—6
7.4	Resultaten.....	7—7
7.5	Conclusies	7—10
8	Discussie, conclusies en aanbevelingen	8—1
8.1	Directe extrapolatie versus probabilistische rekenmodellen	8—1
8.2	Aanbevolen methoden	8—2
8.3	Kennishiaten en knelpunten	8—3
9	Referenties	9—1

Bijlage:

A	Statistiek voor de HR2006.....	A—1
A.1	Inleiding	A—1
A.2	Bovenrivierengebied Rijn en Maas.....	A—1
A.2.1	Afvoer.....	A—1
A.2.2	Wind	A—3
A.3	Benedenrivierengebied Rijn en Maas	A—3
A.3.1	Inleiding.....	A—3
A.3.2	Rijnafvoer Lobith.....	A—4
A.3.3	Maasafvoer Lith	A—5
A.3.4	Zeewaterstand Maasmond	A—7
A.3.5	Windsnelheid en windrichting	A—8
A.3.6	Wind-waterstandstatistiek.....	A—9
A.4	Vecht en IJsseldelta.....	A—10
A.4.1	Inleiding.....	A—10
A.4.2	Vecht (Dalfsen)	A—12

A.4.3	IJssel (Olst)	A-13
A.4.4	IJsselmeer.....	A-13
A.4.5	Correlaties	A-15
A.4.6	Windsnelheid en –richting	A-16
A.5	Meren	A-16
A.5.1	Meerpeilstatistiek IJsselmeer	A-16
A.5.2	Windstatistiek meren	A-18
A.6	Kusten	A-20
A.6.1	Inleiding.....	A-20
A.6.2	Wind	A-21
A.6.3	Waterstand.....	A-21
A.6.4	Golven	A-24

I Inleiding

I.1 Project SBW

De belangrijkste doelstelling van het project Sterkte en Belasting van Waterkeringen (SBW) is het invullen van de belangrijkste kennisleemtes ten behoeve van de toetsing van primaire waterkeringen.

Het SBW bestaat uit 3 deelprojecten:

- veldmetingen;
- randvoorwaarden; en
- faalmechanismen.

De in dit rapport beschreven studie maakt onderdeel uit van het deelproject *SBW – randvoorwaarden*.

I.2 Project statistiek basisvariabelen

Een belangrijk onderdeel uit het project SBW–randvoorwaarden is de statistiek van de natuurlijke variabelen die, direct of indirect, tot falen van een waterkering kunnen leiden. De statistiek beschrijft de relatie tussen de overschrijdingsfrequenties (of overschrijdingskansen) enerzijds en de bijbehorende waarden van de bijbehorende variabele anderzijds. Een voorbeeld van de informatie die wordt vastgelegd met deze statistiek is:

“Een waterstand van NAP+3m bij Hoek van Holland wordt gemiddeld eens per 10 jaar overschreden”

De kennisontwikkeling op het gebied van deze statistiek is nog volop in ontwikkeling. Statistieken van extreme waarden zijn in de regel behept met relatief grote onzekerheden. Deze onzekerheden worden vooral veroorzaakt door het feit dat de statistiek gebaseerd is op meetreeksen met een lengte die veel korter is dan de herhalingscycli waarvoor de statistieken afgeleid worden. Dat betekent dat de statistiek bepaald wordt op basis van extrapolatietechnieken.

Een ander aspect dat bijdraagt aan de bestaande onzekerheden is klimaatverandering. Het breed gedragen beeld is dat meteorologische condities in de toekomst extremer worden als gevolg van klimaatverandering. Dat heeft tot gevolg dat de hydraulische belastingen van onze waterkeringen ook zwaarder zullen worden en daarop moet tijdig geanticipeerd worden. Er bestaat echter grote onzekerheid over de mate waarin het klimaat verandert en de snelheid waarmee dat gebeurt.

Behalve grote onzekerheden speelt ook dat statistische extrapolatie van meetresultaten naar extreme situaties kan leiden tot fysisch onrealistische waarden. In de praktijk gaan onder extreme omstandigheden wellicht fysische begrenzingen een rol spelen die op puur statistische basis niet uit de reeks van waarnemingen geïdentificeerd kunnen worden. Dat kan in sommige gevallen leiden tot een overschatting van hydraulische belastingen, en indirect dus tot een onnodige over-dimensionering van dijken, duinen en kunstwerken. Behalve bovengrenzen zijn er ook fysische fenomenen die onder extreme condities juist aanleiding geven tot een extreme toename van de hydraulische belasting. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is als een meer of reservoir gedurende een extreme afvoergebeurtenis vol loopt en de inkomende rivierafvoer niet meer kan bergen. Dit zal benedenstrooms tot een sterke toename van de afvoer leiden. Het niet in ogenschouw nemen van dergelijke fenomenen kan leiden tot een onderschatting van hydraulische belastingen, en indirect dus tot een onnodige onder-dimensionering van waterkeringen.

In dit rapport staan de volgende vraagstukken centraal:

1. Welke methoden voor het schatten van statistieken van extreme waarden zijn bekend vanuit de literatuur?
2. Welke methoden worden momenteel gebruikt in het kader van de hydraulische randvoorwaarden (HR2006)?
3. Is het voor toekomstige randvoorwaarden zinvol om over te stappen op een andere (alternatieve) methode?
4. Zijn er nog knelpunten/verbeterpunten die aangepakt moeten worden [a] in de bestaande methoden en [b] bij potentiële alternatieven?

1.3 Auteurs en organisatie

Dit rapport is opgesteld door Ferdinand Diermanse, Hanneke van der Klis, Herman Gerritsen en Jacco Groeneweg (allen WL | Delft Hydraulics), Chris Geerse en Jan van Noortwijk (beiden HKV [LIJN IN WATER](#)). Verder heeft Pieter van Gelder (TU Delft) enkele waardevolle suggesties en informatiebronnen aangeleverd.

Het voorliggende rapport is het eindproduct van het project, zoals verwoord in RIZA-opdrachtnummer 4500047390 d.d. 26 juni 2006. De projectbegeleiding bij RWS RIZA was in handen van Houcine Chbab.

2 Aanleiding voor deze studie

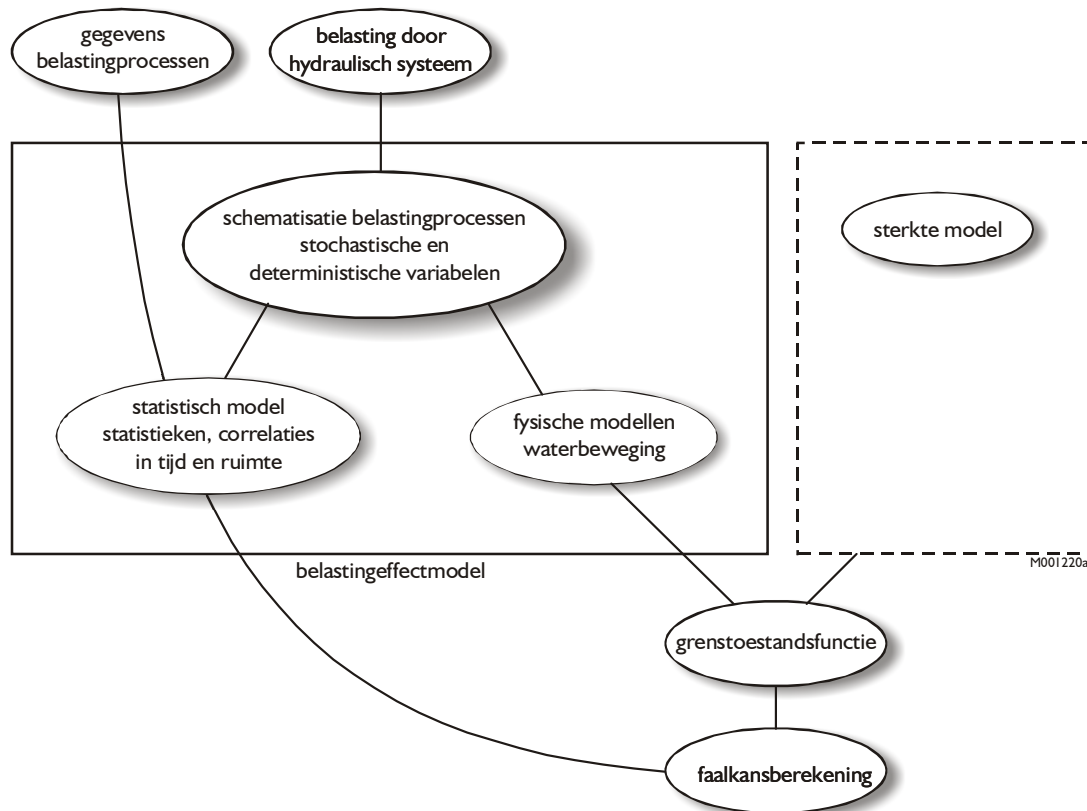
2.1 Hydraulische randvoorwaarden

Sinds januari 1996 is de nieuwe "Wet op de Waterkering" van kracht (WOW, 2002). Middels deze wet is onder andere vastgelegd dat er iedere vijf jaar door de beheerders een toetsing op veiligheid moet plaatsvinden van alle primaire waterkeringen in Nederland. Deze toetsing dient zoveel mogelijk op uniforme wijze uitgevoerd te worden, zowel wat betreft de ontwerpregels (sterkte) als wat betreft de bepaling van de randvoorwaarden (belastingen). Bij de toetsing gaan de beheerders na of de primaire waterkeringen voldoen aan de in de wet gedefinieerde veiligheidsnorm. Deze veiligheidsnorm is voor elk dijkkringgebied gedefinieerd als een toegestane gemiddelde overschrijdingskans - per jaar - van het bezwijken van een primaire waterkering.

Om de toetsing te kunnen uitvoeren moeten tevens de maatgevende hydraulische belastingen bekend zijn. Voor het bepalen van de maatgevende belastingen wordt de wettelijke norm voor de veiligheid in de belastingen verdisconteerd. Deze belastingen worden elke vijf jaar vastgesteld en gepresenteerd in de publicatie "Hydraulische Randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen", oftewel het Hydraulisch Randvoorwaardenboek. De eerste versie van het randvoorwaardenboek is gepubliceerd in 1996, het thans geldende randvoorwaardenboek is vastgesteld en uitgekomen in 2001. De eerstvolgende versie zal in 2006 gereed zijn (HR2006).

2.2 Belastingmodellen

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. De hydraulische randvoorwaarden die voor de vijfjaarlijkse toetsronde worden vastgesteld bestaan uit een *maatgevende* hydraulische belasting. Aangezien de vastgestelde veiligheidsnorm gedefinieerd is als een toegestane gemiddelde overschrijdingskans, wordt deze maatgevende combinatie geselecteerd op basis van overschrijdingskansen van de waterstand en golfkarakteristieken. Figuur 2.1 geeft schematisch de plaats van het belastingmodel weer binnen de faalkansanalyse.

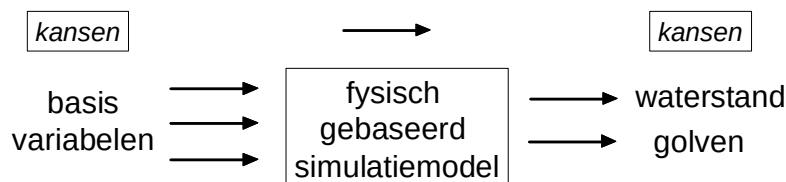


Figuur 2.1 Weergave van de elementen waaruit een belastingmodel wordt opgebouwd, en de plaats binnen de faalkansanalyse.

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. De basis van een dergelijk model bestaat uit statistieken van de belangrijkste invloedsvariabelen op strategisch geselecteerde meetlocaties; de zogenaamde basisvariabelen. Een voorbeeld van een basisvariabele is de hoeveelheid afvoer die per seconde door de Rijn stroomt. In het bovenrivierengebied, waar het getij geen invloed heeft, is deze afvoer bepalend voor de waterstand in de rivier. De statistiek van de afvoer is daarom een belangrijke invoer van het belastingmodel dat voor het bovenrivierengebied wordt toegepast bij het afleiden van hydraulische randvoorwaarden. Paragraaf 4.2 beschrijft hoe deze statistiek is afgeleid uit metingen bij het station Lobith.

In een belastingmodel worden de statistieken van de basisvariabelen vertaald naar statistieken van lokale waterstanden en golven met behulp van simulatiemodellen waarin de relevante fysische processen van het gemodelleerde gebied beschreven zijn. Zo worden voor het benedenrivierengebied mogelijke combinaties van o.a. heersende rivierafvoeren, zeewaterstanden, en windsnelheden met behulp van het stromingsmodel SOBEK vertaald naar lokale waterstanden langs de dijkvakken. Bij de kust worden golven op relatief diep water doorgerekend naar de kust met het golfmodel SWAN.

Het belastingmodel draagt er vervolgens zorg voor dat deze vertaalslag ook in termen van kansen gebeurt. In het voorbeeld van het benedenrivierengebied betekent dit dat de overschrijdingskansen van rivierafvoeren, zeewaterstanden en windsnelheden door het belastingmodel voor elk dijkvak vertaald worden naar overschrijdingskansen van de waterstand (en golven).



Figuur 2.2 Schematisatie van een belastingmodel

2.3 Overzicht van basisvariabelen per gebied

Er zijn verschillende belastingmodellen beschikbaar voor de verschillende watersystemen. Het project SBW concentreert zich op het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden van de *primaire wateren* in en rondom Nederland. Mede met het oog op de bestaande belastingmodellen houden we in deze studie de volgende indeling aan in typen watersystemen:

- Kusten (en estuaria);
- Meren;
- Bovenrivierengebied Rijn/Maas (BOR);
- Benedenrivierengebied Rijn/Maas (BER);
- IJssel en Vecht delta (IJVD)

Onderstaande tabel geeft aan welke variabelen op welke watersystemen van invloed zijn. We beperken ons hierbij tot de “natuurlijke variabelen”. Een variabele als het falen van een kering staat hier niet vermeld, omdat hieraan voor deze studie geen relevante statistiek aan ten grondslag ligt.

Tabel 2.1 Overzicht van de relevante invloedsvariabelen per watersysteem

	watersysteem				
basisvariabele	kusten	meren	BOR	BER	IJVD
wind	x	x	x	x	x
waterstand op zee	x			x	
meerpeil		x			x
golven op zee	x				
rivierafvoeren			x	x	x

Enkele opmerkingen naar aanleiding van deze tabel:

- Golven zijn voor alle gebieden bepalend voor de hydraulische belasting van de kering. Echter, alleen voor de kust speelt het een rol als *basisvariabele* in het belastingmodel. De golfperiode op diep water is namelijk mede bepalend voor de golfperiode voor de kering. In alle andere watersystemen wordt de golfbelasting afgeleid uit de lokale windsnelheid.
- Het meerpeil is een soort van gemiddelde waterstand over het hele meer (IJsselmeer, Markermeer) en dient niet verward te worden de waterstand op een specifieke locatie voor de kering.
- De afvoer van de rivier de Rijn (IJssel) is een zeer belangrijke invloedsvariabele van het IJsselmeerpeil en daardoor mede bepalend voor de mate van belasting langs het IJsselmeer. De reden dat de rivierafvoer desondanks niet genoemd staat als invloedsvariabele van het belastingmodel meren in Tabel 2.1 is dat het IJsselmeerpeil zelf als invloedsvariabele vermeld staat. Hetzelfde geldt voor de waterstand op zee die eveneens van invloed is op het meerpeil (omdat het de spuicapaciteit bij de Afsluitdijk beïnvloedt).

Hoofdstuk 4 beschrijft hoe de statistische verdelingsfuncties van de basisvariabelen zijn vastgesteld in het kader van de HR2006.

2.4 Probleemstelling

De primaire waterkeringen in Nederland zijn berekend op hoge waterstanden met een extreem kleine overschrijdingskans (in de orde van 1 op 1.000 tot 1 op 10.000 keer per jaar). Het schatten van waterstanden met dergelijke kleine overschrijdingskansen is een voorbeeld van *extreme-waardenanalyse*. Vanwege de toepassing van belastingmodellen zijn schattingen nodig van de betrokken basisvariabelen met eveneens extreem lage overschrijdingskansen. Op basis van de metingen worden relaties bepaald tussen enerzijds mogelijke waarden van de variabele, en anderzijds de bijbehorende overschrijdingskans. Bijvoorbeeld:

“Een waterstand van NAP+3m bij Hoek van Holland wordt gemiddeld eens per 10 jaar overschreden”

Deze relatie wordt beschreven met een wiskundige verdelingsfunctie. De reden hiervoor is dat op basis van een dergelijke functie overschrijdingskansen bepaald kunnen worden voor alle mogelijke uitkomsten, dus óók voor waarden die hoger zijn dan ooit gemeten. Deze methode voor het schatten van kansen buiten het bereik van de metingen wordt extrapoleren genoemd. Het probleem hierbij is dat er geen informatie beschikbaar is om de geschatte kansen te valideren. De onzekerheden in de berekende uitkomsten zijn daarom per definitie groot.

Om een voorbeeld te geven: de veiligheidsnorm van dijken in het bovenrivierengebied is 1:1.250 per jaar. Dat betekent dat de dijken in dit gebied gedimensioneerd worden op een afvoer die, *onder de huidige omstandigheden* van klimaat en stroomgebied, naar verwachting eens per 1.250 jaar wordt overschreden. Deze afvoer wordt de *maatgevende*

afvoer genoemd. De geschatte maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith is momenteel vastgesteld op $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (WL, 2004c).

Dit getal van $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ is omgeven met relatief grote onzekerheden. Uit statistische rekentechnieken blijkt dat het zogenaamde 95% betrouwbaarheidsinterval om deze schatting bij benadering gelijk is aan $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dat betekent dat de “werkelijke” maatgevende afvoer (d.w.z. de werkelijke afvoer met een overschrijdingsfrequentie van 1/1.250 per jaar) ergens tussen $13.500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $18.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ligt. Om aan te geven wat dat betekent: langs de Waal resulteert een toename van de maatgevende afvoer met $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in een toename van de benodigde kruinhoogte van orde 30 cm. Met een dergelijke verhoging zijn miljarden Euro’s gemoeid. Ter complicatie geldt bovendien dat er ook grote onzekerheid bestaat over de schatting van de onzekerheid (Van den Boogaard and Diermanse, 2005).

De oorzaak van deze relatief grote onzekerheid ligt in het feit dat de norm van 1/1.250 per jaar nogal extreem is. Eigenlijk hebben we bij deze norm een meetreeks nodig die veel langer is dan 1.250 jaar. In werkelijkheid hebben we voor de Rijn bij Lobith de beschikking over een meetreeks van orde 100 jaar. Met een reeks van deze lengte kunnen we vrij nauwkeurige schattingen maken van de afvoer met een overschrijdingsfrequentie van, bijvoorbeeld, 1:10 per jaar. Bij een overschrijdingsfrequentie van 1:100 jaar neemt de onzekerheid al sterk toe en bij 1:1.250 jaar is deze dus in de orde van $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.5 Doel van dit project

Hoewel in het kader van komende randvoorwaardenboeken de beschikbare meetreeks telkens met 5 jaar in lengte toeneemt en daarmee meer informatie beschikbaar komt zal dit nauwelijks tot een reductie in de onzekerheid leiden. Daarvoor zouden we, bij wijze van spreken, 1.250 jaar of langer moeten wachten. Een reductie in de onzekerheid zal daarom moeten komen van verbeterde methoden voor het schatten van overschrijdingskansen van extreme gebeurtenissen. Dit gegeven vormt het uitgangspunt van dit rapport en geeft aanleiding tot de volgende vraagstukken (ook reeds verwoord in de inleiding):

1. Welke methoden voor het schatten van statistieken van extreme waarden zijn bekend vanuit de literatuur?
2. Welke methoden worden momenteel gebruikt in het kader van de hydraulische randvoorwaarden (HR2006)?
3. Is het voor toekomstige randvoorwaarden zinvol om over te stappen op een andere (alternatieve) methode?
4. Zijn er nog knelpunten/verbeterpunten die aangepakt moeten worden [a] in de bestaande methoden en [b] bij potentiële alternatieven?

Aan elk van deze vier vragen is in het vervolg van dit rapport een hoofdstuk gewijd (hoofdstuk 3 t/m 6).

3 Inventarisatie van statistische methoden

3.1 De klassieke methode: directe extrapolatie

3.1.1 Inleiding

De methode van directe analytische extrapolatie is nog steeds het meest gangbaar in extreme-waardenanalyse, vooral vanwege de relatief eenvoudige toepasbaarheid. Het betreft het fitten van een statistische verdelingsfunctie op een meetreeks. De afgeleide verdelingfunctie geeft de relatie tussen overschrijdingsfrequenties (of gemiddelde herhalingstijden) en de (basis-)variabele (bijvoorbeeld rivierafvoer, golfhoogte of meerpeil).

De functie wordt in de regel verondersteld geldig te zijn voor alle mogelijke uitkomsten van de bemeeten variabele. Bij extreme-waardenanalyses is er vaak sprake van extrapolatie van de functie tot buiten het bereik waarvoor het bewezen heeft goed te functioneren. Daarmee wordt dus expliciet aangenomen dat de afgeleide frequentieverdeling ook geldig is voor uitkomsten van de variabele die (veel) hoger zijn dan de hoogst gemeten waarden in de meetreeks. Dit betekent dat, bijvoorbeeld, een afvoer met een herhalingstijd van 1000 jaar kan worden afgeleid uit de verdelingsfunctie, zelfs als de beschikbare meetreeks slechts een periode van bijvoorbeeld 100 jaar beslaat.

3.1.2 Procedure

De eerste stap in de procedure bestaat uit het selecteren van een deelverzameling uit de beschikbare reeks metingen. In het algemeen wordt ofwel de reeks jaarmaxima geselecteerd, ofwel de reeks maxima die een door de modelleur bepaalde drempelwaarde overschrijden (de zogenaamde ‘peaks over threshold’, of POT-reeks).

Vervolgens wordt een keuze gemaakt van een kansverdelingfunctie, bij voorkeur uit de groep van extreme-waardenverdelingen (bv. Pareto, Gumbel, Weibull). Na de keuze voor de functie worden de parameterwaarden van de functie zodanig gekozen dat de functie zo goed mogelijk past bij de geselecteerde metingen. Er zijn verscheidene procedures beschikbaar om deze fit te vinden, waarvan de “momentenmethode” en de “maximum likelihood methode” het meest gangbaar zijn.

Ten slotte wordt beoordeeld of de verdelingsfunctie een goede gelijkenis vertoont met de metingen. Daartoe wordt een schatting gemaakt van de overschrijdingskans uit de geselecteerde deelverzameling van metingen. Deze schatting is gebaseerd op de lengte van de meetperiode en het aantal keren dat het betreffende maximum is overschreden in de meetperiode. Deze geschatte kans wordt gebruikt als “plotpositie” om deze visueel te kunnen vergelijken met de uitkomst die uit de gefitte verdelingsfunctie volgt. Behalve visuele vergelijkingen zijn er ook kwantitatieve vergelijkingen mogelijk, zoals de “Kolmogov-Smirnov” toets of de chi-kwadraattoets.

In de hier beschreven procedure moet de gebruiker de volgende keuzes maken:

1. de deelverzameling metingen waarop de statistiek uiteindelijk gebaseerd wordt;
2. de kansverdelingfunctie waarmee een fit op de reeks uit stap 1 wordt afgeleid; en
3. een methode om de fit mee af te leiden.

Voor elk van deze onderdelen zijn in de literatuur diverse methoden te vinden. Zeker in het geval van extrapolatie naar extreme waarden van de variabelen kunnen de te maken keuzes grote gevolgen hebben op de uitkomst. In het vervolg van deze paragraaf geven we een inventarisatie van deze methoden.

3.1.3 Selectie van maxima

De selectie van gegevens uit beschikbare meetreeksen die gebruikt worden om de statistiek van extreme waarden af te leiden is een essentiële stap in het hele proces. In de praktijk blijkt vaak dat deze keuze een grote invloed heeft op de berekende overschrijdingskansen (zie bijvoorbeeld (WL, 2004b; Repko et al., 2004)).

We onderscheiden drie methoden om gegevens te selecteren voor een extreme-waardenanalyse:

1. De maxima in tijdsintervallen van gelijke lengte van een relatief lange (deel)reeks van metingen, die voor deze intervallen als statistisch onafhankelijk kunnen worden beschouwd. Over het algemeen worden hier jaarmaxima gebruikt. Opgemerkt wordt dat bij het bepalen van de jaarmaxima doorgaans geen kalenderjaren worden gebruikt, maar zogenaamde “hydrologische jaren”. De begindatum van een dergelijk jaar verschilt van fenomeen tot fenomeen, maar de overeenkomst is dat de begindatum gekozen wordt in een periode van het jaar waar doorgaans geen extremen plaats vinden. De reden hiervoor is om zo te kunnen werken met een duidelijk afgebakend “hoogwaterseizoen” of “stormseizoen”.
2. De r grootste waarden in tijdsintervallen van gelijke lengte per relatief lange (deel)reeks van metingen, waarbij r een klein getal is. Bijvoorbeeld de 3 hoogste rivierafvoeren per jaar. Deze methode wordt in de praktijk weinig toegepast.
3. De zogenaamde Peaks over Threshold (POT) methode, waarin de maxima worden geselecteerd van de deelreeksen die boven een gekozen hoge drempelwaarde, d , liggen. Bijvoorbeeld de maxima van de periodes waarin de Rijnafvoer hoger is dan $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$. De keuze van deze drempelwaarde is tot op zekere hoogte subjectief en vaak van grote invloed op de afgeleide statistiek. Verder is het hierbij van belang om onafhankelijke metingen te selecteren. Maxima die kort na elkaar optreden behoren namelijk vaak tot dezelfde gebeurtenis. Daarom wordt bij deze methode vaak een zichtduur gehanteerd: een minimale tijdsperiode die tussen twee opeenvolgende maxima moet zitten opdat deze als onafhankelijk gekenmerkt worden. Bij deze methode wordt is de frequentie van overschrijden van een bepaald niveau, x (waarbij x boven drempelwaarde d ligt) gelijk aan het product van de frequentie van overschrijden van de drempelwaarde d en de conditionele kans van overschrijden van x gegeven dat deze groter is dan d .

3.1.4 Keuze van de verdelingsfunctie

Volgens de extreme-waardentheorie (zie bijv. WL, 2006a) zijn de volgende verdelingsfuncties geschikt om de statistiek van de belastingsvariabelen te beschrijven:

- Als de jaarmaxima geselecteerd zijn:
 - Gumbelverdeling,
 - Fréchetverdeling,
 - Weibull-verdeling,
- Als de Peak over Threshold methode is gebruikt om gegevens te selecteren:
 - Exponentiële verdeling,
 - Paretoverdeling,
 - Betaverdeling.

De theorie van de extreme waarden is echter gebaseerd op de aanname van homogene meetreeksen (d.w.z. onveranderde omstandigheden in het gebied) en een (bij benadering) oneindig lange meetreeks. In de praktijk zijn er echter daarom ook andere verdelingsfuncties die veelvuldig met succes zijn toegepast in extreme-waardenanalyses:

- Pearson III verdeling (3 parameter gamma verdeling);
- Logpearson verdeling;
- Lognormale verdeling;
- Conditionele Weibull-verdeling;
- Rayleigh verdeling.

3.1.5 Parameterschatting bij verdelingstype

Er is in de onderzoeksgemeenschap geen consensus over de vraag wat de beste methode is om parameters te schatten van een gegeven verdelingsfunctie, zodat de functie zo goed mogelijk fit op de meetgegevens. Een uitgebreid overzicht en een bespreking en vergelijking van methoden wordt gegeven door (Van Gelder, 2003) waarin ook een uitgebreid overzicht gegeven wordt van literatuur over dit onderwerp. Bekende methoden voor het schatten van parameters zijn bijvoorbeeld:

- Momentenmethode;
- Maximum Likelihood Methode;
- Kleinste Kwadraten methode;
- Bayesiaanse schattingsmethode; en
- L-Momenten Methode.

In het artikel van (Van Gelder, 2003) wordt onderzocht in hoeverre deze methoden de werkelijke parameters van een verdelingsfunctie, F , te schatten op basis van reeksen van synthetische gegevens die gegenereerd zijn met verdelingsfunctie F . Voor de beoordeling zijn verschillende relevante criteria gebruikt, zoals de bias en de variantie van de resulterende schatting.

Welke methode het meest geschikt is voor een gegeven verdelingsfunctie kan niet op voorhand gezegd worden. Dit hangt onder meer af van de grootte van de dataset, de achterliggende verdelingsfunctie en het criterium waarop je de verdelingen beoordeelt. Dat blijkt ook uit het literatuuroverzicht dat door (Van Gelder, 2003) is uitgevoerd naar vergelijkbare studies. Een dergelijke conclusie voor “laboratoriumstudie” met vooraf aangenomen verdelingsfuncties, is hoogstwaarschijnlijk ook valide voor de “werkelijke wereld”. Bij het vergelijken van de hierboven genoemde vijf statistische schattingsmethoden is het echter wel van belang op te merken dat de Bayesiaanse schattingsmethode de enige methode is, die expliciet rekening houdt met de statistische onzekerheid als gevolg van een gebrek aan gegevens.

3.1.6 Toetsen

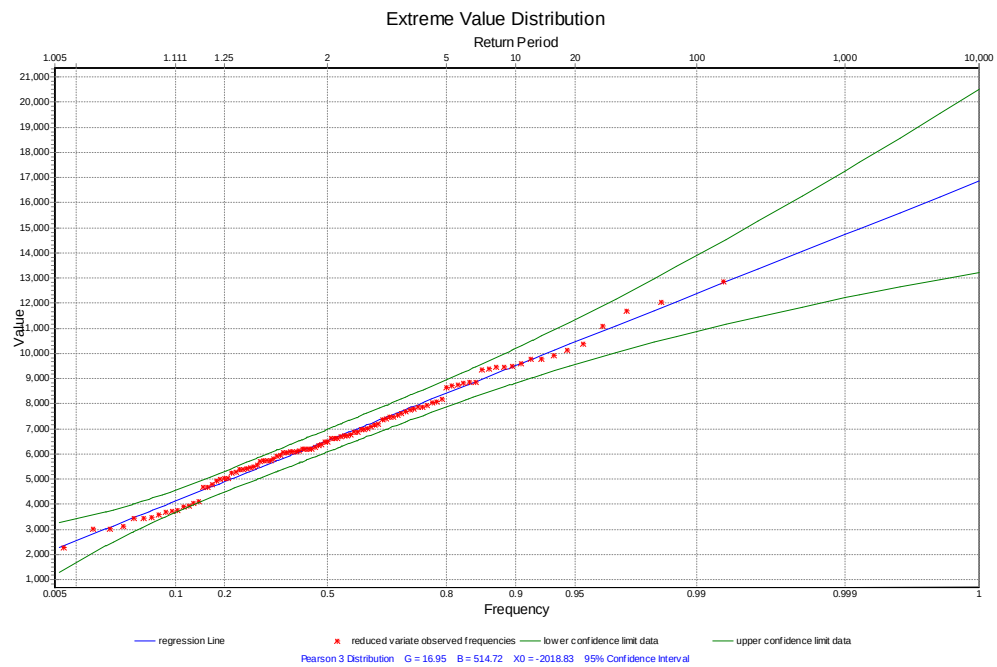
Ten slotte wordt beoordeeld of de verdelingsfunctie een goede gelijkenis vertoont met de metingen. Daartoe wordt voor elke waarde uit de reeks jaarmaxima of POT-reeks een schatting gemaakt van de overschrijdingskans, doorgaans op basis van de volgende formule:

$$P = \frac{r - c}{N + 1 - 2c} \quad (3.1)$$

waarin:

- P = overschrijdingskans
- c = plotconstante
- N = aantal tijdseenheden (meestal jaren)
- 1 = rankingnummer (1 voor de hoogste waarde, 2 voor de één na hoogste, etc)

De waarde van c is vrij te kiezen binnen het interval [0,1). Vervolgens worden deze initiële schattingen vergeleken met de gefitte verdelingsfunctie. Figuur 3.1 laat een voorbeeld zien van een dergelijke vergelijking voor gemeten afvoeren van de Rijn bij Lobith. Over het algemeen liggen de metingen dicht in de buurt van de centrale lijn (de omliggende twee lijnen geven het betrouwbaarheidsinterval weer). Hieruit blijkt dat de fit in orde is. Er zijn echter ook andere verdelingsfuncties denkbaar die een vergelijkbare of wellicht zelfs betere mate van fit geven.



Figuur 3.1 Fit van de Pearson-III verdeling op de reeks jaarmaxima van de Rijn bij Lobith (reeks gehomogeniseerd naar de toestand van 1977).

Indien de visuele fits onvoldoende uitsluitsel geven over welke verdelingsfunctie de beste is, is het raadzaam om enkele kwantitatieve “goodness-of-fit” testen uit te voeren. Een bekend voorbeeld daarvan is de *Kolmogorov-Smirnov toets*, waarin het maximale verschil bepaald wordt tussen de gefitte verdelingsfunctie, $F(x)$, en de empirische verdelingsfunctie, $F'(x)$, die direct volgt uit de metingen:

$$K = \max_x |F(x) - F'(x)| \quad (3.2)$$

De empirische verdelingsfunctie, $F_e(x)$, wordt als volgt bepaald:

$$F_e(x) = \begin{cases} 0 & \text{als } x < x_1 \\ \frac{i}{n} & \text{als } x_1 \leq x < x_N \\ 1 & \text{als } x \geq x_N \end{cases} \quad (3.3)$$

waarin $0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_N$ de geselecteerde verzameling metingen zijn. Deze toetsingsmethode werkt met name goed als slechts een relatief klein aantal samples beschikbaar is, omdat dan mogelijke verschillen tussen de empirische en de theoretische verdelingsfunctie aan het licht komen. Het nadeel is dat dit criterium over het algemeen te weinig onderscheidend is, met andere woorden het is doorgaans moeilijk om een nul-hypothese af te wijzen op basis van dit criterium.

De chi-kwadraattoets van afhankelijkheid stelt altijd de vraag of één variabele statistisch afhankelijk is van een andere. In dit geval gaat het om de afhankelijkheid tussen de metingen en de gefitte verdelingsfunctie. De empirische *kansdichtheidsfunctie* van de metingen wordt vergeleken met de empirische kansdichtheid van de gefitte verdelingsfunctie. Hierin onderscheidt de toets zich van de Kolmogorov-Smirnov toets waar de (empirische) *kansverdelingsfunctie* wordt gebruikt. Het probleem hierbij is dat voor de kansdichtheidsfunctie relatief veel waarnemingen nodig zijn voor een realistische schatting. Deze toets werkt derhalve niet bij een gering aantal waarnemingen.

Stel dat we de ruimte van mogelijke uitkomsten opdelen in een grid $\{x_j\}_{j=1..N}$. Een eenvoudige schatting van de empirische kansdichtheid is als volgt:

$$f_e(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^M 1_{[x_j - \frac{1}{2}\Delta x < x_i < x_j + \frac{1}{2}\Delta x]}}{M \Delta x} \quad j = 1..N \quad (3.3)$$

Met andere woorden: tel het aantal waarnemingen binnen een interval ter grootte Δx om het punt x_j heen. afstand en deel dat door het totale aantal waarnemingen en door Δx . Als nu de waarnemingen afkomstig zijn uit verdelingsfunctie F , met kansdichtheidsfunctie f , dan is de volgende grootte:

$$Y^2 = \sum_j \frac{(f(x_j) - f_e(x_j))^2}{f_e(x_j)} \quad (3.4)$$

bij benadering Chi-kwadraat verdeeld met $n-1-k$ vrijheidsgraden, waarbij k het aantal parameters van de gefitte verdelingsfunctie is. De waarde van Y kan rechtstreeks uit de metingen en de gefitte verdelingsfuncties bepaald worden. Stel dat de uitkomst een bepaalde waarde Y^* is. Dan is het vervolgens zaak om uit de chi-kwadraat verdeling de kans te bepalen dat $Y \geq Y^*$. Als deze kans klein is (bijvoorbeeld kleiner dan 5%) dan wordt de hypothese verworpen dat waarnemingen afkomstig zijn uit de gefitte verdelingsfunctie F . Anders gezegd: verdelingsfunctie F wordt verworpen als zijnde een geschikte beschrijving van de waarnemingen.

In het algemeen zullen diverse verdelingen aansluiten bij de metingen. Welke daarvan de statistiek van extreme waarden het beste beschrijft kan niet altijd eenduidig worden geverifieerd. Zo geven statistische toetsen als de chi-kwadraat-toets en de Kolmogorov-Smirnov-toets vaak onvoldoende uitsluitsel. Een alternatief voor deze toetsen, bekend uit de klassieke statistiek, is de Bayesiaanse statistiek (Chhab en Van Noortwijk, 2002; Van Noortwijk et al., 2004). Met behulp van zogenoemde Bayesfactoren kan – gegeven de waarnemingen – worden bepaald wat de kans is dat een bepaalde kansverdeling bij de waarnemingen past. Analyses met schaal- of numerieke modellen geven mogelijk nog meer inzicht in welke kansverdelingen de ‘beste’ is.

Opgemerkt dient te worden dat voor alle toetsmethoden geldt dat de vergelijkingen tussen metingen en gefitte verdelingen alleen uitgevoerd kunnen worden voor het gemeten bereik en derhalve geen zekerheid kunnen verschaffen over het extreme bereik. De toetsen kunnen daarom alleen *vertrouwen* geven ten aanzien van de validiteit in het extreme bereik.

3.1.7 Bayesiaanse statistiek

De twee belangrijkste onzekerheden, waarmee rekening moet worden gehouden bij het bepalen van een extreme waarde statistieken zijn de inherente en de statistische onzekerheid. Inherente onzekerheid betreft de onzekerheid die van nature in een fysisch systeem aanwezig is. Vanwege de natuurlijke fluctuaties in de tijd is het bijvoorbeeld niet mogelijk om de afvoer van volgende week of volgend jaar exact te voorspellen. Statistische onzekerheid ontstaat indien er voor het schatten van de parameters van een kansverdeling te weinig gegevens beschikbaar zijn. Hoe meer waarnemingen, des te kleiner is de statistische onzekerheid. Ook de onzekerheid met betrekking tot de keuze van het type kansverdeling behoort tot de statistische onzekerheid.

