

Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat WVL**

Hydra-NL

Statistiek en modelonzekerheden HIJ en VZM



Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat WVL**

Hydra-NL

Statistiek en modelonzekerheden HIJ en VZM



Auteurs

Chris Geerse
Matthijs Duits
Bastiaan Kuijper

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Inhoud	1
2	Statistiek.....	3
2.1	Afvoerstatistiek	3
2.2	Meerpeilstatistiek (VZM)	5
2.3	Correlatie afvoer en meerpeil (VZM).....	18
2.4	Zeewaterstandstatistiek.....	27
2.5	Windstatistiek	28
2.6	Keringen.....	29
3	Modelonzekerheden	31
3.1	Hollandse IJssel	31
3.2	Volkerak-Zoommeer.....	33

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Binnen dit project breiden we Hydra-NL uit om hydraulische belastingen te kunnen bepalen op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer, conform de WBI2017-systematiek.

- Voor de Hollandsche IJssel betekent dat vooral het toevoegen van de optie om te rekenen met modelonzekerheden en het uitbreiden van de functionaliteit voor wat betreft de rekenopties. Dit gebied is complex vanwege de dubbele stormvloedkeringen, namelijk de Europoortkering (Maeslantkering en Hartelkering) en de stormvloedkering bij de Hollandsche IJssel. Voor deze keringen is in de Waterwet een aparte eis voor betrouwbaarheid van sluiting vastgelegd, die als eenheid heeft "kans per sluitvraag". Met deze kans moet rekening worden gehouden bij het bepalen van de hydraulische belastingen op achterliggende dijktrajecten.
- Voor het Volkerak-Zoommeer voegen we een extra watersysteemtype toe aan Hydra NL om hydraulische belastingen te bepalen, rekening houdend met inzet van het Volkerak-Zoommeer voor waterberging. Berging van water op het Volkerak-Zoommeer is een onderdeel van de Ruimte voor de Rivier maatregelen. Door wateraanvoer vanuit het Hollands Diep bij bepaalde combinaties van storm en afvoer die een waterstand veroorzaken boven 2,60 m+NAP bij Rak Noord en een gesloten Maeslantkering, veranderen de hydraulische belastingen aanzienlijk t.o.v. het huidige merensysteem.

1.2 Inhoud

Dit document beschrijft de benodigde statistiek voor de Hollandse IJssel en het Volkerak-Zoommeer en de voorgestelde keuzes ten aanzien van de parameters voor de modelonzekerheid in waterstand en golfparameters.

2 Statistiek

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de invoerbestanden met benodigde statistiek voor de Hollandse IJssel en het Volkerak-Zoommeer, die beschikbaar zijn in Hydra-NL. Hierbij wordt aangegeven welke statistiek standaard gebruikt wordt voor de berekeningen in de Basis- en Klimaatmodus van het programma. Voor het grootste deel komt dit overeen met de invoer voor de Benedenrivieren, aangezien beide watersystemen daar een uitbreiding/variant op vormen.

2.1 Afvoerstatistiek

Op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer is de Rijnaafvoer bij Lobith – net als in het Benedenrivierengebied – een van de stochasten. Bij installatie levert Hydra-NL 16 bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith in een periode van 30 dagen. Vier hiervan zijn van toepassing op 2017 of eerder. Deze bestandsnamen zijn met toelichting in Tabel 2-1 opgesomd. Paragraaf 3.1 van [Duits en Kuijper, 2017] geeft een voorbeeld van deze bestanden.

Bestandsnaam	Toelichting
Ovkans_Lobith_piekafvoer_Ref.txt	Dit bestand bevat de overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith met gegevens die in 2011 en eerder van toepassing waren.
Ovkans_Lobith_piekafvoer_2017.txt	Dit bestand bevat de overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith met gegevens die in 2017 toe- passing zijn. Hierbij is gebruik gemaakt van GRADE.
Ovkans_Lobith_piekafvoer_2017_metOnzHeid.txt	Dit bestand bevat de overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith, waarin de statistische onzeker- heid is meegenomen. Deze onzekerheid is uitge- teintergeerd. Het bestand is van toepassing op 2017. Hierbij is gebruik gemaakt van GRADE.
GRADE_Ovkans_Lobith_piekafvoer_Ref.txt	Dit bestand bevat de overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith met een werklijn uit GRADE, die in 2011 binnen het Deltamodel gebruikt werd.

Tabel 2-1: Bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith in een periode van 30 dagen, die van toepassing zijn op 2017 of eerder.

In de Basismodus van Hydra-NL wordt gerekend met het bestand *Ovkans_Lobith_piekafvoer_2017_metOnzHeid.txt*. In dit bestand is de statistische onzekerheid meegenomen. Ook wordt in de Testmodus initieel met dit bestand gerekend. Wel kan in deze modus een ander bestand gekozen worden. In de Klimaatmodus wordt in de referentiesituatie eveneens met dit bestand gerekend. In de Klimaatmodus kan daarnaast gerekend worden voor de jaren 2050 en 2100 voor de klimaatscenario's Rust/Druk of en Warm/Stoom uit [Bruggeman et al., 2011]. Telkens wordt dan met een ander bestand gerekend. In Tabel 2-2 staan de bestandsnamen. Het Rust/Druk-scenario is conform het KNMI '06 scenario 2050/2100 G en het Warm/Stoom-scenario is conform het KNMI '06 scenario 2050/2100 W+. Deze bestanden zijn inclusief de statistische onzekerheid (uitgeïntegreerd), maar hierbij is *geen* uitvoer uit GRADE gebruikt.

Scenario	Bestandsnaam
2050 – Rust/Druk	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_RD_metOnzHeid.txt
2050 – Warm/Stoom	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_SW_metOnzHeid.txt
2100 – Rust/Druk	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_RD_metOnzHeid.txt
2100 – Warm/Stoom	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_SW_metOnzHeid.txt

Tabel 2-2: Bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith voor de klimaatscenario's van de klimaatmodus van Hydra-NL.

Van de bestanden uit Tabel 2-2 zijn ook versies zonder dat de statistische onzekerheid is meegenomen. Deze zijn in Tabel 2-3 weergegeven. Ook voor de inhoud van deze bestanden is *geen* uitvoer uit GRADE gebruikt. Na installatie van Hydra-NL zijn wel bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith voor klimaatscenario's beschikbaar, waarin uitvoer van GRADE gebruikt zijn. Deze zijn in Tabel 2-4 opgesomd. Hierin is *geen* statistische onzekerheid aanwezig.

Scenario	Bestandsnaam
2050 – Rust/Druk	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_RD.txt
2050 – Warm/Stoom	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_SW.txt
2100 – Rust/Druk	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_RD.txt
2100 – Warm/Stoom	Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_SW.txt

Tabel 2-3: Bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith voor de klimaatscenario's zonder statistische onzekerheid, geen uitvoer uit GRADE gebruikt.

Scenario	Bestandsnaam
2050 – Rust/Druk	GRADE_Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_RD.txt
2050 – Warm/Stoom	GRADE_Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2050_SW.txt
2100 – Rust/Druk	GRADE_Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_RD.txt
2100 – Warm/Stoom	GRADE_Ovkans_Lobith_piekafvoer_DM_2100_SW.txt

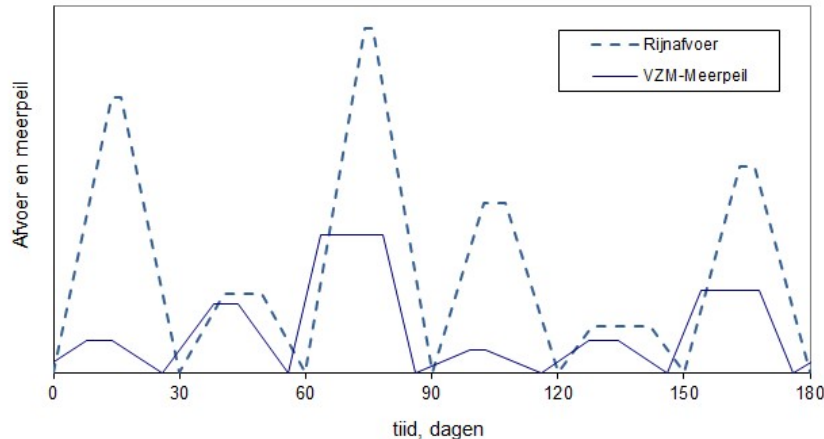
Tabel 2-4: Bestanden met overschrijdingskansen van de afvoer bij Lobith voor de klimaatscenario's zonder statistische onzekerheid, waarin uitvoer uit GRADE gebruikt is.

Voor de afvoer wordt in Hydra-NL gerekend met afvoergolven met een basisduur van 30 dagen. Deze afvoergolven kunnen afkomstig zijn uit een bestand (zie paragraaf 3.3 van [Duits en Kuijper, 2017] voor een voorbeeld) of kunnen eenvoudig bestaan uit trapezia. Voor trapezia is dan nog slechts de topduur nodig, die per afvoer gevarieerd kan worden. Deze topduren verwacht Hydra-NL in een bestand. In paragraaf 3.2 van [Duits en Kuijper, 2017] is een voorbeeld gegeven van een bestand met topduren. Standaard rekent Hydra-NL met trapezia voor de afvoergolven. Voor de Rijnaafvoer bij Lobith zijn de topduren afkomstig uit het bestand *Topduur_Lobith_2017.txt*. In de Testmodus kan gekozen worden voor het rekenen met een afvoerverloop uit een bestand. Ook kan gekozen worden voor een ander bestand met topduren. Er is een tweede bestand met topduren voor de Rijn bij Lobith met de installatie van Hydra-NL meegenomen (*Topduur_Lobith_v01.txt*), maar de inhoud is identiek aan die van het in alle modi gebruikte bestand.

2.2 Meerpeilstatistiek (VZM)

2.2.1 Belangrijke grootheden uit de meerpeilstatistiek

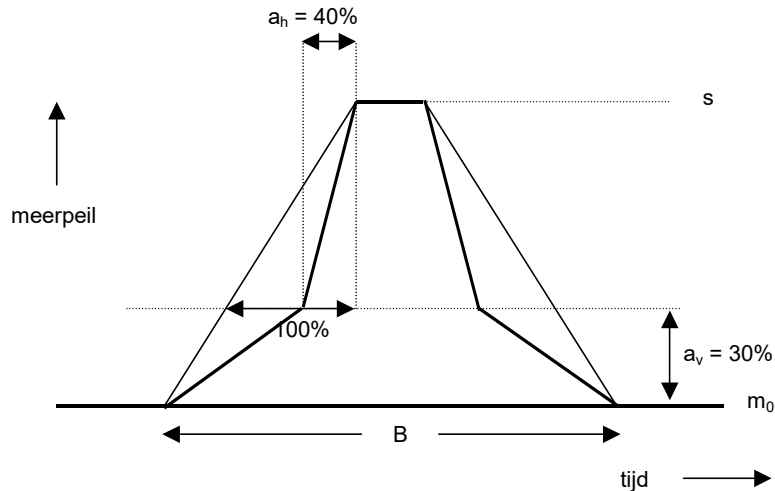
In eerdere rapporten is uitgebreid beschreven hoe meerpeilstatistiek voor Hydra-Zoet/NL kan worden bepaald, zie bijvoorbeeld [Geerse, 2012] voor meerpeilstatistiek zonder statistische onzekerheid en [Geerse, 2016] voor dergelijke statistiek inclusief statistische onzekerheid. In deze paragraaf beperken we ons tot een opsomming van de relevante begrippen uit de meerpeilstatistiek, zonder uitgebreide uitleg. Voor details wordt verwezen naar de genoemde referenties.



Figuur 2-1 Illustratie trapeziumvormige meerpeilgolven in Hydra-Zoet. In dit geval geldt een basisduur $B = 30$ dagen. Ook trapezia als modellering voor de Rijngolven zijn weergegeven.

In Hydra-Zoet/NL worden meerpeilgolven geschematiseerd door trapezia, met een bepaalde basisduur B . Daarbij wordt het winterhalfjaar gevuld met een aantal trapezia. Voor de huidige statistiek van het VZM geldt een basisduur $B = 20$ dagen, maar deze wordt in de herziene statistiek gelijk aan 30 dagen (Figuur 2-1). De figuur geeft ook trapezia als modellering voor de Rijngolven weer, die verschoven zijn t.o.v. de meerpeilgolven; die verschuiving komt in paragraaf 2.3.3 aan de orde.

De meerpeiltrapezia kunnen ook "geknikt" zijn, zie Figuur 2-2 voor de betekenis van de horizontale en verticale knikparameters a_h en a_v . Deze figuur laat ook de betekenis zien van de piekwaarde s van het trapezium en het minimale meerpeil m_0 .



Figuur 2-2 Notatie voor geknikt trapezium, met piekwaarde s en minimum-meerpeil m_0 ; hier is als voorbeeld voor de knikparameters gekozen $a_v = 0.3$ en $a_h = 0.4$.

Zie voor de belangrijkste begrippen uit de meerpeilstatistiek Tabel 2-5. Het winterhalfjaar (whjaar) bestaat uit de maanden oktober t/m maart; in de afleidingen wordt aangenomen dat dit bestaat uit 180 dagen.

