

Opdrachtgever:
Deltares

Belastingmodellen WTI2017

**Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele
aanpassingen aan Hydra-Ring**

Auteur: Chris Geerse

Samenvatting

In het kader van WTI2017 worden productieberekeningen uitgevoerd voor de watersystemen bovenrivieren, benedenrivieren en IJssel- en Vechtdelta, voor zover deze systemen worden beïnvloed door te nemen maatregelen (bijvoorbeeld Ruimte voor de Rivier) in de periode tot en met 2017.

Voorafgaand aan de uitvoering van de productieberekeningen dient duidelijk te zijn welke aansturing gehanteerd dient te worden voor de productieberekeningen. Het gaat hierbij om de aansturing in relatie tot de te hanteren stochasten in het belastingmodel zoals beoogd in het kader van Hydra-Ring [Roscoe et al, 2012]. Op dit moment is er nog enige onzekerheid ten aanzien van de invulling van het belastingmodel, dat wil zeggen: vanwege de overstap naar overstromingskansen dient het bestaande belastingmodel wellicht op detailpunten aangepast te worden.

Door Deltares is aan HKV gevraagd enkele onderwerpen nader te onderzoeken. Die betreffen zaken als onzekerheid afvoerverdeling op de splitsingspunten, al of niet stochastisch meenemen van de afvoergolfvorm te Borgharen, faalmodi van Europoortkering en Haringvlietsluizen, en correlatiemodelleringen tussen rivieren (waaronder die tussen Rijn en Maas). Daarbij gaat het om het op hoofdlijnen in kaart brengen van de mogelijkheden van het uitbreiden/vereenvoudigen van het belastingmodel en om de consequenties voor de benodigde productieberekeningen.

In dit rapport wordt hiervan verslag gedaan. Daarbij is aandacht geschonken aan de volgende aspecten:

- Wat zijn de belangrijkste opties?
- Wat is de verwachte invloed (ruwe schatting) van een beschouwde optie op het MHW?¹
- Wat zijn de argumenten voor/tegen een optie, in relatie tot het geschatte effect op het MHW en de haalbaarheid i.v.m. extra productiesommen?

Het hoofddoel van deze studie is om per onderdeel een advies te geven voor de behandeling in de WTI2017, inclusief de belangrijkste argumenten daarvoor. Deze adviezen, alsmede de belangrijkste conclusies voor de genoemde onderdelen, zijn gezien het grote aantal onderdelen niet kort samen te vatten. Vandaar dat wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

Wel worden hier twee belangrijke conclusies/adviezen genoemd, namelijk dat het de moeite loont de onzekerheid op de splitsingspunten op te nemen in Hydra-Ring, en dat het zinvol is om – op het traject Borgharen tot Lith – de (breedte van de) golfvorm te Borgharen stochastisch mee te nemen. Dat laatste leidt tevens tot een andere werklijn (overschrijdingsfrequentie) van de afvoer te Lith.

¹ Het MHW (Maatgevende Hoogwaterstand) voor een beschouwde locatie is gelijk aan de waterstand die optreedt met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de normfrequentie.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergronden	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Leeswijzer	2
2	Onzekerheid afvoerverdeling op de splitsingspunten	3
2.1	Eerder onderzoek	3
2.2	Probabilistische formules voor het verwerken van de onzekerheid	5
2.2.1	Model	6
2.2.2	Bepalen marginale kansverdelingen van K_1 t/m K_4 (dijkvakniveau)	7
2.2.3	Bepalen overschrijdingskansen van ringdelen	8
2.3	Gevoeligheidsmodel	11
2.3.1	Parameterkeuzes in het model	11
2.3.2	Resultaten op dijkvakniveau	12
2.3.3	Resultaten voor ringdelen	16
2.4	Aanvullende zaken	18
2.4.1	Eventuele implementatie en benodigde productiesommen	18
2.4.2	Eventuele inconsistenties tussen HR voor boven- en benedenrivieren	19
2.4.3	Advies	19
3	Golfvorm als stochast	21
3.1	Formules	21
3.1.1	Berekening van de overschrijdingskans in de basisduur	21
3.1.2	Berekening van de overschrijdingsfrequentie uit Hydra-Zoet	23
3.1.3	Berekening van overschrijdingskans voor het winterhalfjaar volgens aanpak uit Hydra-Ring	24
3.1.4	Variabele d als continue grootheid	24
3.2	Golfvormgenerator	24
3.3	Opschalingsmethode en duuranalyses	27
3.3.1	Algemene opmerkingen over de opschalingsmethode	27
3.3.2	Opschaling van gemeten golven	27
3.3.3	Duuranalyses voor relatief niveau $v = 0.85$	29
3.4	Keuze modelparameters	33
3.4.1	Overschrijdingsfrequentie Borgharen	33
3.4.2	Locatiegegevens	33
3.4.3	Keuzes voor referentiewaterstand	34
3.4.4	Keuzes voor topvervlakking	34
3.5	Resultaten	40
3.5.1	Algemeen	40
3.5.2	Bespreking van resultaten voor Lith	41
3.5.3	Bespreking resultaten Roermond, Boxmeer en overige Maaslocaties	44
3.6	Conclusies en aanbevelingen	45
3.7	Eventuele implementatie en productiesommen	45
3.8	Opmerkingen over de statistiek te Lith	46
3.9	Advies	46

4	Stormvloedkeringen benedenrivieren	47
4.1	Haringvlietsluizen	47
4.1.1	Effecten op MHW's van niet-sluiten en niet-openen van de Haringvlietsluizen	47
4.1.2	Formules voor het belastingmodel en benodigde productiesommen	49
4.1.3	Benodigde productiesommen	50
4.1.4	Recent verkregen informatie	51
4.1.5	Advies	51
4.2	Meenemen van onzekerheid in de faalkans van de Europoortkering	52
4.2.1	Aanpak en formules	52
4.2.2	Resultaten voor MHW-effecten	53
4.2.3	Advies	58
4.3	Additionele faalmodi Europoortkering	59
4.3.1	Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering	59
4.3.2	Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm	60
4.3.3	Partieel falen van de Maeslantkering	60
4.3.4	Advies	61
5	Correlaties	63
5.1	Correlatie tussen Rijnafvoer Lobith en Maasafvoer Lith	63
5.1.1	De 50%-lijnen uit de huidige aanpak	63
5.1.2	Het 1-1 verband, als vervanging van de 50%-lijnen	64
5.1.3	Consequenties voor implementatie en productiesommen	66
5.1.4	Advies en aanbeveling	66
5.2	Correlatie tussen IJsselafvoer Olst en Vechtafvoer Dalfsen	66
5.2.1	Modellering van de correlatie in de huidige situatie	66
5.2.2	Advies	67
5.3	Correlatie tussen afvoeren Maas, Dommel en Aa	67
5.3.1	Timing afvoergolven Maas enerzijds en Dommel en Aa anderzijds	67
5.3.2	Advies	68
6	Conclusies en advies	69
6.1	Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten	69
6.2	Golfvorm te Borgharen als stochast	70
6.3	Stormvloedkeringen	70
6.3.1	Haringvlietsluizen	70
6.3.2	Onzekerheid faalkans niet-sluiten Europoortkering	71
6.3.3	Advies faalmodi Europoortkering	72
6.4	Correlaties	73
6.4.1	50%-lijnen vervangen door 1-1 verband Rijn en Maas	73
6.4.2	50%-lijn voor Vecht en IJssel	73
6.4.3	Timing afvoergolven Maas en Dommel/Aa	73
	Referenties	75
	Bijlage A Gecombineerde overschrijdingskans ringdeel langs Waal en Lek	79
	Bijlage B Keuzes topvervlakking te Roermond	81
	Bijlage C Keuzes topvervlakking te Boxmeer	83

1 Inleiding

1.1 Achtergronden

In het kader van WTl2017 worden productieberekeningen uitgevoerd voor de watersystemen bovenrivieren, benedenrivieren en IJssel- en Vechtdelta, voor zover deze systemen worden beïnvloed door te nemen maatregelen (bijvoorbeeld Ruimte voor de Rivier) in de periode tot en met 2017.

Voorafgaand aan de uitvoering van de productieberekeningen dient duidelijk te zijn welke aansturing gehanteerd dient te worden voor de productieberekeningen. Het gaat hierbij om de aansturing in relatie tot de te hanteren stochasten in het belastingmodel zoals beoogd in het kader van Hydra-Ring [Roscoe et al, 2012]. Op dit moment is er nog enige onzekerheid ten aanzien van de invulling van het belastingmodel, dat wil zeggen: vanwege de overstap naar overstromingskansen dient het bestaande belastingmodel wellicht op detailpunten aangepast te worden.

Teneinde een beeld te krijgen van mogelijke veranderingen in het belastingmodel welke invloed kunnen hebben op de uit te voeren productieberekeningen, hebben bij Deltares een aantal overleggen plaats gevonden. Tijdens deze overleggen is op basis van kennis en ervaring besproken welke toevoegingen en/of vereenvoudigingen van het belastingmodel zinvol en praktisch haalbaar zouden zijn. Centrale vraag daarbij was of er parameters zijn die (mede) bepalend zijn voor de hydraulische belasting, waarvoor geldt dat:

- de onzekerheid/natuurlijke variabiliteit in WTl2017 probabilistisch zou moeten worden meegenomen,
- die extra zijn t.o.v. de referentie-aanpak (WTl2011),
- die extra productieberekeningen-fysica vergen.

Naar aanleiding hiervan is een drietal onderwerpen naar voren gekomen waarvoor duidelijk dient te worden of, en zo ja hoe, deze meegenomen kunnen worden in het belastingmodel voor WTl2017 (dus extra ten opzichte van WTl2011). Die onderwerpen zijn:

1. Rivierafvoeren,
2. Stormvloedkeringen Europoort en Haringvlietsluizen,
3. Correlaties.

Door Deltares is aan HKV gevraagd deze onderwerpen nader te onderzoeken. Daarbij gaat het om het op hoofdlijnen in kaart brengen van de mogelijkheden en consequenties van het uitbreiden/vereenvoudigen van het belastingmodel, waarbij in het bijzonder van belang is wat, bij een gewijzigde aanpak, de consequenties zijn voor de uit te voeren productieberekeningen.

1.2 Doelstelling

De doelstelling bestaat uit het nader onderzoeken van de drie hiervoor genoemde onderwerpen (rivierafvoeren, stormvloedkeringen en correlaties).

Bij het behandelen van de onderwerpen zal, conform de offerte-aanvraag, aandacht worden geschonken aan de volgende aspecten:

- Wat zijn de belangrijkste opties?
- Wat is de verwachte invloed (ruwe schatting) van een beschouwde optie op het MHW? Het MHW (Maatgevende Hoogwaterstand) voor een beschouwde locatie is gelijk aan de waterstand die optreedt met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de normfrequentie.
- Wat zijn de argumenten voor/tegen een optie (in relatie tot het geschatte effect op het MHW en de haalbaarheid i.v.m. extra productiesommen)?

Uiteindelijk doel is om per onderdeel een voorstel te geven voor de behandeling in WTI2017, inclusief de belangrijkste argumenten daarvoor.

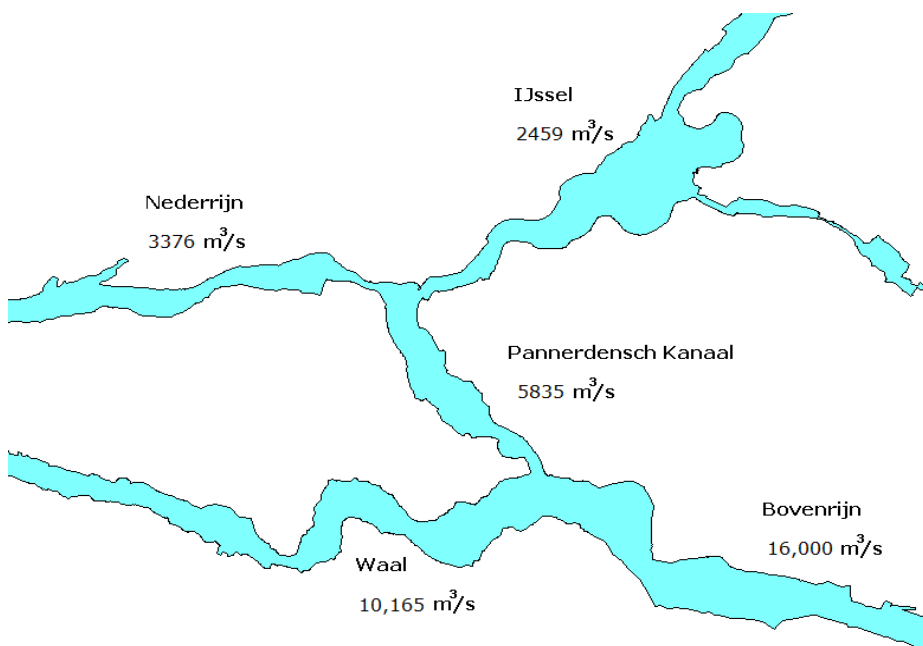
1.3 Leeswijzer

Het onderwerp "afvoeren" valt uiteen in twee deelonderwerpen, namelijk onzekerheid van de afvoerverdeling op de splitsingspunten en de stochastische behandeling van de golfvorm van de afvoer (respectievelijk hoofdstuk 2 en 3). Daarna worden de stormvloedkeringen in de benedenrivieren behandeld (hoofdstuk 4) en de correlaties in hoofdstuk 5. Tot slot worden in hoofdstuk 6 de conclusies en adviezen voor de WTI2017 gegeven.

2 Onzekerheid afvoerverdeling op de splitsingspunten

In dit hoofdstuk worden de splitsingspunten Pannerdensche Kop en IJsselkop beschouwd. De vraag die moet worden beantwoord, is of onzekerheden in de afvoerverdelingen een significante invloed hebben op de MHW's. Bovendien dient advies te worden gegeven over het al of niet opnemen van deze onzekerheden in Hydra-Ring, en moeten eventuele consequenties voor de productiesommen worden aangegeven.

Zie voor een weergave van de splitsingspunten Figuur 2-1. De aangegeven afvoerverdeling, hier voor een Rijnafvoer van 16,000 m³/s te Lobith, stemt overeen met de beleidsmatig voor de HR2006 gehanteerde afvoerverdeling.²



Figuur 2-1 Weergave van de splitsingspunten, met de afvoerverdeling volgens de HR2006, bij een Rijnafvoer van 16,000 m³/s.

2.1 Eerder onderzoek

In het verleden zijn verschillende studies uitgevoerd naar de onzekerheid in de afvoerverdeling, voor de splitsingspunten Pannerdensche Kop en IJsselkop:

1. HKV: "Nauwkeurigheidsanalyse Ruimte voor Rijntakken", [Duits en Van Noordwijk, 1999].
2. Schropp: "Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater", [Schropp, 2002].
3. Ogink: "Nauwkeurigheids toetspeilen", [Ogink, 2003].
4. Ogink: "Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn", [Ogink, 2006].

² Ten minste, dat is mijn indruk. De informatie over de afvoerverdeling in de diverse rapporten komt af en toe verwarrend op mij over.

5. Paarlberg et al: "Onzekere afvoerverdeling en hoogwaterstanden rondom de Pannerdensch Kop. Invloed van onzekerheid in Bovenrijn-afvoer en bodemdynamiek", [Paarlberg et al, 2010].

Met name referentie 4 is nuttig, omdat deze referentie ten eerste een review geeft van de referenties 1 t/m 3, en daarnaast een schatting voor de onzekerheid geeft voor beide splitsingspunten, in termen van een standaarddeviatie σ . Referentie 5 geeft het meest recente onderzoek; die referentie levert echter alleen informatie over Pannerdensch Kop, en bovendien wordt geen σ gegeven voor de spreiding in de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop.

Voor de voorliggende studie worden de getallen volgens Tabel 2-1 gebruikt. Wat de gegevens volgens [Ogink, 2006] betreft het volgende. Deze referentie geeft voor de onzekerheid van de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop een geschatte σ van 130 m³/s tot 180 m³/s. In plaats van één enkele waarde wordt dus een range gegeven (de aangegeven range betreft als het ware de onzekerheid in de onzekerheid). In het voorliggende onderzoek worden de onder- en bovengrens van deze range gebruikt. Ook voor IJsselkop is sprake van een range met een onder- en bovengrens.

Standaarddeviatie σ , m ³ /s			
	Range σ volgens [Ogink, 2006]		Extra hoge variant
	ondergrens	bovengrens	(willekeurig gekozen)
Pannerdensch Kop	130	180	230
IJsselkop	85	100	115

Tabel 2-1 Gebruikte waarden voor de standaarddeviaties op de splitsingspunten.

We merken verder op dat de waarden volgens de bovengrens (180 m³/s en 100 m³/s) ook zijn gebruikt in de Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, zie het deelrapport "Analyse watersysteem: Gevoeligheidsanalyse" uit [Systeemanalyse RMM, 2009]. In dat rapport worden echter integraal waterstanden met de aangegeven σ verhoogd, i.p.v. dat het effect van onzekerheid op probabilistische wijze wordt verwerkt met een kansverdeling voor de onzekerheid, zoals dat in de voorliggende studie wordt gedaan (in paragraaf 2.2).

Verder merken we nog op dat referentie 5 de mogelijkheid openlaat dat de bovengrenzen van [Ogink, 2006] toch wat aan de lage kant zijn, wat te maken heeft met de onzekerheid in de mate van duinvorming op de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Volgens berekeningen met Delft3D kan het zijn dat bij smalle afvoergolven (spitse golven) de ruwheid van het Pannerdensch Kanaal heel laag blijft, waardoor deze tak veel afvoer gaat trekken. Als extra variant t.o.v. [Ogink, 2006] worden in de voorliggende studie daarom ook grotere waarden van de σ 's gebruikt; zie de getallen in de laatste kolom van Tabel 2-1. Die getallen zijn t.b.v. deze studie nogal willekeurig gekozen.

Tot slot nog de opmerking dat de getallen uit de tabel representatief zijn voor *extreme* afvoeren rondom de maatgevende afvoer, waarbij het winterbed "volop" meestroomt. Voor minder extreme afvoeren kan de onzekerheid anders zijn, terwijl voor nog lagere afvoeren (zomerbedafvoeren), die onzekerheid weer anders kan zijn. In principe zou nader kunnen worden onderzocht hoe de onzekerheid als functie van de afvoer zich gedraagt. Ons inziens is het met het oog op Hydra-Ring niet nodig dat te doen. Voor de veiligheid zijn met name de flink verhoogde en extreme afvoeren van belang. Uiteraard kunnen bedreigende situaties ook voorkomen bij lagere afvoeren, maar alleen in combinatie met stormvloed en/of

windstormen, in welk geval een (onzekere) afvoerverandering gewoonlijk minder invloed heeft op de waterstand dan in het extreme afvoerbereik.

Zie als toelichting daarop Tabel 2-2. Het is duidelijk dat een afvoerverandering vooral voor de door de afvoer gedomineerde locatie Gorinchem sterk doorwerkt op de waterstanden, terwijl een afvoerverandering voor de overige locaties (gedomineerd door *combinaties* van zee en afvoer) veel minder doorwerkt. Dat voor de lagere afvoeren eventueel een iets andere σ gebruikt zou moeten worden, is dan niet zo belangrijk voor de resultaten: voor locaties waar de afvoer dominant is, dient σ te zijn afgestemd op extreme afvoeren (wat met de keuzes uit Tabel 2-1 het geval is), terwijl voor locaties waar ook de zee van invloed is, de keuze van σ minder nauw steekt.

afvoer Lobith m ³ /s	Waterstanden voor locaties, gelegen nabij:			
	Rotterdam	Dordrecht	Moerdijk	Gorinchem
	m+NAP	m+NAP	m+NAP	m+NAP
4000	1.34	1.02	0.68	1.76
6000	1.40	1.23	0.89	2.74
13000	1.63	1.80	1.43	5.06
16000	1.75	1.99	1.72	5.84

Tabel 2-2 Waterstanden als functie van de afvoer te Lobith, bij windsnelheid 0 m/s, voor open keringen en opzet 0 m. Getallen afkomstig uit TMR2006-database voor de benedenrivieren.

2.2 Probabilistische formules voor het verwerken van de onzekerheid

In deze paragraaf worden de formules gegeven voor het verwerken van de onzekerheid op de splitsingspunten. Daarbij worden alleen afvoerstochasten beschouwd, vanuit de gedachte dat andere stochasten als zeestanden, meerpeilen e.d. hier geen significante invloed hebben. N.B. Invloed van de wind op de waterbeweging (en dus afvoerverdeling) wordt geacht in de onzekerheid rondom de afvoerverdeling verwerkt te zijn.

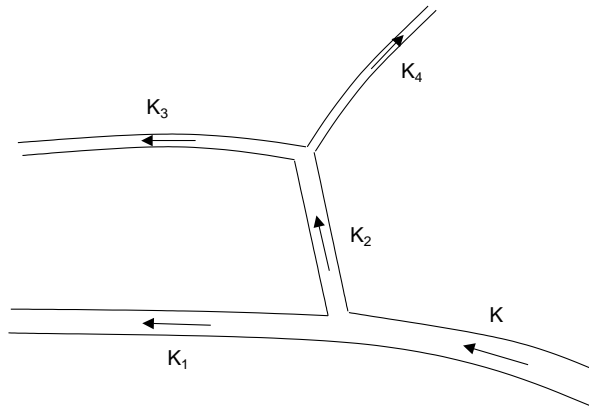
Voor de onzekerheid t.o.v. de deterministische afvoerdelingen worden in het model normale verdelingen aangenomen, met gemiddelde 0 m³/s, en σ 's volgens Tabel 2-1. Daarbij worden deze normale verdelingen (in essentie) statistisch onafhankelijk aangenomen. Dat betreft een benadering van de werkelijkheid. Bijvoorbeeld westelijke wind zal zorgen voor zowel een iets lagere Waalafvoer t.o.v. de standaardafvoerverdeling, en tevens voor een iets lagere Lekafvoer t.o.v. de standaardafvoerverdeling. De westelijke wind bemoeilijkt immers enigszins dat water naar deze riviertakken stroomt. De verwachting is echter dat het "grootste deel" van de onzekerheid op de splitsingspunten statistisch onafhankelijk van elkaar zal zijn.

In de modellering wordt aangenomen dat de σ 's voor de Pannerdensche Kop en de IJsselkop van de grootte van de afvoer mogen afhangen. In toepassingen lijkt het, zoals toegelicht aan het eind van paragraaf 2.1, voldoende nauwkeurig om deze σ 's constant aan te nemen. Met weinig inspanning kan de theorie echter voor de meer algemene situatie van afvoerafhankelijke σ 's worden gegeven, welke situatie in het vervolg wordt beschouwd.

2.2.1 Model

Het model voor het verwerken van de splitsingspunten wordt nu beschreven. De stochastische afvoeren, in m^3/s , op de takken worden als volgt aangegeven (Figuur 2-2):

- K: afvoer Rijn (Bovenrijn te Lobith),
- K_1 : afvoer Waal,
- K_2 : afvoer Pannerdensch Kanaal,
- K_3 : afvoer Nederrijn/Lek,
- K_4 : afvoer IJssel.



Figuur 2-2 Schematische weergave van de splitsingspunten, met de notatie van de stochasten.

De afvoeren waar hier sprake van is, zijn de *piekafvoeren* van de afvoertrapezia die in Hydra-Zoet en Hydra-Ring gebruikt worden in de modellering van de afvoer. Deze trapezia hebben een (gemeenschappelijke) basisduur van 30 dagen.³ In deze basisduur zijn in de genoemde Hydra-modellen de kansverdelingen nodig van de stochasten K, K_1, \dots, K_4 , zie voor meer details [Geerse, 2011] en [Roscoe et al, 2012].

Ter plaatse van Pannerdensch Kop geldt:⁴

$$K = K_1 + K_2 \quad (2.1)$$

De stochast K_1 voor de Waalafvoer wordt als volgt gemodelleerd:

$$K_1 = a(K) + Y_{PK} \quad (2.2)$$

Hierin stelt $a(K)$ de deterministische afvoerverdeling voor, die de Waalafvoer geeft als functie van de Rijnafvoer. De grootte Y_{PK} geeft de onzekerheid weer in de afvoerverdeling bij de Pannerdensch Kop. Merk op dat K_1 een functie is van K en Y_{PK} , oftewel $K_1 = K_1(K, Y_{PK})$. Kansen op uitkomsten van K_1 kunnen worden bepaald met een bivariate kansdichtheid van de vorm:

$$f_{K, Y_{PK}}(k, y) = f_K(k) f_{Y_{PK}|K}(y|k) \quad (2.3)$$

De kansdichtheid $f_K(k)$ kan eenvoudig worden bepaald uit de bekende gegevens voor de afvoer te Lobith (zie het eind van deze paragraaf en formule (2.12)). Voor $f_{Y_{PK}|K}(y|k)$ wordt hier een normale verdeling aangenomen, die conditioneel op $K = k$, een normale verdeling volgt met gemiddelde 0 en standaarddeviatie $\sigma_{PK}(k)$. Kortweg noteren we dat als:

³ Als in Hydra-Ring FBC-modellen worden gebruikt als beschrijving van de tijdsafhankelijke afvoer, blijven de formules uit dit hoofdstuk ongewijzigd. Alleen de parameters uit de formules worden dan anders.

⁴ Voor het hele Pannerdensch Kanaal wordt eenzelfde (piek)afvoer aangehouden. Er wordt daarmee voorbij gegaan aan een eventuele (geringe) laterale afvoer door gemaal Kandia langs het Pannerdensch Kanaal.

$$Y_{PK} \text{ volgt conditioneel op } K = k: N(0, \sigma_{PK}(k)) \quad (2.4)$$

Als de Waalafvoer gelijk is aan $a(K)$, moet volgens de deterministische afvoerverdeling de afvoer van het Pannerdensch Kanaal vanwege (2.1) gelijk zijn aan $K - a(K)$. Als we met I de identieke functie aanduiden, waarvoor $I(x) = x$, kunnen we deze grootheid noteren als volgt:

$$(I - a)(K) = K - a(K) \quad (2.5)$$

N.B. Deze notatie maakt het mogelijk de inverse van de functie $K \rightarrow K - a(K)$ te schrijven als $(I - a)^{-1}$, wat in formules soms handig is.

Vanwege (2.1) volgt nu als modellering voor K_2 :

$$K_2 = (I - a)(K) - Y_{PK} \quad (2.6)$$

De modellering voor de afvoerverdeling op de IJsselkop gebeurt op soortgelijke wijze. Dan geldt:

$$K_2 = K_3 + K_4 \quad (2.7)$$

$$K_3 = b(K_2) + Y_{LK} \quad (2.8)$$

$$K_4 = (I - b)(K_2) - Y_{LK} \quad (2.9)$$

Hierin geeft $b(K_2)$ de deterministische Lekafvoer als functie van de afvoer op het Pannerdensch Kanaal. Voor Y_{LK} wordt aangenomen

$$Y_{LK} \text{ volgt conditioneel op } K_2 = k_2: N(0, \sigma_{LK}(k_2)) \quad (2.10)$$

Verder zal worden aangenomen dat de afwijkingen op de splitsingspunten t.o.v. de deterministische verdelingen in benadering statistisch onafhankelijk van elkaar zijn. Om precies te zijn: er wordt aangenomen dat, conditioneel op waarden $K_2 = k_2$, Y_{PK} en Y_{LK} statistisch onafhankelijk van elkaar zijn. In formule houdt dat in:⁵

$$P(Y_{PK} < y_1, Y_{LK} < y_2 | K_2 = k_2) = P(Y_{PK} < y_1 | K_2 = k_2)P(Y_{LK} < y_2 | K_2 = k_2) \quad (2.11)$$

Voor de afvoer van de Rijn is in Hydra-Zoet en Hydra-Ring de kansverdeling $P(K > k)$ voor de Rijnafvoer bekend (gerelateerd aan de basisduur van de afvoertrapezia). Voor de stochasten K_1 t/m K_4 dienen de kansverdelingen nog bepaald te worden. Daarover gaat de volgende paragraaf.

2.2.2 Bepalen marginale kansverdelingen van K_1 t/m K_4 (dijkvakniveau)

Als in Hydra-Zoet of Hydra-Ring wordt uitgegaan van een dijkvakbenadering, zijn in de berekeningen de marginale verdelingen $P(K_i > k_i)$ nodig. Hieronder worden daarvoor de formules gegeven.

Er wordt, zoals gezegd, vanuit gegaan dat $P(K > k)$ voor de Rijn bekend is. Geef de kansdichtheid hiervoor aan met $f_K(k)$:

$$f_K(k) = -\frac{dP(K > k)}{dk} \quad (2.12)$$

⁵ De onafhankelijkheid kan misschien ook zonder conditionering op K_2 kan worden geformuleerd, maar (2.11) is in ieder geval de aanname die verderop gebruikt zal worden.

N.B. Als geen verwarring kan ontstaan, wordt in de formules de index K vaak weggelaten, in welk geval $f(k)$ wordt geschreven i.p.v. $f_K(k)$.

Voor $P(K_1 > k_1)$ voor de Waal volgt nu:

$$P(K_1 > k_1) = \int dk f(k) P(K_1 > k_1 | K = k) \quad (2.13)$$

We geven de cumulatieve *onderschrijdingskansen* van de standaardnormale verdeling als gebruikelijk aan door Φ , en de cumulatieve *overschrijdingskansen* met $\bar{\Phi}$ (dus $\bar{\Phi}(z) = 1 - \Phi(z)$). Dan geldt:

$$\begin{aligned} P(K_1 > k_1 | K = k) &= P(a(K) + Y_{PK} > k_1 | K = k) \\ &= P(Y_{PK} > k_1 - a(k)) \\ &= \bar{\Phi}\left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)}\right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

zodat volgt

$$P(K_1 > k_1) = \int dk f(k) \bar{\Phi}\left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)}\right) \quad (2.15)$$

Op dezelfde wijze kan voor het Pannerdensch Kanaal worden afgeleid:

$$P(K_2 > k_2) = \int dk f(k) \bar{\Phi}\left(\frac{k_2 - (I-a)(k)}{\sigma_{PK}(k)}\right) \quad (2.16)$$

Voor de Lek en de IJssel volgt op dezelfde manier:

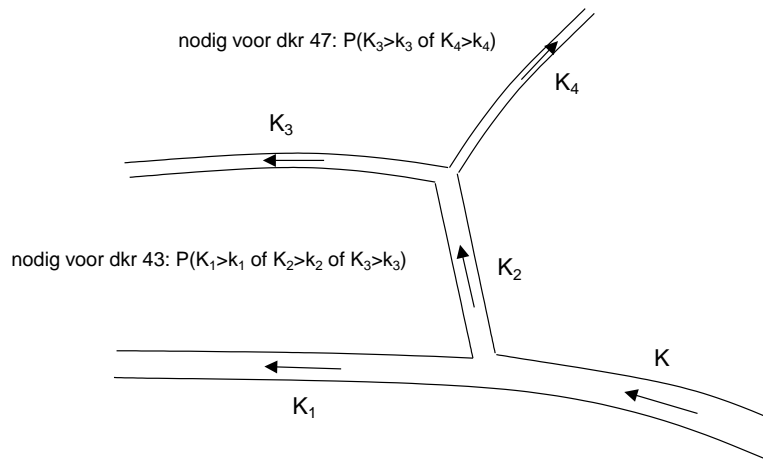
$$P(K_3 > k_3) = \int dk_2 f_2(k_2) \bar{\Phi}\left(\frac{k_3 - b(k_2)}{\sigma_{LK}(k_2)}\right) \quad (2.17)$$

$$P(K_4 > k_4) = \int dk_2 f_2(k_2) \bar{\Phi}\left(\frac{k_4 - (I-b)(k_2)}{\sigma_{LK}(k_2)}\right) \quad (2.18)$$

waarin $f_2(k_2) = -dP(K_2 > k_2)/dk_2$ de kansdichtheid voor het Pannerdensch Kanaal weergeeft.

2.2.3 Bepalen overschrijdingskansen van ringdelen

In Hydra-Ring worden overschrijdingskansen bepaald voor ringdelen. Dat betekent dat de voorgaande (marginale) verdelingen van de afvoerstochasten niet voldoende zijn voor de berekening van overschrijdingskansen. Er zijn gecombineerde kansen nodig. Voor bijvoorbeeld dijkkring 47 (Arnhemse- en Velpsebroek), gelegen ten noorden van de IJsselkop, zijn kansen nodig van de vorm $P(K_3 > k_3 \text{ of } K_4 > k_4)$. Voor dijkkring 43 (Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden), gelegen ten westen van het Pannerdensch Kanaal, zijn kansen nodig van de vorm $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2 \text{ of } K_3 > k_3)$.



Figuur 2-3 Aanduiding benodigde kansen dkr 43 en dkr 47 (dkr = dijkring).

Voor andere dijkringdelen zijn varianten van deze formules nodig. Het opstellen van formules voor dergelijke kansen blijkt het nodige werk met zich mee te brengen. In het kader van deze oriënterende studie worden niet alle varianten van gecombineerde kansen behandeld. Alleen formules voor de volgende situaties worden bepaald:

1. Waal en Pannerdensch Kanaal: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$,
2. Lek en IJssel: $P(K_3 > k_3 \text{ of } K_4 > k_4)$,
3. Pannerdensch Kanaal en Lek: $P(K_2 > k_2 \text{ of } K_3 > k_3)$,
4. Waal en Lek: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$.

Formules ringdeel Waal en Pannerdensch Kanaal: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$

Het doel is een expliciete formule af te leiden voor $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$. Heel algemeen geldt voor gebeurtenissen A, B en C de regel:

$$P(A \text{ of } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ en } B) \quad (2.19)$$

In het vervolg zullen we schrijven $P(A, B)$ voor $P(A \text{ en } B)$. In dat geval volgt:

$$P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2) = P(K_1 > k_1) + P(K_2 > k_2) - P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) \quad (2.20)$$

De kansen $P(K_1 > k_1)$ en $P(K_2 > k_2)$ volgen uit (2.15) en (2.16), zodat alleen $P(K_1 > k_1, K_2 > k_2)$ hoeft te worden bepaald.

We beschouwen daartoe eerst de conditionele kans $P(K_1 > k_1, K_2 > k_2 | K = k)$. Vanwege (2.2) en (2.6) leidt dat in termen van Y_{PK} , conditioneel beschouwd op $K = k$, tot de volgende voorwaarden:

$$a(k) + Y_{PK} > k_1 \quad \Leftrightarrow \quad Y_{PK} > k_1 - a(k) \quad (2.21)$$

$$(1 - a)(k) - Y_{PK} > k_2 \quad \Leftrightarrow \quad Y_{PK} < k - a(k) - k_2 = k - k_1 - k_2 + [k_1 - a(k)] \quad (2.22)$$

Als $k_1 + k_2 \geq k$ zijn er geen realisaties van $Y_{PK}(k)$ waarvoor aan deze voorwaarden is voldaan omdat in dat geval vgl (2.20) en vgl (2.21) in tegenspraak zijn. Als $k_1 + k_2 < k$ liggen de realisaties y in het interval $[k_1 - a(k), (1 - a)(k) - k_2]$. Dan volgt:

$$P(K_1 > k_1, K_2 > k_2 | K = k) = \Phi\left(\frac{(1 - a)(k) - k_2}{\sigma_{PK}(k)}\right) - \Phi\left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)}\right) \quad (2.23)$$

Door k uit te integreren volgt dan:

$$P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) = \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f(k) \left\{ \Phi \left(\frac{(I-a)(k)-k_2}{\sigma_{PK}(k)} \right) - \Phi \left(\frac{k_1-a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \right\} \quad (2.24)$$

De grootheid $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$ kan volgens (2.20) dan worden berekend uit (2.15), (2.16) en (2.24):

$$P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2) = P(K_1 > k_1) + P(K_2 > k_2) - \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f(k) \left\{ \Phi \left(\frac{(I-a)(k)-k_2}{\sigma_{PK}(k)} \right) - \Phi \left(\frac{k_1-a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \right\} \quad (2.25)$$

Formules ringdeel Lek en IJssel: $P(K_3 > k_3 \text{ of } K_4 > k_4)$

Voor deze situaties zijn de formules analoog, met dien verstande dat de Rijnafvoer vervangen moet worden door de afvoer van het Pannerdensch Kanaal. Analoog aan de berekening van $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$ geldt dan:

$$P(K_3 > k_3 \text{ of } K_4 > k_4) = P(K_3 > k_3) + P(K_4 > k_4) - \int_{k_3+k_4}^{\infty} dk_2 f_2(k_2) \left\{ \Phi \left(\frac{(I-b)(k_2)-k_4}{\sigma_{IJK}(k_2)} \right) - \Phi \left(\frac{k_3-b(k_2)}{\sigma_{IJK}(k_2)} \right) \right\} \quad (2.26)$$

met $P(K_3 > k_3)$ en $P(K_4 > k_4)$ gegeven door (2.17) en (2.18).