Voor het schatten van kansverdelingen, waarmee zowel inherente als statistische onzekerheid kan worden gemodelleerd, is de Bayesiaanse statistiek geschikt. Hiermee is het mogelijk om rekening te houden met de statistische onzekerheid in zowel de verdelingsparameters als het type kansverdeling. Zo wordt aangenomen dat iedere parameter onzeker is en dat de resulterende kansverdeling een gewogen gemiddelde is van de beschouwde verdelingen. Er worden zogenaamde Bayesgewichten berekend, die afhankelijk zijn van de kwaliteit van de fit. De Bayesgewichten zijn gedefinieerd op basis van Bayesfactoren (Kass en Raftery, 1995). Bayesfactoren kunnen worden toegepast om, uitgaande van a priori kansen dat bepaalde hypothesen, kansmodellen of kansverdelingen juist zijn, de a posteriori kansen te bepalen wanneer waarnemingen beschikbaar zijn. De termen ‘a priori’ en ‘a posteriori’ betekenen hier respectievelijk ‘voordat de waarnemingen beschikbaar zijn’ en ‘nadat de waarnemingen beschikbaar zijn’. De bijbehorende Bayesgewichten zijn groter naarmate de waarschijnlijkheid van optreden van de waarnemingen groter is. Bij het berekenen van de waarschijnlijkheid van de waarnemingen worden statistische onzekerheden uitgeïntegreerd. Hierbij wordt meestal aangenomen dat er – voordat er waarnemingen beschikbaar zijn – geen a priori informatie aanwezig is. De resulterende overschrijdingskans is gedefinieerd als het gewogen gemiddelde van de per kansverdeling geschatte overschrijdingskansen. De gewogen middeling vindt plaats over de afzonderlijke overschrijdingskansen op basis van de berekende Bayesgewichten.

Naast de gangbare aanname dat er bij een statistische analyse geen a priori informatie aanwezig is het in de Bayesiaanse aanpak ook mogelijk om andere bronnen van informatie in de schatting mee te nemen. Er wordt in zo’n geval wel a priori informatie meegenomen, namelijk beschikbare informatie voordat de steekproef genomen is of metingen verricht zijn. Een informatieve a priori verdeling voor de statistische parameters van de kansverdeling van de Rijnafvoer zou bijvoorbeeld informatie kunnen bevatten over de geldende fysica (zoals het fysisch maximum) en/of opgetreden afvoeren vóór de periode waarvoor betrouwbare afvoermetingen beschikbaar zijn. Er zijn verschillende mogelijkheden om die a priori informatie mee te nemen: via expertmeningen of een analyse van opgetreden data en informatie uit vergelijkbare situaties. In het geval van afvoeren zou ook informatie gebruikt kunnen worden van een andere rivier met dezelfde karakteristieken als de Rijn.

Er moet wel op gelet worden dat de a priori kansverdeling onafhankelijk is van de waarnemingen waarmee de a posteriori kansverdeling bepaald wordt.

3.2 Probabilistische rekentechnieken

3.2.1 Inleiding

In tegenstelling tot de methode van directe extrapolatie houden probabilistische methoden in de regel expliciet rekening met de fysische processen die de dynamiek van de variabele waarin men geïnteresseerd is beschrijft (in het vervolg duiden we laatstgenoemde variabele aan als de “doelvariabele”, om onderscheid te maken met variabelen die de onderliggende fysische processen beschrijven; de doelvariabele kan bijvoorbeeld één van de eerder beschreven basisvariabelen zijn). In dergelijke methoden wordt een stap terug (of meerdere stappen) gedaan in de “oorzaak-gevolg” keten. De belangrijkste processen (invloedsvariabelen) die ten grondslag liggen aan extreem hoge waarden van de doelvariabele worden in kaart gebracht en beschreven met stochastische variabelen. Bijvoorbeeld: in het benedenrivierengebied worden hoge waterstanden veroorzaakt door hoge waterstanden op zee, hoge rivierafvoeren, of een combinatie van beide factoren.

Vervolgens worden [a] verdelingsfuncties vastgesteld voor deze invloedsvariabelen en [b] een relatie gelegd tussen de invloedsvariabelen en de doelvariabele door middel van een fysisch gebaseerd simulatiemodel. In feite is deze aanpak dezelfde als die geschetst is voor belastingmodellen (zie hoofdstuk 2). Op basis van deze aanpak kan een verdelingsfunctie van de doelvariabele afgeleid worden waarin rekening gehouden is met de relevante fysische processen (middels het simulatiemodel). Er zijn vele methoden waarop de verdelingsfunctie van de doelvariabele bepaald kan worden. We bespreken hier kort de meest gebruikte methoden:

- Numerieke integratie,
- Numerieke integratie met Principal Component Analysis,
- Klassieke Monte Carlo analyse,
- Varianten van de klassieke Monte Carlo analyse.

3.2.2 Numerieke integratie

De volgende vijf stappen worden uitgevoerd om de overschrijdingskansen van de gewenste variabelen af te leiden:

1. definitie van de stochastische variabelen (invloedsvariabelen);
2. opdelen van het bereik van elke stochastische variabele in een aantal klassen;
3. bepalen van de kans op voorkomen per klasse voor elke stochastische variabele op basis van de beschikbare reeks metingen (in de regel met behulp van de methoden uit paragraaf 3.1);
4. berekenen van de maximale waarde van de doelvariabele met behulp van het fysisch gebaseerde simulatiemodel voor alle mogelijke combinaties van realisaties van de stochastische variabelen (hetgeen een eindig aantal is vanwege de gedefinieerde klassen);

5. combineren van de kansen als bepaald in stap 3 en de maxima als berekend in stap 4 tot een verdelingsfunctie van de doelvariabele.

In stap 5 worden voor een gegeven waarde, x , van de doelvariabele de gesimuleerde gebeurtenissen geïdentificeerd die leiden tot een overschrijding van x . De overschrijdingskans van x is bij benadering gelijk aan de som van de kansen op voorkomen van deze gebeurtenissen. De kans op voorkomen per gebeurtenis wordt bepaald op basis van de statistiek die in stap 3 is afgeleid. Door deze procedure te herhalen voor verschillende waarden van x ontstaat een kansverdelingsfunctie van de doelvariabele.

3.2.3 Klassieke Monte Carlo analyse (crude Monte Carlo)

In essentie bestaat de Monte Carlo (MC) methode uit een groot aantal deterministische simulaties met een fysisch model, waarbij voor elke afzonderlijke simulatie de onzekere parameters en randvoorwaarden random zijn gegenereerd op basis van vooraf vastgestelde kansverdelingen. Dankzij het random karakter van de invoer bestaat ook de verzameling modelresultaten uit random trekkingen uit de kansverdeling van de uitvoer. Daarom kunnen met behulp van standaard statistische technieken statistische eigenschappen van de modeluitvoer worden geschat. De theorie rond de MC methode wordt beschreven door vele auteurs (o.a. Hammersley en Handcomb, 1964; Rubinstein, 1982; Morgan en Henrion, 1990).

Voor een gegeven waarde, x , van de doelvariabele wordt de overschrijdingskans als volgt bepaald:

1. definitie van de stochastische variabelen (basisvariabelen);
2. uitvoeren van N trekkingen van combinaties van de stochastische variabelen;
3. berekenen van de maximale waarde van de doelvariabele met behulp van het fysisch gebaseerde simulatiemodel voor alle N realisaties uit stap 2;
4. bepalen voor hoeveel gebeurtenissen (M) uit stap 3 niveau x wordt overschreden;
5. bepalen van de overschrijdingskans, p , van niveau x , met de eenvoudige rekenregel: $p=M/N$.

De MC methode maakt geen vereenvoudigingen in de modelstructuur om onzekerheden in de modeluitvoer te kwantificeren. Om die reden is de MC methode populair voor onzekerheidsanalyses van complexe niet-lineaire modellen. Het soms grote aantal benodigde trekkingen voor een betrouwbaar resultaat kan een belangrijk nadeel van de methode zijn. Met name voor het schatten van extreem kleine overschrijdingskansen zijn veel trekkingen nodig. Dit komt doordat bij extreem kleine overschrijdingskansen slechts een klein deel (mogelijk zelfs geen) van de N trekkingen leidt tot een overschrijding van niveau x . Dat betekent dat er relatief weinig informatie beschikbaar is over de extremen en de onzekerheid in de schatting van de overschrijdingskans daardoor relatief groot is. Dit kan gecompenseerd worden door het opvoeren van het aantal trekkingen, N , maar dat heeft weer als nadeel dat dan de benodigde rekentijd toeneemt.

3.2.4 Varianten van de klassieke Monte Carlo methode

Om het aantal simulaties dat nodig is voor een Monte Carlo analyse te beperken zijn alternatieve methoden ontwikkeld waarmee meer “gerichte” trekkingen worden uitgevoerd, zoals:

- Latin hypercube sampling
- Importance sampling
- Directional sampling
- Extreme-waardenschaling

Het doel van *Latin Hypercube Sampling* (LHS) is de trekkingen meer gelijk te verdelen over het parameterbereik vergeleken met random trekkingen (McKay et al., 1979). Hiertoe wordt het bereik van elke individuele stochast verdeeld in n elkaar niet overlappende intervallen van gelijke kans. Vervolgens worden random waarden getrokken voor elk van de stochasten, zodanig dat uit elk interval precies één waarde wordt getrokken. De getrokken waarden worden willekeurig gecombineerd tot n combinaties van ‘Latin Hypercube trekkingen’, waarin elke combinatie één waarde van elke stochast bevat.

Het blijkt dat LHS efficiënter is in geval van monotone relaties (McKay et al., 1979; Helton en Davis, 2002), maar niet altijd in geval van niet-monotone relaties (Helton en Davis, 2002; Van der Klis, 2003). In het laatste geval is LHS nooit minder efficiënt dan crude sampling, maar op voorhand kan niet worden gezegd of het daadwerkelijk efficiënter is.

Merk op dat LHS niet speciaal gericht is op het schatten van extreem kleine kansen. Dit maakt deze trekkingsmethode waarschijnlijk minder geschikt voor extreme-waardenanalyses.

Importance Sampling kan een geschikte trekkingsmethode zijn als men vooral geïnteresseerd is in een specifiek deel van de uitvoerverdeling. In geval van extreme-waardenanalyses is dit bijvoorbeeld het geval omdat we voornamelijk geïnteresseerd zijn in kleine overschrijdingskansen. Het idee van Importance Sampling is dat de kansverdelingen van (een aantal van) de stochasten zo worden aangepast dat een groter deel van de trekkingen leidt tot extreme situaties (Clark, 1961). Door deze verstoring achteraf te compenseren kan de kans op de extreme gebeurtenis worden geschat met een kleiner aantal trekkingen.

De efficiëntie van Importance Sampling hangt voor een belangrijk deel af van de keuze van de ‘verstoorde verdeling’. Een verkeerde keuze kan juist een grotere variantie in de schatting tot gevolg hebben. Inzicht in het model en ervaring met Importance Sampling zijn vereist om deze methode op een verantwoorde manier toe te passen. Echter, als het lukt, biedt het ook de mogelijkheid om grote reductie van het benodigde aantal trekkingen te bewerkstelligen.

Directional Sampling is een speciale vorm van Importance Sampling. De methode gaat uit van een probleemdefinitie in de vorm van een faalfunctie Z , waarbij een systeem ‘faalt’ als $Z < 0$. De variabelen U waarin Z is uitgedrukt worden (eventueel na transformatie) verondersteld standaard normaal verdeeld te zijn. Bij Directional Sampling worden poolcoördinaten getrokken (in plaats van cartesische coördinaten, zoals bij eenvoudige random trekking). Hierbij wordt de hoek random getrokken, terwijl de kans dat de straal een

waarde heeft waarbij falen optreedt analytisch wordt uitgerekend (Vrouwenfelder et al., 1997) of bepaald met behulp van een iteratie procedure (Waarts, 2003). De wiskundige details van Directional Sampling staan beschreven in Ditlevsen en Bjerager (1987) en Ditlevsen en Madsen (1996, Hoofdstuk 9).

Waarts (2003a,b) laat zien dat het benodigde aantal Directional Sampling trekkingen kleiner is dan het aantal eenvoudige random trekkingen, waarbij het aantal Directional Sampling trekkingen toeneemt met het aantal stochasten en de vereiste nauwkeurigheid. Vaak vereist een Directional Sample meerdere modelsimulaties, vanwege de iteratieprocedure om de straal te bepalen waarvoor precies falen optreedt. Hierdoor wordt random trekken toch weer efficiënter voor hoogdimensionale problemen (Waarts noemt $n > 100$, onder aanname van 4 simulaties per iteratieprocedure).

In het onderzoek 'Gevoeligheidsanalyse Probabilistische Belastingmodellen en Rekentechnieken' (Vrouwenfelder et al., 1997) is onder andere Directional Sampling toegepast op verschillende Belastingmodellen voor verschillende case studies.

Extreme-waardenschaling verkleint het benodigde aantal trekkingen door trekkingen in een domein met een relatief hoge kansdichtheid (die dus veel voorkomen in een random trekking) te verschuiven naar het faaldomein, wat overeenkomt met een domein met een lage kansdichtheid. De gezochte faalkans wordt benaderd door eerst de faalkans te berekenen op basis van de verschoven trekkingen en deze vervolgens te vermenigvuldigen met een correctiefactor die volgt uit de toegepaste verschuiving. De richting van deze verschuiving wordt bepaald door de vorm van de staart van de gezamenlijke verdelingsfunctie. De bepaling van deze richting voor een willekeurige gezamenlijke verdelingsfunctie is niet zo eenvoudig, met uitzondering van gevallen van asymptotische afhankelijkheid of volledige onafhankelijkheid. De toegepaste verschuiving kan in meer of mindere mate invloed hebben op de geschatte faalkans, afhankelijk van de vorm van het faaldomein. Een voorbeeld van extreme waarden schaling is de "methode de Haan" (De Haan en Resnick, 1977) die aan de basis ligt van het rekenprogramma Hydra_K, waarmee de hydraulische randvoorwaarden voor dijken langs de Nederlandse kust bepaald worden.

3.3 Overige methoden

3.3.1 Inleiding

Paragraaf 3.1 en paragraaf 3.2 gaven een *algemene* beschrijving van directe extrapolatie en probabilistische rekentechnieken met een fysische inslag. In paragraaf 3.3 beschrijven we enkele specifieke rekentechnieken en methoden die toegepast worden in extreme-waardenanalyse.

3.3.2 Regionale frequentie analyse

Bij een regionale frequentie analyse, kortweg RFA, worden meetgegevens van diverse locaties met gelijkwaardige fysische eigenschappen vertaald naar de locatie waar men een verdelingsfunctie wil afleiden. Het gevolg is dat de reeks (veel) meer data bevat en de extrapolatie daardoor betrouwbaarder wordt geacht. Na extrapolatie met die 'verlengde' reeks wordt het resultaat weer teruggeschaald. RFA staat ook bekend onder het principe

"trading space for time". Voor een uitgebreide beschrijving van deze methode verwijzen we naar (Hosking and Wallis, 1997) en (Van Gelder, 1999).

Van belang bij deze methode is om vast te stellen of de betrokken locaties inderdaad gelijkwaardige fysische eigenschappen bezitten en, vertaald naar de statistiek, homogeen zijn. Hosking en Wallis [1993] hebben diverse methoden ontwikkeld om dit te bepalen op basis van de meetreeksen, de meeste gebaseerd op zogenaamde. "L-moments" (Hosking, 1990), een relatief recent gedefinieerde karakteristiek van verdelingsfuncties. De L-momentenmethode maakt gebruik van lineaire combinaties van verwachtingen van steekproefkwantielen ("order statistics").

3.3.3 Resampling

Resampling is een techniek waarbij een groot aantal random trekkingen wordt verricht uit de beschikbare meetreeksen (of een deel ervan, zoals bijvoorbeeld stormmaxima). Het resultaat van deze trekkingen is een verzameling "synthetische" meetreeksen" waarop verdere statistische analyses uitgevoerd kunnen worden. Deze techniek wordt met name toegepast bij het bepalen van betrouwbaarheidsbanden. Voor elk van de synthetische meetreeksen wordt dan de gezochte statistiek bepaald (zoals parameters van verdelingsfuncties en bijbehorende kwantielen). De variatie in de uitkomsten geven een beeld van de onzekerheden in de uitkomsten.

De meest gebruikte resamplingtechnieken zijn 'JackKnife' en 'Bootstrap', zie bijvoorbeeld Tichelaar and Ruff (1989), Efron (1982) or Wu (1986). Bij JackKnife wordt een synthetische reeks verkregen door een vastgesteld aantal van j elementen te trekken uit de N beschikbare metingen. De trekkingen worden zonder teruglegging verricht, dat wil zeggen elke waarneming x_i kan hooguit één keer voorkomen in een synthetische reeks. Bij Bootstrap wordt een synthetische reeks verkregen door exact N elementen te trekken uit de N beschikbare metingen. In dat geval worden de trekkingen mét teruglegging verricht, dat wil zeggen een meting kan mogelijk meer dan één keer in de synthetische reeks opgenomen worden. Bij beide methoden wordt op basis van de afgeleide parameters van de verdelingsfuncties het gemiddelde en de standaarddeviatie bepaald. In het geval van Bootstrap gebeurt dat op de klassieke manier, bij JackKnife moet een kleine correctie toegepast worden bij het berekenen van de standaarddeviatie (zie Van den Boogaard en Diermanse, 2005).

Behalve voor het vaststellen van onzekerheden kan resampling ook toegepast worden om overschrijdingskansen van extreme (onbemeten) gebeurtenissen te schatten. In dat geval wordt resampling toegepast op het tijdsverloop van bestaande extreme gebeurtenissen om zo nieuwe extreme(re) gebeurtenissen te genereren. Een voorbeeld van een dergelijke toepassing is de zogenaamde "neerslaggenerator" die we in paragraaf 5.3 in meer detail bespreken.

3.3.4 Samengestelde verdelingsfuncties

Voor een aantal basisvariabelen geldt dat deze onderling afhankelijk zijn, zoals bijvoorbeeld windsnelheid en waterstand op zee of de afvoer van de Rijn en de afvoer van de Maas. Voor 2 variabelen die statistisch afhankelijk zijn, geldt dat de waarde van de één iets zegt over de kansverdeling van de uitkomst van de ander. In de regel heeft dit tot gevolg dat kans op een extreme belasting van de waterkering toeneemt omdat de kans op het samenvallen van de verschillende “bedreigingen” worden vergroot.

Voor het beschrijven van deze afhankelijkheid zijn samengestelde verdelingsfuncties nodig, d.w.z. verdelingsfuncties die de gezamenlijke kansdichtheid van twee of meerdere afhankelijke variabelen beschrijven. Om pragmatische redenen wordt vaak de verwachtingswaarde van een variabele geschreven als functie van de uitkomst van een andere variabele. Vervolgens wordt er rondom deze variabele een normale verdelingsfunctie gesuperponeerd om de onzekerheid in de uitkomst te kwantificeren. Bijvoorbeeld: Als de windsnelheid hoog is en de wind uit het noordwesten komt dan is er bij Hoek van Holland *naar verwachting* een hoge waterstand. In die zin is er een verband tussen de heersende waarde van de windsnelheid en de verwachtingswaarde van de waterstand. De exacte waarde van de waterstand is echter niet te herleiden uit de windsnelheid, omdat andere factoren ook van belang zijn (getij, duur van de storm, draaien van windrichtingen). Vandaar daar een element van onzekerheid wordt toegevoegd aan de verwachtingswaarde, doorgaans in de vorm van een normale verdelingsfunctie.

Het beschrijven van samengestelde verdelingen en correlatie is het onderwerp van een ander deelproject van SBW. In dit rapport gaan we daarom niet uitgebreid in op dit onderwerp. Min of meer ter illustratie beschrijven we een voorbeeld van een toepassing waarin statistische afhankelijkheid een rol van betekenis speelt. Het betreft een studie naar de relatie tussen de offshore golfhoogte en golfperiode. In een publicatie van (Repko et. al, 2004) zijn vijf verschillende “modellen” gebruikt om deze samenhang te beschrijven:

1. de bivariaat lognormale verdeling;
2. de bivariaat lognormale verdeling met correctie (voor scheefheid);
3. een conditionele verdeling van de piekperiode gegeven de golfhoogte, waarbij schaalparameter, de locatieparameter en de vormparameter allen een functie zijn van de golfhoogte¹;
4. een model, gebaseerd op de aanname van constante golfsteilheid;
5. een complex bivariaat model van Morton en Bouwers.

¹ In de uiteindelijke toepassing in de publicatie van (Repko et al, 2004) is overigens een normale verdeling gebruikt als kansverdeling van de piekperiode (Pieter van Gelder, persoonlijke communicatie)

In eerste instantie werden de resultaten van deze modellen in de studie van (Repko et al., 2004) verstoord door effecten van deining. In omstandigheden van relatief beperkte golfhoogten en lage windsnelheden kan het namelijk gebeuren dat de gemiddelde golfperiode zeer hoog is. Het golfveld bestaat dan meestal geheel of gedeeltelijk uit deining. Aangezien dit soort omstandigheden geen rol spelen bij kritieke belastingen op waterkeringen en duinen moeten deze (hoge) waarden van de golfperiode niet opgenomen worden in de selectie van maxima. Daarom is in het paper van (Repko et al, 2004) besloten om waarnemingen die duiden op deining te verwijderen uit de meetreeks.

Na de correctie voor deining bleken alle modellen naar behoren te werken. De mate van fit bleek wel sterk afhankelijk van de gekozen drempelwaarde; een bekend verschijnsel (zie paragraaf 3.1.3). Bij lage drempelwaarden krijgen de minder extreme stormgebeurtenissen relatief veel invloed op de gefitte functie. In de studie van (Repko et al, 2004) gaf dat aanleiding tot een relatief steil verloop van de verdelingsfuncties en daarmee een overschatting van golfparameters in het extreme bereik.

Op basis van bivariate plots is ook beoordeeld in hoeverre de modellen de gemeten samenhang tussen de golfhoogte en golfperiode kunnen reproduceren. Daaruit bleek het vierde model, met constante golfsteilheid, de beste fit te geven. Verder heeft dit model als voordeel dat het rekening houdt met fysische begrenzings van golfparameters, waar andere modellen nogal eens onrealistische uitkomsten lieten zien. Een ander voordeel van dit model is dat het relatief eenvoudig in gebruik is.

3.3.5 Principal Component Analysis

Bij probabilistische rekenmethoden als numerieke integratie speelt de beschrijving van de invloedsfactoren een belangrijke rol. De PCA (Principal Component Analysis) methode biedt een alternatief waarmee een meer dynamische weergave van de processen mogelijk is. Verder biedt de methode het voordeel dat met de statistische afhankelijkheid tussen de processen automatisch rekening wordt gehouden.

Principal Component Analysis is een multivariate analyse om gemeenschappelijke kenmerken te detecteren in verschillende meetreeksen. De beschikbare reeksen worden weergegeven met vectoren van gelijke lengte, M , en vormen zo een meerdimensionale “wolk” van meetgegevens. Het belangrijkste idee achter PCA is het vinden van de richtingen in de M -dimensionale ruimte met de grootste spreiding, ofwel, die richtingen die het grootste deel van de totale variantie in de meetgegevens verklaren. De PCA-analyse kan worden gebruikt om de gemeenschappelijke kenmerken te detecteren in gemeten patronen van de invloedsfactoren gedurende extreme gebeurtenissen. Met deze informatie kan vervolgens een verzameling synthetische invoerreeksen gegenereerd worden voor het fysische model. Op basis van de modelresultaten worden de overschrijdingskansen van modelresultaten geschat, analoog aan de methode Numerieke Integratie. Voor literatuur over PCA wordt de lezer verwezen naar Haan (1977) en Pielou (1984). Een toepassing van PCA voor het afleiden van extreme-waardenverdelingen staat beschreven in (WL, 2004b).

4 Statistiek voor de HR2006

4.1 Inleiding

Het project Sterkte en Belasting van Waterkeringen (SBW) is erop gericht de kennisontwikkeling in met name de keten van bepaling hydraulische randvoorwaarden in samenhang te beschouwen. In 2006 worden de nieuwe randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen in Nederland vastgesteld. Bijlage A beschrijft per gebied/belastingmodel hoe de statistische verdelingsfuncties van de belangrijkste invloedsvariabelen zijn vastgesteld in het kader van de HR2006. In dit hoofdstuk beschrijven we per basisvariabele hoe de statistiek is vastgesteld.

4.2 Afvoer Rijn en Maas

4.2.1 Homogenisatie van de meetreeks

Door ingrepen in het stroomgebied en met name het riviersysteem kunnen de beschikbare meetreeksen bij Lobith niet als homogeen gezien worden. Voor de *Rijn* bij Lobith is in het kader van HR2001 besloten om de meetreeks te homogeniseren voor de kanalisatiewerken in de Oberrhein die tussen 1955 en 1977 zijn uitgevoerd. De homogenisatie is uitgevoerd naar het jaar 1977 d.w.z direct na voltooiing van de Rijnkanalisatie. Dat betekent dat van alle hoogwaters in de meetreeks is vastgesteld hoe hoog de afvoer bij Lobith zou zijn geweest als de afvoergebeurtenis in het jaar 1977 zou hebben plaatsgevonden. Voor dit doeleinde zijn simulaties van hoogwaters uitgevoerd met twee hydraulische modellen: SYNHP en SOBEK (BfG, 1999).

Voor de Maas bij Borgharen is met name door de Commissie Boertien II veel aandacht besteed aan het homogeniseren van de meetreeks. Daarbij zijn de volgende activiteiten ondernomen:

- correctie van 8-uur en daggemiddelde afvoeren naar “werkelijke” piekafvoeren.
- correctie van piekafvoeren uit de periode 1911-1932 door toepassing van een gewijzigde $Q(h)$ -relatie; de oorspronkelijk toegepaste $Q(h)$ -relatie week namelijk af van die bij de Sint Pieter te Maastricht en die bij Visé in Wallonië.
- correcties van afvoermetingen met stokdrijvers, omdat nader onderzoek heeft uitgewezen dat dergelijke metingen de afvoer in de regel overschatten.
- correcties voor rivierwerken op de Waalse Maas met behulp van een 1D hydrodynamisch model (WENDY).
- correcties voor gewijzigde onttrekkingen bovenstrooms van Borgharen, omdat deze in de loop der tijd langzaam zijn toegenomen.

In het kader van HR2001 zijn verder nog de afvoerwaarden tussen 1984 en 1987 gecorrigeerd op grond van de vertaling van een gewijzigde $Q(h)$ -relatie, rekening houdend met bodemdaling.

4.2.2 Frequentieanalyse van piekafvoeren

Overschrijdingsfrequenties van piekafvoeren van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen in het kader van HR2006 zijn afgeleid op basis van statistische extrapolatie (WL, 2004c,d). De keuze van de verdelingsfuncties, het selecteren van data en de gebruikte fitmethoden is grotendeels afkomstig uit studies van de commissies Boertien I en Boertien II. In het kort werkt de procedure als volgt:

- Voor herhalingsstijden *kleiner* dan 25 jaar zijn de corresponderende afvoeren gebaseerd op een frequentieanalyse van afvoerpieken met de gegeneraliseerde Pareto-verdeling (GPD). Deze verdeling is gebaseerd op de reeks van N hoogste afvoerpieken, waarbij N gelijk is aan het aantal jaren in de meetreeks. Dit is de zogenaamde “*partiële reeks*” afvoeren die even lang is als de reeks jaarmaxima en voor een gedeelte dezelfde afvoeren bevat. De partiële reeks is daarmee een speciaal geval van de ‘peaks over threshold’, of POT-reeks (zie paragraaf 3.1.2).
- Voor herhalingsstijden *groter* dan 25 jaar zijn de corresponderende afvoeren gebaseerd op een middeling van de uitkomsten van een frequentieanalyse met de volgende vier verdelingen:
 - de 3-parameter log-normale verdeling, de Pearson-III (Gamma) verdeling en de Gumbel-verdeling. Hierbij is gebruik gemaakt van de reeks van jaarmaxima, waarbij voor de Gumbel-verdeling een ondergrens gekozen is van 7.000 m³/s.
 - de exponentiële verdeling, gefit op de partiële reeks.

De parameters zijn geschat met behulp van een gemodificeerde versie² van de “maximum likelihood methode” (MLH) of, in het geval van de gegeneraliseerde Paretoverdeling, de “method of moments” (MoM).

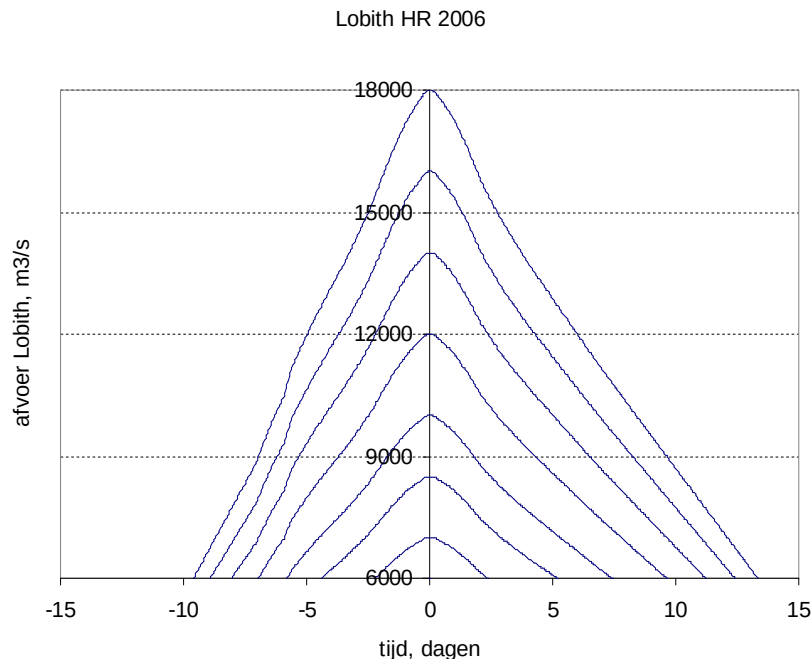
Tabel 4.1 Overzicht van gebruikte verdelingsfuncties en data-series.

verdelingsfunctie	herhalingsstijden	gefit op	fitmethode
GPD	< 25 jaar	partiële -reeks	MoM
Exponentieel	> 25 jaar	partiële -reeks	MLH
Pearson-III	> 25 jaar	jaarmaxima	MLH
Lognormaal	> 25 jaar	jaarmaxima	MLH
Gumbel	> 25 jaar	jaarmaxima > 7.000 m ³ /s (Rijn) jaarmaxima > 1.000 m ³ /s (Maas)	MLH

² “Gemodificeerd” impliceert hier dat eerst de locatieparameter met behulp van de “method of moments” wordt vastgesteld en de overige parameters vervolgens met de “maximum likelihood methode”.

4.2.3 Golfvormen

Gekoppeld aan de statistiek van piekafvoeren is een zogenaamde “standaard golfvorm”, die afhankelijk is van de hoogte van de piekafvoer. Deze golfvormen zijn bepaald met de zogenaamde *opschalingsmethode*. Daarbij worden gemeten golven eerst verticaal opgeschaald naar een gewenste piekwaarde, waarna de golven op een bepaalde manier worden gemiddeld. De golven voor HR2006 zijn weergegeven in Figuur 4.1



Figuur 4.1 Afvoergolven Lobith voor HR2006.

4.3 Windstatistiek

4.3.1 Het Rijkooort Weibull model van het KNMI

De windstatistiek is gebaseerd op het zogenaamde Rijkooort Weibull model (RW-model). Dat model is in 1983 door het KNMI opgesteld. Het model wordt globaal beschreven in (Wieringa en Rijkooort, 1983), en veel gedetailleerder in het artikel (Rijkooort, 1983). Het model is hoofdzakelijk opgesteld door Rijkooort en bevat de statistieken van 12 windstations uit Nederland, welke in samenhang met elkaar zijn afgeleid. Het model zit nogal gecompliceerd in elkaar, wat eind jaren 90 bij Rijkswaterstaat RIZA tot vragen heeft geleid over de juiste interpretatie van het model. Vandaar dat toen het rapport (Geerse, 1999) is geschreven, waarin zorgvuldig de opbouw van het model is nagegaan, en de juiste interpretatie van de formules is onderzocht. In de jaren 1998-2003 heeft daarnaast het door het KNMI uitgevoerde Hydra-project gelopen, met als doel nieuwe extreme windstatistiek voor windstations in Nederland af te leiden (Verkaik et al, 2003). Als onderdeel daarvan is het RW-model onderzocht, en vergeleken met andere windanalyses. In de beschrijving hieronder baseren we ons op de genoemde referenties.

In essentie bestaat het RW-model uit twee componenten. De ene component omvat *momentane* kansverdelingen, waarin uitspraken worden gedaan over kansen op uurwaarden van windsnelheden. De andere component omvat *extreme-waarden* verdelingen, waarin overschrijdingskansen van windsnelheden worden gegeven voor een heel jaar of voor een tweemaandelijks seizoen. Dergelijke kansen kunnen in verband worden gebracht met herhalingstijden van windsnelheden. Zowel de momentane als de extreme-waarden verdelingen kunnen binnen het RW-model gegeven worden uitgesplitst naar 12 richtingssectoren en/of 6 seizoenssectoren.

Tabel 4.2 Basisstations uit het RW-model.

Schiphol
Eelde
Soesterberg
De Bilt
Deelen
Vlissingen
Gilze Rijen
Eindhoven
Beek
Leeuwarden
L.S. Texel
Zestienhoven

Het RW-model is gebaseerd op 12 ‘basisstations’ verspreid over Nederland, zie Tabel 4.2. De wind waar in het RW-model sprake van is, is altijd de uurgemiddelde potentiële windsnelheid. Dat is een ‘genormaliseerde’ uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte, boven homogeen open terrein met een ruwheidslengte van $z_0 = 0.03$ meter.

4.3.2 Formules RW-model voor de momentane kansverdelingen

Eén van de twee ‘hoofdonderdelen’ van het RW-model bestaat uit de momentane kansen, die betrekking hebben op uurwaarden. Die kansen worden beschreven door cumulatieve verdelingsfuncties, die gelden conditioneel op de windrichting en het seizoen. In de nachten komen lagere windsnelheden vaker voor dan overdag, vandaar dat verschillende cumulatieve verdelingsfuncties worden gehanteerd voor overdag en voor ’s nachts. De seizoenen en richtingen (feitelijk richtingssectoren) worden aangeduid met

seizoen $s = 1, 2, \dots, 6$ ($s = 1$ is januari-februari, $s = 2$ is maart-april, etcetera)
 richting $r = 1, 2, \dots, 12$ ($r = 1$ is 15° - 44° , $r = 2$ is 45° - 74° , etcetera)

Beschouw voor een gegeven basisstation in Nederland een tijdstip in seizoen s , waarop de wind uit de richting r waait. De kans dat de windsnelheid op dat moment kleiner is dan u wordt voor overdag gegeven door:

$$F_d(u | r, s) = P(U < u | r, s) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{u}{a_{rs}} \right]^{k_{rs}} \right\} \quad (4.1)$$

en voor 's nachts door:

$$F_n(u | r, s) = P(U < u | r, s) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{u}{a_{rs}} \left\{ 1 + \gamma_{rs} \exp \left(-\frac{u}{5} \right) \right\} \right]^{k_{rs}} \right\} \quad (4.2)$$

De parameters a_{rs} , k_{rs} en γ_{rs} zijn respectievelijk de schaalparameter, vormparameter en de stabiliteitsparameter voor de betreffende locatie (de laatste parameter heeft te maken met de stabiliteit van de atmosfeer). Merk op dat F_d een Weibullverdeling volgt, en dat F_n een 'gemodificeerde' Weibullverdeling volgt. Voor hoge windsnelheden gaat de term $\exp(-u/5)$ naar 0, zodat voor dergelijke snelheden ook F_n wordt benaderd door een Weibullverdeling, in welk geval F_d en F_n overeen gaan stemmen. Met de term $\exp(-u/5)$ in de verdeling voor de nacht wordt er rekening mee gehouden dat, in het bereik van de lagere windsnelheden, de windsnelheden 's nachts gewoonlijk iets lager zijn dan overdag.

Het aantal parameters in de (gemodificeerde) Weibullverdelingen is erg groot: voor elk van de 12 basisstations zijn er drie Weibullparameters, die voor elke richting/seizoen nog eens een andere waarde hebben (in totaal $12 \cdot 6 \cdot 3 = 216$ per station). Deze parameters zijn in eerste instantie geschat met de Maximum Likelihood methode. Vanwege het grote aantal parameters heeft Rijkooft daarna echter 'smoothingstechnieken' toegepast, op zo'n manier dat het aantal onafhankelijke parameters in het model sterk wordt gereduceerd.

4.3.3 Formules RW-model voor extreme-waarden verdelingen

Het tweede 'hoofdonderdeel' uit het RW-model betreft extreme-waarden verdelingen. Vaak worden dat soort verdelingen afgeleid door kansverdelingen te fitten aan jaarmaxima of door analyses te baseren op een reeks van geselecteerde pieken (POT-reeksen). Rijkooft heeft er echter voor gekozen om de momentane verdelingen als uitgangspunt te nemen, om redenen uiteengezet in (Wieringa en Rijkooft, 1983) en (Rijkooft, 1983). We beperken ons hier tot het geven van de meest relevante formules uit het RW-model voor de bepaling van extreme windsnelheden. Alvorens die formules te geven is het handig eerst uit te leggen hoe de verdelingsfunctie van het maximum van N onafhankelijke identiek verdeelde variabelen kan worden berekend uit de verdelingsfunctie van één zo'n variabele.

Beschouw een aantal identiek verdeelde onafhankelijke stochastische variabelen $X_1, X_2, \dots, X_N$. Geef de cumulatieve verdeling, die dus eenzelfde vorm heeft voor elke variabele, aan door $F(x) = P(X_1 < x)$. Als de stochast $X_{\max}$ het maximum aangeeft van de N variabelen, wordt de cumulatieve verdeling $F_{\max}$ gegeven door

$$F_{\max}(x) = P(X_{\max} < x) = F(x)^N \quad (4.3)$$

Immers, een maximum kleiner dan x doet zich voor (dan en slechts dan) als elke realisatie x_i , $i = 1$ t/m N , van de variabelen X_1 t/m X_N kleiner is dan x ; vanwege de onafhankelijkheid van de N variabelen volgt dan (4.3).

Rijkooft heeft een gemodificeerde versie van formule (4.3) als uitgangspunt genomen om diverse extreme-waarden verdelingen af te leiden. Centraal in zijn aanpak staat de grootheid

$$G_{rs}(u) = F_d(u | r, s)^{\frac{d_{rs}}{q_{rs}}} F_n(u | r, s)^{\frac{n_{rs}}{q_{rs}}} \quad (4.4)$$

die betrekking heeft op de combinatie van richting r en seizoen s . Hierin geeft d_{rs} het gemiddeld aantal daguren in seizoen s waarvoor de windrichting r is, n_{rs} het gemiddeld aantal nachturen in seizoen s waarvoor de windrichting r is, terwijl q_{rs} de zogenaamde *persistentie* voor richting r en seizoen s geeft, waarover zo meteen meer. Rijkooft heeft verzuimd een precieze interpretatie te geven van de grootheid G_{rs} , vandaar dat in (Geerse, 1999) is uitgezocht waar deze grootheid precies voor staat. Hier volgt een globale uitleg.