B	dag	Basisduur van het trapezium.
s	m+NAP	Piekwaarde van trapezium.
m_0	m+NAP	Het laagste meerpeil dat in de statistiek wordt gebruikt.
$b(s)$	uur	Duur topniveau van trapezium met hoogte s .
a_v	[-]	Knikfactor voor de verticale hoogte in het trapezium.
a_h	[-]	Knikfactor voor de horizontale insnoering van het trapezium.
$P(S > s)$	[-]	Overschrijdingskans piekmeerpeil s in de basisduur.
$F(S > s)$	1/jaar	Overschrijdingsfrequentie van het piekmeerpeil s (voor het winterhalfjaar).
$D(M > m)$	1/jaar	Gemiddeld aantal overschrijdingsdagen per winterhalfjaar.
N_{trap}	[-]	Aantal trapezia in winterhalfjaar ($=180/B$).

Tabel 2-5 Gebruikte notatie.

Het verband tussen de overschrijdingsfrequentie en de overschrijdingskans in de basisduur wordt gegeven door:

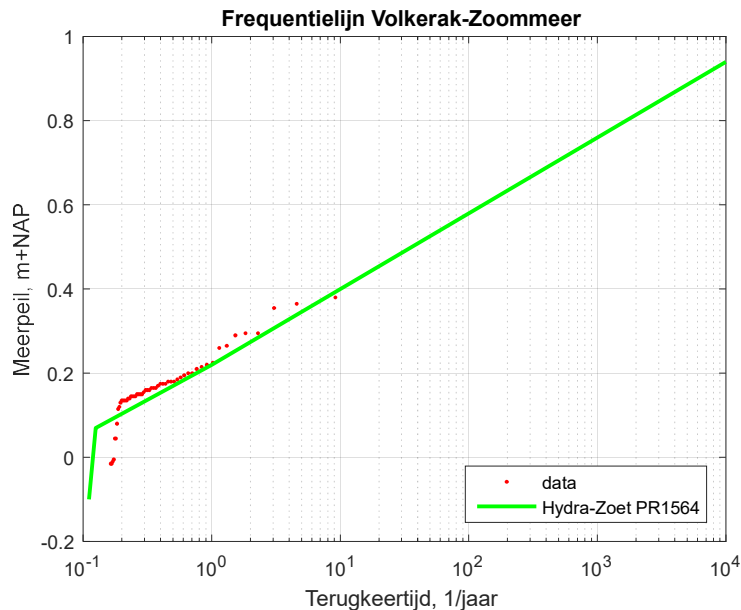
$$F(S > s) = N_{trap} P(S > s) \quad (2.1)$$

2.2.2 Huidige meerpeilstatistiek VZM

In [Geerse, 2012] is meerpeilstatistiek afgeleid voor het VZM als invoer voor Hydra-Zoet (zonder onzekerheden). Die statistiek was geënt op bestaande statistiek uit het probabilistisch model PROMOVERA, die was gebaseerd op de meetperiode 1998 t/m 2006. Voor Hydra-Zoet zijn toen de volgende grootheden bepaald, die hierna worden besproken:

- Minimum-meerpeil $m_0 = -0.10$ m+NAP.
- Basisduur $B = 20$ dagen (met dus $N_{trap} = 9$).
- Overschrijdingskans $P(S > s)$.
- Knikparameters $a_v = 0.25$, $a_h = 1.2$.
- Topduur $b(s)$.

In Figuur 2-9 worden de data en de overschrijdingsfrequentie $F(S>s)$ getoond die in [Geerse, 2012] zijn bepaald. Die werkzaamheden zijn indertijd uitgevoerd in het project met nummer PR1564, vandaar dat de grootte $F(S>s)$ die toen is afgeleid hier als label PR1564 heeft meegekregen. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat de *frequentielijn de data alleen goed hoeft te beschrijven vanaf $T = 1$ jaar*; het feit dat de laagste data niet goed beschreven worden door de lijn heeft dus geen betekenis; het laagste deel van de lijn $F(S>s)$ moet echter wel aanwezig zijn, zie voor achtergronden hierbij [Geerse, 2012].



Figuur 2-3 Gegevens uit PR1564 voor de overschrijdingsfrequentie en de data uit [Geerse, 2012].

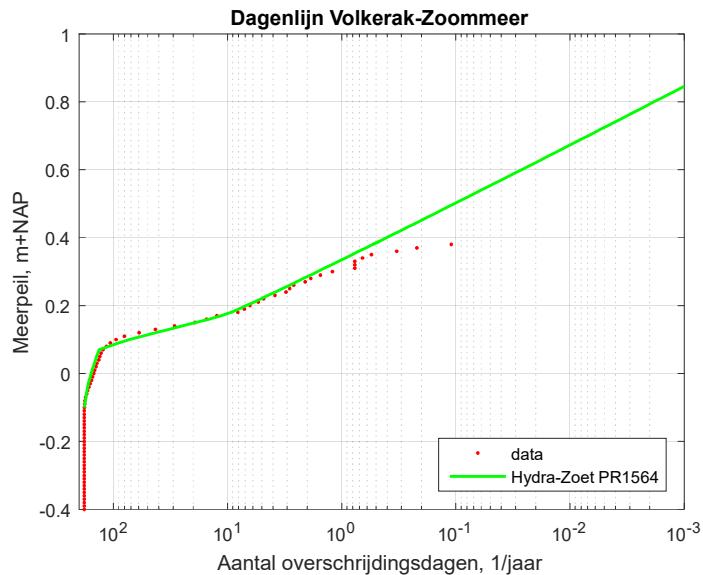
Voor de dagenlijn staan de gegevens in Figuur 2-4. De figuur laat zien dat de groene lijn doorloopt tot aan veel lagere meerpeilen dan $m_0 = -0.1$ m+NAP. Feitelijk is een probleem met de data dat er voor het VZM in het whjaar geen eenduidig streefpeil wordt gehanteerd: men hanteert een bandbreedte die loopt van -0.10 m+NAP tot 0.15 m+NAP. Dat is ook te zien in Figuur 2-5, waaruit blijkt dat aan het begin en einde van het whjaar lagere meerpeilen voorkomen.

De hogere meerpeilgolven blijken vooral voor te komen in situaties waarbij het meerpeil aan het begin van de golf al redelijk hoog is, op een niveau van ongeveer 0.10 m+NAP. Dat is te zien in Figuur 2-6 waarin ook de modellering van de golven is aangegeven die in [Geerse, 2012] is afgeleid. In die afleiding is aangenomen dat de allerlaagste meerpeilen voor de veiligheid niet van belang zijn; daarbij is dus de waarde -0.10 m+NAP als laagste meerpeil voor de statistiek aangenomen.

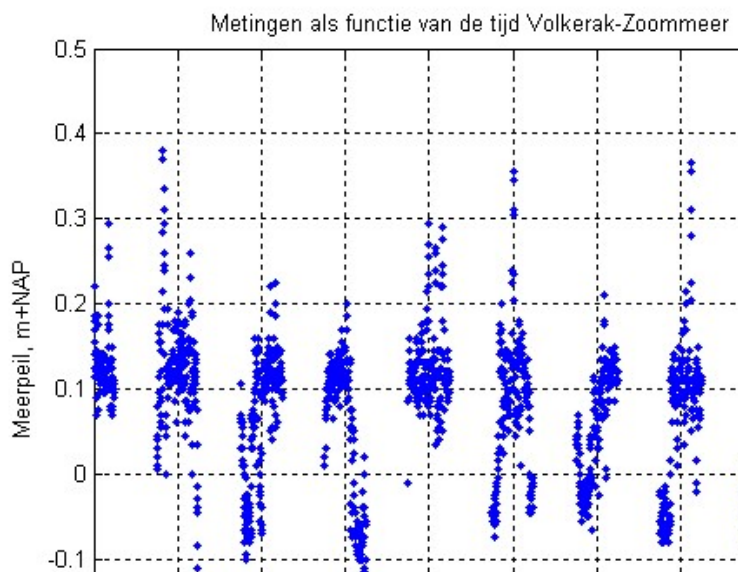
We merken het volgende op over de modellering door de trapezia (zie voor meer achtergronden en motivatie [Geerse, 2012]):

1. De meerpeilstatistiek is zodanig opgesteld dat het gemiddelde meerpeil volgens de statistiek overeenstemt met dat uit de metingen. Met de grootte $P(S>s)$ en de meerpeiltrapezia blijkt dat gemiddelde van de statistiek te kunnen worden bepaald: voor het whjaar is volgens de metingen zowel als de statistiek dit gemiddelde 0.08 m+NAP.

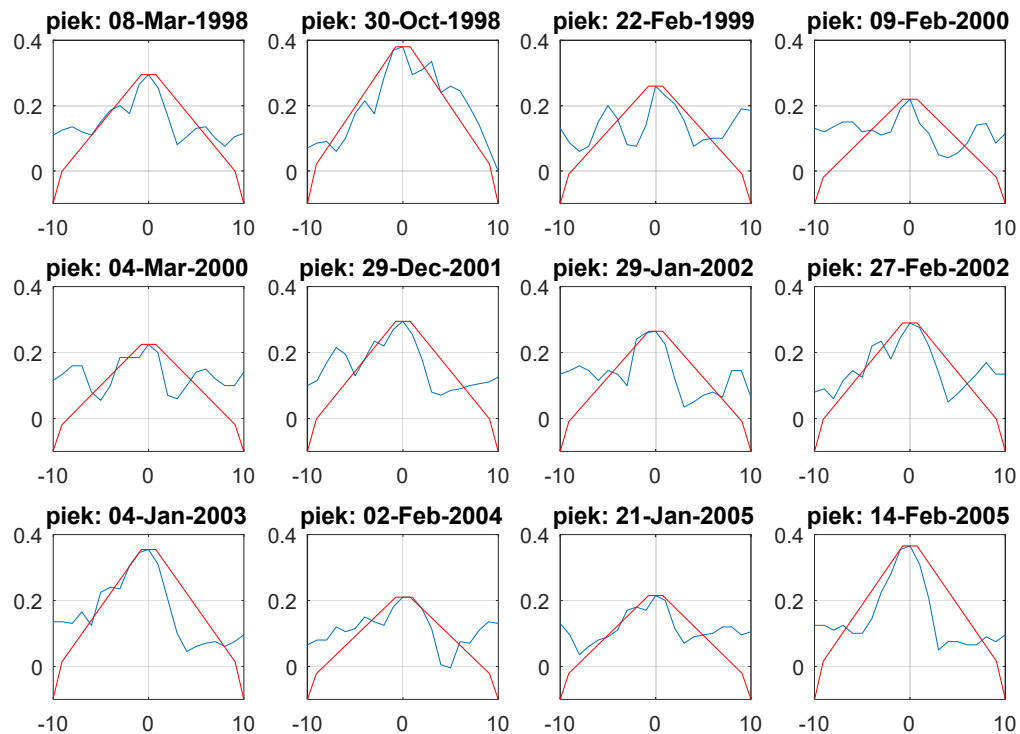
2. De meerpeilgolven hoeven alleen de 'bovenste helft' van de gemeten golven (gemiddeld gezien) goed te modelleren. Overigens blijken de gemeten hogere delen van de golven toch smaller te zijn dan de modellering door de trapezia. Reden daarvan is dat moest worden aangesloten bij de gegevens uit PROMOVERA; bij smaller gekozen trapezia blijkt overeenstemming daarmee echter niet mogelijk.
3. Dat de lagere delen van de trapezia de golven niet goed beschrijven is geen probleem, zolang het gemiddelde meerpeil maar correct door de statistiek wordt weergegeven, wat volgens punt 1 dus het geval is.



Figuur 2-4 Gegevens uit PR1564 voor de dagenlijn en de data uit [Geerse, 2012].

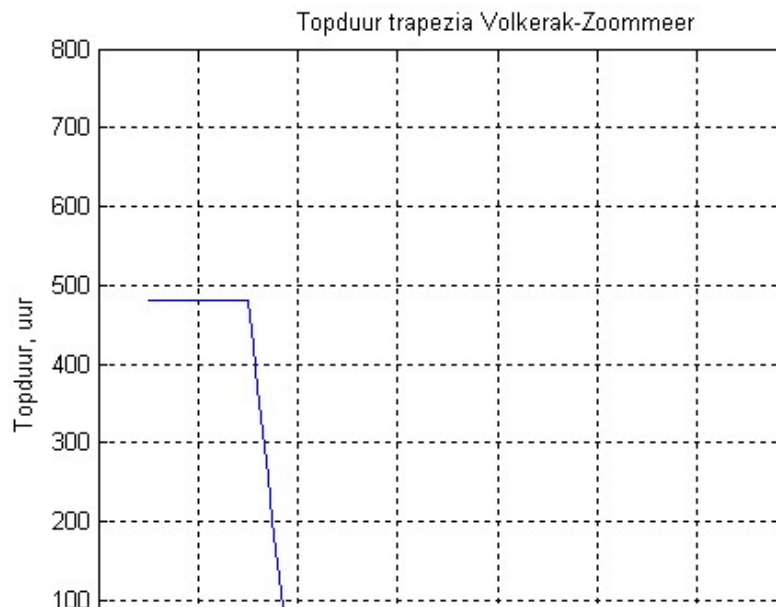


Figuur 2-5 Tijdreeks voor de dagwaarden van het meerpeil voor het Volkerak-Zoommeer. Bron: [Geerse, 2012].