Formules ringdeel Pannerdensch Kanaal en Lek: $P(K_2 > k_2 \text{ of } K_3 > k_3)$

We beginnen met de berekening van $P(K_2 > k_2, K_3 > k_3)$. Daarvoor geldt, met behulp van (2.8) en (2.10),

$$P(K_2 > k_2, K_3 > k_3) = \int_{k_2}^{\infty} ds f_2(s) P(K_3 > k_3 | K_2 = s) = \int_{k_2}^{\infty} ds f_2(s) \bar{\Phi} \left(\frac{k_3 - b(s)}{\sigma_{IJK}(s)} \right) \quad (2.27)$$

Dan volgt, met de algemene regel (2.19),

$$P(K_2 > k_2 \text{ of } K_3 > k_3) = P(K_2 > k_2) + P(K_3 > k_3) - \int_{k_2}^{\infty} ds f_2(s) \bar{\Phi} \left(\frac{k_3 - b(s)}{\sigma_{IJK}(s)} \right) \quad (2.28)$$

met $P(K_2 > k_2)$ en $P(K_3 > k_3)$ gegeven door (2.16) en (2.17).

Formules ringdeel Waal en Lek: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$

De afleiding voor deze formule is nogal bewerkelijk, en wordt gegeven in Bijlage A. Het resultaat luidt als volgt:

$$P(K_1 > k_1, K_3 > k_3) = \int dk_2 \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f_K(k) \varphi \left(\frac{k-k_2-a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \frac{1}{\sigma_{PK}(k)} \bar{\Phi} \left(\frac{k_3-b(k_2)}{\sigma_{IJK}(k_2)} \right) \quad (2.29)$$

waarin φ als gebruikelijk de standaardnormale kansdichtheid voorstelt.

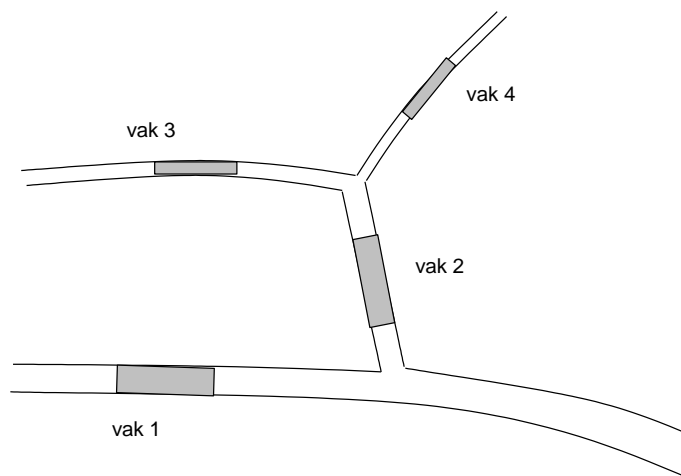
2.3 Gevoeligheidsmodel

2.3.1 Parameterkeuzes in het model

De hiervoor afgeleide formules zullen worden toegepast op een versimpelde situatie. Er worden vier fictieve dijkvakken beschouwd, als weergegeven in Figuur 2-4. Voor de deterministische afvoerverdeling wordt uitgegaan van de volgende percentages (afvoeren relatief t.o.v. Lobith):

- Waal: 63.53%
- Pannerdensch Kanaal: 36.47%
- Lek: 21.10%
- IJssel: 15.37%

Deze getallen stemmen overeen met die uit Figuur 2-1.



Figuur 2-4 Schetsmatige weergave van de splitsingspunten met vier dijkvakken.

Als overschrijdingskans $P(K > k)$ voor Lobith, voor de piekafvoer K in de basisduur van de trapezia, wordt genomen:⁶

$$P(K > k) = \frac{1}{6} \exp\left(-\frac{k - 6612.61}{1316.43}\right), \quad k \geq 4254 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.30)$$

Deze overschrijdingskans stemt voor afvoeren groter dan $10850 \text{ m}^3/\text{s}$ overeen met de overschrijdingsfrequentie (werklijn) volgens de HR2006. Voor lagere afvoeren geldt voor de HR2006 een heel andere beschrijving, maar omdat we voor de gevoeligheidsanalyse uitsluitend geïnteresseerd zijn in de hogere en extreme afvoeren, is deze beschrijving in deze context toereikend.

Voor elk dijkvak wordt een HQ-relatie aangenomen, van de vorm

$$HQ(q) = Cq + D \quad (2.31)$$

Daarbij zijn de volgende parameters aangenomen:

⁶ N.B. De factor $1/6$ correspondeert met het aantal afvoertrapezia in het winterhalfjaar.

$$\begin{array}{lll}
\text{Waal (vak 1):} & C = 4.414 \cdot 10^{-4}, \quad D = 10.513; & h_{\text{dec}} = 85 \text{ cm} \\
\text{Pannerdensch Kanaal (vak 2):} & C = 6.787 \cdot 10^{-4}, \quad D = 11.040; & h_{\text{dec}} = 75 \text{ cm} \\
\text{Lek (vak 3):} & C = 10.164 \cdot 10^{-4}, \quad D = 9.569; & h_{\text{dec}} = 65 \text{ cm} \\
\text{IJssel (vak 4):} & C = 13.953 \cdot 10^{-4}, \quad D = 9.569; & h_{\text{dec}} = 65 \text{ cm}
\end{array} \tag{2.32}$$

De waarden h_{dec} , die eveneens zijn aangegeven, laten zien met welke decimeringswaarden deze HQ-relaties corresponderen. Voor bijvoorbeeld de Waal geldt een decimeringswaarde van 85 cm. Dat wil zeggen dat een afvoer met een factor 10 kleinere overschrijdingskans, correspondeert met een waterstandsverhoging van 85 cm. Deze keuzes zijn gebaseerd op de decimeringswaarden zoals per kilometerraai gegeven in [Slomp, 2006]: voor de takken Waal, Pannerdensch Kanaal en Lek is h_{dec} ruwweg bepaald als het gemiddelde van de decimeringswaarden over een traject van 10 km lengte, gerekend vanaf het (relevante) splitsingspunt. Voor de IJssel zou bij middeling over een dergelijk traject de decimeringswaarde erg laag uitkomen, namelijk op 46 cm. Omdat verder benedenstrooms van de IJsselkop veel hogere decimeringswaarden voorkomen (tot circa 80 cm), is gekozen voor een hogere waarde voor h_{dec} van 65 cm.

De constanten D in (2.32) zijn zo gekozen dat ze voor de afvoeren die corresponderen met de deterministische afvoerverdeling bij Lobith-afvoer $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ de volgende MHW's opleveren:

- vak 1 en vak 2: MHW = 15.00 m+NAP (volgens deterministische berekening)
- vak 3 en vak 4: MHW = 13.00 m+NAP (volgens deterministische berekening)

Deze MHW's stemmen dus overeen met de waterstanden bij de afvoeren op de takken volgens Figuur 2-1. Overigens spelen de precieze waarden voor de MHW's in het vervolg geen rol voor de conclusies die worden getrokken. Ze zijn alleen handig bij de uitleg van zaken.

De onzekerheden worden gemodelleerd zoals beschreven in paragraaf 2.2.1 (normale verdelingen met gemiddelde $0 \text{ m}^3/\text{s}$). De standaarddeviaties σ_{PK} en σ_{IJK} worden gekozen volgens de gegevens uit Tabel 2-1 (drie varianten), en hangen niet af van de grootte van de afvoer.

2.3.2 Resultaten op dijkvakniveau

De bovenstaande gegevens kunnen worden ingevuld voor de formules uit paragraaf 2.2.2. Daarmee kunnen kansen van de vorm $P(K_i > k_i)$ worden bepaald, zoals die gelden inclusief het meenemen van onzekerheid op de splitsingspunten.

Dergelijke kansen kunnen uiteraard ook worden bepaald zonder onzekerheid mee te nemen, in welk geval deze kansen direct volgen door K_i deterministisch te vertalen naar Lobith. Voor bijvoorbeeld K_1 volgt dan, m.b.v. (2.2) ingeval Y_{PK} gelijk aan 0 wordt genomen,

$$P(K_1 > k_1) = P(a(K) > k_1) = P(K > a^{-1}(k_1)) \tag{2.33}$$

waarbij a^{-1} de inverse aangeeft van de functie $k \rightarrow a(k)$. In de situatie waar hier sprake van is, geldt $a(k) = 0.6353 \cdot k$, in welk geval $a^{-1}(k_1)$ eenvoudig gelijk is aan $a^{-1}(k_1) = k_1/0.6353$. Op deze manier volgt voor de versie van $P(K_1 > k_1)$ exclusief onzekerheden, m.b.v. (2.30),

$$P(K_1 > k_1) = \frac{1}{6} \exp\left(-\frac{k_1/0.6353 - 6612.61}{1316.43}\right) \tag{2.34}$$

Voor de duidelijkheid geven we ook aan hoe deze kans kan worden omgerekend naar een overschrijdingsfrequentie $F_{1,ov}(k_1)$ in keren/jaar. Daartoe hoeft (2.34) slechts te worden vermenigvuldigd met het aantal afvoertrapezia in het winterhalfjaar (6 stuks).⁷ Oftewel:

$$F_{1,ov}(k_1) = 6P(K_1 > k_1) = \exp\left(-\frac{k_1/0.6353 - 6612.61}{1316.43}\right) \quad (2.35)$$

Inmiddels is duidelijk hoe kansen van de vorm $P(K_i > k_i)$, en overschrijdingsfrequenties van de vorm $F_{i,ov}(k_i)$, kunnen worden bepaald, zowel exclusief als inclusief het meenemen van onzekerheid op de splitsingspunten.

	Stand. deviaties Pan.Kop / IJs.Kop, m ³ /s		
	130 / 85	180 / 100	230 / 115
MHW-verhoging op dijkvakniveau, door meenemen van onzekerheid			
	cm	cm	cm
Waal	0.45	0.85	1.4
Pannerdensch Kanaal	1.2	2.3	3.7
Lek	2.4	3.8	5.7
IJssel	3.5	5.4	7.8
Toename overschrijdingsfrequentie van oude MHW, door meenemen onzekerheid			
	%	%	%
Waal	1.2	2.3	3.9
Pannerdensch Kanaal	3.7	7.3	12
Lek	8.7	14	22
IJssel	13	21	32

Tabel 2-3 Resultaten gevoeligheidsmodel afvoerverdeling splitsingspunten op dijkvakniveau.

Uit de zojuist behandelde formules, en die uit paragraaf 2.2.2, volgen de resultaten in Tabel 2-3. Om de getallen uit te leggen, wordt als voorbeeld de variant met σ 's 180/100 m³/s genomen, voor vak 4 langs de IJssel. Deterministisch⁸ berekend is het MHW hier gelijk aan 13.00 m+NAP, welke waarde volgens Figuur 2-1 correspondeert met een afvoer van 2459 m³/s (deze afvoer heeft deterministisch gezien een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar). Als onzekerheid wordt meegenomen, verschuift de overschrijdingsfrequentie naar iets hogere afvoeren, zoals weergegeven in Figuur 2-5. Volgens de nieuwe frequentielijn correspondeert 1/1250 dan met een iets hogere IJsselafvoer (namelijk 2498 m³/s). Die hogere afvoer levert volgens de HQ-relatie uit (2.32) een iets hoger MHW, van 13.054 m+NAP. Oftewel een 5.4 cm hogere MHW dan de deterministisch berekende waarde. Dat verschil is weergegeven in Tabel 2-3.

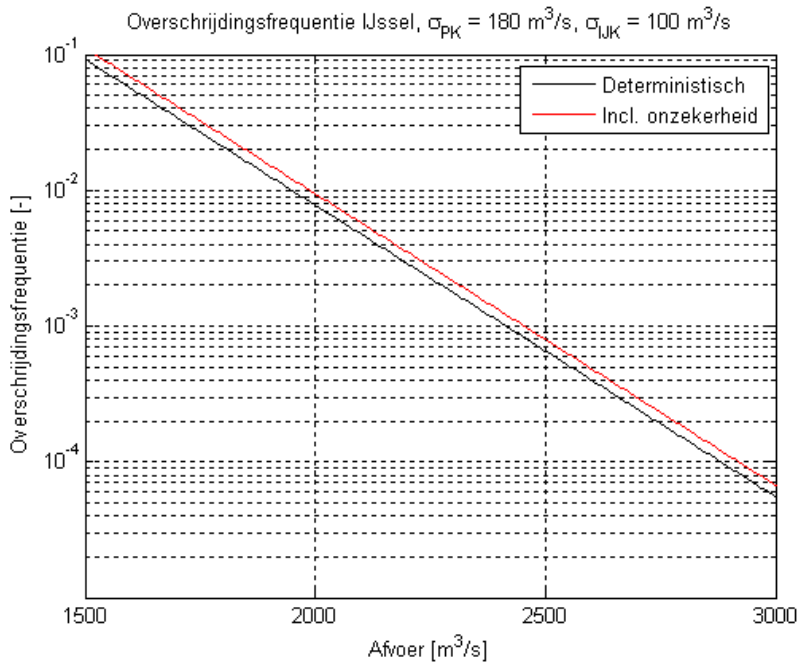
Een andere manier om het effect van het meenemen van onzekerheid (voor dit vak) te beoordelen, is door te bezien in welke mate de overschrijdingsfrequentie van het "oude" MHW van 13.00 m+NAP verandert door het meenemen van de onzekerheid. Volgens de nieuwe frequentielijn blijkt 13.00 m+NAP een overschrijdingsfrequentie te hebben van 1/1031 per jaar.⁹ Dat levert een verhoging van de overschrijdingsfrequentie met een factor $(1/1031)/(1/1250) = 1.21$, oftewel 21%. Dit percentage is weergegeven in de tabel.

⁷ In Hydra-Ring gebeurt de omrekening waarschijnlijk iets anders, maar dat is voor de resultaten uit deze studie niet relevant.

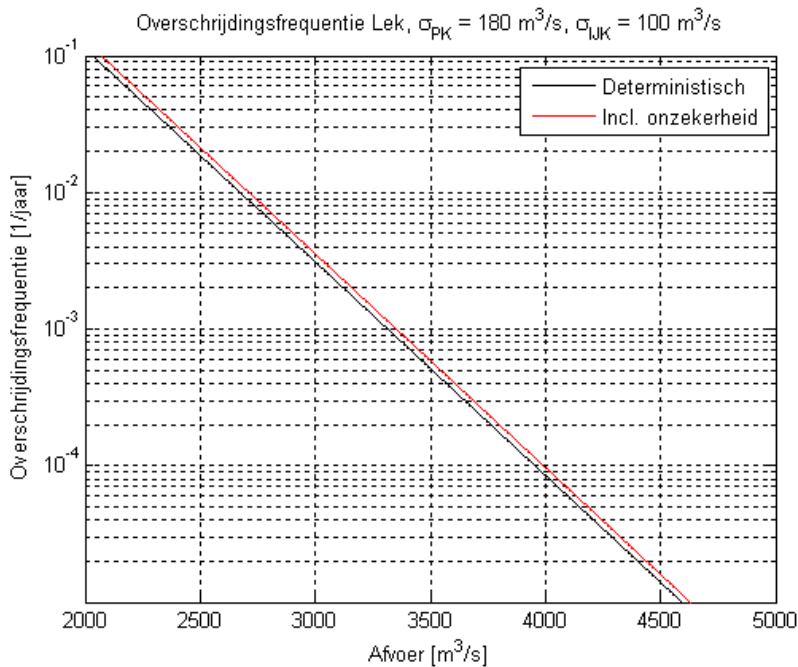
⁸ De term "deterministisch" is misschien wat misleidend, omdat in de berekening indirect wel gebruik is gemaakt van de overschrijdingsfrequentie van de afvoer (een probabilistische grootheid). De term deterministisch slaat hier op het feit dat de waterstand via een deterministische relatie uit de maatgevende afvoer wordt bepaald, zonder rond de maatgevende afvoer een onzekerheid toe te passen.

⁹ De overschrijdingsfrequentie is berekend via de afvoer. Het oude MHW correspondeert met de IJsselafvoer 2459 m³/s; deze afvoer heeft volgens de nieuwe frequentielijn een overschrijdingsfrequentie van 1/1031 per jaar.

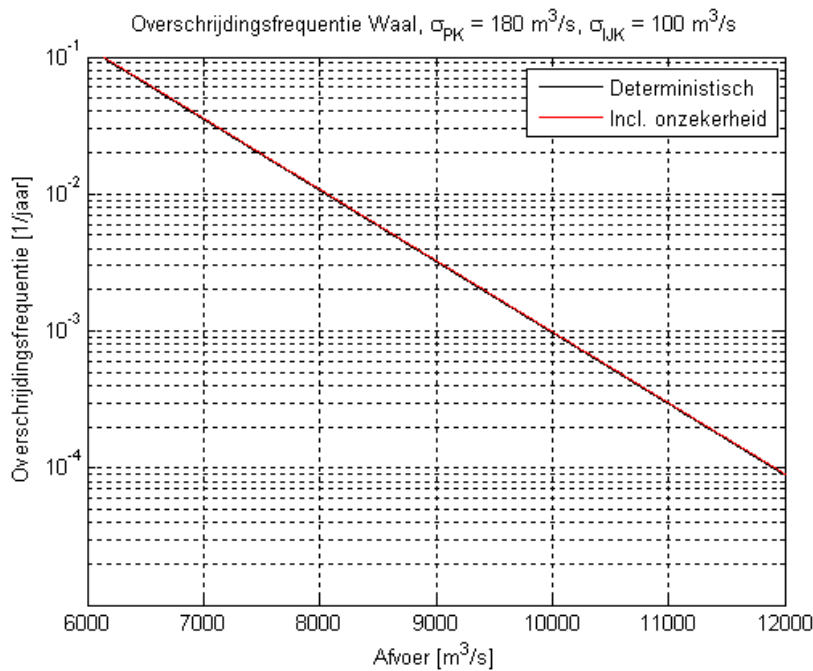
De met Figuur 2-5 overeenkomstige figuren voor de Lek, Waal en Pannerdensch Kanaal staan in Figuur 2-6 t/m Figuur 2-8.



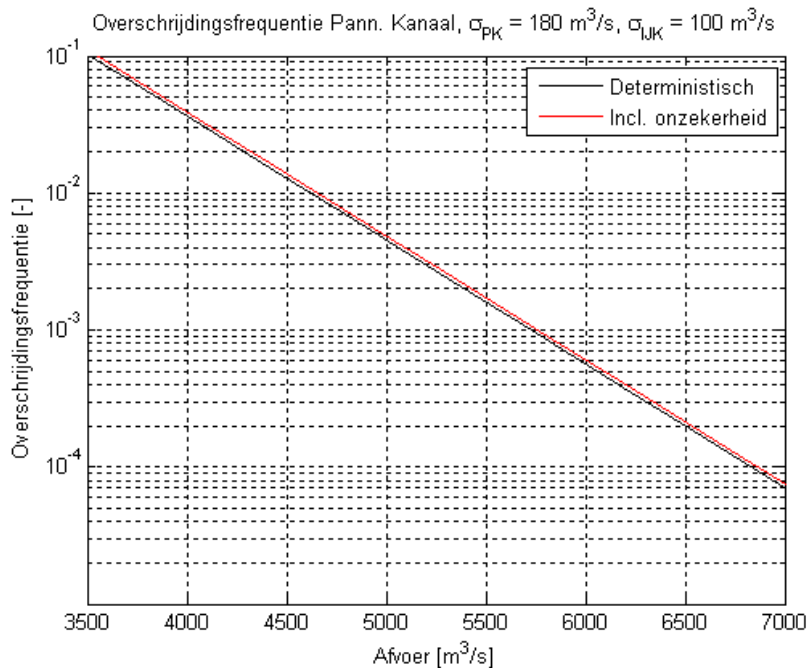
Figuur 2-5 Vergelijking tussen deterministisch berekende frequentielijn met de frequentielijn inclusief onzekerheden, voor de IJssel.



Figuur 2-6 Vergelijking tussen deterministisch berekende frequentielijn met de frequentielijn inclusief onzekerheden, voor de Lek.



Figuur 2-7 Vergelijking tussen deterministisch berekende frequentielijn met de frequentielijn inclusief onzekerheden, voor de Waal.



Figuur 2-8 Vergelijking tussen deterministisch berekende frequentielijn met de frequentielijn inclusief onzekerheden, voor Pannerdensch Kanaal.

De conclusies die uit Tabel 2-3 getrokken kunnen worden zijn als volgt:¹⁰

1. De grootste verschillen doen zich voor op de Lek en de IJssel. Dat ligt voor de hand, omdat deze riviertakken zich achter *beide* splitsingspunten bevinden.

¹⁰ Merk wel op dat deze conclusies gelden onder de aannames (2.31) en (2.32). Bij andere keuzes voor C en D uit (2.31) zouden iets andere conclusies kunnen gelden, met dien verstande dat naar verwachting de trend in de getallen ongeveer hetzelfde blijft.

2. De kleinste verschillen doen zich voor op de Waal. Reden daarvan is enerzijds dat deze riviertak zich achter slechts één splitsingspunt bevindt, en anderzijds dat de Waal veel meer afvoer voert dan het Pannerdensch Kanaal, waardoor een beschouwde afvoerverandering op de Waal minder effect heeft dan op het Pannerdensch Kanaal.
3. De resultaten zijn sterk afhankelijk van de beschouwde variant voor σ_{PK}/σ_{IJK} . Voor de variant met de kleinste sigma's (130/85 m³/s), wordt op de IJssel een MHW-verhoging gevonden van 3.5 cm, terwijl dat voor de variant met de grootste sigma's (230/115 m³/s) meer dan het dubbele is, namelijk 7.8 cm.

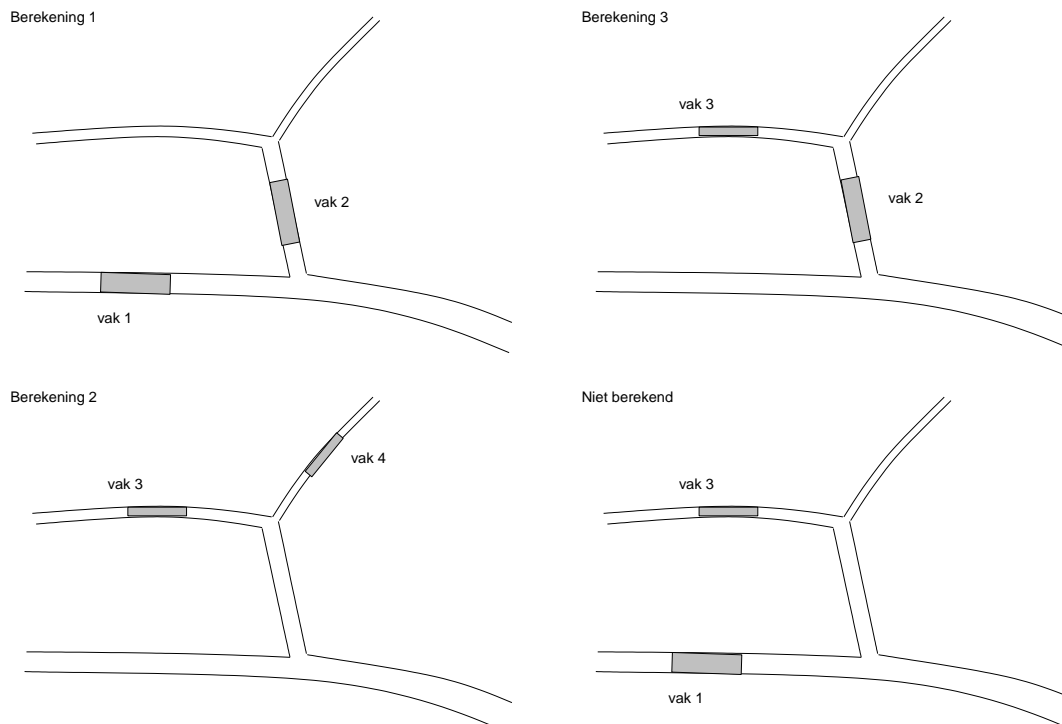
Verdere conclusies worden uitgesteld tot paragraaf 2.4.3.

2.3.3 Resultaten voor ringdelen

In paragraaf 2.3.3 zijn formules voor gecombineerde kansen van de vorm $P(K_i > k_i \text{ of } K_j > k_j)$ gegeven. Met de modelparameters uit paragraaf 2.3.1 kunnen dergelijke kansen gebruikt worden om (versimpelde) berekeningen voor ringdelen te maken. We brengen in herinnering dat voor de volgende situaties kansen zijn afgeleid:

1. Waal en Pannerdensch Kanaal: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_2 > k_2)$,
2. Lek en IJssel: $P(K_3 > k_3 \text{ of } K_4 > k_4)$,
3. Pannerdensch Kanaal en Lek: $P(K_2 > k_2 \text{ of } K_3 > k_3)$,
4. Waal en Lek: $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$.

Voor de eerste drie situaties zijn er berekeningen uitgevoerd. Daarbij zijn per ringdeel de eerder beschouwde fictieve dijkvakken genomen (zie Figuur 2-9).



Figuur 2-9 Weergave van berekende en niet-berekende situaties.

Neem als voorbeeld voor een uitgevoerde berekening situatie 1. Voor deze vakken zijn de "oude" MHW's (degenen zonder onzekerheid) beide gelijk aan 15.00 m+NAP. Volgens de gegevens uit Figuur 2-1 doen die MHW's zich zonder onzekerheid voor bij afvoeren $k_{1,det} = 10165 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal (vak 1) en bij $k_{2,det} = 5835 \text{ m}^3/\text{s}$ op het Pannerdensch Kanaal (vak 2), waarin de index "det" slaat op het deterministische karakter van de aldus bepaalde afvoeren. Elk van deze vakken heeft, apart beschouwd, volgens de deterministische aanpak een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 per jaar.

We kunnen ons nu de vraag stellen wat de overschrijdingsfrequentie is voor het *overlopen* van dit ringdeel als de dijkvakken een hoogte hebben gelijk aan de MHW's van 15.00 m+NAP. Voor de praktijk is dit geen reële berekening, omdat dijken (die aan de norm voldoen) altijd een extra hoogte hebben i.v.m. golfoploop. Het is echter wel een interessante vergelijking om te bezien in welke mate de "ringfrequentie" zich verhoudt tot de "dijkvakfrequentie". Die frequentie is in dat geval gelijk aan $6 \cdot P(K_1 > k_{1,det} \text{ of } K_2 > k_{2,det})$, waarbij deze kans wordt berekend met (2.20) (dus inclusief onzekerheid). Deze frequentie blijkt voor het geval $\sigma_{PK}/\sigma_{IJK} = 180/100 \text{ m}^3/\text{s}$ gelijk te worden aan 1/969 per jaar, oftewel 29% hoger dan de deterministisch bepaalde frequentie 1/1250 per jaar van de individuele vakken. Dat percentage staat in Tabel 2-4. Die tabel bevat de gegevens voor de drie doorgerekende ringdelen, terwijl voor de overzichtelijkheid ook de gegevens uit Tabel 2-3 daarin zijn weergegeven.

Berekeningen voor dijkvakken	Stand. deviaties Pan.Kop / IJs.Kop, m ³ /s		
	130 / 85	180 / 100	230 / 115
MHW-verhoging op dijkvakniveau, door meenemen van onzekerheid			
	cm	cm	cm
Waal	0.45	0.85	1.4
Pannerdensch Kanaal	1.2	2.3	3.7
Lek	2.4	3.8	5.7
IJssel	3.5	5.4	7.8
Toename overschrijdingsfrequentie van oude MHW, door meenemen onzekerheid			
	%	%	%
Waal	1.2	2.3	3.9
Pannerdensch Kanaal	3.7	7.3	12
Lek	8.7	14	22
IJssel	13	21	32

Berekeningen voor ringdelen	Stand. deviaties Pan.Kop / IJs.Kop, m ³ /s		
	130 / 85	180 / 100	230 / 115
Toename overschrijdingsfrequentie van de oude MHW's langs de ringdelen, door meenemen onzekerheid			
	%	%	%
Ringdeel bestaande uit vak 1 (Waal) en vak 2 (Pann. Kanaal)	20	29	40
Ringdeel bestaande uit vak 3 (Lek) en vak 4 (IJssel)	43	57	75
Ringdeel bestaande uit vak 2 (Pann. Kanaal) en vak 3 (Lek)	19	27	37

Tabel 2-4 Resultaten gevoeligheidsmodel op dijkvakniveau zowel als dijkkringdeelniveau.

Uit de tabel blijkt dat de frequenties van de ringdelen meer verhoogd zijn t.o.v. 1/1250 dan die voor de "losse" dijkvakken, ook als voor de dijkvakken frequenties inclusief onzekerheid worden beschouwd. Met name voor het ringdeel bestaande uit vak 3 en 4 is de frequentie van dit ringdeel veel groter dan 1/1250 (bij $\sigma_{PK}/\sigma_{IJK} = 180/100 \text{ m}^3/\text{s}$ 57% hoger), terwijl de frequentie van dit ringdeel ook aanzienlijk hoger is dan die van de individuele vakken inclusief onzekerheid (bij $\sigma_{PK}/\sigma_{IJK} = 180/100 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de vakken 14% en 21%, wat flink lager is dan de 57% voor het ringdeel).

Eén reden daarvoor is dat deze vakken achter *beide* splitsingspunten liggen. Daarnaast is een belangrijke reden voor het verschil tussen ring- en vakbenadering – ingeval een ring vakken bevat gelegen langs beide takken áchter een splitsingspunt – de volgende. Als de dijkvakken individueel zijn afgestemd op de deterministische afvoerverdeling, is iedere afwijking van die verdeling ongunstig voor één van beide takken van de ring. In de “aparte vakbenadering” middelen afwijkingen t.o.v. de deterministische verdeling min of meer uit, terwijl dat niet het geval is voor de ringbenadering.

Hier moet wel bedacht worden dat in werkelijkheid de overschrijdingsfrequentie van een ringdeel wordt bepaald door meerdere faalmechanismes, waarbij de actuele hoogte en sterkte van de dijken in de berekeningen wordt betrokken. Als bijvoorbeeld voor het ringdeel langs de Lek/IJssel de vakken langs de IJssel overhoogte/oversterkte zouden hebben, wordt de overschrijdingsfrequentie van de ring bijna volledig bepaald door de dijken langs de Lek, en valt het grote verschil tussen de ring- en vakbenadering grotendeels weg.

De ringfrequentie valt volgens Tabel 2-4 vooral hoog uit voor de ring bestaande uit vakken langs de Lek en IJssel (dijkring 47). Dat betreft echter een vrij kleine ring, met relatief weinig kilometers dijk. Daarnaast moet worden opgemerkt dat dijkring 43 vakken langs Waal, Pannerdensch Kanaal en Lek heeft. Die situatie is niet doorgerekend, maar verwacht moet worden dat voor deze dijkring het verschil tussen ring- en vakbenadering nog wat groter is dan voor het ringdeel met vakken langs het Pannerdensch Kanaal en de Lek.

2.4 Aanvullende zaken

2.4.1 Eventuele implementatie en benodigde productiesommen

Stel dat in Hydra-Ring onzekerheden op de splitsingspunten worden meegenomen. Er zijn dan meerdere mogelijkheden, zoals:

1. Implementeer de onzekerheden op probabilistische wijze voor zowel de ring- als de vakbenadering (meest volledige implementatie).
2. Implementeer de onzekerheden op probabilistische wijze door alleen de frequentielijnen op *vakniveau* aan te passen (gedeeltelijke implementatie van de onzekerheden). Hanteer eventueel een deterministische toeslag op de overschrijdingsfrequentie ingeval een ringberekening wordt uitgevoerd.
3. Implementeer de onzekerheden op een vereenvoudigde manier door op deterministische wijze toeslagen toe te passen (bijvoorbeeld op de waterstanden per vak, en/of op de overschrijdingsfrequentie bij een ringberekening).

Een advies hierover wordt uitgesteld tot paragraaf 2.4.3. Hier wordt alleen ingegaan op de vraag of voor WTI2017, afhankelijk van de beschouwde optie, extra productiesommen zijn vereist. Terzijde: ik ga er vanuit dat in WTI2017 ook voor de bovenrivieren in Hydra-Ring probabilistisch gerekend wordt met wind en afvoer, in welk geval met WAQUA meerdere afvoergolven worden doorgerekend (standaard 9 verschillende niveaus voor de piekwaarden). In dat geval zijn geen extra productiesommen vereist, ook niet als voor de eerste optie wordt gekozen.

Het enige vereiste voor Hydra-Ring is namelijk dat per riviertak, bij een gegeven afvoerwaarde op die tak, de waterstand bekend is. Maar deze informatie kan al worden verkregen op basis van de WAQUA-sommen met een deterministische afvoerverdeling. Van dat laatste wordt nu een voorbeeld gegeven.

Stel dat $H_{Lob,X}(q)$ de waterstand op een locatie X langs de Waal aangeeft, zoals die volgt uit WAQUA-sommen (en door interpolatie tussen resultaten uit deze sommen). In Hydra-Ring is bij een probabilistische aanpak van de onzekerheden op de splitsingspunten de grootte $H_{1,X}(q_1)$ nodig, die de waterstand op locatie X weergeeft als functie van de Waalafvoer q_1 . Uitgaande van de deterministische afvoerverdeling $q_1 = a(q)$, geldt dan eenvoudig:

$$H_{1,X}(q_1) = H_{Lob,X}(a^{-1}(q)) \quad (2.36)$$

waarbij a^{-1} de inverse van de functie a weergeeft. Oftewel: zoek bij een gegeven Waalafvoer eerst de corresponderende Lobithafvoer op, en bepaal dan uit de WAQUA-sommen (die per Lobith-afvoerniveau bekend zijn, de waterstand op voor locatie X.

Uiteraard dienen in de database met waterstanden de gegevens van de (deterministische) afvoerverdeling wel te zijn opgeslagen: voor elk van de 9 niveaus te Lobith dienen de bijbehorende afvoeren op de Waal, Pannerdensch Kanaal, Lek en IJssel gegeven te zijn.

2.4.2 Eventuele inconsistenties tussen HR voor boven- en benedenrivieren

Een vraag die is gesteld, is of er, bij het probabilistisch verwerken van de onzekerheden, inconsistenties kunnen ontstaan tussen de HR voor de boven- en de benedenrivieren.

In paragraaf 2.4.1 zijn drie opties genoemd voor het meenemen van de onzekerheden op de splitsingspunten. Als voor beide watersystemen dezelfde optie wordt gekozen, ontstaan geen inconsistenties. Twee kanttekeningen hierbij:

1. Er ontstaat altijd een bepaalde inconsistentie tussen beneden- en bovenrivieren, omdat o.m. in de benedenrivieren de invloed van wind en zee in de waterstanden wordt meegenomen, terwijl dat niet gebeurt voor de bovenrivieren. Daarnaast ontstond in het verleden een inconsistentie tussen het SOBEK-model voor de benedenrivieren, en het WAQUA-model voor de bovenrivieren. Als voor de WT12017 in beide gevallen WAQUA wordt gebruikt, behoort de laatste inconsistentie hopelijk grotendeels tot het verleden.¹¹
2. Als de onzekerheid op de splitsingspunten (deels) met deterministische toeslagen wordt verwerkt, dienen die toeslagen nog te worden bepaald. Afhankelijk van hoe dat wordt gedaan, kunnen al of niet significante verschillen tussen aangrenzende locaties ontstaan.

2.4.3 Advies

Er dient een advies te worden gegeven over de manier waarop in WT12017 moet worden omgegaan met de onzekerheid op de splitsingspunten.

In paragraaf 2.4.1 zijn daartoe drie opties genoemd. Voor optie 1 (volledige implementatie) en optie 2 (implementatie alleen op vakkniveau) dient Hydra-Ring te worden aangepast, terwijl dat

¹¹ Er bestaat dan echter nog steeds het verschil dat voor de bovenrivieren afvoergolven worden doorgerekend, terwijl voor de benedenrivieren permanenties worden beschouwd.

voor optie 3 (deterministische toeslagen) niet of nauwelijks het geval is. Mijn advies hangt af van de mate van complexiteit van het inbouwen van opties 1 en 2. Overleg met de opdrachtgever suggereert dat de volledige implementatie (optie 1) in Hydra-Ring goed haalbaar is – de structuur van het programma wordt daartoe voldoende flexibel geacht.