We mogen aannemen, omdat we hier uitsluitend geïnteresseerd zijn in *hoge* windsnelheden, dat F_d gelijk is aan F_n , en schrijven daartoe $F_d = F_n = F$. Laten we verder eerst eens aannemen – hoewel dat in werkelijkheid zeker niet klopt – dat opeenvolgende uren statistisch onafhankelijk zijn, welke situatie blijkt te corresponderen met $q_{rs} = 1$. Dan levert vergelijking (4.4):

$$G_{rs}(u) = F(u | r, s)^{d_{rs} + n_{rs}} \quad (4.5)$$

met $d_{rs} + n_{rs}$ gelijk aan het gemiddeld aantal uren in seizoen s met richting r . Deze formule is ogenschijnlijk van de goed te interpreteren vorm (4.3), maar toch niet helemaal: het aantal uren in seizoen s met richting r varieert namelijk van jaar tot jaar. Als we aannemen dat dit aantal uren in elk jaar precies gelijk zou zijn, kan aan (4.5) een eenduidige interpretatie gegeven worden. In dat geval geeft $G_{rs}(u)$ de kans dat in een beschouwd jaar geen enkel uur voorkomt waarvoor geldt dat het én deel uitmaakt van seizoen s , én een windrichting r heeft én niveau u overschrijdt (merk op dat deze kans zeer zeker *niet* conditioneel geldt op s en r). Het precieze bewijs van deze bewering wordt gegeven in (Geerse, 1999). De grootheid $1 - G_{rs}(u)$ kan dan geïnterpreteerd worden als de kans dat in een jaar tijd minimaal één uur voorkomt waarvoor geldt dat niveau u wordt overschreden, alsook dat de richting tijdens dat uur r is, alsook dat dat uur zich in seizoen s bevindt. Iets korter geformuleerd schrijven we dat als

$$1 - G_{rs}(u) = \text{kans op minimaal 1 uur in een jaar waarvoor } U > u, R = r, S = s \quad (4.6)$$

In (Geerse, 1999) wordt aangetoond dat deze formule *in benadering* geldig blijft in de situatie waarin het aantal uren met richting r binnen seizoen s varieert. De hiervoor gedane aanname van onafhankelijke uren geldt in werkelijkheid echter niet, ook niet in benadering. Opeenvolgende uren tonen namelijk een sterke samenhang: een hoge windsnelheid wordt in de regel gevolgd door een eveneens hoge windsnelheid. Om dat probleem te ondervangen heeft Rijkooft de persistenties q_{rs} ingevoerd (theoretisch moeten deze groter dan 1 zijn, zie echter hieronder). De exponenten d_{rs}/q_{rs} en n_{rs}/q_{rs} in (4.4) kunnen worden geïnterpreteerd als de aantallen onafhankelijke dag- en nachturen met richting r in seizoen s . Men kan zich dat voorstellen alsof een en dezelfde windsnelheid steeds q_{rs} aansluitende uren aanhoudt, om dan gevolgd te worden door een volledig onafhankelijke nieuwe windsnelheid die opnieuw q_{rs} aansluitende uren aanhoudt (eventueel bij een andere richting en/of in een volgend seizoen). Het delen van het aantal onafhankelijke uren voor richting r en seizoen s door de persistenties verkleint derhalve het aantal mogelijke onafhankelijke ‘gebeurtenissen’ dat kan optreden.

Het gebruik van persistenties vormt een *pragmatische* manier om rekening te houden met de samenhang (autocorrelatie) tussen opeenvolgende windsnelheden. Om met deze persistenties goede resultaten te krijgen, bleken ze afhankelijk te moeten worden gemaakt van de windsnelheid. Rijkooorts formule voor de persistentie luidt, voor windsnelheid u ,

$$q_{rs}(u) = \exp \left\{ A_{rs} \left(\frac{u}{a_{rs}} \right)^2 + B_{rs} \right\} \quad (4.7)$$

Hierin zijn $A_{rs} < 0$ en $B_{rs} > 0$ constanten die voor elk basisstation dezelfde waarden hebben, terwijl a_{rs} gelijk is aan de schaalparameter van de Weibullverdeling uit (4.1). Met (4.4) en (4.7) wordt in het RW-model dan $G_{rs}(u)$ berekend. Op grond van het voorgaande kan dan in benadering gesteld worden:

$$1 - G_{rs}(u) \approx \text{kans op minimaal 1 uur in een jaar waarvoor } U > u, R = r, S = s \quad (4.8)$$

Dat dit, in tegenstelling tot de voor (4.6) beschouwde situatie, een benadering is, komt ten eerste door het feit dat het aantal uren met richting r in seizoen s per jaar varieert in plaats van constant is, en ten tweede door het feit dat de modellering met persistenties van de autocorrelatie van de wind een nogal pragmatische aanpak vormt.

Naast de grootheid $G_{rs}(u)$ heeft Rijkooort extra grootheden ingevoerd, met analoge interpretaties, waarvan we de belangrijkste twee hier noemen. Voor richting r geldt

$$1 - G_r(u) = 1 - \prod_{s=1}^6 G_{rs}(u)^{0.83} \quad (4.9)$$

$$\approx \text{kans op minimaal 1 uur in een jaar waarvoor } U > u, R = r$$

$$1 - G(u) = 1 - \prod_{r=1}^{12} \prod_{s=1}^6 G_{rs}(u)^{0.5} \quad (4.10)$$

$$\approx \text{kans op minimaal 1 uur in een jaar waarvoor } U > u$$

De exponenten 0.83 en 0.5 in deze formules zijn door Rijkooort ingevoerde persistentiecorrecties, die voor het niet afhankelijk zijn van opeenvolgende richtingen/seizoenen corrigeren. We merken op dat in het RW-model de kans $G(u)$ niet gelijk is aan de sommatie van de kansen $G_r(u)$ over alle richtingen. Anders gezegd: de omnidirectionele kans is niet gelijk aan de sommatie over de kansen per richting. Dat komt omdat in het RW-model een storm waarin meerdere richtingen voorkomen met betrekking tot $G(u)$ als één storm wordt geteld, terwijl deze storm bij uitsplitsing naar de windrichting bij iedere windrichting wordt geteld die in de storm voorkomt. (Voor hoge windsnelheden blijkt de overschrijdingsfrequentie gesommeerd over de richtingen in goede benadering een factor $0.83/0.5 = 1.66$ hoger uit te komen dan de overschrijdingsfrequentie volgens de omnidirectionele verdeling).

4.3.4 Formules RW-model voor herhalingstijden

De formules (4.8) t/m (4.10) geven, al of niet in combinatie met richtingen en/of seizoenen, overschrijdingskansen van jaarmaxima (we gaan hier voorbij, net als in het RW-model, aan het feit dat deze formules benaderingen betreffen). Zulke overschrijdingskansen mogen ook, tenminste voor niet al te lage snelheden, benaderenderwijs worden opgevat als overschrijdingsfrequenties per jaar. De herhalingstijd T van een windsnelheid volgt dan als de reciproke van de overschrijdingsfrequentie. Het gelijkstellen van de overschrijdingskansen van het jaarmaximum aan een overschrijdingsfrequentie per jaar is een benadering die vrij nauwkeurig is voor $T \geq$ circa 10 jaar, en die standaard wordt gevolgd in allerlei literatuur. De geldigheid van de benadering berust erop dat voor $T \geq$ circa 10 jaar de kans op twee of meer overschrijdingen binnen een jaar verwaarloosbaar is ten opzichte van de kans op precies één overschrijding binnen een jaar, zie bijvoorbeeld (Geerse, 1999) voor meer uitleg.³

Op grond van het voorgaande kunnen op basis van (4.8) t/m (4.10), voor $T \geq$ circa 10 jaar, met het RW-model de volgende soorten herhalingstijden worden berekend

$$\begin{aligned} T_{rs}(u) &= \frac{1}{1 - G_{rs}(u)} \\ T_r(u) &= \frac{1}{1 - G_r(u)} \\ T(u) &= \frac{1}{1 - G(u)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Neem als voorbeeld de middelste formule. Stel eens dat voor richting 270° , voor $u = 30$ m/s, voor een zeker basisstation geldt dat $T_r(u) = 1000$ jaar. Dan wil dat zeggen dat gemiddeld eens in de 1000 jaar een overschrijding van 30 m/s optreedt, die eventueel meerdere uren kan duren, tijdens welke overschrijding minstens één van de uren richting 270° heeft.

4.3.5 Opmerkingen RW-model

In deze paragraaf wordt ingegaan op twee punten uit het RW-model. De eerste betreft de persistenties q_{rs} . Theoretisch gezien kunnen die niet kleiner dan 1 worden, maar in het RW-model blijken ze wel degelijk veel kleiner dan 1 te kunnen zijn voor de hogere (nog wel degelijk relevante) windsnelheden. De reden daarvoor is dat de persistenties volgens formule (4.7) niet alleen blijken te dienen om de autocorrelatie in de wind te modelleren, maar ook om te corrigeren voor het feit dat de (gemodificeerde) Weibullverdelingen F_d en F_n uit (4.1) en (4.2) te snel afnemende staarten hebben. De kansen op hoge (uurlijkse) windsnelheden blijken door deze verdelingen namelijk te worden onderschat. De door Rijksoort gevolgde aanpak, waarbij de F_d en F_n als basis dienen voor een extreme-waarden analyse, blijkt dus niet al te fraai uit te pakken.

³ Hierbij wordt wel verondersteld dat stormen binnen een jaar min of meer statistisch onafhankelijk van elkaar zijn. Vaak wordt het optreden van stormen gemodelleerd met een Poissonproces.

Een ander opvallend punt betreffende het RW-model is dat, zo werd geconstateerd in (Verkaik et al, 2003; Phase report 6), Rijkooit de parameters uit zijn model ‘handmatig’ heeft aangepast voor de stations Deelen, Eelde en Leeuwarden. Voor de eens in de 1000 jaar windsnelheid resulteerde die aanpassing voor Deelen in een verlaging van 4.3 m/s, voor Eelde in een verhoging van 2.3 m/s en voor Leeuwarden in een verhoging van 2.0 m/s. Voor Deelen merken we op dat – ook na aanpassing – het RW-model voor dit station weinig overtuigende extreme windsnelheden oplevert. Zo blijkt de eens in de 1000 jaar windsnelheid voor Deelen 1 m/s hoger uit te pakken dan die voor Schiphol (33.7 m/s versus 32.7 m/s), en dat terwijl Deelen verder landinwaarts ligt dan Schiphol. Zoals uit Figuur 5.21 van (Wieringa en Rijkooit, 1983) blijkt, wordt Deelen ook ‘omringd’ door stations met duidelijk *lagere* extreme windsnelheden dan Schiphol. Onze conclusie is dus dat het RW-model – ook na aanpassing – te hoge extreme windsnelheden voor Deelen geeft.

4.3.6 Hydra-project van het KNMI

In de jaren 1998-2003 is, in opdracht van Rijkswaterstaat RIKZ, door het KNMI het Hydra-project uitgevoerd, waarvan verslag wordt gedaan in 16 deelrapporten (Verkaik et al, 2003; zie vooral het eindrapport ‘Phase report 15’). Eén van de doelstellingen van het project bestond er uit windstatistiek voor potentiële windsnelheden af te leiden, voor willekeurige locaties in Nederland. In het project is in eerste instantie geprobeerd (a) het RW-model te reproduceren en (b) het toe te passen op meerdere windstations en langere meetreeksen dan indertijd door Rijkooit gebruikt. De reproductie van het model bleek niet exact mogelijk, mede omdat, zoals hiervoor al opgemerkt, Rijkooit in een aantal gevallen niet gedocumenteerde ‘handmatige’ aanpassingen van de parameters heeft verricht.

Bij de reproductie liep men tegen een aantal zwakheden van het RW-model aan, zoals het hiervoor genoemde gebruik van persistenties kleiner dan 1 – gerelateerd aan te snel afnemende staarten van de verdelingen F_d en F_n uit (4.1) en (4.2). In eerste instantie is door het KNMI geprobeerd de zwakheden uit het RW-model te ondervangen. De aangepaste versie van het model bleek echter voor stations landinwaarts tot een sterke onderschatting van de extreme windsnelheden te leiden. Een belangrijke reden dat de aangepaste versie van het model verkeerde resultaten oplevert, is dat (de kansen op) zeer lage windsnelheden < 2 m/s sterk van invloed zijn op de parameterschattingen uit de verdelingen F_d en F_n uit (4.1) en (4.2).

Op de uitkomsten van extremen-analyses mogen dergelijke lage snelheden echter geen invloed hebben. Vandaar dat in het Hydra-project uiteindelijk is overgestapt op het gebruik van POT-reeksen, waarbij stormpieken boven een voldoende hoge drempelwaarde zijn beschouwd. Deze pieken zijn gefit met conditionele Weibullverdelingen. Daarbij is een nieuwe methode ontwikkeld om de consistentie tussen seizoenen, windrichtingen en de omnidirectionele statistiek te waarborgen. Helaas bleek de nieuwe aanpak geen consistent geografisch beeld over Nederland op te leveren: de extreme windsnelheden aan de kust bleken (gewoonlijk) lager uit te pakken dan die in het binnenland, wat vanuit fysisch oogpunt onrealistisch wordt geacht. Die verschillen komen voort uit een tot nu toe onbegrepen gedrag van de vormparameter uit de Weibullverdeling: bij de kust blijkt sprake van een grotere mate van ‘kromming’ van de Weibullverdeling dan in het binnenland, met als gevolg dat bij extrapolatie naar hoge herhalingstijden de extreme snelheden in het binnenland hoger worden dan die aan de kust, terwijl de *metingen* in het binnenland gemiddeld juist *lager* uitpakken dan de metingen aan de kust.

Vanwege de genoemde geografisch onlogische resultaten uit het Hydra-project, heeft Rijkswaterstaat besloten de resultaten uit het project niet te gebruiken voor de hydraulische randvoorwaarden. Rijkswaterstaat houdt dus vast aan het ‘oude’ RW-model.

4.4 Meerpeilstatistiek IJsselmeer

De meerpeilstatistiek betreft daggemiddelde waarden van de meerpeilen; zo’n waarde kan worden gezien als een ruimtelijk gemiddelde over het IJsselmeer (betreft dus geen tijdsgemiddelde). De meerpeilstatistiek uit Hydra-M bestaat uit drie onderdelen:

- Frequentielijn $F(m)$. Deze geeft de overschrijdingsfrequentie van niveau m , in keren per jaar.⁴
- Dagenlijn $D(m)$. Deze geeft het gemiddeld aantal dagen per jaar dat niveau m wordt overschreden.
- Duur per top $d(m)$. Deze geeft de gemiddelde overschrijdingsduur dat niveau m wordt overschreden, binnen meerpeilgolven waarvan de piekwaarde niveau m overschrijdt.

In Hydra-M worden alleen de eerste twee grootheden (middels ascii-tabellen) als invoer gebruikt. Van de grootheid $d(m)$ wordt alleen in de afleiding van $D(m)$ gebruik gemaakt. Hoe de diverse onderdelen precies worden bepaald staat beschreven in (Blaakman et al, 1999). Hier volgt een korte weergave.

4.4.1 Gegevens

Voor het meerpeil zijn metingen gebruikt uit de periode 1976 t/m 1995. Vóór 1976 zijn geen metingen beschikbaar, omdat in 1975 de Houtribdijk gereed is gekomen (nadien splitsing Zuiderzee in IJssel- en Markermeer). Om toch te kunnen beschikken over een langere reeks, zijn met het balansmodel BEKKEN synthetische meerpeilen berekend, voor alleen de winterhalfjaren uit de periode 1932 t/m 1975 (vóór 1932 zijn dergelijke gegevens niet te bepalen, omdat pas in 1932 de Afsluitdijk gereed kwam).

In de statistische analyses voor het meerpeil is steeds uitgegaan van winterhalfjaren, omdat bleek dat extreme meerpeilen in de zomermaanden april t/m september vrijwel geen kans van voorkomen hebben. Daarnaast is nog relevant dat ook extreme stormen in de zomermaanden praktisch niet voor kunnen komen. Al met al is de aanname in Hydra-M dat extreme bedreigingen in de zomermaanden niet voorkomen.

4.4.2 Frequentielijn

Voor de lagere meerpeilen, van -0.4 tot 0.36 m+NAP, is $F(m)$ direct bepaald uit de metingen. Voor deze lage meerpeilen is dat goed mogelijk, omdat ze vaak voorkomen. In feite is het genoemde bereik van meerpeilen opgedeeld in een aantal trajecten, waarvoor polynomen zijn gefit, die daarna vloeiend op elkaar zijn aangesloten.

⁴ Een jaar betreft feitelijk steeds een winterhalfjaar, dat loopt van oktober t/m maart.

Voor de hogere meerpeilen, namelijk hoger dan 0.20 m+NAP, is om aan $F(m)$ te komen een extreme-waardenanalyse uitgevoerd op basis van jaarextremen. In de extreme-waardenanalyse zijn de jaarmaxima van de meerpeilen gefit met vier verdelingen:

- Pearson-type 3 (Gammaverdeling)
- Gumbelverdeling
- Normale verdeling
- Raleighverdeling

Elk van deze verdelingen levert een overschrijdingsfrequentie $F(m)$ op in het bereik 0.20 tot 1.80 m+NAP. Vervolgens is voor iedere m uit dit bereik het gemiddelde van de vier overschrijdingsfrequenties bepaald, resulterend in de overschrijdingsfrequentie $F(m)$ voor de hogere meerpeilen.

Aldus is $F(m)$ bepaald voor de lagere meerpeilen, en tevens voor de hogere meerpeilen. Vervolgens zijn de voor beide trajecten resulterende lijnen vloeiend op elkaar aangesloten.

4.4.3 Dagenlijn en duur per top

Voor de lagere meerpeilen, van -0.4 tot 0.36 m+NAP, die vaak voorkomen, is $D(m)$, net als $F(m)$, direct bepaald uit de metingen. In feite is het genoemde bereik van meerpeilen opgedeeld in een aantal trajecten, waarvoor polynomen zijn gefit, die daarna vloeiend op elkaar zijn aangesloten.

Het hogere deel van $D(m)$ is indirect bepaald: daarbij is eerst de duur per top $d(m)$ bepaald, waarna $D(m)$ dan met behulp van de reeds bepaalde $F(m)$ volgt uit de (eenvoudig te verifiëren) formule:

$$D(m) = F(m)d(m) \quad (4.12)$$

De grootte $d(m)$ is door middel van een machtsfunctie gefit aan de data.

Aldus is $D(m)$ beschikbaar voor zowel een traject van lage als van hoge meerpeilen. Beide trajecten zijn vervolgens vloeiend op elkaar aangesloten bij het meerpeil 0.26 m+NAP, resulterend in één lijn $D(m)$.

4.4.4 Opmerkingen

Hier volgen nog wat opmerkingen over de meerpeilstatistiek.

1. Nadat de analyses waren verricht zijn $F(m)$ en $D(m)$ nog uitgesplitst (op een manier die we hier niet beschrijven) naar de 'hoofdsectoren' West (195° - 45°) en Oost (45° - 195°). Het bleek namelijk dat verhoogde meerpeilen relatief vaak samen gaan met westelijke windrichtingen, vandaar dat apart statistieken voor de genoemde hoofdsectoren zijn bepaald.

2. Vervolgens is nog een correctie toegepast op de grootheden $F(m)$ en $D(m)$ voor de lagere meerpeilen $< 0.36 m + \text{NAP}$. Het bleek namelijk dat de met BEKKEN verkregen meerpeilen voor de jaren 1932 t/m 1975 een systematische onderschatting van de peilen te zien gaven. Voor het bepalen van de correcties van $F(m)$ en $D(m)$ is gebruik gemaakt van de gemeten meerpeilen uit 1976 t/m 1995.
3. In deze analyses bleek dat verhoogde meerpeilen relatief vaak samen gaan met verhoogde windsnelheden: windsnelheid en meerpeil zijn dus positief gecorreleerd. Een (flink) deel van die correlatie wordt echter al meegenomen via de, met behulp van de twee hoofdsectoren gemodelleerde, correlatie tussen windrichting en meerpeil. Vandaar dat, bij een gegeven windrichting, de correlatie tussen windsnelheid en meerpeil is verwaarloosd.
4. Bij het herzien van de meerpeilstatistiek voor het IJsselmeer ten behoeve van het probabilistisch model Hydra-VIJ voor de Vechtdelta, is in (Geerse, 2006) gebleken dat de Hydra-M statistiek voor een groot bereik van meerpeilen een onderschatting geeft van $D(m)$ en $d(m)$. Beleidsmatig is er echter voor gekozen om voor de meren voor HR2006 grotendeels vast te houden aan HR2001; vandaar dat de meerpeilstatistiek uit Hydra-M niet is aangepast.

4.5 Waterstand op zee

4.5.1 Basispeilen

Voor de waterstand is in het kader van HR2006 windrichtingafhankelijke statistiek toegepast, beschreven met de conditionele Weibull-verdeling. Bij het afleiden van deze verdelingen is rekening gehouden met de zogenaamde “basispeilen” (RIKZ, 1995). Dat zijn waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar, afgeleid uit de omnidirectionele statistiek van de waterstand. Ten behoeve van de consistentie is de windrichtingsafhankelijke statistiek zó gecorrigeerd dat na omrekening naar omnidirectionele statistiek de basispeilen exact worden gereproduceerd. Voor een gegeven waterstand, zoals het basispeil, dient de omnidirectionele overschrijdingsfrequentie namelijk gelijk te zijn aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector. Na het afleiden van de verdelingsfuncties per windrichtingssector en omnidirectioneel is dat echter in de regel slechts bij benadering het geval. Ten behoeve van de consistentie wordt daarom voor de verschillen gecorrigeerd.

De basispeilen zijn in eerste instantie in 1993 afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen, en Delfzijl (RIKZ, 1993a). In 1995 zijn de basispeilen voor de hele Nederlandse kust afgeleid (RIKZ, 1995a). Het resultaat bestaat uit een aantal ruimtelijke contourlijnen die punten van gelijke basispeilen verbinden. In (RIKZ, 1995) is de gegeneraliseerde Pareto-verdeling (GPV) toegepast. Vervolgens is gecontroleerd of de afgeleide statistiek in overeenstemming is met de fysica door middel van een numeriek modelonderzoek (RIKZ, 1993b), waarin simulaties van “superstormen” zijn uitgevoerd met het 2-dimensionele waterbewegingsmodel WAQUA. De simulaties leverden extreme waterstanden in de diverse stations op die vervolgens weer onderling vergeleken zijn. Op basis van deze vergelijking zijn de basispeilen aangepast opdat het ruimtelijke verloop van de peilen langs de kustlijn meer in overeenstemming is met de realiteit.

De basispeilen zoals beschreven in het bovenstaande verhaal gelden voor de situatie in het jaar 1985. Vanwege de stijging van het waterpeil als gevolg van effecten van klimaatverandering dienen de peilen doorlopend te worden geactualiseerd naar het jaar waarop de toetsing of het ontwerp van een waterkering betrekking heeft. Het eerstvolgende randvoorwaardenboek verschijnt in 2006 (of eigenlijk: 1 januari 2007) en is bestemd voor de 3^e toetsronde die is afgerond in 2011. Daarom zijn in het kader van HR2006 de basispeilen geactualiseerd naar het jaar 2011 (HKV, 2005). Daartoe is het effect van zeespiegelstijging gekwantificeerd door een trendlijn af te leiden uit jaarmaxima van waterstanden voor diverse kuststations.

4.5.2 Windrichtingsafhankelijke statistiek

De statistiek van de waterstand is in eerste instantie per windrichting afzonderlijk afgeleid. Vervolgens is een lopend gemiddelde (filter) over de windrichtingen toegepast. Daarmee zijn niet-significante verschillen weggewerkt tussen de richtingen onderling die meer door toevalligheden bepaald zijn dan een echte fysische basis hebben. Tenslotte is de windrichtingsafhankelijke statistiek, zoals beschreven in de vorige paragraaf, afgestemd op de omnidirectionele statistiek en, daarmee samenhangend, de basispeilen. Samenvattend zijn de volgende drie stappen doorlopen:

1. Eerste selectie van parameterwaarden per windrichting;
2. Middeling over windrichtingen;
3. Vereffening met basispeil.

De methode is ontwikkeld in de studie van (RIKZ, 2000).

4.6 Golven op zee

4.6.1 Omni-directionele statistiek

In het onderzoek van (WL, 2004a) is de golfstatistiek afgeleid voor 9 stations op relatief diep water langs de Noordzeekust, op basis van stormmaxima (Peaks-Over-Threshold) in de periode van 1979 tot 2002. Net als voor de waterstand is daarbij eerst een keuze gemaakt voor vormparameter α op basis van “drempelfiguren” (zie paragraaf A.6.3 voor een toelichting). Een dergelijke figuur geeft de relatie weer tussen enerzijds het aantal geselecteerde stormmaxima (lees: de hoogte van de drempelwaarde) en anderzijds de resulterende waarde van α . De waarde van α wordt zo gekozen dat deze als functie van het aantal stormmaxima “stabiel” is. Met andere woorden: de drempelwaarde is zó gekozen dat een kleine aanpassing van de drempelwaarde nauwelijks effect heeft op de resulterende waarde van α .

De aldus gekozen waarde van α is sterk locatieafhankelijk. Bijvoorbeeld voor de significante golfhoogte H_{m0} varieert de gevonden waarde van α tussen ca. 1.9 en 3.3 voor de 9 stations langs de Noordzeekust. Gedeeltelijk is de variatie van deze parameter afhankelijk van toevalligheden (“statistische ruis”), maar de verschillen zijn zo significant dat er ook een fysische verklaring bestaat. Zo is bijvoorbeeld de waarde van α voor de noordelijke

stations lager dan voor de zuidelijke stations omdat golven in de noordelijke stations in de regel hoger zijn tijdens stormcondities.

In (WL, 2004a) is een methode ontwikkeld om de (ongewenste) statistische toevalligheden in de berekende waarde van α zoveel mogelijk te reduceren, gebruik makend van een eenvoudige beschrijving van de fysica. De methode vertoont een sterke gelijkenis met de zogenoemde “Regional Frequency Analysis” (zie paragraaf 3.3.2). De factoren die van invloed zijn op de ontwikkeling van het golfveld zijn met name de strijklengte en de waterdiepte. Daarom is de waarde van α gerelateerd aan de volgende functie:

$$\alpha = aL^b D^c$$

waarin:

L	=	representatieve (strijk-)lengtemaat (= geschatte afstand tot Doggersbank in km);
D	=	waterdiepte (m); en
a, b, c	=	functieparameters, af te leiden op basis van een fitprocedure.

Omdat de fit voor 9 stations wordt afgeleid heeft een afwijkende waarde van α in één van de stations mogelijk vrij veel effect op de uiteindelijke fit. Met andere woorden: het eindresultaat is waarschijnlijk vrij gevoelig voor afwijkingen. Om deze gevoeligheid te reduceren is gebruik gemaakt van een andere fysische eigenschap van het systeem onder stormcondities: golfhoogte en golfperiode zijn sterk gecorreleerd. Uitgaande van volledige afhankelijkheid hebben (Den Heijer et al., 2005) aangetoond dat er een lineair verband bestaat tussen de α -waarden van verschillende golfparameters (H_{m0} , T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_p). Daarom is in (WL, 2004a) één fit afgeleid van bovenstaande vergelijking op basis van de α -waarden van alle vier de golfparameters. Met een fit op basis van 36 waarden (4 golfparameters keer 9 stations) is de gevoeligheid voor afwijkende waarden namelijk kleiner dan voor 9 waarden. Om deze fit af te kunnen leiden zijn de α -waarden eerst herschaald zodat de verdelingen van de vier afzonderlijke golfparameters onderling vergelijkbaar zijn.

Na de vaststelling van parameter α wordt voor elke locatie een nieuwe Weibull-verdeling afgeleid. In de eerste plaats moet (wederom) een keuze gemaakt worden voor het aantal stormmaxima dat bij de fit-procedure wordt gehanteerd. Uiteindelijk is, enigszins arbitrair, gekozen voor 200 stormmaxima. In (WL, 2004a) is aangetoond dat de resultaten bij deze keuze niet veel afwijken van de resultaten bij een keuze van bijvoorbeeld 100 stormmaxima. Met de keuze van het aantal stormmaxima ligt de drempelwaarde, ω , en de overschrijdingsfrequentie van de drempelwaarde, ρ , gelijk vast. Dat betekent dat schaalparameter σ de enige vrijheidsgraad is bij de af te leiden fit.

4.6.2 Windrichtingsafhankelijke statistiek

De statistiek per windrichtingssector is als volgt bepaald (RIKZ, 2000; WL, 2004a):

1. Indelen van alle meetwaarden (dus niet alleen stormmaxima) in windrichtingssectoren.
2. Afleiden van een Weibull-verdeling voor elke sector.
3. Corrigeren van de 10^{-4} -kwantielen van elke sector opdat het geheel in overeenstemming is met de omnidirectionele statistiek.
4. Opnieuw afleiden van een Weibull-verdeling voor elke sector waarbij geldt dat deze de gecorrigeerde 10^{-4} -kwantiel-waarde oplevert.

5 Fysische begrenzings in de statistiek

5.1 Inleiding

De statistiek van extreme waarden is in de regel gebaseerd op meetreeksen die (veel) korter zijn dan de herhalingsstijden waarvoor de statistieken afgeleid worden. Dat betekent dat de statistiek bepaald wordt op basis van extrapolatietechnieken. Statistische extrapolatie van meetresultaten naar extreme situaties kan leiden tot fysisch onrealistische waarden voor de beschouwde variabele. Zo kan het bijvoorbeeld zijn dat de afvoer van een rivier bij een bepaalde locatie die op basis van de statistiek een overschrijdingsfrequentie heeft van 1:1.000 jaar, in werkelijkheid helemaal niet kan optreden omdat de bovenstroomse afvoercapaciteit van de rivier daartoe niet toereikend is.

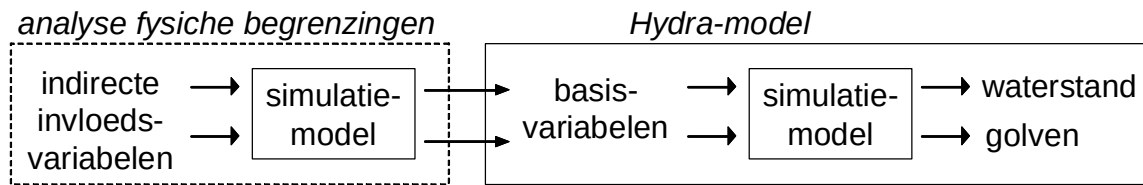
In dit hoofdstuk beschrijven we enkele methoden waarmee effecten van fysische begrenzings op de statistiek van extreme waarden gekwantificeerd kunnen worden. Een aantal van deze methoden is reeds toegepast of in verregaande staat van ontwikkeling. Er zitten echter ook voorstellen bij voor methoden die het stadium van ontwerp (vooral nog) niet gepasseerd zijn.

5.2 Methode algemeen

5.2.1 Principe van oorzaak en gevolg

De algemene aanpak om (mogelijke) effecten van fysische begrenzings op marginale statistieken te kwantificeren is om een stap terug te gaan in de “oorzaak-gevolg keten”. In die zin is er grote overlap met de probabilistische rekentechnieken (zie paragraaf 3.2) waarmee, in de zogeheten “Hydra-modellen”, voor de meeste watersystemen de hydraulische randvoorwaarden worden bepaald in het kader van HR2006. Dit alles is schematisch weergegeven in Figuur 5.1.

De hydraulische randvoorwaarden, bestaande uit de waterstand en golven voor de kering, worden binnen een Hydra-model op basis van rekenresultaten met een simulatiemodel bepaald uit de “basisvariabelen” (zie Tabel 2.1 voor een overzicht van de basisvariabelen per watersysteem). De taak van de Hydra-modellen bestaat eruit om de vertaalslag van de *statistiek* van deze variabelen naar de hydraulische randvoorwaarden te maken. Een vergelijkbare vertaalslag wordt gemaakt in het gestippelde blok van Figuur 5.1, zij het dat het nu een vertaalslag is van de *indirecte* invloedsvariabelen naar de basisvariabelen. Het toepassen van het simulatiemodel met de belangrijkste processen maakt het mogelijk om rekening te houden met de fysische begrenzings van de basisvariabelen.



Figuur 5.1 Grove schematisatie van de oorzaak gevolg keten van de hydraulische randvoorwaarden (waterstand en golven voor de kering).

De vraag is natuurlijk: “hoe ver we terug moeten gaan in de oorzaak-gevolg keten?”. De indirecte invloedsvariabelen in Figuur 5.1 hebben immers mogelijk ook te kampen met fysische begrenzingen die op basis van een puur statistische analyse vastgesteld kunnen worden. De belangrijkste overwegingen die bij deze vraag een rol spelen zijn:

1. zijn de gemodelleerde processen/begrenzingen nog relevant bij het vaststellen van de hydraulische randvoorwaarden?
2. de praktische haalbaarheid.

Met het tweede punt bedoelen we dat beschikbare (reken-)tijd, menskracht en budget in de regel limieten opwerpen aan de benodigde hoeveelheid analyses die uitgevoerd kan worden. Het eerste punt illustreren we aan de hand van een voorbeeld:

Ter bepaling van de golfrandvoorwaarden langs de kust hebben we beschikking over de golfrandvoorwaarden op relatief diep water, ongeveer rond de NAP – 20 m lijn. Deze golfrandvoorwaarden op relatief diep water maken, naast windsnelheid en waterstand, deel uit van de indirecte variabelen in het schema van Figuur 5.1. Ten aanzien van fysische begrenzingen is het (naar verwachting!) wel relevant om het effect hiervan op de golfperiode te onderzoeken, terwijl dat (naar verwachting!) voor de golfhoogte veel minder het geval is. De golfhoogte langs de kust wordt immers in belangrijke mate bepaald door de locale bodemdiepte dicht tegen de kust. Eventuele fysische begrenzingen op relatief diep water zijn daardoor niet of nauwelijks relevant. De golfperiode aan de kust daarentegen wordt juist wel voor een belangrijk deel bepaald door de golfperiode op relatief diep water. In hoofdstuk 7 werken we dit voorbeeld overigens uit aan de hand van een case-studie.

5.2.2 Opzet procedure

Globaal gezien passen we de volgende 5 stappen toe:

1. vaststellen welke processen aanleiding geven tot extreme waarden van de doelvariabele;
2. opstellen van een wiskundige beschrijving van deze processen middels variabelen;
3. afleiden van statistische verdelingsfuncties van deze variabelen;
4. implementeren van een fysisch gebaseerd rekenmodel waarmee de vertaalslag van de variabelen uit stap 3 naar de doelvariabele wordt gemaakt; en
5. uitvoeren van een probabilistische rekenexercitie, waarmee overschrijdingskansen van de doelvariabele worden vastgesteld.

Als de fysische processen op correcte wijze zijn geïmplementeerd in het rekenmodel van stap 4 dan is het eindresultaat een statistische verdelingsfunctie die expliciet rekening houdt met fysische processen en begrenzingen. De praktische invulling van stap 1 t/m stap 5 verschilt sterk per type systeem (kusten, meren, bovenrivieren, benedenrivieren) omdat de relevante processen verschillen. Per systeem beschrijven we één potentiële en/of bestaande methode, wetende dat er uiteraard meerdere wegen naar Rome leiden. Bij de beschrijving van elke methode houden we, waar mogelijk, stap 1 t/m 5 als leidraad aan. Dat betekent dat we bij elke methode en elk systeem (beknopt) beschrijven:

1. de relevante fysische processen onder extreme omstandigheden;
2. de in aanmerking komende variabelen (stochasten) om deze processen te beschrijven;
3. de beschikbare statistische verdelingsfuncties van deze variabelen en/of methoden voor het afleiden van deze functies;
4. het fysisch gebaseerd rekenmodel; en
5. de in aanmerking komende probabilistische rekenmethoden voor het afleiden van de statistiek van de doelvariabele.

5.3 Rivierafvoeren: Neerslaggeneratormethode

Om de statistiek van rivierafvoeren op een fysisch gebaseerde manier af te kunnen leiden is door RIZA, in samenwerking met o.a. het KNMI, de Bundesanstalt für Gewässerkunde fG, WL en HKV, de neerslaggeneratormethode ontwikkeld. Dit is een keten van een neerslagmodel, een hydrologisch model en een hydraulische model. Het hydrologisch/hydraulisch model berekent de rivierafvoer op een bepaalde locatie (Lobith, Borgharen), gevoed door synthetische neerslag- en temperatuurreeksen voor het betreffende stroomgebied. Deze neerslagreeksen worden gegenereerd door de zogenaamde neerslaggenerator. In deze paragraaf bespreken we deze methode, waarbij we gebruik maken van rapportages van eerder uitgevoerde studies door RIZA, KNMI en WL (o.a. RIZA, 2005; WL, 2005a, KNMI, 2004).

1. De relevante fysische processen onder extreme omstandigheden

Het afvoerproces in de Rijn bij Lobith of in de Maas bij Borgharen wordt bepaald door de weersomstandigheden in en de gesteldheid van het betreffende stroomgebied. De processen die hierbij een rol spelen zijn:

- de neerslag in het stroomgebied en de temperatuur (die bepaalt of neerslag in de vorm van regen of van sneeuw valt);
- het proces van afstromen van het regenwater of de gesmolten sneeuw uit de bergen in de riviertakken;
- de verplaatsing van de afvoer door de riviertakken en het combineren van de diverse bijdragen van de zijtakken tot de afvoer in de hoofdrivier.

Onder extreme omstandigheden waarin extreem hoge afvoeren Nederland binnen komen is sprake van:

- extreme neerslag in een groot deel van het stroomgebied over meerdere dagen;
- een verzadigde ondergrond, zodat de neerslag in hoog tempo richting rivier afstroomt;
- overstroming van gebieden langs de rivier bovenstrooms van Lobith of Borgharen.

2. De stochastische variabelen die de processen beschrijven

In de neerslaggeneratormethode worden alleen de neerslag en de temperatuur in het stroomgebied als stochasten beschouwd. De hydrologische en hydraulische processen die daarna een rol spelen zijn als deterministische processen gemodelleerd.

3. De statistische verdelingsfuncties van de variabelen

Voor de neerslag en de temperatuur worden lange reeksen gegenereerd op basis van de beschikbare reeks metingen. Deze techniek staat beter bekend als *resampling* (zie paragraaf 3.3.3). In het geval van de neerslaggenerator worden van gemeten reeksen de daggegevens in random volgorde geplaatst, waarbij rekening wordt gehouden met afhankelijkheden in de tijd en in de ruimte (i.e. tussen de diverse meetstations). Op deze manier kunnen reeksen van een willekeurige lengte (typisch enkele duizenden jaren) gegenereerd worden, waarin de karakteristieke kenmerken die belangrijk zijn voor de rivierafvoeren overeenkomen met de metingen.

Vanwege het gebruik van resampling-technieken wordt er geen concrete statistische verdelingsfunctie afgeleid voor de variabelen neerslag en temperatuur. Door de resampling-methode die wordt gehanteerd blijven alle relevante statistische kenmerken van de gemeten reeksen behouden in de synthetische reeksen. Dat betekent dat een willekeurige gegenereerde deelreeks van 35 jaar in statistische zin (gemiddelden, gemiddelde jaarmaxima, etc) sterke overeenkomsten vertoont met de meetreeks van 35 jaar).

Doordat de neerslaggeneratormethode een lange reeks synthetische afvoergegevens levert kunnen op basis van deze reeks de herhalingstijden van extreem hoge afvoeren bepaald worden, zonder dat daarbij gebruik gemaakt hoeft te worden van statistische extrapolatie-technieken. Het is echter wel van belang om te realiseren dat de gegenereerde reeks gebaseerd wordt op een meetreeks van orde 35 jaar (1961-1995). Hoewel de lengte van de gegenereerde reeks in principe onbeperkt is, is de basis dat wel. Dat betekent bijvoorbeeld dat de hoogst gemeten dagneerslag in de reeks van 35 jaar nooit overschreden zal worden in de gegenereerde reeks. Een ander aspect is dat het model werkt op basis van dagwaarden, terwijl vooral voor de Maas de fluctuaties binnen een dag ook relevant kunnen zijn voor de resulterende piekafvoer.

4. Het fysisch gebaseerd rekenmodel

De synthetische reeksen die door de neerslaggenerator worden gegenereerd worden vertaald naar afvoerreeksen met behulp van twee fysisch gebaseerde modellen:

- Het neerslag-afvoerproces wordt gemodelleerd met het HBV model (SMHI, 1999) een HBV schematisatie van de diverse deelstroomgebieden, en
- De voortplanting van de afvoergolf door de hoofdriever wordt gemodelleerd met een SOBEK schematisatie.

In geval van de Rijn zijn diverse SOBEK schematisaties beschikbaar, waarin verschillende aannames worden gedaan over het overstromen van gebieden langs de Rijn in Duitsland.

5. De probabilistische rekenmethoden

De statistiek in de neerslaggeneratormethode zit enerzijds aan het begin, waar de neerslagreeksen worden gegenereerd, en anderzijds aan het eind van de modellentrein. In de laatste fase wordt namelijk de lange afvoerreeks vertaald naar een overschrijdingsverdeling van de afvoer. In deze methode wordt dus geen gebruik gemaakt van methoden als Numerieke Integratie of Monte Carlo analyse. In feite is resampling de techniek die hier toegepast wordt, hetgeen vrij bijzonder is in het geval van extreme-waardenanalyses.

Door trekkingen uit te voeren uit de bestaande dagen van meetreeks (zoals voor de Rijn), komen er dus geen “extremere” dagen voor dan die beschikbaar zijn in de meetreeks, terwijl men in extreme-waardenanalyse toch per definitie juist in die extremen geïnteresseerd is. De gedachte achter de methode is juist dat het in bijvoorbeeld de Rijn vooral gaat om meerdaagse perioden. Door toepassing van resampling ontstaan er nieuwe reeksen van opeenvolgende dagen die tot veel extremere afvoeren aanleiding kunnen geven dan de bestaande meetreeks.

Bevindingen

In de studie van (Lammersen, 2004) staat een beknopte analyse beschreven van resultaten met de neerslaggenerator voor de *Rijn* bij Lobith. In de reeks van 1000 jaar, gesampled uit de gemeten neerslag in de periode 1961-1995, komen zoals verwacht hogere 10-daagse sommen voor dan in de meetreeks. De statistiek van 10-daagse sommen komt echter goed overeen met de waarnemingen in het gemeten bereik (d.w.z. voor lage herhalingstijden). De maximale gesimuleerde afvoer in 1000 jaar is gelijk aan $19.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (vergelijk: de hoogst gemeten waarde is $12.500 \text{ m}^3/\text{s}$), indien aangenomen wordt dat er geen overstromingen langs de Rijn in Duitsland plaats vinden. Bij deze aanname geldt bovendien dat de overschrijdingsverdeling goed overeen komt met het resultaat van directe extrapolatie uit de gemeten afvoeren. Indien wel rekening gehouden wordt met overstromingen langs de Oberrhein dan is de maximale afvoer gelijk aan $16.700 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit geeft aan dat fysische maxima wel degelijk een rol spelen. Ook langs de Niedderhein kunnen overstromingen optreden onder extreme omstandigheden die een reducerend effect hebben op de afvoer bij Lobith. Dit aspect is vooralsnog niet gekwantificeerd met de neerslaggenerator, maar zeker de moeite van het analyseren waard.

In de studie van (Aalders et al., 2004) is een analyse uitgevoerd met rekenresultaten van de neerslaggenerator voor de *Maas* bij Borgharen. In deze studie is een reeks van 3.000 jaar gegenereerd en ook hier is de maximale gesimuleerde afvoer een stuk hoger dan de hoogst gemeten waarde: 3.914 m³/s resp. 3.080 m³/s. In deze studie is niet expliciet gekeken naar effecten van overstromen van dijken. Wel blijkt uit de analyse dat de berekende maatgevende afvoer op basis van de uitkomsten van de neerslaggenerator in dezelfde orde van grootte liggen als de maatgevende afvoer die op basis van metingen is vastgesteld.

Ook in de studie van (Leander et al., 2005) is een analyse uitgevoerd met rekenresultaten van de neerslaggenerator voor de *Maas* bij Borgharen. In deze studie zijn meerdere reeksen van 3.000 jaar gegenereerd en ook hier is de daggemiddelde maximale gesimuleerde afvoer een stuk hoger dan de hoogst gemeten waarde: 4.500 m³/s resp. 3.080 m³/s. In deze studie is nog niet expliciet gekeken naar hydraulische aspecten zoals het overstromen van dijken. Wel blijkt uit de analyse dat het volume van de berekende maatgevende afvoergolf op basis van de uitkomsten van de neerslaggenerator in dezelfde orde van grootte ligt als die van de maatgevende afvoergolf die op basis van opgeschaalde metingen is vastgesteld.

5.4 Meerpeil

In het kader van R&D heeft WL in de afgelopen jaren in samenwerking met RIZA een casestudie uitgewerkt over extreme meerpeilen van het IJsselmeer (WL, 2004b; Van der Klis et al, 2005). Onderstaande uitwerking is op deze studie gebaseerd.

I. De relevante fysische processen onder extreme omstandigheden

In het R&D project is een analyse uitgevoerd naar de invloedsfactoren die van belang zijn voor extreme meerpeilen. Hiervoor is gebruik gemaakt van het model WINBOS, een SOBEK schematisatie van het IJsselmeergebied. Op basis van deze analyse zijn de volgende invloedsfactoren geselecteerd:

- de IJsselaflow;
- de cumulatieve afvoer van de kleinere rivieren en kanalen die uitmonden in het IJsselmeer (de zgn. ‘regionale toevoer’);
- de zeewaterstand bij Den Oever;
- de windrichting; en
- de windsnelheid.

De eerste twee factoren zijn verantwoordelijk voor de toevoer van water naar het IJsselmeer, de laatste drie beïnvloeden de mate waarin het water uit het IJsselmeer geloosd kan worden op de Waddenzee.

2. De stochastische variabelen (stochasten) die de processen beschrijven

De invloedsfactoren representeren processen met een dynamisch karakter, d.w.z. met een sterke tijdsafhankelijke variabiliteit (en in sommige gevallen ook met een ruimtelijke variabiliteit). Voor praktische doelen is een relatief eenvoudige beschrijving van deze dynamiek nodig. Het is daarbij uiteraard van belang dat in de beschrijving de belangrijke kenmerken met betrekking tot het genereren van hoge waterstanden op het IJsselmeer bewaard blijven. We bespreken hier in het kort de gebruikte schematisaties van de invloedsfactoren.

De *IJsselafvoer* is gekarakteriseerd door de maximale afvoer die optreedt in de gesimuleerde gebeurtenis. De tijdsafhankelijke variatie van de afvoer wordt gerepresenteerd door een gestandaardiseerde hydrograaf, waarvan de vorm gebaseerd is op de statistiek van gemeten hydrografen en vastgesteld met behulp van de zogenaamde “golfvormgenerator”(HKV 1999a,b). Bij elke simulatie vindt de piek van de hydrograaf plaats op dag 15 van de gesimuleerde gebeurtenis (de gesimuleerde periode is 30 dagen).

De *zeewaterstand* gedurende één getij wordt gemodelleerd als een sinusfunctie met een amplitude van 0.75 m. Het gemiddelde van de sinusfunctie wordt constant verondersteld gedurende een periode van 5 dagen. Omdat een periode van 30 dagen wordt gesimuleerd betekent dit dat in totaal 6 onafhankelijke stochastische variabelen nodig zijn om de tijdsafhankelijke variabiliteit van het zeeniveau te beschrijven. De keuze voor een periode van 5 dagen is een afweging tussen een nauwkeurige representatie van de tijdsafhankelijke variabiliteit aan de ene kant en het benodigde aantal model simulaties aan de andere kant.

In tegenstelling tot de *IJsselafvoer*, wordt de gecombineerde afvoer van *regionale toevoer* beschouwd als constant gedurende de gesimuleerde periode van 30 dagen. Dezelfde aanname geldt voor de *windrichting*. Het zeeniveau, de windsnelheid en de windrichting worden deterministisch aan elkaar gekoppeld. Dit betekent dat de windsnelheid als constant beschouwd wordt gedurende 5 dagen, analoog aan het zeeniveau.

Er is geverifieerd dat deze vereenvoudigende aannames geoorloofd zijn, door na te gaan of historische extreme IJsselmeerpeilen met deze methode voldoende nauwkeurig kunnen worden gereproduceerd.

3. De statistische verdelingsfuncties van de variabelen

De benodigde statistische kenmerken van de *IJsselafvoer*, het zeeniveau bij Den Oever en de wind zijn overgenomen uit voorgaande studies (HKV, 2001; RIKZ, 2000). Deze statistieken zijn afgeleid door extreme-waardenverdelingen te fitten door beschikbare meetgegevens. De beschikbare statistiek van het zeeniveau is omgezet van een getijdenschaal naar een 5-daagse schaal.

Een marginale verdelingsfunctie van de regionale toevoer was niet beschikbaar en moest daarom worden afgeleid binnen het huidige onderzoek. Voor dit doeleinde is een extreme-waardenvergelijking gefit door beschikbare data.

4. Het fysisch gebaseerd rekenmodel

Voor de IJsselmeerstudie heeft RIZA het WINBOS instrumentarium beschikbaar gesteld. Het WINBOS (Waterhuishouding in het Natte Hart – Beslissings Ondersteunend Systeem) is een beslissingsondersteunend systeem voor het IJsselmeer, Markermeer, de randmeren, Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal. WINBOS is in opdracht van RIZA ontwikkeld met als doel verschillende waterbeheerstrategieën onder verschillende scenario's te kunnen beoordelen.

Het onderdeel van het model dat in de IJsselmeerstudie gebruikt is, is het waterbewegingsmodel uit WINBOS. Dit is het zogenaamde SOBEK-BEKKEN model. Dit model bevat een relatief eenvoudige SOBEK-schematisatie van het IJsselmeergebied, waarin elk meer is weergegeven door één knoop. Verder zijn alle kunstwerken tussen de meren in de schematisatie opgenomen. Randvoorwaarden van het SOBEK model zijn:

- De IJsselafoer nabij het Ketelmeer
- De inlaat bij de Beatrixsluizen op het Amsterdam-Rijnkanaal
- De inlaat van de Irenesluizen op het Amsterdam-Rijnkanaal
- Buitenwaterstanden bij Kornwerderzand, Den Oever (Waddenzee)
- Buitenwaterstand op de Noordzee bij IJmuiden

De meren zijn gemodelleerd als rechte bakken met een constant oppervlak. Het debiet over de takken wordt bepaald met behulp van een speciale formulering voor windopzet bij kunstwerken. Het WINBOS simuleert het IJsselmeergebied en berekent meerpeilen per half uur. In het WINBOS is gebruik gemaakt van de beschikbare gegevens voor de periode 1951-1996. In het rapport 'Onafhankelijk Onderzoek Markermeer' is aangetoond dat de met WINBOS berekende waterstanden een voldoende goede fit vertonen met de gemeten waterstanden.

In de IJsselmeerstudie is de hierboven beschreven SOBEK-schematisatie gebruikt als model van het fysische systeem. De relevante invloedsfactoren voor het IJsselmeerpeil zijn als stochast gemodelleerd. Het WINBOS is vervolgens gebruikt om voor verschillende realisaties van de gekozen stochasten te berekenen wat het daggemiddelde maximale IJsselmeerpeil wordt.

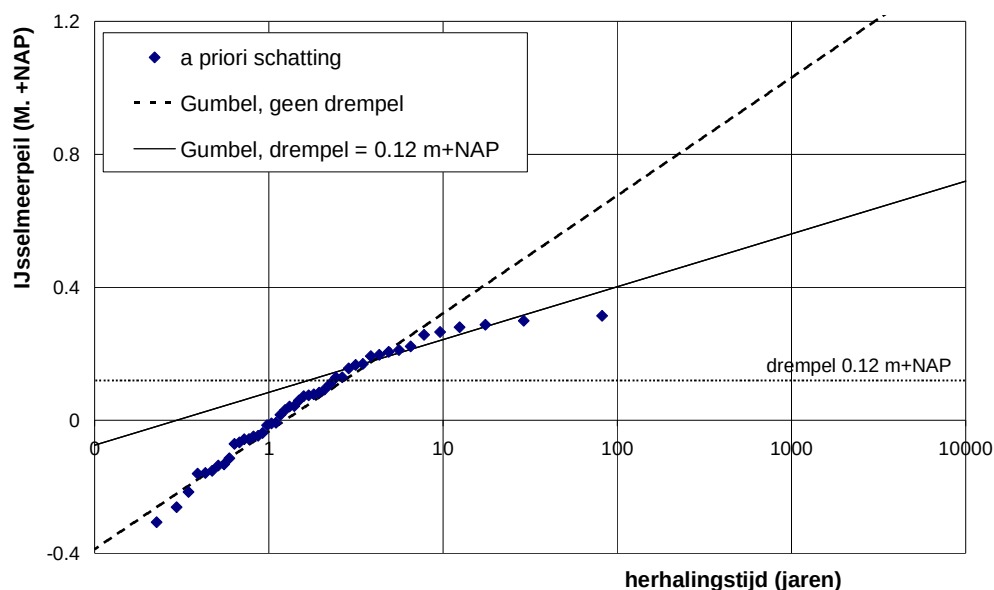
5. De probabilistische rekenmethoden

Er zijn vier verschillende methodes toegepast om de statistiek van extreme meerpeilen van het IJsselmeer af te leiden. De eerste methode bestaat uit het fitten van een extreme-waardenverdelingsfunctie door een reeks gemeten jaarmaxima en vervolgens het extrapoleren van deze functie om de statistiek van de extreme waarden af te leiden. In tegenstelling tot de eerste methode houden de andere methoden expliciet rekening met de fysische processen die de dynamiek van het meerpeil bepalen.

- Numerieke integratie
- Numerieke integratie op basis van Principal Component Analysis
- Monte Carlo Analyse

Bevindingen

Over het algemeen komt het berekende meerpeil bij de diverse probabilistische methoden een herhalingstijd van 4.000 jaar voor de verschillende methoden uit op 0,6 tot 0,8 m+NAP. Ter vergelijking: een methode op basis van directe statistische extrapolatie op basis van 46 jaarmaxima kwam uit op 1,25 m+NAP⁵. De oorzaak van dat verschil ligt in het feit dat de jaarmaxima een sterke knik laten zien rond een meerpeil van 0,10-0,20 m+NAP (zie Figuur 5.2). De fit op basis van deze jaarmaxima (gestippelde lijn) volgt hoofdzakelijk het relatief steile patroon van de lagere metingen. Na extrapolatie tot een herhalingstijd van 4.000 jaar levert dat de relatief hoge waarde van 1,25 m+NAP op. In Figuur 5.2 staat ook een fit afgebeeld op basis van alleen de jaarmaxima die hoger zijn dan 0,12 m+NAP. In dat geval daalt de 1/4.000 jaar meerpeil met ruim 0,6 m en is daarmee meer in overeenstemming met de probabilistische methoden. Mogelijk dat de knik in de jaarmaxima duidt op toenemende invloeden van fysische begrenzings voor extremere gebeurtenissen waar de probabilistische methoden rekening mee houden. Mogelijk duidt dit op toenemende invloeden van fysische begrenzings voor extremere gebeurtenissen. Anderzijds steekt het meest extreme gemeten meerpeil, dat van oktober 1998 (geen onderdeel van de getoonde meetreeks; die loopt tot 1996) weer ver boven de overige waarnemingen uit, hetgeen de sterke invloed van fysische begrenzings weer enigszins nuanceert.



Figuur 5.2 Gumbelfit van het IJsselmeerpeil op basis van (1) alle 46 jaarmaxima en (2) de verzameling jaarmaxima boven 0.12 m +NAP.

⁵ We benadrukken dat deze waarde en de hier getoonde figuren verschillen van de officiële meerpeilstatistiek (paragraaf 4.4), vanwege het gebruik van verschillende methoden.

5.5 Waterstand op zee en windsnelheid

Vanwege de nauwe verwevenheid tussen de waterstand op zee en de windsnelheid bespreken we deze beide variabelen tezamen.

I. De relevante fysische processen onder extreme omstandigheden

Windopzet

Over het ontstaan van (extreme) windopzet langs de Noordzeekust van Nederland kan het volgende gesteld worden:

- het is vooral gedreven door sterke windsnelheden die langdurig aanhouden in de richting van de kust;
- de locale geometrie van de kust is sterk bepalend voor de mate van windopzet;
- langs de Nederlandse kust is het vooral wind die uit het westen en noordwesten komt die aanleiding kan geven tot extreme opzet;
- in zuidelijke richting wordt de Noordzee steeds smaller, zodat het water opgestuwd wordt en relatief weinig ruimte voor doorstroming heeft in de richting van het nauw van Calais.

Energieoverdracht vanuit de atmosfeer naar water

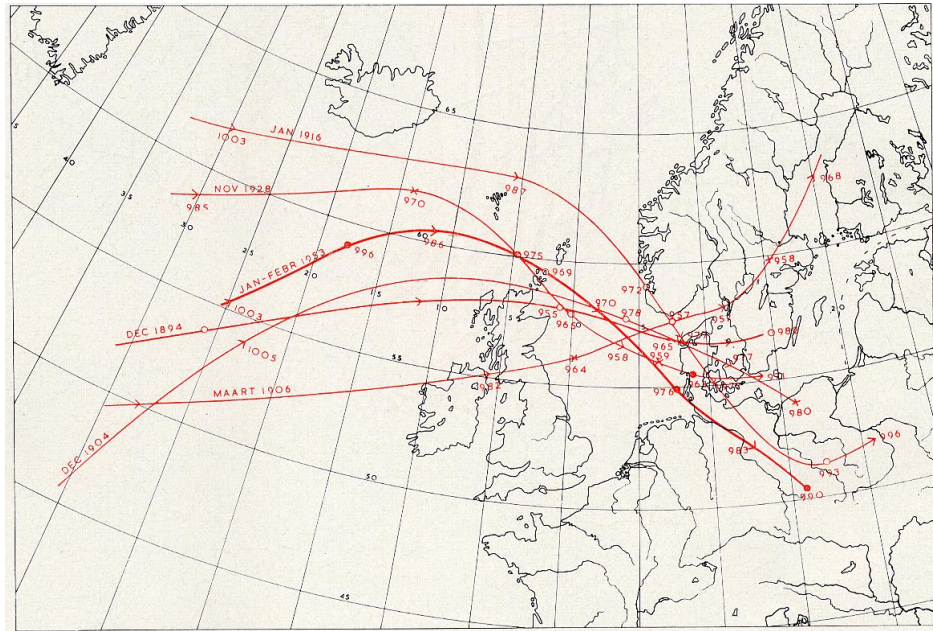
In de diepe delen van de Noordzee (relatief ver verwijderd van de Nederlandse kust) is de lage druk die samen gaat met zware stormen het belangrijkste mechanisme voor windopzet. Vanwege de vrijwel ongelimiteerde hoeveelheid beschikbaar water kan gesteld worden dat een daling van 1 hPa in de luchtdruk leidt tot een stijging van 1 cm in de waterstand (zie bijv. [Pond and Pickard, 1983]). In ondiepere delen van de Noordzee (richting de Nederlandse kust) is het de wrijvingskracht die de wind overbrengt op het wateroppervlak het voornaamste mechanisme voor het genereren van opzet. Deze wrijvingskracht (en dus ook de energieoverdracht) wordt over het algemeen verondersteld evenredig te zijn met het kwadraat van de windsnelheid.

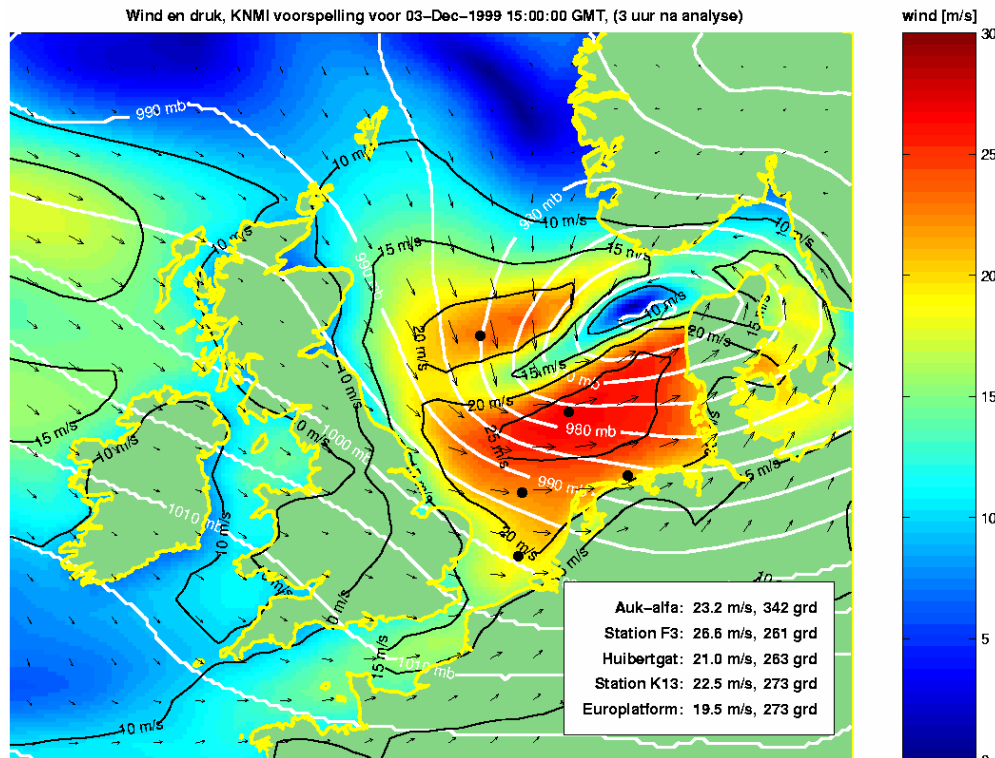
Er is geen indicatie dat er fysische begrenzingen zitten aan de mate van energieoverdracht van de atmosfeer aan het wateroppervlak. Met andere woorden: als extreem hoge windsnelheden kunnen voorkomen, dan zal de bijbehorende energieoverdracht zich naar verwachting gedragen volgens de kwadratische relatie met de windsnelheid. In termen van fysische begrenzingen van de waterstandsopzet is het derhalve vooral relevant om de begrenzingen in de windsnelheid te onderzoeken en de omvang van het windveld en de tijdsduur.

Voortplanting van stormvelden over de Noordzee

Extreme opzet in de Noordzee wordt in de regel veroorzaakt door een zware storm boven de Atlantisch oceaan die in oostelijke richting trekt naar de Noordzee. De belangrijkste invloedsvariabele van de hoogte van de opzet is de daling van de luchtdruk in het “oog” van de storm. Over het algemeen geldt dat een daling tot 970 hPa tot sterke stormen leidt boven de Atlantische oceaan en dat een verdere daling tot 950 hPa of lager zeldzaam zijn.

Over het algemeen beweegt de waterstandsverhoging mee met het oog van de storm in oostwaartse richting. Nadat het oog van de storm Schotland is gepasseerd buigt het doorgaans af in zuidelijke richting, waarna het wegtrekt richting Duitsland en Denemarken. Figuur 5.3 illustreert dit principe aan de hand van 6 waargenomen (extreme) stormgebeurtenissen (uit: Gerritsen, 2005; oorspronkelijk: Rijkswaterstaat and KNMI, 1961)





Figuur 5.4 Stormveld van 3 December 1999 (Philippart, 2000; data bron KNMI)

2. De stochastische variabelen die de processen beschrijven

Zoals blijkt uit de vorige paragraaf blijkt is het bij het onderzoek naar fysische begrenzingen in de waterstand vooral van belang om de windsnelheid goed in model te brengen, zowel in fysische als probabilistische zin. In lijn met de vorige paragraaf ligt het dan voor de hand om de volgende variabelen te kiezen die stochastisch gemodelleerd worden:

1. de baan die de storm volgt;
2. de snelheid waarmee de baan wordt afgelegd; en
3. de grootte van het verval in luchtdruk in de oog van de storm;

3. De statistische verdelingsfuncties van de variabelen

De statistische verdelingsfuncties zijn, voor zover bekend, niet beschikbaar en zullen aan de hand van analyses van weersystemen voorafgaand en tijdens extreme stormgebeurtenissen moeten worden afgeleid.

4. Het fysisch gebaseerd rekenmodel

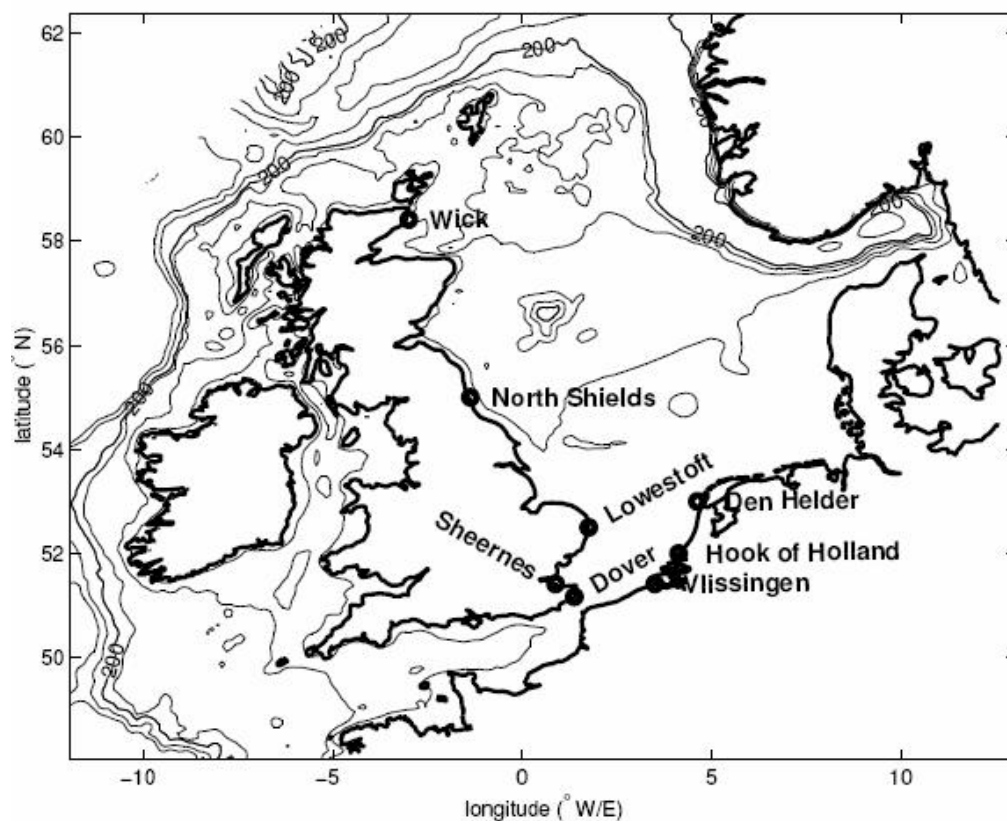
Als keuze van het fysisch gebaseerde rekenmodel ligt de keuze van het 2-dimensionele waterbewegingsmodel WAQUA voor de hand. Er is de afgelopen jaren veel ervaring met dit model opgedaan en het wordt erkend als zijde “state-of-the-art”. Dit model wordt door de stormvloedwaarschuwingdienst, SVSD, van rijkswaterstaat gebruikt om de dagelijkse voorspellingen van getij en opzet te verrichten. Met WAQUA worden waterstanden, waterstromingen en concentraties van opgeloste stoffen berekend in open wateren.

WAQUA werkt met diepte-gemiddelde waterstromingen en concentraties. Er wordt verondersteld dat deze niet variëren over de diepte van de rivier of zee die wordt gesimuleerd. Dit is een 2D (tweedimensionale horizontale) benadering. Het WAQUA model voor de Noordzee beschrijft de relevante processen zoals hydrostatische drukkrachten, bodemwrijving en corioliskrachten.

Binnen WAQUA is het zogenaamde “(Dutch) Continental Shelf Model” ontwikkeld (Verboom et al, 1992, Gerritsen et al, 1995) waarmee de Noordzee en directe omgeving is gemodelleerd tot tenminste de 200 m dieptelijn (zie Figuur 5.5). Het model is opgebouwd uit sferische gridcellen van $1/8^\circ$ graad bij $1/12^\circ$ graad (ongeveer 8 bij 8 km).

Naast het DCSM zijn er ook andere schematisaties beschikbaar waarmee het gebied voor de Nederlandse kust in meer detail gemodelleerd kan worden. Afhankelijk van de uiteindelijke toepassing kunnen de diverse schematisaties aan elkaar gekoppeld worden. Het betreft:

- DCSM: Dutch Continental Shelf Model (grof grid);
- ZUNO: model Zuidelijke Noordzee (middel);
- Kuststrook Model (fijn grid).



Figuur 5.5 Gemodelleerd gebied in het Dutch Continental Shelf Model (uit: Verlaan, et al., 2005)

5. De probabilistische rekenmethoden

Voor zover bekend zijn er geen uitgebreide probabilistische berekeningen uitgevoerd met WAQUA. Echter, bij het afleiden van de statistiek van de waterstand op zee in het kader van HR2006 en voorgangers is al in enige mate rekening gehouden met de fysica onder extreme omstandigheden en daarbij zijn modelberekeningen met WAQUA uitgevoerd (zie paragraaf 4.5.1). In die analyses zijn enkele “superstormen” gesimuleerd: opgeschaalde versies van waargenomen gebeurtenissen van februari 1953, november 1981, februari 1983 en februari 1989. De simulaties leverden extreme waterstanden in de diverse stations op die vervolgens weer onderling vergeleken zijn. Op basis van deze vergelijking zijn de basispeilen aangepast opdat het ruimtelijke verloop van de peilen langs de kustlijn meer in overeenstemming is met de fysica.

In 1995 zijn de basispeilen voor de hele Nederlandse kust afgeleid (RIKZ, 1995). Het statistisch onderzoek uit 1993 is daartoe opnieuw uitgevoerd, nu met additionele stations Terneuzen, Hansweert, IJmuiden en West Terschelling. Ook het fysische onderzoek is opnieuw uitgevoerd, d.w.z. er zijn additionele simulaties uitgevoerd van synthetische stormgebeurtenissen. De uitkomsten van de simulaties zijn gebruikt om door middel van (niet-lineaire) interpolatie de basispeilen te schatten voor locaties waar geen metingen beschikbaar zijn. Het resultaat bestaat uit een aantal ruimtelijke contourlijnen die punten van gelijke basispeilen verbinden.

Tabel 5.1 toont de belangrijkste resultaten van de bovengenoemde onderzoeken (uit: Rijkswaterstaat, 2000). Hieruit blijkt dat de ontwerpwaterstanden zo’n 100-150 cm hoger zijn dan de hoogst gemeten waterstanden.

Tabel 5.1 Waterstanden met overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar en hoogste waargenomen waterstanden (in cm +NAP) sinds 1900.

Station	1/10.000 jaar ⁻¹ waterstand	hoogst waargenomen waterstand	datum	verschil
Vlissingen	545	455	1 Feb 1953	90
Hoek van Holland	500	385	1 Feb 1953	115
Den Helder	440	325	1 Feb 1953	115
Harlingen	500	369	3 Jan 1976	131
Delfzijl	615	483	01 Nov 2006	132

Voor zover bekend zijn geen uitgebreide probabilistische berekeningen uitgevoerd met WAQUA. Op zich lenen alle methoden uit paragraaf 3.2 zich voor een dergelijke exercitie. Uiteraard moet wel rekening gehouden worden met de rekentijd van het model, maar deze is niet uitzonderlijk lang (orde 2 minuten rekentijd om 24 uur door te rekenen met het DCSM). Bovendien kan, zoals gesuggereerd, het aantal stochastische variabelen beperkt blijven tot 3 (de baan die de storm volgt; de snelheid waarmee de baan wordt afgelegd en de grootte van het verval in luchtdruk in de oog van de storm) waardoor het aantal benodigde berekeningen waarschijnlijk binnen de perken blijft.

Bevindingen

De 1/10.000 jaar waterstanden die in het kader van HR2006 en voorgangers zijn afgeleid, zijn enkele jaren geleden geanalyseerd om na te gaan of deze fysisch mogelijk zijn (Philippart, 2000). De basis van de analyse was de stormvloed van 1953. Daarop zijn vervolgens enkele scenario's gesuperponeerd om te zien in hoeverre deze stormvloed nog hogere waterstanden had kunnen opleveren onder ongunstigere condities. De berekeningen zijn wederom uitgevoerd met het continental shelf model in WAQUA.

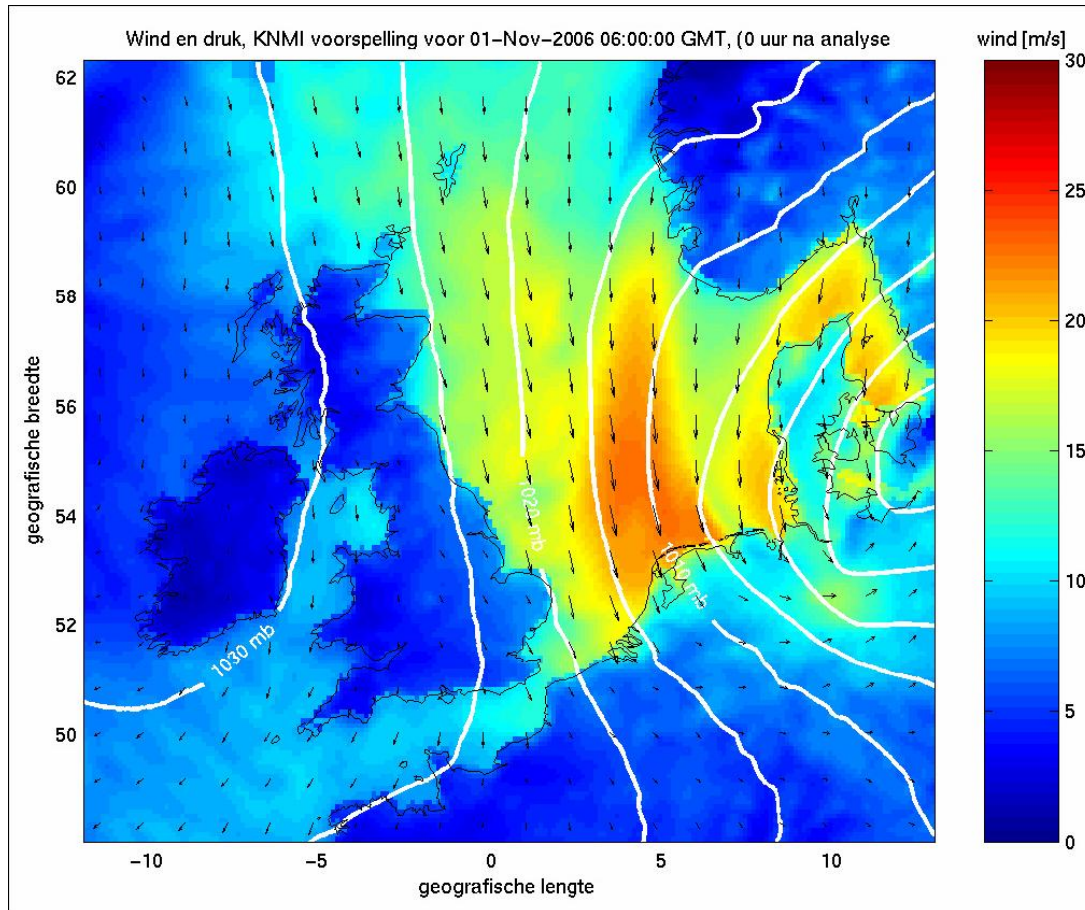
Tabel 5.2 toont de resultaten van deze analyse en daaruit blijkt dat een waterstand van 5 m+NAP (Tabel 5.1) bij Hoek van Holland wel degelijk mogelijk is. Merk op dat de aannames fysisch realistisch zijn.

Tabel 5.2 Potentiële maximale waterstanden bij Hoek van Holland voor verschillende scenario's (Philippart, 2000)

Scenario	astronomisch getij [m+NAP]	opzet [m.]	resulterende waterstand [m+NAP]
A: Februari 1953	0.81	3.04	3.85
B: scenario A + zeespiegelrijzing; situatie 2000	1.03	3.04	4.07
C: scenario B + springtij	1.58	3.04	4.62
D: scenario C + verschoven stormveld	1.58	3.22	4.80
E: scenario D + 4% extra windsnelheid	1.58	3.47	5.05
F: scenario D + 10% extra windsnelheid	1.58	3.79	5.47

Verder is nog het vermelden waard dat de stormgebeurtenis van 1 november 2006 bij Delfzijl tot een extreme waterstandsopzet heeft geleid van orde 3,50 m. Met name de noordelijke oriëntatie van de windsnelheid heeft daartoe geleid (zie Figuur 5.6) want qua windsnelheden zijn er extremere stormgebeurtenissen bekend. Het astronomisch getij was relatief laag, waardoor de maximale waterstand "slechts" tot 4,83 m+NAP is gekomen. Indien het op dat moment springtij was geweest, was de waterstand wellicht al in de buurt van de 1/10.000 jaar waterstand gekomen.

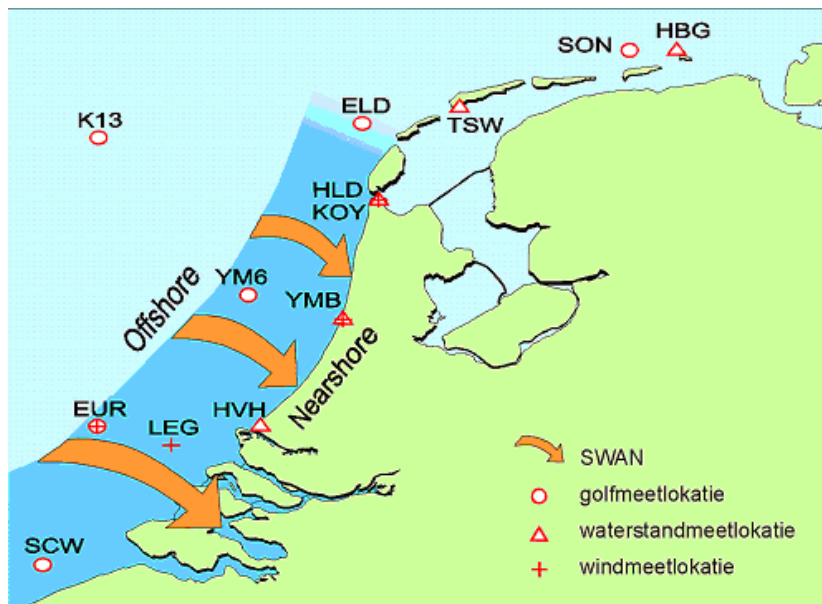
Tot slot merken we op dat in deze exercitie niet gekeken is naar de uitkomsten van modellen van het ECMWF. Deze modellen geven een indicatie over de mogelijkheid van voorkomen van extremere windsnelheden.



Figuur 5.6 Windsnelheid en luchtdruk, KNMI voorspelling voor 1 november 2006 (Bron: SVSD rijkswaterstaat)

5.6 Golven op zee

Om een faalkans van de kering te kunnen bepalen is statistiek nodig van waterstand en golven direct voor de kering. Echter, de statistiek van *golven* is alleen beschikbaar voor enkele meetlocaties op diep water (offshore), omdat aan de kust de variatie van golfkarakteristieken door invloed van locale bodemeffecten te groot is. Daarom is er een vertaalslag nodig van golven op diep water naar het ondiepe water voor de waterkering (zie Figuur 5.7). In het kader van de HR2006 is deze vertaling gemaakt met het golfmodel SWAN.



Figuur 5.7 Schematische weergave van de vertaalslag van golven op diep water naar locaties direct voor de kering.

1. De relevante fysische processen onder extreme omstandigheden

In de afleiding van de vastgestelde offshore randvoorwaarden zijn vooralsnog de mogelijk aanwezige fysische beperkingen niet verdisconteerd. In een eerste verkennende studie heeft (WL, 2005a) het model SWAN ingezet om effecten van diepte beperking in de statistische golfparameters mee te nemen. In deze paragraaf zullen we verder ingaan op de fysische beperkingen van de golfparameters onder extreme omstandigheden.

Golven worden op zee enerzijds opgewekt doordat wind energie overdraagt aan de golven. Omdat de golven niet willekeurig hoog en steil kunnen worden, zullen de golven anderzijds energie kwijtraken. Op open zee zal uiteindelijk een balans tussen generatie en dissipatie ontstaan. De processen die een rol spelen bij de vorming van het golfveld op zee zijn:

- Golfgeneratie en golfgroei als gevolg van wind.
- Golfdissipatie als gevolg van breken op steilheid. Dit is te zien aan de turbulente laag op voorkant van de golven.
- Niet-lineaire wisselwerkingen tussen golven die ervoor zorgen dat enerzijds golven langer worden en anderzijds korte golven worden gegenereerd.

Onder extreme omstandigheden kunnen de golven zo lang en hoog worden dat processen die onder normale omstandigheden alleen in de kustzone optreden, zich ook rond de -20 m lijn manifesteren naast bovengenoemde processen, d.w.z:

- Breken van golven door dieptebeperking;
- Bodemwrijving.

Het zal niet zo zijn dat met toenemende wind de golfhoogte en golfperiode per definitie zullen toenemen. Onder extreme omstandigheden is namelijk sprake van:

- Een maximale waarde voor golfhoogte en golfperiode als gevolg van diepte beperking.
- Verandering van de wind boven het zeeoppervlak, omdat de golven in feite in ondiep water terecht komen en daardoor de asymmetrische vorm krijgen die ze onder normale omstandigheden alleen in de kustzone krijgen. Door de steilere golven kan de surface drag (= energieoverdracht van wind naar water) veranderen.
- Een maximale waarde voor de overdracht van energie. Boven een bepaalde windsnelheid ziet de wind de golven als een nagenoeg glad oppervlak en neemt de energieoverdracht misschien zelfs af (volgens Makin, 2005).

Hoe de golven zich precies zullen gedragen onder extreme omstandigheden is niet altijd duidelijk. Onder deze omstandigheden zijn immers geen meetresultaten beschikbaar voor de Nederlandse wateren. Ook buitenlandse meetgegevens zijn schaars en beschrijven dikwijls een afwijkende configuratie ten opzichte van de Nederlandse kustgebieden. Desalniettemin, is het vertrouwen in het spectrale golfmodel SWAN groot genoeg om daarmee ook golfcondities onder extreme situaties te berekenen.

2. De stochastische variabelen die de processen beschrijven

De belangrijkste variabelen die de golfhoogte bepalen zijn de wind (snelheid en richting) en de waterstand. Verder is uiteraard de bodemconfiguratie van belang, maar deze wordt in principe niet als stochast beschouwd, hoewel deze wel degelijk van jaar tot jaar en van seizoen tot seizoen kan verschillen. In (WL, 2005b) zijn de windsnelheid, windrichting en waterstand als (enige) stochasten beschouwd in een eerste verkennende studie naar mogelijke fysische begrenzingen in de golfhoogte en golfperiode. Momenteel wordt in het kader van SBW – Waddenzee een vervolg gegeven aan deze analyse.

In beide studies worden de stochasten wind en waterstand gecombineerd met het golfmodel SWAN. De berekeningen met SWAN zijn *stationair*. De stochasten representeren derhalve een representatieve “instantane” waarde. In de studie van (WL, 2005b) was dat de maximale windsnelheid, de maximale waterstand en de dominante windrichting gedurende een storm. In de studie voor de Waddenzee die momenteel wordt uitgevoerd representeert de stochast windsnelheid de waarde die voorkomt op het moment van de maximale waterstand.

Vanwege de toepassing van het stationaire rekenmodel worden tijdsafhankelijkheden in de variabelen niet meegenomen. Het golfmodel SWAN biedt echter wel de mogelijkheid om dat te doen, aangezien er ook een niet-stationaire versie is. De stormduur en, aanverwant, het stormverloop heeft mogelijk grote impact op de resulterende golfhoogten. In dat geval dienen tijdsafhankelijkheden in de toekomst wel degelijk meegenomen te worden. Dat vergt allereerst een uitgebreide data-analyse van wind en waterstand (en wellicht ook golfparameters) om deze tijdsafhankelijkheid op zinvolle wijze te kunnen kwantificeren. Een mogelijkheid is om de stormduur dan als extra stochast mee te nemen en op basis van de stormduur een representatief stormverloop te construeren uit de realisaties van de stochasten wind en waterstand. Een andere optie is om het verloop van waargenomen stormen te selecteren en deze op te schalen naar de extreme hoogten die relevant zijn voor de probabilistische berekeningen.

3. De statistische verdelingsfuncties van de variabelen

De statistiek van de windsnelheid en waterstand zijn per windrichtingssector van 30 graden beschikbaar en afgeleid in het kader van de HR2006 en voorgangers. De afhankelijkheid tussen windrichting enerzijds en windsnelheid en waterstand anderzijds is daarmee vastgelegd. Het is echter ook van belang om de onderlinge afhankelijkheid tussen windsnelheid en waterstand mee te nemen. In het kader van de HR2006 is deze statistiek niet in expliciete (parametrische) vorm afgeleid, maar wel op indirecte wijze in het rekenmodel Hydra-K.

In Hydra-K wordt de afhankelijkheid van wind en waterstand gemodelleerd door het “opschalen” van simultane waarnemingen van windsnelheid en waterstand, volgens een methode die bekend staat als de “methode de Haan”. Opschalen betekent in dit verband niets anders dan een vertaalslag van waargenomen stormgebeurtenissen naar extreme stormgebeurtenissen. Bij deze opschaling wordt de samenhang (correlatie) tussen wind en waterstand verondersteld behouden te blijven.

Bij eventuele toekomstige analyses naar bovengrenzen van golfparameters kan er voor gekozen worden om alsnog een parametrische beschrijving van de afhankelijkheid tussen windsnelheid en waterstand af te leiden. Anderzijds is het ook mogelijk om de “methode de Haan” toe te passen, al dan niet met gebruik van de programmatuur van Hydra-K. In de case-studie voor de Waddenzee (hoofdstuk 7) wordt deze laatste optie toegepast.

De stormduur is mogelijk een belangrijke stochast die aan de analyses toegevoegd moet worden, maar het is vooralsnog onduidelijk hoe de verdelingsfunctie van de stormduur er in extreme situaties uit zou moeten zien. Van Aalst (1983) heeft een aanzet hiertoe gegeven in termen van een log-normale verdeling. De met deze methode verkregen relatie tussen golfhoogte en waterstand geven echter niet het vertrouwen dat de voorgestelde verdeling van de stormduur nauwkeurig is. Welke verdelingsfunctie wel tot nauwkeurige resultaten leidt, dient in de toekomst te worden onderzocht.

4. Het fysisch gebaseerd rekenmodel

De hydrodynamische processen die een rol spelen bij de vertaling van offshore golfcondities naar nearshore locaties onder normale en extreme omstandigheden wordt gedaan met behulp van het spectraal model SWAN. Dit model is ook ingezet om de fysische bovengrenzen als gevolg van diepte beperking in de offshore meetlocaties te bepalen. Het model is state-of-the-art en wordt wereldwijd ingezet om golfcondities in kustzones van honderden vierkante kilometers te berekenen.

Desalniettemin is er onvoldoende inzicht in de validiteit van het model onder extreme omstandigheden. In het kader van SBW Randvoorwaarden wordt veel onderzoek verricht naar de kwaliteit van de modelvoorspellingen. Onder normale omstandigheden wordt vertrouwen in het model gekweekt door de berekende resultaten te vergelijken met meetresultaten. Indien nodig wordt het model cq. de modelinvoer verbeterd.

De focus van SBW Randvoorwaarden ligt voornamelijk op de stationaire modelversie. We kunnen echter stellen dat de stationaire aanname onder extreme omstandigheden niet altijd opgaan en dat significant betere voorspellingen verkregen zouden worden wanneer het model in instationaire mode gebruikt zou worden. Belangrijke aspecten die hierbij onderzocht moeten worden zijn:

- Calibratie en validatie van de niet-stationaire SWAN versie;
- Beschikbaarheid van inputgegevens;
- Hoe zien wind-, waterstand- en stromingsvelden er onder extreme condities uit?

Vooralsnog worden berekeningen onder normale en extreme omstandigheden uitgevoerd onder de aanname dat de situatie stationair is. Wanneer de wind-, waterstand en stromingsvariatie over een voldoende lange periode beperkt is zal aan deze aanname zijn voldaan. In de meeste gevallen is dit echter niet het geval en zouden de berekeningen in stationaire toestand moeten worden uitgevoerd.

5. De probabilistische rekenmethoden

Hoofdstuk 7 beschrijft een probabilistische rekenmethode waarmee de bovengrenzen van golfcondities bepaald zijn. Dit is zeker niet de enige geschikte methode. Op zich lenen alle methoden uit paragraaf 3.2 zich voor een dergelijke exercitie. Als we ervan uitgaan dat bij een dergelijke analyse van te voren reeds een matrix van mogelijk stormgebeurtenissen is doorgerekend met SWAN, dan kan de probabilistische rekentechniek putten uit de daaruit voortvloeiende database en hoeft een probabilistische berekening relatief weinig tijd te kosten. Om die reden maken alle bestaande Hydra's gebruik van een dergelijke aanpak via een database.

Indien gekozen wordt om de niet-stationaire versie van het model SWAN toe te passen moet rekening gehouden worden met een (sterke) toename van de rekestijd bij het samenstellen van de database. De dan toegevoegde stochast “stormduur” zal dan nl. aanleiding geven tot extra berekeningen en bovendien kost een niet-stationaire berekening met SWAN meer tijd dan een stationaire berekening.

6 Bestaande kennishiaten en knelpunten

6.1 Inleiding

Het vorige hoofdstuk beschrijft probabilistische rekenmethoden die mogelijk toegepast kunnen worden voor het afleiden van statistiek voor de basisvariabelen afvoer, meerpeil, waterstand op zee, golven op zee en wind. Dit hoofdstuk beschrijft de kennishiaten die opgevuld moeten worden om dergelijke rekenmethoden daadwerkelijk toe te passen en eventueel de belangrijkste knelpunten die daarvoor overwonnen moeten worden. Verder wordt bij enkele methoden die nu reeds worden toegepast in het kader van HR2006 de onderdelen genoemd die mogelijk voor verbetering vatbaar zijn.

6.2 Algemeen: klimaatverandering en homogeniteit

Een ander aspect dat bijdraagt aan de bestaande onzekerheden is klimaatverandering. Het breed gedragen beeld is dat meteorologische condities in de toekomst extremer worden als gevolg van klimaatverandering. Dat heeft tot gevolg dat de hydraulische belastingen van onze waterkeringen ook zwaarder zullen worden en daarop moet tijdig geanticipeerd worden. Er bestaat echter grote onzekerheid over de mate waarin het klimaat verandert en de snelheid waarmee dat gebeurt.

6.3 Afvoerverdeling Rijn/Maas

6.3.1 Extrapolatiemethode

Bij de methode die voor HR2006 is toegepast om de maatgevende afvoer te bepalen zijn in totaal 5 verdelingsfuncties gebruikt (zie paragraaf 4.2). Uiteindelijk is de gemiddelde uitkomst van deze functies bepalend. Hiermee wordt bereikt dat het individuele effect van één functie verkleind wordt, en daarmee ook de nadelige effecten van een eventuele “verkeerde keuze”. Echter, het opvallende aan deze methode is dat de uitkomsten van de individuele functies onderling sterk kunnen verschillen. Het maakt dus veel uit welke functie wordt gekozen; als er nog een verdelingsfunctie aan de procedure wordt toegevoegd kan de maatgevende afvoer weer veranderen. Gezien het enorme belang van de uiteindelijke maatgevende afvoer is het noodzakelijk om een steviger fundament onder de keuze van de verdelingsfuncties te bouwen. Hetzelfde geldt voor de keuze van de fitmethode, mede omdat ook deze keuze een significant effect kan hebben op de uitkomsten.

Verder verdient de homogenisatie van de meetreeks nog nadere aandacht. In het kader van HR2006 zijn gehomogeniseerde reeksen gebruikt die in het kader van HR2001 zijn afgeleid (BfG, 1999). Voor de *Rijn* bij Lobith is de meetreeks op basis van modelsimulaties gehomogeniseerd voor de kanalisatiewerken in de Oberrhein die tussen 1955 en 1977 zijn uitgevoerd. In de studie van (BfG, 1999) zijn eerst, ter validatie, modelberekeningen uitgevoerd voor hoogwaters verspreid over de gehele periode van 1901-1998.

Daaruit bleek dat de gemiddelde modelfout over de periode vóór 1955 gelijk is aan $408 \text{ m}^3/\text{s}$ (onderschatting van het model) en over de periode na 1977 was dit $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Ten aanzien van de gemiddelde modelfout is er dus een verschil van ruim $400 \text{ m}^3/\text{s}$ tussen deze 2 perioden en dat is meer dan het uiteindelijk vastgestelde effect van de kanalisatiewerken op de afvoer van de Rijn bij Lobith! Het vastgestelde effect van kanalisatiewerken zou dus wel eens goeddeels een artefact van de hydraulische modellen kunnen zijn. Dit dient nader onderzocht te worden en waar mogelijk, dient de homogenisatie opnieuw uitgevoerd te worden.

6.3.2 Neerslaggenerator

Het wellicht belangrijkste knelpunt van de neerslaggenerator is het feit dat de gegenereerde neerslagreeks gebaseerd wordt op een meetreeks van orde 35 jaar (1961-1995). Hoewel de lengte van de gegenereerde reeks in principe onbeperkt is, is de basis dat dus wel. Dat betekent bijvoorbeeld dat de hoogst gemeten dagneerslag in de reeks van 35 jaar nooit overschreden zal worden in de gegenereerde reeks.

Onlangs is uitgewerkt wat nog nodig is om deze methode volledig geaccepteerd te krijgen zodat deze ingezet kan worden om de officiële hydraulische randvoorwaarden vast te stellen (Van der Klis, 2005). Samengevat werd het volgende geconcludeerd:

- De betrouwbaarheid van de uitkomsten van de neerslaggeneratormethode zijn nog onvoldoende bekend en onderbouwd. Om de gangbare methode (directe extrapolatie) te vervangen of te combineren met deze nieuwe aanpak is het nodig om aan te tonen dat dit de betrouwbaarheid van de afvoerstatistiek ten goede komt. Inmiddels zijn door RIZA en het KNMI verdere stappen gezet om in deze behoefte van een grondige betrouwbaarheidsanalyse te voorzien.
- Er bestaat soms wat argwaan over de gekozen aanpak in de neerslaggeneratormethode, wat vaak voortkomt uit een gebrekkige informatievoorziening over de nieuwe methode. Alhoewel er diverse wetenschappelijke publicaties zijn geschreven blijken deze niet geschikt voor niet-wetenschappelijk publiek. Om deze reden wordt momenteel door RIZA gewerkt aan een overzichtsrapport met de laatste stand van zaken rond de neerslaggeneratormethode, gericht op een breder publiek.
- Voordat een nieuwe aanpak als de neerslaggeneratormethode geaccepteerd wordt moeten diverse partijen geïnformeerd worden over deze nieuwe methode. Het is verstandig om hiervoor een communicatieplan op te stellen, zodat de verschillende partijen op een geschikt moment en een passende manier geïnformeerd worden.

6.4 Meerpeil

Paragraaf 5.4 beschrijft een aantal probabilistische rekenmethoden waarmee de statistiek van het IJsselmeerpeil is vastgesteld in (WL, 2004b). Een aantal onderdelen van de rekenmethode verdient verdere aandacht, zoals:

1. Het rekenmodel WINBOS, waarmee de dynamica van het meerpeil wordt gesimuleerd, is relatief eenvoudig opgezet. Desondanks is in het *Onafhankelijk Onderzoek Markermeer* (WL, 1997, 1998) aangetoond dat de met WINBOS berekende waterstanden een voldoende goede fit vertonen met de gemeten waterstanden. Desalniettemin is het zinvol om na te gaan of deze conclusie ook geldt voor probabilistische berekeningen en afhankelijk van de bevindingen te trachten het model te verbeteren.
2. Om het aantal modelberekeningen beperkt te houden zijn de belangrijkste invloedsvariabelen op betrekkelijk eenvoudige wijze geschematiseerd. Eén van de gevolgen is, dat hiermee een fout wordt geïntroduceerd in de uitvoer van WINBOS. Om een beeld van deze fout te krijgen zijn modelberekeningen uitgevoerd met [a] de gemeten tijdreeksen van de invoervariabelen en [b] de vereenvoudigde beschrijving van de invoervariabelen. De uitvoer blijkt soms toch significant te verschillen. Een meer realistische schematisatie van de invloedsvariabelen is daarom zeer wenselijk. Uiteraard moet daarbij in de gaten gehouden worden dat het aantal benodigde modelberekeningen binnen de perken blijft.
3. Indien numerieke integratie als rekenmethode wordt gekozen moet een keuze gemaakt worden over het aantal klassen waarin de invloedsvariabelen worden onderverdeeld. Mede afhankelijk van de gewijzigde schematisaties van stap 2 geldt dat hier een heroverweging nodig is van de gemaakte keuzes.

Belangrijk voor de acceptatie is dat het probabilistische model in het gemeten bereik (dus relatief lage herhalingstijden) resultaten oplevert die in lijn zijn met de metingen. In de studie van (WL, 2004b) waren de discrepanties nog te groot.

6.5 Waterstand op zee en wind

Om volledige probabilistische analyses van de waterstand op de Noordzee uit te kunnen voeren volgens de werkwijze van paragraaf 5.5 moet eerst een statistische analyse uitgevoerd worden van de belangrijkste invloedsvariabelen:

1. de baan die de storm volgt;
2. de snelheid waarmee de baan wordt afgelegd; en
3. de grootte van het verval in luchtdruk in de oog van de storm;

Het rekenmodel WAQUA is in principe “klaar voor gebruik” in de probabilistische setting. Wel moet nog een keuze gemaakt worden over de te gebruiken bodemschematisatie. Voor de hand ligt om in elk geval gebruik te maken van het Continental Shelf Model waarmee de hele Noordzee geschematiseerd wordt. Maar mogelijk gaat het interesse gebied uit naar meer detail voor de kust en wordt het zuidelijke Noordzeemodel ZUNO aan het rekeninstrumentarium toegevoegd, of zelfs het zeer gedetailleerde kuststrook model.

Tot slot moet uiteraard op zorgvuldige wijze een probabilistisch rekenmodel worden opgezet.

6.6 Golven op zee

Om volledige probabilistische analyses van golven op relatief diep water langs de Noordzee uit te voeren is het wenselijk om een parametrische beschrijving van de gezamenlijk kansverdeling van wind en waterstand af te leiden. Een andere optie is om de methode de Haan toe te passen waarmee de samenhang tussen wind en waterstand op niet-parametrische wijze wordt gekwantificeerd. Het voordeel van deze laatste keuze is dat de beschikbare programmatuur reeds beschikbaar is (in Hydra-K). Het nadeel is dat daarmee de flexibiliteit in mindere mate aanwezig is in vergelijking met een parametrische beschrijving.

Indien verkozen wordt om stormduur c.q. stormverloop als extra stochast toe te passen moet ook hiervoor een kansverdeling worden afgeleid. Er zijn weliswaar kansverdelingen beschikbaar, bijvoorbeeld in het belastingmodel van de Oosterschelde in Hydra-K of bij de methode van (Van Aalst, 1983), maar de exacte betekenis van het begrip stormduur is daarbij niet helder. Het begrip stormduur dient helder gedefinieerd te worden, waarbij de definitie dient aan te sluiten op de toepassing in SWAN c.q. de nieuw op te zetten probabilistische rekentool voor het bepalen van kansverdelingen van golfparameters op relatief diep water. Vervolgens dient, uitgaande van de definitie, een statistische verdelingsfunctie van de stormduur afgeleid te worden op basis van de beschikbare meetgegevens.

Tot slot moet uiteraard op zorgvuldige wijze een probabilistisch rekenmodel worden opgezet.

7 Case studie: golfstatistiek op diep water

7.1 Inleiding

In hoofdstuk 5 is uitgebreid gesproken over het probleem van overschrijding van fysische bovengrenzen dat kan optreden bij toepassing van statistische extrapolatie. In dit hoofdstuk bespreken we een case-studie waar dit probleem zich voordoet. Het betreft de statistische extrapolatie van golfparameters als de significante golfhoogte, de spectraal gemiddelde periode en de piekperiode op de Noordzee. Deze parameters zijn, na vertaling richting de kust, bepalend voor de golfbelasting op de waterkeringen en dus het vereiste veiligheidsniveau van de kering. In (WL, 2004a) is de statistiek van enkele relevante golfparameters (H_{m0} , T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_p) bepaald zonder inachtneming van eventuele fysische begrenzingen zoals beperkte waterdiepte of strijklengte tijdens extreme condities.

In (WL, 2005b) is een *eerste verkenning* uitgevoerd naar het effect van dergelijke fysische begrenzingen op de kans van voorkomen van extreme golfhoogtes en –perioden in de meetlocaties SON, ELD, YM6, EUR en SCW. Met name bij locatie SON bleken deze effecten *mogelijk* grote gevolgen te hebben. Echter, omwille van de doelstelling (eerste verkenning) zijn in de studie van (WL, 2005b) enkele vereenvoudigingen toegepast. Daarom is een vervolgstudie uitgevoerd op dit onderwerp in het kader van het project “SBW – Waddenzee” (WL, 2006b). De resultaten van die studie gebruiken we in de onderhavige studie als representatief voorbeeld van een probabilistische analyse waarin effecten van fysische bovengrenzen een rol spelen. De belangrijkste verschillen tussen de twee genoemde studies zijn:

1. In (WL, 2005b) is een 1D versie gebruikt van het golfmodel SWAN; in (WL, 2006b) is een 2D versie gehanteerd.
2. In (WL, 2005b) is volledige correlatie verondersteld tussen de waterstand en de windsnelheid. Dat wil zeggen dat, bijvoorbeeld, de 1/4.000 waterstand verondersteld wordt tegelijkertijd op te treden met de 1/4.000 jaar windsnelheid. In (WL, 2006b) is de werkelijke correlatie tussen windsnelheid en waterstand toegepast, afgeleid van de reeks simultane waarnemingen. Voor dit doeleinde is het probabilistische rekenmodel Hydra-K ingezet.

7.2 Procedure

Het effect van fysische bovengrenzen op golfstatistieken van 5 meetstation (SON, ELD, YM6, EUR en SCW) wordt vastgesteld met gebruik van simulaties met het golfmodel SWAN, gebaseerd op de hieronder beschreven procedure.

1. De SWAN-2D berekeningen zijn uitgevoerd voor:
 - 6 windrichtingen (210, 240, 270, 300, 330 en 0 graden)
 - 4 combinaties windsnelheden (25, 30, 35, 40 m/s)
 - 3 waterstanden (2 m+NAP, 4 m+NAP, 6 m+NAP)

2. De $6 \times 4 \times 3 = 72$ 2D berekeningen leveren golfcondities in de 5 locaties op voor verschillende condities van wind en waterstand. Indicaties van de fysische bovengrenzen zijn als volgt verkregen:
 - a) De golven zouden verder gegroeid zijn indien de strijklengte groter was geweest. In dit geval zijn de maximale waarden beperkt als gevolg van de strijklengte.
 - b) De golven hebben hun maximum bereikt bij een kortere strijklengte. In dit geval zijn de maximale waarden beperkt door de totale waterdiepte (bodemdiepte+waterstand).

Vervolgens wordt de statistiek van de invloedsvariabelen wind en waterstand gecombineerd met de in stap 2 verkregen bovengrenzen. Voor dit doeleinde is het rekenmodel Hydra-K gebruikt, of eigenlijk een speciaal voor dit doeleinde aangepaste onderzoeksversie van Hydra-K. Hydra-K is een probabilistisch rekenprogramma dat in het kader van HR2006 is toegepast om de hydraulische randvoorwaarden voor dijken langs de kust te bepalen. Binnen Hydra-K wordt de afhankelijkheid van wind en waterstand in het extreme bereik gemodelleerd door het “opschalen” van waargenomen stormgebeurtenissen naar extreme stormgebeurtenissen. Bij deze opschaling wordt de samenhang (correlatie) tussen wind en waterstand verondersteld behouden te blijven. De speciale onderzoeksversie van Hydra-K is als volgt gebruikt voor het vaststellen van effecten van fysische bovengrenzen:

3. Voor elke opgeschaalde stormgebeurtenis in Hydra-K zijn de golfperiode en golfhoogte op diep water gegeven. Deze opgeschaalde waarden zijn vergeleken met de bovengrenzen die in stap 2 bepaald zijn. Indien de opgeschaalde waarden groter zijn dan de bovengrenzen, dan worden de opgeschaalde waarden gelijk gesteld aan de bovengrenzen. Dit gebeurt uiteraard met de gedachte dat het niet mogelijk is boven de bovengrenzen uit te komen.
4. Met de onderzoeksversie van Hydra-K zijn relevante statistieken bepaald zoals:
 - a) de offshore golfstatistiek;
 - b) de nearshore golfstatistiek;
 - c) de benodigde kruinhoogte voor een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 jaar
5. De gegevens uit stap 4 zijn ook berekend met de versie van Hydra-K waarin geen bovengrenzen zijn opgenomen.

De verschillen in uitkomsten tussen stap 4 en stap 5 zijn direct toe te wijzen aan het wel/niet rekening houden met bovengrenzen. Hoe groter deze verschillen zijn, des te belangrijker is het om rekening te houden met fysische bovengrenzen bij het afleiden van hydraulische randvoorwaarden.

In het onderzoek van (WL, 2005b) is dit rechtstreeks gedaan op basis van de marginale statistiek van de wind en de waterstand omdat deze twee variabelen volledig afhankelijk werden verondersteld. In (WL, 2006b) is echter een meer realistische modellering van de onderlinge afhankelijkheid van wind en waterstand toegepast. Voor dit doeleinde is het rekenmodel Hydra-K gebruikt, of eigenlijk een speciaal voor dit doeleinde aangepaste onderzoeksversie van Hydra-K.

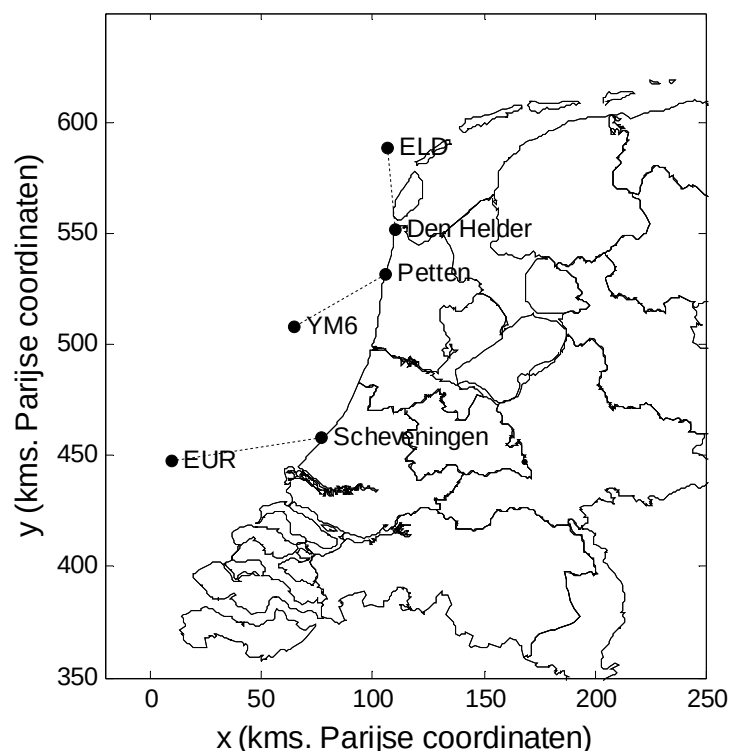
7.3 Opzet modelberekeningen

7.3.1 Uitvoerlocaties

Tabel 7.1 en Figuur 7.1 tonen de drie locaties langs de Hollandse kust waarvoor de berekeningen met het aangepaste model van Hydra-K zijn uitgevoerd. Elke locatie vertegenwoordigt een afzonderlijke deelregio binnen Hydra-K: kust noord (Den Helder), kust midden (Petten) en kust zuid (Scheveningen). Tabel 7.1 en Figuur 7.1 tonen ook de bijbehorende golfstations van deze drie locaties. Deze golfstations worden in Hydra-K beschouwd als de locaties waarvoor de offshore statistiek van de waterstand, wind en, optioneel, periodemaat $T_{m-1,0}$ geldig zijn. Deze locaties vormen het startpunt van de SWAN berekeningen waarmee offshore condities van wind, waterstand en golven worden vertaald naar nearshore waterstanden en golfcondities.

Tabel 7.1 Uitvoerlocaties, hun Parijse coördinaten en het bijbehorende golfstation.

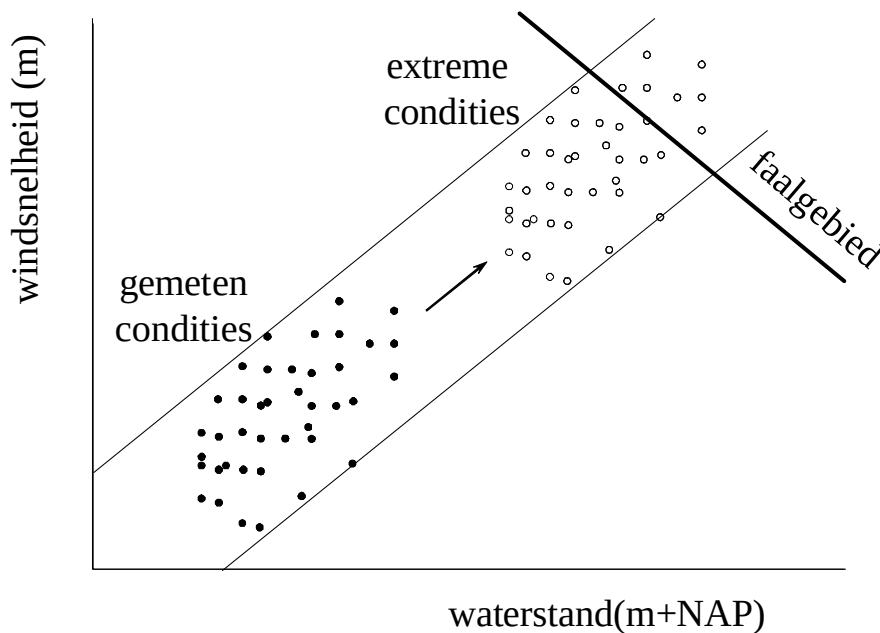
Locatie	x	y	corresponderend golfstation
Scheveningen	77.275	457.988	EUR
Petten	105.662	531.747	IJM
Den Helder	110.020	551.666	ELD



Figuur 7.1 Uitvoerlocaties en hun corresponderende golfstation (zie Tabel 7.1).

7.3.2 Modelconcept Hydra-K

Hydra-K is een probabilistisch model waarmee, onder andere, de faalkans van een dijk langs de Nederlandse kust bepaald kan worden. De probabilistische rekenmethode waarop Hydra-K is gebaseerd staat bekend als de methode "De Haan" (De Haan and Resnick, 1977). De basis van de methode is een verzameling waarnemingen (op diep water) van wind, waterstand en golfcondities gedurende stormgebeurtenissen uit het verleden. In het voorbeeld van Figuur 7.2 zijn deze weergegeven door de puntenwolk met gesloten bolletjes. Elk punt in de puntenwolk representeert de hoogste waarneming van waterstand en windsnelheid gedurende een stormgebeurtenis.



Figuur 7.2 Schematische weergave van het opschalen van stormgebeurtenissen tot nabij of zelfs in het faalgebied.

Om iets te kunnen zeggen van de extremen is extrapolatie noodzakelijk van normale naar extreme condities. Hydra-K gebruikt hiervoor de methode De Haan, die gebaseerd is op de aanname dat de puntenwolk van de waarnemingen te verschuiven is naar het extreme gebied zonder dat de puntenwolk “uitwaaiert”⁶ (zie Figuur 7.2; de open cirkels representeren de verschoven waarden). Met andere woorden: de mate van afhankelijkheid tussen de windsnelheid en waterstand blijft behouden in het extreme bereik. Deze methode is alleen toepasbaar als de betrokken variabelen (wind en waterstand) voldoen aan de voorwaarde van ‘asymptotische afhankelijkheid’.

⁶ Deze eigenschap geldt overigens alleen in het “standaard exponentiele vlak”, een wiskundige beschrijving die verkregen wordt na transformatie van gemeten waterstanden en windsnelheden.

Door de verschuiving wordt elke waargenomen stormgebeurtenis als het ware getransformeerd in een meer extreme stormgebeurtenis. Zo kan bijvoorbeeld een gemeten waterstand van NAP + 3m en een windsnelheid van 20 m/s getransformeerd worden naar NAP + 4m respectievelijk 30 m/s. Het doel van deze verschuiving is om zo een deelverzameling van (synthetische) gebeurtenissen te genereren waarvoor geldt dat de dijk faalt. Op basis van het aantal faalgebeurtenissen kan dan een schatting van de faalkans gemaakt worden, zoals we verderop laten zien. In Figuur 7.2 worden de faalgebeurtenissen gerepresenteerd door de open cirkels, rechtsboven de vetgedrukte lijn.

Na opschaling wordt voor elke stormgebeurtenis de vertaalslag gemaakt van diep water (orde 20 m diep) naar ondiep water nabij de kering. Dat betekent dat op basis van de (opgeschaalde) waarde van de waterstand, windsnelheid en windrichting wordt bepaald hoe groot de hydraulische belasting voor de kering is, bestaande uit een combinatie van de waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Deze vertaalslag van diep water naar de kering geschiedt op basis van een database (KUSTDB2006) met rekenresultaten van het golfmodel SWAN.

Voor elke (opgeschaalde) stormgebeurtenis wordt de berekende hydraulische belasting vergeleken met het sterktemodel van de kering om te bepalen of deze faalt. De jaarlijkse faalkans, of faalfrequentie, van een kering wordt vervolgens als volgt gekwantificeerd:

$$\mu = \frac{\kappa}{\Delta} e^{-\nu} \quad (7.1)$$

waarin

- μ = de faalfrequentie (per jaar);
- κ = het aantal faalgebeurtenissen na opschaling;
- ν = de grootte van de verschuiving bij het opschalen;
- Δ = de lengte van de meetreeks (in jaren).

De waarden van κ en Δ zijn bij aanvang van de berekening bekend: κ dient door de gebruiker opgegeven te worden (standaard: 50) en Δ is het aantal jaren van de meetreeks. De waarde van de verschuivingsterm, ν , bepaalt Hydra-K vervolgens op iteratieve wijze, en wel zodanig dat er exact κ faalgebeurtenissen zijn. Na uitvoering van deze procedure zijn alle termen ter rechterzijde van het gelijkteken in vergelijking (7.1) bekend en kan derhalve de faalfrequentie, μ , gekwantificeerd worden.

Behalve het berekenen van de faalkans van een bestaande kering biedt Hydra-K ook de mogelijkheid om ontwerpberekeningen uit te voeren voor een door de gebruiker in te voeren faalfrequentie. In Nederland worden dijken immers ontworpen op basis van een veiligheidsniveau, uitgedrukt in een faalfrequentie van orde 10^{-3} tot 10^{-4} per jaar. Ten behoeve van een ontwerpberekening herschrijven we vergelijking (7.1) als volgt:

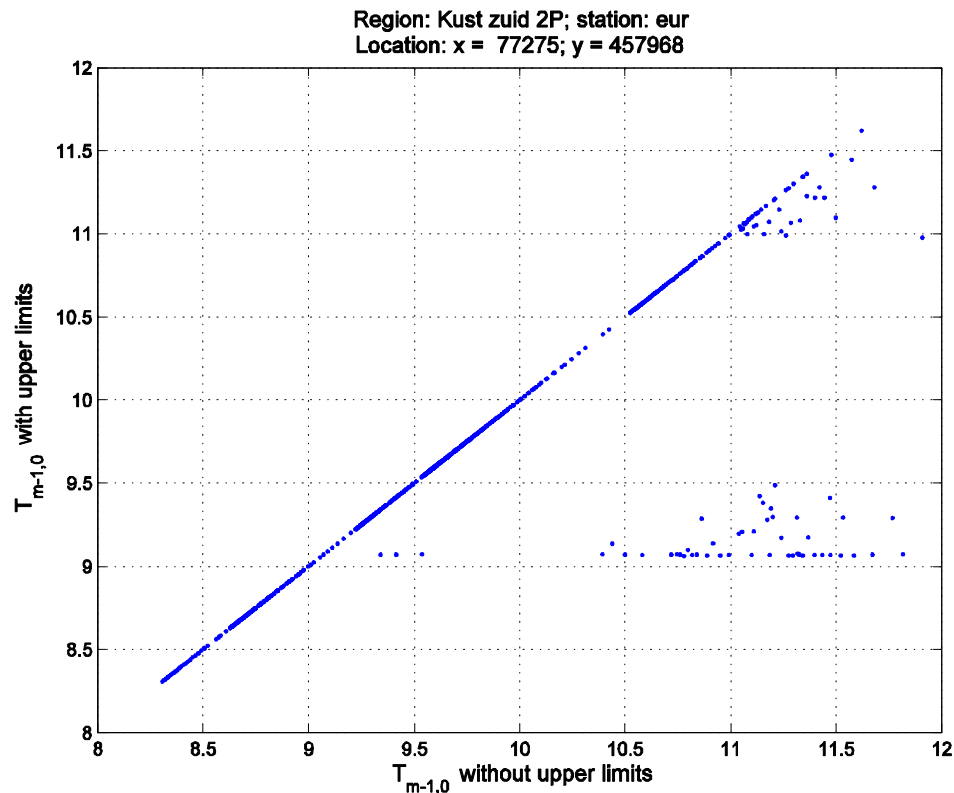
$$\nu = -\ln\left(\frac{\mu \Delta}{\kappa}\right) \quad (7.2)$$

Bij een ontwerpberekening moet bijvoorbeeld de kruinhoogte bepaald worden waarmee de kering voldoet aan een gegeven faalfrequentie. Bij deze rekenoptie is het rechterlid van bovenstaande vergelijking bij aanvang van de berekening reeds bekend. De waarde van verschuivingsterm v kan derhalve direct bepaald worden en deze wordt vervolgens toegepast op de offshore waarden van de windsnelheid en de waterstand. Vervolgens worden deze waarden weer vertaald naar nearshore golfcondities op basis van de database met resultaten van SWAN-berekeningen. Of deze nearshore golfcondities tot falen van de kering leiden is dan nog niet bekend omdat de dimensies van de kering nog niet bekend zijn. Deze dimensies worden op iteratieve wijze vastgesteld, en wel zodanig dat er weer exact κ faalgebeurtenissen zijn. De dimensies die als resultaat uit deze iteratieve procedure rollen, voldoen exact aan de gestelde veiligheidsnorm en zijn derhalve de gezochte dimensies.

7.3.3 Implementatie van fysische bovengrenzen in Hydra-K

De vorige paragraaf beschrijft de opschaling van offshore parameters in Hydra-K. Het resultaat is een verzameling opgeschaalde stormgebeurtenissen, gekarakteriseerd door de maximale waarde van de waterstand, windsnelheid, windrichting en spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$. Deze waarden zijn opgeschaald door toepassing van *statistische* technieken, hetgeen betekent dat geen rekening wordt gehouden met eventuele fysische bovengrenzen. Voor parameter $T_{m-1,0}$ kunnen we de opgeschaalde waarden echter wel vergelijken met de fysische maxima die zijn afgeleid op basis van SWAN-berekeningen. Merk op dat deze fysische maxima verschillend zijn voor elke combinatie van de windrichting, windsnelheid en waterstand.

Als de opgeschaalde waarde van $T_{m-1,0}$ hoger is dan de vastgestelde fysische bovengrens dan veronderstellen we dat dat niet mogelijk is. In de speciaal voor deze analyse aangepaste onderzoeksversie van Hydra-K wordt deze opgeschaalde waarde dan gelijk gesteld aan de vastgestelde bovengrens. Het gevolg is dat voor een deel van de opgeschaalde stormgebeurtenissen de waarde van $T_{m-1,0}$ gereduceerd wordt. Figuur 7.3 geeft een voorbeeld van het reduceren van een deel van de waarden van $T_{m-1,0}$ voor locatie Scheveningen. Het toont waarden voorafgaand (x-as) en na afloop (y-as) van de reductie. De punten *op* de lijn $y=x$ zijn die waarden die niet gereduceerd zijn, d.w.z. die kleiner zijn dan de bijbehorende fysische bovengrens. De punten *onder* de lijn $y=x$ zijn wel gereduceerd en gelijk gesteld aan de bijbehorende fysische bovengrens.



Figuur 7.3 Parameter $T_{m-1,0}$ voor opgeschaalde stormgebeurtenissen bij locatie Scheveningen; met en zonder bovenlimiet (uit: WL, 2006b).

Een eventuele reductie in de offshore-waarde van $T_{m-1,0}$ leidt automatisch tot een reductie in de nearshore hydraulische belasting. Dat heeft uiteraard ook gevolgen voor de faalkans van een dijk en voor de benodigde ontwerphoogte van een dijk bij een gegeven faalkans. In (WL, 2006b) is met name het effect van de reductie op de ontwerphoogte gekwantificeerd. N.B. het effect van fysische bovengrenzen van andere golfparameters zoals H_{m0} , T_{m02} , and T_p op de ontwerphoogte kon helaas niet op deze wijze gekwantificeerd worden omdat deze parameters geen aparte stochastische variabelen zijn in Hydra-K. Wel was het mogelijk om voor deze parameters vergelijkbare figuren op te stellen als Figuur 7.3; ofwel een vergelijking van opgeschaalde offshorewaarden van H_{m0} , T_{m02} , en T_p met bovengrenzen was wel mogelijk.

7.4 Resultaten

Tabel 7.2 en Tabel 7.3 tonen statistieken van offshore respectievelijk nearshore parameters, zoals berekend door Hydra-K voor 5 verschillende herhalingstijden: 10, 100, 1.000, 10.000 en 100.000 jaar. Tabel 7.4 toont de kruinhoogte voor dezelfde herhalingstijden. De kolommen met titel “geen Bg” bevatten resultaten van berekeningen waarbij *geen* rekening gehouden is met fysische bovengrenzen. De kolommen met titel “Bg” bevatten resultaten van Hydra-K berekeningen waarbij *wel* rekening gehouden is met fysische bovengrenzen. De kolommen met titel “versch.” Tonen het verschil tussen de twee.

Uit Tabel 7.4 blijkt dat van de drie locaties alleen bij Petten het effect van bovengrenzen van parameter $T_{m-1,0}$ op de ontwerphoogte een significant effect heeft, nl. een reductie van 1.4 m in de kruinhoogte voor een herhalingsdij van 10.000 jaar. Voor locatie Den Helder is er nauwelijks een effect waarneembaar en voor Scheveningen is er zelfs in het geheel geen effect. Uit een analyse van offshore-waarden van $T_{m-1,0}$ blijkt dat bij locaties Den Helder en Petten *alle* hoogste opgeschaalde waarden worden gereduceerd omdat deze boven de fysische bovengrenzen uitkomen. Voor Scheveningen is dat niet het geval en dat verklaart waarom het effect op de kruinhoogte voor deze locatie nihil is.

De oorzaak van het relatief kleine effect bij Den helder (in vergelijking met Petten) ligt in het feit dat de golven in offshore locatie ELD (Figuur 7.1) over het Marsdiep moeten voordat deze Den Helder bereiken. Dit heeft een sterk reducerend effect op met name de extreem hoge golven. Dat maakt weer dat het reducerend effect van bovengrenzen offshore niet of nauwelijks merkbaar zijn nearshore.

Zoals aangegeven in paragraaf 7.3 heeft de reductie in de offshore waarde van parameters H_{m0} , en T_p geen effect op de berekende kruinhoogte, omdat deze parameters niet als stochastische variabelen gedefinieerd zijn in Hydra-K. De vergelijking offshore kan echter wel gemaakt worden, zie Tabel 7.2. Uit deze Tabel blijkt dat de het effect van fysische bovengrenzen relatief klein is in vergelijking met parameter $T_{m-1,0}$.

Tabel 7.2 Offshore parameters

HM0	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	7.02	7.00	0.02	6.19	6.19	0.00	5.52	5.52	0.00
100	8.44	8.41	0.03	7.29	7.25	0.04	6.41	6.41	0.00
1.000	9.65	9.64	0.01	8.23	8.19	0.04	7.12	7.12	0.00
10.000	10.64	10.60	0.04	9.00	8.94	0.06	7.73	7.73	0.00
100.000	11.50	11.26	0.24	9.54	9.45	0.09	8.21	8.21	0.00
Tm10	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	11.07	10.83	0.24	10.84	10.61	0.23	9.15	9.04	0.11
100	12.31	11.53	0.78	11.99	11.07	0.92	9.93	9.75	0.18
1.000	13.39	12.24	1.15	12.95	11.72	1.23	10.58	10.41	0.17
10.000	14.35	12.56	1.79	13.79	12.29	1.50	11.15	10.94	0.21
100.000	15.21	12.69	2.52	14.52	12.55	1.97	11.66	11.41	0.25
Tp	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	12.41	12.40	0.01	11.96	11.80	0.16	9.79	9.79	0.00
100	13.98	13.91	0.07	13.36	13.30	0.06	10.80	10.75	0.05
1.000	15.39	15.27	0.12	14.64	14.44	0.20	11.62	11.60	0.02
10.000	16.64	16.42	0.22	15.69	15.52	0.17	12.35	12.33	0.02
100.000	17.54	17.30	0.24	16.43	16.19	0.24	12.99	12.91	0.08

Tabel 7.3 Nearshore parameters

HM0	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	2.41	2.41	0.00	2.97	2.95	0.02	4.47	4.47	0.00
100	2.78	2.78	0.00	3.39	3.36	0.03	4.99	4.99	0.00
1.000	3.08	3.08	0.00	3.78	3.74	0.04	5.45	5.45	0.00
10.000	3.37	3.37	0.00	4.14	4.09	0.05	5.86	5.86	0.00
100.000	3.62	3.62	0.00	4.46	4.39	0.07	6.25	6.25	0.00
Tm10	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	6.43	6.43	0.00	10.18	10.07	0.11	9.01	9.00	0.01
100	6.72	6.72	0.00	11.45	10.75	0.70	10.27	10.26	0.01
1.000	6.93	6.93	0.00	12.43	11.37	1.06	11.37	11.33	0.04
10.000	7.09	7.09	0.00	13.07	11.85	1.22	12.09	12.01	0.08
100.000	7.30	7.23	0.07	13.37	11.97	1.40	12.45	12.41	0.04
TP	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	12.04	11.43	0.61	12.12	11.91	0.21	10.90	10.86	0.04
100	13.01	11.88	1.13	13.81	12.85	0.96	12.38	12.31	0.07
1.000	13.50	12.51	0.99	15.15	13.53	1.62	13.64	13.59	0.05
10.000	13.73	12.25	1.48	16.04	14.09	1.95	14.60	14.53	0.07
100.000	14.49	12.25	2.24	16.64	14.32	2.32	15.11	15.05	0.06
Tm02	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	4.18	4.18	0.00	8.04	8.02	0.02	6.99	6.99	0.00
100	4.38	4.38	0.00	8.94	8.47	0.47	7.96	7.96	0.00
1.000	4.54	4.54	0.00	9.60	8.93	0.67	8.84	8.82	0.02
10.000	4.67	4.67	0.00	9.96	9.13	0.83	9.39	9.36	0.03
100.000	4.77	4.77	0.00	9.95	9.15	0.80	9.60	9.59	0.01

Tabel 7.4 Kruinhoogte (m+NAP)

	Den Helder			Petten			Scheveningen		
T	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.	geen Bg	Bg	versch.
10	7.01	7.01	0.00	10.40	10.34	0.06	12.52	12.52	0.00
100	7.90	7.90	0.00	12.79	12.30	0.49	15.72	15.72	0.00
1.000	8.63	8.62	0.01	15.39	14.51	0.88	18.86	18.86	0.00
10.000	9.42	9.38	0.04	18.02	16.63	1.39	21.73	21.73	0.00
100.000	10.36	10.23	0.13	20.15	18.39	1.76	24.37	24.37	0.00

7.5 Conclusies

In deze case studie, die uitgebreid beschreven staat in (WL, 2006b), is onderzoek gedaan naar het mogelijke effect van fysische bovengrenzen van golfparameters op de statistiek die in het kader van HR2006 is afgeleid en toegepast. Verder is ook een inschatting gemaakt van het effect op nearshore hydraulische randvoorwaarden en ontwerpwaarden voor kruinhoogten gekwantificeerd. De fysische bovengrenzen zijn afgeleid met het golfmodel SWAN en variëren per locatie en per combinatie van windrichting, windsnelheid en waterstand. De effecten op de offshore statistiek, nearshore randvoorwaarden (golfcondities) en ontwerp-kruinhoogtes zijn gekwantificeerd met een speciaal voor deze studie aangepaste onderzoeksversie van Hydra-K.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor drie locaties langs de Hollandse kust: Scheveningen, Petten en Den Helder. Alleen bij locatie Petten bleek de invloed van fysische bovengrenzen op de berekende kruinhoogte significant te zijn: een reductie van 1.4 m voor ontwerpcondities. Bij Scheveningen was er geen effect omdat de offshore golfparameters niet of nauwelijks in de buurt van de bovengrens kwamen. Bij Den Helder was het effect klein omdat de offshore effecten sterk worden gereduceerd naar nearshore. Dit komt doordat het traject van locatie ELD (offshore) naar Den Helder (nearshore) over het relatief ondiepe Marsdiep gaat, waar hoge golven worden afgebroken.

De uitkomsten voor locatie Petten tonen aan dat het zinvol is om rekening te houden met mogelijke effecten van fysische bovengrenzen bij het ontwerpen en toetsen van dijken. De resultaten van Den Helder en Scheveningen laten zien dat dit niet voor de hele Hollandse kust relevant is.

8 Discussie, conclusies en aanbevelingen

8.1 Directe extrapolatie versus probabilistische rekenmodellen

In elke discussie over het afleiden van statistieken van extreme waarden (gebeurtenissen) duikt veelal hetzelfde probleem op: er is onvoldoende informatie beschikbaar om de gehanteerde technieken te valideren. Het handelt immers om gebeurtenissen die zo extreem zijn dat ze nog maar zelden of wellicht zelfs nog nooit zijn waargenomen in de periode van meten. De statistische onzekerheden in de berekende uitkomsten zijn groot en deze nemen toe naarmate de beschouwde herhalingsstijd toeneemt c.q. de beschouwde overschrijdingsfrequentie afneemt.

Aangezien zowel het onderschatten als het overschatten van overstromingsgevaar een kostbare zaak is, is het buitengewoon relevant om de onzekerheid in de schattingen zo klein mogelijk te houden. Het gebrek aan informatie omtrent de extremen zal hierbij echter te allen tijde een beperkende factor zijn. Inschattingen over de betrouwbaarheid van de uitkomsten zullen daarom voor een niet onbelangrijk gedeelte gebaseerd zijn op vertrouwen in de gehanteerde methode. Een belangrijk aspect daarbij is dat niet de indruk mag ontstaan dat de fysica geweld wordt aangedaan doordat bijvoorbeeld waarden overschreden worden die fysisch onmogelijk zijn. De klassieke statistische extrapolatie (paragraaf 3.1) ontbeert een dergelijke fysische basis.

Daarom wordt in de extreme-waardenstatistiek in toenemende mate gebruik gemaakt van probabilistische rekentechnieken die gebruik maken van numerieke simulatiemodellen. Indien de relevante fysische processen op correcte wijze gemodelleerd zijn wordt ‘automatisch’ rekening gehouden met mogelijke effecten van bovengrenzen. Het nadeel van deze methode is dat deze complicaties en (potentiële) foutenbronnen met zich meebrengt in de vorm van gehanteerde schematisatie van de betrokken variabelen, modelfouten, benaderingen in de gehanteerde kansverdelingen van de betrokken variabelen en eventuele afrondings- of afbreekfouten van de probabilistische rekenmethode. Daardoor is de vraag gerechtvaardigd of het *op deze wijze* inbrengen van de fysica in de berekeningsmethode altijd een toegevoegde waarde heeft. Bij de beantwoording van deze vraag is het van groot belang dat het probabilistische model in het gemeten bereik (dus relatief lage herhalingsstijden) resultaten oplevert die in lijn zijn met de metingen.

Het antwoord op de laatste vraag zal verschillen per probleem en per gekozen oplossingsmethode. Zoals eerder gemeld is op basis van de metingen doorgaans nauwelijks of geen oordeel te vellen over de kwaliteit van de methode en is veelal de keuze voor een eenvoudig uit te voeren extrapolatiemethode gerechtvaardigd. Aan de andere kant hebben bijvoorbeeld de verscheidene “Hydra’s” (Hydra-b, Hydra-K, Hydra-m) inmiddels hun diensten bewezen, mede op grond van de fysische modellen die daarin een voorname rol spelen. Een belangrijk pluspunt daarbij is dat de Hydra’s middels de fysische modellen in staat zijn om statistieken af te leiden voor locaties waar geen metingen beschikbaar zijn.

Idealiter zouden zowel metingen als fysica de basis moeten vormen voor het schatten van gemiddelde herhalingstijden van extreme belastingen. Ook zou er rekening moeten worden gehouden met de aanwezige statistische onzekerheid. In de aard van de methode is de Bayesiaanse statistiek uitermate geschikt voor het combineren van verschillende bronnen van informatie. Zo zouden fysische modellen en historische gegevens kunnen worden gecombineerd tot informatieve a priori kansverdelingen van de verdelingsparameters, die vervolgens met behulp van de stelling van Bayes kunnen worden bijgewerkt met recente metingen. Hoe zulke informatieve a priori kansverdelingen in de praktijk kunnen worden afgeleid, vereist echter nog nader onderzoek.

8.2 Aanbevolen methoden

In het kader van HR2006 zijn de statistieken van de basisvariabelen (wind, waterstand op zee, afvoer, meerpeil en golven op zee) grotendeels bepaald op basis van statistische extrapolatietechnieken. In een enkel geval (bijvoorbeeld de waterstand op zee) zijn de uitkomsten geverifieerd aan de hand van een fysisch gebaseerd numeriek simulatiemodel en in enige mate aangepast aan de hand van een dergelijke vergelijking.

In hoofdstuk 5 is voor elk van de 5 variabelen een methode geschetst waarmee de statistiek op probabilistische wijze bepaald kan worden. De kernvraag is natuurlijk in hoeverre een dergelijke overstap noodzakelijk is. Er moet terdege rekening gehouden worden met het feit dat met het opzetten van een probabilistische analyse c.q. rekenmethode aanzienlijke inspanningen gemoeid zijn. Bovendien is in de vorige paragraaf al uiteengezet dat een overstap naar een probabilistische aanpak niet per definitie tot betere schattingen van overschrijdingskansen leidt. Anderzijds is het wel per definitie een toegevoegde waarde om vergelijkingen te maken tussen enerzijds de probabilistische methode en anderzijds de puur statistische methode. In dat kader moet ook niet uitgesloten worden dat een combinatie van beide methoden uiteindelijk als beste optie uit de bus komt voor HR2011 of latere edities.

De behoefte aan het ontwikkelen van een probabilistische methode voor het afleiden van statistiek van de invloedsvariabelen is vooral afhankelijk van de mate waarin het vermoeden bestaat dat bepaalde fysische processen en/of begrenzingsen een rol van betekenis gaan spelen waar de bestaande statistische extrapolatiemethode geen rekening mee houdt. Per belastingvariabele is daarover het volgende te melden:

1. *Rivierafvoeren*: begrenzingsen in de afvoercapaciteit hebben significante invloed op de afvoer van de Rijn en de Maas die uiteindelijk Nederland zal bereiken. De mate waarin hangt, behalve van de afvoercapaciteit van het riviersysteem, ook af van de vorm en genese van de hoogwatergolf. Met name vanwege het laatste argument is een probabilistische aanpak wenselijk en, in de vorm van de neerslaggenerator, inmiddels in een gevorderd stadium van ontwikkeling.
2. *Meerpeil*: In de meetgegevens van het meerpeil zit een sterke “knik” in de jaarmaxima die mogelijk duidt op toenemende invloeden van fysische begrenzingsen voor extremere gebeurtenissen. Anderzijds steekt het meest extreme gemeten meerpeil, dat van oktober 1998, weer ver boven de overige waarnemingen uit, hetgeen de sterke invloed van fysische begrenzingsen weer enigszins nuanceert. In die zin verdient het aanbeveling om middels een probabilistische aanpak meer grip te krijgen op deze problematiek.

Uit de analyses van (WL, 2004) blijkt dat het systeem en de belangrijkste invloedsvariabelen dermate complex zijn dat het opstellen van een vertrouwenwekkend probabilistisch rekenmodel niet eenvoudig is.

3. *Waterstand op zee*: In paragraaf 5.5 is uiteengezet dat de ontwerpwaterstanden met herhalingsdij 1/10.000 jaar die zijn afgeleid in het kader van HR2006, fysisch gezien realistisch zijn. Hoewel het uiteraard leerzaam is om de uitkomsten te vergelijken met die van een probabilistische aanpak, is de behoefte daaraan voor deze variabele wellicht minder groot dan voor de overige variabelen.
4. *Golven op zee*: Uit een verkennende analyse van (WL, 2005b) bleek dat voor enkele meetstations de golfparameters tegen fysische begrenzingen op lopen waar de statistiek geen rekening mee houdt. Vanuit dat oogpunt is een probabilistische aanpak dus sterk aan te raden. Anderzijds kan ook voor een semi-probabilistische aanpak gekozen worden zoals in de case studie van hoofdstuk 7, waarbij de statistiek als het ware “afgekapt” wordt zodra de fysische begrenzingen zijn bereikt die op basis van de het golfmodel zijn bepaald.
5. *Wind*: In de jaren 1998-2003 heeft daarnaast het door het KNMI uitgevoerde Hydra-project gelopen, met als doel nieuwe extreme windstatistiek voor windstations in Nederland af te leiden (Verkaik et al, 2003). Dit heeft uiteindelijk niet tot een nieuwe algemeen geaccepteerde statistiek geleid. Verder is door (Van den Brink et al, 2005) statistisch onderzoek uitgevoerd naar windsnelheden op basis van langjarige reeksen die met klimaatmodellen gegenereerd zijn. De behoefte aan verder onderzoek is daarom voor deze variabele wellicht minder groot dan voor de overige variabelen.

8.3 Kennishiaten en knelpunten

In hoofdstuk 6 is een aantal knelpunten en kennishiaten genoemd bij het overstappen naar probabilistische rekenmethoden. Over het algemeen zijn deze niet onoverkomelijk en is het opstellen en uitvoeren van een dergelijke methode “gewoon” een kwestie van doen (indien er consensus bestaat of toepassen van een dergelijke methode gewenst is). In de meeste gevallen dient voor de belangrijkste invloedsvariabelen nog wel enige statistiek afgeleid te worden. Verder geldt in de meeste gevallen dat de probabilistische rekenmodellen opgezet dienen te worden. Voor beide (statistiek en probabilistische modellen) is echter voldoende kennis en expertise aanwezig bij Rijkswaterstaat, kennisinstituten, ingenieursbureaus en universiteiten.

9 Referenties

- Aalders, P., Warmerdam, P.M.M. and Torfs, P.J.J.F., 2004: Rainfall generator for the Meuse basin; 3,000 year simulations in the Meuse basin, report 124 Wageningen University, sub-departement Water resources.
- BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde), 1999: Einfluß der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein, Entwurf Juni 1999.
- Blaakman E.J., H. Buiteveld, H.C. van Twuiver, A. van Agthoven. Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 2: Meerpeilstatistiek. RIZA rapport 99.039. RIZA Lelystad, 25 maart 1999.
- Boertien I (Ministerie van verkeer en waterstaat), 1993: Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, deelrapport 2: Maatgevende belastingen.
- Boertien II (Ministerie van Verkeer en Waterstaat), 1994. Onderzoek Watersnood Maas, deelrapport 4, hydrologische aspecten.
- Chbab, E.H. Herberekening 1/4000 IJsselmeerpeil voor HR 2006. Concept. RIZA-Werkdocument 2006.055x. RIZA Lelystad, maart 2006.
- Chbab, E.H., Van Noortwijk, J.M. Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden. RIZA rapport 2002.006. RIZA en HKV Lijn in Water, Lelystad, januari 2002.
- Clark, C.E., 1961. Importance Sampling in Monte Carlo Analyses, *Operations Research*, Vol. 9, pp. 603 – 620.
- De Haan, L. en Resnick, S.I., 1977: *Limit theory for multivariate sample extremes*, Z.Warscheinlichkeittheorie verw. Gebiete 40
- Den Heijer, F., Diermanse, F.L.M., Van Gelder, P.H.A.J.M., 2005: extreme wave statistics using regional frequency analysis, 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.
- DGW, 1993: Waterstanden langs de Hollandse kust; rapport DGW-93.026. Rijkswaterstaat.
- Ditlevsen, O. en P. Bjerager, 1987. *Plastic Reliability Analysis by Directional Simulation*. Technical University of Denmark, Report no. 353.
- Ditlevsen, O. en H.O. madsen, 1996. *Structural Reliability Methods*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Efron, B., 1982: The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans, 92pp., SIAM, Philadelphia, Pa.
- Geerse, C.P.M. De interpretatie van het Rijksoort Weibull model. RIZA-rapport 99.048. RIZA Lelystad, 20 juli 1999.
- Geerse, C.P.M., M.T. Duits, H.J. Kalk, I.B.M. Lammers. Wind-waterstandstatistiek Hoek van Holland. RIZA/HKV rapport, Lelystad, juli 2002.
- Geerse, C.P.M. Bivariate correlatiemodellen met exponentiële en asymptotisch exponentiële marginale verdelingen. RIZA-werkdocument 2002.104x. RIZA Lelystad, mei 2004.
- Geerse, C.P.M. Hydraulische Randvoorwaarden 2006 benedenrivierengebied – Afvoerstatistiek en overige statistische invoer Hydra-B. RIZA-werkdocument 2005.114x. RIZA Lelystad, september 2005.
- Geerse, C.P.M. Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta - Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. RIZA-werkdocument 2006.036x. RIZA Lelystad, januari 2006.
- Gerritsen, H. (2005) What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect. Phil. Trans. R. Soc. A. Vol. 363, 1271 – 1291
- Gerritsen, H., De Vries, H. and Philipart, M., 1995: The Dutch continental shelf model, coastal and estuarine studies, vol 47, pp 425-467.
- HKV, 2005: Toets- en rekenpeilen 2011; Nederlandse kust en estuaria, HKV LIJN IN WATER in opdracht van RIKZ, oktober 2005
- HR, 2001: Hydraulische randvoorwaarden 2001, voor het toetsen van primaire waterkeringen; Rijkswaterstaat DWW, december 2001.
- Morgan, M.G. en M. Henrion (1990) Uncertainty. A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis; Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

- Repko, A., P.H.A.J.M. van Gelder, H.G. Voortman, J.K. Vrijling (2004). Bivariate description of offshore wave conditions with physics-based extreme value statistics. *Applied Ocean Research* 26, pp. 162-170.
- Haan, C.T. 1997. *Statistical Methods in Hydrology*. The IOWA State University Press, Ames IOWA.
- Helton, J.C. en Davis, F.J., 2002. illustration of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Risk Analysis*, 22(3), pp. 591-622.
- Hosking, J.R.M., 1990. L-moments analysis and estimation of distributions using linear combination of order statistics. *J. Royal Statistical Society, Series B*, 52:105–24.
- Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R., 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resour. Res.*, 29(2), 271-281.
- Hosking J.R.M., en Wallis, J.R. 1997, *Regional Frequency Analysis*, Cambridge University Press.
- HKV, 2001. *Uitbreiding afvoerstatistiek Borgharen, Lith, Lobith en Olst*. HKV report, December 2001 (in Dutch).
- Kass, R.E., Raftery, A.E., 1995. Bayes factors. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430): 773-795.
- KNMI, 1983: *Windklimaat van Nederland*, KNMI, Staatsuitgeverij, Den Haag 1983
- KNMI, 2004: Rainfall generator for the Meuse basin, Development of a multi-site extension for the entire drainage area, KNMI-publication 196-III.
- Lammersen, 2004: Grensoverschrijdende effecten van extreme hoogwater op de Niederrhein, R. Lammersen in opdracht van de Duits-Nederlandse werkgroepo hoogwater.
- Leander, R., Buishand, A., Aalders, P. and de Wit, M., 2005: Estimation of extreme floods of the river Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model. Accepted for publication in *Hydrological Sciences Journal*.
- Makin, V.K. 2005, A note on drag of the sea surface at hurricane winds, *Boundary-Layer Meteorol.*, vol 115, 169-176.
- McKay, M.D., R.J. Beckman and W.J. Conover , 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2):239-245.
- Philippart, M.E. 2000 Veilig voor de storm. De mogelijkheid voor het bereiken van extreme waterstanden. Werkdocument RIKZ/OS/2000.112X, april 2000, 21 pagina's.
- Pond, Stephen, and George L. Pickard, 1983. *Intorductory Dynamical Oceanography*. Pergamom Press, Oxford. 2nd edition, 329 pages, 1983.
- Pielou, E.C. 1984. *The interpretation of Ecological Data. A primer on Classification and Ordination*. Wiley & Sons, New York.
- Repko, a., Van Gelder, P.H.A.J.M., Voortman, H.G. and Vrijling, J.K.: Bivariate description of offshore wave conditions with physics-based extreme value statistics.
- Rijkooort P.J. A compound Weibull model for the description of surface wind velocity distribution. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). De Bilt, 1983.
- Rijkswaterstaat (2000) Verslag van de stormvloed 3 en 4 december 1999; SR 79, Den Haag, Rijkswaterstaat, 19 pp en 11 bijlagen.
- Rijkswaterstaat en KNMI (1961) Verslag over de stormvloed van 1953. 's Gravenhage: Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf, 714 pp.
- RIKZ, 1993a: De basispeilen langs de Nederlandse kust; eindverslag, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.026
- RIKZ, 1993b: De basispeilen langs de Nederlandse kust; fysisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Rapport DGW-93.025
- RIKZ, 1995: De basispeilen langs de Nederlandse kust, De ruimtelijke verdeling, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Rapport RIKZ-95.008
- RIKZ, 2000. *Richtingsafhankelijke extreme waarden voor HW-standen, golfhoogten en golfperiodes*, RIKZ report December 2000
- RIZA 2002: Hoeveel (hoog)water kan ons land binnenkomen via de Rijn bij Lobith, nu en in de toekomst, RIZA rapport 2003.015.
- RIZA, 2005, Rainfall generators for the Rhine and Meuse, RIZA report November 2005 (in concept).

- Slomp R.M., C.P.M. Geerse en H. de Deugd. Onderbouwing Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het Benedenrivierengebied. RIZA-rapport 2002.017. RIZA Lelystad, 19 mei 2005. SWAN user manual, 2004: SWAN Cycle III version 40.41, User manual, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft. December 2004.
- SMHI, 1999. Integrated Hydrological Modelling System (IHMS). Manual Version 4.3. SMHI, Norrköpping.
- TAW, 1985: Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken – deel I bovenrivierengebied.
- Tichelaar, B.W. and Ruff, L.J., 1989: How Good Are Our Best Models? Jackknifing, Bootstrapping, and Earthquake Depth, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 70, pp 593-606
- Van Allst, 1983: Golfhoogte-waterstandsrelaties t.p.v. de NAP –20m lijn langs de Nederlandse kust, memo WWKZ-836.218, Rijkswaterstaat.
- Van der Klis, H., 2003. *Uncertainty Analysis applied to Numerical Models of River bed Morphology*. Ph.D.-thesis, Delft University of Technology. Published by Delft University Press. ISBN 90-407-2440-7.
- 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..
- Van den Brink, H., 2005: Extreme winds and sea-surges in climate models, proefschrift van Henk van de Brink, maart 2005.
- Van Gelder, PHAJM, 1999. *"Statistical Methods for the Risk-Based Design of Civil Structures"*, (Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, ISSN:0169-6548 00-1, 248pages).
- Van Gelder, P.H.A.J.M. (2003) Statistical estimation methods in hydrological engineering, In: Analysis and stochastic modeling of extreme runoff in Euroasian rivers under conditions of climate change, Pages 11- 57, Proceedings International Scientific Seminar, Irkutsk, 16-23 June 2003 Publishing House of the Institute of Geography, 2004 Editors: L.M. Korytny and W.M. Luxemburg, ISBN 5-94797-040-6.
- Van Noortwijk, J.M., Kalk, H.J., Chhab, E.H., 2004. Bayesian estimation of design loads. *HERON*, 49(2):189-205.
- Van Twuiver, H.C. en C.P.M. Geerse. Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 3: Windstatistiek. RIZA rapport 99.040. RIZA Lelystad, 25 maart 1999.
- Verboom, G. K., De Ronde, J. G. and Van Dijk, R. P., 1992: A fine grid tidal flow and storm surge model of the North sea., Continental shelf research, vol 12, nr 2/3, pp 213-233.
- Verkaik et al, 2003: KNMI-Hydra project: Phase reports 1 - 16. J.W. Verkaik, A. Smits, J. Ettema. KNMI De Bilt, the Netherlands, may, 2003.
- Verlaan, M., Zijderfeld, A., De Vries, H. and Kroos, J., 2005: Operational storm surge modelling in the Netherlands: developments in the last decade, article submitted to Royal society.
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., J.M. van Noortwijk, C.F. de Valk, M.T. Duits en M. Kok, 1997. Gevoeligheidsanalyse Probabilistische Belastingmodellen en Rekentechnieken. Deelrapport 1: locatie Rotterdamsche Hoek, faalmechanisme overloop en golfoverslag. HKV, TNO Bouw en Argoss.
- Volker, W.F. Statistiek van wind en waterstanden in Hoek van Holland; tweede concept, 20 mei 1987.
- Waarts, P.H. 2003a. *Structural reliability using Finite Element Analysis. An appraisal of DARS: Directional Adaptive Response Surface Sampling*. Proefschrift. TUD.
- Waarts, P.H., 2003b. Efficiency and accuracy of Monte Carlo (importance) sampling. In: Proceedings of ESREL 2003. *Safety and Reliability*, T. Bedford and P.H.A.J.M. van Gelder (Eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 1663 – 1670.
- WL, 1997. Onafhankelijk onderzoek Markermeer, Rapport H3211, WL | Delft Hydraulics, december 1997.
- WL, 1998. Wind opzet SOBEK-Bekken. Rapport T2215, WL | Delft Hydraulics, maart 1998.
- WL, 1999: Onderzoek 1/1250 jaar afvoer bij Lobith, F. Diermanse, rapport WL | Delft Hydraulics.
- WL, 2004a: Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2004.
- WL, 2004b. IJsselmeerstudie: extreme-waardenanalyse; WL-rapport Q2960, 2004.
- WL, 2004c: HR2006 - Herberekening werklijn Rijn, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIZA.
- WL, 2004d: HR2006 - Herberekening werklijn Maas, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIZA.

- WL, 2005a: Proposal to implement the rainfall generator method in river management. WL-rapport Q4025. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA.
- WL, 2005b: Analyse golfstatistiek op relatief diep water, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, september 2005.
- WL, 2006a: Extreme wave statistics: methodology and applications to North Sea wave data, WL | Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIKZ.
- WL, 2006b: SBW – Waddenzee: statistics, uncertainties and physical boundaries of wave parameters, report WL | Delft Hydraulics (in prep).
- WOW, 2002: Wet op de Waterkeringen. Wet, houdende algemene regels ter verzekering van de beveiliging door waterkeringen tegen overstromingen door het buitenwater en regeling van enkele daarmee verband houdende aangelegenheden. *Staatsblad* 304.
- Wu, C.F.J., 1986: Jackknife, bootstrap, and other resampling methods in regression analysis, *Ann. Stat.*, 14, 1261, 1986.

A Statistiek voor de HR2006

A.1 Inleiding

Het project Sterkte en Belasting van Waterkeringen (SBW) is erop gericht de kennisontwikkeling in met name de keten van bepaling hydraulische randvoorwaarden in samenhang te beschouwen. In 2006 worden de nieuwe randvoorwaarden voor de primaire waterkeringen in Nederland vastgesteld. Deze bijlage beschrijft hoe de statistische verdelingsfuncties van de belangrijkste invloedsvariabelen zijn vastgesteld in het kader van de HR2006. Deze beschrijving wordt per gebied/belastingmodel uitgevoerd:

- Kusten (en estuaria);
- Meren;
- Bovenrivierengebied Rijn/Maas (BOR);
- Benedenrivierengebied Rijn/Maas (BER);
- IJssel en Vecht delta (IJVD).

A.2 Bovenrivierengebied Rijn en Maas

A.2.1 Afvoer

Homogenisatie van de meetreeks

Door ingrepen in het stroomgebied en met name het riviersysteem kunnen de beschikbare meetreeksen bij Lobith niet als homogeen gezien worden. Voor de *Rijn* bij Lobith is in het kader van HR2001 besloten om de meetreeks te homogeniseren voor de kanalisatiewerken in de Oberrhein die tussen 1955 en 1977 zijn uitgevoerd. De homogenisatie is uitgevoerd naar het jaar 1977 d.w.z direct na voltooiing van de Rijnkanalisatie. Dat betekent dat van alle hoogwaters in de meetreeks is vastgesteld hoe hoog de afvoer bij Lobith zou zijn geweest als de afvoergebeurtenis in het jaar 1977 zou hebben plaatsgevonden. Voor dit doeleinde zijn simulaties van hoogwaters uitgevoerd met twee hydraulische modellen: SYNHP en SOBEK (BfG, 1999).

Voor de Maas bij Borgharen is met name door de Commissie Boertien II veel aandacht besteed aan het homogeniseren van de meetreeks. Daarbij zijn de volgende activiteiten ondernomen:

- correctie van 8-uur en daggemiddelde afvoeren naar “werkelijke” piekafvoeren.
- correctie van piekafvoeren uit de periode 1911-1932 door toepassing van een gewijzigde $Q(h)$ -relatie; de oorspronkelijk toegepaste $Q(h)$ -relatie week namelijk af van die bij de Sint Pieter te Maastricht en die bij Visé in Wallonië.

- correcties van afvoermetingen met stokdrijvers, omdat nader onderzoek heeft uitgewezen dat dergelijke metingen de afvoer in de regel overschatten.
- correcties voor rivierwerken op de Waalse Maas met behulp van een 1D hydrodynamisch model (WENDY).
- correcties voor gewijzigde onttrekkingen bovenstrooms van Borgharen, omdat deze in de loop der tijd langzaam zijn toegenomen.

In het kader van HR2001 zijn verder nog de afvoerwaarden tussen 1984 en 1987 gecorrigeerd op grond van de vertaling van een gewijzigde $Q(h)$ -relatie, rekening houdend met bodemdaling.

Frequentieanalyse

Overschrijdingsfrequenties van afvoeren van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen in het kader van HR2006 zijn afgeleid op basis van statistische extrapolatie (WL, 2004c,d). De keuze van de verdelingsfuncties, het selecteren van data en de gebruikte fitmethoden is grotendeels afkomstig uit studies van de commissies Boertien I en Boertien II. In het kort werkt de procedure als volgt:

- Voor herhalingsstijden *kleiner* dan 25 jaar zijn de corresponderende afvoeren gebaseerd op een frequentieanalyse van afvoerpieken met de gegeneraliseerde Pareto-verdeling (GPD). Deze verdeling is gebaseerd op de reeks van N hoogste afvoerpieken, waarbij N gelijk is aan het aantal jaren in de meetreeks. Dit is de zogenaamde “*partiële reeks*” afvoeren die even lang is als de reeks jaarmaxima en voor een gedeelte dezelfde afvoeren bevat.
- Voor herhalingsstijden *groter* dan 25 jaar zijn de corresponderende afvoeren gebaseerd op een middeling van de uitkomsten van een frequentieanalyse met de volgende vier verdelingen:
 - de 3-parameter log-normale verdeling, de Pearson-III (Gamma) verdeling en de Gumbel-verdeling. Hierbij is gebruik gemaakt van de reeks van jaarmaxima, waarbij voor de Gumbel-verdeling een ondergrens gekozen is van $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - de exponentiële verdeling, gefit op de partiële reeks.

De parameters zijn geschat met behulp van een gemodificeerde versie⁷ van de “maximum likelihood methode” (MLH) of, in het geval van de gegeneraliseerde Paretoverdeling, de “method of moments” (MoM).

⁷ “Gemodificeerd” impliceert hier dat eerst de locatieparameter met behulp van de “method of moments” wordt vastgesteld en de overige parameters vervolgens met de “maximum likelihood methode”.

Tabel A-1 Overzicht van gebruikte verdelingsfuncties en data-series.

verdelingsfunctie	herhalingstijden	gefit op	fitmethode
GPD	< 25 jaar	partiële -reeks	MoM
Exponentieel	> 25 jaar	partiële -reeks	MLH
Pearson-III	> 25 jaar	jaarmaxima	MLH
Lognormaal	> 25 jaar	jaarmaxima	MLH
Gumbel	> 25 jaar	jaarmaxima > 7.000 m ³ /s (Rijn) jaarmaxima > 1.000 m ³ /s (Maas)	MLH

A.2.2 Wind

Voor het bepalen van de golfbelasting in het bovenrivierengebied worden windsnelheden toegepast die in de leidraad voor het ontwerpen van rivierafvoeren staat (TAW, 1985). Deze waarden zijn gebaseerd op windstatistiek van de stations Herwijnen (voor het gebied ten westen van Tiel) en Deelen (voor het gebied ten oosten van Tiel). Per windrichting wordt een ontwerp-windsnelheid gekozen (zie bijlage 12 in TAW, 1985), en vervolgens wordt bepaald bij welke windrichting de maximale golfloop resulteert.

A.3 Benedenrivierengebied Rijn en Maas

A.3.1 Inleiding

Voor het benedenrivierengebied worden de hydraulische randvoorwaarden HR2006 bepaald met het rekenprogramma Hydra-B. In Hydra-B komen zogenaamde Rijndominante en Maasdominante locaties voor. Voor Rijndominante locaties is de Rijn bedreigender dan de Maas en voor Maasdominante is de Maas bedreigender dan de Rijn. Voor HR 2006 worden locaties bovenstrooms van km 251 op de Bergsche Maas Maasdominant geacht, terwijl alle overige locaties Rijndominant worden geacht. Hydra-B kent de volgende stochasten:

- Rivierafvoer. Dat is ofwel de Rijnafvoer te Lobith voor Rijndominante locaties, ofwel de Maasafvoer te Lith voor Maasdominante locaties.
- Zeewaterstand Maasmond.
- Windsnelheid (statistiek van Schiphol).
- Windrichting (statistiek van Schiphol).
- Beheerssituatie (beide open of beide dicht) van de Maeslant- en Hartelkering.
- Voorspelling van de zeewaterstand te Hoek van Holland.

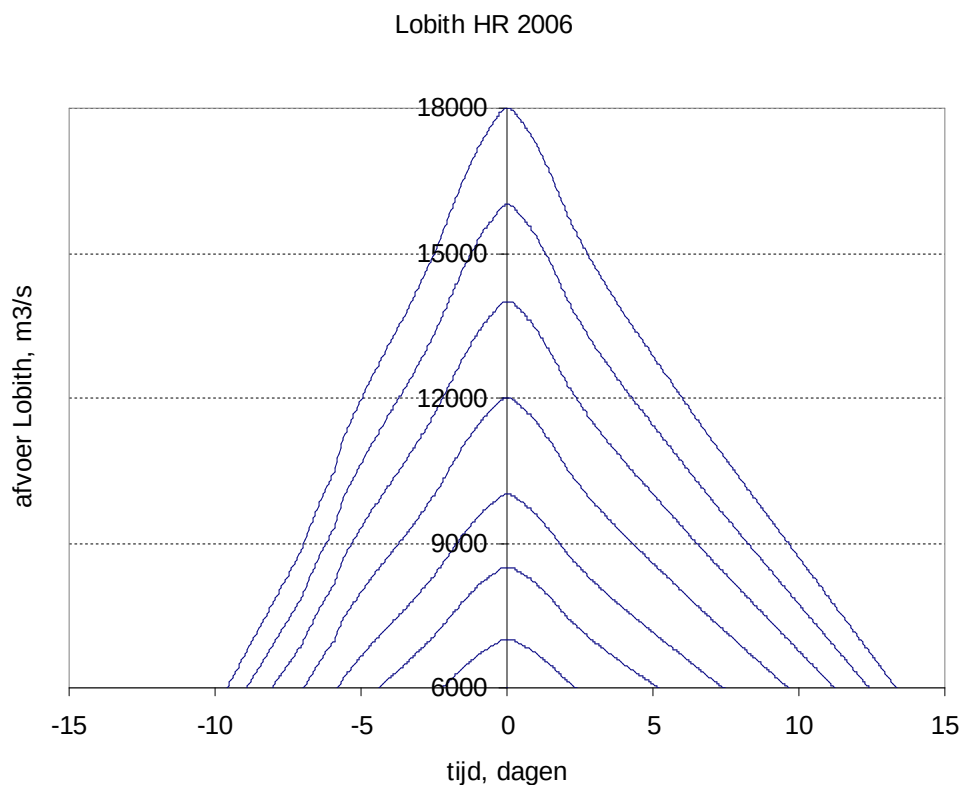
Voor een uitgebreide beschrijving van deze stochasten en het model Hydra-B, in zoverre deze betrekking hebben op HR2001, wordt verwezen naar (Slomp et al, 2005). De statistiek voor HR2006 heeft ten opzichte van die voor HR2001 betrekkelijk geringe wijzigingen ondergaan; de nieuwe statistiek wordt beschreven in (Geerse, 2005). In onderstaande worden de eerste vier stochasten beknopt behandeld, terwijl de laatste twee, omdat ze voor de doeleinden van dit project weinig relevant zijn, niet worden beschouwd.

A.3.2 Rijnafvoer Lobith

De afvoerstatistiek voor Lobith bestaat uit drie onderdelen:

- Standaardgolfvormen van de afvoer. Bij iedere piekwaarde (maximum van de golf) hoort één standaardgolfvorm. Deze standaardgolfvormen geven het gemiddelde tijdsverloop van de afvoer en zijn in Hydra-B beschikbaar vanaf de eens per jaar afvoer (ongeveer 6000 m³/s).
- De werklijn. Deze geeft voor iedere herhalings tijd, T , de bijbehorende piekafvoer. De werklijn is in Hydra-B beschikbaar vanaf de eens per jaar afvoer (ongeveer 6.000 m³/s).
- De dagenlijn. Deze geeft het gemiddelde aantal dagen per winterhalfjaar dat een bepaald afvoerniveau wordt overschreden. De dagenlijn is in Hydra-B beschikbaar voor het volledige afvoerbereik.

De standaardgolfvormen zijn bepaald met de zogenaamde *opschalingsmethode*. Daarbij worden gemeten golven eerst verticaal opgeschaald naar een gewenste piekwaarde, waarna de golven op een bepaalde manier worden gemiddeld. De golven voor HR2006 zijn weergegeven in Figuur A-1.



Figuur A-1 Afvoergolven Lobith voor HR2006.

De werklijn voor HR2006 is ongewijzigd gebleven ten opzichte van HR2001, zie voor een beschrijving van de manier waarop deze is bepaald paragraaf 4.2.

De dagenlijn kan voor afvoerniveaus groter dan $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ worden berekend uit de werklijn en de golfvormen. Voor lagere afvoerniveaus is deze bepaald door het turven van afvoermetingen. De twee aldus bepaalde dagenlijnen zijn bij $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ op elkaar aangesloten.⁸

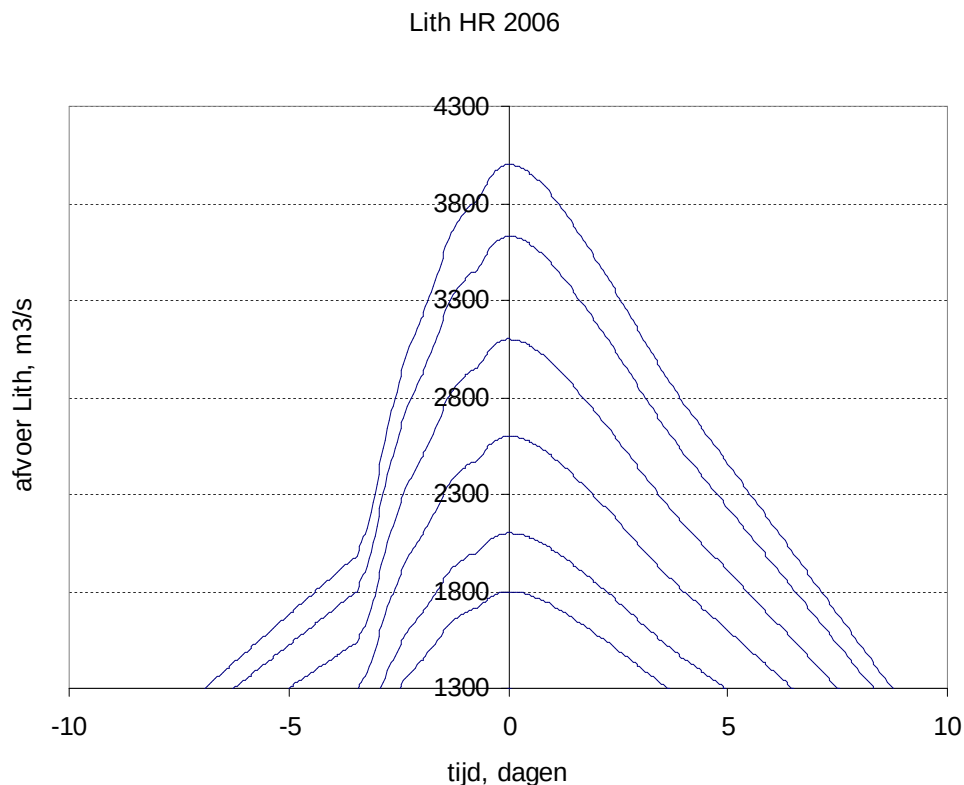
A.3.3 Maasafvoer Lith

De afvoerstatistiek voor Lith bestaat net als die te Lobith uit drie onderdelen:

- Standaardgolfvormen van de afvoer. Bij iedere piekwaarde (maximum van de golf) hoort één standaardgolfvorm. Deze standaardgolfvormen geven het gemiddelde tijdsverloop van de afvoer en zijn in Hydra-B beschikbaar vanaf de eens per jaar afvoer (ongeveer $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$).
- De werklijn. Deze geeft voor iedere herhalingsdij T de bijbehorende piekafvoer. De werklijn is in Hydra-B beschikbaar vanaf de eens per jaar afvoer.
- De dagenlijn. Deze geeft het gemiddelde aantal dagen per winterhalfjaar dat een bepaald afvoerniveau wordt overschreden. De dagenlijn is in Hydra-B beschikbaar voor het volledige afvoerbereik.

Om aan standaardgolven te Lith te komen, zijn met een waterbewegingsmodel 13 golven doorgerekend van Borgharen naar Lith, waarbij aannames voor de diverse laterale toestromingen zijn gedaan. De bij Borgharen opgelegde golven zijn daartoe bepaald met de eerdergenoemde opschalingsmethode. De resulterende golven, waarop in (Geerse, 2005) enige aanpassingen zijn verricht, zijn weergegeven in Figuur A-2.

⁸ Feitelijk ligt de situatie iets ingewikkelder dan hier geschetst. Voor afvoeren kleiner dan $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn voor HR2006 namelijk ook een werklijn en golfvormen afgeleid, die feitelijk geen fysische betekenis hebben. Deze leveren echter wel op correcte wijze, d.w.z. in overeenstemming met de metingen, het deel van de dagenlijn onder $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Zie voor meer informatie (Geerse, 2005).



Figuur A-2 Afvoergolven Lith voor HR2006.

De van Borgharen naar Lith doorgerekende 13 golven leveren meteen informatie over de werklijn te Lith. Van iedere golf te Borgharen is namelijk de herhalingstijd T bekend: de bij Lith resulterende golf heeft dan dezelfde herhalingstijd. Aldus zijn 13 punten van de werklijn te Lith bekend. Hieraan zijn drie trajecten gefit (piekafvoer lineair afhankelijk van de logaritme van de herhalingstijd).

De dagenlijn kan voor afvoerniveaus groter dan $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ worden berekend uit de werklijn en de golfvormen. Voor lagere afvoerniveaus is deze bepaald door het turven van afvoermetingen. De twee aldus bepaalde dagenlijnen zijn bij $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ op elkaar aangesloten.⁹

⁹ Feitelijk ligt de situatie, net als voor Lobith, iets ingewikkelder dan hier geschetst. Voor afvoeren kleiner dan $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn voor HR2006 namelijk ook een werklijn en golfvormen afgeleid, die feitelijk geen fysische betekenis hebben. Deze leveren echter wel op correcte wijze, d.w.z. in overeenstemming met de metingen, het deel van de dagenlijn onder $1300 \text{ m}^3/\text{s}$. Zie voor meer informatie (Geerse, 2005).

A.3.4 Zeewaterstand Maasmond

In Hydra-B wordt de zeewaterstand te Maasmond als stochast gebruikt, aangeduid als M . Deze geeft de *maximale* waterstand gedurende een getijperiode, dus de waterstand tijdens hoogwater. Het tijdstip van dit hoogwater kan verschillen van het tijdstip waarop het astronomisch hoogwater valt. In Hydra-B is de kansdichtheid $g(m)$ van M nodig, met daarnaast de voorwaardelijke kansdichtheden $g(m|r)$ van de zeewaterstand bij gegeven windrichting r . De $g(m)$ en $g(m|r)$ hebben dus betrekking op een getijperiode, voor de locatie Maasmond. Voor de HR 2006 dienen ze te gelden voor het toestandsjaar 2011. In (Slomp et al, 2005) wordt beschreven hoe $g(m)$ en $g(m|r)$ voor de HR2001 zijn bepaald. Voor de HR2006 gebeurt die bepaling op precies dezelfde wijze, met dien verstande dat nu een iets andere zeespiegelstijging wordt aangenomen. We zullen hieronder beknopt beschrijven hoe de $g(m)$ en $g(m|r)$ voor de HR2006 zijn bepaald.

Het RIKZ beschikt over een frequentieverdeling van de waterstand bij Hoek van Holland in plaats van Maasmond, die geldt voor het toestandsjaar 1985 in plaats van 2011 (RIKZ, 1995). De verdeling is gerelateerd aan een winterhalfjaar.¹⁰ Het is een gegeneraliseerde Paretoverdeling, die de overschrijdingsfrequentie van de hoogwaterstand geeft in keren per winterhalfjaar. Behalve deze frequentieverdeling is ook de uitsplitsing hiervan beschikbaar, vanaf drempelwaarde 1.90 m+NAP, in termen van 10°-windrichtingssectoren (RIKZ, 2000). De frequenties voor deze 10°-sectoren zijn eerst omgezet naar de voor Hydra-B gebruikte 22.5°-sectoren. Daarna zijn de frequentieverdelingen herschaald met als resultaat de kansdichtheden $g(m|r)$ per getijperiode. Hierbij is wat pragmatisch omgegaan met zeewaterstanden onder de drempelwaarde 1.90 m+NAP, waarvoor die herschaling eigenlijk niet is toegestaan. Dergelijke lage zeewaterstanden (de drempelwaarde wordt ongeveer 7 keer per winterhalfjaar overschreden) hebben echter nauwelijks invloed op de uitkomsten van Hydra-B.

Het basispeil te Hoek van Holland (hoogwaterstand die eens per 10000 jaar wordt overschreden, zie 4.5.1) is voor toestandsjaar 1985 gelijk aan 5.00 m+NAP. De toetspeilen uit HR 2006 dienen representatief te zijn voor het jaar 2011. Over de periode 1985-2011 is 0.07 m zeespiegelstijging aangehouden. Die stijging wordt in de kansdichtheden $g(m|r)$ verwerkt door deze simpelweg met dit bedrag te verschuiven.

Voor Hydra-B zijn de kansdichtheden $g(m|r)$ te Maasmond nodig in plaats van die voor Hoek van Holland. Zeewaterstanden te Maasmond liggen iets *lager* dan die te Hoek van Holland. De $g(m|r)$ zijn getransformeerd van Hoek van Holland naar Maasmond door ze met een vast bedrag te verschuiven. Deze verschuiving is onafhankelijk van de beschouwde richting genomen, en bedraagt 0.02 m. Terzijde: de zojuist genoemde zeespiegelstijging en deze verschuiving kunnen ook gecombineerd worden tot één verschuiving van $0.07 - 0.02 = 0.05$ m. Bijvoorbeeld 5.00 m+NAP te Hoek van Holland, toestand 1985, correspondeert dan met 5.05 m+NAP te Maasmond, toestand 2011.

¹⁰ In feite gebruikt het RIKZ het 'lange stormzeizoen' dat loopt van 1 oktober t/m 15 maart. Dit valt praktisch samen met het winterhalfjaar dat loopt van 1 oktober t/m 31 maart – in Hydra-B is geen vertaalslag toegepast.

A.3.5 Windsnelheid en windrichting

De windstatistiek in Hydra-B heeft betrekking op een getijperiode. De gegevens daarvoor zijn op een bepaalde manier afgeleid van uurlijkse (potentiële) windsnelheden voor Schiphol. De windstatistiek wordt in Hydra-B voor de westelijke en oostelijke richtingen verschillend behandeld. De opdeling over deze zogeheten *westsector* en *oostsector* is als volgt:

Oostsector: 9 oostelijke richtingen: NNO, NO, ..., ZZW
 Westsector: 7 westelijke richtingen: ZW, WZW, ..., N

De achtergrond hiervan is dat voor de westelijke richtingen stormvloeden kunnen optreden, maar niet voor de oostelijke. Vanwege de correlatie tussen stormvloeden en wind blijkt dit tot gevolg te hebben dat de windstatistiek voor de oostelijke en westelijke richtingen afwijkend moet worden behandeld. Die correlatie is er meteen de reden van dat de windstatistiek uit Hydra-B nogal complex is (hieronder zal blijken dat voor de westelijke en oostelijke richtingen verschillende interpretaties gelden). In (Geerse et al, 2002) wordt uitgebreid informatie gegeven over de windstatistiek in Hydra-B. Hier volgt een beknopte beschrijving daarvan.

De stochasten windsnelheid en windrichting worden respectievelijk aangegeven met U en R . Tussen deze stochasten bestaat een correlatie, die in Hydra-B wordt meegenomen. De stochast U heeft als interpretatie:

- Voor de oostelijke richtingen geeft U de maximale windsnelheid in een getijperiode (De maximale uurwaarde van de potentiële windsnelheid die voorkomt in de periode).
- Voor de westelijke richtingen geeft U voor herhalingstijden $T > 10$ jaar de windsnelheid *tijdens het moment van hoogwater* in een getijperiode. Voor $T < 1$ jaar geeft U de maximale windsnelheid in een getijperiode, terwijl voor $1 < T < 10$ jaar geleidelijk wordt overgegaan van het ene naar het andere bereik.

De windrichting heeft voor de westelijke en oostelijke richtingen strikt genomen ook een iets andere interpretatie, die hier niet zal worden uitgelegd; denk simpelweg aan een representatieve windrichting in een getijperiode. De kansen $P(r)$ voor de 16 richtingen NNO, NO,..., N zijn beschreven in (Geerse et al, 2002).

Voor de oostelijke richtingen maakt Hydra-B gebruik van een invoerbestand waarin, bij gegeven richting r , overschrijdingskansen $P(U > u|r)$ worden gegeven, zie bijlage J van (Geerse et al, 2002). Deze kansen zijn door herschaling bepaald uit dergelijke overschrijdingskansen voor perioden van 12 uur (i.p.v. getijperioden). De 12-uur kansen zijn voor de lagere windsnelheden door turven bepaald uit de metingen, terwijl deze voor de hogere windsnelheden zijn bepaald door herschaling uit de zogenaamde ‘winterhalfjaartabel’ uit het Rijkkoord-Weibull-model (zie voor een beschrijving van dat model paragraaf 4.3). Hierbij is voor een vloeiende overgang tussen de lage en hoge windsnelheden gezorgd.

Voor de westelijke richtingen is een soortgelijke procedure gevolgd, met dien verstande dat de overschrijdingskansen van de hogere windsnelheden (op nogal pragmatische wijze) zijn gereduceerd met een factor 2 (de zogenaamde ‘Volkerfactor’). Reden daarvoor is dat de maximale waterstand tijdens een stormvloed niet in de tijd hoeft samen te vallen met de maximale windsnelheid. De (kans op de) windsnelheid tijdens hoogwater wordt daarom enigszins gereduceerd.¹¹

A.3.6 Wind-waterstandstatistiek

Wind en stormvloeden zijn gecorreleerd: hoge zeewaterstanden te Maasmond, die voorkomen bij westelijke richtingen, gaan meestal samen met hoge windsnelheden boven het benedenrivierengebied. Deze correlatie wordt in Hydra-B beschreven met een kansdichtheid $g(u,m,r)$, waarmee voor een getijperiode de kansen kunnen worden berekend op het gezamenlijk optreden van windsnelheid u , zeewaterstand m en windrichting r . Deze kansdichtheid wordt aangeduid als de ‘wind-waterstandstatistiek’. De marginale verdelingen hiervan zijn gelijk aan de eerder besproken verdelingen voor de wind, de zeewaterstand en de windrichting.

In het verleden is door Willem Volker al zo’n gezamenlijke kansdichtheid $g(u,m,r)$ afgeleid voor Hoek van Holland in plaats van voor Maasmond; (Geerse et al, 2002) beschrijft gedetailleerd Volker’s model, en ook hoe dat is aangepast om bruikbaar te zijn voor Hydra-B. Op die aanpassingen wordt hier niet ingegaan, we schetsen slechts hoe Volker’s model globaal in elkaar zit.

In Volker’s model wordt een bepaalde (analytische) formulering gekozen voor $g(u|m,r)$, waarbij de parameters uit het model worden gefit aan de data. Zodra $g(u|m,r)$ bepaald is, kan met de reeds bekende $g(m|r)$ en $P(r)$ de gewenste $g(u,m,r)$ worden berekend. Hoe door Volker de $g(u|m,r)$ is gekozen, is door hem beschreven in (Volker, 1987). Later bleek, zoals behandeld in (Geerse, 2004), dat Volker’s model deel uitmaakt van een gehele klasse van correlatiemodellen, waarin (in dit geval bij gegeven richting r) de marginale kansdichtheden $g(u)$ en $g(m|r)$ eerst worden getransformeerd naar zekere kansdichtheden $g(x)$ en $g(y)$. Hierbij volgt $g(x) = \exp(-x)$ een standaardexponentiële verdeling en volgt $g(y)$ een asymptotisch exponentiële verdeling, gegeven door:

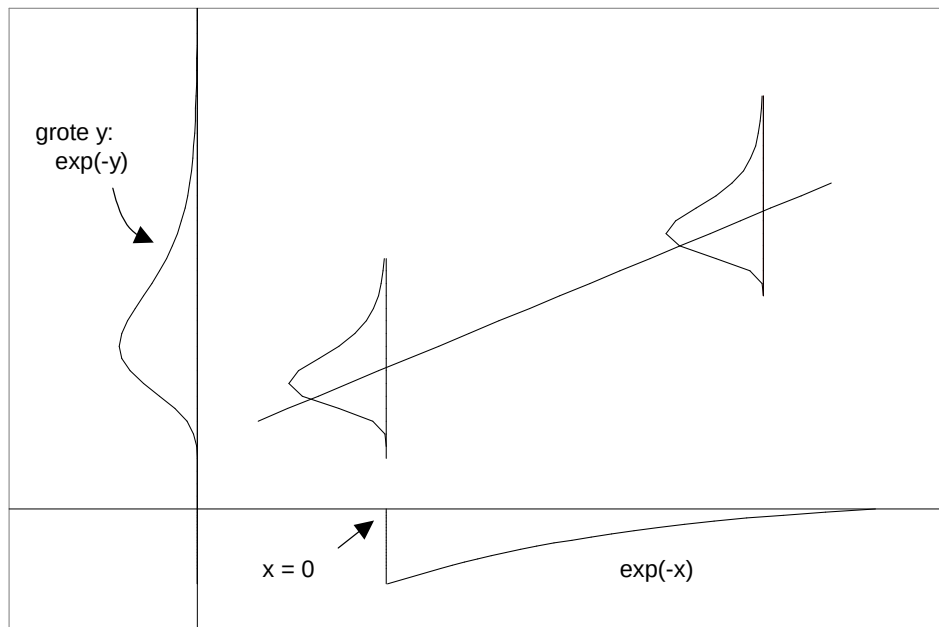
$$g(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} \lambda(y-x-\delta) dx$$

In het algemene geval is $\lambda(t)$ een willekeurige kansdichtheid met gemiddelde 0 en standaarddeviatie s (hoe kleiner s , hoe sterker daarbij de correlatie).¹² Bij geschikte keuze van δ blijkt $g(y)$ asymptotisch standaardexponentieel te worden (deze δ hangt af van s).

¹¹ De informatie uit het Hydra-B invoerbestand met overschrijdingskansen $P(U > u|r)$, afkomstig uit bijlage J van (Geerse et al, 2002), wordt alleen gebruikt voor de oostelijke richtingen; voor de westelijke richtingen worden deze kansen berekend volgens de formules uit de hierna behandelde wind-waterstandstatistiek. Het wijzigen van de kansen $P(U > u|r)$ voor de westelijke richtingen heeft dus geen invloed op de Hydra-B uitkomsten.

¹² De enige eis aan $\lambda(t)$ is dat de staart daarvan niet al te langzaam afneemt; de verwachtingswaarde van $h(t) = \exp(t)$ dient m.b.t. $\lambda(t)$ eindig te zijn. Voor bijvoorbeeld $\lambda(t)$ gelijk aan de normale verdeling is dat zeker het geval.

Meetkundig kan dit correlatiemodel worden weergegeven als in Figuur A-3. De conditionele kansdichtheid $g(y|x)$ is, op een verschuiving langs een rechte lijn met helling 45° na, steeds dezelfde functie.



Figuur A-3 Correlatiemodel waarvan Volker's model een speciaal geval is.

In het geval van Volker's model wordt $\lambda(t)$ gegeven door een 'gemodificeerde' Gumbelverdeling, in dit geval een Gumbelverdeling die bij de hoogste 2% van de staart is afgekapt en daarna opnieuw genormeerd (de gemodificeerde Gumbelverdeling heeft per richting een andere locatie- en schaalparameter).

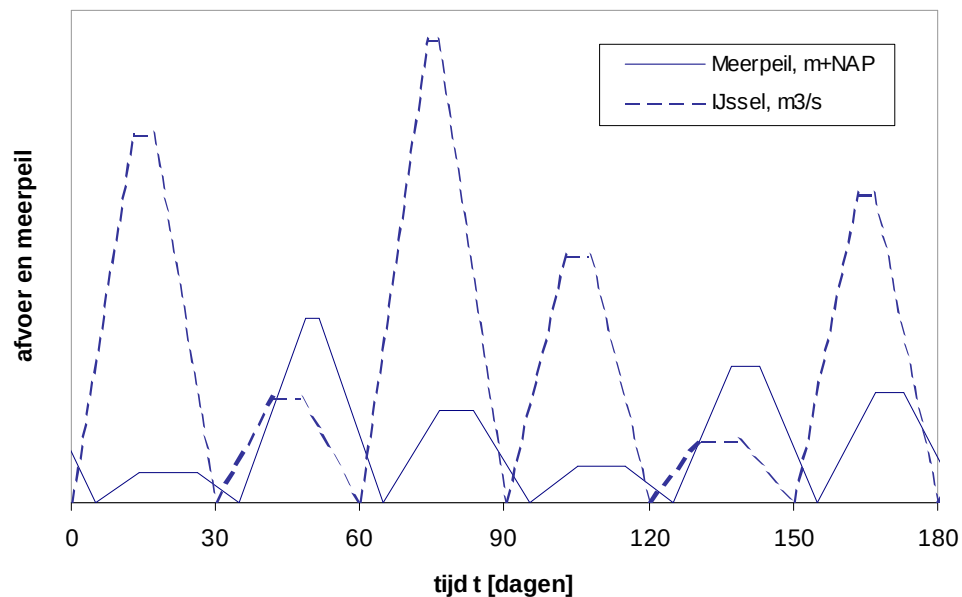
A.4 Vecht en IJsseldelta

A.4.1 Inleiding

Voor de Vecht- en IJsseldelta worden de hydraulische randvoorwaarden HR2006 bepaald met het rekenprogramma Hydra-VIJ. In dit programma komen deze stochasten voor:

- Rivierafvoer. Dat is ofwel de IJsselafoer te Olst voor een dijkvak in de IJsseldelta, ofwel de Vechtafvoer te Dalfsen voor een dijkvak in de Vechtdelta.
- IJsselmeerpeil.
- Windsnelheid (statistiek van Schiphol).
- Windrichting (statistiek van Schiphol).
- Keringstoestand van de balgstuw te Ramspol; de open en dichte situatie worden beschouwd, waarbij de faalkans van de keringen in het model wordt meegenomen.

Voor de laatste stochast is nauwelijks statistische informatie nodig (slechts de faalkans is nodig), vandaar dat die verder achterwege wordt gelaten. In Hydra-VIJ wordt het tijdsverloop van de afvoer en van het meerpeil gemodelleerd met trapezia, zoals weergegeven in Figuur A-4, waartussen een faseverschuiving wordt aangenomen. De basisduur B van de trapezia is in Hydra-VIJ gelijk aan 30 dagen. Omdat bedreigende situaties nauwelijks kunnen voorkomen in de zomermaanden (april t/m september), worden in Hydra-VIJ alleen de wintermaanden beschouwd, resulterend in zes trapezia voor zowel de afvoer als het meerpeil. Voor de wind wordt aangenomen dat deze elke 12 uur kan veranderen van snelheid zowel als richting.



Figuur A-4 Tijdsverloop van afvoer en meerpeil in Hydra-VIJ.

Samengevat zijn, afgezien van de keringstoestand, de volgende gegevens nodig voor de stochasten uit Hydra-VIJ. Deze worden hierna globaal toegelicht, waarbij voor details wordt verwezen naar (Geerse, 2006).

Vecht Dalfsen

- Kansdichtheid $f(k)$ van de piekafvoer, welke gerelateerd is aan de basisduur B .
- Topduur $b(k)$ van de trapezia, als functie van de hoogte k van het trapezium.

IJssel (Olst)

- Kansdichtheid $f(k)$ van de piekafvoer, welke gerelateerd is aan de basisduur B .
- Topduur $b(k)$ van de trapezia, als functie van de hoogte k van het trapezium.

IJsselmeer

- Kansdichtheid $f(m)$ van het piekmeerpeil, welke gerelateerd is aan de basisduur B .
- Topduur $b(m)$ van de trapezia, als functie van de hoogte m van het trapezium.

Correlaties

- Karakteristieke waarde voor de fase ϕ tussen Vecht- en IJsselmeertrapezia.
- Karakteristieke waarde voor de fase ϕ tussen IJssel- en IJsselmeertrapezia.

- Parameter σ voor de parametrisatie van de gezamenlijke kansdichtheid $f(k,s)$ voor de pieken van Vecht- en meerpeiltrapezia.
- Parameter σ voor de parametrisatie van de gezamenlijke kansdichtheid $f(k,s)$ voor de pieken van IJssel- en meerpeiltrapezia.

Wind (Schiphol)

- Momentane kansen $P(r)$ op de windrichtingen r , namelijk de richtingen N, NNO, NO,..., NNW.
- Conditionele overschrijdingskansen $P(U > u | r)$ van het 12-uursmaximum van de windsnelheid u , gegeven richting r gedurende de 12-uursperiode (feitelijk betreft het hier de vectorieel gemiddelde richting in de 12-uursperiode).

A.4.2 Vecht (Dalfsen)

De kansdichtheid $f(k)$ van de piekafvoer, geassocieerd met basisduur B , volgt eenvoudig uit de overschrijdingsfrequentie $F(k)$, in keren per (winterhalf)jaar, door deze door zes te delen. De grootte $F(k)$, ook vaak als de *werklijn* aangeduid, is als volgt bepaald. Voor de lagere afvoeren is deze gefit op de data (POT-reeksen met zichtduur 15 dagen), terwijl deze voor de hogere afvoeren wordt vastgelegd door de eis dat voor herhalingsjijd 1250 jaar de maatgevende afvoer van $550 \text{ m}^3/\text{s}$ dient te resulteren. De overschrijdingsfrequentie $F(k)$ is in Hydra-VIJ niet alleen nodig voor de hogere afvoeren, maar ook tot aan de allerlaagste afvoer van $0 \text{ m}^3/\text{s}$, waarbij $F(k)$ voor de lagere afvoeren geen fysische betekenis meer heeft. (Voor de lage afvoeren dient $F(k)$ wel op een bepaalde manier gekozen te worden, namelijk op zo'n manier dat deze in samenhang met de topduren $b(k)$ de juiste momentane afvoerkansen oplevert.) Voor de overschrijdingsfrequentie $F(k)$ te Dalfsen zijn in Hydra-VIJ twee exponentiële trajecten beschouwd; de scheiding tussen de trajecten ligt bij herhalingsjijd $T = 1$ jaar (afvoer $180 \text{ m}^3/\text{s}$).

De maatgevende afvoer van $550 \text{ m}^3/\text{s}$ berust op een TC-Rand beslissing. Die beslissing is onder meer genomen omdat Bayesiaanse analyses door RIZA-WRV (niet uitgebreid gerapporteerd) wezen op een maatgevende afvoer van $500 \text{ á } 550 \text{ m}^3/\text{s}$. Terzijde kan nog worden vermeld dat de resultaten van eerder onderzoek, waarbij door 'routing' een afvoergolf te Emlichheim met Sobek werd doorgerekend naar Dalfsen, met daarbij ook afvoergolven aangenomen op de zijleidingen van de Vecht, tot discutabele resultaten bij Dalfsen leidden (de golven bij Dalfsen bleken een factor 2 smaller dan volgens de metingen). Vanwege dat laatste is voor de keuze van de maatgevende afvoer uitgegaan van extrapolaties van de metingen te Dalfsen.

De topduur $b(k)$ van de trapezia, als functie van de hoogte k van het trapezium, is voor de hogere piekwaarden k groter dan $180 \text{ m}^3/\text{s}$ zo gekozen dat de resulterende trapezia gemiddeld gezien de afvoergolven te Dalfsen goed modelleren. Een vaste topduur van 2 dagen bleek voor deze piekwaarden een goede keuze. Voor de lagere afvoeren bleek dat de topduur dient toe te nemen met afnemende k : er is een lineair verloop aangenomen waarbij $k = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ duur 30 dagen heeft en $k = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ duur 2 dagen. (Net als het laagste deel van $F(k)$ hebben de trapezia voor de lagere piekwaarden geen fysische betekenis, maar dienen ze slechts om in combinatie met $F(k)$ de juiste momentane afvoerkansen op te leveren.)

A.4.3 IJssel (Olst)

De kansdichtheid $f(k)$ van de piekafvoer, geassocieerd met basisduur B , volgt net als voor de Vecht uit de overschrijdingsfrequentie $F(k)$, in keren per (winterhalf)jaar, door deze door zes te delen. De grootte $F(k)$ is als volgt bepaald. Voor de hogere afvoeren, groter dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$, zijn met het model WAQUA zes afvoergolven doorgerekend van Lobith naar Olst. Dat levert zes punten $(k_i, F(k_i))$ op, voor $i = 1$ t/m 6 , waarvan de overschrijdingsfrequenties volgen uit de werklijn te Lobith. Door deze zes punten is een exponentieel verband gekozen, resulterend in een maatgevende afvoer te Olst van $2.720 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T = 1250$ jaar). Voor de lagere afvoeren, kleiner dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$, is een tweede exponentieel traject gekozen dat doorloopt tot minimumafvoer $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit tweede traject heeft, net als voor de Vecht, geen fysische betekenis, maar dient slechts om – in combinatie met specifiek gekozen topduren $b(k)$ – de juiste momentane kansen te reproduceren.

De topduur $b(k)$ van de trapezia, als functie van de hoogte k van het trapezium, is voor de hogere piekwaarden k groter dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$ zo gekozen dat de resulterende trapezia gemiddeld gezien de met WAQUA berekende afvoergolven te Olst goed modelleren. Een vaste topduur van 1 dag bleek voor deze piekwaarden een goede keuze. Voor de lagere afvoeren bleek dat de topduur dient toe te nemen met afnemende k : er is een lineair verloop aangenomen waarbij $k = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ duur 30 dagen heeft en $k = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ duur 1 dag. (Net als het laagste deel van $F(k)$ hebben de trapezia voor de lagere piekwaarden geen fysische betekenis, maar dienen ze slechts om in combinatie met $F(k)$ de juiste momentane afvoerkansen op te leveren.)

A.4.4 IJsselmeer

Voor Hydra-VIJ is ten behoeve van HR2006 een nieuwe statistiek van het IJsselmeer afgeleid, die afwijkt van die voor de meren/Hydra-M gebruikte statistiek (zie paragraaf 4.4). Reden voor het opnieuw afleiden is dat de Hydra-M statistiek voor verbetering vatbaar bleek. (omdat voor de meren beleidsmatig is gekozen voor het vasthouden aan de HR2001, wordt de nieuwe statistiek alleen voor Hydra-VIJ gebruikt en niet voor Hydra-M).

Voor de statistiek voor Hydra-VIJ zijn, gerelateerd aan de basisduur B van de meerpeiltrapezia, de kansdichtheid $f(m)$ van het piekmeerpeil m en de topduur $b(m)$ van de trapezia nodig. Daarnaast zijn in (Geerse, 2006) ook, ter vergelijking met de Hydra-M statistiek, de onderdelen uit de Hydra-M statistiek bepaald. Die onderdelen zijn:

- Frequentielijn $F(m)$. Deze geeft de overschrijdingsfrequentie van niveau m , in keren per jaar.
- Dagenlijn $D(m)$. Deze geeft het gemiddeld aantal dagen per jaar dat niveau m wordt overschreden. Er is een simpel verband tussen deze grootte en de momentane overschrijdingskans van het meerpeil: $P(M > m) = D(m)/182$, met 182 gelijk aan het aantal dagen per winterhalfjaar.
- Duur per top $d(m)$. Deze geeft de gemiddelde overschrijdingsduur dat niveau m wordt overschreden, binnen meerpeilgolven waarvan de piekwaarde niveau m overschrijdt.

Frequentielijn

Voor de bepaling van $F(m)$ is uitgangspunt geweest dat het 4000 jaar-kwantiel van het meerpeil, namelijk 0.96 m+NAP , onveranderd is gelaten.¹³ In (Chbab, 2006) zijn namelijk nieuwe extreme-waardenanalyses verricht, met ‘werkelijke’ metingen uit de periode 1976 t/m 2002 en met de balansmodellen BEKKEN en BEKKENWIN bepaalde ‘synthetische meerpeilen’ uit de periode 1932 t/m 1975. Deze analyses, waarbij zo goed mogelijk is gecorrigeerd voor aanwezig gebleken systematische fouten in de synthetische meerpeilen, gaven geen aanleiding het 4000 jaar kwantiel te herzien. Het deel van $F(m)$ voor meerpeilen tussen 0.05 en 0.96 m+NAP is zó gekozen dat het overeenstemt met de data (POT-reeks op basis van zichtduur 15 dagen, uit de periode 1976 t/m 2005), waarna dit deel naar hogere meerpeilen dan 0.96 m+NAP is doorgetrokken. De lijn $F(m)$ is daarna ook nog op een bepaalde manier voortgezet tot aan het allerlaagste beschouwde meerpeil van -0.40 m+NAP , om redenen hieronder toegelicht. Het laagste deel van $F(m)$, zeg voor meerpeilen kleiner dan 0.0 m+NAP , heeft daarbij echter geen fysische betekenis. Al met al bestaat de lijn $F(m)$ uit drie exponentiële trajecten, met ‘rand/knikpunten’ bij meerpeilen -0.40 , 0.05 en 0.40 m+NAP .

Dagenlijn en meerpeilgolven

Alvorens de dagenlijn te bepalen dienen eerst, tenminste in de aanpak uit (Geerse, 2006), meerpeilgolven te worden gemodelleerd. De gemeten meerpeilgolven bleken in de analyses adequaat door trapezia met basisduur $B = 30$ dagen te kunnen worden gemodelleerd, met voor piekmeerpeilen $m > 0.05\text{ m+NAP}$ topduur $b(m)$ van de trapezia gelijk aan 4 dagen. Voor lagere piekwaarden m is een topduur $b(m)$ aangenomen die toeneemt met afnemende m : een lineair verband is aangenomen, met voor $m = -0.40\text{ m+NAP}$ topduur 30 dagen en voor $m = 0.05\text{ m+NAP}$ topduur 4 dagen. De reden voor deze keuze lichten we hieronder toe, maar we melden nu reeds dat de lagere trapezia geen fysische betekenis hebben.

Wanneer $F(m)$ en de meerpeiltrapezia vastliggen, ligt daarmee ook de dagenlijn $D(m)$ vast (en dus ook de direct daarmee samenhangende momentane kans): die kan met een expliciete formule uit deze twee grootheden worden berekend. De zojuist beschreven topduur $b(m)$ bleek in combinatie met de hiervoor beschreven $F(m)$ een dagenlijn op te leveren die in goede overeenstemming was met de metingen, waarbij $D(m)$ volgens de metingen simpelweg volgt door het turven van het aantal meerpeilen dat gemiddeld per jaar niveau m overschrijdt. Samenvattend: de $F(m)$ en de meerpeiltrapezia hebben voor de lagere meerpeilen geen fysische betekenis, maar zorgen er in combinatie met elkaar wel voor dat de door de metingen voorgeschreven dagenlijn $D(m)$, alsmede de direct daarmee samenhangende momentane kans, op de juiste manier worden gerepresenteerd.

¹³ Feitelijk is dit kwantiel, evenals het 10000 jaar-kwantiel, toch iets veranderd, als noodzakelijk gevolg van een andere helling van de frequentielijn. Het 4000 jaar-kwantiel in Hydra-VIJ is 0.98 m+NAP .

Overschrijdingsduur per top

Aldus zijn $F(m)$ en $D(m)$ bepaald. De gemiddelde overschrijdingsduur per top $d(m)$, die indertijd in het afleiden van de meerpeilstatistiek voor Hydra-M een rol speelde (Blaakman et al, 1999), volgt simpelweg door $D(m)$ te delen door $F(m)$, dus $d(m) = D(m)/F(m)$. Het blijkt dat $d(m)$ volgens de nieuwe analyses uit (Geerse, 2006) heel anders uitpakt dan in de oude analyses: de opnieuw bepaalde $d(m)$ leidt tot duren van orde 6 dagen, terwijl daarvoor in de oude analyses 0.5 dag werd aangenomen (zie voor uitleg van $d(m)$ ook paragraaf 4.4). Eveneens blijken de nieuwe analyses tot een dagenlijn te leiden waarbij de kans op de hogere meerpeilen veel groter uitpakt dan in de oude. Er zijn dus nogal wat verschillen tussen de in HR2006 gebruikte meerpeilstatistiek uit Hydra-M en Hydra-VIJ. Zie (Geerse, 2006) voor commentaar op deze verschillen.

Statistische meerpeilgegevens Hydra-VIJ

Nadat $F(m)$ opnieuw is afgeleid kan de in Hydra-VIJ benodigde kansdichtheid $f(m)$ van het piekmeerpeil, geassocieerd met basisduur B, worden bepaald door $F(m)$ te delen door zes. Hiervoor werd al beschreven hoe de topduur $b(m)$ van de trapezia is gekozen. De meerpeilstatistiek voor Hydra-VIJ ligt hiermee vast.

A.4.5 Correlaties

In Hydra-VIJ wordt voor dijkvakken in de Vechtdelta rekening gehouden met onder meer de stochasten Vechtafvoer en IJsselmeerpeil (de IJsselafoer speelt in de probabilistische formules geen rol, maar doet slechts enige invloed gelden via de gebruikte Waquasommen). De Vechtafvoer en het meerpeil worden zoals gezegd gemodelleerd met trapezia. Hiertussen is, zoals getoond in Figuur A-4, een faseverschuiving aangenomen, waarmee verdisconteerd wordt dat beide trapezia gewoonlijk niet hun maxima bereiken op een en hetzelfde tijdstip. Analyses van gemeten afvoer- en meerpeilgolven hebben geleid tot een faseverschil van $\varphi = 3.5$ dagen (meerpeil later dan afvoer).¹⁴ Voor dijkvakken in de IJsseldelta is analoog een faseverschil bepaald tussen IJsselafoer en meerpeil; ook daarvoor is genomen $\varphi = 3.5$ dagen (meerpeil later dan afvoer).

De piekwaarden van de Vechtafvoer, aangeduid als k , en van het meerpeil, aangeduid als m , zijn gecorreleerd. Daarvoor wordt een gezamenlijke kansdichtheid $f(k,m)$ gebruikt, die als marginale verdelingen exact de eerder genoemde kansdichtheden $f(k)$ en $f(m)$ heeft. Om $f(k,m)$ te bepalen is een bepaald correlatiemodel gebruikt. Dit model is zodanig in elkaar gezet dat na zekere transformaties van $f(k)$ en van $f(m)$ de spreiding van de waarnemingen constant wordt verondersteld, met de waarnemingen ‘gespreid’ gelegen rond een rechte lijn. Het is hetzelfde model als beschreven in paragraaf , met dien verstande dat de als conditionele verdeling gebruikte $\lambda(t)$ nu een normale verdeling volgt, in dit geval met standaarddeviatie $\sigma = 1.2$. Voor de correlatie tussen IJsselafoer en meerpeil wordt eenzelfde model gebruikt, eveneens met standaarddeviatie $\sigma = 1.2$.

¹⁴ Gemiddeld gezien komt het faseverschil vrij dicht bij 0, dus ook meerpeilgolven met hun maximum eerder dan het maximum van de Vechtafvoer komen voor. De aangenomen faseverschuiving dient er vooral voor om te zorgen dat afvoeren en meerpeilen niet tegelijkertijd hun maximum bereiken.

A.4.6 Windsnelheid en –richting

Voor de wind worden statistische gegevens van Schiphol gebruikt. De windsnelheid u in Hydra-VIJ is gelijk aan het 12-uurlijkse maximum van de potentiële wind: voor een periode van 12 uur wordt de statistiek van het maximum van de 12 uurwaarden uit de periode beschouwd. De windrichting voor de 12-uurlijkse periode is gelijk aan het vectorieel gemiddelde van de 12 uurwaarden.

In Hydra-VIJ worden als invoer voor de wind overschrijdingskansen $P(U > u | r)$ gebruikt. De grootte $P(U > u | r)$ geeft de overschrijdingskans van niveau u , bij gegeven windrichting r . Deze kansen zijn afkomstig uit bijlage G van (Geerse et al, 2002). Voor de lagere windsnelheden, tot aan herhalingstijd $T = 10$ jaar, zijn ze door turven uit de metingen bepaald, terwijl ze voor de hogere herhalingstijden door een herschaling uit het Rijkooort Weibull-model zijn afgeleid, waarbij voor een vloeiende overgang is gezorgd. (Zie voor een korte beschrijving van het Rijkooort-Weibull-model paragraaf 4.3)

A.5 Meren

Voor de meren worden de hydraulische randvoorwaarden bepaald met het rekenprogramma Hydra-M. Voor het IJssel- en Markermeer worden de HR2006 gelijkgenomen aan de HR2001, met uitzondering van IJburg, waarvoor nieuwe waterstands- en golfberekeningen zijn gemaakt. Dat laatste geldt ook voor het Gooi- en Eemmeer. De meerpeil- en windstatistiek uit de HR2006 zijn echter gelijkgebleven aan die uit HR2001.

In Hydra-M worden voor het IJssel- en Markermeer verschillende statistieken gebruikt (voor IJburg en het Gooi- en Eemmeer wordt de statistiek van het Markermeer gebruikt). We beperken ons in het volgende tot de statistiek van het IJsselmeer. De statistiek voor het Markermeer is analoog bepaald aan die voor het IJsselmeer, maar wel met diverse vereenvoudigingen.

A.5.1 Meerpeilstatistiek IJsselmeer

De meerpeilstatistiek betreft dagwaarden van de meerpeilen; zo'n dagwaarde kan worden gezien als een ruimtelijk gemiddelde over het IJsselmeer (betreft dus geen tijdsgemiddelde). De meerpeilstatistiek uit Hydra-M bestaat uit drie onderdelen:

- Frequentielijn $F(m)$. Deze geeft de overschrijdingsfrequentie van niveau m , in keren per jaar.¹⁵
- Dagenlijn $D(m)$. Deze geeft het gemiddeld aantal dagen per jaar dat niveau m wordt overschreden.
- Duur per top $d(m)$. Deze geeft de gemiddelde overschrijdingsduur dat niveau m wordt overschreden, binnen meerpeilgolven waarvan de piekwaarde niveau m overschrijdt.

In Hydra-M worden alleen de eerste twee grootheden (middels ascii-tabellen) als invoer gebruikt. Van de grootte $d(m)$ wordt alleen in de afleiding van $D(m)$ gebruik gemaakt.

¹⁵ Een jaar betreft feitelijk steeds een winterhalfjaar, dat loopt van oktober t/m maart.

Hoe de diverse onderdelen precies worden bepaald staat beschreven in (Blaakman et al, 1999). Hier volgt een korte weergave.

Gegevens

Voor het meerpeil zijn metingen gebruikt uit de periode 1976 t/m 1995. Vóór 1976 zijn geen metingen beschikbaar, omdat in 1975 de Houtribdijk gereed is gekomen (nadien splitsing Zuiderzee in IJssel- en Markermeer). Om toch te kunnen beschikken over een langere reeks, zijn met het balansmodel BEKKEN synthetische meerpeilen berekend, voor alleen de winterhalfjaren uit de periode 1932 t/m 1975 (vóór 1932 zijn dergelijke gegevens niet te bepalen, omdat pas in 1932 de Afsluitdijk gereed kwam).

In de statistische analyses voor het meerpeil is steeds uitgegaan van winterhalfjaren, omdat bleek dat extreme meerpeilen in de zomermaanden april t/m september vrijwel geen kans van voorkomen hebben. Daarnaast is nog relevant dat ook extreme stormen in de zomermaanden praktisch niet voor kunnen komen. Al met al is de aanname in Hydra-M dat extreme bedreigingen in de zomermaanden niet voorkomen.

Frequentielijn

Voor de lagere meerpeilen, van -0.4 tot 0.36 m+NAP, is $F(m)$ direct bepaald uit de metingen. Voor deze lage meerpeilen is dat goed mogelijk, omdat ze vaak voorkomen. In feite is het genoemde bereik van meerpeilen opgedeeld in een aantal trajecten, waarvoor polynomen zijn gefit, die daarna vloeiend op elkaar zijn aangesloten.

Voor de hogere meerpeilen, namelijk hoger dan 0.20 m+NAP, is om aan $F(m)$ te komen een extreme-waardenanalyse uitgevoerd op basis van jaarextremen. In de extreme-waardenanalyse zijn de jaarmaxima van de meerpeilen gefit met vier verdelingen:

- Pearson-type 3 (Gammaverdeling)
- Gumbelverdeling
- Normale verdeling
- Raleighverdeling

Elk van deze verdelingen levert een overschrijdingsfrequentie $F(m)$ op het bereik 0.20 tot 1.80 m+NAP. Vervolgens is voor iedere m uit dit bereik het gemiddelde van de vier overschrijdingsfrequenties bepaald, resulterend in de overschrijdingsfrequentie $F(m)$ voor de hogere meerpeilen.

Aldus is $F(m)$ bepaald voor de lagere meerpeilen, en tevens voor de hogere meerpeilen. Vervolgens zijn de voor beide trajecten resulterende lijnen vloeiend op elkaar aangesloten.

Dagenlijn en duur per top

Voor de lagere meerpeilen, van -0.4 tot 0.36 m+NAP, die vaak voorkomen, is $D(m)$, net als $F(m)$, direct bepaald uit de metingen. In feite is het genoemde bereik van meerpeilen opgedeeld in een aantal trajecten, waarvoor polynomen zijn gefit, die daarna vloeiend op elkaar zijn aangesloten.

Het hogere deel van $D(m)$ is indirect bepaald: daarbij is eerst de duur per top $d(m)$ bepaald, waarna $D(m)$ dan met behulp van de reeds bepaalde $F(m)$ volgt uit de (eenvoudig te verifiëren) formule:

$$D(m) = F(m)d(m)$$

De grootte $d(m)$ is door middel van een machtsfunctie gefit aan de data, waarbij is aangenomen dat $d(m)$ voor de hogere meerpeilen limiteert naar een duur van 12 uur.

Aldus is $D(m)$ beschikbaar voor zowel een traject van lage als van hoge meerpeilen. Beide trajecten zijn vervolgens vloeiend op elkaar aangesloten bij het meerpeil 0.26 m+NAP, resulterend in één lijn $D(m)$.

Opmerkingen

Hier volgen nog wat opmerkingen over de meerpeilstatistiek.

5. Nadat de analyses waren verricht zijn $F(m)$ en $D(m)$ nog uitgesplitst (op een manier die we hier niet beschrijven) naar de ‘hoofdsectoren’ West (195° - 45°) en Oost (45° - 195°). Het bleek namelijk dat verhoogde meerpeilen relatief vaak samen gaan met westelijke windrichtingen, vandaar dat apart statistieken voor de genoemde hoofdsectoren zijn bepaald.
6. Vervolgens is nog een correctie toegepast op de grootheden $F(m)$ en $D(m)$ voor de lagere meerpeilen < 0.36 m+NAP. Het bleek namelijk dat de met BEKKEN verkregen meerpeilen voor de jaren 1932 t/m 1975 een systematische onderschatting van de peilen te zien gaven. Voor het bepalen van de correcties van $F(m)$ en $D(m)$ is gebruik gemaakt van de gemeten meerpeilen uit 1976 t/m 1995.
7. In deze analyses bleek dat verhoogde meerpeilen relatief vaak samen gaan met verhoogde windsnelheden: windsnelheid en meerpeil zijn dus positief gecorreleerd. Een (flink) deel van die correlatie wordt echter al meegenomen via de, met behulp van de twee hoofdsectoren gemodelleerde, correlatie tussen windrichting en meerpeil. Vandaar dat, bij een gegeven windrichting, de correlatie tussen windsnelheid en meerpeil is verwaarloosd.
8. Bij het herzien van de meerpeilstatistiek voor het IJsselmeer ten behoeve van het probabilistisch model Hydra-VIJ voor de Vechtdelta, is in (Geerse, 2006) gebleken dat de Hydra-M statistiek voor een groot bereik van meerpeilen een onderschatting geeft van $D(m)$ en $d(m)$. Beleidsmatig is er echter voor gekozen om voor de meren voor HR2006 grotendeels vast te houden aan HR2001; vandaar dat de meerpeilstatistiek uit Hydra-M niet is aangepast.

A.5.2 Windstatistiek meren

Voor de windstatistiek wordt in Hydra-M gebruik gemaakt van twee soorten tabellen (Twuiver en Geerse, 1999; Geerse, 1999), die per richting, feitelijk richtingssectoren met breedtes van 30° (richtingen 30° , 60° , ..., 360°), zekere overschrijdingskansen van de windsnelheid bevatten:

- Winterhalfjaartabel. Bij windsnelheid u en richting r kan uit deze tabel worden afgelezen wat de kans is dat gedurende een winterhalfjaar minimaal één uur voorkomt waarvoor tegelijkertijd de windrichting r is en de windsnelheid niveau u overschrijdt.
- Dagtabel. Bij windsnelheid u en richting r kan uit deze tabel worden afgelezen wat de kans is dat gedurende een dag de maximale windsnelheid niveau u overschrijdt, gegeven dat de (representatieve) windrichting gedurende deze dag gelijk is aan r .

Op kleine aanpassingen na is de winterhalfjaartabel afkomstig uit het Rijkoort Weibull-model (zie paragraaf 4.3, of [Rijkoort, 1983] [Twuiver en Geerse, 1999] [Geerse, 1999]). Zeer globaal zit het RW-model, tenminste het deel betreffende de extreme windsnelheden, als volgt in elkaar. In eerste instantie worden twee soorten kansverdelingen voor uurlijkse waarnemingen gebruikt: een Weibull-verdeling voor uren die overdag vallen, en een gemodificeerde Weibull-verdeling (strikt genomen geen echte Weibull-verdeling) voor nachtelijke uren. Bovendien wordt ook een opsplitsing gemaakt in 2-maandelijke seizoenen: voor ieder seizoen worden apart parameters voor de (gemodificeerde) Weibull-verdelingen bepaald.

De kansverdelingen uit het RW-model voor extreme windsnelheden, waarin voor de respectievelijke richtingen jaarmaxima worden beschouwd, hebben een heel andere vorm dan de (gemodificeerde) Weibull-verdelingen voor de uurlijkse waarnemingen. De laatstgenoemde verdelingen zijn ook niet eenvoudig in die voor de jaarmaxima om te zetten, omdat opeenvolgende uurwaarden een sterke *autocorrelatie* vertonen. Rijkoort heeft een manier bedacht om met deze autocorrelaties om te gaan. Daartoe voert hij zogenoemde windsnelheids- en windrichtingsafhankelijke *persistenties* $q_{u,r}$ in, die losjes gezegd zó geïnterpreteerd kunnen worden dat opeenvolgende uren worden ingedeeld in ‘blokken’ met een duur $q_{u,r}$. De verdeling van de jaarmaxima wordt vervolgens, ten minste in goede benadering, gevonden door op een bepaalde manier, rekening houdend met de persistenties, de verdelingen van de uurlijkse waarnemingen met elkaar te vermenigvuldigen. Terzijde: als gevolg van deze handelwijze worden de jaarmaxima uit het RW-model, behorend bij de respectievelijke windrichtingen, *niet gegeven door Weibull-verdelingen*, hoewel af en toe in sommige rapporten dat wel wordt beweerd.

Nog een punt is hier van belang. De persistenties zijn bedoeld als een correctie voor de autocorrelatie tussen opeenvolgende uren. In het RW-model worden ze echter ook gebruikt als een soort ‘staartcorrectie’ van de (gemodificeerde) Weibull-verdelingen voor de uurlijkse waarnemingen. Het blijkt namelijk dat de staarten van deze verdelingen te snel afnemen met toenemende windsnelheid, waardoor de overschrijdingskansen voor de hogere windsnelheden worden onderschat, vandaar dat een correctie nodig is. Vanwege dat laatste blijken de persistenties uit het RW-model voor hoge windsnelheden kleiner dan 1 te worden, hoewel ze theoretisch altijd minimaal gelijk aan 1 zouden moeten zijn.

Tot zover de winterhalfjaartabel. De dagtabel is door een soort van herschaling uit de winterhalfjaartabel bepaald, op een manier die hier verder niet beschreven wordt, zie voor details (Geerse, 1999; Twuiver en Geerse, 1999). We merken slechts op dat de dagtabel geen onderdeel uitmaakt van het RW-model.

A.6 Kusten

A.6.1 Inleiding

De hydraulische randvoorwaarden van de kust worden bepaald met het rekenprogramma HYDRA-K. Een belangrijke invoer van HYDRA-K is de marginale statistiek van wind, de waterstand en golven (op diep water). De statistieken van wind, waterstand en golven zijn afgeleid als functie van de windrichting en ook als zodanig toegepast bij het berekenen van de randvoorwaarden. De windrichting is opgedeeld in 12 sectoren van elk 30 graden. Voor elke sector zijn apart statistieken afgeleid. De statistiek is gebaseerd op maxima van stormen waarvan de dominante windrichting toebehoort aan de bewuste sector. De statistiek wordt gekwantificeerd als een *gecombineerde* kans of frequentie. Bijvoorbeeld:

“De combinatie van een windrichting uit sector 9 (255° – 285°) en een windsnelheid van 27 m/s of hoger komt bij locatie Vlissingen gemiddeld eens per 100 jaar voor”

Behalve de windrichtingsafhankelijke statistiek is voor alle variabelen ook de omni-directionele statistiek beschikbaar. De omni-directionele statistiek volgt direct uit de windrichtingsafhankelijke statistiek. Voor een gegeven waterstand of windsnelheid is de omni-directionele overschrijdingsfrequentie gelijk aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector.

Voor de wiskundige beschrijving van overschrijdingsfrequenties van de verscheidene maten is gekozen voor een conditionele Weibull-verdeling (RIKZ, 1995b). De keuze voor deze verdelingsfunctie komt voort uit een onderzoek naar *golf*parameters in (RIKZ, 1995b). Uit pragmatische overwegingen¹⁶ is deze keuze overgenomen voor de windsnelheid en de waterstand. Deze verdelingsfunctie is voor elke windrichtingssector als volgt geformuleerd:

$$F(X > x) = \rho \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\sigma} \right)^\alpha + \left[\frac{\omega}{\sigma} \right]^\alpha \right\} ; x \geq \omega$$

waarin:

- F = overschrijdingsfrequentie;
- X = de variabele waarvoor de verdelingsfunctie is afgeleid;
- x = mogelijke realisatie van variabele X ;
- α = vorm- of krommingparameter;
- σ = schaalparameter;
- ω = drempelwaarde, waarboven de statistieken zijn afgeleid; en
- ρ = overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω .

¹⁶ Hiermee doelen we op het zoveel mogelijk compact en overzichtelijk houden van de programmatuur van HYDRA-K

A.6.2 Wind

Voor de statistiek van de wind maakt HYDRA-K gebruik van de resultaten van een onderzoek van het KNMI uit 1983, het zogenaamde "Windklimaat van Nederland", (KNMI, 1983). In die studie is frequentieanalyse uitgevoerd met het zogenaamde "Rijkoort-Weibull-model" dat gebaseerd is op een Weibull-verdeling met 2 parameters (zie paragraaf 4.3).

De Weibull-verdeling in het "Rijkoort-Weibull-model" verschilt van de conditionele Weibull-verdeling die voor HYDRA-K wordt toegepast. Daarom is de conditionele Weibull-verdeling gefit aan de uitkomsten volgens de het Rijkoort-Weibull-model van (KNMI, 1983).

A.6.3 Waterstand

Basispeilen

Ook voor de waterstand gebruikt HYDRA-K windrichtings-afhankelijke statistiek, beschreven met de conditionele Weibull-verdeling. Bij het afleiden van deze verdelingen is rekening gehouden met de zogenaamde "basispeilen" (RIKZ, 1995). Dat zijn waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 per jaar, afgeleid uit de omni-directionele statistiek van de waterstand. Ten behoeve van de consistentie is de windrichtings-afhankelijke statistiek zó gecorrigeerd dat na omrekening naar omnidirectionele statistiek de basispeilen exact worden gereproduceerd. Voor een gegeven waterstand, zoals het basispeil, dient de omni-directionele overschrijdingsfrequentie namelijk gelijk te zijn aan de optelsom van de frequenties per windrichtingssector. Na het afleiden van de verdelingsfuncties per windrichtingssector en omni-directioneel is dat echter in de regel slechts bij benadering het geval. Ten behoeve van de consistentie wordt daarom voor de verschillen gecorrigeerd.

De basispeilen zijn in eerste instantie in 1993 afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, Den Helder, Harlingen, en Delfzijl (RIKZ, 1993a). In 1995 zijn de basispeilen voor de hele Nederlandse kust afgeleid (RIKZ, 1995a). Het resultaat bestaat uit een aantal ruimtelijke contourlijnen die punten van gelijke basispeilen verbinden. In (RIKZ, 1995) is de gegeneraliseerde Pareto-verdeling (GPV) toegepast. Vervolgens is gecontroleerd of de afgeleide statistiek in overeenstemming is met de fysica door middel van een fysisch modelonderzoek (RIKZ, 1993b), waarin simulaties van "superstormen" zijn uitgevoerd met het 2-dimensionele waterbewegingsmodel WAQUA. De simulaties leverden extreme waterstanden in de diverse stations op die vervolgens weer onderling vergeleken zijn. Op basis van deze vergelijking zijn de basispeilen aangepast opdat het ruimtelijke verloop van de peilen langs de kustlijn meer in overeenstemming is met de fysica.

Windrichtingsafhankelijke statistiek

De statistiek van de waterstand is in eerste instantie per windrichting afzonderlijk afgeleid. Vervolgens is een lopend gemiddelde (filter) over de windrichtingen toegepast. Daarmee zijn niet-significante verschillen weggewerkt tussen de richtingen onderling die meer door toevalligheden bepaald zijn dan een echte fysische basis hebben. Tenslotte is de windrichtingsafhankelijke statistiek, zoals beschreven in de vorige paragraaf, afgestemd op de omnidirectionele statistiek en, daarmee samenhangend, de basispeilen. Samenvattend zijn de volgende drie stappen doorlopen:

4. Eerste selectie van parameterwaarden per windrichting;
5. Middeling over windrichtingen;
6. Vereffening met basispeil.

In het vervolg van deze paragraaf werken we de eerste twee stappen in meer detail uit. De methode is ontwikkeld in de studie van (RIKZ, 2000).

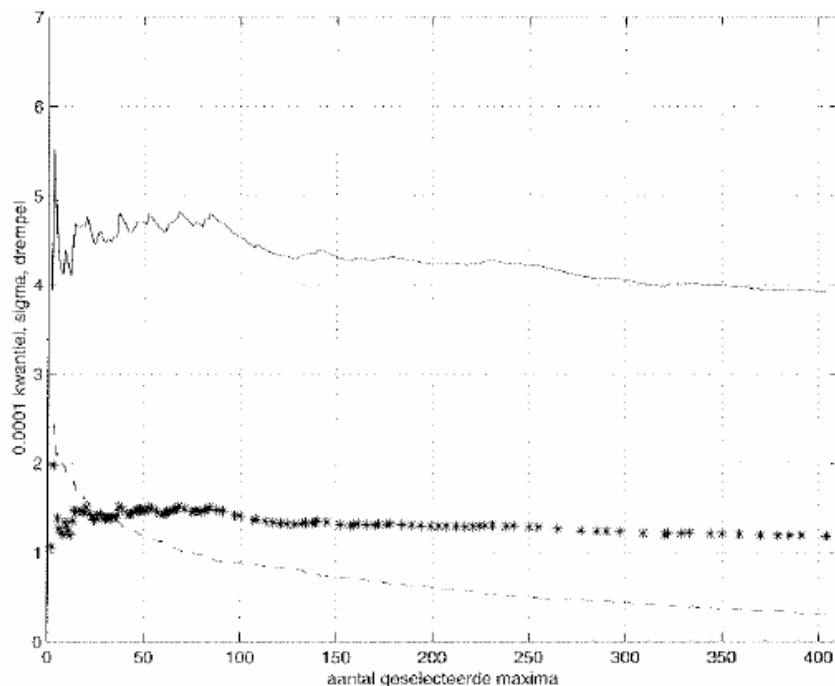
Stap 1: Eerste selectie van parameterwaarden

De studie van (RIKZ, 2000) richtte zich op 11 meetstations: Vlissingen, Hansweert, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Terschelling West, Den Oever, Harlingen, Lauwersoog, Delfzijl en Huibertgat. De windrichtingsafhankelijke statistiek is afgeleid op basis van een reeks van 16 jaar (1981 t/m 1996).



Figuur A-5 Waterstandstations

Voor elk station en voor elke windrichtingssector van 30° is een Weibull-verdeling afgeleid op basis van de metingen. De conditionele Weibull-verdeling bevat in totaal vier parameters: α , σ , ω en ρ (zie paragraaf A.6.1). De keuze van parameters α , ω en ρ is bepaald op basis van een visuele beoordeling van zogenaamde “drempelfiguren”, waarvan Figuur A-6 een voorbeeld geeft. Deze figuren geven de belangrijkste uitkomsten van de fitprocedure als functie van het aantal stormmaxima dat voor de fitprocedure is geselecteerd. Op basis van deze drempelfiguren is in de studie van (RIKZ, 2000) onderzocht bij welke drempelwaarden de Weibull-verdeling een goede fit van de stormmaxima geeft. Mede op basis daarvan is een geschikte waarde van de drempelwaarde gekozen. Een ander belangrijk criterium was dat het verloop van het 10^{-4} -kwantiel als functie van het aantal stormmaxima “stabiel” moet zijn. Met andere woorden: de drempelwaarde is zó gekozen dat een kleine aanpassing van de drempelwaarde nauwelijks effect heeft op het resulterende 10^{-4} -kwantiel. In de figuur is dit het gebied waar de doorgetrokken lijn een relatief vlak, vrijwel horizontaal, verloop heeft.



Figuur A-6 10^{-4} kwantiel (doorgetrokken lijn), drempelwaarde ω (stippellijn) en schaalparameter σ als functie van het aantal geselecteerde metingen waarop de Weibull-verdeling is gefit (bron: RIKZ, 2000).

Na uitvoering van bovenstaande analyse ligt de waarde van α , ρ en ω vast voor alle stations en alle windrichtingen. Dat betekent dat de fitprocedure vervolgens niets anders behelst dan het kiezen van de optimale waarde van schaalparameter σ .

Stap 2: Middelen over windrichtingen

In (RIKZ, 2000) is vervolgens per locatie een onderlinge vergelijking gemaakt tussen de resulterende 10^{-4} -kwantielen voor de diverse windrichtingssectoren. Bij alle locaties kwam hetzelfde beeld naar voren: de waarde is relatief laag bij zuidwestelijke richtingen, neemt toe met een top in de buurt van de noordwestelijke windrichting om daarna snel weer af te nemen (oostelijke richtingen). Er bleek echter ook nogal wat ruis uit de resultaten, d.w.z. niet-significante verschillen tussen de richtingen die meer door toevalligheden bepaald zijn

dan een echte fysische basis hebben. Om het effect van deze toevalligheden te verminderen is een filter toegepast over de windrichtingen. Dit is een soort van lopend gemiddelde waarmee het 10^{-4} kwantiel als functie van de windrichting een “gladder” verloop krijgt. Daarbij is het volgende filter toegepast:

$$X(i) = (X(i-1) + 2X(i) + X(i+1)) / 4$$

waarbij i het volgnummer is van de windrichtingssector en X de waterstand bij die sector. De filterprocedure resulteert in nieuwe 10^{-4} -kwantielen die niet meer aan de in stap 1 berekende verdelingsfuncties voldoen. De verdelingsfuncties zijn daarom aangepast. In eerste instantie is daartoe parameter ρ (de overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde ω) aangepast. Vervolgens wordt schaalparameter σ weer bepaald op basis van de optimale fit. De overige parameters blijven onveranderd.

A.6.4 Golven

Omni-directionele statistiek

In het onderzoek van (WL, 2004a) is de golfstatistiek afgeleid voor 9 stations op relatief diep water langs de Noordzeekust, op basis van stormmaxima (Peaks-Over-Threshold). in de periode van 1979 tot 2002. Net als voor de waterstand is daarbij eerst een keuze gemaakt voor vormparameter α op basis van “drempelfiguren” zoals Figuur A-6. De aldus gekozen waarde van α is sterk locatieafhankelijk. Bijvoorbeeld voor de significante golfhoogte H_{m0} varieert de gevonden waarde van α tussen ca. 1.9 en 3.3 voor de 9 stations langs de Noordzeekust. Gedeeltelijk is de variatie van deze parameter afhankelijk van toevalligheden (“statistische ruis”), maar de verschillen zijn zo significant dat er ook een fysische verklaring bestaat. Zo is bijvoorbeeld de waarde van α voor de noordelijke stations lager dan voor de zuidelijke stations, als gevolg van het feit dat golven in de noordelijke stations in de regel hoger zijn tijdens stormcondities.

In (WL, 2004a) is een methode ontwikkeld om de (ongewenste) statistische toevalligheden in de berekende waarde van α zoveel mogelijk te reduceren, gebruik makend van een eenvoudige beschrijving van de fysica. De methode vertoont een sterke vergelijking met de zogenoemde “Regional Frequency Analysis” (zie paragraaf 3.3.2). De factoren die van invloed zijn op de ontwikkeling van het golfveld zijn met name de strijklengte en de waterdiepte. Daarom is de waarde van α gerelateerd aan de volgende functie:

$$\alpha = aL^b D^c$$

waarin:

L	=	representatieve (strijk-)lengtemaat (= geschatte afstand tot Doggersbank in km);
D	=	waterdiepte (m); en
a, b, c	=	functieparameters, af te leiden op basis van een fitprocedure.

Omdat de fit voor 9 stations wordt afgeleid heeft een afwijkende waarde van α in één van de stations mogelijk vrij veel effect op de uiteindelijke fit. Met andere woorden: het eindresultaat is waarschijnlijk vrij gevoelig voor afwijkingen. Om deze gevoeligheid te reduceren is gebruik gemaakt van een andere fysische eigenschap van het systeem onder stormcondities: golfhoogte en golfperiode zijn sterk gecorreleerd. Uitgaande van volledige afhankelijkheid hebben (Den Heijer et al., 2005) aangetoond dat er een lineair verband bestaat tussen de α -waarden van verschillende golfparameters (H_{m0} , T_{m02} , $T_{m-1,0}$ en T_p). Daarom is in (WL, 2004a) één fit afgeleid van bovenstaande vergelijking op basis van de α -waarden van alle vier de golfparameters. Met een fit op basis van 36 waarden (4 golfparameters keer 9 stations) is de gevoeligheid voor afwijkende waarden namelijk kleiner dan voor 9 waarden. Om deze fit af te kunnen leiden zijn de α -waarden eerst herschaald zodat de verdelingen van de vier afzonderlijke golfparameters onderling vergelijkbaar zijn.

Na de vaststelling van parameter α wordt voor elke locatie een nieuwe Weibull-verdeling afgeleid. In de eerste plaats moet (wederom) een keuze gemaakt worden voor het aantal stormmaxima dat bij de fit-procedure wordt gehanteerd. Uiteindelijk is, enigszins arbitrair, gekozen voor 200 stormmaxima. In (WL, 2004a) is aangetoond dat de resultaten bij deze keuze niet veel afwijken van de resultaten bij een keuze van bijvoorbeeld 100 stormmaxima. Met de keuze van het aantal stormmaxima ligt de drempelwaarde, ω , en de overschrijdingsfrequentie van de drempelwaarde, ρ , gelijk vast. Dat betekent dat schaalparameter σ de enige vrijheidsgraad is bij de af te leiden fit.

Windrichtingsafhankelijke statistiek

De statistiek per windrichtingssector is als volgt bepaald (RIKZ, 2000; WL, 2004a):

5. Indelen van alle meetwaarden (dus niet alleen stormmaxima) in windrichtingssectoren.
6. Afleiden van een Weibull-verdeling voor elke sector.
7. Corrigeren van de 10^{-4} -kwantielen van elke sector opdat het geheel in overeenstemming is met de omnidirectionele statistiek.
8. Opnieuw afleiden van een Weibull-verdeling voor elke sector waarbij geldt dat deze de gecorrigeerde 10^{-4} -kwantiel-waarde oplevert.



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