Figuur 2-6 De 12 hoogste meerpeilgolven voor het Volkerak-Zoommeer (blauwe lijnen). Tevens zijn de trapezia aangegeven (rode lijnen) die als modellering voor de meerpeilgolven worden gebruikt. Bron: [Geerse, 2012].

Tot slot geeft Figuur 2-7 de topduur $b(s)$ van de trapezia. Merk op dat vanaf ongeveer 0.2 m+NAP de topduur een vaste waarde heeft, die gelijk is aan 36 uur.



Figuur 2-7 De topduur $b(s)$ van de trapezia. Bron: [Geerse, 2012].

2.2.3 Nieuwe meerpeilstatistiek (zonder statistische onzekerheid)

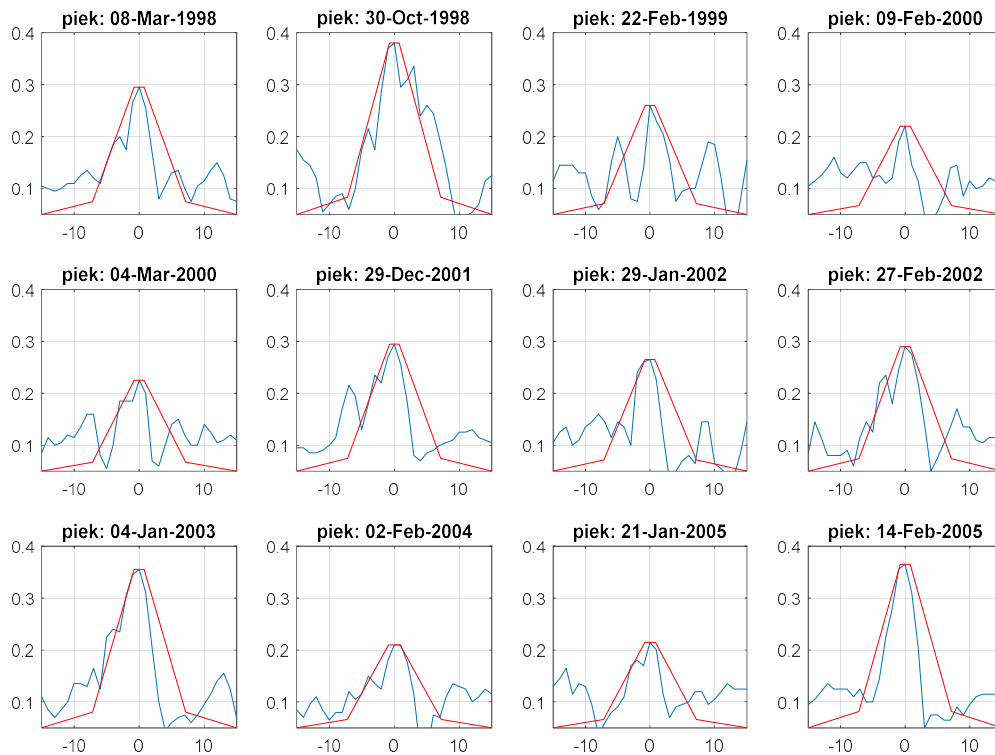
De statistiek moet opnieuw worden bepaald voor een basisduur $B = 30$ dagen in plaats van 20 dagen. Daarbij gelden de volgende uitgangspunten:

1. De trapezia hoeven alleen de bovenste helft van de gemeten golven goed te beschrijven, zo lang het gemiddelde meerpeil maar correct door de statistiek wordt weergegeven.
2. De frequentielijn $F(S>s)$ moet vanaf $T = 1$ jaar de data goed beschrijven en dan bovendien overeenstemmen met de eerdere gegevens uit Figuur 2-3.
3. De dagenlijn $D(M>m)$ moet vanaf $T = 1$ jaar goed overeenstemmen met de eerdere gegevens uit Figuur 2-4.
4. Het gemiddelde meerpeil moet na aanpassing gelijk blijven ($0.08 \text{ m} + \text{NAP}$ in het whjaar).

Voor de nieuwe statistiek zijn de volgende grootheden bepaald, die hierna worden toegelicht:

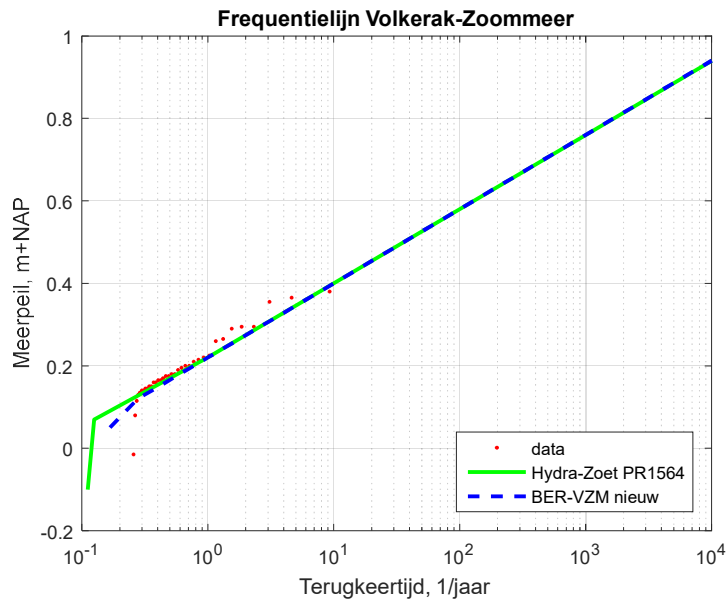
- Minimum-meerpeil $m_0 = +0.05 \text{ m} + \text{NAP}$.
- Basisduur $B = 30$ dagen (met dus $N_{\text{trap}} = 6$).
- Overschrijdingskansen $P(S>s)$. Zie voor de precieze numerieke gegevens paragraaf 2.2.6.
- Knikparameters $a_v = 0.1$, $a_h = 0.5$.
- Topduur $b(s)$. Zie voor de precieze numerieke gegevens paragraaf 2.2.6.

In de nieuwe statistiek wordt dus gebruik gemaakt van een hoger minimum-meerpeil m_0 in combinatie met andere knikparameters. Dat levert ons inziens een wat betere modellering van de meerpeilgolven (Figuur 2-8). De rode lijnen laten nu de nieuwe trapezia zijn, waarin de knikken worden bepaald door de genoemde knikparameters. Ons inziens klopt de (bovenste helft van de) modellering nog iets beter met de gemeten golven dan in de oude statistiek uit de voorgaande paragraaf.

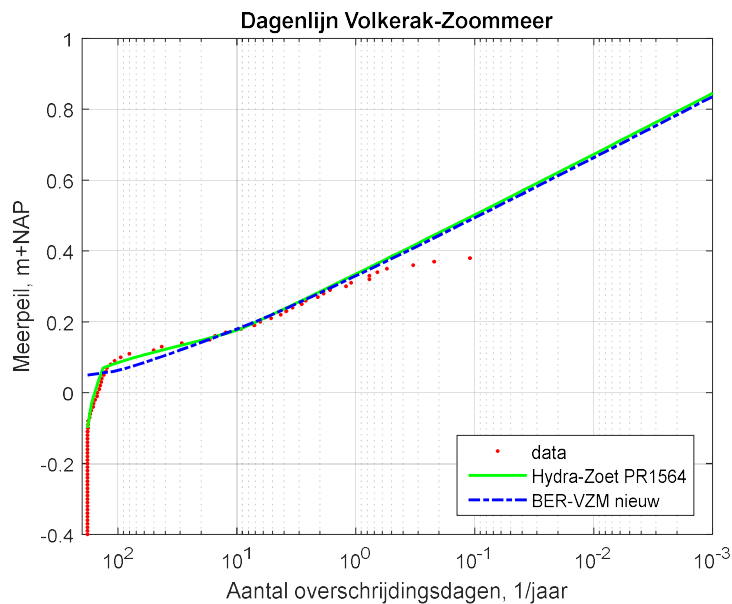


Figuur 2-8 De 12 hoogste meerpeilgolven voor het Volkerak-Zoommeer (blauwe lijnen) met de nieuwe modellering van de trapezia (rode lijnen).

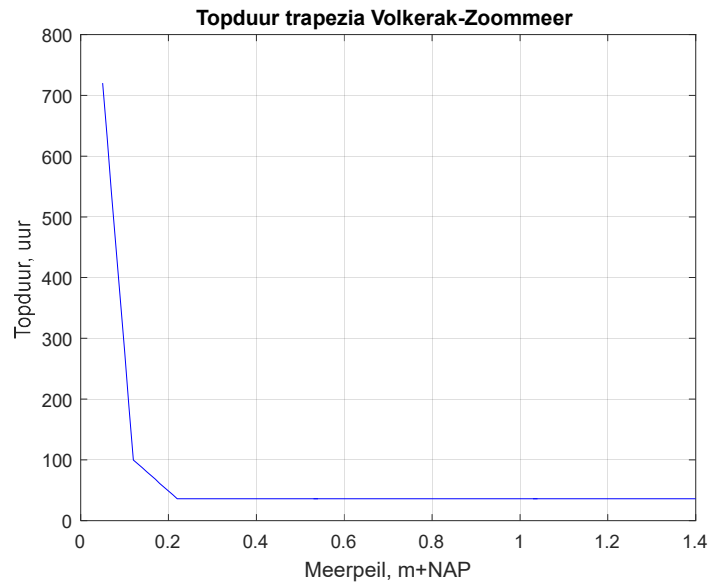
In Figuur 2-9 is te zien dat voor de frequentielijn $F(S>s) = 6P(S>s)$ exact aan punt 2 hierboven is voldaan, terwijl Figuur 2-10 laat zien dat voor de dagenlijn ook in goede benadering aan punt 3 is voldaan. N.B. Het is mogelijk om vanaf $T = 1$ jaar de dagenlijn exact kloppend te krijgen met de oude gegevens, maar alleen door aanzienlijk bredere trapezia te kiezen, die dan slecht overeenkomen met de gemeten golven; voor dat laatste is niet gekozen. Wat punt 4 betreft, het gemiddelde in de oude en nieuwe gegevens is 0.08 m+NAP. De topduur $b(s)$ is gekozen als in Figuur 2-11; vanaf ongeveer $T = 1$ jaar geldt een topduur van 36 uur, net als in de oude gegevens.



Figuur 2-9 Gegevens uit PR1564 en de nieuw afgeleide $F(S>s)$.



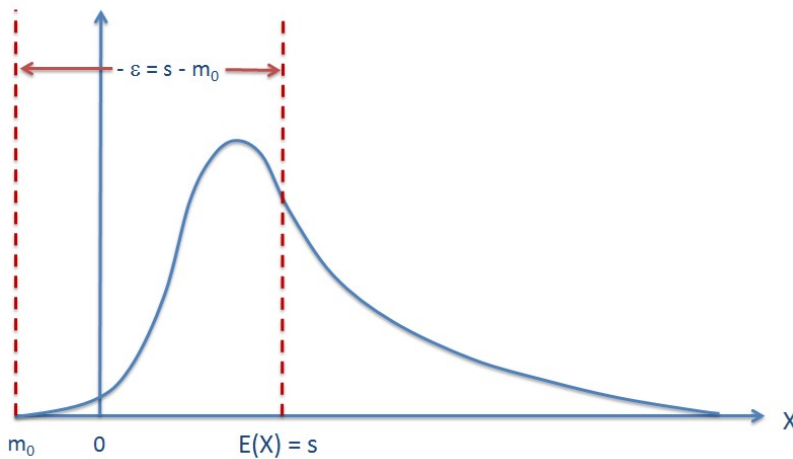
Figuur 2-10 Gegevens uit PR1564 en de nieuw afgeleide $D(M>m)$.



Figuur 2-11 De topduur $b(s)$ van de nieuw afgeleide trapezia.

2.2.4 Modellering statistische onzekerheid

Voor de meren wordt een lognormale verdeling gebruikt om de statistische onzekerheid te modelleren. Dit gebeurt met het zogenaamde additieve model. De modellering wordt kort beschreven in [Chbab, 2015] en uitgebreider in [Geerse, 2016]. Hier geven we alleen een beknopte beschrijving van de relevante begrippen en formules.



Figuur 2-12 Schets van de onzekerheidsmodellering met de lognormale verdeling, voor de beschrijving van de onzekerheid rond meerpeil s .

Daarbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd (zie Figuur 2-12):

1. De onzekerheid rond een meerpeil s wordt gemodelleerd met een stochast X die een lognormale verdeling volgt. Gemiddeld is de onzekerheid rondom het meerpeil s gelijk aan nul, wat inhoudt dat de verwachtingswaarde gelijk is aan $E(X) = s$. De standaarddeviatie σ_x van de lognormale kansdichtheid $f_x(x)$ mag afhangen van het beschouwde meerpeil s .