Mijn advies is dit vermoeden nader te verifiëren, en als dat bevestigd wordt, deze optie 1 in te bouwen voor de WTI2017. Mocht dit vermoeden (toch) onjuist blijken, bouw dan de simpelere optie 2 in (implementatie alleen op vakniveau), terwijl voor typische ringeffecten dan eventueel met deterministische toeslagen gewerkt kan worden. Deze toeslagen dienen dan nog wel bepaald te worden.

Een nadeel van de opties 1 en 2 is wel dat geen simpel verband meer bestaat tussen het deel van de bovenrivieren vóór en het deel ná de splitsingspunten: niet langer volstaat één WAQUA-berekening om voor alle (afvoerdominante delen van de) Rijntakken de MHW's te bepalen. Deze toegenomen complexiteit dient geaccepteerd te worden.

3 Golfvorm als stochast

Op dit moment worden de HR voor de bovenrivieren berekend op basis van een gemiddelde (standaard) afvoergolf – in de modellen voor de Rijn opgelegd bij Lobith en voor de Maas bij Borgharen. Voor de Rijn is sprake van een vrij brede standaard afvoergolf, die weinig topvervlakking kent. Voor de Maas ligt dat anders: bij Borgharen is sprake van een vrij smalle (gepiekte) afvoergolf, die bij Lith flink breder is geworden, enerzijds door flinke topvervlakking vanwege berging, en anderzijds door laterale toestroming. Benedenstreams van Lith is, in het afvoerdominante deel van de Maas, de topvervlakking veel minder, en blijft de golfvorm ongeveer gelijk van vorm.

In dit hoofdstuk wordt onderzocht of het meerwaarde biedt om op het traject Borgharen - Lith de vorm van de afvoergolf probabilistisch mee te nemen in Hydra-Ring, waarbij in plaats van één gemiddelde standaardgolf ook smallere en bredere golven worden beschouwd.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden eerst de formules behandeld voor het probabilistisch verwerken van de vorm van de afvoergolf. Daarna wordt de zogenaamde golfvormgenerator besproken, waarmee verschillende typen golfvormen kunnen worden bepaald. Dan worden duuranalyses gedaan, op grond waarvan aan de typen afvoergolven kansen kunnen worden toegekend. Vervolgens worden keuzes van modelparameters besproken, waarna berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor de probabilistische behandeling van de vorm van de afvoergolf. Resultaat daarvan is een inschatting van MHW-veranderingen langs de Maas, als gevolg van het probabilistisch verwerken van de golfvorm.

Tot slot wordt bekeken wat voor Hydra-Ring de consequenties zijn van de genoemde probabilistische verwerking, voor de implementatie en het aantal benodigde productiesommen. Het hoofdstuk besluit met een advies over de aanpak in Hydra-Ring.

3.1 Formules

3.1.1 Berekening van de overschrijdingskans in de basisduur

In deze paragraaf worden de formules gegeven om de breedte van de golfvorm stochastisch te behandelen. In het model worden daarbij twee stochasten beschouwd: de piekafvoer te Borgharen en de breedte van de golfvorm. De stochastische verwerking van de breedte gebeurt daarbij door een aantal typen van golfvormen te beschouwen, variërend van smalle tot brede typen golven; één van deze typen golven wordt gelijk genomen aan de standaardafvoergolf (verwachtingswaarde), afkomstig uit de golfvormgenerator (zie hierover ook paragraaf 3.2).

Er wordt aangenomen dat de kansen op de typen golven onafhankelijk zijn van het beschouwde piekniveau. Deze aanname wordt hier verder niet onderbouwd. Een dergelijke onderbouwing zou ook erg lastig zijn – omdat het aantal echt hoge afvoergolven, waarvoor deze kansen nu juist relevant zijn – in de metingen beperkt is. Als dat aantal ook nog eens in verschillende klassen van piekafvoeren moet worden opgedeeld, wordt het erg lastig om per klasse een verschillende duurstatistiek af te leiden. Als men dit toch nader wil onderzoeken, lijkt het verstandig om met GRADE gegenereerde afvoergolven te onderzoeken, zie over GRADE o.m. [Wit De en Buishand, 2007]. Dan beschikt men over zoveel golven dat per klasse van piekafvoeren een aparte duurstatistiek is af te leiden. Overigens dient men wel af te wegen of

de complicatie van een duurstatistiek per afvoerniveau veel toevoegt, gezien het feit dat afvoeren sowieso al erg geschematiseerd worden. Dat laatste vormt ook een benadering van de werkelijkheid.

Hieronder worden de formules uit het model gegeven, vooraf gegaan door de definities van de belangrijkste grootheden, waarvan de precieze betekenis hieronder nog duidelijker zal worden:¹²

D	Parameter voor de duur (oftewel breedte) van de golfvorm te Borgharen. Beschouwd worden $d = 1, 2, \dots, N_D$ waarden, corresponderend met N_D typen golfvormen. Oplopende waarden corresponderen met toenemende breedtes van golven.	[-]
K	Piekafvoer te Borgharen	m^3/s
B	Basisduur van afvoergolven te Borgharen.	dag
N_B	Aantal basisduren dat past in het winterhalfjaar (whjaar).	[-]
$H_X(k,d)$	Waterstand op locatie X langs de Maas, als functie van de realisaties van de piekafvoer k en de duur(parameter) d .	$m+NAP$
$H_{X,ref}(k)$	Waterstand op locatie X die correspondeert met de gemiddelde standaardgolfvorm (referentiesituatie).	$m+NAP$
$\Delta h_X(k,d)$	De mate van topvervlakking t.o.v. de referentiesituatie, als functie van de realisaties van k en d .	m (of cm)
$k_X(h,d)$	De piekafvoer die, ter plaatse van X, bij een gegeven duur d , als waterstand niveau h oplevert.	
$f(d)$	Kans op een golfvorm met duur d .	[-]
$f(k)$	Kansdichtheid van de piekafvoer te Borgharen.	$1/(m^3/s)$
$P_B(H_X > h)$	Kans dat de waterstand op locatie X het niveau h overschrijdt, gedurende een afvoergolf die optreedt in basisduur B.	[-]
$F(H_X > h)$	Overschrijdingsfrequentie van waterstandniveau h , op locatie X.	1/jaar

De kans dat (op locatie X langs de Maas) gedurende de basisduur B het niveau h wordt overschreden, wordt gegeven door:

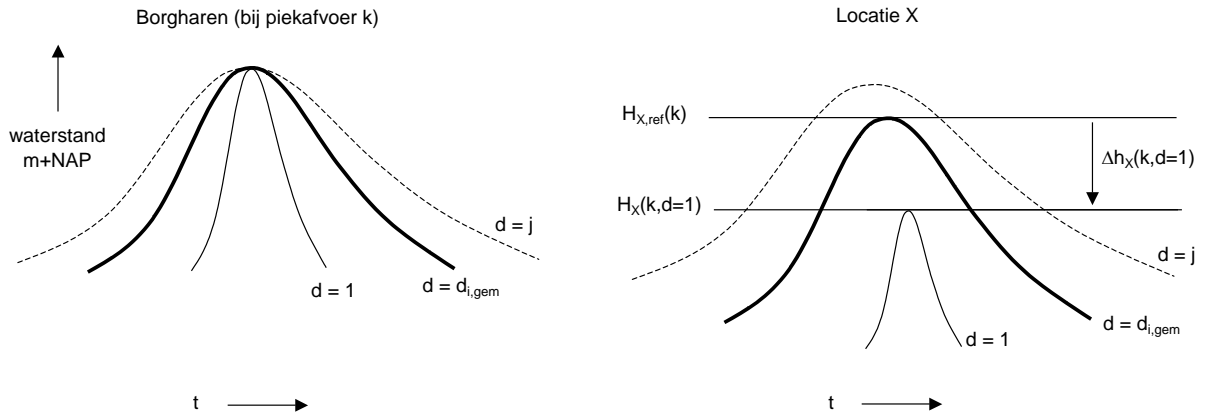
$$P_B(H_X > h) = \sum_{d=1}^{N_D} f(d) \int dk f(k) P_B(H_X > h | K = k, D = d) \quad (3.1)$$

waarbij $P_B(H_X > h | K = k, D = d)$ de kans op overschrijden van niveau h geeft, conditioneel op de waarden k en d .

Er wordt aangenomen dat H_X een functie is van k en d : $H_X = H_X(k,d)$. Verder wordt de grootheid $H_{X,ref}(k)$ beschouwd, die staat voor de waterstand op locatie X zoals bepaald door met SOBEK (of WAQUA) de gemiddelde standaardafvoergolf door te rekenen. Smalle golven geven meer topvervlakking dan de gemiddelde golf, terwijl bredere golven juist minder topvervlakking geven. De topvervlakking wordt, in termen van waterstanden, voor locatie X, bij piekafvoer k te Borgharen en golfparameter d , aangeduid als $\Delta h_X(k,d)$. Zie ter illustratie Figuur 3-1, waarvoor voor $d = 1$ (de smalste golf) de topvervlakking is weergegeven, t.o.v. de referentiesituatie. N.B. De golven kunnen verschillende looptijden hebben. Volgens de studie Verkenning Verruiming Maas, zie Tabel 3-5 uit [Barneveld et al, 2000], loopt een erg smalle golf langzamer

¹² De basisduur B en het aantal basisduren dat in het winterhalfjaar past (N_B) speelt in de uiteindelijke formules uit het model geen rol meer, zoals blijkt uit formule (3.6). Deze grootheden worden hier alleen geïntroduceerd om het verband met overige formules uit Hydra-Zoet en Hydra-Ring duidelijk te maken.

dan de gemiddelde golf, terwijl een heel bredere golf iets sneller loopt dan de gemiddelde; deze situatie is schetsmatig weergegeven in de figuur.



Figuur 3-1 Illustratie van de topvervlakking, in termen van waterstanden, in smalle en brede golven t.o.v. de gemiddelde golf (referentiegolf), met label $d = d_{i,gem}$.

Met de hiervoor gegeven definities van de referentiewaterstand en de topvervlakking, kan voor $H_X(k,d)$ worden geschreven:

$$H_X(k,d) = H_{X,ref}(k) + \Delta h_X(k,d) \quad (3.2)$$

Om (3.1) te herschrijven in een meer handzame vorm, is de piekafvoer nodig die, ter plaatse van X, bij een gegeven duur als waterstand niveau h oplevert. Deze piekafvoer wordt aangeduid als $k_X(h,d)$, oftewel:¹³

$$k_X(h,d) \text{ is de afvoer die voldoet } H_X(k_X(h,d),d) = h. \quad (3.3)$$

Voor afvoeren $k > k_X(h,d)$ geldt $H_X(k,d) > h$, en voor afvoeren $k < k_X(h,d)$ geldt $H_X(k,d) < h$. Met behulp van (3.3) kan de grootte (3.1) dan als volgt worden herschreven:¹⁴

$$P_B(H_X > h) = \sum_{d=1}^{N_B} f(d) \int_{k > k_X(k,d)}^{\infty} dk f(k) = \sum_{d=1}^{N_B} f(d) P(K > k_X(k,d)) \quad (3.4)$$

waarin $P(K > k)$ de overschrijdingskans van de piekafvoer te Borgharen geeft, beschouwd in de basisduur B.

3.1.2 Berekening van de overschrijdingsfrequentie uit Hydra-Zoet

Hiervoor is de overschrijdingskans $P_B(H_X > h)$, die de kans geeft dat in de basisduur B de waterstand niveau h overschrijdt. Deze kans kan eenvoudig worden omgerekend naar een overschrijdingsfrequentie $F(H_X > h)$, in keren per winterhalfjaar. Vermenigvuldig daartoe simpelweg de overschrijdingskans in de basisduur met het aantal basisduren N_B dat past in het winterhalfjaar:

$$F(H_X > h) = N_B P_B(H_X > h) \quad (3.5)$$

¹³ N.B. In de verderop beschouwde gegevens is er steeds een *unieke* piekafvoer k_0 te vinden als oplossing van de vergelijking $H_X(k_0,d) = h$.

¹⁴ We merken op dat in de hier beschouwde context $P_B(H_X > h | K=k, D=d)$ uit (3.1) in feite een indicatorfunctie is, met waarde 1 voor combinaties (k,d) die leiden tot een waterstand groter dan h, en waarde 0 voor combinaties (k,d) die leiden tot een waterstand kleiner dan h.

Omdat, zoals eerder gezegd in paragraaf 2.3.2, de overschrijdingsfrequentie $F(K>k)$ van de afvoer, in keren per winterhalfjaar, kan worden berekend als $F(K>k) = N_B P(K>k)$, kan op basis van (3.4) en (3.5) dan worden geschreven:

$$F(H_X > h) = \sum_{d=1}^{N_D} f(d) F(K > k_X(k, d)) \quad (3.6)$$

Hiermee is de overschrijdingsfrequentie $F(H_X > h)$ uitgedrukt in de kansen $f(d)$ op de duren d , de overschrijdingsfrequentie $F(K>k)$ van de piekafvoer te Borgharen, en grootheden van de vorm (3.3). Nadat benodigde modelparameters zijn bepaald (in paragraaf 3.3 en 3.4), wordt formule (3.6) gebruikt om voor diverse locaties/scenario's de overschrijdingsfrequentie te bepalen (zie paragraaf 3.5).

3.1.3 Berekening van overschrijdingskans voor het winterhalfjaar volgens aanpak uit Hydra-Ring

In Hydra-Ring wordt geen overschrijdingsfrequentie van niveau h bepaald voor het winterhalfjaar (whjaar), maar wordt de kans $P_{whj}(H_X > h)$ berekend dat gedurende het whjaar niveau h minstens één keer wordt overschreden. Met N_B het aantal trapezia in het whjaar, volgt die kans als

$$P_{whj}(H_X > h) = 1 - [1 - P_B(H_X > h)]^{N_B} \quad (3.7)$$

3.1.4 Variabele d als continue grootheid

In Hydra-Ring wordt veel gebruik gemaakt van FORM als numerieke rekentechniek [Roscoe et al, 2012]. Deze rekentechniek is minder nauwkeurig dan numerieke integratie, maar heeft als grote voordeel dat deze toegepast kan worden op een zeer groot aantal stochasten (wat niet mogelijk is voor numerieke integratie), en daarnaast enorm veel sneller is dan numerieke integratie. Voorwaarde voor FORM is wel dat de stochasten continu zijn, en niet discreet.

Het is aantrekkelijk om te onderzoeken of de variabele D , hiervoor als discrete stochast beschouwd, in Hydra-Ring als continue stochast kan worden behandeld. Dat betekent twee zaken:

- De discrete kansverdeling $f(d) = P(D = d)$ moet worden vervangen door een continue kansdichtheid $f_D(d)$.
- Om voor iedere combinatie (k, d) de grootheid $k_X(k, d)$ te bepalen, dient geïnterpoleerd te worden tussen de resultaten van een beperkt aantal berekeningen. Als bijvoorbeeld 9 waarden van k worden doorgerekend, in combinatie met 5 waarden van d , staan er $9 \cdot 5 = 45$ sommen ter beschikking waaruit de grootheid $k_X(k, d)$ door interpolatie moet worden bepaald.

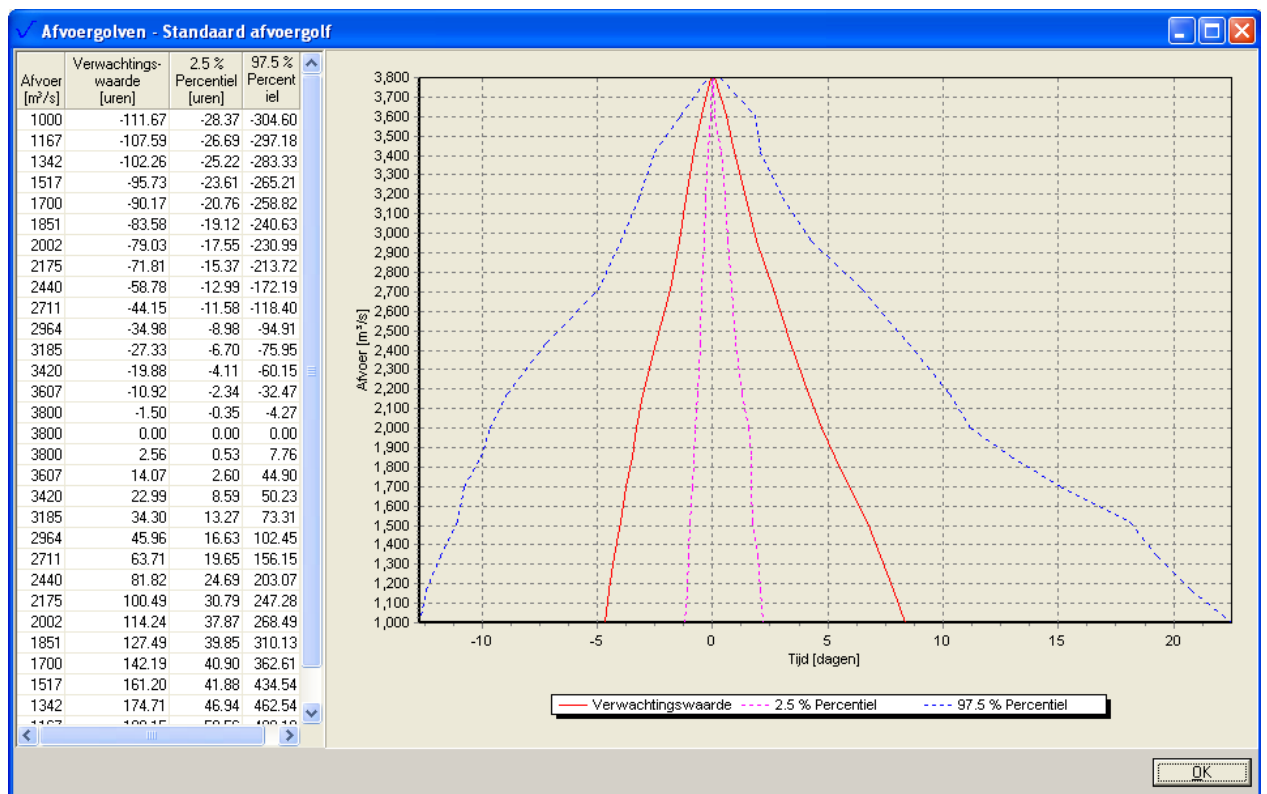
Het eerste punt zal geen probleem vormen. In welke mate het tweede een probleem vormt is minder duidelijk, maar ook dat lijkt goed mogelijk.

3.2 Golfvormgenerator

Standaardafvoergolven voor de Maas te Borgharen kunnen worden bepaald met de golfvormgenerator. Daarin wordt de zogenaamde opschalingsmethode gebruikt, voor de Maas

beschreven in [Klopstra en Vrisou van Eck, 1999], welke methode hier bekend wordt verondersteld. De golfvormgenerator geeft standaard als uitvoer de gemiddelde golfvorm, en daarnaast een smalle en een brede golf, die corresponderen met het p-de en (100-p)-de percentiel. Zie als voorbeeld Figuur 3-2, waarin resultaten worden gegeven voor piekwaarde $k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$ (de thans geldende maatgevende afvoer voor Borgharen).¹⁵

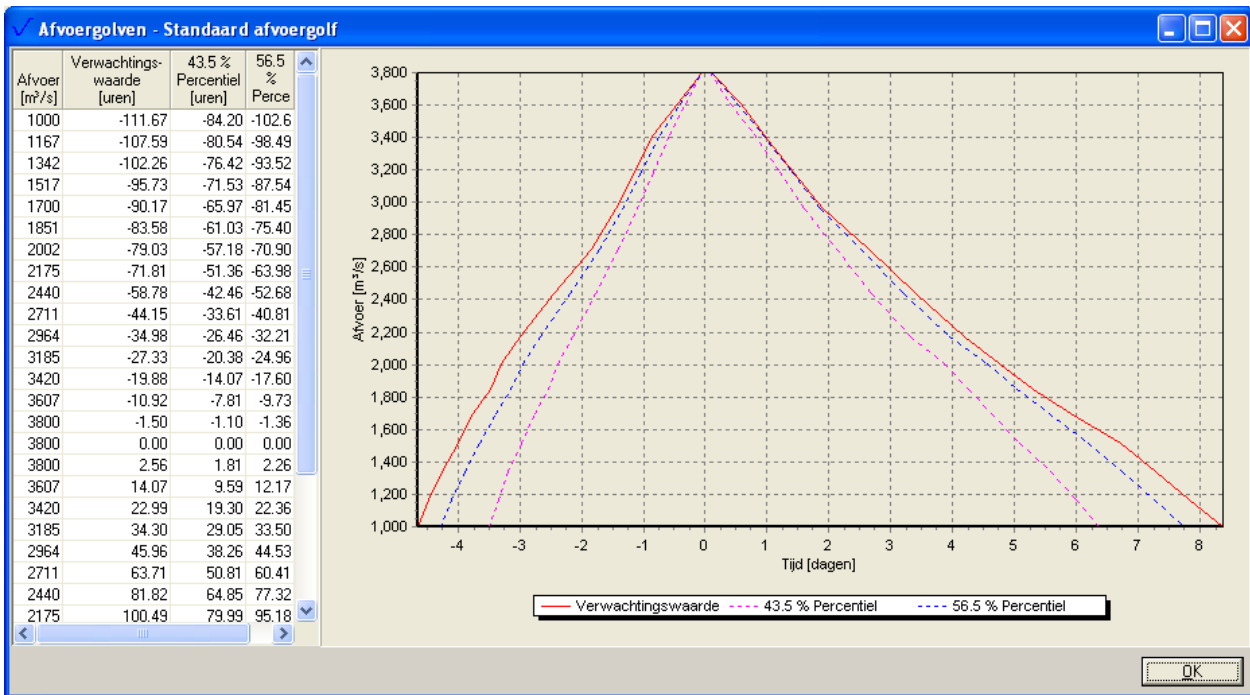
Standaard zijn in het verleden berekeningen gemaakt met de gemiddelde golf uit de generator, oftewel de "verwachtingswaarde". Volgens het rapport [AHA BV en Rura, 2013] is het echter beter gebruik te maken van een iets spitsere golf, die correspondeert met een volume rondom de top dat overeenstemt met een door Deltares afgeleide werklijn voor het volume.¹⁶ Iets preciezer gezegd heeft deze volume-werklijn betrekking op het gemiddelde debiet in de golf over het tijdsinterval [-25 uur, 38 uur], dat loopt van 25 uur voorafgaand aan de piek tot 38 uur vólgend op de piek. Volgens [AHA BV en Rura, 2013] correspondeert deze spitsere golf met een generatorgolf die hoort bij $p = 43.5\%$. Die golf is te zien in Figuur 3-3 (paarse gestreepte lijn).



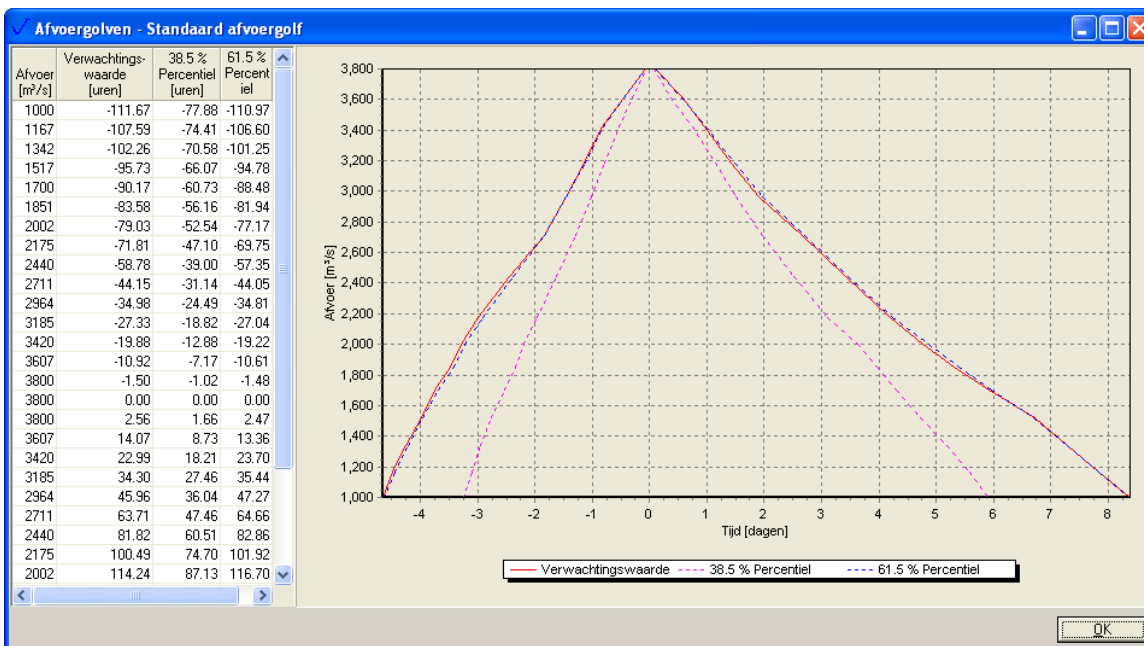
Figuur 3-2 Uitvoer golfvormgenerator voor Borgharen, tijdstap 10min-waarden, verwachtingswaarde, en $p = 2.5\%$ en $p = 97.5\%$.

¹⁵ N.B. De in dit rapport gebruikte versie van de generator is steeds versie 2.1.0, Golfvormgenerator RVW 2006.

¹⁶ Voor zover mij bekend zijn de resultaten van de analyse niet uitgebreid gerapporteerd, en is geen figuur beschikbaar waarin de volumina-data staan uitgezet tegen de "modelvolumina" volgens de werklijn. Wel worden in [AHA BV en Rura, 2013] andersoortige resultaten gegeven voor meerdere modelfits.



Figuur 3-3 Uitvoer golfvormgenerator voor Borgharen, tijdstap 10min-waarden, verwachtingswaarde, $p = 43.5\%$ (spitse golf die volume reproduceert) en $p = 56.5\%$.



Figuur 3-4 Uitvoer golfvormgenerator voor Borgharen, tijdstap 10min-waarden, verwachtingswaarde, en $p = 39.5\%$ en $p = 61.5\%$.

Daarnaast wordt in [AHA BV en Rura, 2013] gesteld dat de verwachtingswaarde van de golf overeenstemt met $p = 61.5\%$. Ter controle is, in Figuur 3-4, ook die golf gegenereerd door de generator. Inderdaad komt de verwachtingswaarde (nagenoeg) overeen met $p = 61.5\%$.

Bij de keuze van modelparameters (paragraaf 3.5) wordt een versie van de parameters beschouwd die overeenstemt met de gemiddelde golf (verwachtingswaarde), en daarnaast een versie die overeenstemt met de spitsere golf, die correspondeert met de volumina-werklijn.

Verderop in de analyses zijn duren nodig van de 2.5%-golf, de verwachtingswaarde en de 97.5%-golf, zoals die gelden voor het niveau dat 15% onder de piekwaarde ligt. Uit de gegevens van Figuur 3-2 kunnen deze duren door interpolatie worden afgeleid, bij absoluut niveau $0.85 \cdot 3800 = 3230 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Tabel 3-1.

	duur 15% onder de piekwaarde, uur
2.5%-golf	18.6
gemiddelde golf	58.0
97.5%-golf	141.8

Tabel 3-1 Duren op 15% onder de piekwaarde van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3 Opschalingsmethode en duuranalyses

3.3.1 Algemene opmerkingen over de opschalingsmethode

Als onderdeel van de modelparameters zijn volgens formule (3.6) kansen $f(d)$ nodig, die corresponderen met kansen op smallere en bredere afvoergolven. In principe zijn dergelijke kansen te bepalen door op een geschikte manier keuzes te maken voor percentielen in de generator. Die weg wordt hier echter niet gevolgd. Mijn *persoonlijke* mening is dat voor de *heel smalle* zowel als de *heel brede* golven uit de generator de resultaten niet erg betrouwbaar zijn, zowel wat de vorm van de golven betreft als de kansen op de golven. Dat wordt ook gesuggereerd door Figuur 3-2, waarbij voor de brede golf tijdens de val een merkwaardig steil deel te zien valt, tussen afvoeren 3400 en $3600 \text{ m}^3/\text{s}$, dat uit de toon valt bij de rest.

In het vervolg van paragraaf 3.3 worden analyses gedaan voor duren van golven. Daarbij worden wel opgeschaalde golven beschouwd, maar zonder gebruik te maken van de golfvormgenerator. In plaats daarvan wordt programmatuur gebruikt die is beschreven in [Beijk en Geerse, 2004]. Ook met deze (Matlab)programmatuur kunnen opgeschaalde golven worden bepaald, terwijl die programmatuur het beter mogelijk maakt duuranalyses uit te voeren.

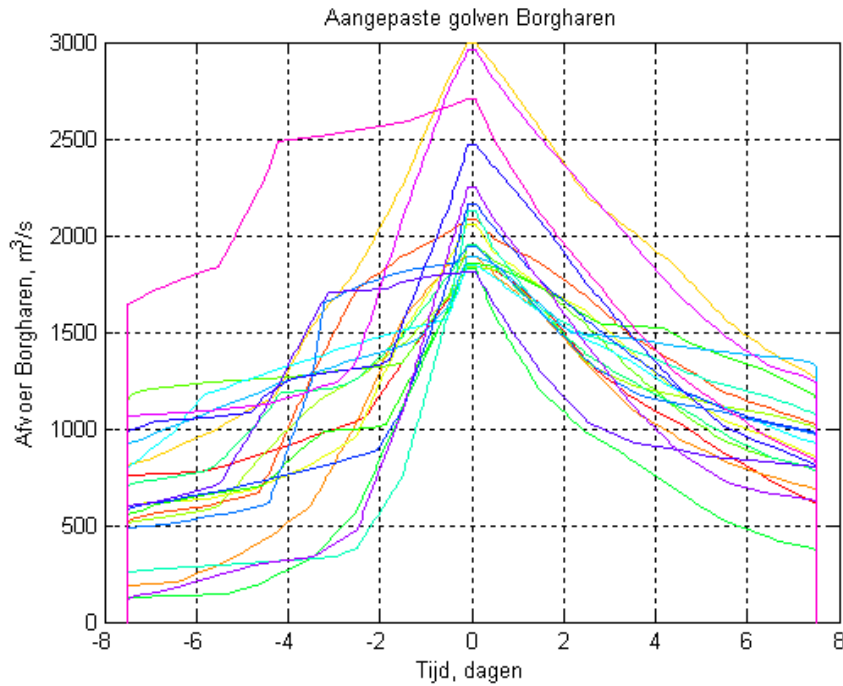
Terzijde nog het volgende. In [Beijk en Geerse, 2004] is toegelicht dat het eigenlijk *onnodig* is afvoergolven steeds apart op te schalen naar de diverse piekwaardes waar de interesse naar uitgaat. In plaats daarvan kan één standaardgolf worden bepaald door op te schalen naar de waarde 1 (deel per geselecteerde golf alle afvoeren binnen de golf door de piekwaarde van de golf). Als deze golf eenmaal is bepaald, kan een gewenste golf, bijvoorbeeld die met piekwaarde $3800 \text{ m}^3/\text{s}$, worden verkregen door de genormeerde (relatieve) afvoeren uit de standaardvorm alle te vermenigvuldigen met $3800 \text{ m}^3/\text{s}$.¹⁷ In het vervolg worden analyses naar duren van afvoeren daarom uitgevoerd voor genormeerde afvoergolven.

3.3.2 Opschaling van gemeten golven

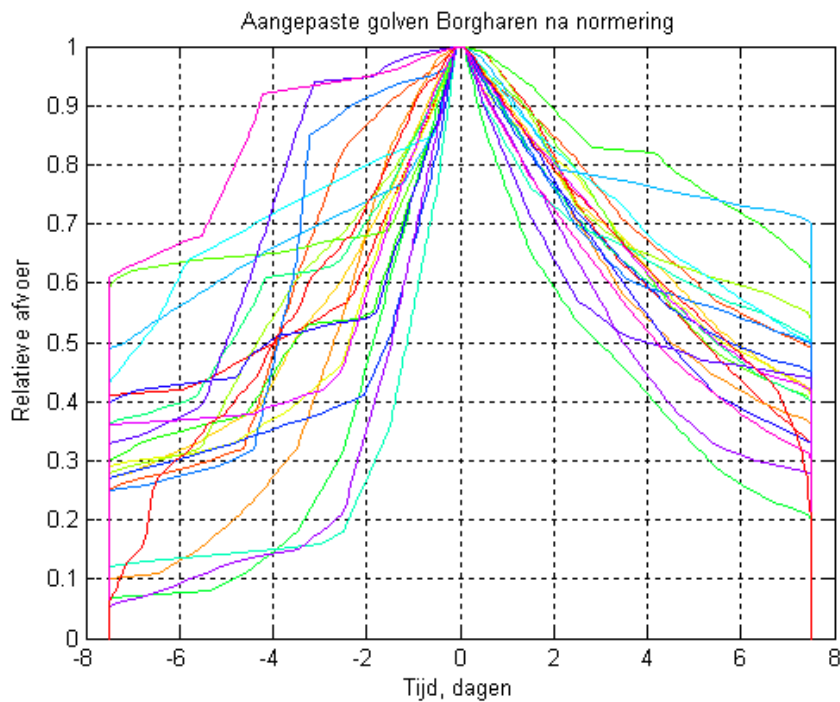
In de volgende analyses wordt gebruik gemaakt van een databestand voor Borgharen, bestaande uit dagwaarden van de afvoer, over de periode 01-01-1911 t/m 30-06-1999.¹⁸ Dit bestand bestaat t/m 1974 uit 8:00-waarden, en daarna uit 0:00-waarden. In de analyses

¹⁷ Voorwaarde is wel dat tijdens de opschaling steeds eenzelfde tijdsverloop van een geselecteerde golf wordt beschouwd, wat strikt genomen in de generator niet helemaal het geval blijkt te zijn. In de generator wordt bij opschaling naar de allerhoogste niveaus namelijk een iets langer deel van de geselecteerde golf gebruikt, zie voor meer details [Beijk en Geerse, 2004]. Terzijde wordt nog opgemerkt dat het inzicht uit deze referentie (namelijk dat één genormeerde standaardgolf volstaat om daaruit door vermenigvuldiging overige golven te bepalen) feitelijk ontleend is aan een niet meer te achterhalen WL-rapport, waarvan Ferdinand Diermanse medeauteur is.

¹⁸ Dit bestand is indertijd door Wout van Vuuren toegeleverd aan RWS-RIZA. Er is geen poging gedaan, gezien het beperkte karakter van de voorliggende analyse, een completer databestand te verkrijgen.



Figuur 3-6 Gemeten golven te Borgharen, $n = 20$, nadat deze zijn aangepast (nevenpieken samengevoegd met hoofdpiek, en een topverbreding van 4 uur).



Figuur 3-7 Genormeerde aangepaste golven te Borgharen, $n = 20$.