2. Het beginpunt van de lognormale verdeling is (voor iedere beschouwde lognormale verdeling) altijd gelijk aan het minimale meerpeil m_0 .

In de figuur is het beschouwde meerpeil s aangegeven, samen met de kansdichtheid (blauwe curve) voor het modelleren van de onzekerheid door de stochast X . Dat betreft dus een (vershoven) lognormale verdeling, die begint bij het minimum-meerpeil m_0 . In de formules hierna wordt de parameter ε gebruikt, die wordt gegeven door:

$$\varepsilon = m_0 - s \quad (2.2)$$

Deze grootte is op een minteken na gelijk aan de afstand tussen m_0 en s ; ook deze afstand is in de figuur aangegeven.

De kansdichtheid $f_X(x)$ wordt vastgelegd door drie parameters, namelijk m_0 , s en de standaarddeviatie σ_X van de verdeling van X . Dat X een lognormale verdeling heeft, betekent (per definitie) dat $\ln(X)$ een normale verdeling volgt. Zoals uitgelegd in [Geerse, 2016] worden de parameters van deze normale verdeling dan gegeven door:

$$\begin{aligned} \mu &= \ln(-\varepsilon) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\varepsilon^2}\right) \\ \sigma^2 &= \ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\varepsilon^2}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

en de kansdichtheid van X volgt dan als:

$$f_X(x) = \frac{1}{(x - m_0) \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x - m_0) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad x > m_0 \quad (2.4)$$

Merk op dat de waarden μ en σ , gegeven door (2.3), afhangen van m_0 en s , omdat σ_X van s afhangt, en ε van m_0 en s .

Formule (2.4) geeft de kansdichtheid voor de onzekerheidsmodellering. Het uitintegreren volgt nu. We geven met V de stochast aan van het piekmeerpeil inclusief statistische onzekerheid. Om in de notatie expliciet te maken dat de kansdichtheid uit (2.4) van s afhangt, schrijven we daarvoor $f_{X|S}(x|s)$. Dan volgt:

$$P(V > v) = \int_{m_0}^{\infty} f_S(s) \int_v^{\infty} dx f_{X|S}(x|s) \quad (2.5)$$

waarin $f_S(s) = -dP(S > s)/ds$ de kansdichtheid van het meerpeil zonder onzekerheid geeft.

Opmerking over het additieve model

Het spraakgebruik is dat de onzekerheid wordt gemodelleerd met het *additieve model*. Om het uitintegreren in termen van een dergelijk model te gieten, moet als volgt te werk worden gegaan. Duid de stochast X gegeven de waarde s aan door X_s en definieer V dan als:

$$V = S + X_s - s \quad (2.6)$$

Hierbij is $X_s - s$ dan een stochast die de onzekerheid modelleert met gemiddelde 0. Dan volgt:

$$\begin{aligned}
 P(V > v) &= P(S + X_s - s > v) \\
 &= \int_{m_0}^{\infty} f_s(s) P(s + X_s - s > v \mid S = s) \\
 &= \int_{m_0}^{\infty} f_s(s) \int_v^{\infty} dx f_{X|S}(x \mid s)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Dat levert inderdaad hetzelfde resultaat als (2.5).

2.2.5 Bepalen overschrijdingsfrequentie inclusief statistische onzekerheid

De parameters die voor de huidige lognormale verdeling van het VZM worden gebruikt staan in (Tabel 2-6). Omdat ze van s afhangen, geven we dat vanaf nu expliciet aan. Bij een gegeven meerpeil s betreft dat dus twee parameters: de standaarddeviatie $\sigma_X(s)$ en de locatieparameter $\varepsilon(s)$ van de lognormale verdeling. Merk op dat voor ieder meerpeil s geldt dat $\varepsilon(s) + s = m_0$, waarbij m_0 dus het minimale meerpeil uit de statistiek geeft.

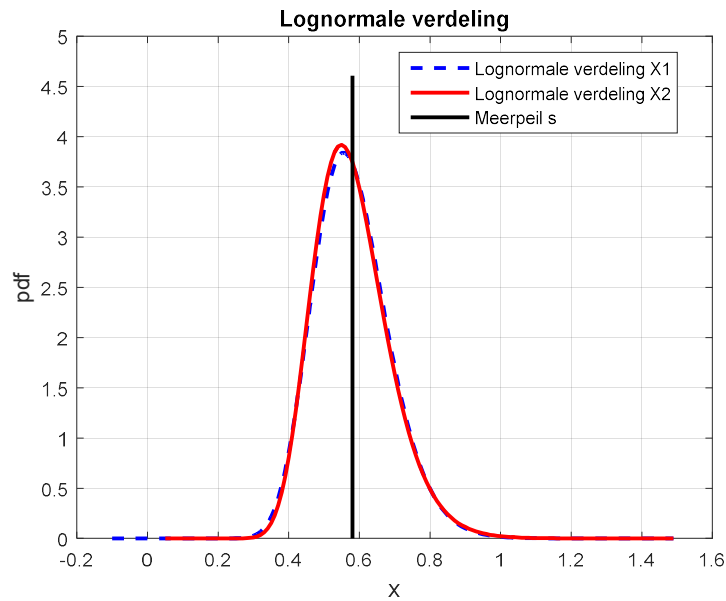
Terugkeertijd	Volkerak-Zoommeer			Minimum-meerpeil
	Meerpeil	Stand.dev.	Epsilon	Epsilon + meerpeil
jaar	m+NAP	m	m	m
	-0.1	0	0	-0.1
10	0.40	0.070	-0.500	-0.1
100	0.58	0.107	-0.680	-0.1
1000	0.76	0.161	-0.860	-0.1
10000	0.93	0.233	-1.030	-0.1
100000	1.11	0.331	-1.210	-0.1

Tabel 2-6 Gegevens voor de verwerking van de statistische onzekerheid in de huidige statistiek van het VZM, met basisduur $B = 20$ dagen. Bron: [Geerse, 2016].

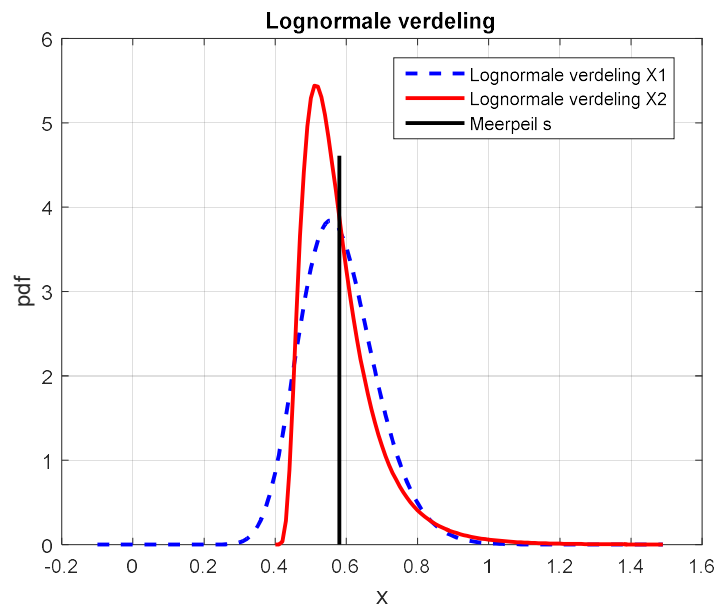
In principe willen we dezelfde parameters gebruiken in de nieuwe statistiek met basisduur $B = 30$ dagen. Strikt genomen is dat niet mogelijk, vanwege de voorwaarde dat $\varepsilon(s) + s$ gelijk moet zijn aan het minimale meerpeil m_0 uit de statistiek, terwijl m_0 in de huidige statistiek gelijk is aan -0.10 m+NAP en in de nieuwe aan 0.05 m+NAP.

Het blijkt echter dat een andere waarde voor m_0 maar weinig invloed heeft op de kansdichtheid $f_{X|S}(x|s)$. Figuur 2-13 geeft de kansdichtheid voor $s = 0.58$ m+NAP en $\sigma_X(s) = 0.107$ m, overeenkomstig Tabel 2-6 voor $T = 100$ jaar. De kansdichtheden blijken nauwelijks te verschillen.¹ Alleen als de afstand van m_0 tot s klein is ten opzichte van $\sigma_X(s)$ zijn er grote verschillen tussen beide kansdichtheden, zie Figuur 2-15 waarin voor X_2 nu geldt $m_0 = 0.40$ m+NAP; deze situatie doet zich in onze toepassingen echter niet voor.

¹ De met de lognormale verdeling geassocieerde normale verdeling krijgt echter wel duidelijk andere parameters, omdat de waarden daarvan ook afhangen van de grootte van ε .



Figuur 2-13 Twee lognormale kansdichtheden, die alleen verschillen voor de waarde m_0 ; X_1 heeft $m_0 = -0.10 m + \text{NAP}$ en X_2 heeft $m_0 = 0.05 m + \text{NAP}$.



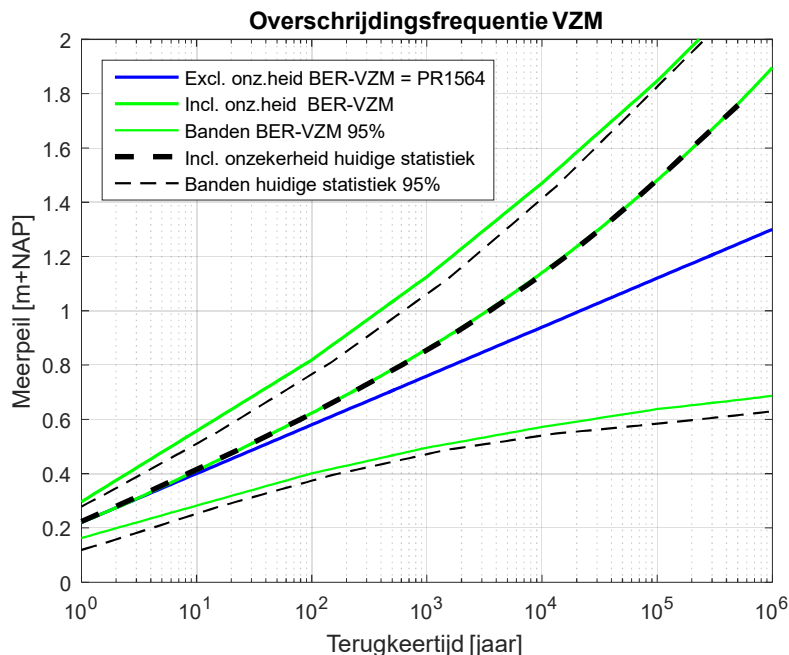
Figuur 2-14 Twee lognormale kansdichtheden, die alleen verschillen voor de waarde m_0 ; X_1 heeft $m_0 = -0.10 m + \text{NAP}$ en X_2 heeft $m_0 = 0.4 m + \text{NAP}$.

Terugkeertijd	Volkerak-Zoommeer			Minimum-meerpeil
	Meerpeil	Stand.dev.	Epsilon	Epsilon + meerpeil
jaar	m+NAP	m	m	m
	0.05	0.0000	0.000	0.05
10	0.40	0.0705	-0.350	0.05
100	0.58	0.1071	-0.530	0.05
1000	0.76	0.1617	-0.710	0.05
10000	0.94	0.2311	-0.890	0.05
100000	1.12	0.3113	-1.070	0.05
1e08	1.84	0.7000	-1.790	0.05

Tabel 2-7 Gegevens voor de verwerking van de statistische onzekerheid in de nieuwe statistiek van het VZM, met basisduur $B = 30$ dagen.²

Tabel 2-7 bevat de nieuwe gegevens voor de onzekerheidsmodellering. Zie als toelichting hierop Figuur 2-15, die de volgende onderdelen bevat:

1. De frequentielijn zonder onzekerheid (blauwe lijn), die in de huidige en nieuwe statistiek hetzelfde is vanaf $T = 1$ jaar (vergelijk met Figuur 2-9).
2. De (onzekerheids)banden waartussen 95% van de kansmassa ligt voor de huidige statistiek (buitenste gestreepte zwarte lijnen).
3. De huidige uitgeïntegreerde frequentielijn (vette gestreepte zwarte lijn).
4. De (onzekerheids)banden waartussen 95% van de kansmassa ligt voor de nieuwe statistiek (buitenste groene lijnen).
5. De nieuwe uitgeïntegreerde frequentielijn (middelste groene lijn).



Figuur 2-15 Gegevens voor statistische onzekerheid: vergelijking met huidige en nieuwe resultaten.

² Merk op dat de meerpeilen 0.94 en 1.12 m+NAP verschillen van die uit Tabel 2-6; deze waarden stemmen exact overeen met de frequentielijn zonder onzekerheid, terwijl de waarden uit Tabel 2-6 feitelijk kleine onnauwkeurigheden bevatten.

Hier volgt commentaar op de lijnen uit de grafiek:

- De nieuwe uitgeïntegreerde lijn valt samen met de huidige uitgeïntegreerde lijn. Dat betekent dat als gerekend wordt met de nieuwe gegevens inclusief statistische onzekerheid, de resultaten van Hydra-NL niet zullen veranderen (in Hydra-NL wordt immers gerekend met de vooraf uitgeïntegreerde lijn).
- De banden uit de huidige en nieuwe statistiek zijn enigszins veranderd; door de verandering in m_0 (van -0.10 naar 0.05 m+NAP) is het namelijk niet mogelijk de lognormale verdeling in de huidige en de nieuwe onzekerheidsmodellering precies hetzelfde te houden. Omdat de uitgeïntegreerde lijn in de huidige en nieuwe statistiek wel hetzelfde is, is de kleine verandering in de banden niet bezwaarlijk.

2.2.6 Invoerbestanden nieuwe meerpeilstatistiek

De nieuwe gegevens exclusief statistische onzekerheid staan voor de overschrijdingskansen $P(S>s)$ uit vergelijking (2.1) in Tabel 2-8 en voor de topduur $b(s)$ in Tabel 2-9. De overschrijdingskansen inclusief statistische onzekerheid staan in Tabel 2-10.

*	Piekwaarde	overschrijdingskans
*	[m+NAP]	[-]
	0.05	1.000E+00
	0.12	6.000E-01
	0.22	1.667E-01
	0.94	1.667E-05
	1.12	1.667E-06

Tabel 2-8 Invoerbestand voor $P(S>s)$ voor het Volkerak-Zoommeer, zonder statistische onzekerheid.

*	Piekwaarde	topduur meerpeilgolf
*	[m+NAP]	[uur]
	0.05	720
	0.12	100
	0.22	36
	1.80	36

Tabel 2-9 Invoerbestand voor topduur $b(s)$ voor het Volkerak-Zoommeer.

*	Piekwaarde	overschrijdingskans
*	[m+NAP]	[-]
	0.05	1.000E+00
	0.12	6.000E-01
	0.22	1.669E-01
	0.30	6.032E-02
	0.40	1.896E-02
	0.50	6.219E-03
	0.60	2.117E-03
	0.70	7.546E-04
	0.80	2.858E-04
	0.90	1.157E-04
	1.00	4.974E-05
	1.10	2.259E-05
	1.20	1.076E-05
	1.30	5.356E-06
	1.40	2.771E-06
	1.50	1.484E-06
	1.60	8.206E-07
	1.70	4.668E-07
	1.80	2.725E-07
	1.90	1.630E-07
	2.00	9.960E-08
	2.10	6.212E-08
	2.20	3.947E-08
	2.30	2.552E-08
	2.40	1.676E-08
	2.60	7.544E-09
	2.70	5.160E-09
	2.80	3.571E-09
	2.90	2.498E-09
	3.00	1.765E-09

Tabel 2-10 Invoerbestand voor $P(S>s)$ voor het Volkerak-Zoommeer, inclusief statistische onzekerheid.

2.2.7 Meerpeilstijging in klimaatscenario's

In principe verandert de meerpeilstatistiek in een klimaatscenario, door een stijgende zeespiegel en toenemende neerslag in Noord-Brabant. De stijgende zeespiegel beïnvloedt namelijk de spui naar zee bij de Bathse spuisluis en eventueel de Krammersluizen, terwijl meer neerslag in Noord-Brabant meer afwatering op het VZM betekent.

Het behoort echter niet tot de scope van dit project om in klimaatscenario's de meerpeilstatistiek van het VZM te bepalen. Terzijde: met het probabilistisch model DEVO is het wel mogelijk meerpeilstatistiek in een klimaatscenario te bepalen, maar voor de huidige meerpeilstatistiek levert DEVO wel andere statistiek op dan bepaald in paragraaf 2.2.3 en 2.2.4.

2.3 Correlatie afvoer en meerpeil (VZM)

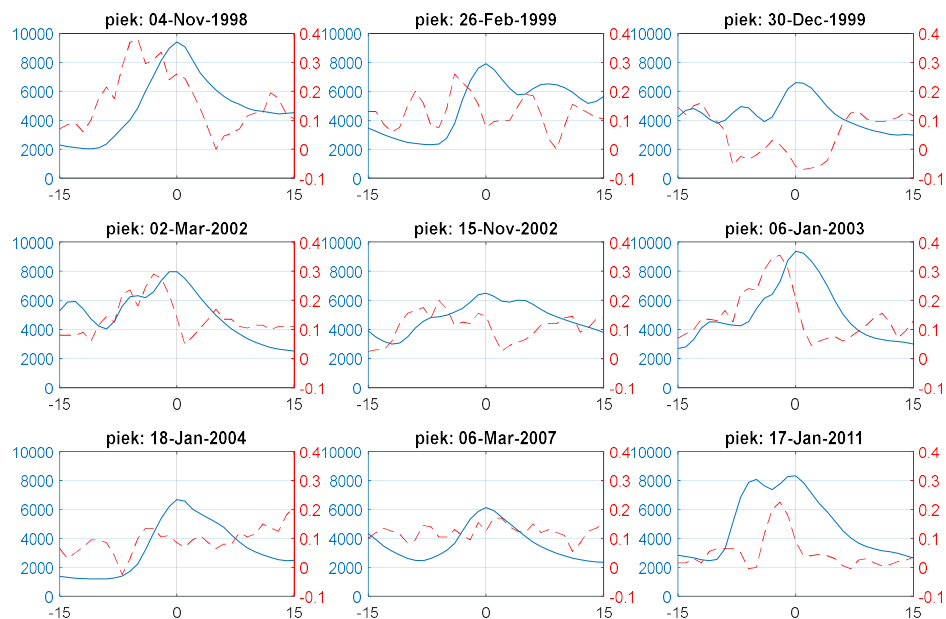
2.3.1 Correlatiemodel CS

In meerdere rapporten wordt een bivariaat correlatiemodel behandeld, waarin na een bepaalde transformatie sprake is van een constante spreiding; dat model wordt aangeduid als CS. Voor een beschrijving en meerdere praktische toepassingen verwijzen we naar [Geerse en Diermanse, 2006] en [Geerse, 2006]. Hier zeggen we alleen dat het doel van het correlatiemodel bestaat uit het afleiden van een bivariate kansdichtheid $f(k,s)$ waarbij k de piekafvoer van de Rijn bij Lobith weergeeft en s het piekmeerpeil van het VZM. De marginale verdelingen van $f(k,s)$ zijn daarbij gelijk aan de vooraf gegeven marginalen $f(k) = -dP(K>k)/dk$ en $f(s) = -dP(S>s)/ds$, waarbij $P(K>k)$ en $P(S>s)$ de overschrijdingskansen zijn van respectievelijk de piekafvoer k bij Lobith en het piekmeerpeil s van het VZM. De kansdichtheid $f(k,s)$ slaat dus op de correlatie tussen de piekafvoer en het piekmeerpeil gedurende de basisduur $B = 30$ dagen.

Bij een gecorreleerd paar (k,s) kunnen k en s op verschillende momenten in de tijd vallen.

2.3.2 Toepassing correlatiemodel op metingen en keuze σ

In dit project zijn simultane metingen beschikbaar van dagwaarden van de Rijnafvoer bij Lobith en het meerpeil van het VZM voor de periode 01-01-1998 t/m 31-12-2011. Deze metingen zijn beschikbaar uit eerdere projecten; zie [Geerse, 2012] voor een beschrijving van de metingen voor het VZM en [Geerse, 2013] voor de Rijn. Het VZM is in zijn huidige vorm ontstaan halverwege 1987, en in principe kan een langere reeks simultane waarnemingen worden geconstrueerd dan 1998 t/m 2011, namelijk van medio 1987 tot heden. Aangezien de metingen van het VZM nogal wat hiaten bevatten, vergt dat de nodige inspanning. Omdat de verwachting is dat de precieze mate van correlatie niet heel nauw steekt voor de resultaten van het probabilistisch model, wordt hier alleen gebruik gemaakt van de nu beschikbare simultane waarnemingen uit 1998 t/m 2011.



Figuur 2-16 De 9 hoogste geselecteerde Rijngolven, samen met de tijdsverlopen van het VZM.

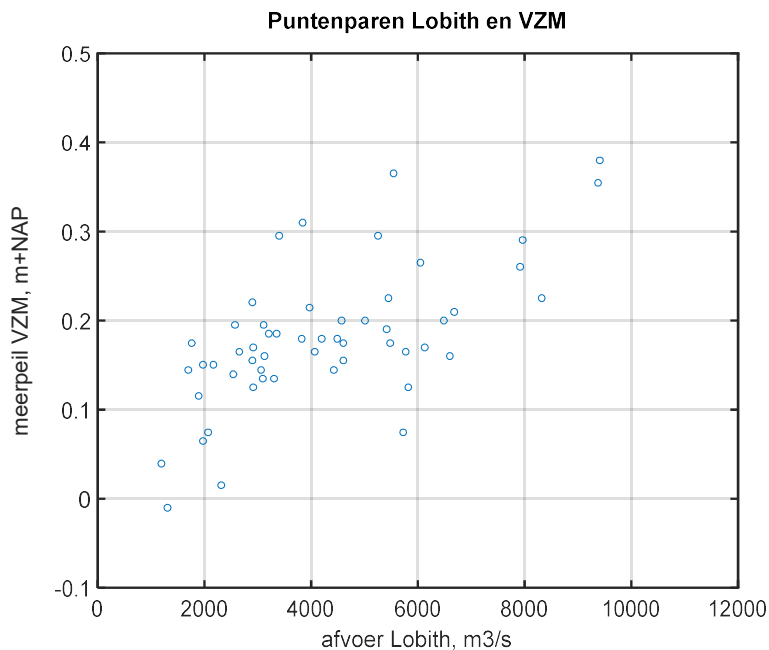
Om simultane waarnemingen te selecteren is als volgt te werk gegaan:

1. Eerst worden met een zogenaamde zichtduur $z = 15$ dagen piekwaarden van de Rijn geselecteerd. Van een geselecteerde piekwaarde k is sprake als deze het maximum vormt binnen een venster van 15 dagen vóór het moment van de piekwaarde tot 15 dagen ná dat moment. Dat levert afvoergolven gedurende de basisduur $B = 30$ dagen. Zie ter illustratie de blauwe lijnen uit Figuur 2-16, die de negen hoogste Rijngolven geven.
2. In hetzelfde tijdsvenster worden ook de meerpeilen van het VZM geselecteerd (rode gestreepte lijnen in de figuur). Het maximum van dat verloop wordt aangeduid door s . Op deze manier worden in de figuur negen paren (k,s) gevonden.

3. In de selectie wordt geen drempelwaarde voor de Rijnafoer gebruikt. In totaal blijken dan in het winterhalfjaar $N = 54$ golven te worden geselecteerd. Dat levert puntenparen (k_i, s_i) , $i = 1..N$ puntenparen.

Intermezzo: het aantal geselecteerde golven

De meetperiode beslaat 14 winterhalfjaren, oftewel $14 \cdot 6 = 84$ wintermaanden. Toch worden met $z = 15$ dagen (met een venster van $2 \cdot 15 = 30$ dagen) 'slechts' 54 golven geselecteerd. Reden daarvan is dat golven elkaar in de tijd niet hoeven op te volgen: er kunnen als het ware 'gaten' vallen tussen opeenvolgende golven. Beschouw als uitleg het theoretische geval dat gedurende de winter sprake is van voortdurend toenemende afvoeren; dan zal gedurende die winter niet één golf worden geselecteerd, omdat een piekwaarde nooit het maximum zal zijn binnen een venster van 15 dagen vóór tot 15 dagen ná de piek.



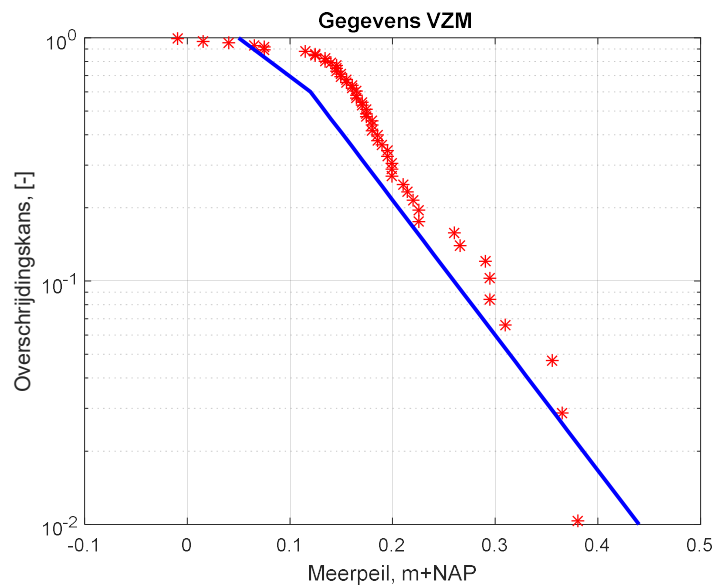
Figuur 2-17 De simultane waarnemingen uit 1998 t/m 2011.