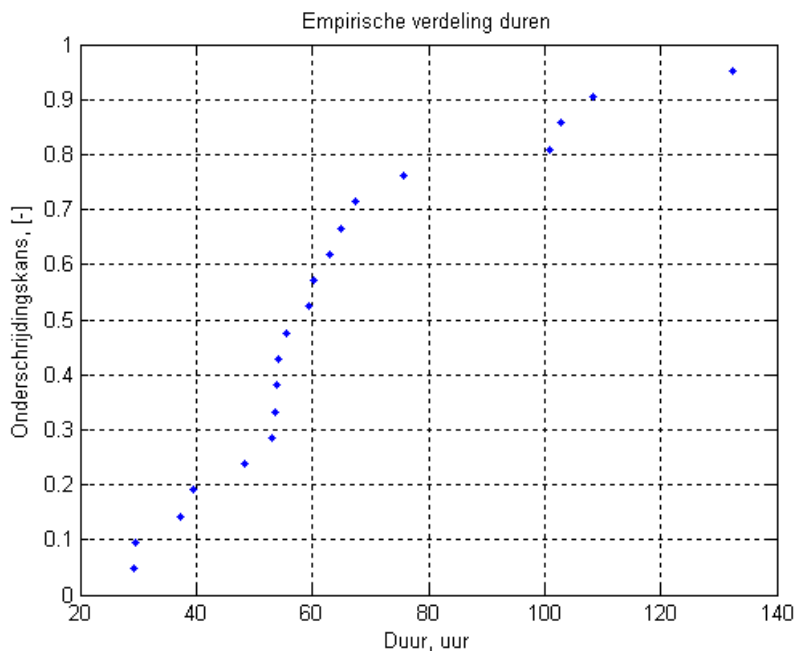
3.3.3 Duuranalyses voor relatief niveau $v = 0.85$

Voor de duuranalyses wordt nu de keuze gemaakt om binnen de genormeerde golven alleen duren te bekijken die horen bij het (relatieve) niveau $v = 0.85$. Hier volgt een motivatie van die keuze. Niveau $v = 0.85$ is equivalent met het bekijken van duren van de aangepaste (niet-genormeerde) golven uit Figuur 3-6, die liggen op niveaus die 15% onder de top liggen. Voor de gemiddelde golf uit de generator met piekwaarde $3800 \text{ m}^3/\text{s}$, is het niveau 15% onder de top

gelijk aan $0.85 \cdot 3800 = 3230 \text{ m}^3/\text{s}$. Door interpolatie tussen de gegevens uit Figuur 3-2 volgt dat dit niveau loopt van $t = -25.9$ uur in de voorflank tot $t = 32.1$ uur in de achterflank. Deze waarden stemmen ongeveer overeen met die waarop de werklijn voor de volumina (zie paragraaf 3.2) is gebaseerd. Vandaar dat $v = 0.85$ een plausibel niveau is om te bekijken.

Van elk van de 20 aangepaste, genormeerde golven uit Figuur 3-7 kunnen de duren op (relatief) niveau $v = 0.85$ worden bepaald. Het gemiddelde van deze getallen blijkt gelijk te zijn aan 64.5 uur.²¹ Die duur is iets langer dan de 58.0 uur uit de generator, maar stemt redelijk overeen; verschillen worden naar verwachting veroorzaakt door het feit dat in de generator iets andere golven aanwezig zijn dan in de onderhavige analyse.

De genoemde $n = 20$ duren kunnen ook worden geordend naar grootte, en dan worden uitgezet tegen hun zogenaamde "empirische onderschrijdingskans", waarbij hier als plotpositie $1-i/(n+1)$ wordt gebruikt, met i het rangnummer van de waarneming ($i = 1$ de hoogste waarneming). De hoogste waarneming krijgt dus onderschrijdingskans $1-1/(n+1)$, de op één na hoogste onderschrijdingskans $1-2/(n+1)$, etcetera... De aldus resulterende empirische verdeling is weergegeven in Figuur 3-8.



Figuur 3-8 Empirische verdeling van de $n = 20$ duren uit de aangepaste, genormeerde golven, op niveau $v = 0.85$.

Voor de stochastische verwerking van de duren/breedtes van golven, dient een aantal klassen van duren te worden beschouwd. We kiezen hier voor $N_D = 5$ klassen. De klassemiddens worden gekozen zoals in het bovenste deel van Tabel 3-2 (de overige rijen worden onderstaand besproken). Merk op dat deze klassen het gemeten bereik redelijk afdekken. Het 2-de en 3-de klassemiddens is gelijk genomen aan de duren (bij $v = 0.85$), zie Tabel 3-1, die corresponderen

²¹ In paragraaf 3.3.2 is gesteld dat het hanteren van een piekverbreding van 4 uur een verwaarloosbare invloed heeft op het bepalen van de kansen $f(d)$. Voorwaarde daarvoor is dat de duren op relatief niveau 0.85 niet of nauwelijks worden beïnvloed door de keuze van de topverbreding. Ter informatie melden we dat de gemiddelde duur van 64.5 uur, corresponderend met piekverbreding 4 uur, gelijk wordt aan 64.4 uur zonder enige piekverbreding, en gelijk wordt aan 65.0 uur bij een piekverbreding van 24 uur. De keuze van de piekverbreding heeft dus, als deze maximaal 1 dag lang is, een volstrekt verwaarloosbare invloed op de duren bij relatief niveau $v = 0.85$.

met respectievelijk de gemiddelde golf uit de generator (58.0 uur), en de spitse golf daaruit die het volume volgens de volumina-werklijn reproduceert (46.4 uur).

duurparameter d =		1	2	3	4	5	
klassemiddens (uur) =		30	46.4	58	70	110	
Kansen voor scenario's:							som kansen
S1	referentie:prob. scenario (gem 58.0 uur)	0.26	0.23	0.19	0.17	0.15	1
S2	prob. scenario (gem 46.4 uur)	0.42	0.25	0.21	0.08	0.04	1
S3	deterministische duur (58.0 uur)	0	0	1	0	0	1
S4	deterministische duur (46.4 uur)	0	1	0	0	0	1

Tabel 3-2 Keuze van de klassemiddens, met scenario's voor klassekansen.

De volgende stap is dat nu kansen $f(d)$ aan deze klassemiddens worden toegekend. Daarbij worden twee (probabilistische) scenario's voor de duur beschouwd: in het ene scenario – de referentie S1 – is de eis dat de kansen $f(d)$ zodanig zijn dat ze als gemiddelde de waarde 58.0 uur opleveren²²; in het andere scenario (S2) is de eis dat de kansen gemiddeld 46.4 uur opleveren. De kansen voor deze scenario's zijn eveneens vermeld in Tabel 3-2. Ter illustratie: het gemiddelde van 46.4 uur is berekend als:

$$0.42 \cdot 30 + 0.25 \cdot 46.4 + 0.21 \cdot 58.0 + 0.08 \cdot 70 + 0.04 \cdot 110 = 46.4 \text{ uur} \quad (3.8)$$

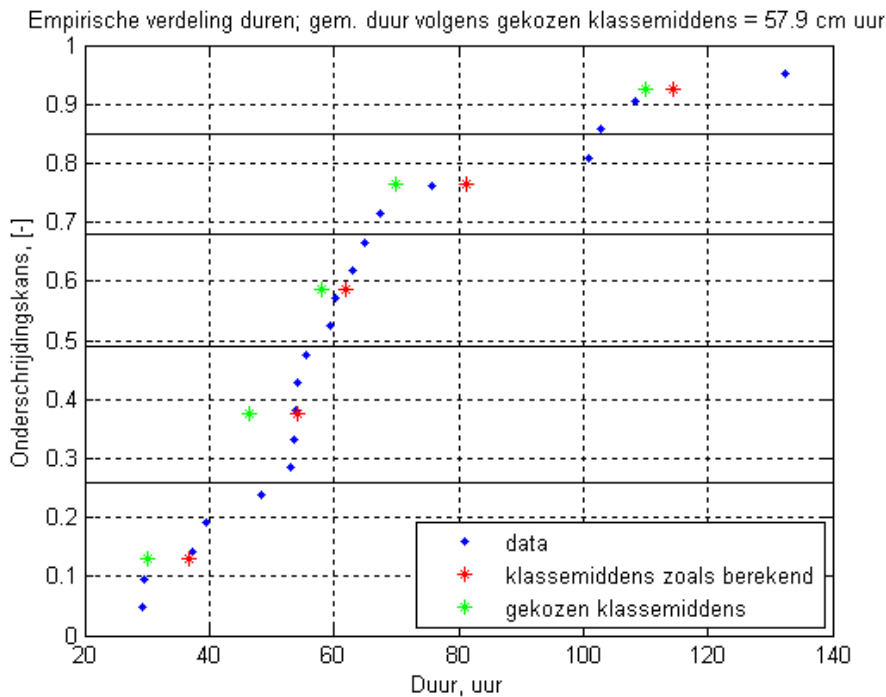
De genoemde probabilistische scenario's zullen in paragraaf 3.5 worden gebruikt om de effecten van het probabilistisch meenemen van de duren van golven op de MHW's te bepalen. In die berekeningen worden ter vergelijking ook deterministische scenario's beschouwd: één scenario (S3) waarin alleen de duur 58.0 uur voorkomt, en één scenario (S4) waarin alleen de duur 46.4 uur voorkomt. Die scenario's zijn eveneens aangegeven in Tabel 3-2.

Zojuist zijn twee probabilistische scenario's ingevoerd, die vooraf gewenste gemiddelde duren opleveren. Uiteraard dienen de kansen uit deze scenario's redelijkerwijs overeen te stemmen met de data uit Figuur 3-8. Voor het referentiescenario S1 wordt dat getoond in Figuur 3-9. Deze figuur bevat de volgende onderdelen:

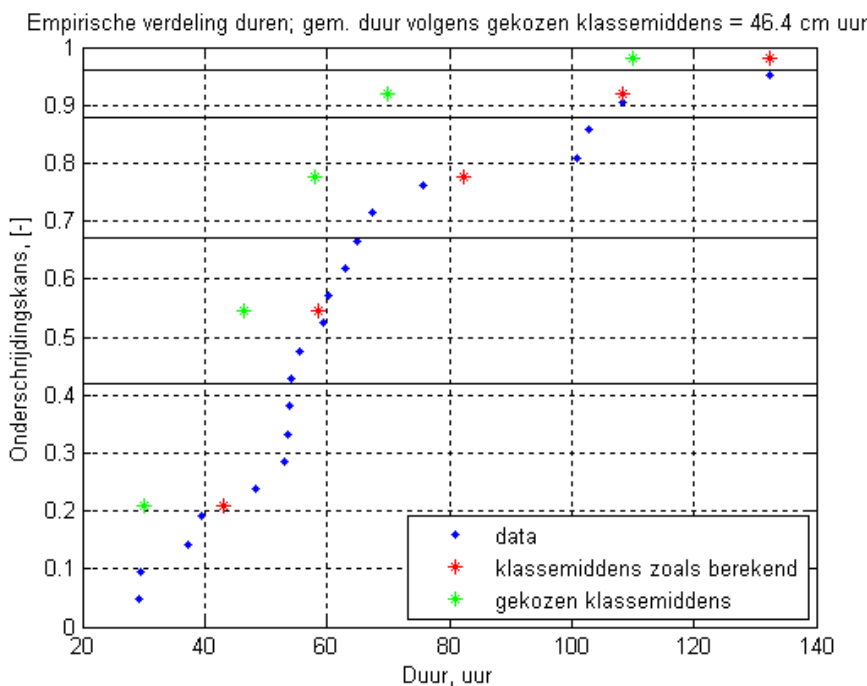
1. De data uit Figuur 3-8.
2. Horizontale lijnen die de klassegrenzen weergeven.
3. De gekozen klassemiddens (groene sterretjes) uit Tabel 3-2, die halverwege tussen de klassegrenzen zijn geplott.
4. De klassemiddens (rode sterretjes) die zijn bepaald door de duren van de punten binnen een en dezelfde klasse te middelen.

Merk op dat de berekende klassemiddens net iets hoger liggen dan de gekozen middens. Dat is ook plausibel, omdat zoals eerder opgemerkt, de middeling van de 20 duren een waarde oplevert van 64.5 uur, wat iets hoger is dan de 58.0 uur volgens de generator. De verschillen tussen de gekozen en berekende middens zijn echter niet zo groot; verwacht moet worden dat bij een iets andere selectie van de data, op dezelfde manier als gedaan t.b.v. de generator, de verschillen nog kleiner worden.

²² Strikt genomen is het gemiddelde 57.9 uur, wat erg dicht in de buurt ligt.



Figuur 3-9 Referentiescenario S1 voor de kansen $f(d)$, tezamen met de duren volgens de data.



Figuur 3-10 Probabilistisch scenario S2 voor de kansen $f(d)$ dat gemiddeld 46.4 uur oplevert, tezamen met de duren volgens de data.

Laten we nu eenzelfde figuur maken voor de kansen die 46.4 uur als gemiddelde opleveren (Figuur 3-10). Nu liggen de berekende klassemiddens veel hoger dan de gekozen middens. Dat suggereert sterk dat de duur van 46.4 uur niet te verenigen valt met de data, ook niet als deze data iets anders geselecteerd zouden worden. Oftewel: de duur die het volume volgens de volumina-werklijn reproduceert, stemt niet overeenstemt met de (gemiddelde) duur volgens de opschalingsmethode. Mijns inziens houdt dat in dat het extrapoleren van volumina "op

gespannen voet staat" met de opschalingsmethode. Welke methode de beste beschrijving geeft voor "werkelijke" extreme omstandigheden kan op basis van het hier gepresenteerde onderzoek echter niet worden uitgemaakt.

De belangrijke vraag voor het vervolg is met name of het probabilistisch meenemen van de duur/breedte van afvoergolven effect heeft op de MHW's langs de Maas. Het antwoord op die vraag is sowieso te geven: het is dan slechts van belang om te zien wat de verschillen zijn tussen S1 en S3. Deze verschillen moeten een maat zijn voor het probabilistisch meenemen van de duur van de golven. Een alternatief is te kijken naar de verschillen tussen S2 en S4. Deze verschillen worden besproken in paragraaf 3.5.

3.4 Keuze modelparameters

3.4.1 Overschrijdingsfrequentie Borgharen

De overschrijdingsfrequentie $F(K > k)$ voor Borgharen, in keren/jaar, wordt gelijk genomen aan:

$$F(K > k) = \exp\left(-\frac{k-1488.7}{324.8}\right), \quad k \geq 902 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.9)$$

Deze overschrijdingskans stemt voor afvoeren groter dan $3280 \text{ m}^3/\text{s}$ (corresponderend met terugkeertijd $T = 250$ jaar) overeen met de overschrijdingsfrequentie (werklijn) volgens de HR2001 uit [Kalk et al, 2001]. Voor lagere afvoeren geldt voor de HR2001 een andere beschrijving, maar omdat we voor de gevoeligheidsanalyse uitsluitend geïnteresseerd zijn in de hogere en extreme afvoeren, is deze beschrijving in deze context toereikend.

Opmerking over de afvoeren voor $T = 1250$ en 250 jaar

De maatgevende afvoer volgens (3.9) is gelijk aan $3805 \text{ m}^3/\text{s}$. In veel rapporten wordt echter als maatgevende afvoer voor de HR2001 (en HR2006) de waarde $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ gehanteerd. In het vervolg zullen we dit kleine verschil van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ verwaarlozen, en simpelweg spreken van een maatgevende afvoer volgens (3.9) van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$. Daarnaast wordt in veel rapporten een $T = 250$ jaar afvoer gehanteerd van $3275 \text{ m}^3/\text{s}$, hoewel die waarde volgens (3.9) gelijk is aan $3280 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook in dat geval zullen we het verschil van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ verwaarlozen, en een $T = 250$ jaar afvoer aanhouden van $3275 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4.2 Locatiegegevens

Er worden in de analyses uit dit hoofdstuk drie locaties beschouwd, die zijn weergegeven in Tabel 3-3. Deze tabel bevat ook de MHW's en de decimeringswaarden h_{dec} . Deze gegevens hebben dezelfde betekenis als beschreven in paragraaf 2.3.1. De twee laatste kolommen worden uitgelegd in paragraaf 3.4.3.

Locatie	MHW, m+NAP	h_{dec} , m	parameters $H_x Q_{\text{Borg}}$ - relatie	
			C, m / (m ³ /s)	D, m+NAP
Roermond, km 79	22.0	0.90	1.203E-03	17.42
Boxmeer, km 150	14.5	0.71	9.494E-04	10.89
Lith, km 201	7.5	0.73	9.761E-04	3.79

Tabel 3-3 Gebruikte locatiegegevens (afgestemd op $T = 1250$ jaar).

We melden hier slechts dat de MHW's gelden voor de HR2006 situatie, en dat deze zijn afgestemd op $T = 1250$ jaar. Voor Roermond, dat een normterugkeertijd heeft van 250 jaar, is het "norm-MHW" omgerekend naar het MHW voor $T = 1250$ jaar, door gebruik te maken van de

aangegeven decimeringswaarde. De gebruikte decimeringswaarden zijn afkomstig uit [Bouw, 2008].²³ Overigens heeft de keuze van de MHW's geen invloed op de conclusies en bevindingen voor wat betreft het effect van het stochastisch meenemen van de duur van de afvoergolven. De MHW's vormen niet meer dan een hulpmiddel in de uitleg. De gebruikte decimeringswaarden hebben wel enige invloed op de bevindingen, zij het dat die invloed gering is.

3.4.3 Keuzes voor referentiewaterstand

Een van de grootheden in de formules uit paragraaf 3.1 is de referentiewaterstand $H_{X,ref}(k)$. Deze grootheid wordt voor elke beschouwde locatie X zo gekozen, dat deze voor de referentiegolfduur, namelijk 58.0 uur, overeenstemt met het MHW en h_{dec} ter plaatse van X. Er geldt:²⁴

$$H_{X,ref}(k) = Ck + D \quad (3.10)$$

De constanten C en D zijn zo gekozen, dat ze het MHW en de decimeringswaarde ter plaatse van X opleveren, uitgaande van de overschrijdingsfrequentie $F(K > k)$ uit (3.9). Zie voor de in dit onderzoek gebruikte waarden Tabel 3-3.

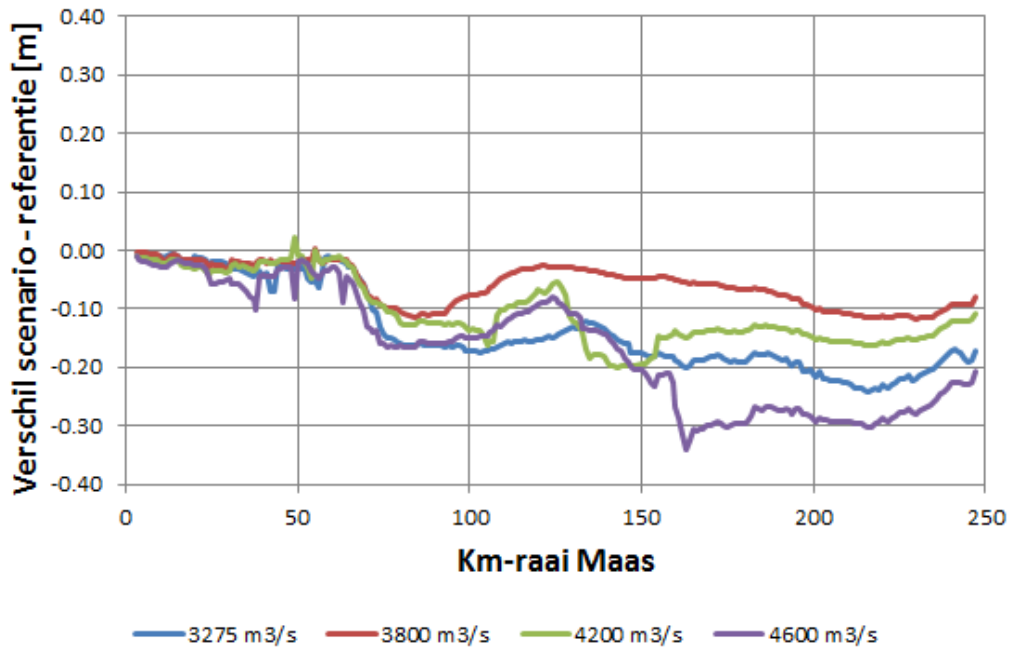
3.4.4 Keuzes voor topvervlakking

Nu wordt ingegaan op de keuze van de topvervlakking $\Delta h_X(k,d)$. Om geschikte waarden hiervoor te vinden zijn de volgende bronnen gebruikt:

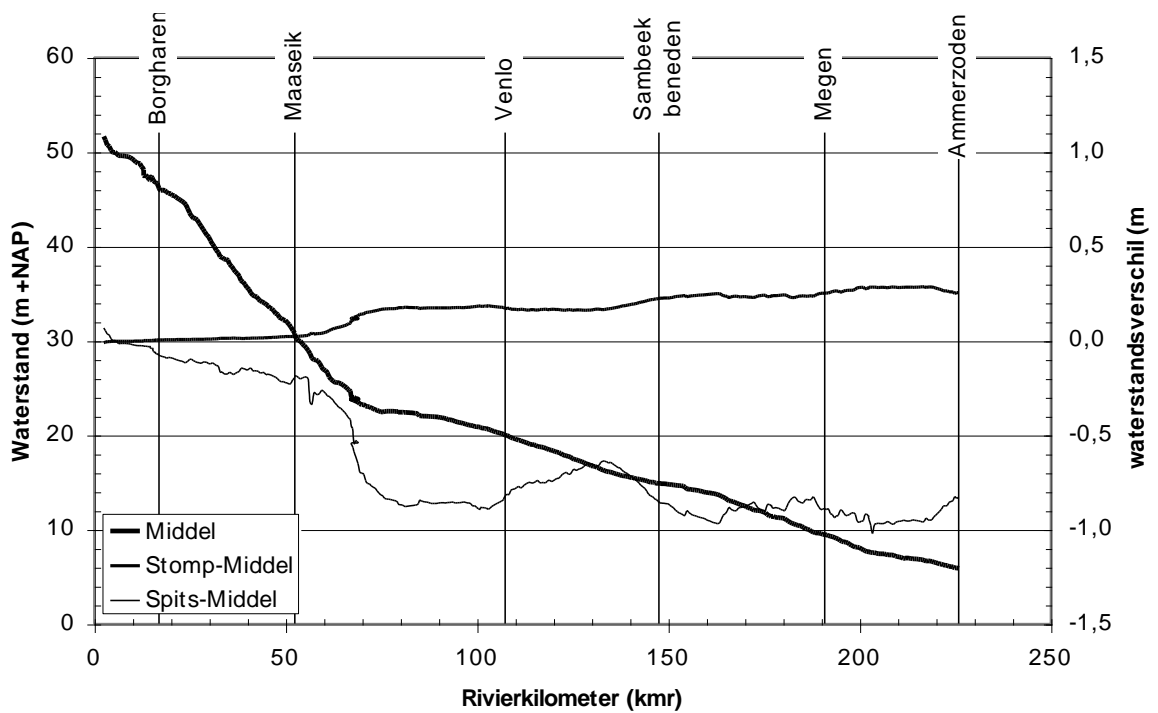
1. Het rapport [AHA BV en Rura, 2013]. In deze studie zijn waterstanden langs de Maas bepaald, uitgaande van piekwaarden te Borgharen van 3275, 3800, 4200 en 4600 m³/s, voor de volgende golven (zie Figuur 3-11):
 - a. de gemiddelde golfvorm uit de generator, die correspondeert met de referentiegolfvorm uit de onderhavige studie,
 - b. de spitsere golf uit de generator, met $p = 43.5\%$, die het volume volgens de volumina-werklijn reproduceert.
2. De studie Verkenning Verruiming Maas (VVM), zie [Barneveld et al, 2000]. In deze studie zijn waterstanden langs de Maas bepaald, uitgaande van piekwaarden te Borgharen van 3275 m³/s en 3800 m³/s, voor de volgende golven (zie Figuur 3-12 en Figuur 3-13):
 - a. de gemiddelde golfvorm uit de generator, die correspondeert met de referentiegolfvorm uit de onderhavige studie,
 - b. de $p = 2.5\%$ -golf uit de generator,
 - c. de $p = 97.5\%$ -golf uit de generator.

²³ Twee opmerkingen. (1) de decimeringswaarden zijn feitelijk berekend met TMR2006 gegevens. (2) de decimeringswaarde voor Boxmeer ontbreekt in dat rapport; de gebruikte waarde is afkomstig van km 152.

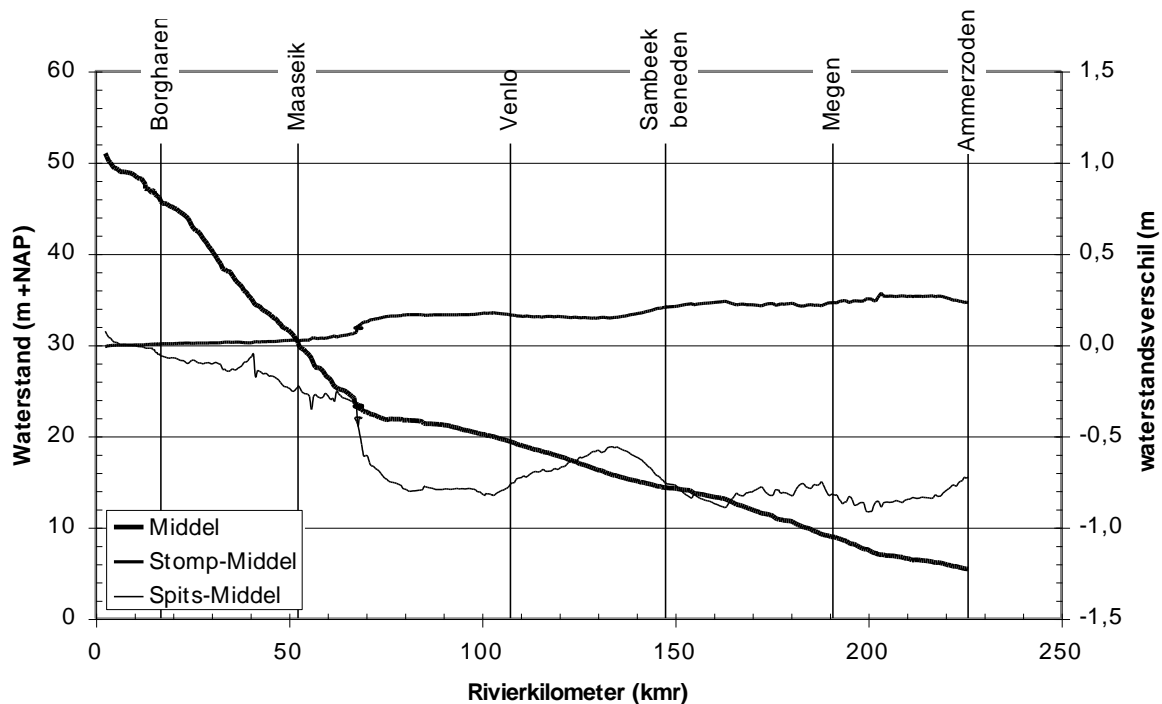
²⁴ Merk op dat de afvoer ter plaatse van X vanwege topvervlakking niet dezelfde afvoer hoeft te zijn als die ter plaatse van Borgharen.



Figuur 3-11 Effect van het rekenen met een spitsere golf ($p = 43.5\%$ -golf), t.o.v. de gemiddelde golf uit de generator. Bron: Figuur 4.7 uit [AHA BV en Rura, 2013].



Figuur 3-12 Maximale waterstanden (linker as) bij gemiddelde golf met piekafvoer $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen, alsmede verschillen (rechter as) met de 2.5%- en de 97.5%-golf. Bron: Figuur 3-1 uit [Barneveld et al, 2000].



Figuur 3-13 Maximale waterstanden (linker as) bij gemiddelde golf met piekafvoer $3275 \text{ m}^3/\text{s}$ te Borgharen, alsmede verschillen (rechter as) met de 2.5%- en de 97.5%-golf. Bron: Figuur 3-3 uit [Barneveld et al, 2000].

Voor een juiste interpretatie van Figuur 3-12 en Figuur 3-13 is het volgende van belang. In een laat stadium van de werkzaamheden is duidelijk geworden dat de in VVM gebruikte versie van de generator andere duren van golven geeft dan de latere versie 2.1.0, waarmee de uitvoer in Figuur 3-2 t/m Figuur 3-4 is gemaakt. In de berekeningen uit de onderhavige studie is echter (abusievelijk) aangenomen dat de smalle en de gemiddelde golf uit VVM overeenstemmen met de golven uit de latere versie 2.1.0. Op grond van later beschikbaar gekomen gegevens, zouden in de voorliggende studie voor de gemiddelde golf en de 2.5%-golf uit VVM andere duren op het niveau 0.85 zijn aangehouden. Voor de 97.5%-golf uit VVM is op het niveau 0.85 overigens wel een tamelijk goede duur aangehouden, namelijk 195 uur (op het oog afgelezen uit Figuur 2-1 van [Barneveld et al, 2000]).²⁵ Verwacht moet worden dat het werken met verbeterde getallen niet veel invloed zou hebben op de resultaten (zie paragraaf 3.5) van de voorliggende studie. Daarom zijn de berekeningen niet opnieuw gedaan.

Na deze kanttekening pakken we de draad op met het afleiden van (geschatte) waarden voor de topvervlakking, voor meerdere piekwaarden van de golven en voor meerdere duren van de golven. Hoe die ruwe inschatting tot stand is gekomen, wordt nu uitgelegd, aan de hand van de gegevens voor Lith (km 201), voor piekafvoer $3800 \text{ m}^3/\text{s}$.

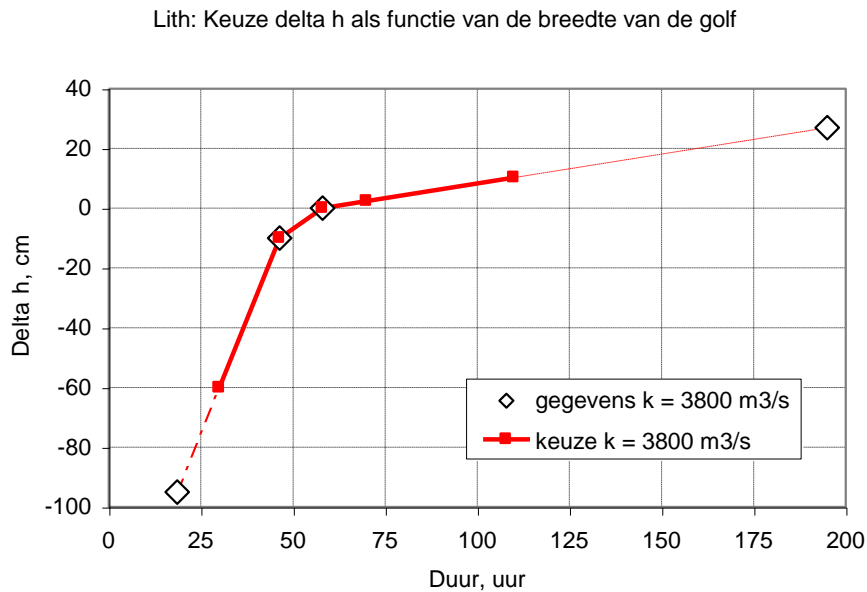
Bekijk daartoe Tabel 3-4. Voor de duur 58.0 uur is een topvervlakking Δh van 0 cm genomen, omdat deze duur de referentie vormt. De topvervlakking $\Delta h = -10 \text{ cm}$ voor de duur 46.4 uur is, ter plaatse van km 201, (op het oog) afgelezen uit Figuur 3-11. Hiermee is de herkomst van de middelste twee rijen duidelijk.

²⁵ Ter informatie: volgens inmiddels bekende gegevens levert de golfvormgenerator die in VVM is gebruikt (bij niveau $v = 0.85$) voor de 2.5%-golf, gemiddelde golf en 97.5%-golf de duren 20.0 uur, 70.3 en 186.7 uur. Deze duren verschillen, met name voor de gemiddelde golf en de 97.5%-golf, duidelijk van die voor versie 2.10 uit Tabel 3-1.

duur, uur	Δh , cm
	gegevens $k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$
18.6	-95
46.4	-10
58.0	0
195	27

Tabel 3-4 Keuze topvervlakking Lith (km 201), op basis van beschikbare gegevens.

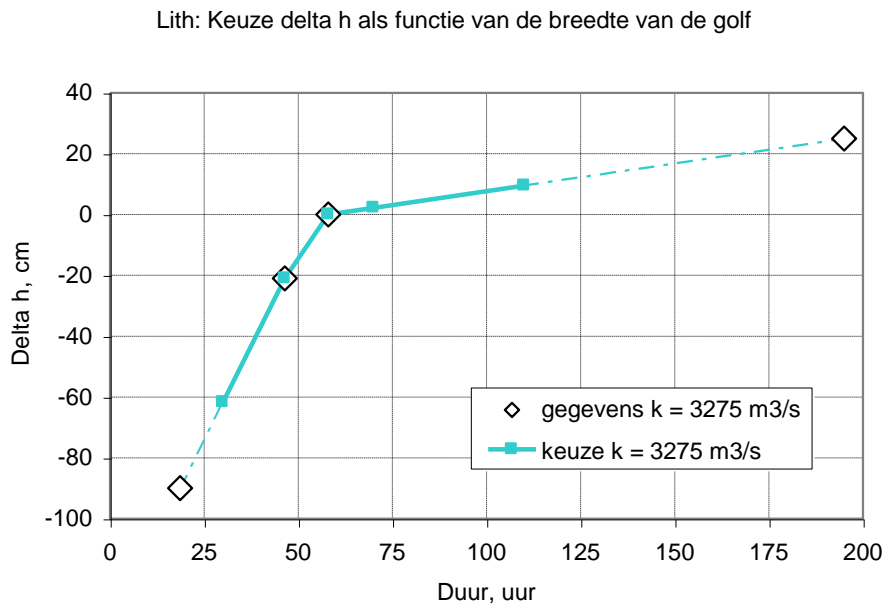
De getallen -95 cm en 27 cm zijn afgelezen uit Figuur 3-12, door te kijken naar de verschillen t.o.v. de referentie voor respectievelijk de 2.5%-golf en de 97.5%-golf. Aan de smalle en aan de brede golven zijn, op het niveau $v = 0.85$, zoals hiervoor uitgelegd duren toegekend van 18.6 uur en 195 uur. Hiermee is duidelijk hoe de getallen uit Tabel 3-4 zijn bepaald.



Figuur 3-14 Grafische weergave van de getallen uit Tabel 3-4, voor $k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$, en extra geïnterpoleerde gegevens.

De getallen uit Tabel 3-4 zijn ook grafisch uitgezet, zie de punten gemarkeerd door een ruit in Figuur 3-14. Voor de eerder gemaakte klasse-indeling, zie Tabel 3-2, moeten echter ook topvervlakkingen Δh beschikbaar zijn voor duren 30, 70 en 110 uur. Deze topvervlakkingen zijn bepaald door (lineair) te interpoleren op basis van de gegevens uit Tabel 3-4. Ook deze geïnterpoleerde waarden zijn aangegeven in Figuur 3-14.

Tot zover de keuzes van de topvervlakkingen $\Delta h_x(k=3800, d)$, voor $d = 1, 2, \dots, 5$. Voor $k = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$ kan op soortgelijke wijze te werk worden gegaan, met als resultaat Figuur 3-15.



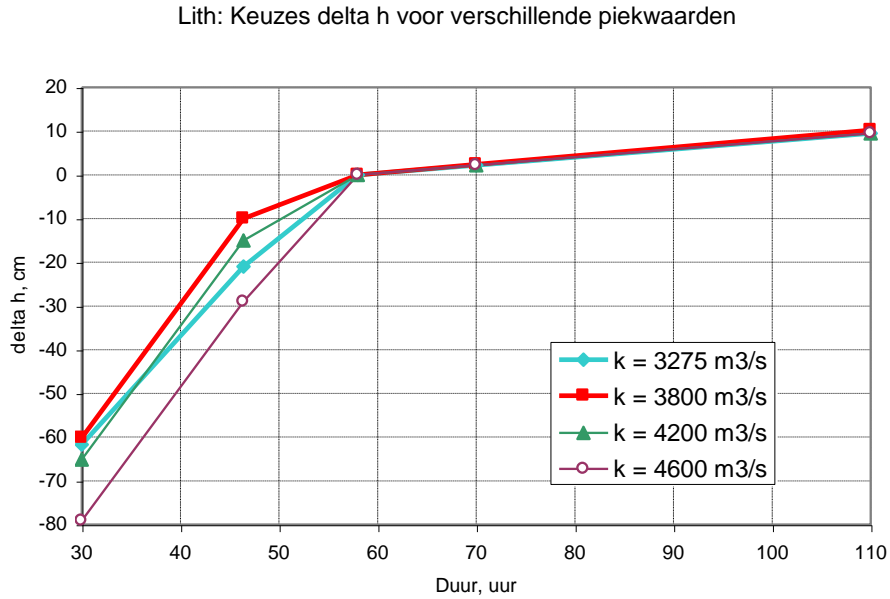
Figuur 3-15 Grafische weergave van de gekozen topvervlakkingen te Lith, voor $k = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$.

Voor $k = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ en $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn alleen gegevens uit [AHA BV en Rura, 2013] beschikbaar, maar niet uit de studie VVM. Hoe de ontbrekende getallen gekozen zijn, wordt nu uitgelegd. Zie daartoe Tabel 3-5. De geel gemarkeerde getallen stemmen overeen met de "bekende" gegevens uit Tabel 3-4, die direct zijn afgelezen uit de hiervoor gegeven Figuur 3-11 t/m Figuur 3-13. De groen gemarkeerde getallen zijn daaruit bepaald door interpolatie. N.B. de geel en groen gemarkeerde getallen uit de kolommen voor 3275 en $3800 \text{ m}^3/\text{s}$, komen ook voor als de keuzes in Figuur 3-14 en Figuur 3-15. De geel gemarkeerde getallen uit de kolommen voor 4200 en $4600 \text{ m}^3/\text{s}$, zijn daaraan toegevoegd, door deze af te lezen uit Figuur 3-11.

duur, uur	Δh , cm			
	$k = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$
30	-61.7	-60.1	-65.1	-79.1
46.4	-21.0	-10.0	-15.0	-29.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	2.2	2.4	2.2	2.2
110	9.5	10.2	9.5	9.5

Tabel 3-5 Gekozen topvervlakkingen voor Lith, km 201. Variant V1.

Hoe de overblijvende "witte" cellen uit de tabel zijn bepaald, wordt toegelicht aan de hand van Figuur 3-16, waarin de getallen uit de tabel grafisch zijn weergegeven. Hieraan is te zien dat voor duren 70 en 110 uur, de waarden Δh eenvoudig gelijk zijn genomen aan die voor afvoer $3275 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor duur 30.0 uur, is een Δh gekozen op zo'n manier dat op het interval [30.0, 46.4] de lijnen voor afvoeren 4200 en $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ evenwijdig lopen aan de lijn voor 3800 m^3/s . De keuzes uit Tabel 3-5 worden in het vervolg de basisvariant genoemd, aangeduid als variant V1.

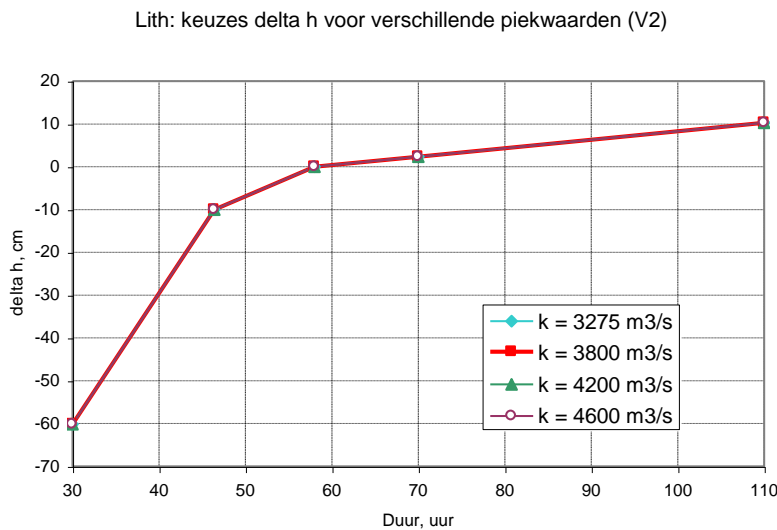


Figuur 3-16 Grafische weergave van de getallen uit Tabel 3-5, variant V1.

Uiteraard zijn aspecten van keuzes uit V1 arbitrair, wat met name geldt voor de "witte cellen" uit de tabel. Als een variant op V1 wordt een situatie beschouwd waarin de topvervlakkingen onafhankelijk van de afvoer worden genomen. Dat is variant V2, zie Tabel 3-6 en Figuur 3-17.

duur, uur	$\Delta h, \text{ cm}$			
	k = 3275 m3/s	k = 3800 m3/s	k = 4200 m3/s	k = 4600 m3/s
30	-60.1	-60.1	-60.1	-60.1
46.4	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	2.4	2.4	2.4	2.4
110	10.2	10.2	10.2	10.2

Tabel 3-6 De keuzes voor de topvervlakkingen te Lith volgens variant V2.



Figuur 3-17 Grafische weergave van de keuzes voor de topvervlakkingen te Lith volgens variant V2.

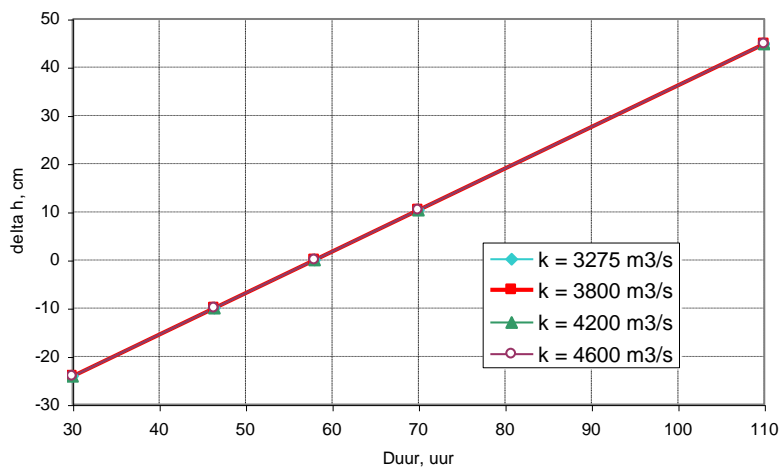
Merk op dat de topvervlakking als functie van de duur een verre van lineair verloop heeft: bij langere duren vlakt de helling van de lijnen in de figuren duidelijk af. Als extra variant (V3)

wordt ook een situatie beschouwd met een lineair verloop van de topvervlakking met de duur. Die variant geeft geen reële situatie weer, maar is wel interessant om door te rekenen en vervolgens te vergelijken met V1 en V2. De keuzes uit V3 zijn te zien in Tabel 3-7 en Figuur 3-18. Merk op dat de helling van de lijn in de figuur, gelijk is genomen aan het traject van duren dat voor $k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$ loopt van 46.4 tot 58.0 uur (vergelijk met Figuur 3-16).

duur, uur	Δh , cm			
	$k = 3275 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 3800 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$	$k = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$
30	-24.1	-24.1	-24.1	-24.1
46.4	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	10.3	10.3	10.3	10.3
110	44.8	44.8	44.8	44.8

Tabel 3-7 De keuzes voor de topvervlakkingen te Lith volgens variant V3.

Lith: keuzes delta h voor verschillende piekwaarden (V3)



Figuur 3-18 Grafische weergave van de keuzes voor de topvervlakkingen te Lith volgens variant V3.

Net als voor Lith, kunnen keuzes voor de topvervlakking voor de locaties Roermond en Boxmeer worden gemaakt. De gegevens staan in Bijlage B en C.

Terzijde nog de volgende opmerking. In de berekeningen is $\Delta h_x(k,d)$ voor alle hogere piekafvoeren nodig, zeg vanaf $2000 \text{ m}^3/\text{s}$,²⁶ terwijl deze grootte slechts is bepaald voor $k = 3275, 3800, 4200, 4600 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze grootte volgt in de berekeningen voor willekeurige k -waarden door lineaire inter- en extrapolatie.

3.5 Resultaten

3.5.1 Algemeen

In de voorgaande paragrafen zijn allerlei gegevens besproken, waarmee nu berekeningen worden gemaakt. Het is echter belangrijk om te beseffen dat de zojuist besproken gegevens voor de topvervlakking op zeer ruwe wijze zijn bepaald. Voor een goede bepaling dienen diverse SOBEK- of WAQUA-berekeningen te worden gemaakt, voor (laten we zeggen) de 5 beschouwde verschillende duren, bij de 4 hiervoor beschouwde piekafvoeren. Daarbij dient voor elke duur en

²⁶ Als alleen een berekening wordt gemaakt voor $T = 1250$ jaar, zijn slechts afvoeren relevant van circa $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ en hoger. Als een complete frequentielijn wordt bepaald, zijn ook gegevens voor veel lagere afvoeren nodig.

piekwaarde een goede golfvorm te worden gekozen. Dergelijke berekeningen kunnen in het kader van dit beperkte onderzoek niet worden gemaakt. Vandaar dat de nu volgende resultaten, bepaald met zeer ruwe gegevens voor de topvervlakkingen $\Delta h_x(k,d)$, met een zeker voorbehoud worden gegeven.

We brengen in herinnering dat er vier scenario's, S1 t/m S4, voor de kansen $f(d)$, $d = 1, 2, \dots, 5$, worden beschouwd, weergegeven in Tabel 3-2. Daarnaast zijn, zoals zojuist besproken, drie varianten (V1 t/m V3) voor de topvervlakking aangenomen. Als deze gegevens, tezamen met de overige gegevens uit paragraaf 3.4.1 t/m 3.4.3 worden gebruikt in formule (3.6), resulteren de gegevens uit Tabel 3-8.

		Keuze klassekansen			
		duren probabilistisch		slechts 1 duur (deterministisch)	
		S1: gem. 58 uur (basisvar.)	S2: gem. 46.4 uur	S3: 58 uur	S4: 46.4 uur
Keuze verschuivingen $\Delta h_x(k,d)$		Roermond, km 79			
V1	basisvariant	-9.1	-17.5	0.0	-10.0
V2	1 verband - kromlijng	-8.8	-16.9	0.0	-10.0
V3	1 verband - lineair (niet reëel)	7.2	-5.9	0.0	-10.0
		Boxmeer, km 150			
V1	basisvariant	-7.3	-16.0	0.0	-5.0
V2	1 verband - kromlijng	-6.4	-13.7	0.0	-5.0
V3	1 verband - lineair (niet reëel)	2.1	-3.8	0.0	-5.0
		Lith, km 201			
V1	basisvariant	-8.3	-17.8	0.0	-10.0
V2	1 verband - kromlijng	-7.6	-16.4	0.0	-10.0
V3	1 verband - lineair (niet reëel)	9.0	-4.7	0.0	-10.0

Tabel 3-8 Resultaten voor het probabilistisch verwerken van de duur/breedte van afvoergolven: waterstandsverschillen, in cm, t.o.v. de referentiesituatie S3 met duur 58.0 uur op relatief niveau $v = 0.85$. De berekeningen zijn uitgevoerd voor $T = 1250$ jaar.

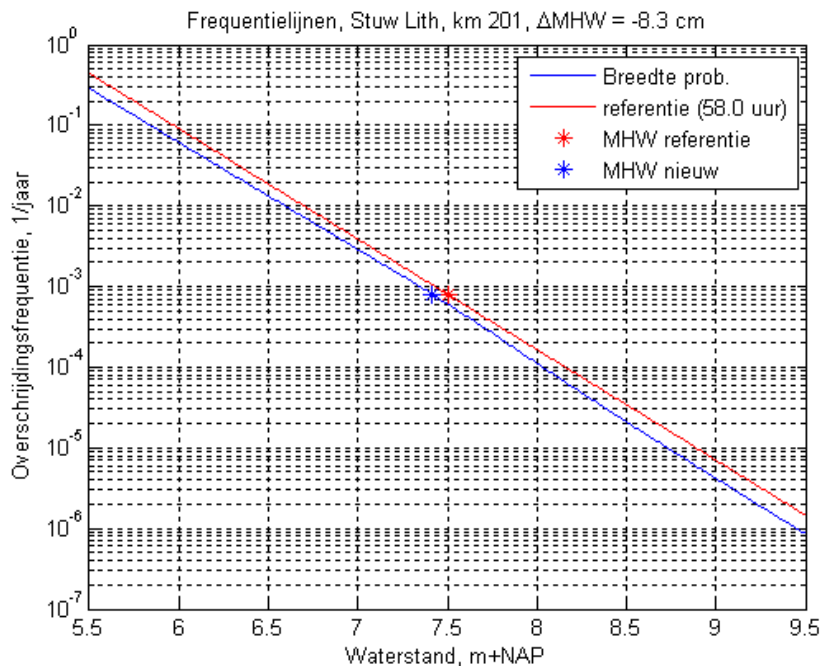
Wat S1 t/m S4 betreft, zijn de relevante scenario's hier S1 en S2; de scenario's S3 en S4, waarin een deterministische duur wordt beschouwd, zijn immers slechts toegevoegd ter vergelijking. Voor de varianten V1 t/m V3 geldt dat V3 geen reële situatie betreft. Het laatste scenario, met een "kunstmatige" lineaire afhankelijkheid van $\Delta h_x(k,d)$ met d , is immers alleen toegevoegd ter vergelijking. De meest reële scenario's bestaan dus uit combinaties van enerzijds V1 en V2, en anderzijds S1 en S2. Als meest geëigende combinatie van scenario's wordt hier (V1,S1) gezien; deze situatie wordt verder aangeduid als de basisvariant. We gaan er hier feitelijk van uit dat de gemiddelde duur van 58.0 uur een geschiktere keuze vormt dan de gemiddelde duur van 46.4 uur die correspondeert met de volumina-werklijn.

3.5.2 Bespreking van resultaten voor Lith

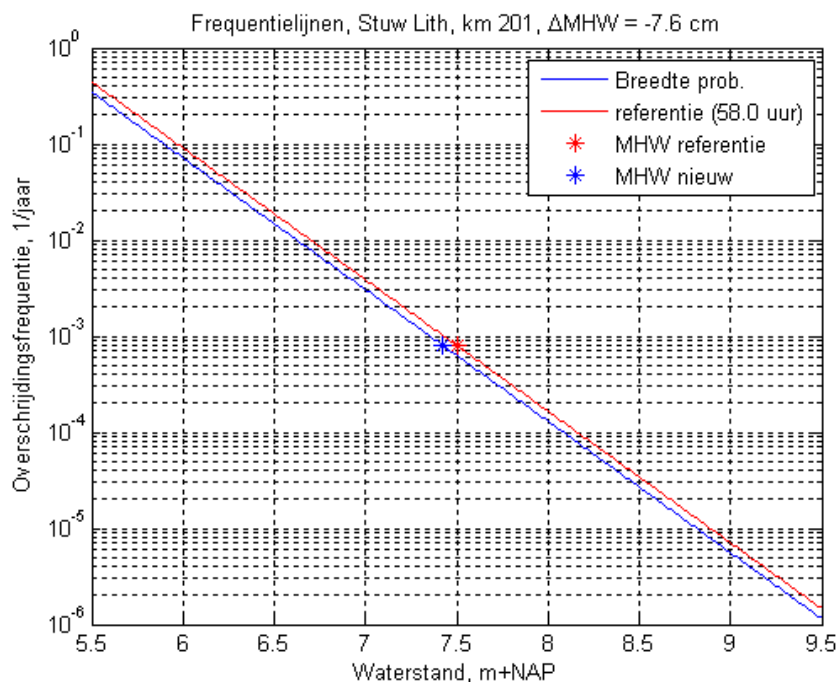
Nu volgt commentaar op de resultaten uit Tabel 3-8, waarbij we ons eerst richten op Lith. In de basisvariant wordt een MHW-verlaging gevonden van 8.3 cm. N.B. Dat is de verlaging t.o.v. een deterministische berekening met de gemiddelde golfvorm met duur 58.0 uur op niveau $v = 0.85$ (situatie S3). Deze berekening correspondeert met $T = 1250$ jaar. Ter illustratie is de volledige frequentielijn van Lith weergegeven in Figuur 3-19.

Interessant is om te zien in welke mate V2 verschilt van V1. Bedenk dat in V2 de topvervlakking $\Delta h_x(k,d)$ onafhankelijk van de afvoer is genomen; vergelijk Figuur 3-16 en Figuur 3-17 en de overeenkomstige figuren in Bijlage B en C. De frequentielijn in scenario (V2,S1) is voor Lith weergegeven in Figuur 3-20. In dat geval is de MHW-verlaging iets kleiner geworden, 7.6 versus de 8.3 cm voor (V1,S1). Het verschil in MHW-verlaging tussen V1 en V2 blijkt dus niet erg groot te zijn. Bedenk wel dat het MHW hier is berekend voor $T = 1250$ jaar. De

frequentielijnen Figuur 3-16 en Figuur 3-17 maken echter duidelijk dat voor andere waarden van T de verschillen anders (in dit geval groter) kunnen zijn.



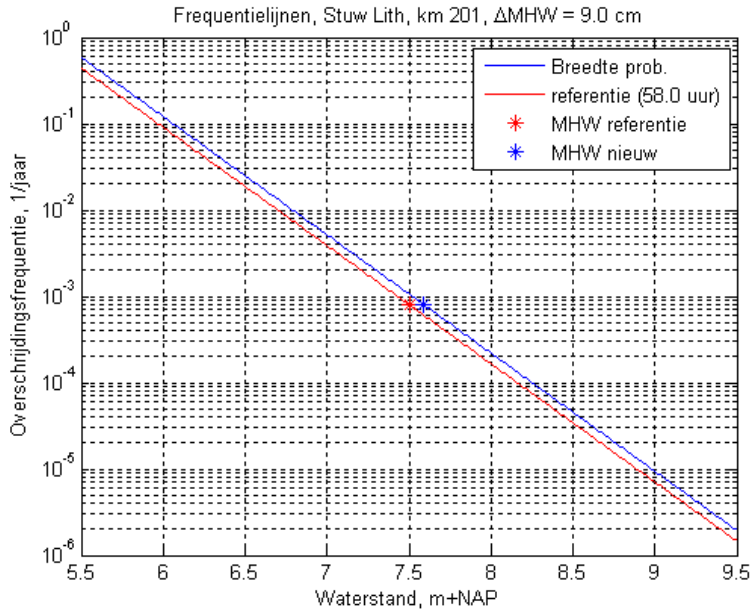
Figuur 3-19 Frequentielijn Lith (V1,S1 en referentie).



Figuur 3-20 Frequentielijn Lith (V2,S1 en referentie).

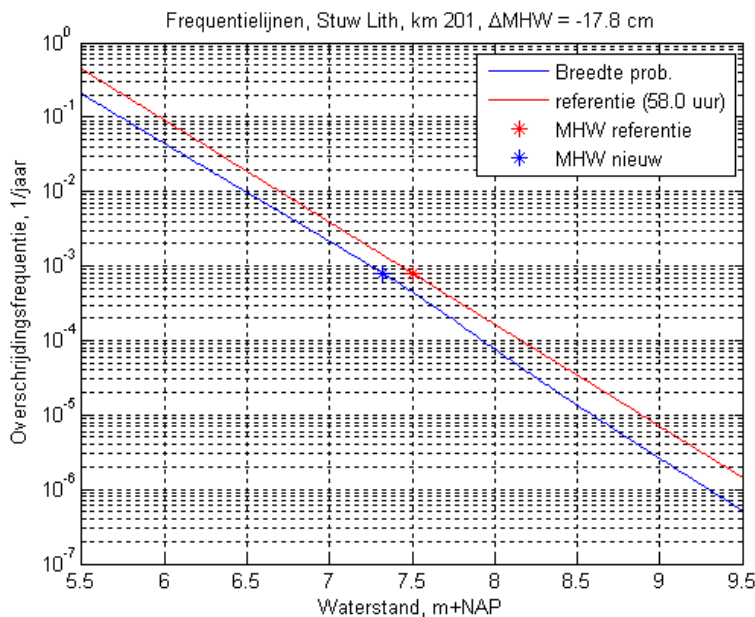
Het is verder interessant om te bezien in welke mate V3 tot andere resultaten leidt dan V1 en V2. Bedenk dat in V3 – een fysisch niet-reële situatie – de topvervlakking lineair is gekozen met de duur (zie Figuur 3-18). De frequentielijn hiervoor staat in Figuur 3-21. Nu blijkt de probabilistische verwerking van de duur tot een MHW-verhoging te leiden! Die verhoging is 9.0 cm. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de aard van het verband tussen topvervlakking $\Delta h_x(k,d)$ en duur cruciaal is. Als dat verband (bij vaste k waarden van k) zodanig

is dat $\Delta h_x(k,d)$ eerst steil omhoog loopt als functie van de duur, en daarna afvlakt, zoals in V1 en V2 het geval is, resulteert een MHW-verlaging. Is dat verband lineair (met een positieve helling), zoals in V3, dan resulteert een MHW-verhoging. Zoals gezegd geeft V3 echter geen fysisch reële situatie weer.



Figuur 3-21 Frequentielijn Lith (V3,S1 en referentie).

Tot zover de resultaten voor de basisvariant S1, waarin duren probabilistisch worden verwerkt, op basis van een gemiddelde duur gelijk van 58.0 uur (op niveau $v = 0.85$). Als duren probabilistisch worden verwerkt, met $f(d)$ zodanig dat de gemiddelde duur 46.4 uur wordt (situatie S2), in overeenstemming met de uit de volumina-werklijn, resulteert een veel grotere MHW-verlaging. Volgens Tabel 3-8 is deze verlaging dan 17.8 cm.



Figuur 3-22 Frequentielijn Lith (V1,S2 en referentie).

De genoemde verlaging moet niet worden opgevat als puur het verschil tussen het probabilistisch versus het deterministisch verwerken van de duur van de golfvorm. Behalve dat in S2 de duur probabilistisch wordt verwerkt, is de gemiddelde duur t.o.v de referentieduur nog eens teruggebracht van 58.0 uur naar 46.4 uur. Uit het verschil tussen de deterministische varianten S3 en S4 blijkt dat alleen het terugbrengen van deze duur – indien deterministisch berekend – al een verlaging van 10 cm oplevert. De verdere verlaging, tot 17.8 cm, komt dan op het conto van de probabilistische verwerking van de duur.

Al met al is de conclusie dat voor Lith, met de hier gebruikte gegevens, het probabilistisch verwerken van de duur/breedte van de golfvorm, tot een MHW-verlaging leidt van circa 7 á 8 cm.

3.5.3 Bespreking resultaten Roermond, Boxmeer en overige Maaslocaties

Zojuist is de situatie voor Lith besproken. Voor Roermond en Boxmeer gelden soortgelijke opmerkingen. We noemen slechts enkele punten t.a.v. Tabel 3-8. Ten eerste valt op dat scenario V3 voor Boxmeer tot een veel geringere verhoging leidt dan voor Roermond en Lith. Reden daarvan is dat de helling uit het lineaire verband voor Boxmeer minder groot is dan voor Roermond en Lith (vergelijk Figuur 3-18 met de overeenkomstige figuren in Bijlage B en C).

De algemene conclusie voor Roermond is dat, bij de gebruikte gegevens, het probabilistisch verwerken van de duur leidt tot een MHW-verlaging van 8 á 9 cm. Voor Boxmeer is dat 6 á 7 cm.

Wat moet worden verwacht voor de overige locaties langs de Maas, van Borgharen tot aan Lith? Als we nog eens Figuur 3-11 t/m Figuur 3-13 in ogenschouw nemen, moet verwacht worden dat vanaf circa km 70 significante MHW-dalingen plaatsvinden, in de orde van grootte voor Roermond, Boxmeer en Lith. Vanaf km 70 resulteren namelijk MHW-verlagingen die vergelijkbaar zijn met die voor de drie doorerekende locaties (circa 6 tot 9 cm).

Van Borgharen (km 16) tot circa km 70 blijken de topvervlakkingen voor de situatie 46.4 uur en de 2.5%-golf veel kleiner; daar staat tegenover dat de 97.5%-golf uit Figuur 3-13 geen vermindering van de topvervlakking laat zien t.o.v. de gemiddelde golf. Ook op dit traject moeten derhalve significante verlagingen worden verwacht.

Het globale beeld dat uit bovenstaande naar voren komt is aldus. Bij Borgharen komen extreme afvoergolven ons land binnen die sterk verschillende duren hebben. De smalste golven zakken verder benedenstrooms aanzienlijk in (veel topvervlakking). Ook de gemiddelde golf heeft topvervlakking, terwijl de allerbreedste golven wat minder topvervlakking hebben dan de gemiddelde golf. In termen van de topvervlakking $\Delta h_x(k,d)$ is het zo dat deze grootte als functie van de duur aanvankelijk steil toeneemt, om daarna sterk af te vlakken. Belangrijk punt hier is dus dat de smalste golven erg veel topvervlakking laten zien, met grote waterstandsdalingen t.o.v. de gemiddelde golf, terwijl de allerbreedste golven t.o.v. de gemiddelde golf weliswaar hogere waterstanden leveren, maar wel verhogingen die relatief gering zijn t.o.v. de gemiddelde golf.

Voor de MHW's benedenstrooms van Borgharen heeft dat (enigszins gechargeerd) de volgende consequenties: de smalste golven zakken zo ver in dat ze verder benedenstrooms geen extreme

waterstanden meer opleveren; golven met een min of meer gemiddelde duur, alsmede de breedste golven leveren de extreme waterstanden die het MHW bepalen.

Terzijde nog het volgende. Mijn persoonlijke indruk is dat de "gemiddelde spitse golf" uit [AHA BV en Rura, 2013], die het volume volgens de volumina-werklijn reproduceert, geen juist uitgangspunt vormt om MHW-berekeningen op te baseren. Ten eerste betwijfel ik of deze duur een juiste weergave geeft van de werkelijkheid (de golf lijkt mij te smal). Ten tweede is het beeld dat uit de probabilistische berekeningen naar voren komt dat benedenstrooms van Borgharen *juist de relatief brede golven de MHW's bepalen*. Uiteraard weet niemand zeker hoe werkelijke golven zich in het extreme bereik gedragen, maar dit is mijn "best guess". Wellicht dat golven afkomstig uit het model GRADE hier meer licht op kunnen werpen.

3.6 Conclusies en aanbevelingen

Op grond van het voorgaande wordt geconcludeerd dat het de moeite waard is de duur/breedte van de afvoergolven te Borgharen probabilistisch mee te nemen. Over grote delen van de Maas zal dat naar verwachting tot verlagingen leiden van circa 5 – 10 cm. Een meer nauwkeurige schatting is echter op basis van de summier gegevens die voor dit onderzoek ter beschikking stonden niet te geven.

Als de golfvorm probabilistisch wordt behandeld, is het nodig om een aantal standaardgolven te bepalen, variërend van smalle tot brede golven. Mijn advies is om deze golven niet op de golfvormgenerator te baseren, omdat die mogelijk voor de allersmalste en de allerbreedste golven geen juiste golven produceert. Ook acht ik de kansen die aan zulke zeer smalle en zeer brede golven worden toegekend twijfelachtig. Mogelijk is een beter instrument het model GRADE.

Met GRADE is het mogelijk om zeer lange tijdreeksen van afvoeren te genereren, met bijvoorbeeld een lengte van 20,000 jaren [Kramer, 2012; Ogink, 2012]. Op basis van een dergelijke tijdreeks kan duurstatistiek worden uitgevoerd, op bijvoorbeeld de manier uit paragraaf 3.3.3, waarbij door het grote aantal beschikbare afvoerpieken met veel grotere betrouwbaarheid kansen aan afvoerclassen kunnen worden toegekend dan op basis van de beschikbare meetreeks. Uiteraard dient dan wel het vertrouwen te bestaan dat het GRADE-instrumentarium de werkelijkheid in voldoende mate recht doet.

3.7 Eventuele implementatie en productiesommen

In deze paragraaf wordt ingegaan op consequenties voor implementatie in Hydra-Ring en op consequenties voor productiesommen.

Implementatie in Hydra-Ring betekent dat het probabilistisch model uit paragraaf 3.1 moet worden ingebouwd, of een soortgelijk model dat rekentechnisch misschien beter past in de architectuur van Hydra-Ring. Naar verwachting is een dergelijke implementatie, gezien de betrekkelijke eenvoud van het model, goed te doen.

Hierbij moet wel worden bedacht dat elk van de typen golfvormen, ter plaatse van Borgharen, als een (geknikt) trapezium moet worden gemodelleerd. Deze trapezia dienen aan de basis een duur te hebben van (bij voorkeur) 30 dagen, welke duur ook voor afvoertrapezia in de

benedenrivieren en Vecht- en IJsseldelta wordt gebruikt. Dergelijke trapezia dienen nog te worden bepaald, tezamen met geschikte kansen $f(d)$ voor dergelijke trapezia.

N.B. Voor de duidelijkheid merken we op dat in SOBEK- of WAQUA sommen "vloeiende" golfvormen dienen te worden beschouwd, terwijl dat voor de probabilistische verwerking in Hydra-Ring niet het geval is. In het laatste geval is een ruwe tijdschematisering voldoende.

Wat het aantal productiesommen betreft het volgende. Stel dat 5 typen golven worden beschouwd, en 9 piekafvoeren. Dan levert dat $9 \cdot 5 = 45$ productiesommen (5 maal zoveel als bij een deterministische behandeling van de golfvorm).

3.8 Opmerkingen over de statistiek te Lith

Een probabilistische verwerking van de golfvorm zal te Lith een andere werklijn opleveren dan nu het geval is. Ons advies is die werklijn te bepalen, en deze vervolgens in Hydra-Ring te gebruiken voor de benedenrivieren. Dat zal in het afvoerdominante deel van de Maas benedenstrooms van Lith een soortgelijke verlaging geven als voor Lith zelf.

Verwacht wordt verder dat het in de benedenrivieren niet loont om de duur van afvoergolven probabilistisch te behandelen. De topvervlakking benedenstrooms van Lith is naar verluidt gering, zodat verschillende duren van golven, die bij Lith sowieso al veel breder zijn dan bij Borgharen, weinig extra nauwkeurigheid opleveren.

Voor de duidelijkheid wordt op het volgende gewezen. Een nieuwe werklijn voor Lith afleiden kost tijd, maar voor de productieberekeningen voor de benedenrivieren is die werklijn niet nodig. Bedenk daarbij dat de 50%-lijnen zowel als het 1-1 verband tussen de afvoer te Lobith en te Lith *niet* van deze werklijnen afhangt (zie paragraaf 5.1.1 en 5.1.2). Ook is voor de productiesommen geen golfvorm nodig, omdat voor de benedenrivieren afvoeren als *permanenties* worden doorgerekend. Als de berekeningen voor de bovenrivieren klaar zijn, kan de nieuwe werklijn bij Lith eenvoudig in Hydra-Ring worden ingevoerd. Eventueel kunnen ook de afvoertrapezia bij Lith worden herzien, maar het is bekend dat de Hydra-Zoet en Hydra-Ring resultaten erg ongevoelig zijn voor de precieze modellering van de trapezia (tenminste voor faalmechanismes overloop en golfoverslag).²⁷ Maar ook als de wens bestaat deze trapezia te herzien, kunnen nieuwe trapeziumparameters eenvoudig in Hydra-Ring worden ingevoerd.

3.9 Advies

Op grond van het voorgaande wordt het geadviseerd om voor de Maas de duur/breedte van de golfvorm probabilistisch te behandelen in Hydra-Ring. Zie voor de werkzaamheden die dit met zich meebrengt paragraaf 3.7 en 3.8.

²⁷ N.B. Als naar andere faalmechanismes wordt gekeken, waarvoor bijvoorbeeld snelle waterstandstijgingen en -dalingen van belang zijn, mogen de (huidige) afvoertrapezia niet worden gebruikt. Voor andere faalmechanismes dan overloop en golfoverslag zijn mogelijk andere modelleringen van de afvoer nodig, die geen onderwerp vormen van het voorliggende rapport.

4 Stormvloedkeringen benedenrivieren

Voor de stormvloedkeringen in de Europoort geldt dat op dit moment alleen de Maeslantkering en de Hartelkering zijn opgenomen in Hydra-Zoet en Hydra-Ring. Verder geldt dat de faalmodi van de Europoortkering, kortweg EP-kering, uitgaan van gelijktijdig falen van beide keringen (*afhankelijk falen*), waarbij één gemeenschappelijke faalkans van de keringen wordt gehanteerd.

In de benedenrivieren bevinden zich nog meer keringen, zoals de Haringvlietsluizen, de Stormstuw Hollandsche IJssel en de keersluis in het Heusdensch Kanaal. Door de opdrachtgever is gevraagd om, behalve voor de EP-kering, ook vragen te beantwoorden over de Haringvlietsluizen.

In het vervolg worden aspecten van de Haringvlietsluizen en de Europoortkering behandeld. Bij elk aspect moeten de volgende zaken worden aangegeven:

- Op welke wijze kan, indien nodig, het betreffende aspect worden geïmplementeerd in het belastingmodel?
- Wat zijn, indien implementatie gewenst is, de consequenties voor het aantal uit te voeren productieberekeningen?



Figuur 4-1 Weergave benedenrivieren met een aantal keringen.

4.1 Haringvlietsluizen

4.1.1 Effecten op MHW's van niet-sluiten en niet-openen van de Haringvlietsluizen

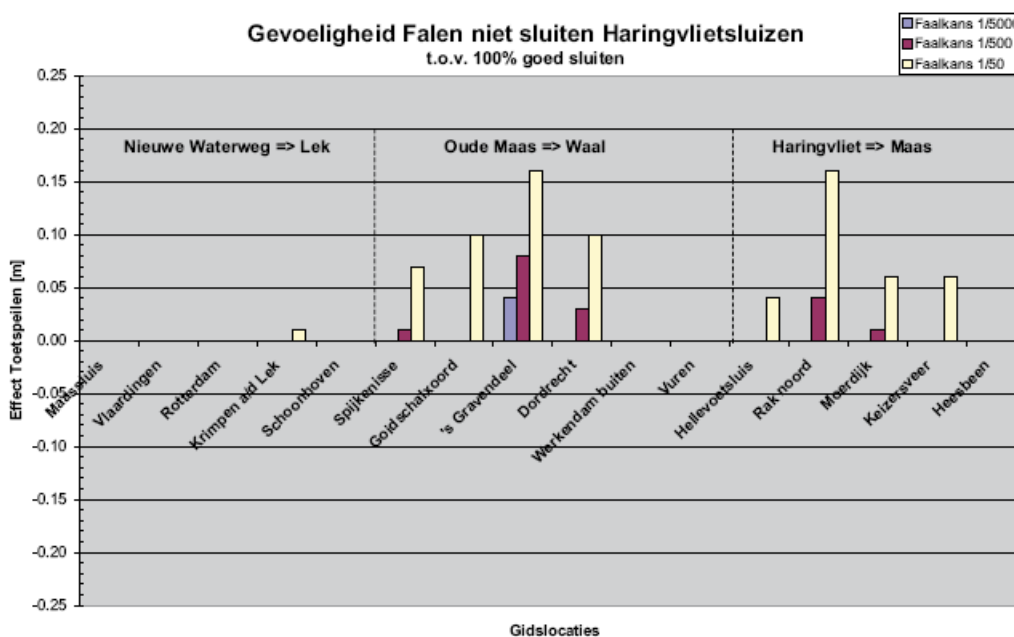
Voor de Haringvlietsluizen dient te worden gekeken naar de faalmodi "niet-sluiten" tijdens een storm, en het "niet-openen" nadat de storm is afgelopen. In het deelrapport "Analyse watersysteem: Gevoelighedsanalyse" uit [Systeemanalyse RMM, 2009] wordt informatie gegeven over het effect op de MHW's als gevolg van de genoemde faalmodi, zie Figuur 4-2 en Figuur 4-3.

In de rapportage wordt over de resultaten uit deze figuren gezegd dat ze met een zeker voorbehoud gelden. Ze zijn namelijk berekend met het zogenoemde 'ad-hoc' model OKE (ontwikkeld in het kader van het project 'Optimalisatie Keringen Europoort' door Rijkswaterstaat Bouwdienst). Dat model kent echter de nodige onnauwkeurigheden en beperkingen. Vandaar dat in de [Systeemanalyse RMM, 2009] wordt gesteld dat de resultaten slechts *schattingen* betreffen.

Voor de Haringvlietsluizen zijn voor niet-sluiten de volgende varianten doorgerekend:²⁸

- faalkans 1/5000 (= faalkanseis),
- faalkans 1/500,
- faalkans 1/50.

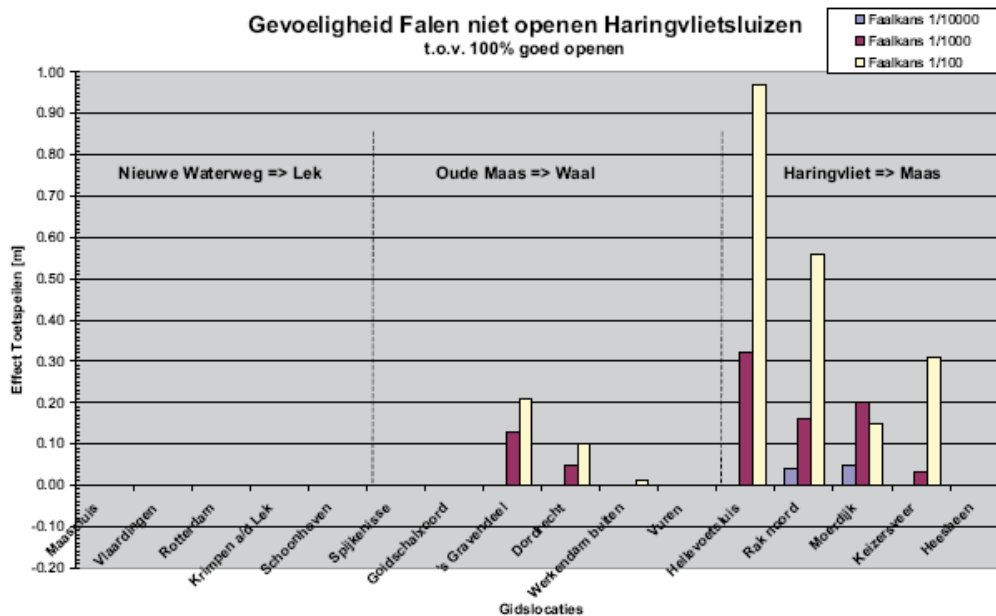
Over de resultaten wordt in de rapportage het volgende gezegd. De varianten voor falen door niet-sluiten van de Haringvlietsluizen tonen een matig verschil met de referentie. Het verschil is orde grootte 10 cm op de Oude Maas en 15 cm op het Haringvliet/Hollandsch Diep bij een faalkans van 1/50. Rak Noord op het Haringvliet springt eruit met een verschil van 16 cm. Verder wordt gezegd dat de grootte van de doorstroomopening tijdens falen afhankelijk is van de stand waarin de schuiven van de Haringvlietsluizen zich bevonden tijdens het lozen. Op moment dat de storm komt, blijven de sluisen op die stand staan (afkomstig uit het lozingsprogramma LPH1984).



Figuur 4-2 De invloed van niet-sluiten van de Haringvlietsluizen op de MHW's (oftewel Toetspeilen).
Bron: [Systeemanalyse RMM, 2009].

Tot zover het commentaar uit de systeemanalyse. Voor het voorliggende project is vooral van belang hoe groot de "werkelijke" faalkans voor niet-sluiten is. Als die gelijk is aan de faalkanseis van 1/5000 (of kleiner) is er geen noodzaak het niet-sluiten in Hydra-Ring op te nemen. Bij een hogere faalkans wordt dat echter wel relevant.

²⁸ Het is mij feitelijk niet duidelijk of deze faalkans per sluitvraag geldt, of per jaar. Vermoedelijk per sluitvraag.



Figuur 4-3 De invloed van niet-openen van de Haringvlietsluizen op de MHW's (oftewel Toetspeilen).
Bron: [Systeemanalyse RMM, 2009].

De resultaten voor niet-openen staan in Figuur 4-3. Het falen door niet-openen van de Haringvlietsluizen geeft grote verschillen met de referentie op het Haringvliet/Hollandsch Diep en nihil verschillen op de overige riviertakken. Tevens wordt gezegd dat de hoge piek van 1.0 m bij Hellevoetsluis, zich moeilijk laat verklaren, en dat de uitkomst op deze locatie niet geheel betrouwbaar lijkt.

De resultaten uit de systeemanalyse geven duidelijk aan wat het invloedsgebied van de kering is. Dat betreft het Haringvliet/Hollandsch Diep, tot de benedenloop van de Bergsche Maas, en een deel van de Oude Maas.

Tot slot wordt nog de volgende opmerking gemaakt. Hiervoor zijn de faalmodi niet-sluiten en niet-openen beschouwd. In feite zijn deze faalmodi sterke versimpelingen van de werkelijkheid. De Haringvlietsluizen bestaan in totaal namelijk uit 17 verschillende sluisen, elk voorzien van dubbele schuiven. Falen kan dus bestaan uit allerlei combinaties van falende schuiven.

4.1.2 Formules voor het belastingmodel en benodigde productiesommen

In [Geerse, 2007] en [Duits, 2007; 2008] wordt het model Hydra-BS beschreven (waarbij de S staat voor **S**ysteemanalyse). Dit model is een speciale versie van Hydra-B, ontwikkeld met het oog op de zojuist genoemde Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, waarin het mogelijk is de Haringvlietkering probabilistisch mee te nemen (met faalmodi niet-sluiten en niet-openen). Dit model is echter niet gebruikt in de systeemanalyse, omdat benodigde SOBEK- en/of WAQUA-sommen daarvoor niet beschikbaar waren. Als deze sommen wel beschikbaar zouden zijn, zouden de in de voorgaande paragraaf genoemde effecten nauwkeuriger kunnen worden bepaald dan die uit Figuur 4-2 en Figuur 4-3.

In [Geerse, 2007] zijn de formules voor het belastingmodel uitgebreid opgeschreven. Deze formules worden hier niet herhaald. Wel volgt hier een korte, kwalitatieve beschrijving. Essentieel in modellen als Hydra-B, Hydra-Zoet en Hydra-Ring, is dat de zee-invoerd

gemodelleerd wordt in 'blokduren' van 12-uursperioden.²⁹ Een belangrijke kans in deze modellen is dan de faalkans gedurende deze blokduur. Stel dat deze wordt aangegeven als $P(Z < 0)$. Als meerdere faalmodi, zeg F_i , $i = 1, 2, \dots, n$, worden beschouwd, dient in deze modellen per faalmodus F_i de faalkans $P(Z < 0 | F_i)$ te worden bepaald. Om aan de 'totale' faalkans $P(Z < 0)$ te komen, dienen de faalkansen $P(Z < 0 | F_i)$ dan te worden gewogen met hun kansen $P(F_i)$ van voorkomen van de faalmodi.

De hier gegeven uitleg is wat versimpeld t.o.v. de formules uit [Geerse, 2007]. Reden daarvan is dat de zojuist gegeven berekening *conditioneel* op de opgetreden omstandigheden (zeestand, windsnelheid, windrichting en afvoer) uitgevoerd moet worden. Globaal komt het, tenminste wiskundig gezien, echter neer op een simpele weging van faalkansen per faalmodus over de kansen waarmee deze faalmodi voorkomen. Voor de details van de formules wordt verwezen naar [Geerse, 2007].³⁰

Verder is nog relevant dat de aanpak in Hydra-BS wat is versimpeld t.o.v. Hydra-B, in de zin dat voor de *waterstandsberekeningen* slechts één windrichting (WNW) wordt beschouwd en dat daarbij de windsnelheid deterministisch is gekoppeld aan de zeewaterstand. Reden daarvoor was uitsluitend om het aantal benodigde productiesommen te beperken. Terwijl het complete Hydra-B als invoer voor de waterstanden in de HR-berekeningen gebruik maakt van 3384 SOBEK-sommen (Rijndominante locaties), heeft Hydra-BS dan slechts 108 SOBEK-sommen nodig als invoer (9 afvoerniveaus, 6 zeewaterstanden, en 2 keringtoestanden). Als in Hydra-BS aanvullende faalmodi voor keringen worden gebruikt, neemt dat aantal van 108 uiteraard (flink) toe.

Tot slot nog de volgende opmerkingen:

1. In Hydra-BS zijn tot nu toe slechts twee faalmodi geïmplementeerd (niet-sluiten en niet-openen). Formuletechnisch is de uitbreiding naar meerdere faalmodi volstrekt evident. Bij meerdere faalmodi dient het computerprogramma Hydra-BS echter te worden aangepast.
2. Zoals gezegd zijn in wiskundig opzicht de formules uit Hydra-BS eenvoudig van aard, en zijn deze met de in Hydra-BS gebruikte numerieke integratiemethodes ook recht toe recht aan op te lossen. Het is mij echter niet helemaal duidelijk hoe ingewikkeld de implementatie in Hydra-Ring zal zijn. Dit programma maakt namelijk, omdat het met een groot aantal stochasten dient om te kunnen gaan, gebruik van meerdere benaderende rekenmethodes, zoals FORM [Roscoe et al, 2012].

4.1.3 Benodigde productiesommen

Als falen van de Haringvlietsluizen niet is opgenomen in het model (bijvoorbeeld Hydra-Zoet of Hydra-Ring), wordt een zeker aantal van N productieberekeningen gebruikt. Voor Rijndominante locaties betreft het in het huidige Hydra-Zoet bijvoorbeeld $N = 3384$ combinaties van afvoer, zeestand, windsnelheid, windrichting en open en juist functionerende EP-kering. Bij één extra faalmodus van de Haringvlietsluizen, dienen deze combinaties ook te worden doorgerekend voor

²⁹ In Hydra-Ring betreft dit feitelijk een getijperiode, maar dat is voor de uitleg niet belangrijk.

³⁰ In feite is de afleiding van de formules uit [Geerse, 2007], om tot de uiteindelijke vrij simpele formules te komen, nogal omslachtig. Reden daarvan is dat veel zorg is besteed aan de rechtvaardiging van het feit dat in de weging over de faalmodi de weging zich mag uitstrekken over situaties waarvoor strikt genomen de modus van falen zich helemaal niet voordoet. Wiskundig is het nogal curieus dat bijvoorbeeld een situatie waarbij de kering niet hoeft te sluiten, omdat het sluitcriterium niet wordt gehaald, toch gewogen mag worden met de kans op een falende kering. Om dergelijke situaties te rechtvaardigen, is de afleiding van de formules erg gecompliceerd, terwijl de eigenlijke formules eenvoudig blijken te zijn.

deze extra faalmodus. Bij n faalmodi, dienen deze combinaties te worden doorgerekend voor al deze extra faalmodi, wat dan leidt tot $n \cdot N$ productieberekeningen.

4.1.4 Recent verkregen informatie

Voordat een advies wordt gegeven over het al of niet meenemen van faalmodi van de Haringvlietsluizen het volgende. Uit persoonlijk contact met Wim Bijl van RWS Directie Zuid-Holland (DZH), is gebleken dat bij DZH de wens bestaat om, bijvoorbeeld in Hydra-Zoet, meerdere faalmodi voor de Haringvlietsluizen in te bouwen.

Verder is uit persoonlijk contact met Sacha de Goederen van DZH gebleken dat hij op dit moment bezig is aspecten van falen van de Haringvlietsluizen te onderzoeken. Daarbij worden twee berekeningsmethodes gebruikt, methode Helsloot en het eerder genoemde OKE-model. Van beide modellen lijkt de betrouwbaarheid niet helemaal gegarandeerd. Uit het gesprek met Sacha de Goederen, en een *voorlopig* stuk dat mij is toegestuurd, blijkt in ieder geval dat meerdere faalmodi van de Haringvlietsluizen – met hun kansen – relevant zijn voor de bepaling van de MHW-effecten.

4.1.5 Advies

Of het voor de WT12017 veel toevoegt om extra faalmodi in te bouwen, hangt volgens de resultaten uit paragraaf 4.1.1, en uit de informatie afkomstig van Sacha de Goederen, sterk af van de 'werkelijke' faalkansen voor de beschouwde faalmodi. Als de faalkanseisen voor niet-sluiten en niet-openen (respectievelijk 1/5000 en 1/10000) in werkelijkheid gehaald worden, is het m.i. op basis van de systeemanalyse overbodig om falen van de Haringvlietsluizen mee te nemen in Hydra-Zoet en Hydra-Ring.

Hier dient wel het voorbehoud te worden gemaakt dat de resultaten uit de systeemanalyse *schattingen* betreffen, want afgeleid met een minder nauwkeurig model (OKE). De juistheid van de resultaten voor m.n. Hellevoetsluis voor faalkansen 1/50 bij niet-openen wordt betwijfeld. Ook de door Sacha de Goederen eveneens gebruikte methode Helsloot lijkt niet helemaal onderbouwd.

Mijn advies luidt als volgt:

1. Ga eerst met Hydra-BS na, voor faalmodi niet-openen en niet-sluiten, of voor realistische waarden van de faalkansen de MHW's relevante veranderingen ondergaan. Eventueel kan Hydra-BS eerst worden uitgebreid met meerdere faalmodi voor de Haringvlietsluizen, in welk geval extra faalmodi kunnen worden doorgerekend. N.B. Mijn voorkeur is dus de oude instrumenten OKE en methode Helsloot niet te blijven gebruiken.
2. Afhankelijk van de uitkomsten uit punt 1 is het advies als volgt:
 - Als de genoemde veranderingen niet significant zijn, hoeft falen van de Haringvlietsluizen niet te worden meegenomen in Hydra-Zoet en Hydra-Ring.
 - Als de genoemde MHW-veranderingen wel significant zijn, is mijn advies het aantal faalmodi zo beperkt mogelijk te houden, zeg maximaal 4 á 5, maar liever nog minder. Het aantal WAQUA-berekeningen voor de benedenrivieren vormt op dit moment namelijk al een forse inspanning, zodat een veelvoud van dat aantal

problematisch kan worden. Daarnaast moet bedacht worden dat de WAQUA-resultaten goed gecontroleerd dienen te worden.³¹

4.2 Meenemen van onzekerheid in de faalkans van de Europoortkering

4.2.1 Aanpak en formules

Op dit moment wordt voor de faalkans van de EP-kering een vaste waarde voor de faalkans α gebruikt, gelijk aan 1/100 per sluitvraag in de HR2006. De vraag kan worden gesteld in welke mate het meenemen van onzekerheden in deze waarde leidt tot andere MHW's.

Daartoe zijn vijf waarden van α beschouwd: 1/30, 1/60, 1/100, 1/300, 1/1000 (per sluitvraag). Aan deze waarden kunnen kansen $P(\alpha)$ worden toegekend. De toekenning van de kansen moet zó gebeuren, dat de weging van α met deze kansen de originele faalkans van 1/100 oplevert:

$$\sum_{i=1}^5 P(\alpha_i) \alpha_i = 1/100 \quad (4.1)$$

Meenemen van onzekerheid mag immers effectief niet resulteren in een andere faalkans.

Variant 1	faalkans α	kans $P(\alpha)$	aandeel in α
	-]	-]	-]
	1/30	0.04	0.0011
	1/60	0.12	0.0017
	1/100	0.58	0.0058
	1/300	0.26	0.0013
	1/1000	0	0.0000
	som	1.0000	0.0100

Variant 3	faalkans α	kans $P(\alpha)$	aandeel in α
	-]	-]	-]
	1/30	0.125	0.0036
	1/60	0.125	0.0018
	1/100	0.29	0.0029
	1/300	0.25	0.0013
	1/1000	0.21	0.0005
	som	1.0000	0.0100

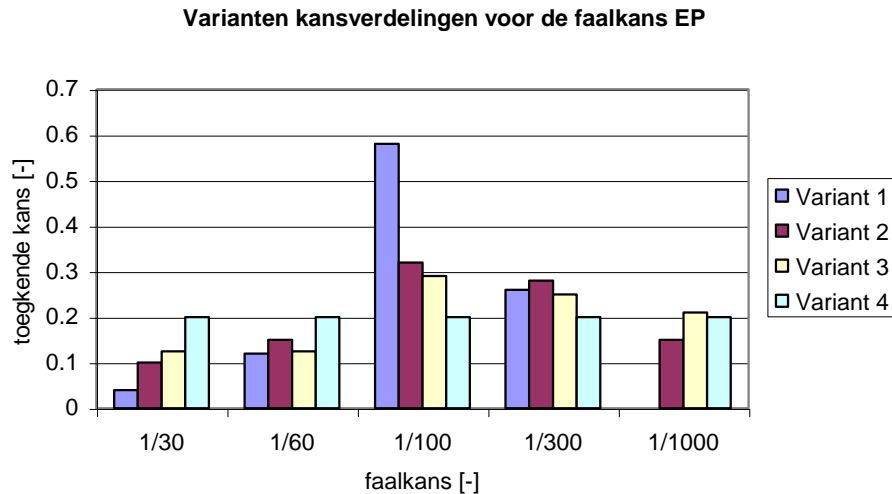
Variant 2	faalkans α	kans $P(\alpha)$	aandeel in α
	-]	-]	-]
	1/30	0.1	0.0029
	1/60	0.15	0.0021
	1/100	0.32	0.0032
	1/300	0.28	0.0014
	1/1000	0.15	0.0004
	som	1.0000	0.0100

Variant 4	faalkans α	kans $P(\alpha)$	aandeel in α
	-]	-]	-]
	1/30	0.2	0.0057
	1/60	0.2	0.0029
	1/100	0.2	0.0020
	1/300	0.2	0.0010
	1/1000	0.2	0.0005
	som	1.0000	0.0121

Tabel 4-1 Onderzochte varianten voor $P(\alpha)$.

Er zijn drie varianten voor dergelijke kansverdelingen $P(\alpha)$ beschouwd, die zijn weergegeven in Tabel 4-1. Daarnaast is ter vergelijking nog de uniforme kansverdeling voor $P(\alpha)$ toegepast. De laatste verdeling is feitelijk "oneigenlijk", omdat deze effectief een hogere faalkans oplevert: de weging volgens (4.1) resulteert dan in een faalkans $0.0121 = 1/83$. De kansverdelingen zijn grafisch weergegeven in Figuur 4-4.

³¹ Voor de HR2006 zijn waterstanden voor de benedenrivieren berekend met SOBEK. Het standaard aantal berekeningen met $N = 3384$ combinaties (Rijndominant) vormt voor SOBEK inmiddels geen probleem meer, maar schijnt voor het WAQUA-model nog steeds een forse inspanning te zijn, met name omdat de sturing van de EP-kering erg veel rekentijd kost.



Figuur 4-4 Grafische weergave van de onderzochte varianten voor $P(\alpha)$.

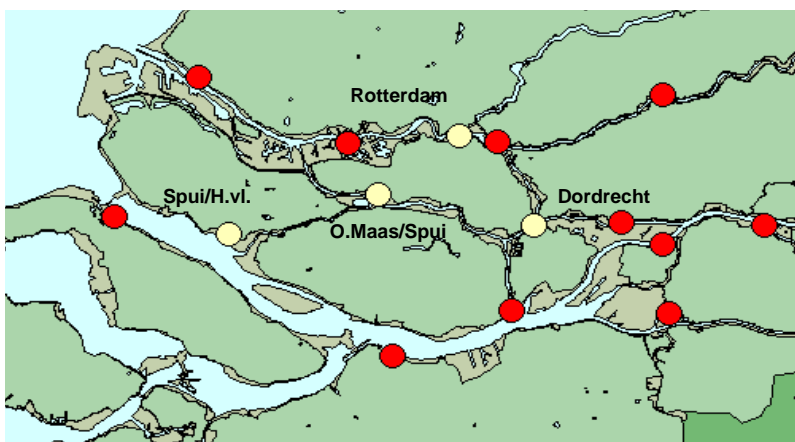
Het effect op de MHW's van het meenemen van de onzekerheid in α kan als volgt worden bepaald. Eerst wordt, voor een beschouwde locatie, voor elke α_i apart met Hydra-Zoet de overschrijdingsfrequentie $F(H > h | \alpha_i)$ bepaald. Daarna worden deze frequentielijnen gewogen met de kansen $P(\alpha_i)$:

$$F(H > h) = \sum_{i=1}^5 P(\alpha_i) F(H > h | \alpha_i) \quad (4.2)$$

4.2.2 Resultaten voor MHW-effecten

De berekeningen zijn uitgevoerd voor vier locaties (zie gele stippen in Figuur 4-5):³²

1. Rotterdam (Nieuwe Maas km 995),
2. Splitsing Oude Maas en Spui (Oude Maas km 995),
3. Monding Spui in Haringvliet (Haringvliet km 1017)
4. Dordrecht (Oude Maas km 977),

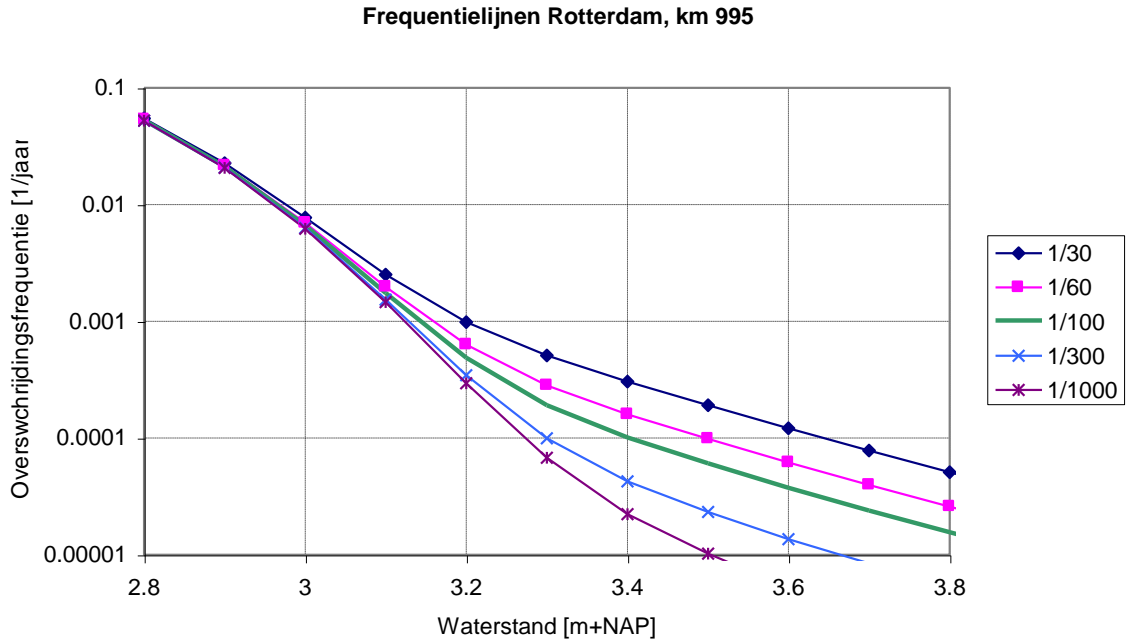


Figuur 4-5 Doorgerenade locaties.

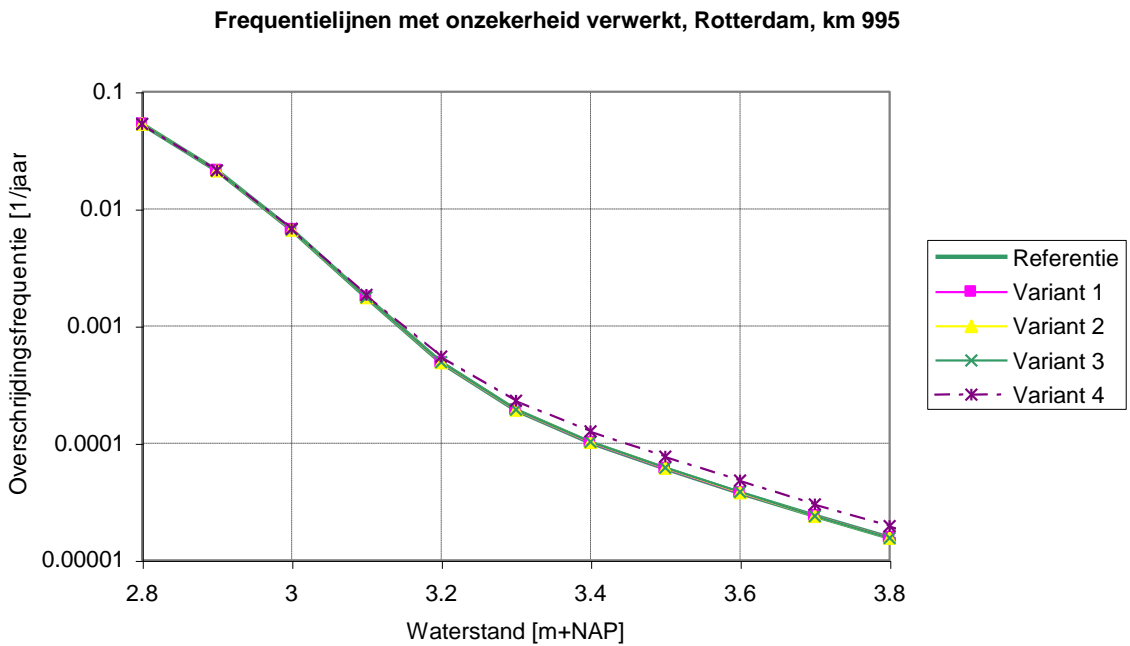
³² De kilometeraanduidingen zijn indicatief.

Voor elke locatie zijn figuren gemaakt met de vijf frequentielijnen $F(H>h|\alpha_i)$. Tevens zijn de volgens (4.2) bepaalde gewogen frequentielijnen bepaald, voor de varianten 1 t/m 4. De resultaten staan in Figuur 4-6 t/m Figuur 4-13.

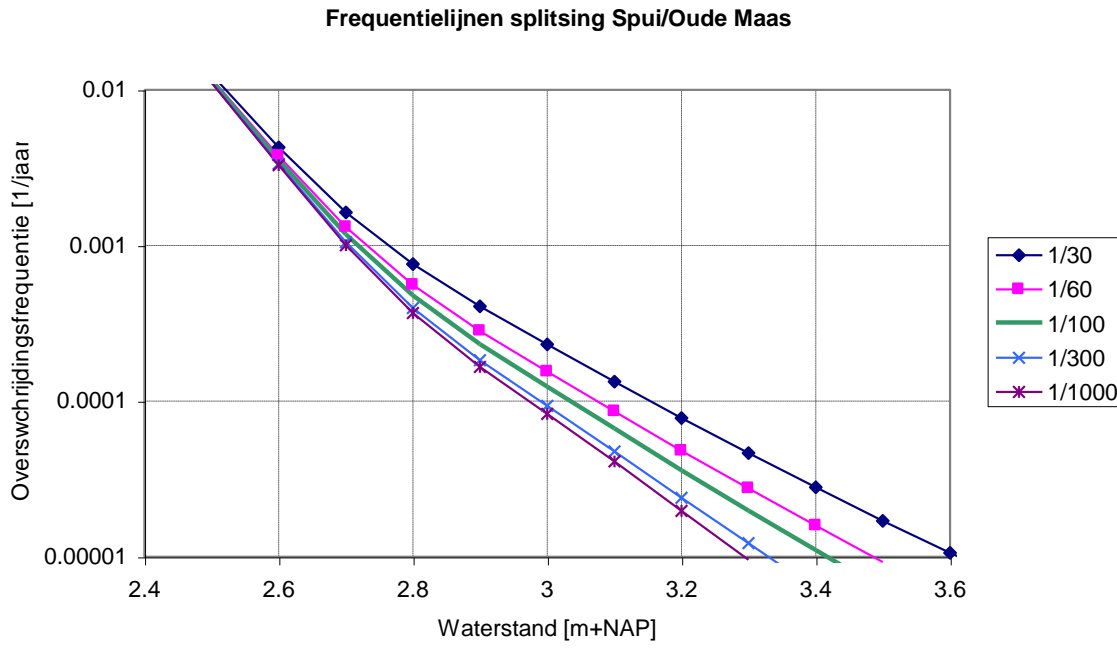
De conclusies zijn duidelijk. De individuele frequentielijnen verschillen aanmerkelijk van elkaar, vooral voor Rotterdam en Spui/Oude Maas, maar voor de varianten 1 t/m 3, die gemiddeld gezien de standaard faalkans van 1/100 opleveren, zijn de gewogen frequentielijnen vrijwel niet te onderscheiden van de referentiesituatie die correspondeert met faalkans 1/100. Alleen variant 4 levert een andere, hoger liggende, gewogen frequentielijn. Maar dat is niet verwonderlijk, omdat die variant effectief gezien een hogere faalkans heeft (1/83 versus 1/100).



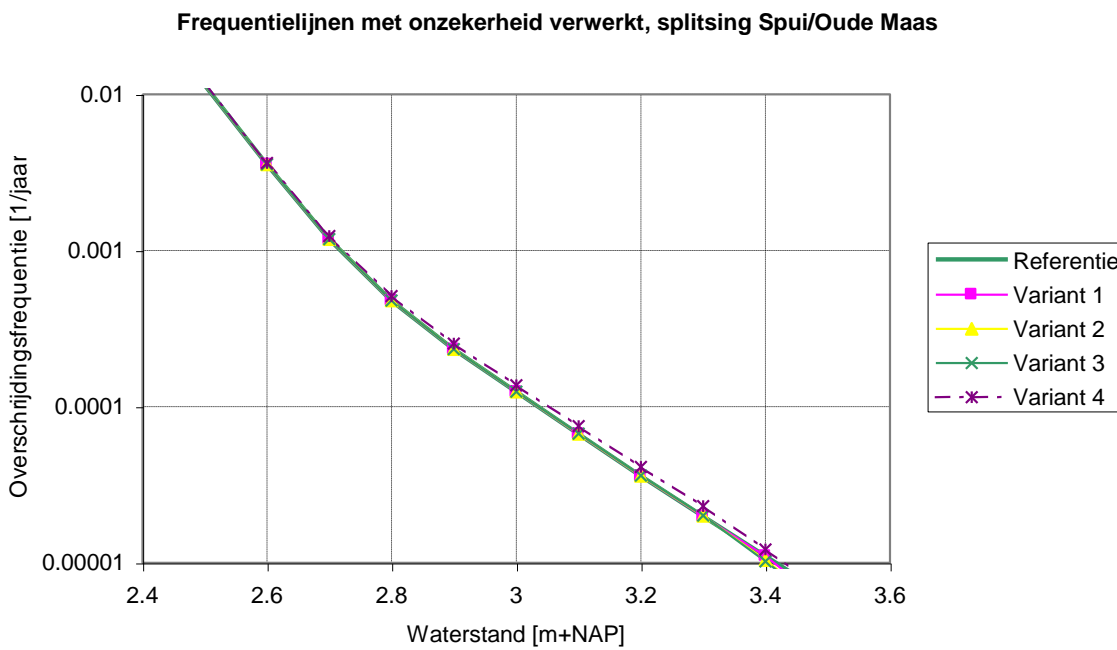
Figuur 4-6 Frequentielijnen Rotterdam, voor de beschouwde faalkansen.



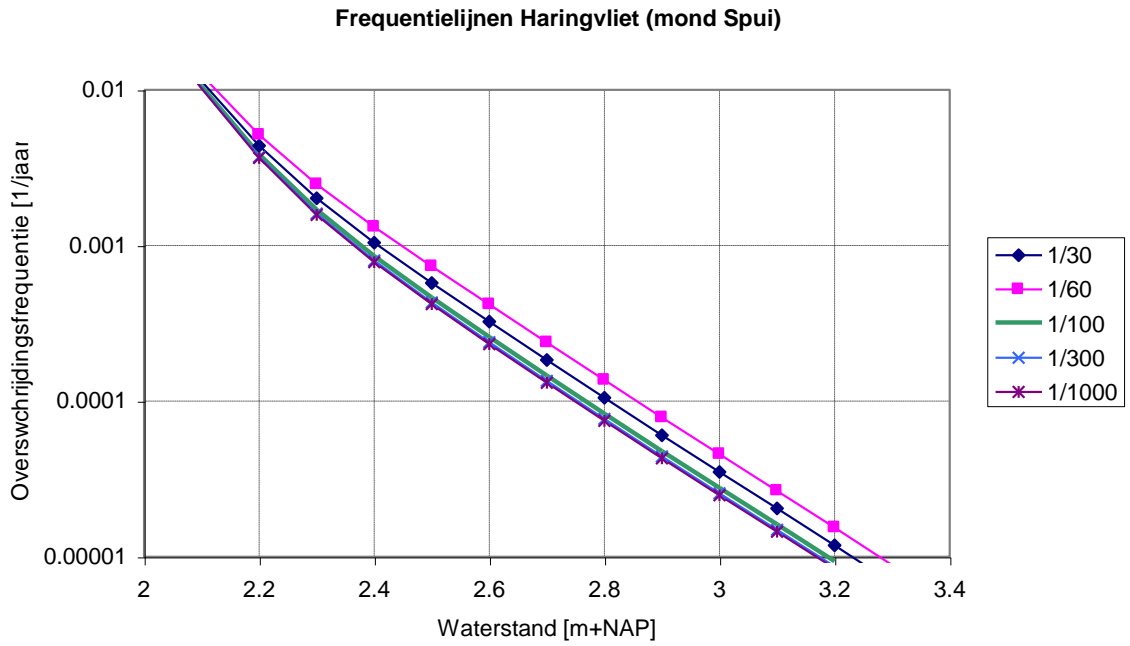
Figuur 4-7 Uiteindelijke (gewogen) frequentielijnen voor de beschouwde varianten, Rotterdam.



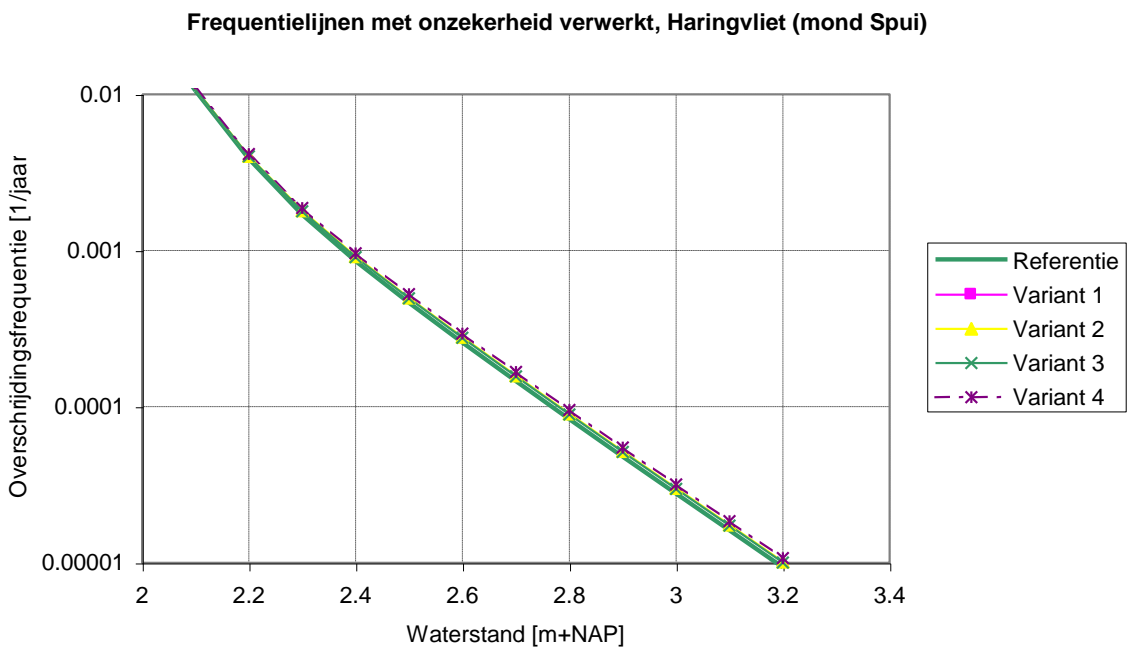
Figuur 4-8 Frequentielijnen Spui/Oude Maas, voor de beschouwde faalkansen.



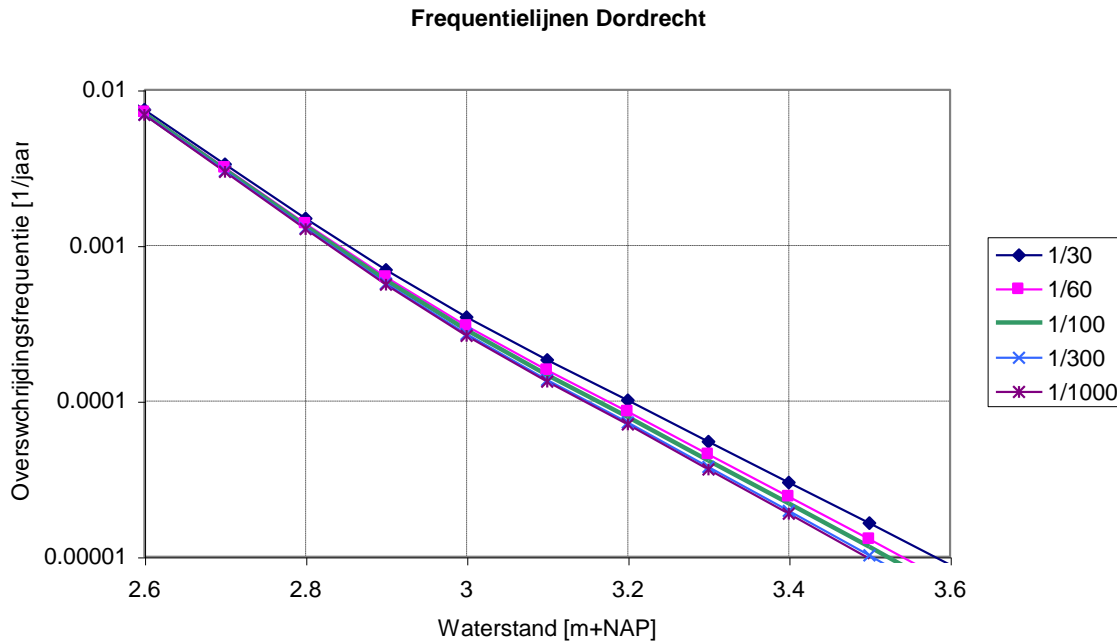
Figuur 4-9 Uiteindelijke (gewogen) frequentielijnen voor de beschouwde varianten, Spui/Oude Maas.



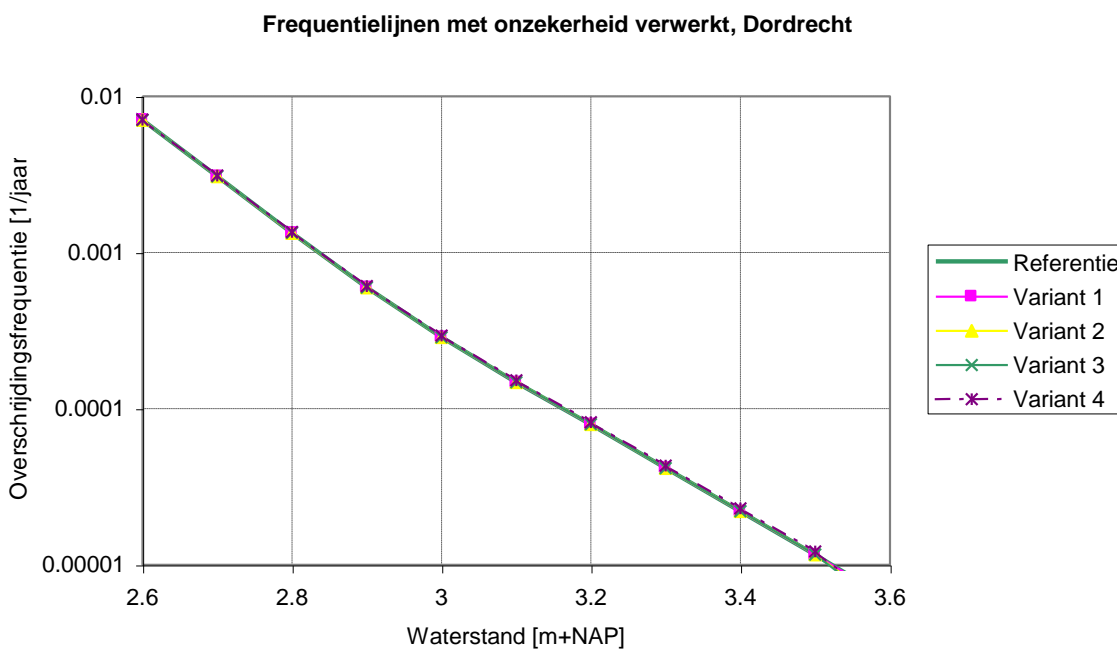
Figuur 4-10 Frequentielijnen Spui/Haringvliet, voor de beschouwde faalkansen.



Figuur 4-11 Uiteindelijke (gewogen) frequentielijnen voor de beschouwde varianten, Spui/Haringvliet.



Figuur 4-12 Frequentielijnen Dordrecht, voor de beschouwde faalkansen.



Figuur 4-13 Uiteindelijke (gewogen) frequentielijnen voor de beschouwde varianten, Dordrecht.

4.2.3 Advies

De conclusie is dat het meenemen van onzekerheid in de faalkans α tot volstrekt verwaarloosbare effecten op het MHW leidt. Het advies is daarom om geen onzekerheid in de faalkans van de Europortkering mee te nemen in de WTl2017.

Voor de volledigheid melden we nog dat, ook als deze onzekerheid wel zou worden meegenomen, geen extra productiesommen zijn vereist. Verder zijn de benodigde formules, zoals hiervoor weergegeven, uiterst simpel van karakter.

4.3 Additionele faalmodi Europoortkering

Door de opdrachtgever is gevraagd welke additionele faalmodi, die in de literatuur zijn beschreven, een significante invloed hebben op de MHW's. De faalmodi die hier worden besproken zijn:

1. Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering.
2. Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm.
3. Partieel falen van de Maeslantkering, d.w.z. een gedeeltelijke sluiting van de kering, waarbij één van beide wanden sluit, maar de andere (deels) geopend blijft.

4.3.1 Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering

Effecten op MHW's

Volgens recent onderzoek [Goederen De, 2012; Diermanse et al, 2010] heeft onafhankelijk falen nabij Rotterdam een MHW-verlaging van circa 6 cm tot gevolg, t.o.v. de situatie van afhankelijk falen. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de MHW-processor voor het maken van de benodigde SOBEEK-sommen, en van Hydra-BS voor de probabilistische naverwerking. Verder wordt in [Goederen De, 2012] gesteld dat volgens de huidige inzichten *onafhankelijk falen* van de Hartel- en Maeslantkering veel dichterbij de werkelijkheid ligt dan *afhankelijk falen*. Volgens deze referentie zullen de MHW's bij een realistische mix van afhankelijk en onafhankelijk falen in het zeegebied circa 5 cm lager uitvallen.

Formules

In Hydra-B, Hydra-Zoet en Hydra-BS bestaat al de mogelijkheid om te rekenen met onafhankelijk falen van de EP. De formules hiervoor, die een eenvoudige variant vormen t.o.v. die voor afhankelijk falen, zijn dan ook genoegzaam bekend, zie bijvoorbeeld [Geerse, 2003] of [Geerse, 2007].³³ Wat tot dit moment ontbreekt zijn de benodigde productiesommen, zie daarover de volgende paragraaf.

Benodigde productiesommen

Voor afhankelijk falen (de aanname uit de HR2006) worden wat de keringen betreft de volgende combinaties doorgerekend:

- Maeslantkering open, Hartelkering open,
- Maeslantkering juist functionerend, Hartelkering juist functionerend.

Voor onafhankelijk falen dienen aanvullend de volgende combinaties te worden doorgerekend:

- Maeslantkering open, Hartelkering juist functionerend,
- Maeslantkering juist functionerend, Hartelkering open.

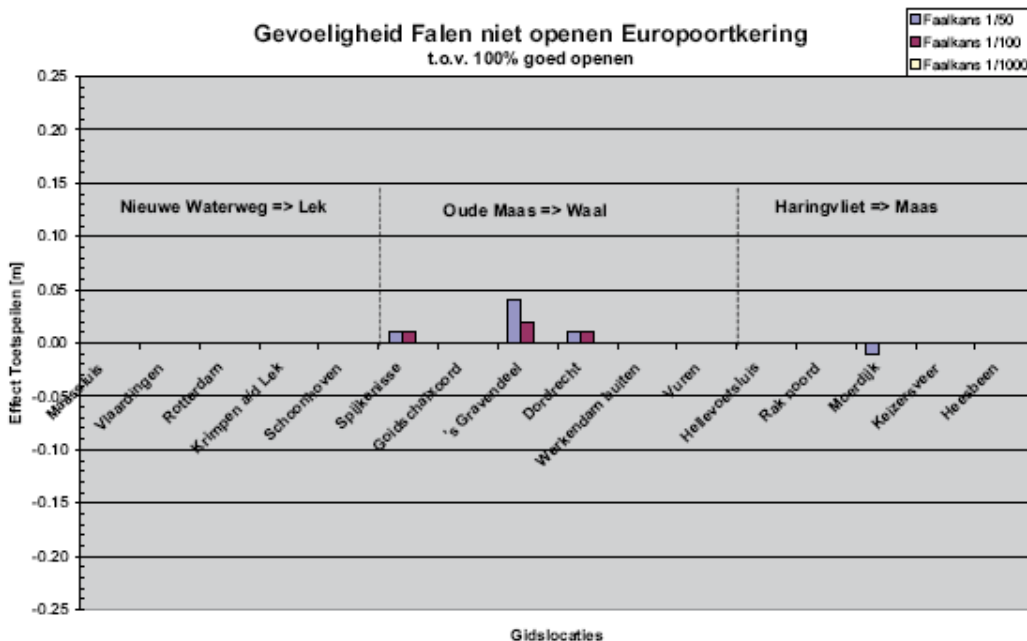
Dat betekent dat bij onafhankelijk falen twee maal zoveel productiesommen moeten worden doorgerekend.

Zie voor de adviezen over al of niet meenemen van onafhankelijk falen paragraaf 4.3.4.

³³ Het is mij niet bekend of onafhankelijk falen ook in Hydra-Ring is geïmplementeerd.

4.3.2 Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm

Volgens "Analyse watersysteem: Gevoeligheidsanalyse" uit [Systeemanalyse RMM, 2009] heeft de genoemde faalmodus een zeer beperkte invloed, zie Figuur 4-14. Reden daarvan is dat bij een gesloten EP-kering normaliter via de Haringvlietsluizen overtollig water zeer effectief kan worden afgevoerd.



Figuur 4-14 De invloed van niet-openen van de Europoortkering op de MHW's (oftewel Toetspeilen). Bron: [Systeemanalyse RMM, 2009].

Deze faalmodus wordt verder dan ook niet beschouwd. Voor de volledigheid noemen we dat de benodigde formules en productiesommen in [Geerse, 2007] wel zijn behandeld. In Hydra-BS bestaat namelijk al de mogelijkheid deze faalmodus mee te nemen. Voorwaarde is dan wel dat deze productiesommen hiervoor beschikbaar zijn.³⁴

4.3.3 Partieel falen van de Maeslantkering

In [Kallen et al, 2012] wordt zogenaamd partieel falen van de Maeslantkering beschouwd: een gedeeltelijke sluiting van de kering, waarbij één van beide wanden op de juiste manier wordt uitgevaren en afzinkt, maar de andere (deels) geopend blijft. De mate waarin de niet juist functionerende wand geopend blijft, kan variëren. In de genoemde referentie worden diverse mogelijkheden daarvoor doorgerekend, met aannames voor de faalkansen. Ook worden situaties beschouwd waarbij beide wanden wel worden uitgevaren maar beiden niet afzinken.

Het effect op de maatgevende waterstanden in deze studie is bepaald met een aangepaste versie van Hydra-BS, ontwikkeld door HKV, die de naam Hydra-BP heeft gekregen. Het gevolg van deze aanpassing is de mogelijkheid om een groot aantal toestanden van de Maeslantkering, onafhankelijk van de toestand van de Hartelkering, te kunnen beschouwen. In totaal is in

³⁴ In "Analyse watersysteem: Gevoeligheidsanalyse" uit [Systeemanalyse RMM, 2009] wordt gezegd dat de resultaten uit Figuur 4-14 met Hydra-B zijn berekend. Vermoedelijk is dan Hydra-BS bedoeld, in welk geval deze productiesommen indertijd gemaakt zijn t.b.v. de systeemanalyse. De precieze gang van zaken heb ik niet kunnen achterhalen.

Hydra-BP in de studie [Kallen et al, 2012] gerekend met 20 verschillende keringcombinaties van Maeslant- en Hartelkering. Daarbij is uitgegaan van *onafhankelijk falende keringen*.

Effecten op MHW's

Afhankelijk van allerlei aannames, wordt in [Kallen et al, 2012] geconcludeerd dat meenemen van partieel falen wel circa 15 cm verlaging van het MHW nabij Rotterdam kan geven.

Kanttekeningen bij partieel falen

Een nadrukkelijke kanttekening die in [Kallen et al, 2012] wordt gemaakt, is dat de huidige Maeslantkering niet is ontworpen voor partieel falen. Ook is de huidige aansturing van de Maeslantkering niet geschikt voor het sluiten van de kering met één wand. Vandaar dat wordt aanbevolen verder onderzoek te doen naar de mogelijkheid van het werken van de kering met één kerende wand. Ook wordt aanbevolen te onderzoeken wat in dat geval de consequenties zijn voor het besturings- en beslissysteem.

Formules

De formules voor het meenemen van partieel falen zijn gelijksoortig aan de overige formules uit Hydra-BS/BP (in essentie een simpele weging over de kansen waarmee faalmodi voorkomen). Zie voor meer details [Duits, 2012].

Benodigde productiesommen

In Hydra-BP worden de waterstandsberekeningen gemaakt voor slechts één windrichting (WNW) met de windsnelheid deterministisch gekoppeld aan de zeewaterstand (voor de Rijn-dominante HR-situatie 108 SOBEK-sommen). Als, analoog aan Hydra-Zoet, in Hydra-Ring alle westelijke richtingen worden meegenomen (ZW, WZW,..., N), en meerdere windsnelheden per richting worden doorgerekend, zijn veel meer sommen nodig ((voor de Rijndominante HR-situatie 3384 SOBEK-sommen).

Als partieel falen wordt ingebouwd in Hydra-Zoet of Hydra-Ring, ligt het voor de hand uit te gaan van de complete sommenset. Als in dat geval meerdere toestanden van partieel falen worden meegenomen, zijn aanzienlijk meer productiesommen nodig dan het aantal van 3384. Dat aantal wordt dan een veelvoud daarvan, met het precieze aantal afhankelijk van het aantal faalmodi van partieel falen.

4.3.4 Advies

Mijn advies betreffende de hiervoor genoemde faalmodi is als volgt:

1. *Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm*
Neem deze optie niet mee, omdat het effect hiervan op de MHW's verwaarloosbaar is.
2. *Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering*
Het lijkt in eerste instantie plausibel deze optie mee te nemen. Het aantal benodigde productiesommen is een factor twee groter t.o.v. de huidige situatie, wat slechts een beperkte toename betekent, terwijl de MHW-verlaging in het zeegebied circa 5 cm betreft.³⁵ Maar alvorens deze optie mee te nemen dient meer zekerheid te bestaan over de aanname dat onafhankelijk falen in werkelijkheid veel realistischer is dan afhankelijk falen. Die

³⁵ Het is mij overigens op dit moment niet duidelijk welke locaties in deze context tot het zeegebied worden gerekend.

aanname dient eerst te worden onderbouwd.

3. *Partieel falen van de Maeslantkering*

Gezien het effect van deze optie (circa 1.5 dm verlaging) lijkt het voor de hand te liggen om deze optie in de een of andere vorm mee te nemen, waarbij het aantal 'partiële faalmodi' dan wel beperkt dient te blijven (met wellicht slechts 1 faalmodus).

Echter, zoals in [Kallen et al, 2012] wordt opgemerkt, is de huidige Maeslantkering niet ontworpen voor partieel falen, en is de huidige aansturing van de kering ook niet geschikt voor het sluiten met één wand. Zolang over deze zaken geen zekerheid bestaat, is het advies partieel falen niet te implementeren.

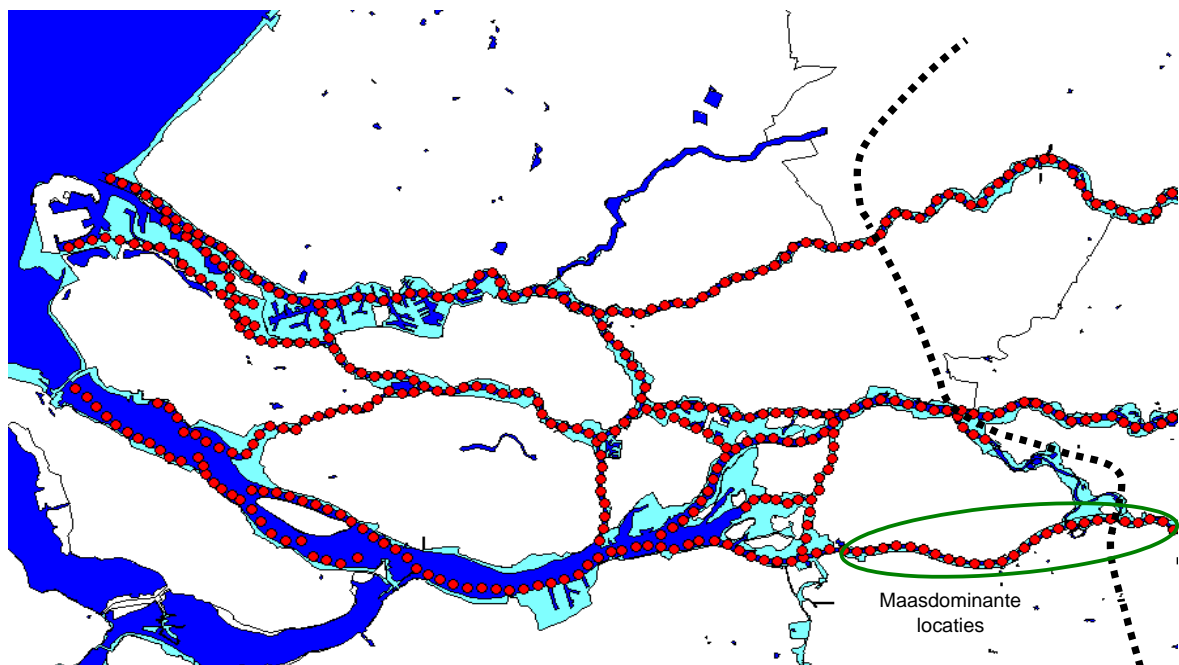
Zonder verdere onderbouwing luidt mijn uiteindelijke advies voor de extra faalmodi van de Europoortkering derhalve om geen van de drie opties mee te nemen, en eenvoudig te blijven bij de huidige aanpak van afhankelijk falen van Maeslant- en Hartelkering, met alleen de faalmodi (volledig) open en juist functionerend.

5 Correlaties

5.1 Correlatie tussen Rijnafvoer Lobith en Maasafvoer Lith

5.1.1 De 50%-lijnen uit de huidige aanpak

In Hydra-Zoet en Hydra-Ring wordt op dit moment voor de benedenrivieren uitgegaan van een vereenvoudigde manier om de correlatie te beschrijven tussen de afvoeren te Lobith en te Lith. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in zogenaamde *Rijndominante* en *Maasdominante* locaties, zie Figuur 5-1. Voor Rijndominante locaties heeft de Rijnafvoer de meeste invloed op de waterstanden, en voor Maasdominante locaties geldt dat voor de Maas. Dientengevolge wordt voor Rijndominante locaties afvoerstatistiek voor de Rijn (Lobith) gebruikt, en voor de Maasdominante afvoerstatistiek voor de Maas (Lith).



Figuur 5-1 Onderverdeling benedenrivieren (gebied ten westen van de gestreepte lijn) in Rijn- en Maasdominante locaties. Weergegeven zijn alleen locaties op de rivieras (zogenaamde aslocaties). De groen omcirkelde locaties zijn Maasdominant, de overige Rijndominant.

De correlatie tussen beide rivieren wordt in Hydra-Zoet en Hydra-Ring niet volledig probabilistisch meegenomen, maar op versimpelde wijze, door in de waterbewegingssommen die als invoer dienen voor deze modellen (voorheen gemaakt met SOBEK en nu met WAQUA) bepaalde verbanden tussen de rivieren aan te nemen.³⁶ Voor Rijndominante locaties, waarbij in de probabilistische berekeningen zoals gezegd Rijnafvoeren worden beschouwd, wordt bij iedere beschouwde Rijnafvoer q_{Lob} een representatieve Maasafvoer $q_{Lith,50\%}$ gekozen. Die Maasafvoer is, bij de beschouwde q_{Lob} , gelijk aan de mediaan (50%-waarde) van de mogelijke Maasafvoeren die bij q_{Lob} kunnen optreden. Omgekeerd wordt voor Maasdominante locaties bij

³⁶ Het wel volledig meenemen van deze correlatie levert, bij beschouwen van 9 afvoeren per rivier, een factor 4.5 maal zoveel benodigde productiesommen dan nu het geval is: dat aantal loopt op tot $4.5 \cdot 6768 = 30456$. Dat aantal wordt, gezien de beperkte vermoedelijke winst aan nauwkeurigheid, onwenselijk groot geacht.

iedere q_{Lith} een representatieve Rijnaafvoer $q_{Lob,50\%}$ gekozen, die weer gelijk is aan de mediane waarde van de Rijnaafvoeren die tijdens q_{Lith} kunnen optreden.

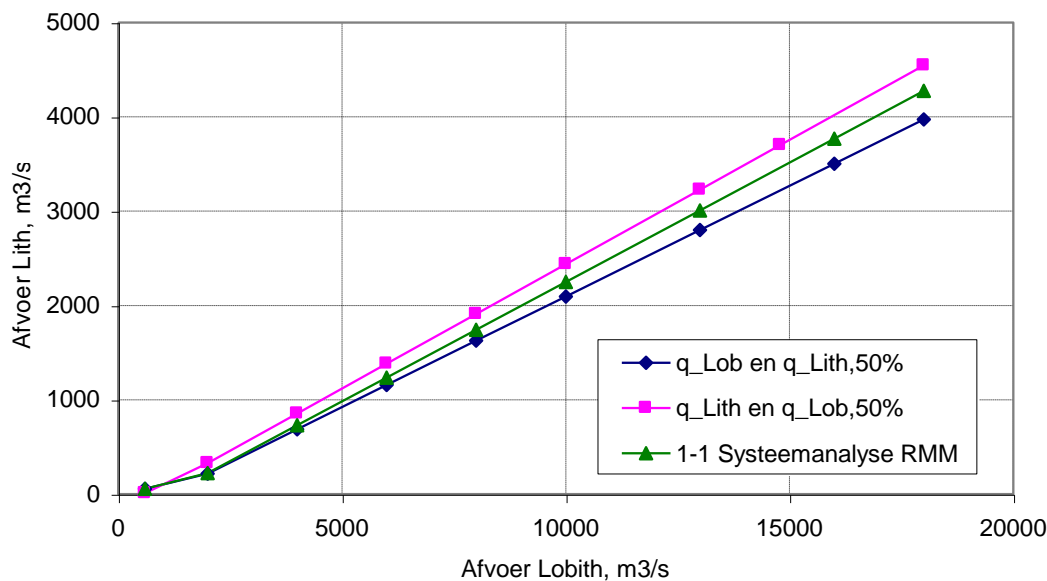
De zojuist genoemde zogenaamde 50%-lijnen zijn weergegeven in Tabel 5-1. Deze getallen zijn gebruikt in de SOBEK-sommen uit de TMR2006, en tevens in de SOBEK-sommen uit de HR2001/HR2006, zie [Waal De, 2007]; de lijnen zijn ook weergegeven in Figuur 5-2.

N.B. de 1-1 lijn wordt hieronder besproken.

Rijndominant		Maasdominant		1-1 lijn maximale correlatie	
q_{Lob}	$q_{Lith,50\%}$	q_{Lith}	$q_{Lob, 50\%}$	q_{Lob}	q_{Lith}
m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
600	55	10	600	600	55
2000	217	327	2000	2000	222
4000	687	855	4000	4000	729
6000	1156	1382	6000	6000	1235
8000	1626	1909	8000	8000	1742
10000	2095	2437	10000	10000	2248
13000	2800	3228	13000	13000	3008
16000	3504	3700	14790	16000	3768
18000	3974	4546	18000	18000	4275

Tabel 5-1 De 50%-lijnen uit de TMR2006/HR2001/HR2006, alsmede de 1-1 lijn.

50%-lijnen en het 1-1 verband Systeemanalyse Rijn-Maasmonding



Figuur 5-2 De 50%-lijnen uit de HR2006.

5.1.2 Het 1-1 verband, als vervanging van de 50%-lijnen

In de Systeemanalyse Rijn-Maasmonding is onderzocht of een vereenvoudiging mogelijk is, waarbij de twee lijnen worden vervangen door één lijn die tussen beide lijnen in ligt. Dat is de zogenaamde 1-1 lijn, die overeenstemt met de maximale correlatie tussen beide rivieren, zoals deze is bepaald op basis van *dagwaarden* in [Fioole, 1999]. Deze lijn is eveneens weergegeven in Tabel 5-1 en Figuur 5-2. N.B. De 1-1 lijn is dus niet afgeleid door de werklijnen van Lobith en Lith aan elkaar te koppelen. Als dat laatste wel het geval zou zijn, zou bijvoorbeeld 16000

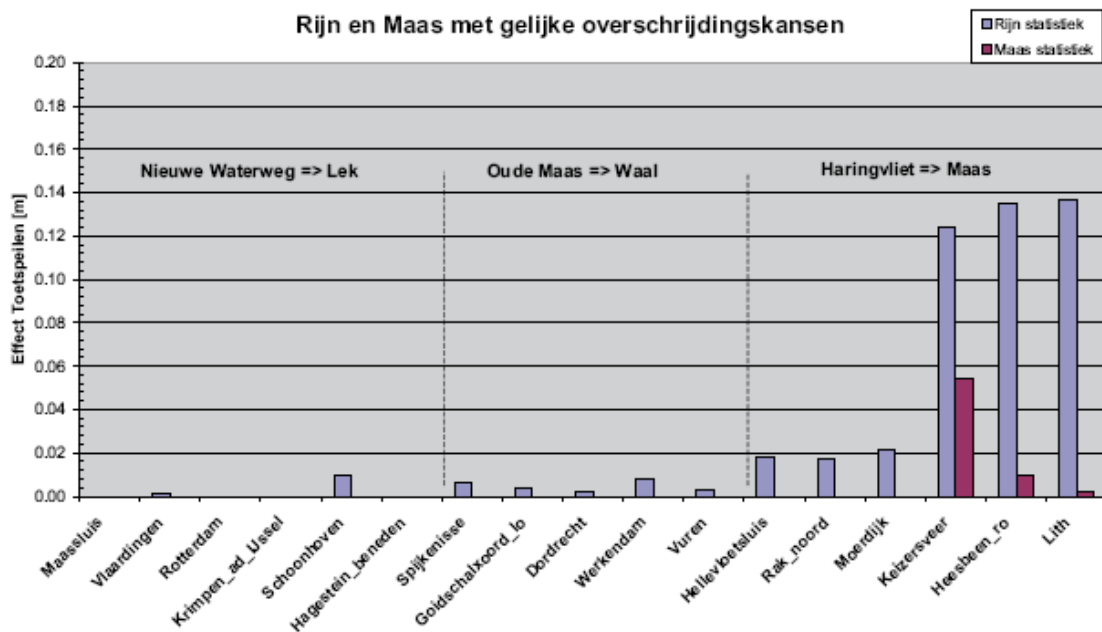
m^3/s voor Lobith corresponderen met $3650 m^3/s$ te Lith (de maatgevende Lith-afvoer in de HR2001/HR2006), i.p.v. met $3768 m^3/s$ zoals in Tabel 5-1.

Als met de 1-1 lijn berekeningen worden gemaakt, blijkt dat slechts geringe verschillen in MHW's ontstaan tussen de berekeningen met de twee 50%-lijnen, zie Figuur 5-3. Deze figuur laat zien dat als per locatie met de goede statistiek wordt gerekend (Rijnstatistiek voor Rijndominante locaties en Maasstatistiek voor Maasdominante) de verschillen voor de doorgerekende locaties beperkt blijven tot 5 á 6 cm. Voor locaties direct ten westen van Keizersveer zouden de verschillen echter wat groter kunnen zijn. Zie hierover echter ook onderstaand kader.

Met welke gegevens voor het 1-1 verband is in de Systeemanalyse gerekend?

De getallen voor de 1-1 lijn zijn grotendeels overgenomen uit Tabel 3.2 van het deelrapport "Analyse watersysteem: Gevoeligheidsanalyse" uit [Systeemanalyse RMM, 2009]. Daarin komt i.p.v. de combinatie ($13000 m^3/s$, $3008 m^3/s$), de combinatie ($12000 m^3/s$, $3008 m^3/s$) voor. Laatstgenoemde combinatie valt echter uit de toon bij de rest van het verband, en is hier veranderd in ($13000 m^3/s$, $3008 m^3/s$). Deze keuze komt bovendien voor als beschrijving van het 1-1 verband in [Deugd De, 1998], dat voor de overige combinaties uit het verband overeenstemt met de getallen uit de systeemanalyse. Daaruit concluderen we dat ($13000 m^3/s$, $3008 m^3/s$) inderdaad de juiste combinatie is.

Mogelijk is in de systeemanalyse toch gerekend met de (foutieve) combinatie ($12000 m^3/s$, $3008 m^3/s$). Als dat zo is, zou de "werkelijke fout" ten westen van Keizersveer kleiner kunnen zijn dan op basis van Figuur 5-3 wordt verwacht. Op dit moment is echter niet na te gaan waarmee in de Systeemanalyse is gerekend.



Figuur 5-3 Het effect van het vervangen van de twee 50%-lijnen op de MHW's door het 1-1 verband tussen Lobith en Lith. Bron: [Systeemanalyse RMM, 2009].

5.1.3 Consequenties voor implementatie en productiesommen

Het huidige aantal productiesommen voor de benedenrivieren is gelijk aan $2 \cdot 3384 = 6768$, waarbij de factor 2 afkomstig is van de twee typen rivierdominantie. Als de twee 50%-lijnen worden vervangen door het 1-1 verband, reduceert het huidige aantal productiesommen met een factor 2, en wordt dat aantal gelijk aan 3384.

Als in Hydra-Ring de 50%-lijnen worden vervangen door het 1-1 verband, heeft dat implementatietechnisch nauwelijks consequenties. De veranderingen aan de code zullen gering zijn. N.B. Het onderscheid tussen Rijn- en Maasdominante locaties *blijft wel bestaan*, omdat per locatie met de juiste afvoerstatistiek moet worden gerekend (juiste overschrijdingskansen en afvoertrapezia). Dat laatste blijkt ook uit Figuur 5-3, waarbij voor bijvoorbeeld Lith het rekenen met de Rijnstatistiek tot een 14 cm hoger MHW blijkt te leiden.

5.1.4 Advies en aanbeveling

Het lijkt aantrekkelijk om de twee 50%-lijnen te vervangen door het 1-1 verband, omdat de resulterende MHW-veranderingen voor in ieder geval de locaties uit Figuur 5-3 over het algemeen gering zijn. Maar alvorens dat te doen, is het aan te bevelen om voor *alle* aslocaties uit de benedenloop van de Maas en in de Biesbosch de gevolgen van deze overgang te onderzoeken, om te controleren of de MHW-veranderingen ook hier aanvaardbaar klein zijn.³⁷ Als deze verschillen aanvaardbaar klein zijn – wat wel de verwachting is – kan deze overgang worden gemaakt.

5.2 Correlatie tussen IJsselaflow Olst en Vechtaflow Dalfsen

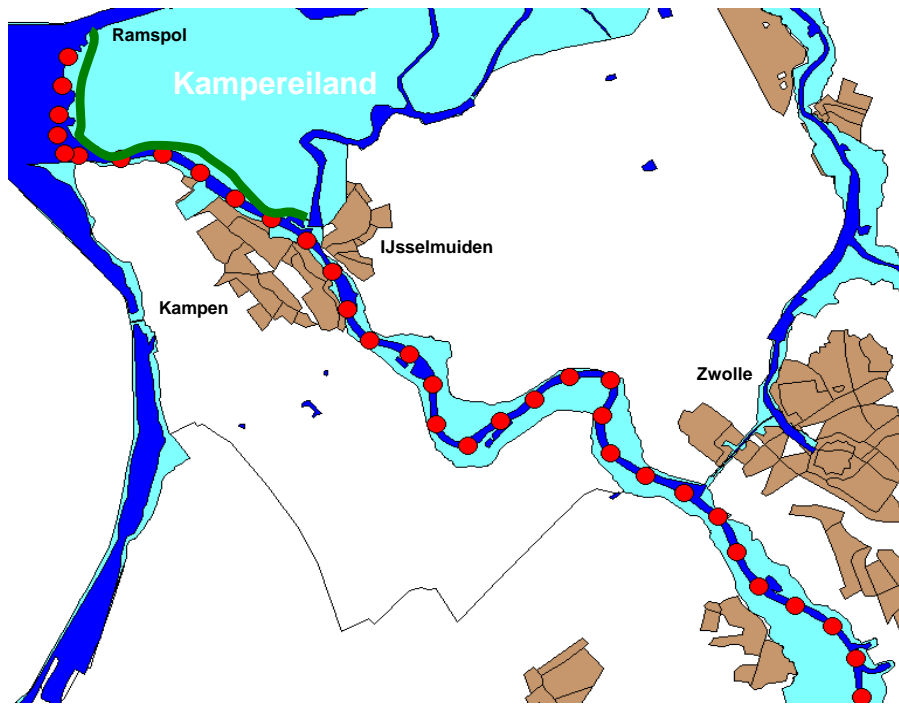
5.2.1 Modelling van de correlatie in de huidige situatie

In Hydra-Zoet en Hydra-Ring wordt onderscheid gemaakt tussen Vechtdominante en IJsseldominante locaties, waarbij dominantie van de rivier een soortgelijke betekenis heeft als voor de benedenrivieren. In de Vecht-IJsseldelta zijn alle locaties ten oosten van de Ramspolkering Vechtdominant, terwijl alle locaties langs de IJssel IJsseldominant zijn. Daarbij wordt echter slechts één 50%-lijn gebruikt, weergegeven in o.m. [Geerse, 2006], die is afgestemd op de Vechtdominante situatie: aan iedere Vechtaflow wordt daarbij een representatieve IJsselaflow gekoppeld. Een juiste keuze is met name van belang omdat de dijk die loopt van IJsselmuiden tot Ramspol overstroombaar is gemaakt, zie Figuur 5-4: deze kan tijdens extreme waterstanden op de IJssel overstromen richting Kampereiland.³⁸

Dat voor IJsseldominante locaties geen representatieve Vechtaflows nodig zijn, heeft als oorzaak dat fysisch gezien de Vecht een verwaarloosbare invloed heeft op locaties langs de IJssel. De Vecht heeft namelijk alleen invloed op waterstanden in de IJssel via de “verre omweg” van het Ramsdiep (ter plaatse van de balgstuw), die uitkomt in het Ketelmeer, waarbij ook relevant is dat Vechtdebieten aanzienlijk kleiner zijn dan IJsseldebieten.

³⁷ Het spreekt voor zich dat er nauwkeurig op moet worden gelet dat het juiste 1-1 verband wordt gebruikt, zoals weergegeven in Tabel 5-1.

³⁸ De representatieve waarde stemt, bij gegeven Vechtaflow, niet precies overeen met de mediaan van de mogelijke IJsselaflows. Reden daarvan is dat het verband dat de representatieve afvoeren weergeeft al in een vroeg stadium gekozen moest worden, voordat de mediane afvoeren bepaald konden worden uit een later gebruikt correlatiemodel.



Figuur 5-4 De IJsseldelta, met de overstroombare dijk IJsselmuiden – Ramspol (groen weergegeven), grenzend aan het Kampereiland. Bron: [Geerse, 2011].

5.2.2 Advies

Omdat voor de Vecht-IJsseldelta slechts één 50%-lijn wordt gebruikt, zijn geen verdere vereenvoudigingen mogelijk, zoals voor de benedenrivieren wel het geval is. Het advies is daarom bij de huidige aanpak te blijven. In het bijzonder zijn er geen consequenties t.a.v. Hydra-Zoet en Hydra-Ring voor implementatie en aantal productiesommen.

5.3 Correlatie tussen afvoeren Maas, Dommel en Aa

5.3.1 Timing afvoergolven Maas enerzijds en Dommel en Aa anderzijds

De Dommel en Aa lozen normaliter hun water via de Dieze op de Maas, bij de keersluis te Crèvecoeur (Maas, km 220), ten noorden van 's Hertogenbosch. Dat gebeurt onder omstandigheden waarbij de waterstand op de Maas onder die van de Dieze ligt. Onder extreme omstandigheden, met veel regenval, zal de Maaswaterstand daarvoor echter vaak te hoog zijn, in welk geval de keersluis gesloten is. In dat geval wordt overtollig water van de Dommel en Aa via het Afwateringskanaal geleid en in de Maas geloosd, bij km 235. (N.B. Het verval over de Maas is veel groter dan het verval over het Afwateringskanaal.

Op dit moment wordt een zekere timing gebruikt tussen de afvoergolf op de Maas enerzijds, en van de afvoergolf op Dommel en Aa anderzijds. De piek van de laatste rivieren valt daarbij vóór die van de afvoergolf op de Maas. Een vraag die onderzocht moet worden is of deze timing, in het licht van de resultaten uit hoofdstuk 3 – waarin is onderzocht of het zinvol is de duur/breedte van de golfvorm als stochast mee te nemen – herzien moet worden.

In hoofdstuk 3 is geconcludeerd dat het inderdaad zinvol is de golfduur stochastisch mee te nemen, mits tenminste de gegevens uit de gevoeligheidsanalyse enigszins representatief zijn

voor de werkelijkheid. Een belangrijke conclusie is dat de MHW's verder benedenstrooms van Borgharen vooral samengaan met afvoergolven die bij Borgharen relatief breed zijn (orde gemiddelde golf én breder). Als deze relatief brede golven een duidelijk andere looptijd hebben dan de gemiddelde golf waarmee tot op heden in de modellen is gerekend zou dat aanleiding zijn de huidige timing tussen afvoeren van Dommel en Aa enerzijds en de Maasafvoer anderzijds, te herzien.

In de eerder genoemde studie Verkenning Verruiming Maas (VVM) is onderzocht wat, over het traject Borgharen – Ammerzoden (km 224), de looptijden zijn van de 2.5%-golf, de gemiddelde golf en de 97.5%-golf (zie de toelichting bij Figuur 3-12). Daarbij zijn zowel looptijden bepaald op basis van de passage van de waterstandstop (looptijd hoogwatergolf) als van de afvoertop (looptijd afvoergolf). Tabel 5-2 bevat gegevens uit die studie voor piekwaarden 3800 m³/s en 3275 m³/s te Borgharen. De tabel laat zien dat de verschillen in looptijd tussen de gemiddelde en de brede golven verwaarloosbaar klein zijn. In het licht van bovenstaande resultaten is er dus geen reden de timing tussen afvoergolven op de Maas enerzijds, en van de afvoergolf op Dommel en Aa anderzijds te herzien.

Golfvorm	Piekwaarde Borharen	Looptijd hoogwatergolf	Looptijd afvoergolf
	m ³ /s	uur	uur
2.5%-golf (zeer smal)	3800	79	77
gemiddelde golf	3800	66	64
97.5%-golf (zeer breed)	3800	66	65
2.5%-golf (zeer smal)	3275	82	79
gemiddelde golf	3275	71	68
97.5%-golf (zeer breed)	3275	71	69

Tabel 5-2 Looptijden afvoergolf tussen Borgharen en Ammerzoden (km 224). Bron: Tabel 3-4 uit [Barneveld et al, 2000].

Oftewel: het feit dat bedreigende situaties op de Maas, volgens de resultaten uit hoofdstuk 3, relatief vaak samen zullen gaan met bredere golven dan tot nu toe wellicht gedacht, heeft geen gevolgen voor de timing tussen beide golven.

5.3.2 Advies

In het licht van bovenstaande resultaten is er geen reden de timing tussen afvoergolven op de Maas enerzijds en van de afvoergolf op Dommel en Aa anderzijds te herzien. Derhalve is het advies de thans gehanteerde timing te blijven hanteren.

6 Conclusies en advies

Het hoofddoel van deze studie is om voor een aantal onderwerpen – betreffende afvoeren, stormvloedkeringen en correlaties – adviezen te geven voor de aanpak daarvan in Hydra-Ring t.b.v. WT12017, alsmede de belangrijkste argumenten daarvoor. In het bijzonder dient duidelijk te worden gemaakt hoe bij een beschouwde optie de inbouw in Hydra-Ring moet plaatsvinden, en wat de consequenties zijn voor de benodigde productiesommen.

In de volgende paragrafen worden deze adviezen gegeven, alsmede de consequenties voor het aantal benodigde productiesommen. Voor de uitgebreide argumentatie – en de manier waarop een optie kan worden ingebouwd – wordt verwezen naar de relevante paragrafen uit dit rapport.

6.1 Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten

De mate waarin de onzekerheid van de afvoerverdeling op de splitsingspunten doorwerkt op de MHW's (op vakniveau) en op ringdelen (op dijkringniveau) hangt af van de beschouwde riviertak en van het beschouwde ringdeel. Voor de IJssel en Lek ondergaan de MHW's (in de berekeningsvariant uit dit rapport) de grootste veranderingen, omdat deze rivieren achter beide splitsingspunten liggen.

De MHW's kunnen bij het meenemen van onzekerheid tot circa 5 cm toenemen. De overschrijdingsfrequenties van ringdelen langs de riviertakken kunnen door het meenemen van deze onzekerheden met circa 50% toenemen. De mate van verandering van de MHW's en de ringfrequenties hangt echter af van de specifieke situatie, en voor de aangenomen spreidingsmaten (σ 's) op de splitsingspunten, zie voor meer details paragraaf 2.3.

Gezien de grootte van de invloed – die meenemen van de genoemde onzekerheid heeft – wordt geadviseerd die onzekerheid mee te nemen in Hydra-Ring. In dit rapport worden daartoe drie opties genoemd:

1. Implementeer de onzekerheden op probabilistische wijze voor zowel de ring- als de vakbenadering (meest volledige implementatie).
2. Implementeer de onzekerheden op probabilistische wijze door alleen de frequentielijnen op vakniveau aan te passen (gedeeltelijke implementatie van de onzekerheden). Hanteer eventueel een deterministische toeslag op de overschrijdingsfrequentie ingeval een ringberekening wordt uitgevoerd.
3. Implementeer de onzekerheden op een vereenvoudigde manier door op deterministische wijze toeslagen toe te passen (bijvoorbeeld op de waterstanden per vak, en/of op de overschrijdingsfrequentie bij een ringberekening).

Voor optie 1 en 2 dient Hydra-Ring te worden aangepast, terwijl dat voor optie 3 niet of nauwelijks het geval is. Het advies hangt af van de mate van complexiteit van het inbouwen van opties 1 en 2. Overleg met de opdrachtgever suggereert dat de volledige implementatie (optie 1) in Hydra-Ring goed haalbaar is – de structuur van het programma wordt daartoe voldoende flexibel geacht.

Op grond hiervan wordt het volgende aangeraden:

- Verifieer of optie 1 inderdaad eenvoudig is in te bouwen in Hydra-Ring. Als dat het geval blijkt, kan deze optie worden ingebouwd.
- Mocht dit vermoeden onjuist blijken, bouw dan de simpelere optie 2 in (implementatie alleen op vakniveau), terwijl voor typische ringeffecten dan eventueel met deterministische toeslagen gewerkt kan worden. Deze toeslagen dienen dan nog wel bepaald te worden. N.B. De volledige optie 3 wordt niet aantrekkelijk geacht.

Productiesommen

Als in WTI2017 ook voor de bovenrivieren in Hydra-Ring probabilistisch wordt gerekend met wind en afvoer, staan met WAQUA berekende afvoergolven ter beschikking (standaard 9 verschillende niveaus voor de piekwaarden). In dat geval zijn voor WTI2017 geen extra productiesommen vereist (dat geldt voor iedere genoemde optie).

6.2 Golfvorm te Borgharen als stochast

Onderzocht is wat het effect is van het stochastisch meenemen van de (breedte van de) golfvorm te Borgharen. Over grote delen van de Maas (een lengte van circa 200 km) zal dat naar verwachting leiden tot verlagingen van circa 5 – 10 cm.

Gezien de grootte van dit effect, wordt geadviseerd de golfvorm op het traject Borgharen – Lith probabilistisch mee te nemen.

Productiesommen

Bij meenemen van de golfvorm als stochast, is het nodig om een aantal standaardgolven te bepalen, variërend van smalle tot brede golven. Als gekozen wordt voor (bijvoorbeeld) 5 typen golven, levert dat in combinaties met 9 afvoerniveaus voor de piek van de golf, in totaal $9 \times 5 = 45$ sommen.

Geadviseerd wordt de typen afvoergolven (van smal tot breed), die in de productiesommen worden gebruikt, niet op de golfvormgenerator te baseren, omdat die mogelijk voor de allersmalste en de allerbreedste golven geen juiste golven produceert. Mogelijk is een beter instrument het model GRADE (zie voor een eventuele aanpak paragraaf 3.6).

6.3 Stormvloedkeringen

6.3.1 Haringvlietsluizen

Voor de Haringvlietsluizen zijn als faalmodi onderzocht het "niet-sluiten" tijdens een storm, en het "niet-openen" nadat de storm is afgelopen.

Of het voor de WTI2017 veel toevoegt om extra faalmodi in te bouwen, blijkt sterk af te hangen van de 'werkelijke' faalkans voor de beschouwde faalmodi (zie paragraaf 4.1.1). Als de faalkanseisen voor niet-sluiten en niet-openen (respectievelijk 1/5000 en 1/10000) in werkelijkheid gehaald worden, lijkt het volgens de Systeemanalyse Rijn-Maasmonding (Systeemanalyse RMM) overbodig om falen van de Haringvlietsluizen mee te nemen in Hydra-Ring.

Hier dient wel het voorbehoud te worden gemaakt dat de resultaten uit de Systeemanalyse RMM *schattingen* betreffen, die grotendeels zijn afgeleid met een minder nauwkeurig model (OKE) of met de "methode Helsloot", waarvan een goede onderbouwing ontbreekt.³⁹

Het volgende wordt geadviseerd:

1. Ga eerst met het programma Hydra-BS na (voor faalmodi niet-openen en niet-sluiten) of voor realistische waarden van de faalkansen de MHW's relevante veranderingen ondergaan. In principe kan, gezien het grote aantal schuiven van de Haringvlietsluizen, het niet-sluiten zowel als het niet-openen op veel manieren gemodelleerd worden. Eventueel kan Hydra-BS eerst worden uitgebreid met extra faalmodi voor de Haringvlietsluizen, in welk geval deze extra faalmodi kunnen worden doorgerekend.
N.B. De voorkeur gaat sterk uit naar Hydra-BS als rekeninstrument, i.p.v. de oude instrumenten OKE en "methode Helsloot".
2. Afhankelijk van de uitkomsten uit punt 1 luidt het advies:
 - o Als de genoemde veranderingen niet significant worden bevonden, hoeft falen van de Haringvlietsluizen niet te worden meegenomen in Hydra-Ring.
 - o Als de genoemde MHW-veranderingen wel significant worden geacht, is het advies het aantal faalmodi zo beperkt mogelijk te houden, zeg maximaal 4 á 5, maar liever nog minder, om het aantal benodigde WAQUA-berekeningen voor de benedenrivieren zo beperkt mogelijk te houden.

Productiesommen

Als falen van de Haringvlietsluizen niet is opgenomen in het model, wordt een zeker aantal van N productieberekeningen gebruikt. Voor bijvoorbeeld Rijndominante locaties betreft dat in de huidige aanpak $N = 3384$ combinaties van afvoer, zeestand, windsnelheid, windrichting en open en juist functionerende EP-kering. Daarbij is een correct functionerende Haringvlietkering aangenomen.

Dit aantal productiesommen neemt evenredig toe met het aantal toestanden van de Haringvlietsluizen. Als in plaats van één toestand (huidige situatie) een aantal van n toestanden wordt beschouwd, leidt dat tot $n \cdot N$ productieberekeningen. Als bijvoorbeeld één toestand voor niet-sluiten wordt toegevoegd, alsmede één toestand voor niet-openen, resulteert dat in $3 \cdot 3384 = 10152$ sommen.

6.3.2 Onzekerheid faalkans niet-sluiten Europoortkering

In dit onderzoek is vastgesteld dat het meenemen van onzekerheid in de faalkans voor het niet-sluiten van de Europoortkering tot volstrekt verwaarloosbare effecten op het MHW leidt. Het advies is daarom om geen onzekerheid in deze faalkans mee te nemen in de WT12017.

Productiesommen

Het al of niet meenemen van de genoemde faalkans heeft geen invloed op het aantal productiesommen (ook bij meenemen van deze faalkans zijn geen extra sommen vereist t.o.v. de huidige situatie).

³⁹ N.B. Het ontbreken van een goede onderbouwing wil uiteraard niet zeggen dat de methode onjuist is, maar (uiteraard) slechts dat tot op heden geen goede onderbouwing daarvan bestaat.

6.3.3 Advies faalmodi Europoortkering

In deze studie zijn de volgende faalmodi van de Europoortkering onderzocht:

- Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm.
- Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering.
- Partieel falen van de Maeslantkering, d.w.z. een gedeeltelijke sluiting van de kering, waarbij één van beide wanden sluit, maar de andere (deels) geopend blijft.

Hierover wordt het volgende geadviseerd:

1. *Niet-openen van de Maeslantkering na afloop van de storm*
Neem deze optie niet mee, omdat het effect hiervan op de MHW's verwaarloosbaar is (heel incidenteel enkele centimeters, maar vrijwel altijd minder dan 1 cm).
2. *Onafhankelijk falen van de Maeslant- en Hartelkering*
Het lijkt in eerste instantie plausibel deze optie mee te nemen. Het aantal benodigde productiesommen is een factor twee groter t.o.v. de huidige situatie, wat slechts een beperkte toename betekent, terwijl de MHW-verlaging in het zeegebied circa 5 cm betreft. Maar alvorens deze optie mee te nemen dient meer zekerheid te bestaan over de aanname dat onafhankelijk falen in werkelijkheid veel realistischer is dan afhankelijk falen. Die aanname dient eerst te worden onderbouwd.
3. *Partieel falen van de Maeslantkering*
Gezien het effect van deze optie (circa 1.5 dm verlaging) lijkt het voor de hand te liggen om deze optie in de een of andere vorm mee te nemen, waarbij het aantal 'partiële faalmodi' dan wel beperkt dient te blijven (met wellicht slechts 1 faalmodus). Echter, zoals in [Kallen et al, 2012] wordt opgemerkt, is de huidige Maeslantkering niet ontworpen voor partieel falen, en is de huidige aansturing van de kering ook niet geschikt voor het sluiten met één wand. Zolang over deze zaken geen zekerheid bestaat, is het advies partieel falen niet te implementeren.

Zonder verdere onderbouwing luidt het advies derhalve om geen van de drie opties mee te nemen, en te blijven bij de huidige aanpak van afhankelijk falen van Maeslant- en Hartelkering, met alleen de faalmodi (volledig) open en juist functionerend.

Productiesommen

Bij meenemen van onafhankelijk falen wordt het aantal benodigde productiesommen 2 maal zo groot als in de huidige aanpak met afhankelijk falen.

Als partieel falen wordt ingebouwd in Hydra-Ring, hangt het aantal benodigde sommen af van het aantal toestanden van partieel falen. Als hiervoor n toestanden worden beschouwd (inclusief de huidige faaltoestand 'volledig open'), levert dat n maal zo veel benodigde sommen als in de huidige situatie.

Terzijde: als partieel falen wordt meegenomen met n toestanden, in combinatie met onafhankelijk falen, levert dat $2*n$ maal zo veel benodigde productiesommen als in de huidige situatie.

6.4 Correlaties

6.4.1 50%-lijnen vervangen door 1-1 verband Rijn en Maas

In deze studie is geïnterviewd wat voor de benedenrivieren het effect is van het vervangen van de 50%-lijnen voor Rijn en Maas (huidige aanpak) door een 1-1 verband. Uit de Systeemanalyse RMM, waarin een (beperkt) aantal testlocaties is beschouwd, blijkt dat, behoudens voor locaties nabij Keizersveer, rekenen met het 1-1 verband verschillen in MHW's oplevert van maximaal 2 cm. Bij Keizersveer resulteert een verschil van circa 5 cm. In principe zouden de verschillen voor niet-doorgerekende locaties nabij Keizersveer echter groter kunnen zijn.

Gezien deze resultaten lijkt het aantrekkelijk om de twee 50%-lijnen te vervangen door het 1-1 verband. Maar alvorens dat te doen, is het aan te bevelen om voor *alle* aslocaties uit de benedenloop van de Maas en in de Biesbosch de gevolgen van deze overgang te onderzoeken, om te controleren of de MHW-veranderingen ook daar aanvaardbaar klein zijn. Als dat inderdaad zo is – wat wel de verwachting is – kan deze overgang worden gemaakt.

Productiesommen

Als de aanpak met 50%-lijnen wordt vervangen door een aanpak met de 1-1 lijn, halveert het aantal benodigde productiesommen.

6.4.2 50%-lijn voor Vecht en IJssel

Voor de Vecht-IJsseldelta wordt in de huidige aanpak slechts één 50%-lijn gebruikt, die dusdanig is dat aan elke Vechtafvoer een representatieve IJsselafoer wordt gekoppeld. Er zijn derhalve geen verdere vereenvoudigingen mogelijk. Het advies is daarom bij de huidige ~~aanpak~~aanpak te blijven.

Productiesommen

Het huidige aantal productiesommen (en de manier waarop deze sommen worden gemaakt) blijft ongewijzigd.

6.4.3 Timing afvoergolven Maas en Dommel/Aa

In dit onderzoek is geïnterviewd in welke mate de looptijden van afvoergolven op de Maas worden beïnvloed door de breedte van de afvoergolf te Borgharen. Andere looptijden leiden namelijk tot een andere timing tussen de afvoergolven van de Maas enerzijds en die van de Dommel/Aa anderzijds.

Op grond van het onderzoek uit hoofdstuk 3 is geconcludeerd dat de meest relevante golven benedenstrooms van Borgharen eerder breder dan smaller zijn dan de huidige maatgevende golf te Borgharen. Omdat volgens de inventarisatie de looptijden van de golven echter nauwelijks blijken af te hangen van hun breedte, leiden deze inzichten niet tot een andere timing tussen afvoergolven op de Maas enerzijds en van de afvoergolf op Dommel en Aa anderzijds. Derhalve is het advies de thans gehanteerde timing te blijven hanteren.

Productiesommen

De gehanteerde timing heeft geen invloed op de productiesommen.

Referenties

[AHA BV en Rura, 2013]

Gevoeligheidsanalyse golfvorm bij afvoergolven Deltamodel. AHA BV en Rura-Arnhem, april 2013. Opdrachtgever Deltares, referentie 1207829-000-VEB-0002.

[Barneveld et al, 2000]

Verkenning Verruiming Maas. Deel 1: Hoofdrapport en Deel 2: Figuren, Tabellen en Bijlagen. H.J. Barneveld, J. Udo en A.D. Voutsis. VVM-rapport nr. 5. HKV Lijn in Water, oktober 2000. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, Directie Limburg.

[Beijk en Geerse, 2004]

Opschaling van afvoergolven en stormen. V.A.W. Beijk en C.P.M. Geerse. RIZA-Werkdocument 2004.075x. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, april 2004.

[Bouw, 2008]

Decimeringshoogten TMR2006 definitief. R. Bouw. Witteveen en Bos. Deventer, juni 2008.

[Deugd De, 1998]

Samenhang afvoer Bovenrijn en Maas. H. de Deugd. Memo WST-98.142. RIZA Dordrecht, 12 oktober 1998.

[Diermanse et al, 2010]

Integraaltest MHWp4.1.1 en Hydra BS. Concept. F. Diermanse, Q. Gao en A. Markus. Deltares, maart 2010.

[Duits en Van Noortwijk, 1999]

Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken. M.T. Duits en J.M. van Noortwijk. Rapport PR163. HKV Lijn in water, 1999.

[Duits, 2007]

Hydra-BS – Functioneel ontwerp. M.T. Duits. HKV Lijn in Water, HKV-rapport PR1081. Lelystad, september 2007.

[Duits, 2008]

Hydra-BS. Gebruikershandleiding, Versie 1.0. M.T. Duits. HKV Lijn in Water, augustus 2008.

[Duits, 2012]

Aanpassingen aan Hydra-BP t.o.v. Hydra-BS. Memo t.b.v. PR2274. M.T. Duits. HKV Lijn in Water, februari 2012.

[Fioole, 1999]

De 50%-lijnen van Bovenrijn en Maas. A.Fioole. RIZA memo WST 98.113. RIZA Dordrecht, juli 1998.

[Geerse, 2003]

Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden Benedenrivierengebied. C.P.M. Geerse. RIZA-werkdocument 2003.128x. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, december 2003.

[Geerse, 2007]

Hydra-BS. Formules voor de inbouw van keringen. C.P.M. Geerse. HKV Lijn in Water, Lelystad, september 2007.

[Geerse, 2011]

Hydra-Zoet for the fresh water systems in the Netherlands. Probabilistic model for the assessment of dike heights. C.P.M. Geerse (HKV), met medewerking van Robert Slomp (Waterdienst) en J.P. de Waal (Deltares). HKV Lijn in Water, december 2011. In opdracht van de Waterdienst.

[Geerse, 2013]

Correlatie tussen stormvloeden en afvoeren voor de benedenrivieren. Mate van correlatie en geschatte invloed op de Toetspeilen. C.P.M. Geerse. PR2442.10. HKV Lijn in Water, mei 2013. In opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst.

[Goederen De, 2012]

Invloed faalkans Hartelkering op de maatgevende hoogwaterstanden in de Rijn-Maasmonding. Sacha de Goederen. Rijkswaterstaat Zuid-Holland, september 2012.

[Kalk et al, 2001]

Uitbreiding afvoerstatistiek – Borgharen, Lith, Lobith, Olst. H.J. Kalk, I.B.M. Lammers, C.P.M. Geerse. HKV Lijn in Water, Lelystad, december 2001.

[Kallen et al, 2012]

Onderzoek naar verbetering van de veiligheid die de Maeslantkering biedt. Eindrapport. Maarten-Jan Kallen, Ton Botterhuis, Matthijs Kok. HKV Lijn in Water, april 2012.

[Kew et al, 2011]

Storm surges and high surges. Sarah Kew, Frank Selten and Geert Lenderink. KNMI De Bilt, december 30, 2011.

[Klopstra en Vrisou van Eck, 1999]

Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Maas bij Borgharen. D. Klopstra, N. Vrisou van Eck. HKV Lijn in water, maart 1999.

[Kramer, 2012]

Procedure to derive the design hydrograph – phase 1. Draft. N. Kramer. Deltares, November 2012.

[Ogink, 2003]

Nauwkeurigheid toetspeilen. Notitie. H.J.M. Ogink. WL|Delft Hydraulics, november 2003.

[Ogink, 2006]

Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn. H.J.M. Ogink. WL|Delft Hydraulics, juni 2006.

[Ogink, 2012]

Design discharge and design hydrograph computation for Meuse and Rhine rivers. Comparison of computational methods. H.J.M. Ogink. August, 2012.

[Paarlberg et al, 2010]

Onzekere afvoerverdeling en hoogwaterstanden rondom de Pannerdensch Kop. Invloed van onzekerheid in Bovenrijn-afvoer en bodemdynamiek. Andries Paarlberg, Hermjan Barneveld, Saskia van Vuren, Wim van Balen. HKV, december 2010. Opdrachtgever: Flood Control 2015.

[Roscoe et al, 2012]

Hydra-Ring Scientific Documentation. Concept. Kathryn Roscoe, Ferdinand Diermanse, Juliana Lopez de la Cruz, Henri Steenbergen, Ton Vrouwenvelder. Deltares en TNO, 2012.

[Schropp, 2002]

Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater. M.H.I. Schropp. RWS/RIZA, RIZA rapport 2002.047.

[Systeemanalyse RMM, 2009]

- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding Inclusief Verkenning faalkansreductie Maeslantkering, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, brochure januari 2008;
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Hoofdrapport, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, rapport RWS-ZH/ARA/2007/09, ISBN nr. 9789036948432, 10 januari 2008;
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Analyse levensduur primaire waterkeringen, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, RWS/ARA/2008/06, ISBN nr. 9789036948531, 23 januari 2008;
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Analyse watersysteem: Gevoeligheidsanalyse, Rijkswaterstaat Waterdienst, Rapport 2007.005, ISBN nr. 9789036914413, 29 november 2007;
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Analyse watersysteem: Scenario's en Beheersmaatregelen, Rijkswaterstaat Waterdienst, Rapport 2007.008, ISBN nr. 9789036914819, 29 november 2007
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Overlopen en golfoverslag Haringvlietssluisen, Rijkswaterstaat Bouwdienst, 9 januari 2008;
- Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, Analyse levensduur primaire waterkeringen bij 1/200 kans niet-sluiten Maeslantkering, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, RWS/ARA/2009/09, 10 maart 2009.

[Waal De, 2007]

Achtergrondrapport HR 2006 voor de Benedenrivieren. Thermometerrandvoorwaarden 2006. J.P. de Waal. RWS RIZA rapport 2007.023.

[Wit De en Buishand, 2007]

Generator of Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. M.J.M. de Wit and T.A. Buishand. Rijkswaterstaat RIZA report 2007.027/KNMI publication 218. Lelystad, The Netherlands, 2007.

Bijlage A Gecombineerde overschrijdingskans ringdeel langs Waal en Lek

Het doel van deze bijlage is het berekenen van de in paragraaf 2.2.3 genoemde overschrijdingskans $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$.

In de afleiding daarvan is de kansdichtheid $f(k_1, k_2)$ nodig, die daarom eerst wordt bepaald. Deze kansdichtheid is te berekenen als

$$f(k_1, k_2) = \left(-\frac{\partial}{\partial k_2} \right) \left(-\frac{\partial}{\partial k_1} P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) \right) = \frac{\partial^2}{\partial k_2 \partial k_1} P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) \quad (\text{A.1})$$

waarin de kans in het rechterlid wordt gegeven door (2.24), die we hier herhalen:

$$P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) = \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f(k) \left\{ \Phi \left(\frac{(I-a)(k) - k_2}{\sigma_{PK}(k)} \right) - \Phi \left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \right\} \quad (\text{A.2})$$

We willen deze kans eerst partieel differentieren naar k_1 . Omdat k_1 zowel in de integrand als in de onderste integratiegrens voorkomt, dient dat zorgvuldig te gebeuren. We kunnen gebruik maken van de volgende eigenschap, die geldig is voor willekeurige functies $g(k)$ en $h(k)$:

Als $I(k)$ gegeven wordt door

$$I(k) = \int_{g(k)}^{h(k)} dx f(x, k) \quad (\text{A.3})$$

wordt de afgeleide van $I(k)$ naar k gegeven door

$$I'(k) = \int_{g(k)}^{h(k)} dx \frac{\partial f(x, k)}{\partial k} + f(h(k), k)h'(k) - f(g(k), k)g'(k) \quad (\text{A.4})$$

waarin $I'(k)$, $h'(k)$ en $g'(k)$ de afgeleides geven van $I(k)$, $h(k)$ en $g(k)$ naar k . Het bewijs is elementair, en wordt hier niet gegeven.

Met behulp van (A.4) volgt voor de partiële afgeleide van (A.2) naar $(-k_1)$, met φ de standaardnormale kansdichtheid,

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial k_1} P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) &= -\frac{\partial}{\partial k_1} \left\{ \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f_K(k) \left[\Phi \left(\frac{(I-a)(k) - k_2}{\sigma_{PK}(k)} \right) - \Phi \left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \right] \right\} \\ &= \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f_K(k) \varphi \left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \frac{1}{\sigma_{PK}(k)} \\ &\quad + f_K(k_1+k_2) \left\{ \Phi \left(\frac{(I-a)(k_1+k_2) - k_2}{\sigma_{PK}(k_1+k_2)} \right) - \Phi \left(\frac{k_1 - a(k_1+k_2)}{\sigma_{PK}(k_1+k_2)} \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Door de tellers in de laatste term tussen de accolades uit te werken, blijkt eenvoudig dat deze term gelijk is aan 0. Dus geldt:

$$-\frac{\partial}{\partial k_1} P(K_1 > k_1, K_2 > k_2) = \int_{k_1+k_2}^{\infty} dk f_K(k) \varphi \left(\frac{k_1 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)} \right) \frac{1}{\sigma_{PK}(k)} \quad (\text{A.6})$$

Door deze grootheid partieel te differentiëren naar $(-k_2)$ volgt dan uit (A.1) en (A.4):

$$f(k_1, k_2) = f_K(k_1 + k_2) \varphi\left(\frac{k_1 - a(k_1 + k_2)}{\sigma_{PK}(k_1 + k_2)}\right) \frac{1}{\sigma_{PK}(k_1 + k_2)} \quad (\text{A.7})$$

Hiermee is $f_K(k_1, k_2)$ bepaald.

We gaan nu verder met de berekening van $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$. Daarvoor geldt:

$$P(K_1 > k_1, K_3 > k_3) = \int dk_2 f_{K_2}(k_2) P(K_1 > k_1, K_3 > k_3 | K_2 = k_2) \quad (\text{A.8})$$

Vanwege de onafhankelijkheid van de splitsingspunten, mits conditioneel beschouwd op $K_2 = k_2$, zie (2.11), moet gelden:

$$P(K_1 > k_1, K_3 > k_3 | K_2 = k_2) = P(K_1 > k_1 | K_2 = k_2) P(K_3 > k_3 | K_2 = k_2) \quad (\text{A.9})$$

De laatste term uit het rechterlid is al bepaald bij de berekening van (2.27). Dan kan (A.9) worden geschreven als:

$$\begin{aligned} P(K_1 > k_1, K_3 > k_3) &= \int dk_2 f_{K_2}(k_2) \int_{k_1}^{\infty} ds f_{K_1|K_2}(s | k_2) \bar{\Phi}\left(\frac{k_3 - b(k_2)}{\sigma_{IK}(k_2)}\right) \\ &= \int dk_2 \int_{k_1}^{\infty} ds f_{K_1, K_2}(s, k_2) \bar{\Phi}\left(\frac{k_3 - b(k_2)}{\sigma_{IK}(k_2)}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

waarin $f_{K_1, K_2}(s, k_2)$ bekend is uit (A.7). Hiermee is de formule voor $P(K_1 > k_1 \text{ of } K_3 > k_3)$ bekend.

We kunnen (A.10) overigens nog wat herschrijven: met (A.7) en (A.10) volgt:

$$P(K_1 > k_1, K_3 > k_3) = \int dk_2 \int_{k_1}^{\infty} ds f_K(s + k_2) \varphi\left(\frac{s - a(s + k_2)}{\sigma_{PK}(s + k_2)}\right) \frac{1}{\sigma_{PK}(s + k_2)} \bar{\Phi}\left(\frac{k_3 - b(k_2)}{\sigma_{IK}(k_2)}\right) \quad (\text{A.11})$$

Door de substitutie $k = s + k_2$, kan deze integraal worden herschreven als:

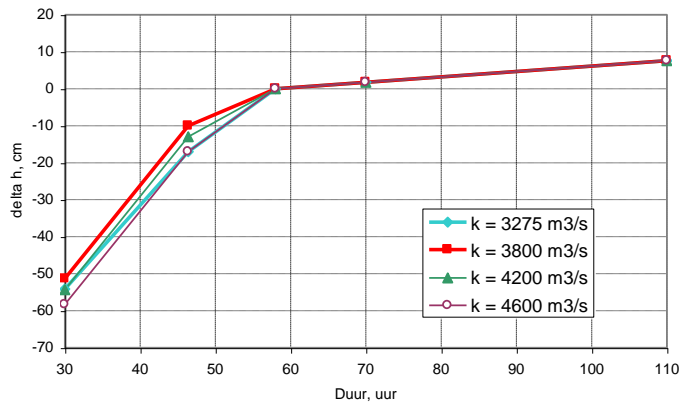
$$P(K_1 > k_1, K_3 > k_3) = \int dk_2 \int_{k_1 + k_2}^{\infty} dk f_K(k) \varphi\left(\frac{k - k_2 - a(k)}{\sigma_{PK}(k)}\right) \frac{1}{\sigma_{PK}(k)} \bar{\Phi}\left(\frac{k_3 - b(k_2)}{\sigma_{IK}(k_2)}\right) \quad (\text{A.12})$$

Bijlage B Keuzes topvervlakking te Roermond

Gegevens Roermond, km 79, basisvariant V1

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-54.2	-51.3	-54.3	-58.3
46.4	-17.0	-10.0	-13.0	-17.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	1.8	1.8	1.8	1.8
110	7.6	7.6	7.6	7.6

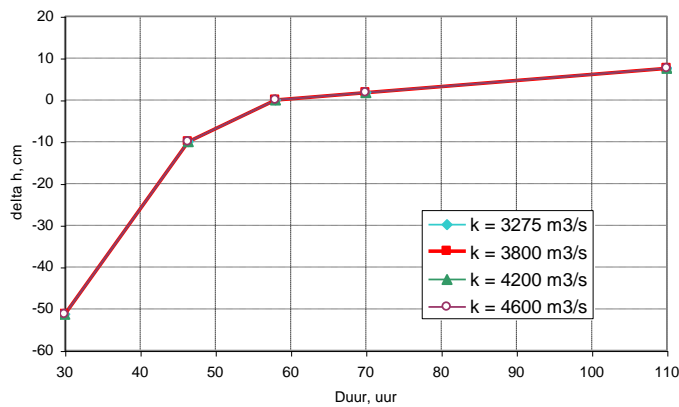
Roermond: Keuzes delta h voor verschillende piekwaarden



Gegevens Roermond, km 79, variant V2

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-51.3	-51.3	-51.3	-51.3
46.4	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	1.8	1.8	1.8	1.8
110	7.6	7.6	7.6	7.6

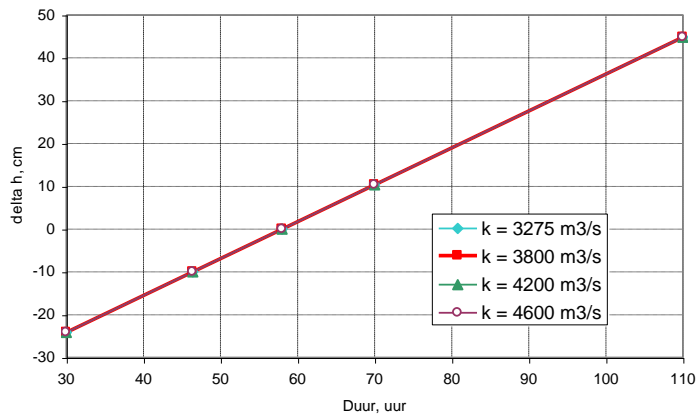
Roermond: Keuzes delta h voor verschillende piekwaarden (V2)



Gegevens Roermond, km 79, variant V3

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-24.1	-24.1	-24.1	-24.1
46.4	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	10.3	10.3	10.3	10.3
110	44.8	44.8	44.8	44.8

Keuzes Roermond, delta h voor verschillende piekwaarden (V3)

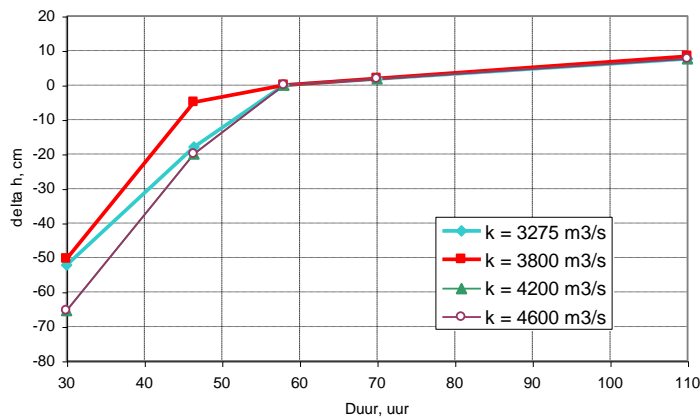


Bijlage C Keuzes topvervlakking te Boxmeer

Gegevens Boxmeer, km 150, basisvariant V1

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-52.2	-50.4	-65.4	-65.4
46.4	-18.0	-5.0	-20.0	-20.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	1.8	1.9	1.8	1.8
110	7.6	8.4	7.6	7.6

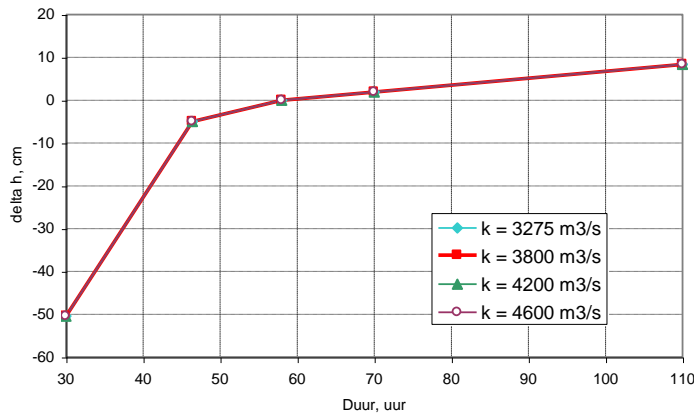
Boxmeer: Keuzes delta h voor verschillende piekwaarden



Gegevens Boxmeer, km 150, variant V2

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-50.4	-50.4	-50.4	-50.4
46.4	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	1.9	1.9	1.9	1.9
110	8.4	8.4	8.4	8.4

Keuzes delta h voor verschillende piekwaarden (V2)



Gegevens Boxmeer, km 150, variant V3

duur, uur	Δh , cm			
	k = 3275 m ³ /s	k = 3800 m ³ /s	k = 4200 m ³ /s	k = 4600 m ³ /s
30	-12.1	-12.1	-12.1	-12.1
46.4	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
58	0.0	0.0	0.0	0.0
70	5.2	5.2	5.2	5.2
110	22.4	22.4	22.4	22.4

Keuzes Boxmeer, delta h voor verschillende piekwaarden (V3)