Deze geselecteerde data zijn weergegeven in Figuur 2-17. Duidelijk is een positieve correlatie te zien: hogere Rijnafoeren gaan gemiddeld gezien samen met hogere meerpeilen van het VZM.

Voor de toepassing van het correlatiemodel zijn de marginale verdelingen nodig van de (piek)afvoer en van het (piek)meerpeil. Deze beschrijven de data echter niet al te best, zoals voor het VZM te zien is in Figuur 2-18. Daar zijn meerdere redenen voor:³

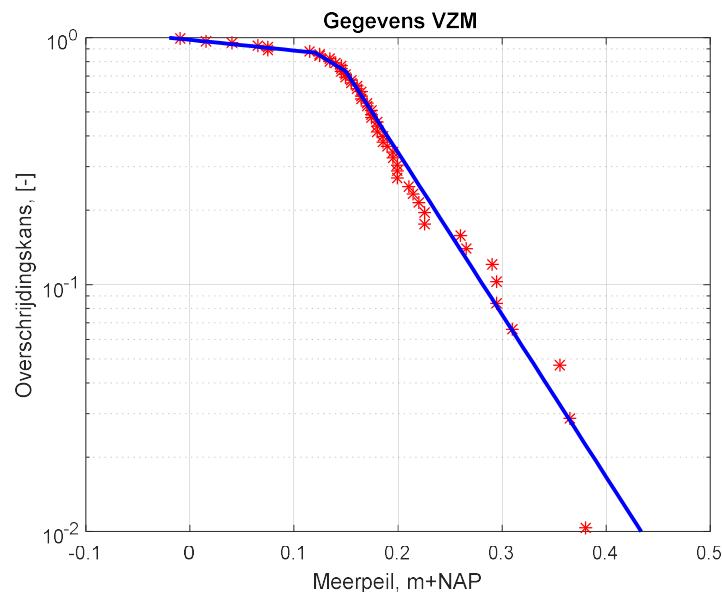
- De metingen betreffen 1998 t/m 2011, terwijl de overschrijdingskans $P(S > s)$ is afgeleid voor kortere periode 1998 t/m 2006.
- Zoals eerder opgemerkt in paragraaf 2.2.2 is $P(S > s)$ niet bedoeld als beschrijving voor de meerpeilen die vaker voorkomen dan eens per jaar, namelijk meerpeil 0.22 m+NAP. De figuur laat zien dat onder dit meerpeil de beschrijving zeer slecht is.

³ De plotposities zijn hier volgens Gringorton: als de data worden geordend van hoog naar laag, met $i = 1$ de hoogste waarneming, is de kans volgens de plotpositie $p(i) = (i+c+d-1)/(N+c)$, met $c = 0.12$ en $d = 0.44$. Deze plotpositie wordt ook voor latere figuren gebruikt.

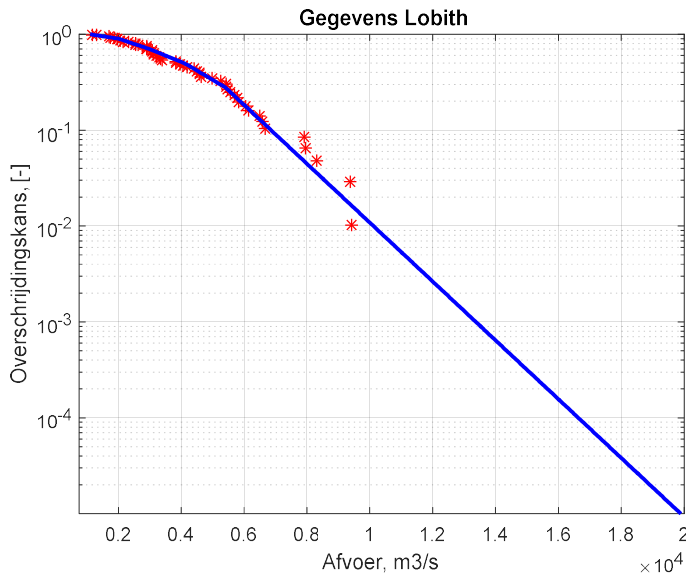


Figuur 2-18 De piekwaarden s_i , $i = 1..54$, voor het VZM, samen met de $P(S>s)$ volgens Tabel 2-8.

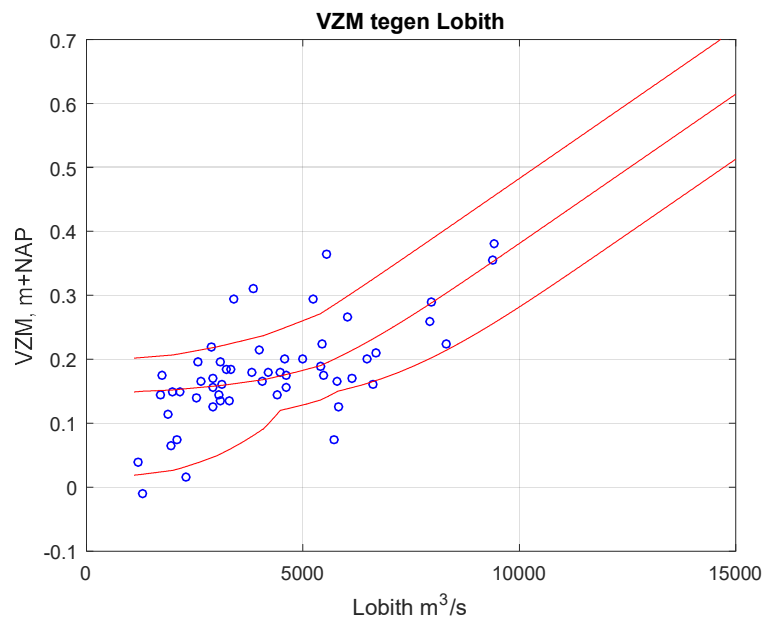
Voor de pieken van de Rijnafvoer blijkt de fit ook erg slecht te zijn. Omdat voor de toepassing van het correlatiemodel marginalen nodig zijn die de data goed beschrijven, zijn nieuwe marginale verdelingen bepaald die de metingen wel goed beschrijven. Die fits worden getoond in Figuur 2-19 en Figuur 2-20. Deze fits mogen alleen voor toepassing in model CS worden gebruikt, om goed zicht te krijgen op de correlatie tussen afvoer en meerpeil, maar hebben verder geen enkele status!



Figuur 2-19 De piekwaarden s_i , $i = 1..54$, voor het VZM, samen met de nieuw bepaalde $P(S>s)$ t.b.v. het correlatiemodel.



Figuur 2-20 De piekwaarden k_i , $i = 1..54$, voor de Rijn, samen met de nieuw bepaalde $P(K > k)$ t.b.v. het correlatiemodel.



Figuur 2-21 De data en de modellering door model CS, voor $\sigma = 1.2$.

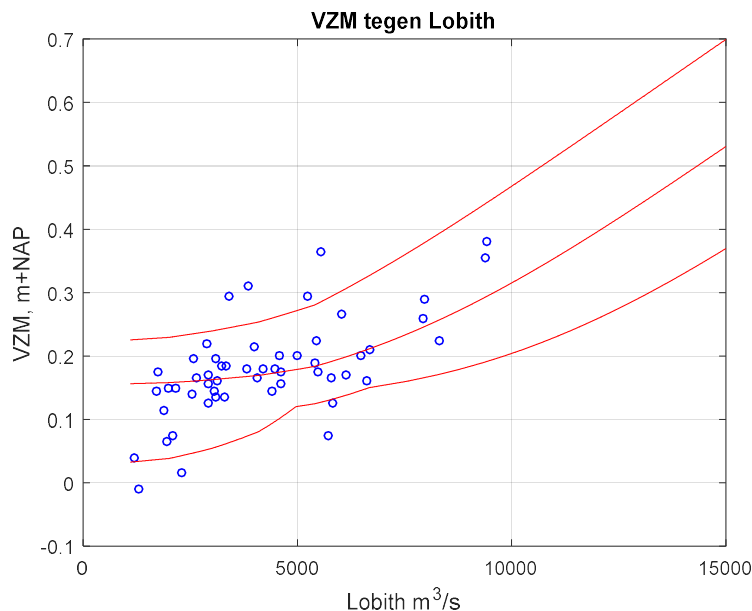
Toepassing van het correlatiemodel CS levert de resultaten volgens Figuur 2-21. Deze figuur bevat de volgende onderdelen:

1. De puntenparen (k_i, s_i) , $i = 1..54$, uit Figuur 2-17.
2. Drie zogenaamde percentielijnen, gerekend van onder naar boven respectievelijk voor percentages 10%, 50% en 90%. Onder de onderste lijn (10%-lijn) ligt idealiter 10% van de data en onder de bovenste (90%-lijn) idealiter 90% van de data. Tussen de buitenste lijnen ligt dan idealiter 80% van de punten.

Zometeen volgt informatie over de in punt 2 genoemde aantallen punten. Eerst melden we dat in model CS een waarde $\sigma = 1.2$ is gebruikt in de zogenaamde getransformeerde ruimte (dimensieloos getal). Deze waarde vormt in de getransformeerde ruimte de standaarddeviatie van de normale verdeling die gebruikt wordt om de spreiding te modelleren (zie voor uitleg desgewenst de eerder genoemde rapporten). De keuze van σ bepaalt de steilheid van de percentiellijnen en de afstanden daar tussen: hoe groter σ , hoe vlakker de lijnen lopen, en hoe groter de afstanden daartussen.

Bij de keuze uit de figuur ($\sigma = 1.2$) liggen onder de onderste lijn 5 punten en boven de bovenste lijn ook 5 punten; tussen de buitenste lijnen liggen dan 44 punten. Dus het correlatiemodel lijkt met $\sigma = 1.2$ de data vrij goed te beschrijven. Opgemerkt moet worden dat de dataset feitelijk te kort is voor een nauwkeurige bepaling van σ . Ook is maar de vraag of model CS – met na transformatie een constante spreiding – de werkelijke correlatie echt goed beschrijft. Mogelijk beschrijft een model met een toenemende spreiding de data beter; dat laatste bleek het geval voor bijvoorbeeld de correlatie tussen de IJssel en het IJsselmeer in [Geerse, 2016]. Maar naar verwachting zal de precieze keuze van σ weinig invloed hebben op de resultaten van het probabilistische model. Terzijde: ook voor de correlatie tussen IJssel en IJsselmeerpeil is indertijd $\sigma = 1.2$ afgeleid.

Ter vergelijking is model CS ook toegepast voor $\sigma = 2.0$ (Figuur 2-22). In dat geval liggen onder de onderste lijn 3 punten en boven de bovenste 4 punten. Dat model fit ons inziens slechter: de lijnen liggen nu te ver uit elkaar, met te weinig punten buiten de buitenste lijnen. Wel benadrukken we nog eens dat voor betrouwbare uitspraken een langere meetperiode noodzakelijk is.

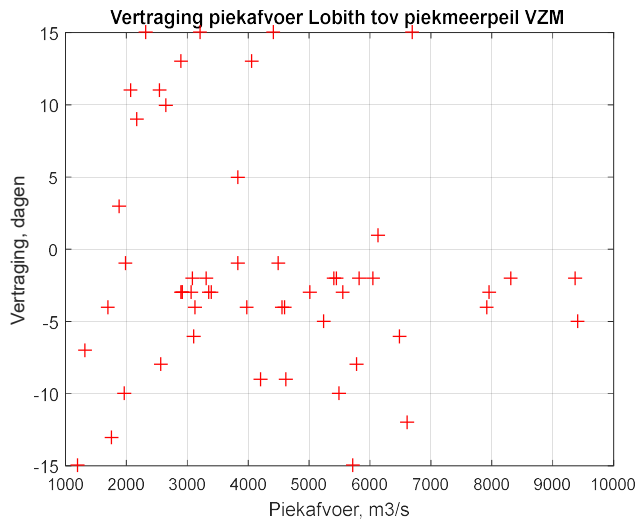


Figuur 2-22 Gevoeligheidsanalyse: de data en de modellering door model CS voor $\sigma = 2.0$.

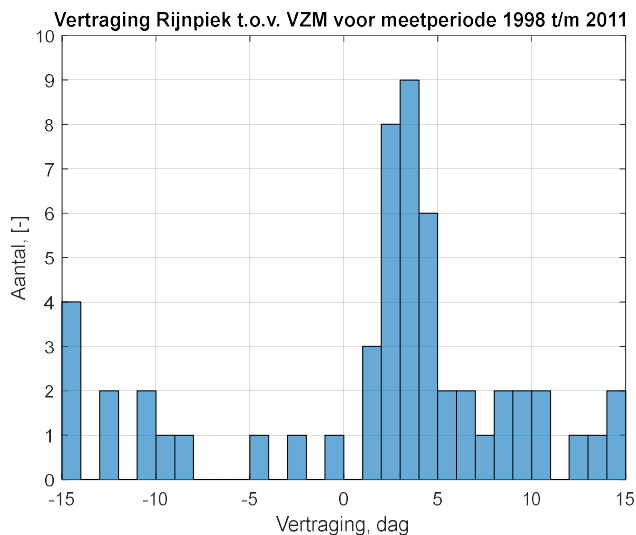
2.3.3 Keuze verschuiving tussen afvoer en meerpeil

In het probabilistisch model wordt een vaste verschuiving gebruikt tussen de middens van de meerpeil- en de afvoertrapezia uit Figuur 2-1. Die wordt nu bepaald.

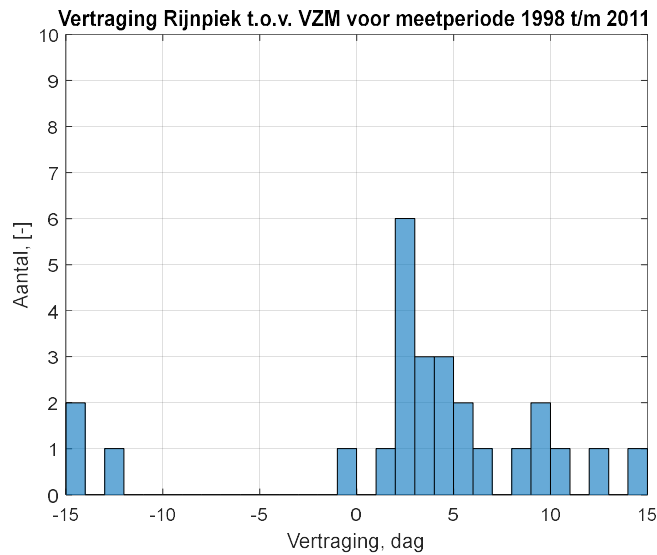
Voor de puntenparen (k_i, s_i) , $i = 1..54$, uit Figuur 2-17 kan per geval worden vastgesteld hoeveel dagen later de Rijngolf zijn maximum bereikt dan de meerpeilgolf. Bijvoorbeeld de hoogste Rijngolf in Figuur 2-16 is van 4 november 1998, terwijl het VZM zijn maximum bereikt op 30 oktober 1998: een vertraging van de Rijnafvoer van 5 dagen t.o.v. het VZM. Van alle geselecteerde puntenparen is de vertraging uitgezet tegen de Rijnafvoer (Figuur 2-23). Het is duidelijk dat waarden om en nabij de 3 dagen het meest voorkomen. Dat blijkt vooral duidelijk als de vertragingen worden uitgezet in een histogram (Figuur 2-24).



Figuur 2-23 Vertraging van de Rijnpiek t.o.v de piek van het VZM, op basis van alle 54 pieken uit de meetperiode 1998 t/m 2011, als functie van de Rijnafvoer.

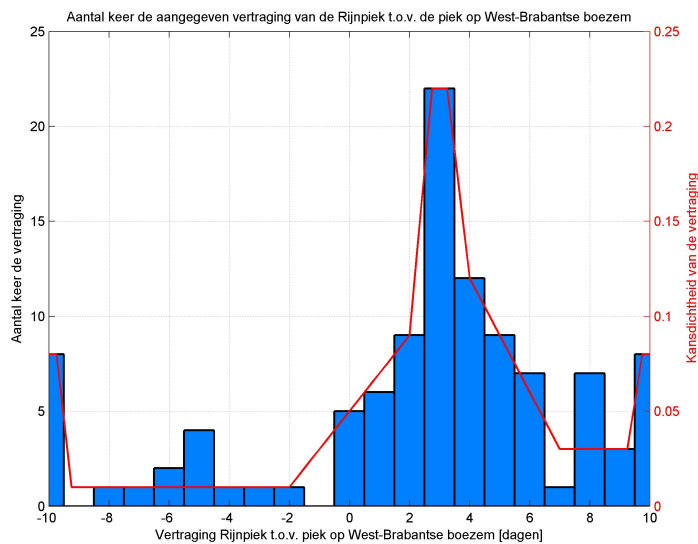


Figuur 2-24 Histogram van de vertraging van de Rijnpiek t.o.v de piek van het VZM, op basis van alle 54 pieken uit de meetperiode 1998 t/m 2011.



Figuur 2-25 Histogram van de vertraging van de Rijnpiek t.o.v. de piek van het VZM, op basis van Rijnpieken $> 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ uit de meetperiode 1998 t/m 2011.

Deze vertragingen zijn in Figuur 2-25 ook nog eens uitgezet voor alleen de Rijnpieken hoger dan $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. Op basis van deze gegevens kiezen we voor een vertraging van 3.5 dag. Deze waarde blijkt goed overeen te stemmen met analyses uit [Kuijper et al, 2014], waaruit Figuur 2-26 afkomstig is. Die figuur geeft een histogram voor de vertraging van de Rijnafvoer t.o.v. de piek van de Mark-Dintel-Vliet boezem, waarbij de onderliggende data in dit geval zijn *berekend*, voor de (lange) periode 1902 tot 2003. Volgens persoonlijke communicatie met Rudolf Versteeg van HKV is de tijdfasering van de Mark-Dintel-Vliet boezem afgestemd op de locaties Dintelsas en Benedensas, die grenzen aan het VZM. Er hoeft dus geen tijdsvertraging te worden toegepast tussen de Mark-Dintel-Vliet boezem en het VZM. Ook in dit geval lijkt een vertraging van 3.5 dag een goede keuze.



Figuur 2-26: Histogram en kansverdeling vertraging Rijnpiek t.o.v. piek Mark-Dintel-Vliet boezem. Bron: [Kuijper et al, 2014].

2.4 Zeewaterstandstatistiek

Op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer is de zeewaterstand bij Maasmond – net als in het Benedenrivierengebied – een van de stochasten. Bij installatie levert Hydra-NL vijf bestanden met zeewaterstandsstatistiek bij Maasmond. Zie Tabel 2-11. Dit zijn bestanden met conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand gegeven de windrichting voor een 12-uursperiode te Maasmond voor 16 windrichtingssectoren (NNO t/m N). Zie paragraaf 3.8 van [Duits en Kuijper, 2017] voor een voorbeeld van de inhoud van zo'n bestand.

Bestandsnaam	Toelichting
CondPovMaasmond_12u_zichtjaar1985_2011.txt	Dit bestand bevat conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor het zichtjaar 1985 met gegevens die in 2011 van toepassing waren.
CondPovMaasmond_12u_zichtjaar1985_2017.txt	Dit bestand bevat conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor het zichtjaar 1985 met een update naar de inzichten van 2017.
CondPovMaasmond_12u_zichtjaar1985_2017_metOnzheid.txt	Dit bestand bevat conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor het zichtjaar 1985 met een update naar de inzichten van 2017, waarin de statistische onzekerheid van de zeewaterstand is meegenomen. De statistische onzekerheid is uitgeïntegreerd.
CondPovMaasmond_12u_zichtjaar2017.txt	Dit bestand bevat conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor het zichtjaar 2017. Hierin is de zeespiegelstijging van 1985 tot 2017 meegenomen. Deze zeespiegelstijging is 10 cm.
CondPovMaasmond_12u_zichtjaar2017_metOnzheid.txt	Dit bestand bevat conditionele overschrijdingskansen van de zeewaterstand voor het zichtjaar 2017, waarin de statistische onzekerheid van de zeewaterstand is meegenomen. De statistische onzekerheid is uitgeïntegreerd.

Tabel 2-11: Bestanden met zeewaterstandsstatistiek bij Maasmond.

Als in Hydra-NL gerekend wordt met het bestand *CondPovMaasmond_12u_zichtjaar1985_2017.txt* en met 10 cm zeespiegelstijging dan volgens dezelfde antwoorden als het rekenen met het bestand *CondPovMaasmond_12u_zichtjaar2017.txt* zonder zeespiegelstijging. Voor de twee bestanden waarin de statistische onzekerheid is uitgeïntegreerd geldt hetzelfde.

In de Basismodus van Hydra-NL wordt gerekend met het bestand *CondPovMaasmond_12u_zichtjaar2017_metOnzheid.txt* (zonder zeespiegelstijging). In dit bestand is de statistische onzekerheid dus meegenomen. In de Testmodus is een ander bestand te kiezen. Ook kan daar een waarde voor de zeespiegelstijging opgegeven worden. In de Klimaatmodus kan gerekend worden voor de jaren 2050 en 2100 voor de klimaatscenario's Rust/Druk of en Warm/Stoom. Hierbij wordt ook uitgegaan van het bestand *CondPovMaasmond_12u_zichtjaar2017_metOnzheid.txt*. De zeespiegelstijgingen ten opzichte van 2017 staan in Tabel 3-1. Het Rust/Druk-scenario is conform het KNMI '06 scenario 2050/2100 G en het Warm/Stoom-scenario is conform het KNMI '06 scenario 2050/2100 W+.

Scenario \ Jaar	2050	2100
Rust/Druk	0.05	0.25
Warm/Stoom	0.25	0.75

Tabel 2-12: Zeespiegelstijgingen (m) t.o.v. 2017 in de vier klimaatscenario's.

2.5 Windstatistiek

Op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer wordt – net als in het Benedenrivieren-gebied – gerekend met windstatistiek bij Schiphol, die bestaat uit kansen op de windrichting en conditionele overschrijdingskansen van de windsnelheid gegeven de windrichting voor een 12-uursperiode voor 16 windrichtingssectoren (NNO t/m N). Bij installatie levert Hydra-NL twee bestanden met kansen op de windrichting:

- Kanswindrichting_v01.txt
- Richtingskansen_Schiphol_2017.txt

Zie paragraaf 3.12 van [Duits en Kuijper, 2017] voor een voorbeeld van de inhoud van zo'n bestand. Het eerste bestand bevat kansen op de windrichting die in 2011 en eerder van toepassing waren; het tweede bestand bevat deze kansen die voor 2017 gelden. Hydra-NL rekent in de Basis- en Klimaatmodus met het tweede bestand. Ook in de Testmodus rekent Hydra-NL met dit bestand, maar dit bestand kan hier wel vervangen worden door het eerste bestand.

Hydra-NL levert bij installatie zes bestanden met statistiek van de windsnelheid bij Schiphol, die relevant zijn voor de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer:

- Ovkanswind_schiphol.txt
- Ovkanswind_schiphol_B_met volker.txt
- Ovkanswind_Schiphol_2017.txt
- Ovkanswind_Schiphol_2017_metOnzHeid.txt
- Ovkanswind_Schiphol_met_Volkerfactor_2017.txt
- Ovkanswind_Schiphol_met_Volkerfactor_2017_metOnzHeid.txt

Zie paragraaf 3.9 van [Duits en Kuijper, 2017] voor een voorbeeld van de inhoud van zo'n bestand. De eerste twee bestanden bevatten statistiek van de windsnelheid die in 2011 en eerder van toepassing waren; het vier laatste bestanden bevatten die statistiek die voor 2017 van toepassing zijn. De bestanden met de term "Volker" in de naam bevatten de zogenaamde Volkerfactor, die bij hoogteberekeningen gebruikt worden. De andere drie bestanden bevatten deze factor niet en worden bij bekledingberekeningen gebruikt. In de bestanden met de term "metOnzHeid" in de naam is de statistische onzekerheid van de windsnelheid meegenomen. De statistische onzekerheid is uitgeïntegreerd.

Hydra-NL rekent in de Basis- en Klimaatmodus met de bestanden *Ovkanswind_Schiphol_met_Volkerfactor_2017_metOnzHeid.txt* en *Ovkanswind_Schiphol_2017_metOnzHeid.txt* voor respectievelijk de hoogteberekeningen en de bekledingberekeningen. Ook in de Testmodus rekent Hydra-NL met deze bestanden, maar kunnen ze vervangen worden.

In klimaatscenario's wordt niet met andere windstatistiek gerekend.

Voor de gezamenlijke windwaterstandstatistiek op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer wordt – net als in het Benedenrivierengebied – gewerkt met een afknotting van de windsnelheidsstatistiek. Het afknottingspercentage is voor alle situaties (Benedenrivieren, HIJ en VZM) gelijk aan 2%. In de Testmodus kan dit percentage worden aangepast.

2.6 Keringen

Op de Hollandsche IJssel en het Volkerak-Zoommeer maakt de Europoortkering deel uit van het probabilistische model. De faalkans van deze kering is – conform het Benedenrivierengebied – gelijk aan 1/100 per sluitvraag. Als de kering gemiddeld eens in de 10 jaar sluit dan mislukt de sluiting hiermee gemiddeld eens in de 1000 jaar. In de Testmodus van Hydra-NL kan deze faalkans gevarieerd worden.

Op de Hollandsche IJssel maakt de Hollandsche IJsselkering deel uit van het probabilistische model. De faalkans van deze kering is 1/100 per sluitvraag. Deze faalkans is momenteel al de default instelling in Hydra-NL. In de Testmodus van Hydra-NL zal deze faalkans gevarieerd kunnen worden.

3 Modelonzekerheden

3.1 Hollandse IJssel

3.1.1 Modelonzekerheden waterstanden

In de systeemdokumentatie van Hydra-NL [Duits en Kuijper, 2017] is beschreven hoe onzekerheid in de waterstand verwerkt is. In paragraaf 5.7 van deze referentie wordt voor de Benedenrivieren de grootheid Δh^* ingevoerd, die het verschil geeft tussen de "werkelijke" en de modelmatig berekende waterstand (door WAQUA of Sobek). Deze grootheid kan worden gezien als de 'fout' in de waterstandsmodellering. Voor de Benedenrivieren bv. leidt deze modellering voor de waterstand dan tot de volgende vorm:

$$H(q, m, u, r, \omega, \Delta h^*) = h_{\text{lok,mod}}(q, m, u, r, \omega) + \Delta h^*$$

Hierin stelt q de afvoer voor, m de zeewaterstand bij Maasmond, u de wind-snelheid, r de windrichting en ω de keringtoestand. Er wordt aangenomen dat Δh^* een normale verdeling heeft met verwachtingswaarde $\mu_{\Delta h^*}$ en standaarddeviatie $\sigma_{\Delta h^*}$, kortweg aangegeven als:

$$\Delta h^* \sim N(\mu_{\Delta h^*}, \sigma_{\Delta h^*})$$

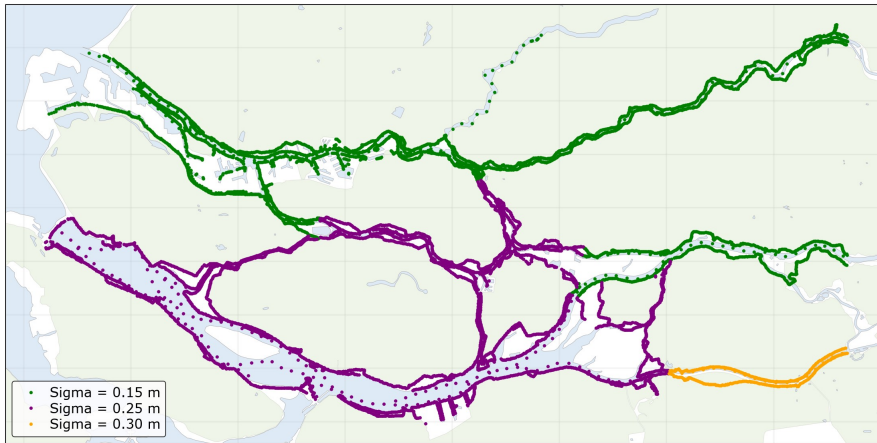
Voor de waterstand wordt in geen enkel watersysteem in Nederland een bias aangenomen ($\mu_{\Delta h^*} = 0$). Dit doen we daarom ook op de Hollandse IJssel.

Een studie naar de grootte van de standaarddeviaties is erg omvangrijk. Zie bijvoorbeeld de rapportage [Chbab, 2014], die voor de Rijn-Maasmonding is uitgevoerd. Zo'n studie voert binnen deze opdracht te ver. Daarom maken we hier een pragmatische keuze, die we goed kunnen verdedigen:

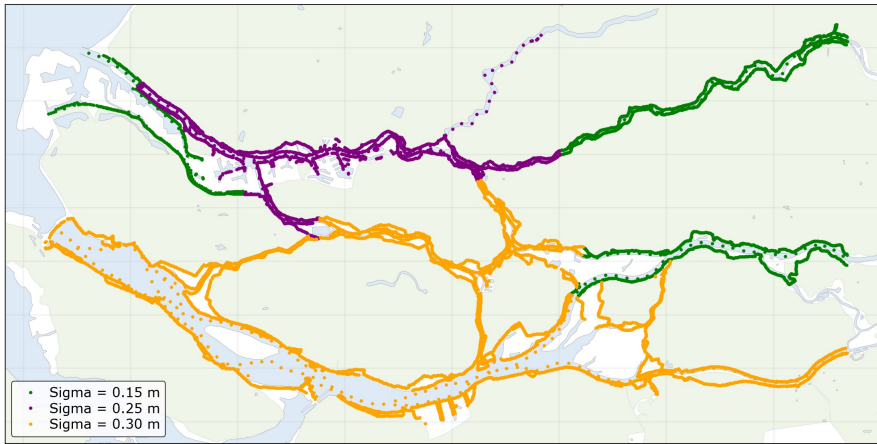
- Op de Hollandse IJssel is de decimeringshoogte van de waterstand erg klein (orde 0.25 m). Bij grote standaarddeviaties wordt de onzekerheid in de waterstand dominant voor dergelijke kleine decimeringshoogtes. Daarom is een kleine standaarddeviatie op de Hollandse IJssel realistisch.
- Op de Hollandse IJssel zijn de waterstanden met Sobek berekend. Het is niet goed verdedigbaar om te stellen dat de onzekerheid met Sobek kleiner is dan in WAQUA. Daarom zullen de standaarddeviaties op de Hollandsche IJssel minstens de waarden van WAQUA moeten hebben.

Beide gezichtspunten combinerend worden de standaarddeviaties van SOBEEK op de Hollandse IJssel gelijk aan die van WAQUA. De standaarddeviatie van de onzekerheid in de waterstand is in het Benedenrivierengebied afhankelijk van de toestand van de Europoortkering. In onderstaande figuren staan de standaarddeviaties voor beide toestanden van de Europoortkering. Op de Hollandse IJssel wordt de standaarddeviatie van de modelonzekerheid van de waterstand bij een geopende Europoortkering gelijk aan 0.15 m (conform Figuur 3-1) en bij de gesloten Europoortkering wordt deze 0.25 m (conform Figuur 3-2).

Vooralsnog kan in Hydra-NL met slechts één standaarddeviatie worden gerekend, onafhankelijk van de toestand van de Europoortkering. We kiezen er voor om uit te gaan van de waarde die geldt voor de gesloten Europoortkering, dat wil zeggen een standaarddeviatie van 0.25 m.



Figuur 3-1: *Figuur 6 Standaarddeviatie modelonzekerheid waterstand voor Benedenrivieren bij een geopende Europoortkering.*



Figuur 3-2: *Standaarddeviatie modelonzekerheid waterstand voor Benedenrivieren bij een gesloten Europoortkering.*

3.1.2 Modelonzekerheden golfparameters

Hydra-NL kan rekenen met modelonzekerheden in golven [Duits en Kuijper, 2017]. Daarbij worden onzekerheden beschouwd in de significante golfhoogte H_{m0} , de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en de piekperiode T_p . Voor het modelleren van de onzekerheid wordt een zogenaamd multiplicatief model gebruikt, waarbij deze grootheden worden vermenigvuldigd met bepaalde factoren:

$$H_{m0,incl} = f_{H_{m0}} H_{m0,excl} \quad \text{met} \quad f_{H_{m0}} \sim N(\mu_{H_{m0}}, \sigma_{H_{m0}})$$

$$T_{m-1,0,incl} = f_{T_{m-1,0}} T_{m-1,0,excl} \quad \text{met} \quad f_{T_{m-1,0}} \sim N(\mu_{T_{m-1,0}}, \sigma_{T_{m-1,0}})$$

$$T_{p,incl} = f_{T_p} T_{p,excl} \quad \text{met} \quad f_{T_p} \sim N(\mu_{T_p}, \sigma_{T_p})$$

waarbij het subscript 'excl' duidt op de golfgegevens zonder onzekerheid, en het subscript 'incl' op die met onzekerheid. In Tabel 3-1 zijn de parameters van de kansverdelingen van de modelonzekerheid van de golfparameters per hoofdsysteem weergegeven voor Hydra-NL. Deze tabel is overeenkomstig de tabel uit de samenvatting van [Chbab en Groeneweg, 2015] op een

verhoging van de verwachtingswaarden μ met waarde 1 na en de in [Chbab en Groeneweg, 2015] ontbrekende golfperiodes zijn ingevuld.

Hoofdsysteem	Factor H_{m0}		Factor $T_{m-1,0}$		Factor T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
I. Kust, IJsselmeer	0.99	0.19	0.96	0.11	0.96	0.11
II. Brede wateren in rivierengebied, randmeren	0.94	0.15	0.89	0.04	0.99	0.07
III. Smalle wateren in rivierengebied, Eemvallei	0.96	0.27	1.03	0.13	1.03	0.13
IV. Markermeer – IJburg	0.95	0.11	1.04	0.08	0.96	0.05
V. Markermeer – overig (excl. IJburg)	0.98	0.20	1.16	0.11	1.16	0.11

Tabel 3-1: Modelonzekerheid golfparameters.

Omdat de Hollandse IJssel in categorie III (smalle wateren in rivierengebied) valt, kiezen we voor de Hollandse IJssel de parameters van de vermenigvuldigingsfactoren uit die categorie voor de golfparameters.

3.2 Volkerak-Zoommeer

3.2.1 Modelonzekerheden waterstanden

In paragraaf 3.1.1 is reeds beschreven hoe onzekerheid in de waterstand in de rekenmethode van Hydra-NL verwerkt is. Voor de standaarddeviatie van de modelonzekerheid in de waterstand op het Volkerak-Zoommeer onderscheiden we de volgende twee situaties:

1. *Situatie zonder inzet*

Het blijkt, op basis van berekeningen met de HR2006 database, dat het VZM voornamelijk meerpeildominant is, terwijl de wind een relatief kleine invloed heeft. Het gedrag lijkt wat de kansmatige invloed van wind en meerpeil betreft op dat van de westzijde van het Markermeer. Volgens [Chbab en Groeneweg, 2015] moet dan gedacht worden aan een σ van 0.15 m á 0.25 m, met $\mu = 0$ m.

2. *Situatie met inzet*

Aangezien de 'eindwaterstand' vooral wordt bepaald door de waterstand bij Rak Noord, en veel minder door het beginpeil op het VZM, ligt het voor de hand de afwijking van de waterstand op het VZM gelijk te kiezen aan die bij Rak Noord. Volgens de zojuist genoemde referentie komen we dan uit op $\sigma = 0.30$ m, met $\mu = 0$ m.

Aangezien slechts één waarde voor μ en σ kan worden gekozen, kiezen we daarom voor $\mu = 0$ m en $\sigma = 0.30$ m.

3.2.2 Modelonzekerheden golfparameters

In paragraaf 3.1.2 is reeds beschreven hoe onzekerheid in de golfparameters in de rekenmethode van Hydra-NL verwerkt is. In Tabel 3-1 zijn de parameters van de kansverdelingen van de modelonzekerheid van de golfparameters per hoofdsysteem weergegeven voor Hydra-NL. Omdat het Volkerak-Zoommeer qua omvang overeenkomt met de brede wateren in het rivierengebied en de randmeren, die in categorie II zitten, kiezen we voor het Volkerak-Zoommeer de parameters van de vermenigvuldigingsfactoren uit categorie II voor de golfparameters.

Referenties

[Bruggeman et al., 2011]

Deltascenario's – Verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21^{ste} eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het Deltaprogramma 2011 - 2012 [*Deltares-rapport 1204151.002*]. Willem Bruggeman, Marjolijn Haasnoot, Saskia Hommes, Aline te Linde, Rutger van der Brugge, Bart Rijken (PBL – Planbureau voor de Leefomgeving), Ed Dammers (PBL) en Gert Jan van den Born (PBL). Deltares, 30 april 2011.

[Chbab, 2014]

Modelonzekerheid WAQUA RMM. Houcine Chbab. Deltares, 14 oktober 2014.

[Chbab, 2015]

Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Houcine Chbab. Kenmerk 1209433-012-HYE-0007, 2 december 2015.

[Chbab en Groeneweg, 2015]

Modelonzekerheid belastingen – Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017 [*1209433-008-HYE-0007, Versie 7*]. Houcine Chbab en Jacco Groeneweg. Deltares, 18 juni 2015.

[Duits en Kuijper, 2017]

Hydra-NL – Systeemdokumentatie – Versie 2.3 [*HKV-rapport PR3506*]. Matthijs Duits en Bastiaan Kuijper. HKV lijn in water. Lelystad, april 2017.

[Geerse, 2006]

Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta - Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ. C.P.M. Geerse. RIZA-werkdocument 2006.036x. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, januari 2006.

[Geerse en Diermanse, 2006]

Correlaties en meerdimensionale statistiek. C.P.M. Geerse en F.L.M. Diermanse. HKV Lijn in Water en WL|Delft Hydraulics, rapport PR1175, Lelystad, november 2006.

[Geerse, 2012]

Statistiek Zeeuwse meren Hydra-Zoet. [*HKV-rapport PR1564.14*]. C.P.M. Geerse. HKV Lijn in Water, mei 2012.

[Geerse, 2013]

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

[Geerse, 2016]

Statistiek kleinere meren inclusief onzekerheid. Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen. C.P.M. Geerse. [*HKV-rapport PR3280.20*]. HKV Lijn in Water, september 2016. In opdracht van RWS - WVL.

[Kuijper et al, 2014]

Effect waterberging Volkerak-Zoommeer op waterstanden Mark-Dintel-Vliet boezem. Aanvullende analyses. [*HKV-rapport PR2904.10*]. Bastiaan Kuijper, Chris Geerse, Jan Stijnen, Ton Botterhuis, Rudolf Versteeg, Matthijs Duits en Iris Vreugdenhill. HKV Lijn in Water, oktober 2014.



HKV lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl