

## **Coïncidentie IJsselmeer**

**Synthetische RACMO tijdseries**





# Coïncidentie IJsselmeer

Synthetische RACMO tijdseries

Nienke Kramer



**Titel**

Coïncidentie IJsselmeer

**Opdrachtgever**

WVL  
Rijkswaterstaat Water,  
Verkeer en Leefomgeving,  
LELYSTAD

**Project**

11202189-010

**Kenmerk**

11202189-010-ZWS-0001

**Pagina's**

45

**Trefwoorden**

Coïncidenties, IJsselmeer, RACMO, synthetische tijdseries

**Samenvatting**

Hoge IJsselmeerpeilen worden veroorzaakt door het samenvallen van verschillende omstandigheden; zoals extreme neerslag, hoge rivierafvoeren en verhoogde zeewaterstanden. Als deze omstandigheden gecorreleerd zijn dan beïnvloedt dit de kans van voorkomen van hoge meerpeilen. Het samenvallen van deze omstandigheden noemen we coïncidentie. Om meer inzicht te krijgen in coïncidentie wordt in dit rapport onderzoek gedaan naar de langjarige tijdserie RACMO-EC-Earth.

Met behulp van een modellentrein zijn de synthetische meteorologische RACMO-EC-Earth tijdseries omgezet naar IJsselmeerpeilen. De genereerde 800-jarige reeks ligt goed op de metingen. Ook de tussenresultaten Vechtafvoer en wind benaderen de metingen goed. Waar wel verschillen te vinden zijn is het tussenresultaat van de neerslag en opzet. Bij het gebruik van de resultaten dient rekening gehouden te worden met de volgende tekortkomingen:

- De extremere neerslagbuien wordt in RACMO onderschat, dit werkt door in de regionale- en IJsselafvoer. Bij de IJsselafvoer is de onderschatting voornamelijk terug te zien bij afvoeren met een herhalingsperiode groter dan 10 jaar. Verwacht wordt dat hiermee ook de extreme RACMO-meerpeilen, die buiten het meetbereik vallen, onderschat worden.
- De opzet (zeewaterstand-getij), welke gegenereerd zijn door WAQUA, geeft een afwijkingen ten opzichte van de metingen. Omdat de opzet bij Den Oever wordt overschat en bij Kornwerderzand onderschat, lijkt het effect op het meerpeil beperkt.

De RACMO reeks is binnen deze studie ingezet voor coïncidentie onderzoek. Voordeel van deze langere (800-jarige) tijdreeks is dat er meer extreme hoogwatersituaties beschikbaar zijn, waar de meetreeks alleen okt/nov 1998 echt hoog was. Uit de analyse kwam naar voren dat de inzichten rondom coïncidentie en tijdsvertraging overeenkomen met de metingen. Wat verder opvalt, is het belang en gevoeligheid van zeewaterstand. De 800-jarige RACMO-tijdreeks laat spuistremmingen oplopend tot 200 uur zien, dit betekent dat er 8 achtereenvolgende dagen niet gespuid kan worden.

Deze studie heeft aangetoond dat de RACMO reeks potentie biedt voor het genereren van bruikbare synthetische reeksen, maar dat er nog enkele tekortkomingen zijn. Om meer vertrouwen te krijgen in de resultaten wordt aanbevolen om RACMO op de hierboven genoemde punten aan te passen. Indien blijkt dat de RACMO modellentrein geschikt is voor het heden, dan kan deze ook ingezet worden voor klimaatprojecties.

**Titel**  
Coïncidentie IJsselmeer

<b>Opdrachtgever</b> WVL Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD	<b>Project</b> 11202189-010	<b>Kenmerk</b> 11202189-010-ZWS-0001	<b>Pagina's</b> 45
---	--------------------------------	---	-----------------------

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeurig</b>
0.1	nov. 2018	Nienke Kramer		Frederiek Sperna Weiland		Gerard Blom

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Project achtergrond	1
1.2	Doel	1
1.3	Aanpak en leeswijzer	1
<b>2</b>	<b>Resultaten synthetische RAMCO-reeks</b>	<b>3</b>
2.1	Methode in hoofdlijnen	3
2.2	Resultaten	4
2.3	Hoogwater events RACMO	5
<b>3</b>	<b>Validatie modellentrein RAMCO-IJsselmeer</b>	<b>9</b>
3.1	Inleiding	9
3.2	Zeewaterstand	9
3.2.1	Gevoeligheid voor getij	9
3.2.2	Validatie stormopzet	11
3.2.3	Validatie zeewaterstand	12
3.3	IJsselafvoer Olst	12
3.4	Afvoer Overijsselse Vecht	14
3.5	Regionale aanvoer	15
3.6	Wind	20
3.7	Conclusie	27
<b>4</b>	<b>Coïncidentie</b>	<b>29</b>
4.1	Inleiding	29
4.2	Frequentielijn meerpeil	29
4.3	Stremming spui versus neerslag	29
4.4	Statistische afhankelijkheid en volgordelijkheid	32
4.4.1	IJsselafvoer en Waddenzeewaterstand	33
4.4.2	Regionale aanvoer en zeewaterstand	34
4.4.3	Lokale aanvoer en de IJsselafvoer	36
4.4.4	Meerpeil en IJsselafvoer	37
4.4.5	Samenvatting tijdsverschuiving	39
4.5	Overige statistische afhankelijkheidsanalyse	39
4.5.1	IJsselafvoer en Waddenzeewaterstand	39
4.5.2	IJsselafvoer en Meerpeil	41
4.5.3	Meerpeil en Waddenzeewaterstand	41
4.5.4	IJssel- en Vechtafvoer	42
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Project achtergrond

Dit rapport is onderdeel van het project 'Kennis Primaire Processen – Versterking Onderzoek' Waterveiligheid (KPP-VOW). Rijkswaterstaat wil met dit project bijdragen aan verbeteringen in het primaire proces rondom waterveiligheid. Eén van de lopende onderwerpen binnen KPP-VOW is het onderzoek naar coïncidentie tijdens het optreden van hoogwatergebeurtenissen in het IJsselmeer.

De oorzaak van deze hoogwatergebeurtenissen hangt samen met het samenvallen van verschillende omstandigheden; zoals extreme neerslag en hoge afvoeren op IJssel en Vecht in combinatie met beperkte spuimogelijkheden. Als de omstandigheden gecorreleerd zijn beïnvloedt dat de kans van optreden van hoge meerpeilen. Het samenvallen van de omstandigheden die hoge waterstanden veroorzaken noemen we coïncidentie.

Om meer inzicht te krijgen in coïncidentie, wordt in dit project onderzoek gedaan naar langjarige synthetische tijdseries. Het project richt zich op de langjarige tijdseries van RACMO-EC-Earth. Met behulp van het regionale klimaatmodel RACMO en het globale model EC-Earth zijn door het KNMI 800-jarige meteorologische tijdreeksen ontwikkeld, welke representatief zijn voor het huidige klimaat. Omdat deze reeksen langer zijn dan de beschikbare historische reeksen wordt het mogelijk om ook de coïncidentie, in meer extreme situaties dan in het verleden waargenomen, te achterhalen én om de coïncidentie met een hogere betrouwbaarheid te kwantificeren.

In Deltares (2017) is een modellentrein doorlopen om de door het KNMI ontwikkelde langjarige meteorologische RACMO-EC-Earth tijdseries om te zetten naar een tijdreeks van IJsselmeerpeilen. Dit rapport is een vervolg van de 2017-studie en gaat in op de eindresultaten, de betrouwbaarheid van de resultaten en de coïncidentie van de gegenereerde synthetische reeksen.

## 1.2 Doel

Het doel van dit memo is drieledig:

- 1 Bespreken resultaten;
- 2 Verificatie van de tussenresultaten van de modellentrein RACMO-IJsselmeer;
- 3 Analyseren van de gegenereerde RACMO tijdreeksen op coïncidentie.

## 1.3 Aanpak en leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de resultaten van de modellentrein besproken. Hoofdstuk 3 gaat in op de vergelijking van de tussenresultaten met de metingen, zo kan beoordeeld worden waar het verschil in eindresultaat vandaan komt. Er wordt hier gekeken naar de parameters zeewaterstand, IJsselafvoer te Olst, Vechtafvoer te Dalfsen, neerslag en wind. Hoofdstuk 4 gaat in op de kans op samenvallen (coïncidentie) tussen de verschillende stochasten. Afgesloten wordt met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5.

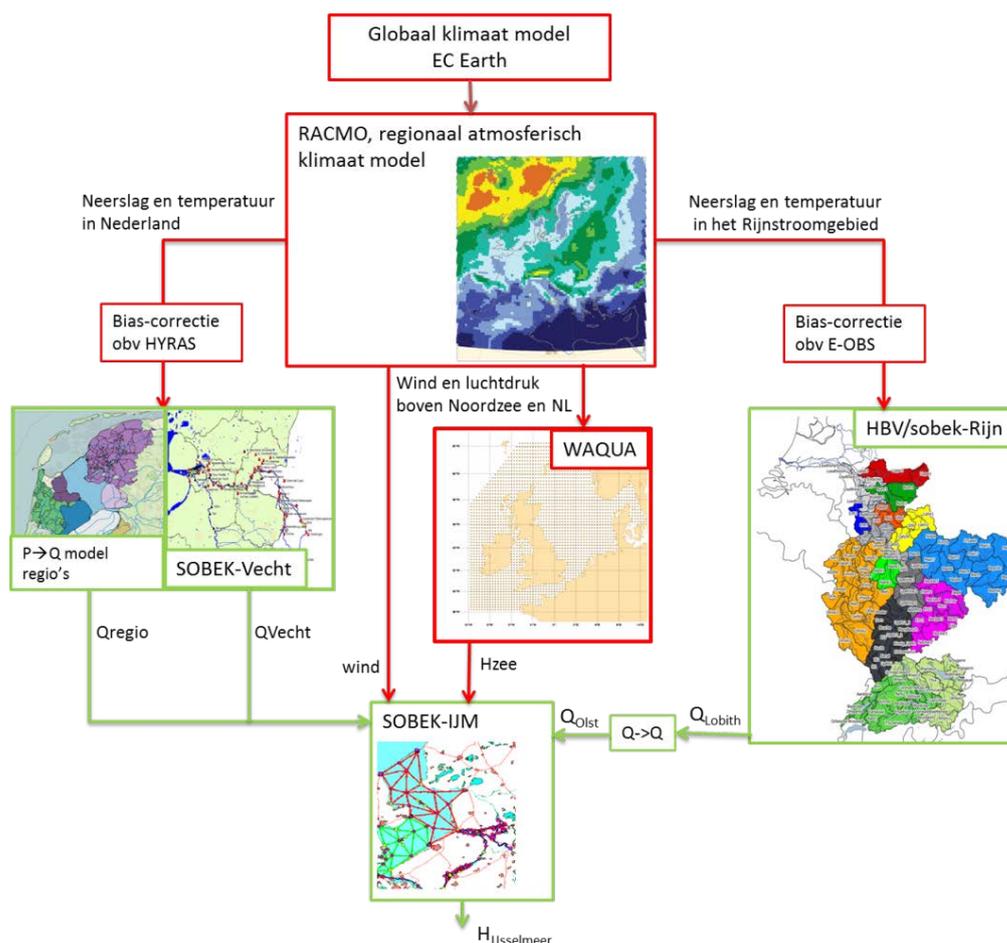


## 2 Resultaten synthetische RAMCO-reeks

### 2.1 Methode in hoofdlijnen

Voor het genereren van een 800-jarige synthetische tijdreeks met IJsselmeerpeilen is in Deltares (2017) de modellentrein uit Figuur 2.1 opgezet. De meteorologische en hydraulische tijdreeksen, die binnen deze modellentrein worden gegenereerd, worden in het vervolg van dit rapport de “RAMCO”-reeksen genoemd.

De rood omlijnde blokken in het figuur geven de werkzaamheden van het KNMI aan. Binnen deze blokken zijn met behulp van het regionale klimaatmodel RACMO en het globale EC-Earth-model 800-jarige meteorologische tijdreeksen ontwikkeld welke representatief zijn voor het huidige klimaat. Het gaat hier om tijdseries van neerslag, temperatuur, potentiële verdamping, wind en zeewaterstanden. De groen omlijnde blokken in het figuur zorgen voor de vertaling van de meteorologische tijdseries naar IJsselmeerwaterstanden.



Figuur 2.1 Modellentrein voor het genereren van een synthetische tijdserie van het IJsselmeerpeil. De rood-omlijnde onderdelen worden uitgevoerd door het KNMI, en de groene onderdelen zijn onderdeel van dit rapport.

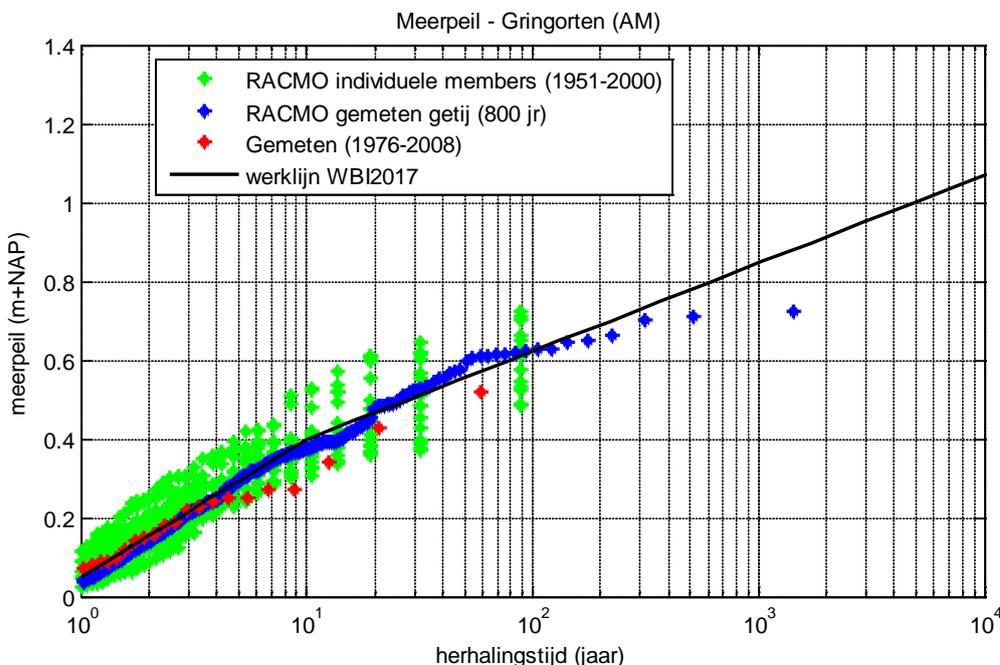
2.2 Resultaten

Het eindproduct van de modellentrein geeft de 800-jarige tijdserie met IJsselmeerpeilen, hieruit kan de meerpeil-frequentielijn worden afgeleid zoals weergegeven in Figuur 2.2 (blauwe punten). Deze frequentielijn van alle members samen ligt dicht op de metingen en dit geeft vertrouwen in de resultaten. Ook het gemiddelde meerpeil en de standaard deviatie komen in de buurt van de gemeten waarden (Tabel 2.1). In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de betrouwbaarheid van de tussenresultaten om nog meer vertrouwen te krijgen in het eindresultaat.

Wat verder opvalt is de afvlakking van de frequentielijn. De extreemste meerpeilen liggen onder de WBI2017-lijn. Het is onduidelijk of dit komt door de onzekerheid rondom de extremen (bijv. de onderschatting van de IJsselafvoer) of dat dit fysisch verklaarbaar is. Een fysische oorzaak zou kunnen zijn; het optreden van overstromingen bovenstrooms, waar de IJsselafvoer ook een afvlakking laat zien.

Bij het bepalen van de frequentielijn van alle members is verondersteld dat de individuele tijdreeksen volledig onafhankelijk zijn, waardoor ze achter elkaar geplakt kunnen worden om een synthetische tijdreeks van 800 jaar te construeren. Deze onafhankelijkheid is onder andere verkregen door het globale EC-Earth model een lange inspeelperiode te geven (1850-1950). Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar IMPREX (2017).

De groene punten in onderstaand figuur geven de statistiek van de individuele members aan, te zien is dat de onzekerheid nog te groot is en de tijdreeksen te kort zijn om betrouwbare statistiek af te leiden. Onderstaande figuur geeft de meerwaarde van het gebruik van het volledige ensemble aan.



Figuur 2.2 Overschrijdingsfrequentielijn IJsselmeerpeil. Selectiemethode events: jaarmaxima (AM), plotpositie: Gringorten (gumbel), periode: wintermaanden<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Het onderste deel van de frequentielijn is niet geplot omdat deze in WBI is afgeleid met een frequentieanalyse ipv een extreme waarde analyse.

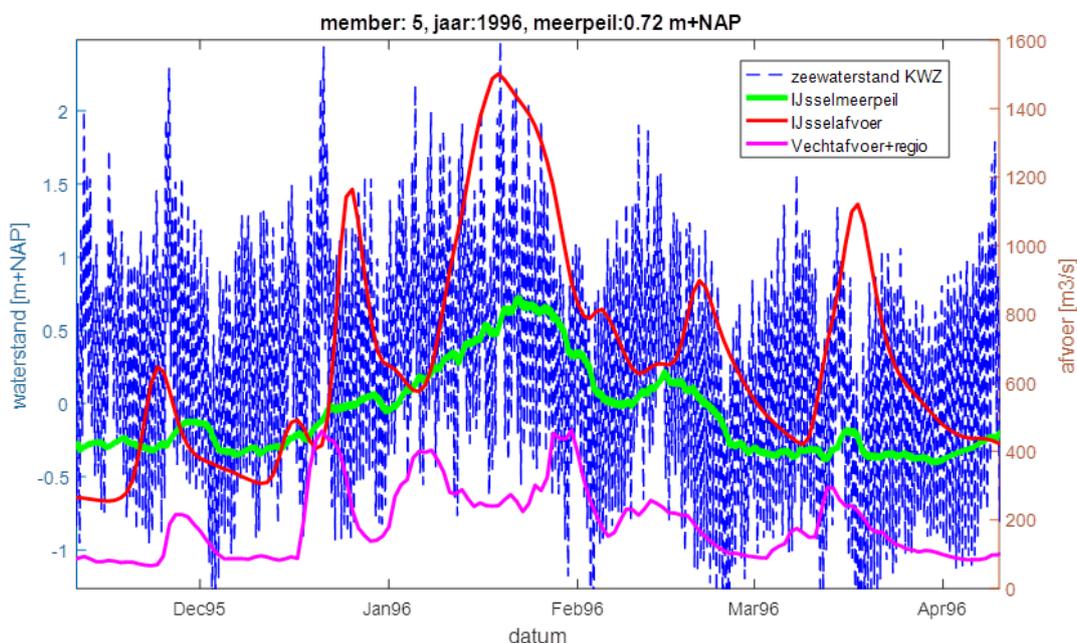
Tabel 2.1 Kentallen vergelijking IJsselmeerpeilen volgens de metingen en RACMO.

periode	parameter	metingen	RACMO_getij	verschil
		[m+NAP]	[m+NAP]	[m]
winter	Gemiddeld meerpeil	-0.262	-0.271	0.009
	Std meerpeil	0.146	0.151	-0.005

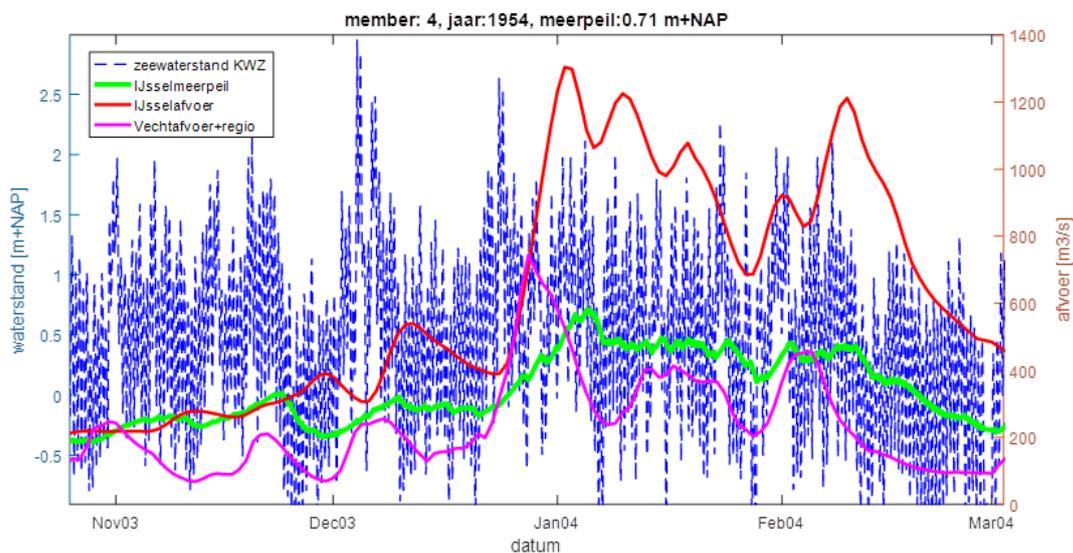
### 2.3 Hoogwater events RACMO

De hoogwater-events met vijf hoogste RACMO-meerpeilen zijn weergegeven in Figuur 2.3 t/m Figuur 2.7. In de figuren is zowel het verloop van het meerpeil, de zeewaterstand, IJsselafvoer, Vecht- en regio afvoer weergegeven.

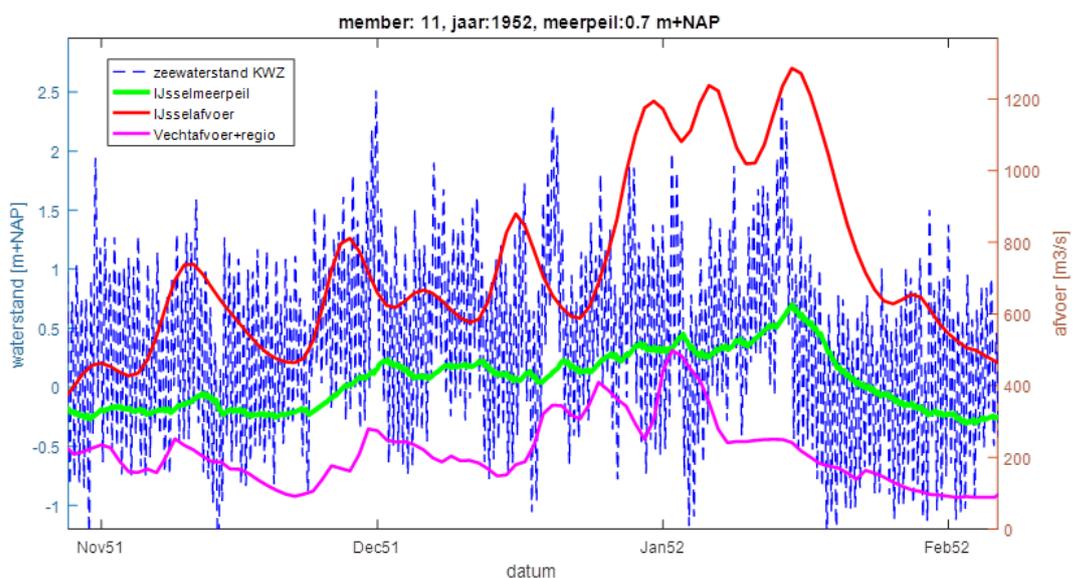
In overeenstemming met historische hoogwaters (zie Figuur 2.8), is er een lange aanloop naar een verhoogd meerpeil. Tijdens deze aanloop komen er frequent perioden voor dat er niet gespuid kan worden. Verder zijn alle vijf de IJsselafvoeren relatief hoog, variërend tussen de 1100 m<sup>3</sup>/s en 2000 m<sup>3</sup>/s. In Figuur 2.7 wordt de “relatief” lage IJsselafvoer ruimschoots gecompenseerd door de afvoer van de regio en de Vecht, welke circa 800 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Geconcludeerd kan worden dat de hier gepresenteerde hoogwatererevents sterk vergelijkbaar zijn met historische hoogwaters, alleen dan net wat extremer. Het hoogst gemeten meerpeil komt uit op 0,52 m+NAP (1998).



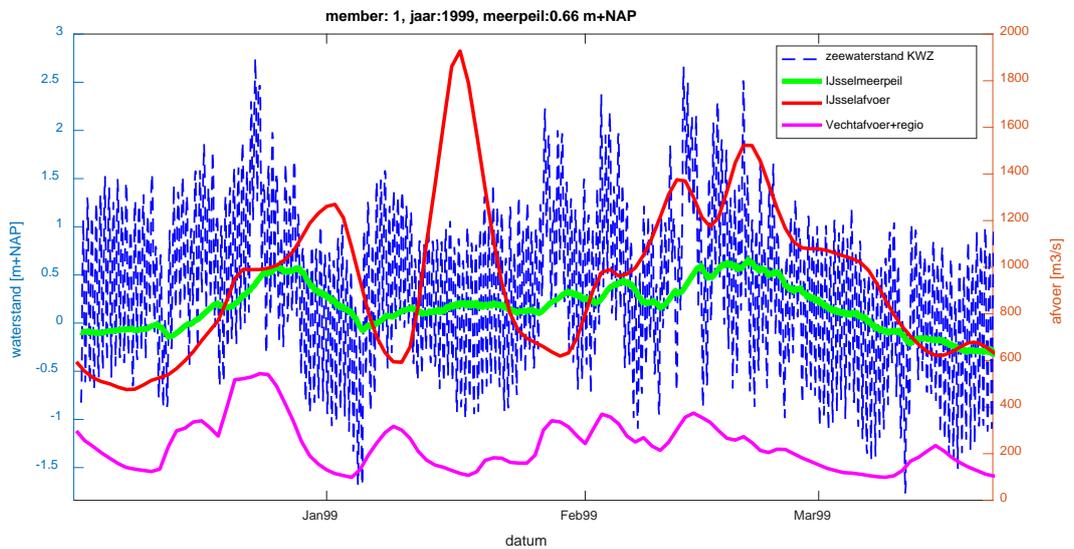
Figuur 2.3 Meerpeil-piek1: Verloop zeewaterstand, IJsselmeerpeil, IJsselafvoer en Vecht en regio-afvoer voor hoogwaterperiode resulterend tot een piekmeerpeil van 0,72 m+NAP.



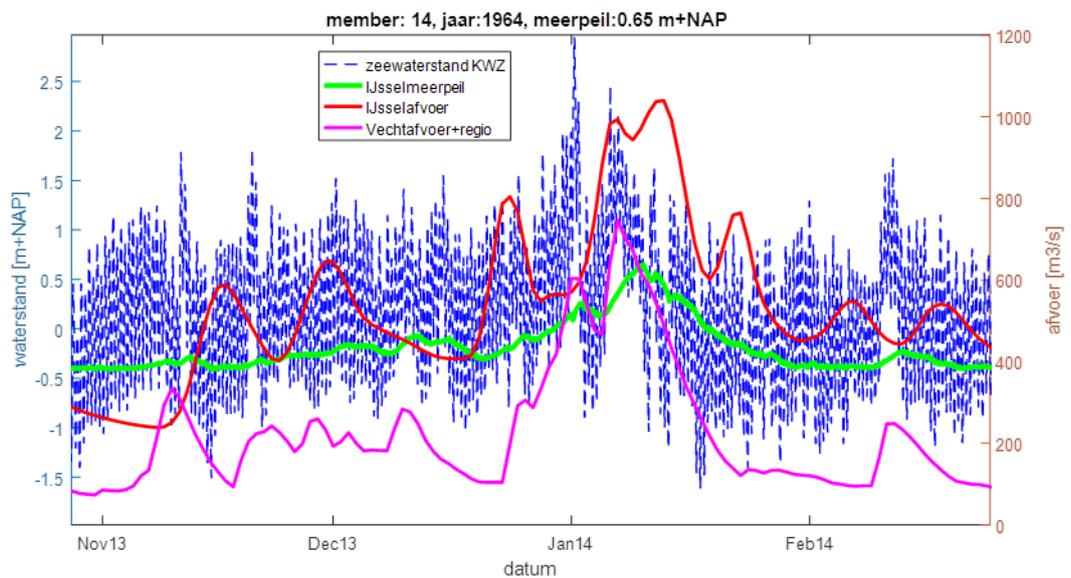
Figuur 2.4 Meerpeil-piek2: Verloop zeewaterstand, IJsselmeerpeil, IJsselafvoer en Vecht en regio-afvoer voor hoogwaterperiode resulterend tot een piekmeerpeil van 0,71 m+NAP.



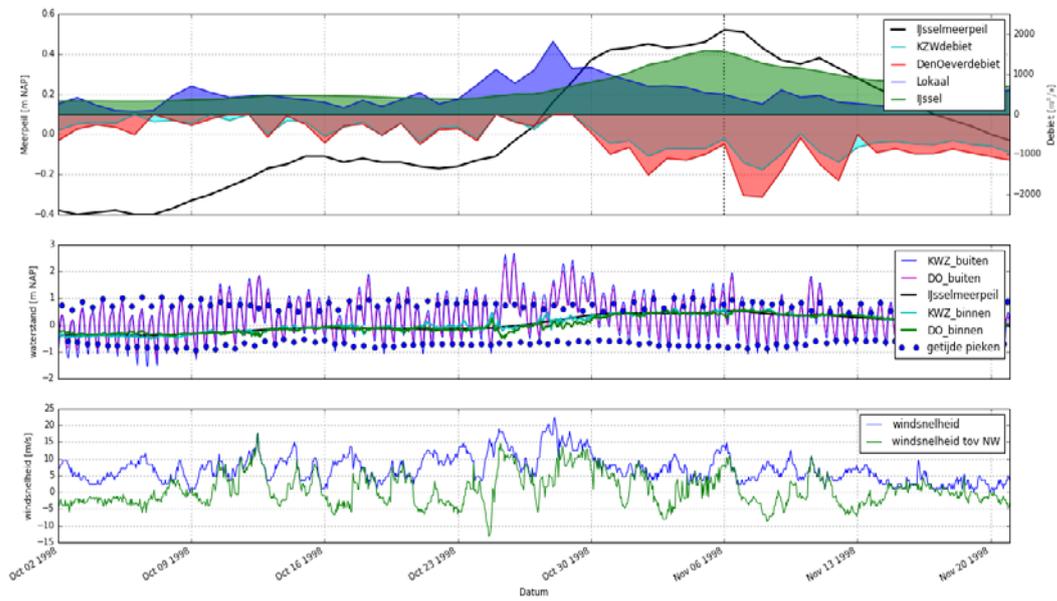
Figuur 2.5 Meerpeil-piek 3: Verloop zeewaterstand, IJsselmeerpeil, IJsselafvoer en Vecht en regio-afvoer voor hoogwaterperiode resulterend tot een piekmeerpeil van 0,7 m+NAP.



Figuur 2.6 Meerpeil-piek 4: Verloop zeewaterstand, IJsselmeerpeil, IJsselafvoer en Vecht en regio-afvoer voor hoogwaterperiode resulterend tot een piekmeerpeil van 0,66 m+NAP.



Figuur 2.7 Meerpeil-piek5: verloop zeewaterstand, IJsselmeerpeil, IJsselafvoer en Vecht en regio-afvoer voor hoogwaterperiode resulterend tot een piekmeerpeil van 0,65 m+NAP.



Figuur 2.8 Historisch hoogwater 1998 (bron: Deltares, 2016a)

### 3 Validatie modellentrein RAMCO-IJsselmeer

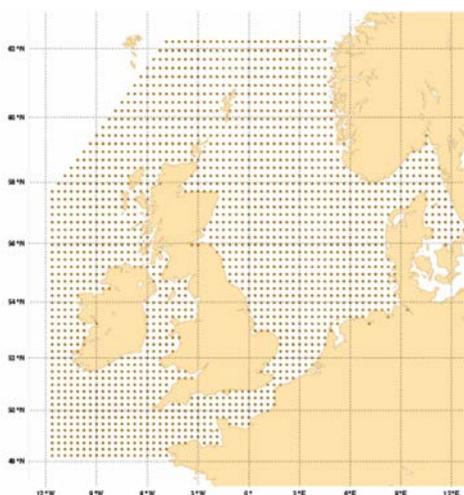
#### 3.1 Inleiding

Om de betrouwbaarheid van de resultaten van de modellentrein (Figuur 2.1) te toetsen wordt in dit hoofdstuk naar de volgende tussenresultaten gekeken:

- Hzee: Zeewaterstand te Den Oever en Kornwerderzand (paragraaf 3.1)
- QOlst: afvoer IJssel te Olst (paragraaf 3.3)
- QVecht: afvoer Vecht te Dalfsen (Paragraaf 3.4)
- Neerslag na bias-correctie obv HYRAS: (paragraaf 3.5)
- Wind: windsnelheid en richting (paragraaf 3.6).

#### 3.2 Zeewaterstand

Omdat het IJsselmeer alleen onder vrij verval water af kan voeren, is de zeewaterstand (opzet+getij) bepalend voor de grootte van de afvoercapaciteit. Om de meteorologische RACMO-tijdseries om te zetten naar tijdseries van getij, opzet en totale waterniveau langs de Nederlandse kust heeft het KNMI gebruik gemaakt van het numerieke hydrodynamische WAQUA-model. Dit model is gevoed met windsnelheid en luchtdruk uit het RACMO-EC-EARTH-ensemble voor de periode 1951-2000. Het totale grid van het WAQUA-model beslaat het zuidelijke deel van de Noordzee met een ruimtelijke resolutie van ~8x8km, zie Figuur 3.1. Uitvoer (WAQUA getij, opzet en totale waterniveau) is beschikbaar op 10-minuten tijdsresolutie en voor 41 stations langs de Nederlandse kust. Binnen deze studie worden de zeewaterstanden bij Den Oever, Kornwerderzand en IJmuiden gebruikt.

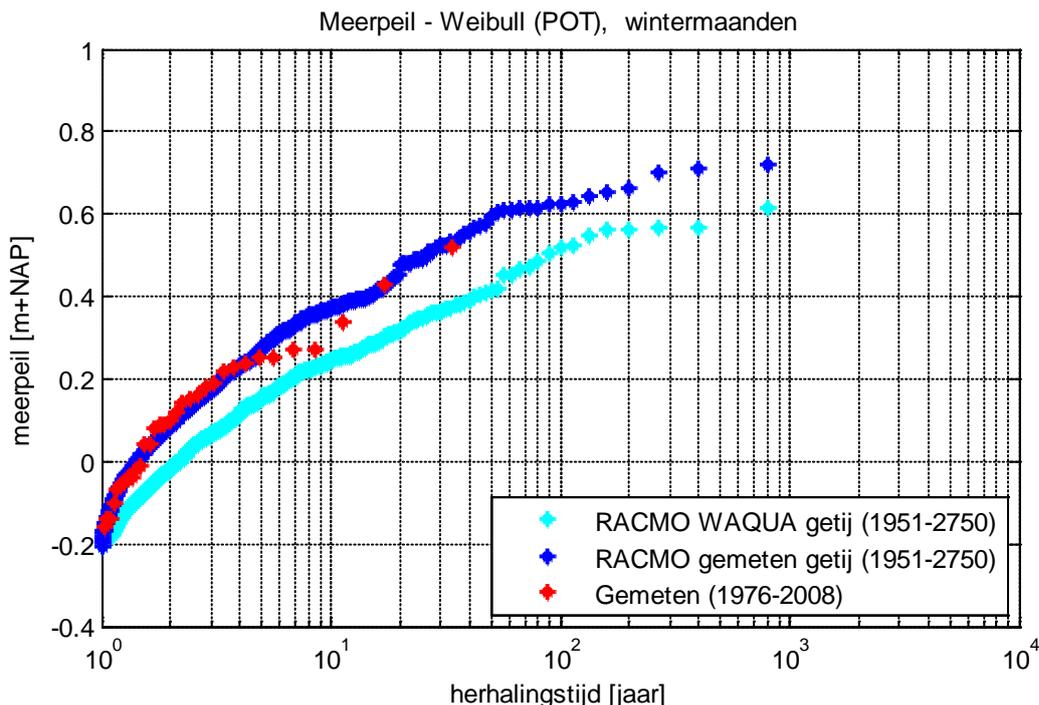


Figuur 3.1 Ruimtelijke domein van het WAQUA-model (Bron: KNMI).

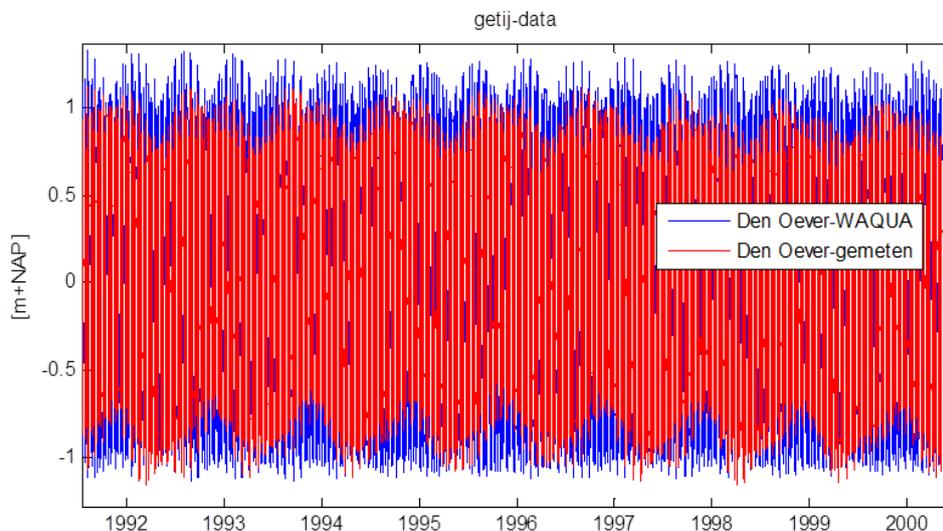
##### 3.2.1 Gevoeligheid voor getij

Dat het getij een grote invloed heeft op het meerpeilniveau is te zien door de donkerblauwe en cyaan-kleurige lijn in Figuur 3.3 met elkaar te vergelijken. Bij beide reeksen is gebruik gemaakt van de RACMO-WAQUA stormopzet, alleen is het getij verschillend. Voor het genereren van de cyaan-kleurige punten is het RACMO-WAQUA getij gebruikt en voor de donkerblauwe punten het gemeten getij.

Figuur 3.3 laat zien dat het RACMO-WAQUA getij niet goed bruikbaar is voor de beschouwde locaties. In het figuur is te zien dat de amplitude van het RACMO-WAQUA getij veel groter is dan het gemeten getij. Bij een grotere amplitude komen de laagwaters lager uit en kan er makkelijker gespuid worden. Dit werkt zowel door op de gemiddelde- als op de piekafvoeren. In het vervolg van het rapport wordt verder gegaan met de tijdreeks van het gemeten getij aangezien de meerpeil resultaten hiervan beter op de metingen liggen.



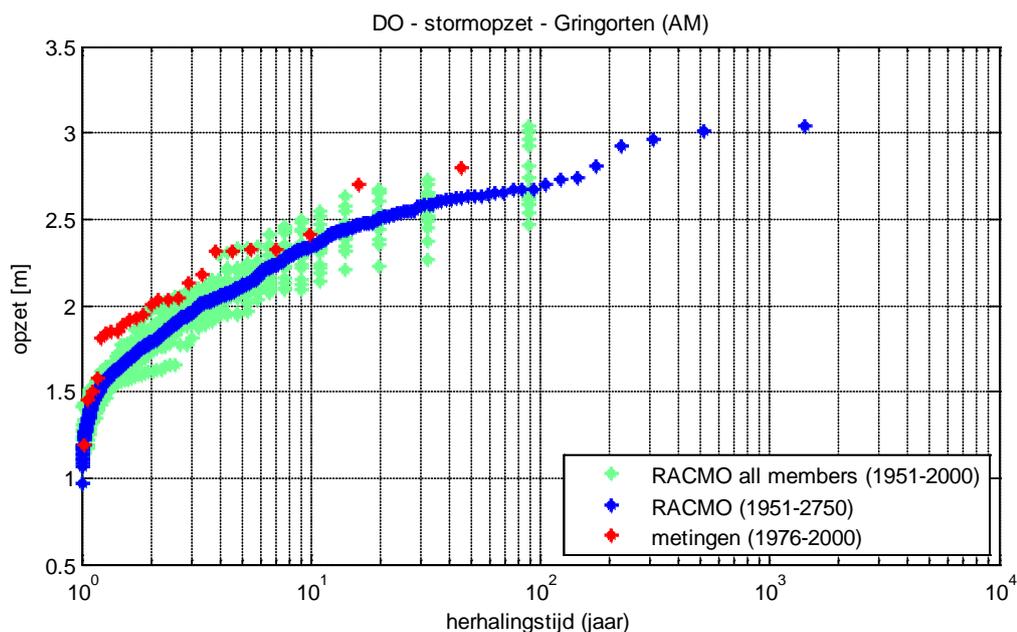
Figuur 3.2 Overschrijdingsfrequentielijn IJsselmeerpeil. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: -0,20 m+NAP, plotpositie: Weibull, Minimale tussenperiode 2 events = 15 dagen, periode: wintermaanden.



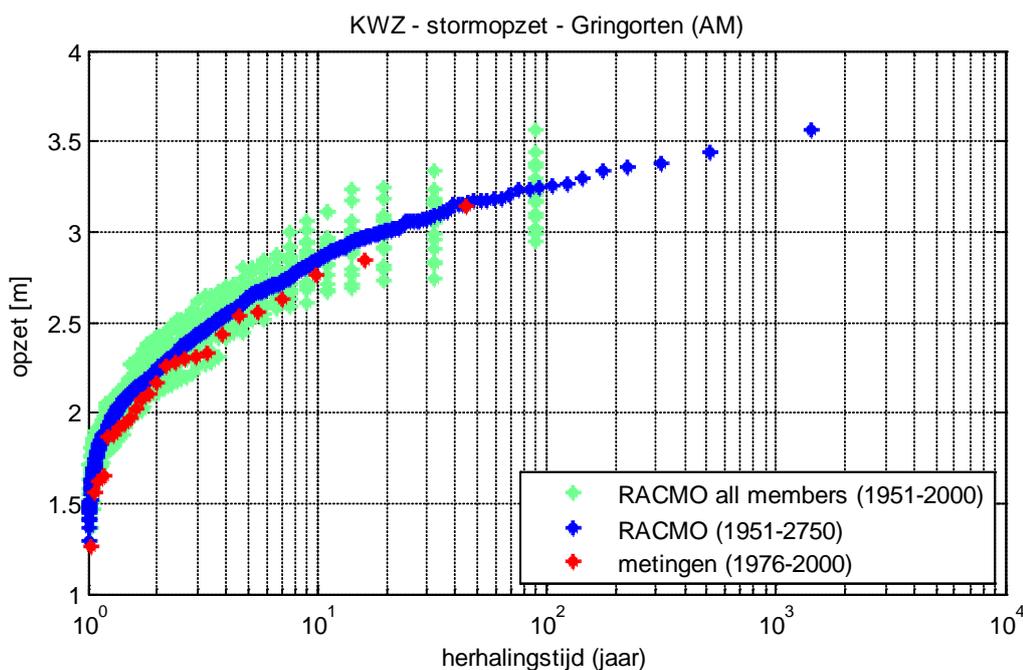
Figuur 3.3 Getijreeksen Den Oever voor de periode 1991 – 2000..

### 3.2.2 Validatie stormopzet

In deze paragraaf wordt gekeken of ook de stormopzet (WAQUA) bij Den Oever en Kornwerderzand (KWZ) overeenkomt met de metingen door te kijken naar de frequentielijnen van de jaarmaxima (Figuur 3.4 en Figuur 3.5). De stormopzet in Den Oever lijkt net te worden overschat, terwijl die van Kornwerderzand juist iets lager ligt.



Figuur 3.4 Frequentielijn stormopzet **Den Oever**. Selectiemethode events: jaarmaxima (AM), plotpositie: Gringorten, periode: wintermaanden.



Figuur 3.5 Frequentielijn stormopzet **KWZ**. Selectiemethode events: jaarmaxima (AM), plotpositie: Gringorten, periode: wintermaanden.

### 3.2.3 Validatie zeewaterstand

In deze paragraaf wordt gekeken of de zeewaterstanden (opzet+getij) bij Den Oever en Kornwerderzand overeenkomen met de metingen door te kijken naar de gemiddelde waarden.

In Tabel 3.1 is te zien de gemiddelde RACMO zeewaterstanden 9 en 7 cm afwijken van de metingen. Oorzaken zouden kunnen zijn 1) de gemeten reeks is gecorrigeerd voor zeespiegelstijging met als referentiejaar 1990, terwijl bij RACMO dit niet het geval is. 2) de gemeten tijdreeks van Den Oever begint pas bij 1971, voor het generen van de RACMO invoer is voor de periode 1951-1970 het getij van Kornwerderzand gebruikt.

De onderschatting van de gemiddelde zeewaterstand uit zich weer in een onderschatting van de gemiddelde RACMO-meerpeil (9 mm).

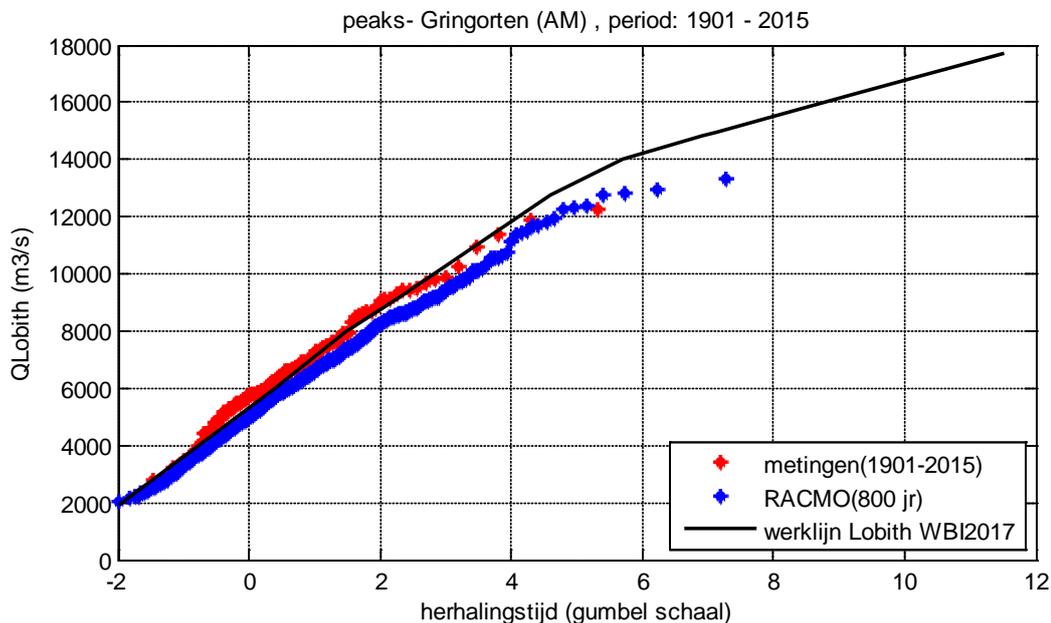
Tabel 3.1 Kentallen Den Oever (DO) en Kornwerderzand (KWZ).

locatie	parameter	Metingen (1951-2000)	RACMO	Verschil
		[m+NAP]	[m+NAP]	[m]
DO	Gemiddelde waterstand	0.070	-0.023	0.093
	Standaard deviatie waterstand	0.602	0.630	-0.028
	Percentage van de tijd in de winter zeewaterstand > 0 m+NAP	57,6%	52.7%	4,8%
	Percentage van de tijd in de winter zeewaterstand < -0.25 m+NAP	31.4%	35.6%	-4,2%
KWZ	Gemiddelde waterstand	0.040	-0.029	0.069
	Standaard deviatie waterstand	0.686	0.680	-0.006
	Percentage van de tijd in de winter zeewaterstand > 0 m+NAP [-]	54,1%	52.0%	2,1%
	Percentage van de tijd in de winter zeewaterstand < -0.25 m+NAP	35.3%	36.8%	-1,6%

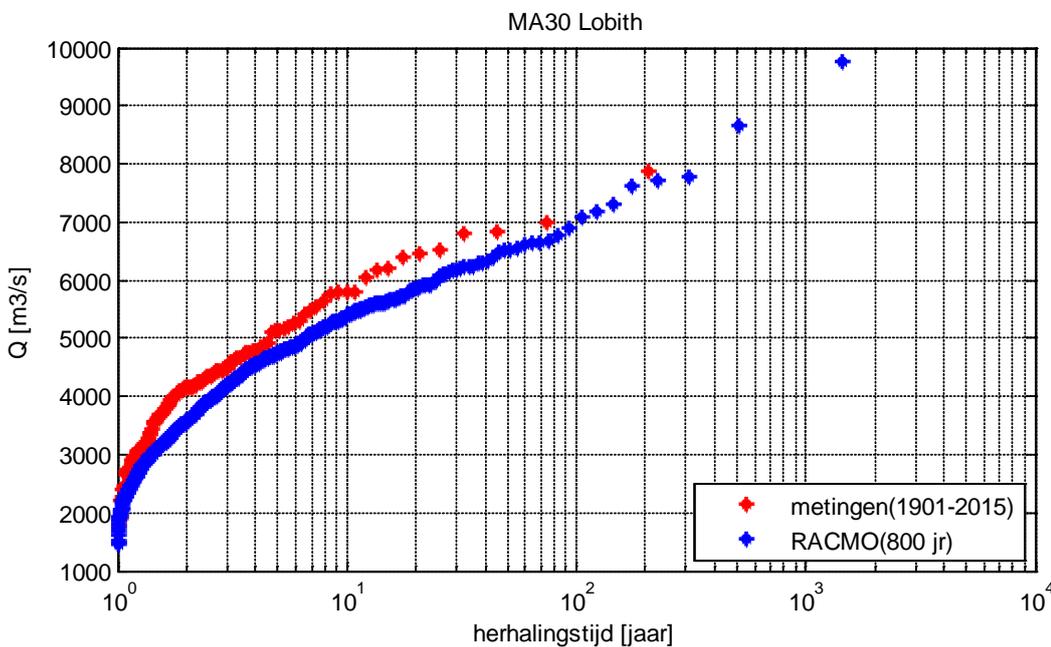
### 3.3 IJsselafvoer Olst

De belangrijkste aanvoerpost van het IJsselmeer is de IJsselafvoer. Om de IJsselafvoer te bepalen wordt in de RACMO-modellentrein eerst de Rijnafvoeren bij Lobith berekend met behulp van het hydrologisch HBV-model en hydraulische SOBEK-model. Vervolgens wordt de afvoer met een vaste relatie vertaald naar de IJssel afvoer te Olst.

De tussenresultaten, de Rijnafvoer, zijn in Figuur 3.6 en Figuur 3.7 weergegeven. In het eerste figuur zijn de overschrijdingsfrequentielijnen voor de metingen en de RACMO-resultaten weergegeven. Over het gehele bereik wijken de RACMO-resultaten circa 10 procent af van de metingen. Omdat voor het IJsselmeerpeil de afvoer over een lagere periode van belang is, is in het tweede figuur de frequentielijn van de 30-daagse afvoeren geven, ook hier is een afwijking waar te nemen. De oorzaak van de verschillen moet vooral gezocht worden in het gebruik van de bias-aanpassing-methode op basis van E-OBS en de circulatiestatistiek in het globale EC-Earth-model. De bias-methode op de neerslag is nodig omdat het in RACMO altijd een klein beetje miezert. In Deltares (2017) wordt dit nader toegelicht.

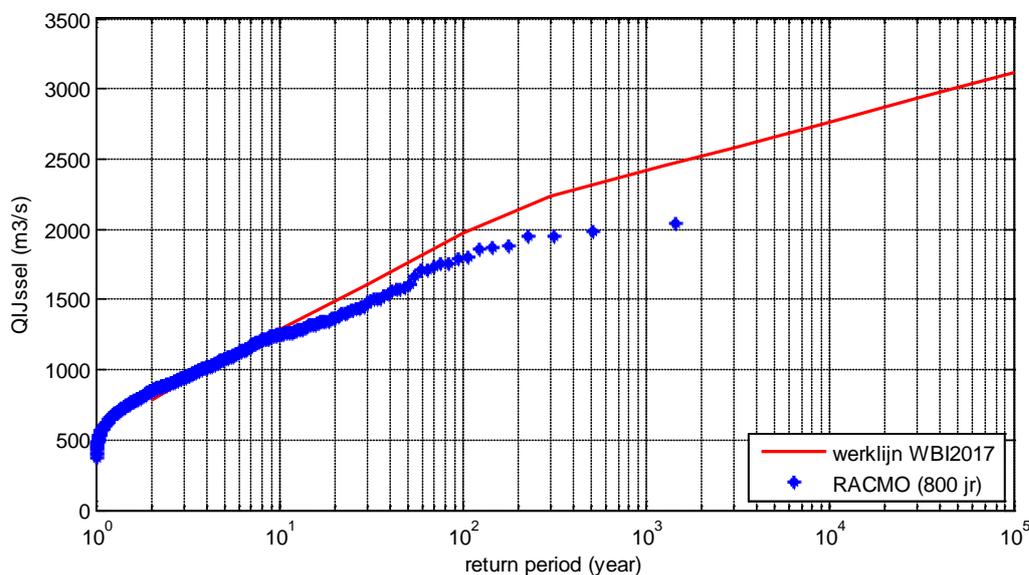


Figuur 3.6 Overschrijdingsfrequentielijn afvoer Lobith op basis van jaarmaxima. Plotpositie: Gumbel.



Figuur 3.7 Overschrijdingsfrequentielijn afvoer Lobith op basis van jaamaxima over 30-daags gemiddelde afvoeren. Plotpositie: Gumbel.

De onderschatting van de RACMO-Rijnafvoeren werkt door in de afvoeren van de IJssel (zie Figuur 3.8). De resultaten worden hier vergeleken met de WBI-werklijn aangezien binnen dit project geen goede meetreeks van Olst beschikbaar is. De RACMO resultaten liggen vanaf herhalingstijd van 10 jaar onder de werklijn. Dat kan de afbuiging van de meerpeillijn in figuur 2.2 verklaren.



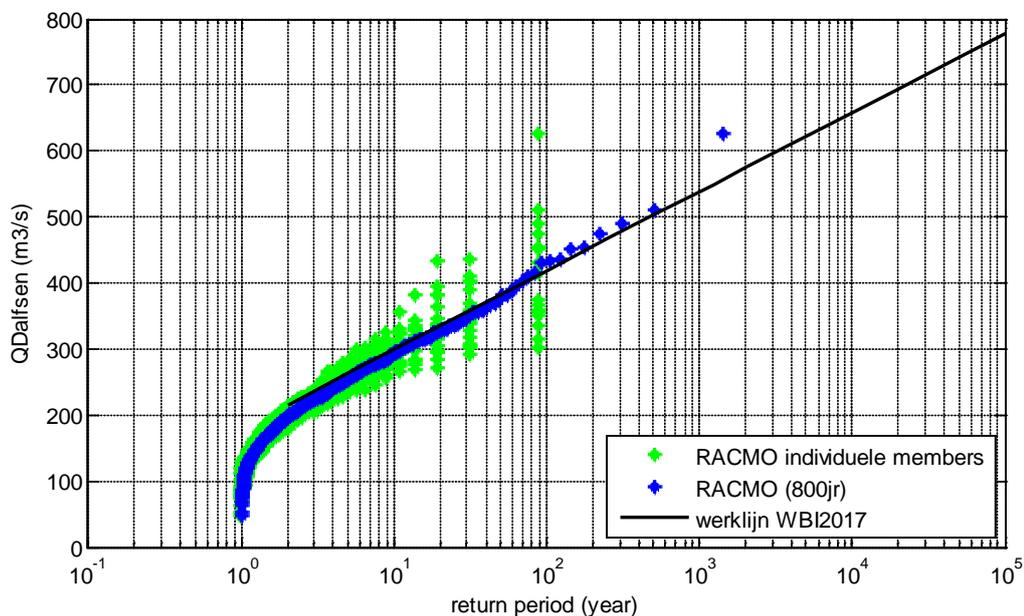
Figuur 3.8 Overschrijdingsfrequentielijn IJsselafvoer bij Olst op basis van jaarmaxima. Plotpositie: Gumbel.

### 3.4 Afvoer Overijsselse Vecht

Een tweede belangrijke aanvoerpost is de afvoer van de Overijsselse Vecht. Voor het genereren van de synthetische tijdreeks met Vechtafvoeren is de RACMO- meteorologische reeks met HBV/SOBEK vertaald naar Vechtafvoeren. De jaarmaxima van de RACMO-Vecht reeks zijn samen met de WBI-2017 werklijn van de Vecht geploteerd in Figuur 3.9. De resultaten komen goed overeen wanneer de statistiek van alle members gezamenlijk wordt bekeken.

Dat de resultaten hier beter zijn dan de resultaten van de IJssel heeft onder andere te maken met de bron-data. Hier is gebruik gemaakt van de verbeterde RACMO neerslag reeksen op basis van HYRAS, terwijl bij de IJssel nog de oude neerslagreeksen op basis van E-OBS zijn gebruikt. De IJssel afvoeren zijn eerder gemodelleerd, toen de verbeterde dataset nog niet voorhanden was.

Opgemerkt dient te worden dat zowel bij de werklijn als de SOBEK modelering geen rekening is gehouden met afvlakking door bovenstroomse overstromingen. Volgens (Deltares, 2017b) ligt het fysisch maximum van de Vecht bij Dalfsen rond de 800 m³/s.

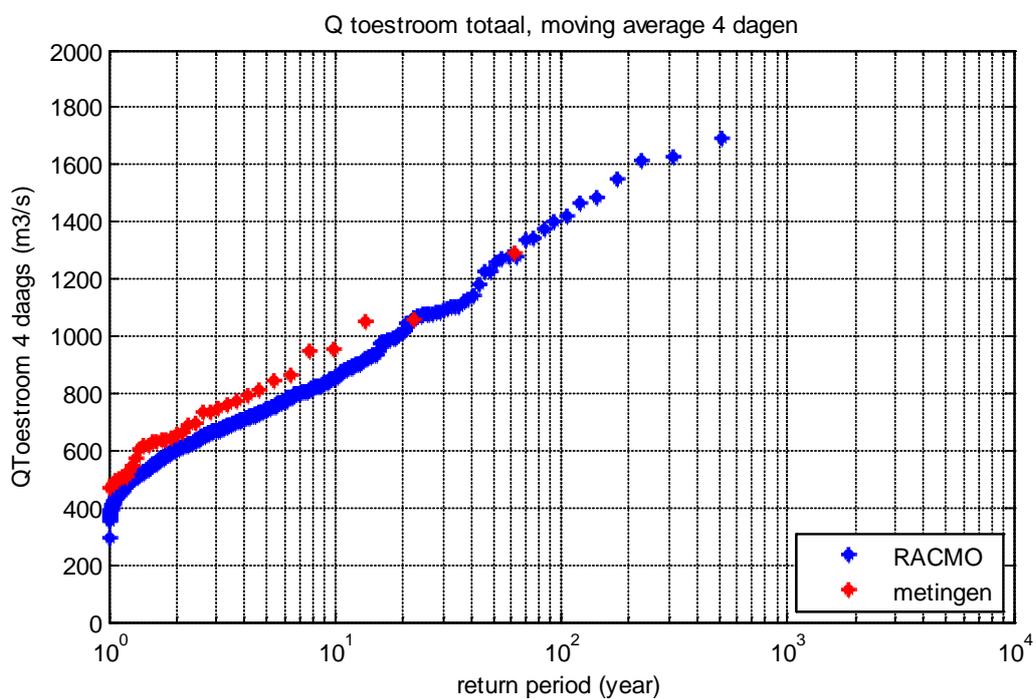


Figuur 3.9 Overschrijdingsfrequentielijn afvoeren Vecht bij Dalfsen op basis van jaarmaxima. Plotpositie: Gumbel.

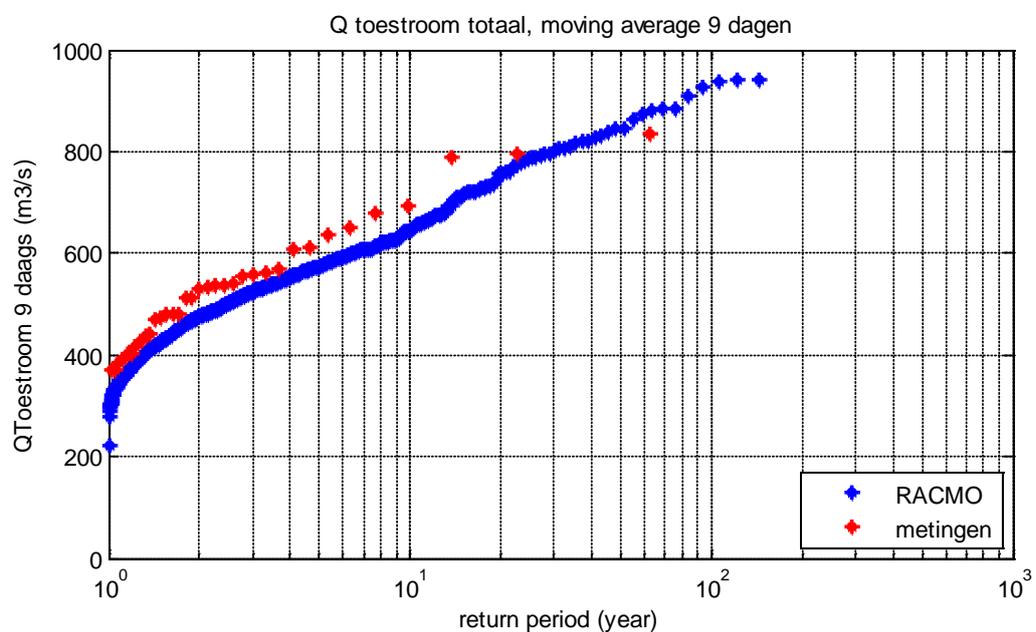
### 3.5 Regionale aanvoer

Een derde belangrijke aanvoerpost van het IJsselmeer is de neerslag die via de omliggende regio's naar binnen stroomt. Het gebied omvat de meren zelf, Friesland, Noord-Holland, Flevoland, de hoge gronden, Reest en wieden en stroomgebied Vecht. Voor het omzetten van de neerslag naar de regionale afvoer is gebruik gemaakt van het statistische model zoals beschreven in Deltares (2017).

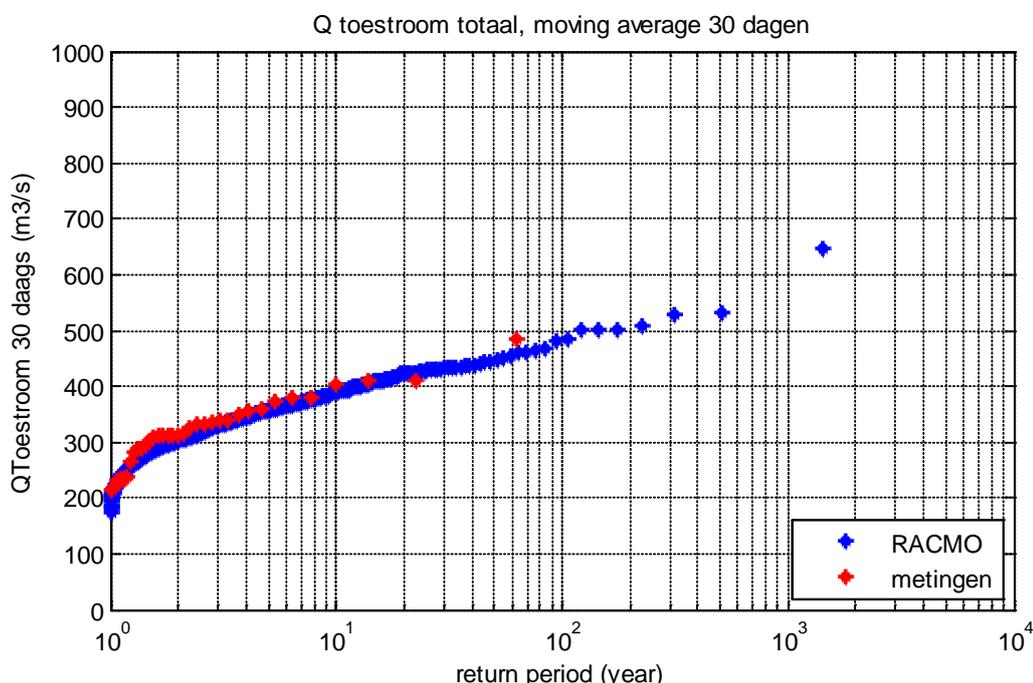
In onderstaande figuren zijn de jaarmaxima van de 4-, 9- en 30-daagse afvoer van de omliggende regio's uitgezet tegen de bijbehorende herhalingstijd. De figuren laten zien dat de voornamelijk voor de 4- en 9-daagse neerslag de RACMO-data iets onder de metingen zit. De 30-daagse afvoer ligt goed op de metingen. Dit laatste is geruststellend omdat voor het tot stand komen van een verhoogd IJsselmeerpeil de aanvoer gedurende een lange periode van belang is.



Figuur 3.10 Jaarmaxima van de gemiddelde 4-daagse afvoer alle regio's samen uitgezet tegen de bijbehorende herhalingsijd.



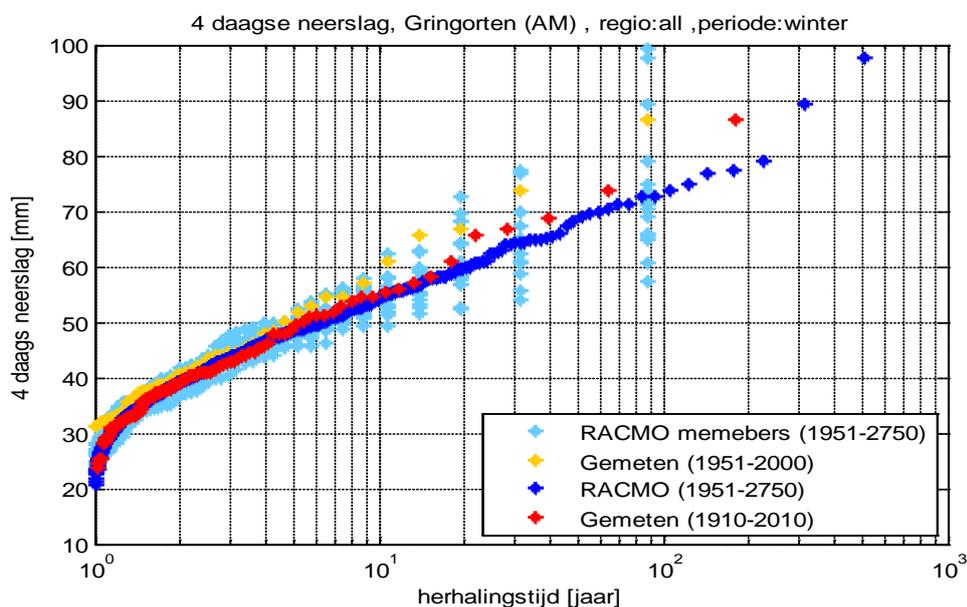
Figuur 3.11 Jaarmaxima van de gemiddelde 9-daagse afvoer van alle regio's samen uitgezet tegen de bijbehorende herhalingsijd.



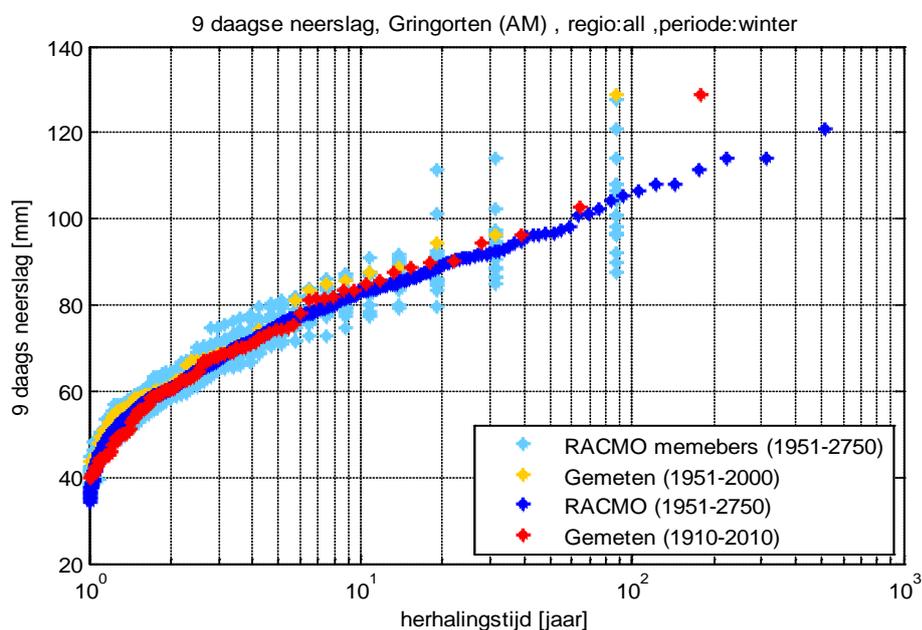
Figuur 3.12 Jaarmaxima van de gemiddelde 30-daagse afvoer van alle regio's samen uitgezet tegen de bijbehorende herhalingstijd.

In Figuur 3.13 t/m Figuur 3.15 zijn tevens de frequentielijnen van de 4-, 9- en 30-daagse gemiddelde neerslag in het IJsselmeergebied geplot. De onderschatting van de regionale 4- en 9-daagse aanvoer is maar deels terug te vinden in de neerslag. Dit betekent dat het gebruikte statistische neerslag-afvoermodel nog verder verbeterd moet worden.

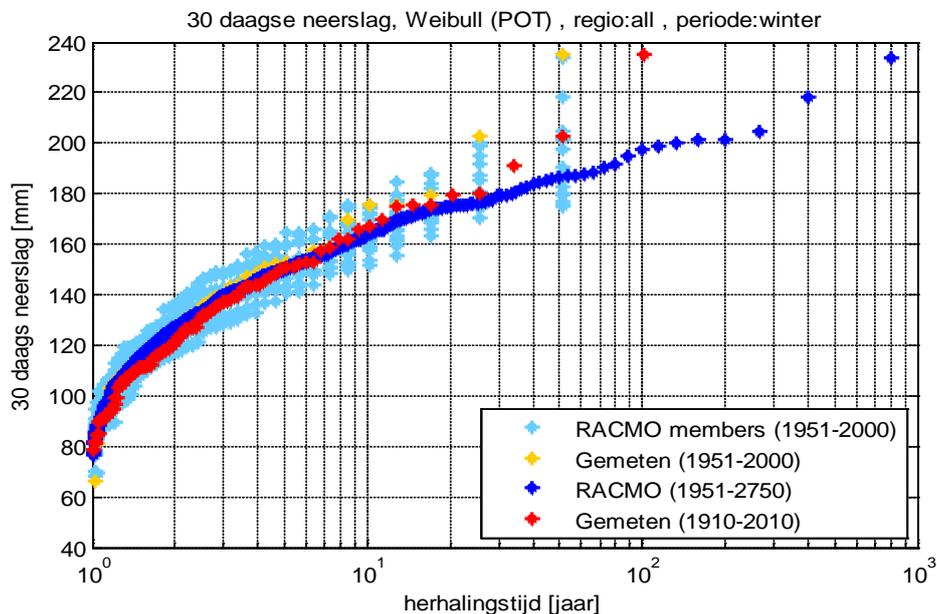
Met name in de 4-daagse neerslag-plot liggen de extremen van RACMO (blauwe punten) lager dan de metingen (rode punten). De reden dat de gemeten tijdserie relatief hoog ligt, kan toeval zijn (het historisch weer was relatief nat voor het type weer wat we kunnen krijgen) of RACMO geeft een onderschatting van de neerslag. De eerste reden is mogelijk aangezien de metingen nog steeds binnen het RACMO-ensemble liggen (lichtblauwe punten). Echter, de tweede reden, de onderschatting van RACMO, is het meest voor de hand liggend aangezien ook de IJsselaanvoer onderschat wordt en omdat de neerslag uit klimaatmodellen een bias vertoont die met een statistische bias-correctie nooit volledig gecorrigeerd kan worden. Opgemerkt moet worden dat ook rekening gehouden moet worden met een trend in de winterneerslag, de laatste helft van de 20<sup>ste</sup> eeuw was veel natter dan de eerste 50 jaar. Om het effect hiervan weer te geven zijn in de Figuur 3.13 t/m Figuur 3.15 ook gele punten geplot, welke de jaarmaxima van de jaren 1951-2000 weergeven. Opvallend hierin is dat de rode punten een stuk lager liggen dan de gele punten en hiermee wordt aangetoond dat de trend in de neerslag een groot effect heeft op de loop van de frequentielijn.



Figuur 3.13 Frequentielijn 4-daagse neerslag. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: 15mm, plotpositie: Weibull, Minimale periode opvolgende events = 4 dagen, periode: wintermaanden.

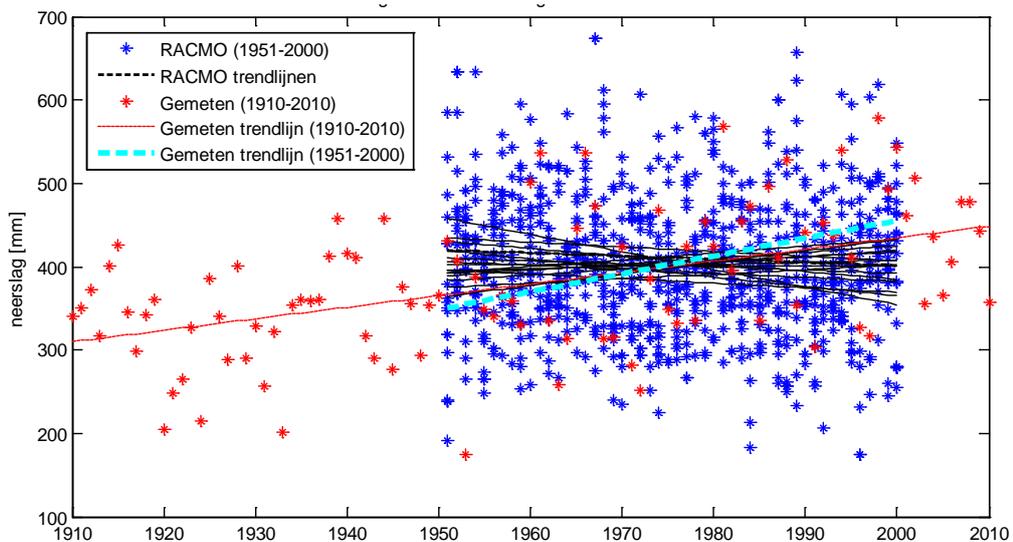


Figuur 3.14 Frequentielijn 9-daagse neerslag. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: 15mm, plotpositie: Weibull, Minimale periode opvolgende events = 9 dagen, periode: wintermaanden.



Figuur 3.15 Frequentielijn 30-daagse neerslag. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: 15mm, plotpositie: Weibull, Minimale periode opvolgende events = 30 dagen, periode: wintermaanden.

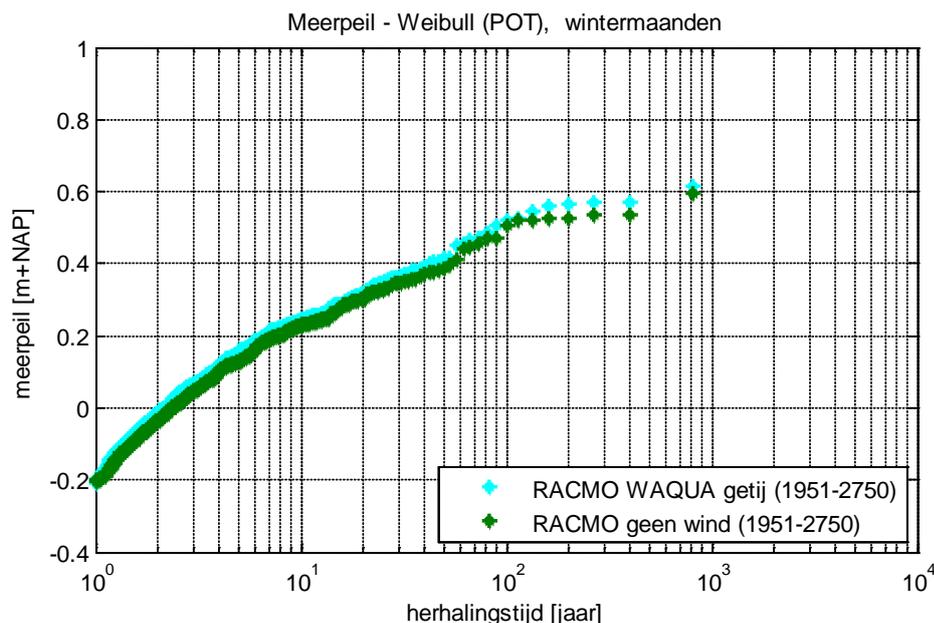
De trend in gemeten neerslagdata is nog beter te zien in Figuur 3.16, waar de totale winterneerslag per jaar is geplott. Er is een lineaire trendlijn door de data-punten getrokken (rood gestippelde lijn). Aangezien de lineaire trendlijn geen lokale variatie laat zien, is apart een trendlijn voor de periode 1951-2000 weergegeven (cyaan gestippelde lijn). De zwart gestippelde lijnen geven per RACMO-member de lineaire trendlijn. In de RACMO data lijkt eerder sprake van een dalende dan een stijgende trend. Dit is merkwaardig aangezien RACMO de trend van klimaatverandering meeneemt, ook bij RACMO zou je dus een stijgende trend verwachten. Het KNMI heeft aangegeven dit nader te bekijken.



Figuur 3.16 Winterneerslag per jaar voor het IJsselmeergebied. De gestippelde lijnen geven de lineaire trendlijnen weer.

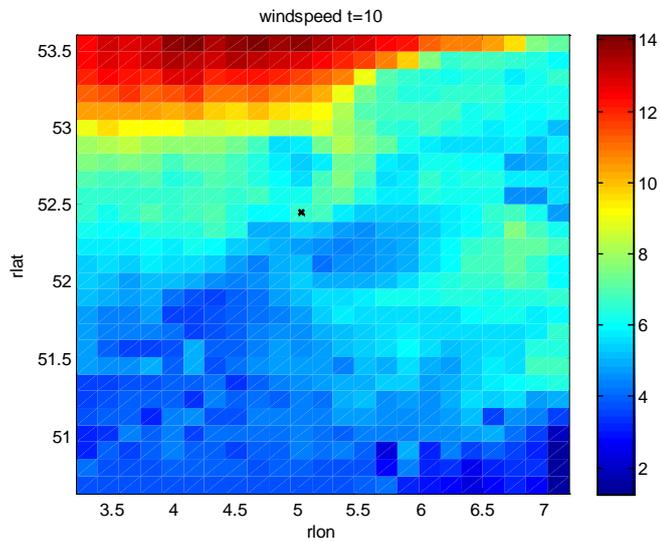
### 3.6 Wind

In de RACMO-modellentrein is tevens de wind op het IJsselmeer meegenomen. Deze wind is bepalend voor de scheefstand op het IJsselmeer. Zoals in Figuur 3.17 te zien is, heeft de wind/scheefstand IJsselmeer een beperkte invloed op de IJsselmeerpeilen. De groene punten geven de resultaten van de run zonder wind en de cyaan-kleurige met wind. Ondanks dat de wind weinig effect heeft, wordt in deze paragraaf toch kort ingegaan op de betrouwbaarheid van de wind in RACMO.

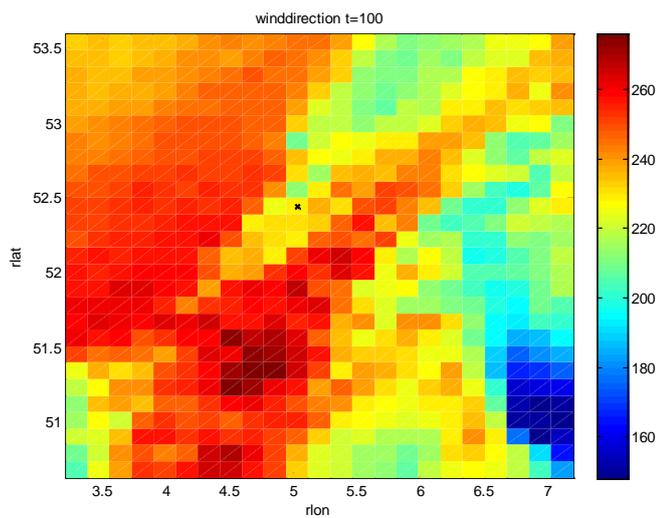


Figuur 3.17 Overschrijdingsfrequentielijn IJsselmeerpeil. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: -0,20 m+NAP, plotpositie: Weibull, Minimale tussenperiode 2 events = 15 dagen, periode: wintermaanden.

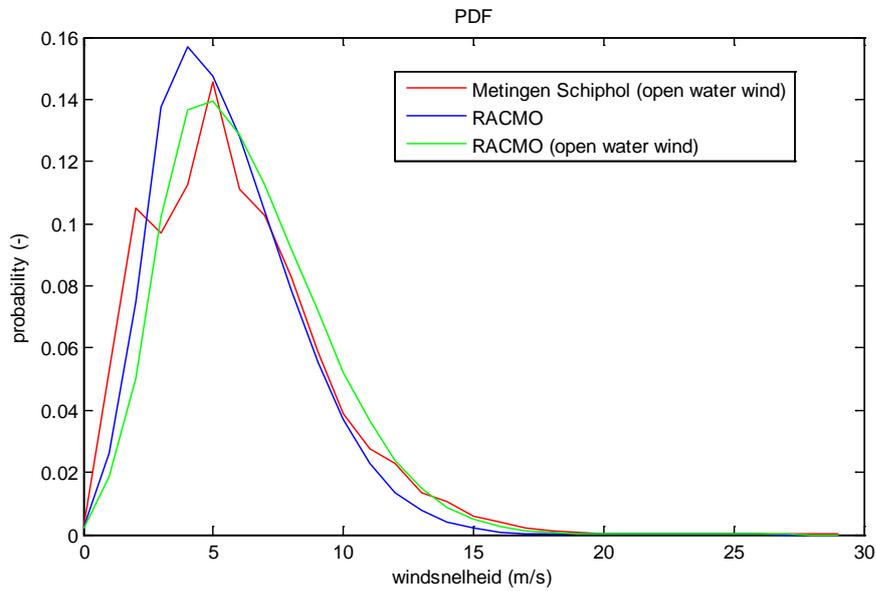
De RACMO-EC-Earth-windbestanden bevatten 3-uurlijkse windsnelheid en windrichting op 10 meter hoogte (zie Figuur 3.18 en Figuur 3.19). De data van de gridcel in de buurt van Schiphol (zie zwart kruisje) is vervolgens omgezet naar open water wind. In onderstaande figuren Figuur 3.20 en Figuur 3.21 is te zien dat de open water wind verder van de metingen af ligt dan de windbestanden die direct uit RACMO komen, om deze reden wordt in de vervolgberekeningen toch de ruwe RACMO data gebruikt.



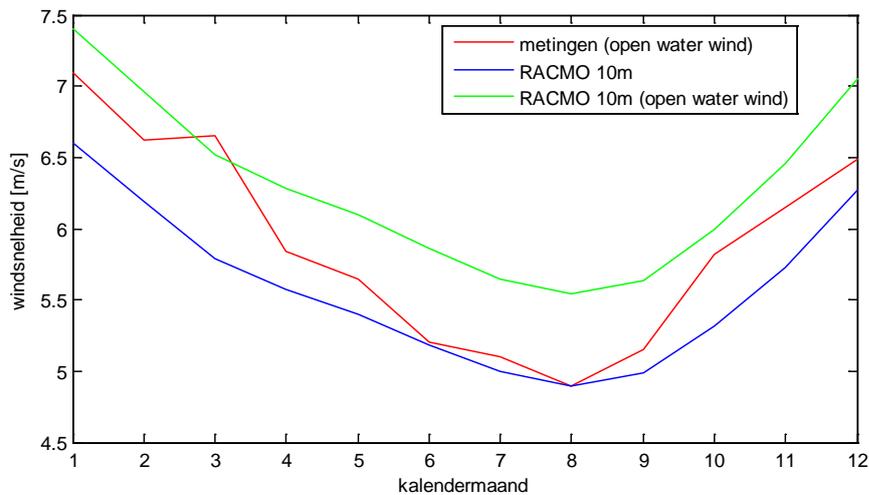
Figuur 3.18 RACMO-windsnelheid in m/s op 10 meter hoogte voor een willekeurige tijdstap. Het zwarte kruisje geeft de gebruikte gridcel weer.



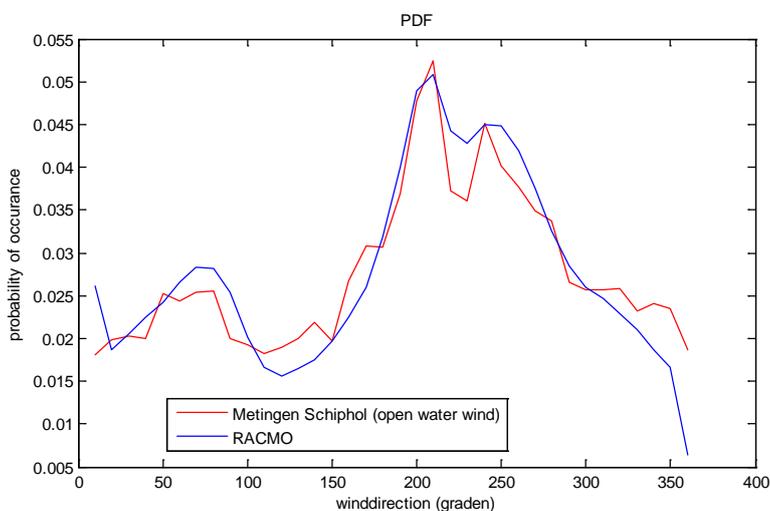
Figuur 3.19 RACMO-windrichting in graden t.o.v. noordrichting voor een willekeurige tijdstap. Het zwarte kruisje geeft de gebruikte gridcel weer.



Figuur 3.20 Kans van voorkomen per windsnelheid.

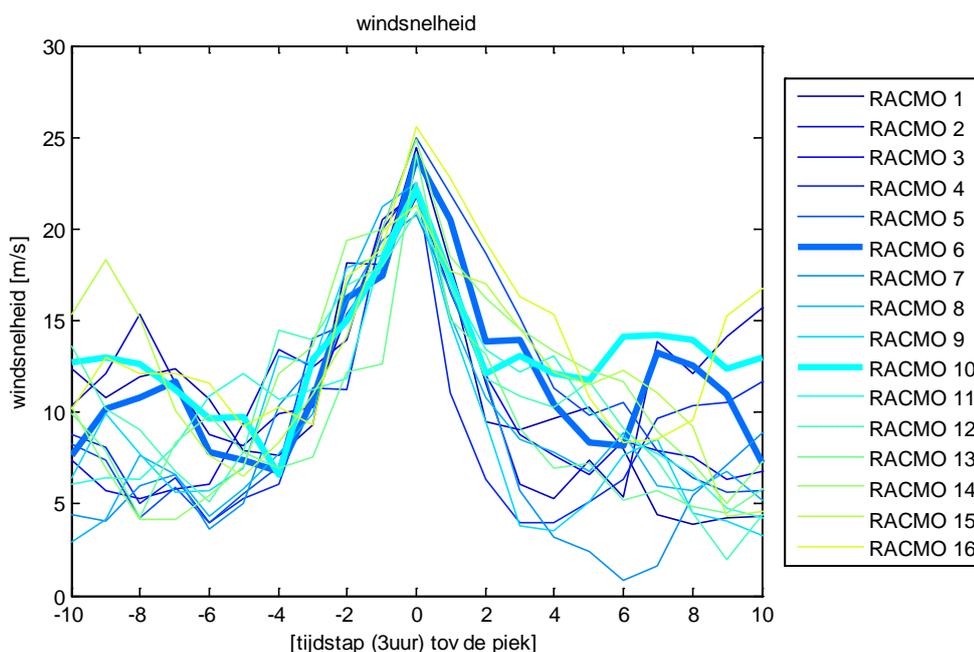


Figuur 3.21 Gemiddelde windsnelheid per kalendermaand.

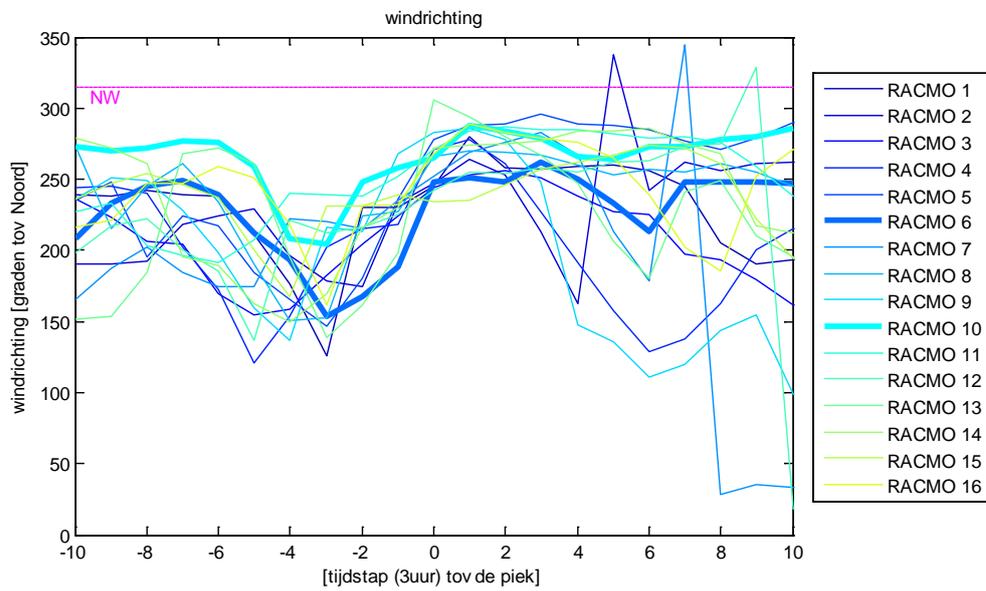


Figuur 3.22 Kans van voorkomen per windrichting.

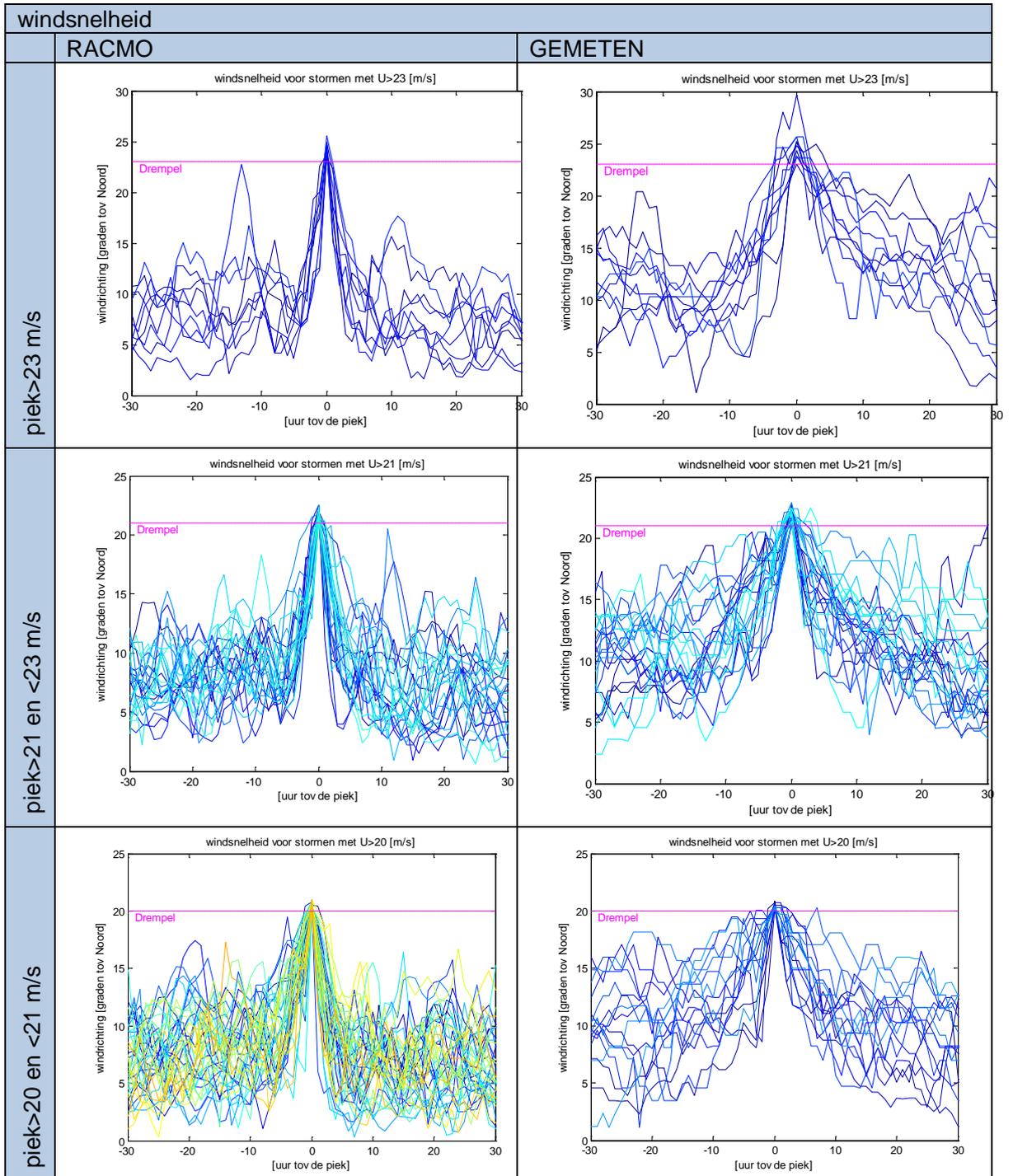
In Figuur 3.23 en Figuur 3.24 is per RACMO-member de storm met de hoogste piekwind snelheid geplot. Opvallend is dat de wind net voor de piek naar het zuidoosten draait (circa 150 graden t.o.v. Noord) en daarna doordraait naar het Westen (270 graden). Er zijn maar weinig stormen die NoordWest (315 graden) aantikken, terwijl de Noordwesten stormen in Nederland berucht zijn. Dit kan komen doordat de tijdstap in RACMO te grof is (3 uur) en een storm vaak maar kort in de NoordWest hoek zit. Om dit verder te onderzoeken zijn in Figuur 3.25 en Figuur 3.26 de winsnelheid en de -richting van een heel scala aan stormen geplot. De gemeten stormen hebben een tijdsinterval van 1 uur. Ook bij de gemeten stormen draait de wind eerst naar het zuidoosten en daarna door naar het Westen. De dip (zuidoosten) is bij de metingen wel iets geleidelijke. Op basis van deze vergelijking is dus geen afwijking gevonden in RACMO.



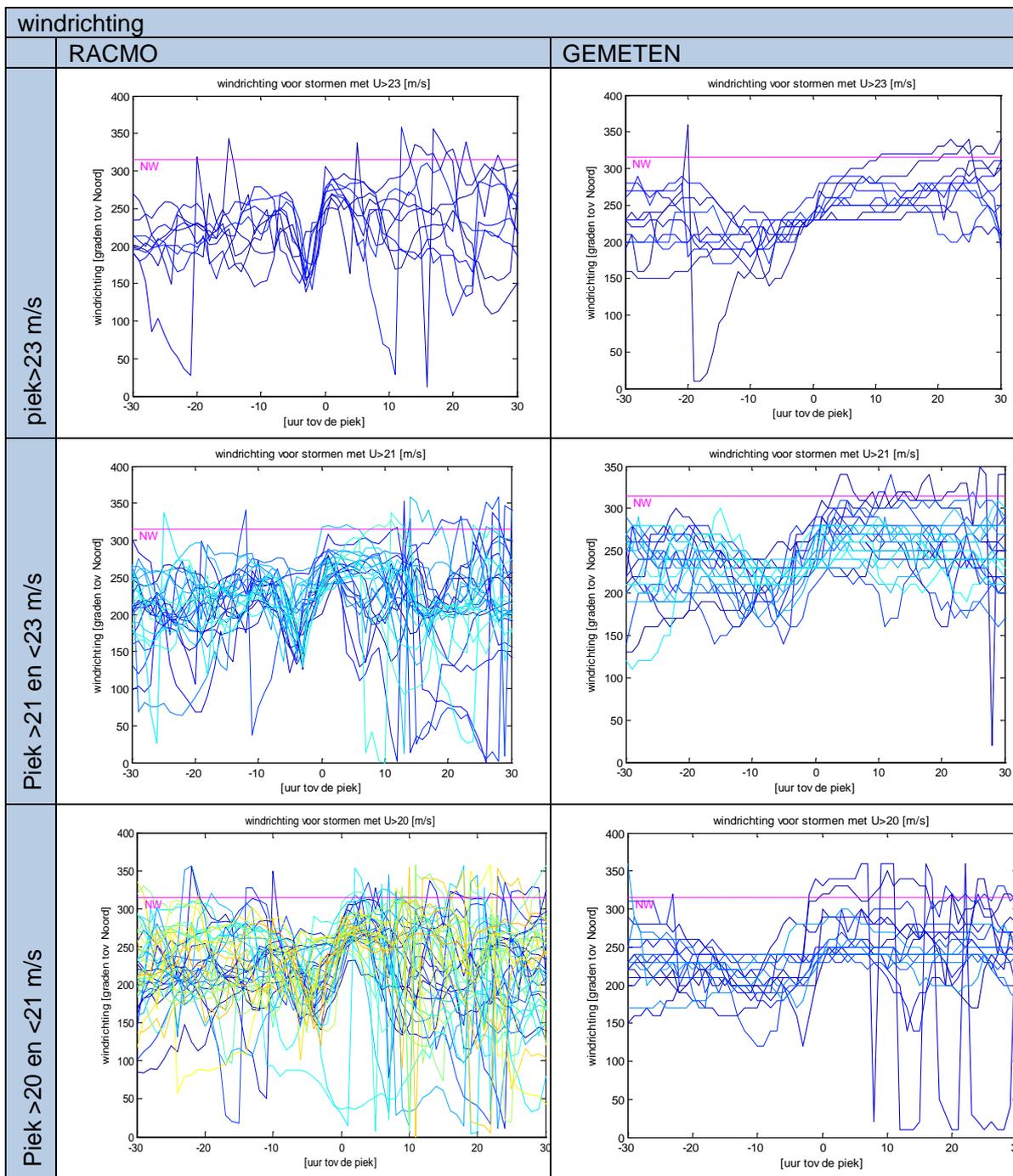
Figuur 3.23 Tijdsverloop windsnelheid per RACMO-member voor de storm met de hoogste piekwind snelheid.



Figuur 3.24 Tijdsverloop windrichting per RACMO-member voor de storm met de hoogste piekwindsnelheid.



Figuur 3.25 Tijdsverloop windsnelheid RACMO- en gemeten stormen gerangschikt volgen piekwindsnelheid.



Figuur 3.26 Tijdsverloop windrichting RACMO- en gemeten stormen gerangschikt volgen piekwindsnelheid van de storm. De uitschieters worden veroorzaakt doordat de windrichting van 360 graden doordraait naar 0 graden.

### 3.7 Conclusie

De betrouwbaarheid van de RACMO-IJsselmeerpeilen ten opzichte van de metingen is in dit hoofdstuk onderzocht door te kijken naar de verschillende tussenresultaten van de modellentrein; de zeewaterstand, IJsselafvoer, regionale aanvoer en wind. Uit deze analyse kan geconcludeerd worden dat de Vechtafvoer en wind de metingen goed benaderen. Waar wel verschillen te vinden zijn is het tussenresultaat van de neerslag en opzet. Bij het gebruik van de resultaten dient rekening gehouden te worden met de volgende tekortkomingen:

- De extremere neerslagbuien wordt in RACMO onderschat, dit werkt door in de regionale- en IJsselafvoer. Bij de IJsselafvoer is de onderschatting voornamelijk terug te zien bij afvoeren met een herhalingsstijd groter dan 10 jaar. Verwacht wordt dat hiermee ook de extreme RACMO-meerpeilen, die buiten het meetbereik vallen, onderschat worden.
- De opzet (zeewaterstand-getij), welke gegenereerd zijn door WAQUA, geeft een afwijkingen ten opzichte van de metingen. Omdat de opzet bij Den Oever wordt overschat en bij Kornwerderzand onderschat, lijkt het effect op het meerpeil beperkt.



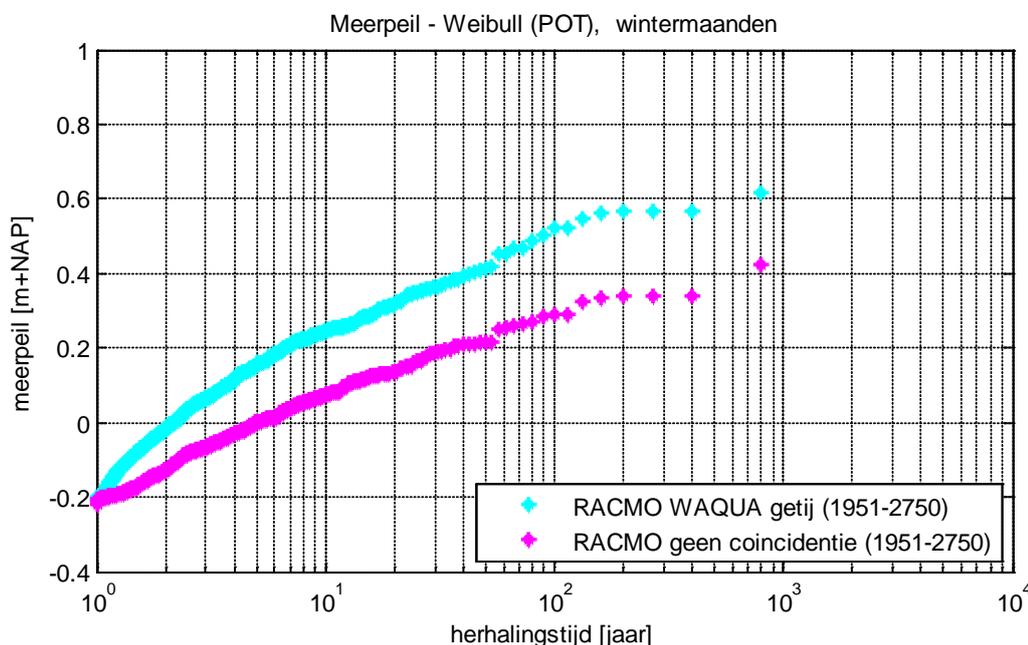
## 4 Coïncidentie

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar coïncidentie tijdens extreem hoge meerpeilen, ofwel extreem natte omstandigheden.

### 4.2 Frequentielijn meerpeil

Dat coïncidentie invloed heeft op de IJsselmeerpeilen, dat weten we. In Figuur 4.1 wordt dit nog eens expliciet gemaakt. De cyaankleurige punten zijn de normale RACMO-berekeningen. Bij de roze punten is de “coïncidentie” tussen zeewaterstand/wind en neerslag/rivierafvoer als ware “uitgezet”, dit betekent dat de zeewaterstand/wind op een willekeurig moment onafhankelijk is van de neerslag/rivierafvoer op dat zelfde tijdstip. In de praktijk is dit gedaan door de zeewaterstand/wind van 1 RACMO-member samen te voegen met de neerslag/rivierafvoer van een willekeurig ander member, en deze vervolgens door de modellentrein heen te halen. Dit heeft een groot effect op de resultaten, de kans van voorkomen op hoge meerpeilen neemt flink af, de afname is 20 cm voor een herhalingsstijd van 100 jaar. De kans op het gelijktijdig optreden van extreme situaties van hoge zeestanden en neerslag/rivierafvoer lijkt sterk af te nemen.



Figuur 4.1 Overschrijdingsfrequentielijn IJsselmeerpeil. Selectiemethode events: Peaks-over-threshold (POT), drempelwaarde: -0,20 m+NAP, plotpositie: Weibull, Minimale tussenperiode 2 events = 15 dagen, periode: wintermaanden.

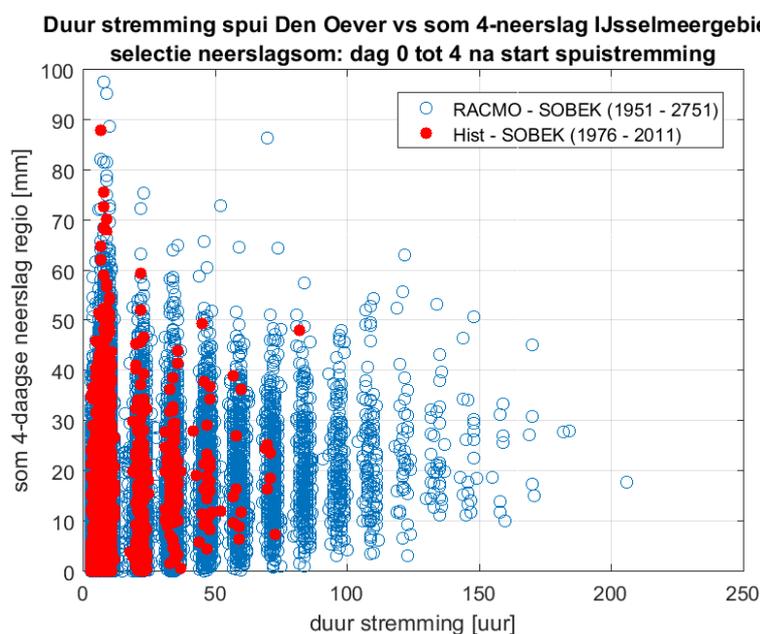
### 4.3 Stremming spui versus neerslag

Ook tussen de hoogte van de zeestand en de lokale neerslag speelt coïncidentie een rol. Een depressie komt vaak vanuit zee, welke stormopzet en neerslag meebrengt. In deze paragraaf wordt met behulp van RACMO gekeken hoe coïncidentie verloopt in situaties met langdurige spuistremmingen (langer dan gemeten).

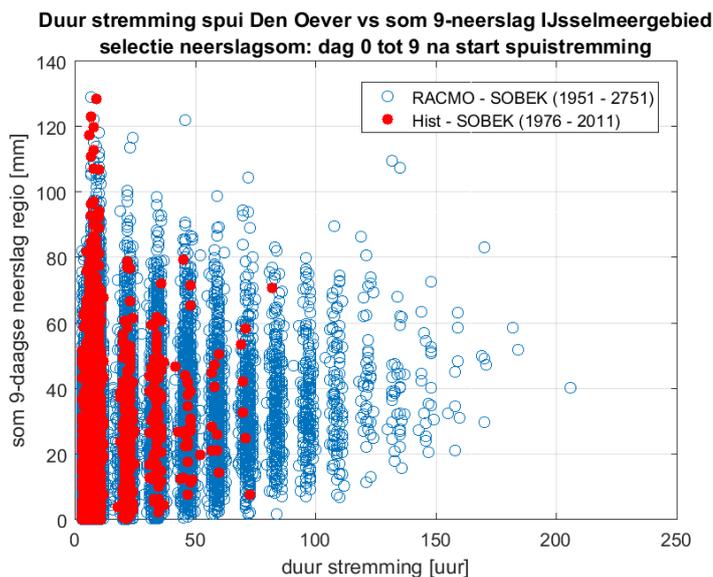
In Figuur 4.2 t/m Figuur 4.4 is per spuistremming de bijbehorende duur uitgezet tegen de som van de 4-, 9- en 30-daagse neerslag. In een periode van vier dagen of meer kunnen meerdere spuistremming-events voorkomen, indien dit het geval is, dan is alleen de spuistremming met de langste duur geplot.

In alle drie de figuren convergeren de neerslaghoeveelheden naar 1 punt. Bij een toenemende stremmingsduur neemt de kans op hoge neerslaghoeveelheden dus af, maar er valt altijd wel een minimum hoeveelheid neerslag bij langdurige spuistremmingen.

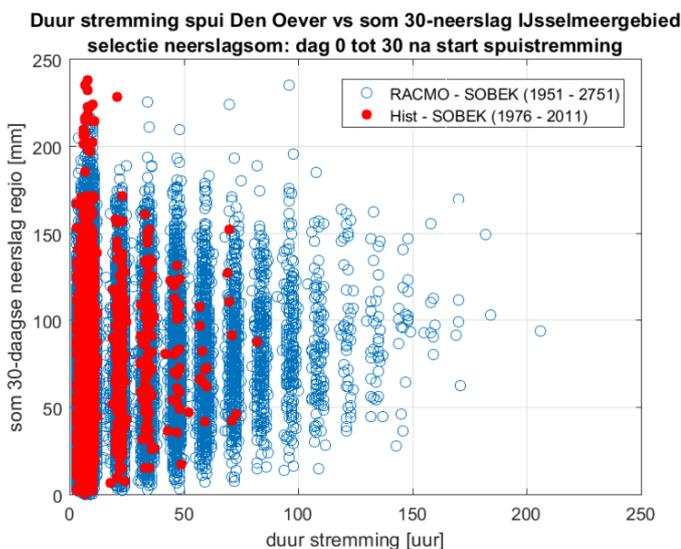
Verder laten de figuren zien dat er in de RACMO-tijdserie spuistremmingen tot wel 200 uur voorkomen, dit betekent dat er 8 achtereenvolgende dagen niet gespuid kan worden.



*Figuur 4.2 Duur spuistremming uitgezet tegen de som van de 4-daagse neerslag in het IJsselmeergebied. De neerslag is bepaald door de som van de neerslag op dag 1 t/m 4 na de start van de spuistremming. Alleen de winterperiode en stremmingen >25 uur zijn meegenomen.*

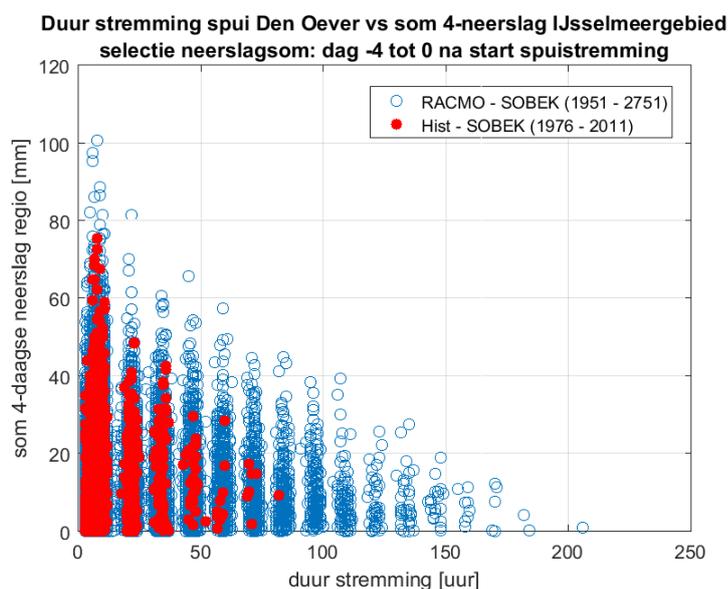


Figuur 4.3 Duur spuistremming uitgezet tegen de som van de **9-daagse** neerslag in het IJsselmeergebied. De neerslag is bepaald door de som van de neerslag op dag 1 t/m 9 na de start van de spuistremming. Alleen de winterperiode en stremmingen >25 uur zijn meegenomen.



Figuur 4.4 Duur spuistremming uitgezet tegen de som van de **30-daagse** neerslag in het IJsselmeergebied. De neerslag is bepaald door de som van de neerslag op dag 1 t/m 30 na de start van de spuistremming.

Het patroon ziet er anders uit kijkende naar de neerslag voorafgaand aan het hoogwater. In Figuur 4.5 is per spuistremming de neerslag voorafgaand aan de spuistremming geselecteerd. Te zien is dat naarmate de stremming langer duurt, de neerslaghoeveelheid sterk afneemt. De neerslaghoeveelheid voorafgaand aan een stremmingsevent berust zich dus meer op toeval, dan dat er sprake is van coïncidentie.

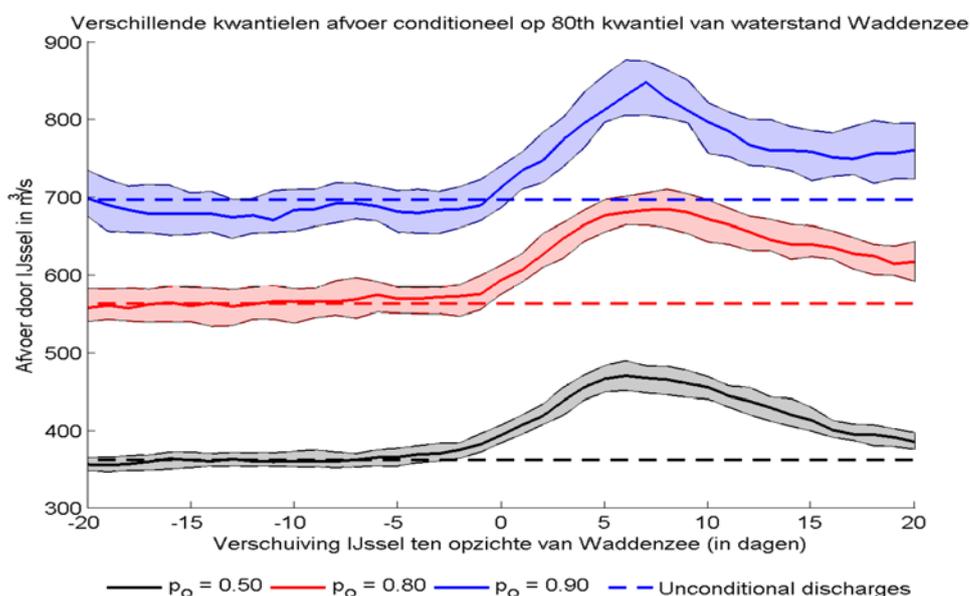


Figuur 4.5 Duur spuistremming uitgezet tegen de som van de **4-daagse** neerslag in het IJsselmeergebied. De neerslag is bepaald door de som van de neerslag op **dag -4 t/m 0** na de start van de spuistremming.

#### 4.4 Statistische afhankelijkheid en volgordelijkheid

In deze paragraaf wordt gekeken naar de afhankelijkheid en volgordelijkheid tussen de basisstochasten. Er wordt gekeken of dit vergelijkbaar is met de metingen. Aangezien RACMO een langere tijdserie bevat (800 jaar), kunnen ook de hogere percentiel-waarden met meer betrouwbaarheid worden vastgesteld.

Om de statistische afhankelijkheid tussen stochasten te bekijken wordt een vergelijkbare aanpak gekozen als in Deltares (2016). Binnen deze aanpak wordt gekeken naar het tijdsverschil van stochasten ten opzichte van elkaar. In Figuur 4.6 is een voorbeeld gegeven. De doorgetrokken lijn in het figuur geven voor verschillende faseverschuivingen het 50-, 80- en 90-percentiel van de afvoer conditioneel op het 80-percentiel van de zeewaterstand. Bij het bepalen van het 50-percentiel van de afvoer worden hier alleen de afvoeren meegenomen die bij het gegeven tijdsverschil zeewaterstand boven het 80-percentiel bevatten. Wanneer de doorgetrokken lijn boven de onderbroken lijn ligt is er sprake van een duidelijke afhankelijkheid. In dit voorbeeld is de correlatie tussen hoge afvoer en hoge zeewaterstanden het grootst bij een tijdsverschil van circa 7 dagen.



Figuur 4.6 Voorbeeld afhankelijkheidsanalyse. **Metingen:** De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsverschillen respectievelijk het 50, 80 en 90-percentiel van de IJsselafvoer conditioneel het 80<sup>ste</sup>-percentiel van de Waddenzee waterstand. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen de dagen meegenomen waarbij de bijbehorende zeewaterstand groter is dan het 80<sup>ste</sup> percentiel.) (bron: Deltares, 2015)

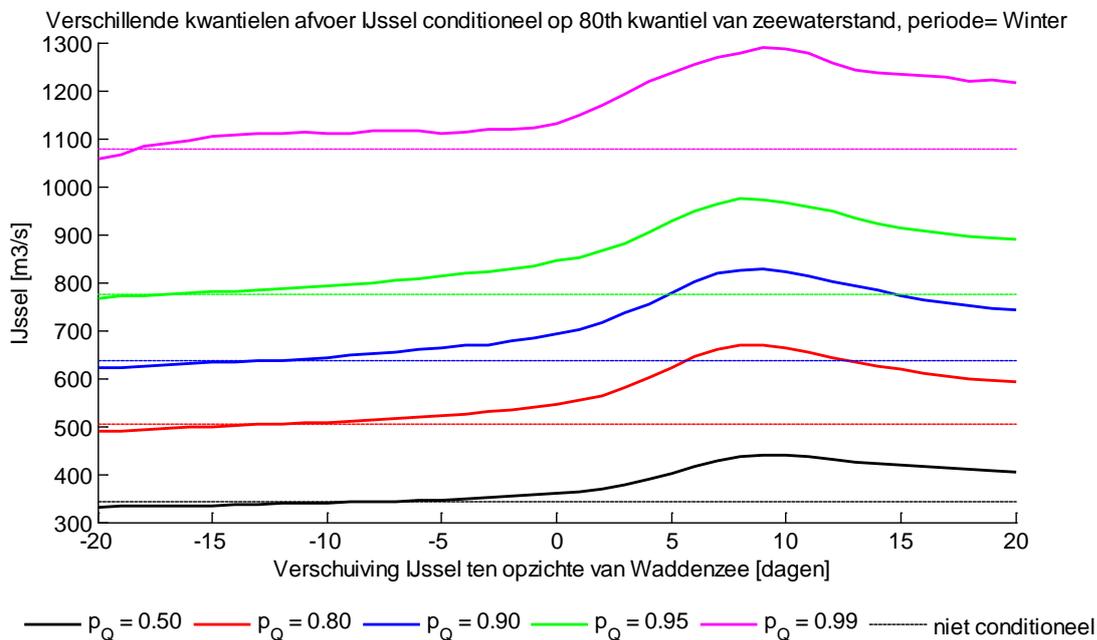
#### 4.4.1 IJsselafvoer en Waddenzeewaterstand

Voor RACMO is in Figuur 4.7 per percentiel van de IJsselafvoer de conditionele zeewaterstand uitgezet. Voor zowel de zeewaterstanden als de afvoeren zijn dagwaarden gebruikt.

De metingen (Figuur 4.6) laten zien dat bij een tijdsverschil van circa 7 dagen de correlatie tussen hoge afvoeren en zeewaterstanden het grootst is. Gebruikmakend van de RACMO dataset lijkt dit punt iets op te schuiven naar een tijdsverschil van 8 dagen.

Bij de RACMO-resultaten en tijdsverschuivingen kleiner dan 0 ligt de conditionele IJsselafvoer hoger dan de niet-conditionele lijn, dit betekent dat je eerst een hoge IJsselafvoer hebt en dan een hoge Waddenzee waterstand. Eigenlijk kan dit alleen als er in een periode van hoge IJsselafvoeren meerdere hoge zeewaterstanden voorkomen.

In het RACMO figuur zijn naast de 50-, 80-, en 90-percentielen ook de 95- en 99-waarden geplott. Net als bij de metingen is te zien is dat de lijnen steeds verder uit elkaar gaan lopen; de statistische afhankelijk wordt groter bij hogere percentielwaarden. Bij hogere afvoeren is er dus meer kans op een zeewaterstand groter dan het 80<sup>th</sup> percentiel.

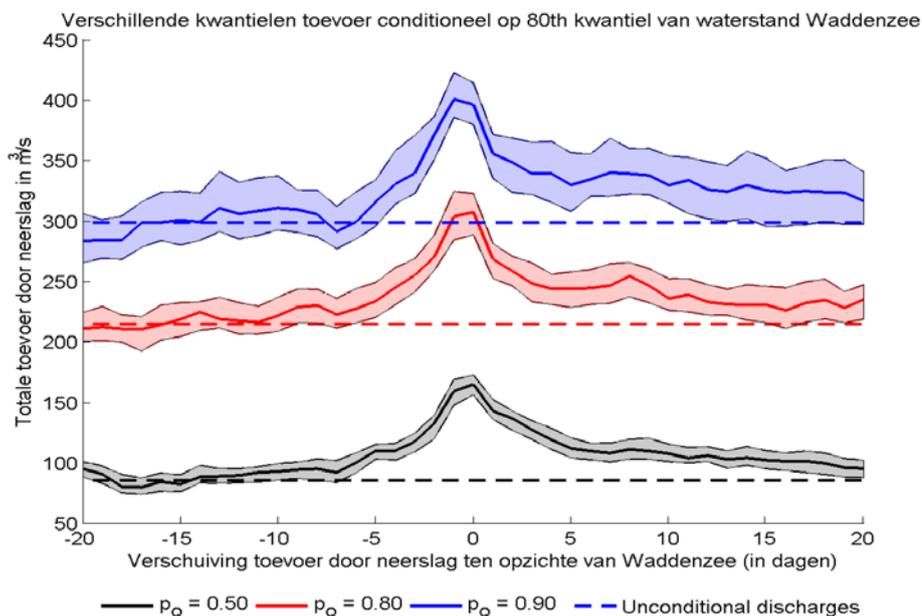


Figuur 4.7 **RACMO**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsvershillen respectievelijk het 50, 80, 90, 95 en 99-percentiel van de IJsselaflow conditioneel aan het 80<sup>ste</sup>-kwantiel van de Waddenzee waterstand. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen de dagen meegenomen waarbij de bijbehorende zeewaterstand groter is dan het 80<sup>ste</sup> kwantiel.)

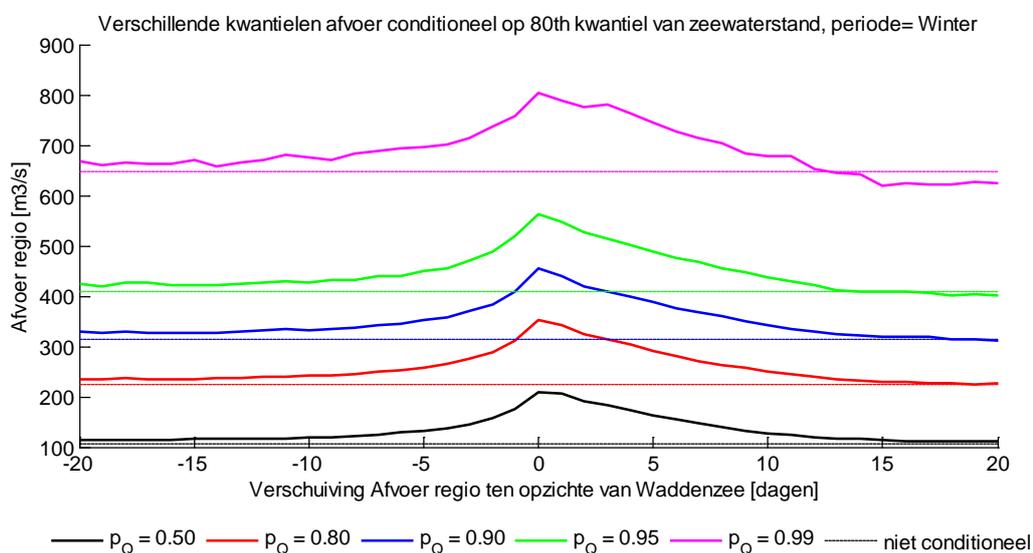
#### 4.4.2 Regionale aanvoer en zeewaterstand

Voor de metingen en RACMO is respectievelijk in Figuur 4.8 en Figuur 4.9 de statistische afhankelijkheid getest voor de regionale aanvoer en de zeewaterstand. Het verloop van RACMO is vergelijkbaar met die van de metingen. Enkel lijkt de grootste statistische afhankelijkheid iets verschoven. Ten opzichte van verhoogde zeewaterstand stroomt de afvoer in RACMO net wat later af. Dit kan ook te maken hebben met het neerslagafvoer model in de modellentrein. Hier is aangenomen dat de verschuiving van regionale afvoer ten opzichte van de neerslag 1 dag bedraagt.

In het RACMO figuur zijn naast de 50-, 80-, en 90-percentielen ook de 95- en 99-waarden geplote. De statistische afhankelijkheid (verschil gestippelde en doorgetrokken lijn) lijkt bij de hogere percentielwaarden net iets groter te worden, echter de toename is zeer beperkt.



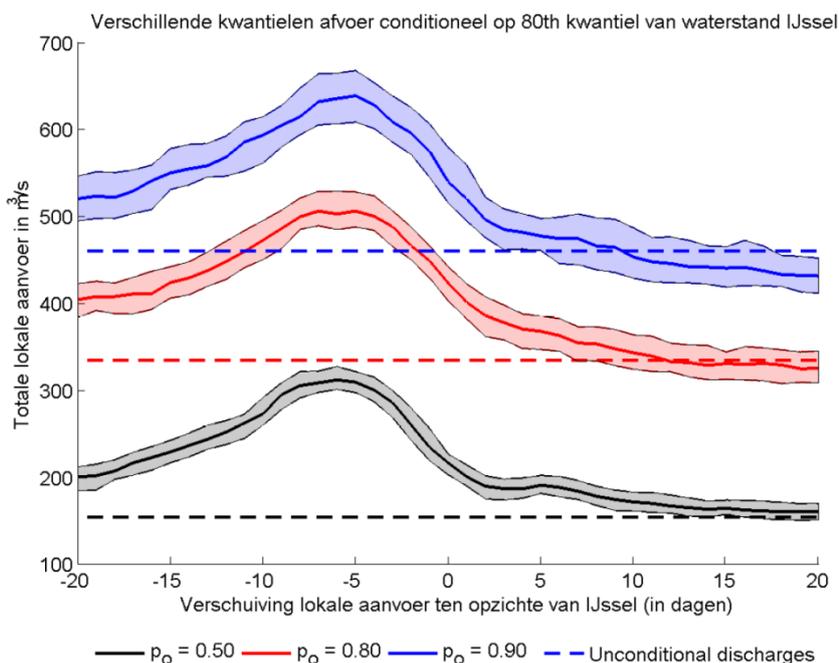
Figuur 4.8 **Metingen**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsvershillen respectievelijk het 50, 80 en 90-percentiel van de regionale aanvoer conditioneel aan het 80<sup>ste</sup>-kwantiel van de Waddenzee waterstand. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen de dagen meegenomen waarbij de bijbehorende zeewaterstand groter is dan het 80<sup>ste</sup> kwantiel.) (bron: Deltares, 2015)



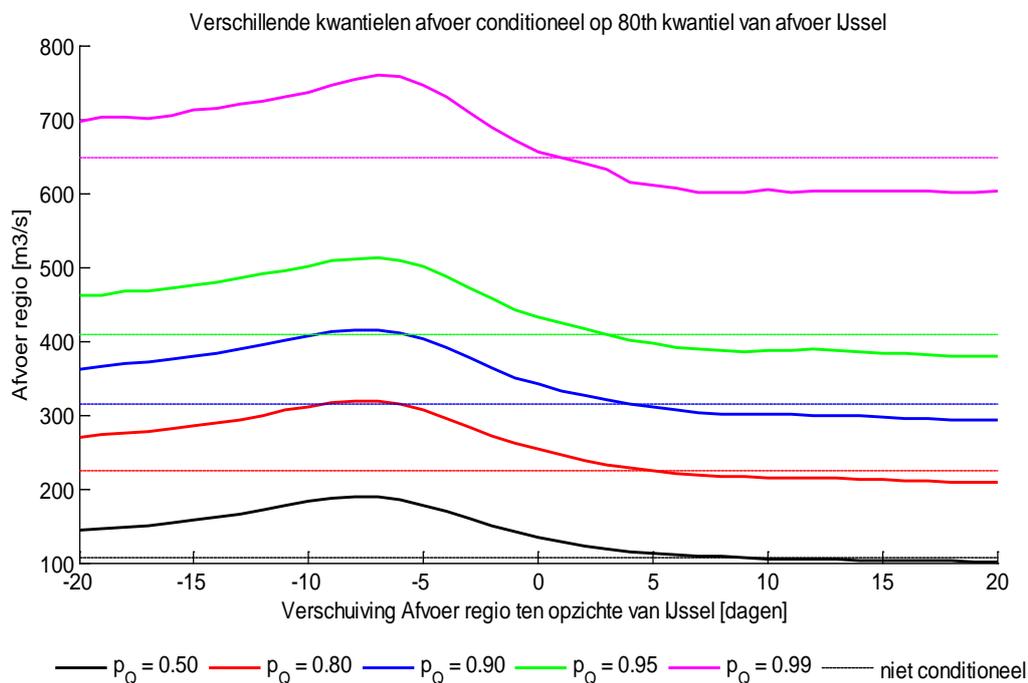
Figuur 4.9 **RACMO**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsvershillen respectievelijk het 50, 80, 90, 95, 99-percentiel van de regionale conditioneel aan het 80<sup>ste</sup>-kwantiel van de Waddenzee waterstand. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen de dagen meegenomen waarbij de bijbehorende zeewaterstand groter is dan het 80<sup>ste</sup> kwantiel.)

### 4.4.3 Lokale aanvoer en de IJsselafvoer

In Figuur 4.10 en Figuur 4.11 wordt de statistische afhankelijkheid getest van de regionale aanvoer en de zeewaterstand gebruik makend van respectievelijk de metingen en RACMO. Het verloop van RACMO is vergelijkbaar met die van de metingen. Alleen de mate van afhankelijkheid is verschillend, de afhankelijkheid tussen de lokale aanvoer en de IJssel is groter in de metingen dan in RACMO.



Figuur 4.10 **Metingen:** De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsverschillen respectievelijk het 50, 80 en 90-percentiel van de lokale aanvoer (neerslag + Zwarte Water) conditioneel aan het 80<sup>ste</sup>-percentiel van de IJsselafvoer. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen data meegenomen waarbij de bijbehorende IJsselafvoer groter is dan het 80<sup>ste</sup> percentiel.) (bron: Deltares, 2015).

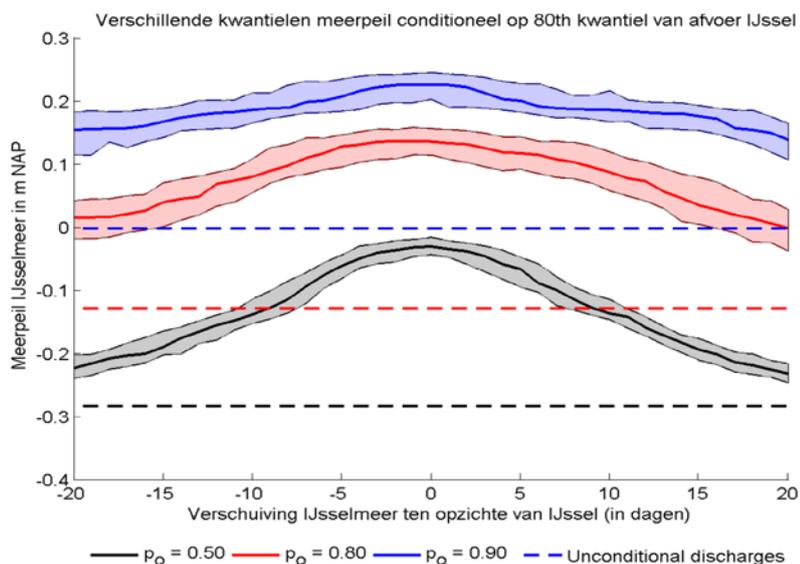


Figuur 4.11 **RACMO**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsverschillen respectievelijk het 50, 80, 90, 95 en 99-percentiel van de lokale aanvoer (neerslag + Vecht) conditioneel aan het 80<sup>ste</sup>-percentiel van de IJsselafvoer. (Bij het bepalen van de percentielen zijn dus alleen data meegenomen waarbij de bijbehorende IJsselafvoer groter is dan het 80<sup>ste</sup> percentiel.).

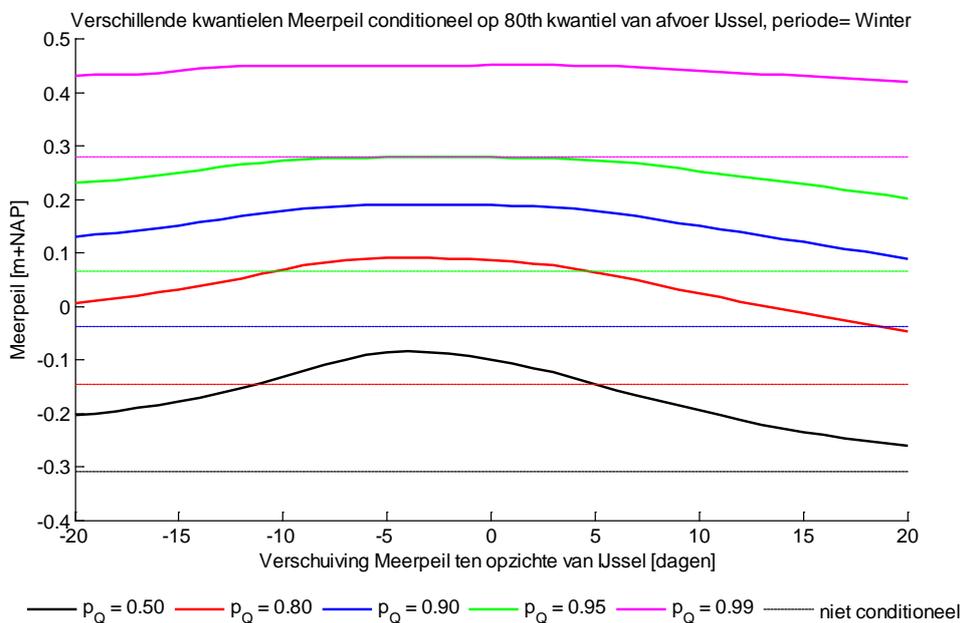
#### 4.4.4 Meerpeil en IJsselafvoer

In Figuur 4.12 en Figuur 4.13 wordt de statistische afhankelijkheid getest voor de regionale aanvoer en de zeewaterstand. Het verloop van RACMO is vergelijkbaar met die van de metingen. In RACMO treden de hoogste afhankelijkheden net eerder op, dus een verhoogd meerpeil volgt sneller op een verhoogde IJsselafvoer.

Zowel voor de metingen als RACMO wordt de lijn vlakker bij hogere percentielwaarden. Dit is ook de verwachting, hoe hoger het meerpeil, hoe langer de periode met hoge IJsselafvoeren.



Figuur 4.12 **Metingen**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsvershillen respectievelijk het 50, 80 en 90-kwantiel van het meerpeil conditioneel aan het 80ste-kwantiel van de IJsselafvoer. (Bij het bepalen van de kwantilen zijn dus alleen data meegenomen waarbij de bijbehorende IJsselafvoer groter is dan het 80ste kwantiel.).



Figuur 4.13 **RACMO**: De doorgetrokken zwarte, rode en blauwe lijn geven voor verschillende tijdsvershillen respectievelijk het 50, 80, 90, 95 en 99-kwantiel van het meerpeil conditioneel aan het 80ste-kwantiel van de IJsselafvoer. (Bij het bepalen van de kwantilen zijn dus alleen data meegenomen waarbij de bijbehorende IJsselafvoer groter is dan het 80ste kwantiel.).

#### 4.4.5 Samenvatting tijdsverschuiving

In Tabel 4.1 is een samenvatting gegeven van de tijdsverschuiving waarbij de statistische afhankelijkheid tussen parameter 1 en 2 het grootst is. De RACMO resultaten zijn erg vergelijkbaar met de metingen. Verder is in bovenstaande paragrafen te zien dat deze waarden ook niet veranderen tijdens meer extremere condities (99- i.p.v. 90-percentiel).

Tabel 4.1 Tijdsverschuiving waarbij de statistische afhankelijkheid tussen twee stochasten het grootst is volgens de metingen en RACMO.

parameter 1	Parameter 2	Statistische afhankelijk stochast 1 en 2 het grootst bij:	
		metingen	RACMO
		[dagen]	[dagen]
Waddenzee waterstand	IJsselafvoer	7	8
Waddenzee waterstand	Lokale aanvoer	-1	0
IJsselafvoer	Lokale aanvoer	-6	-7
IJsselafvoer	IJsselmeer	-2 tot 0	-4 tot 0

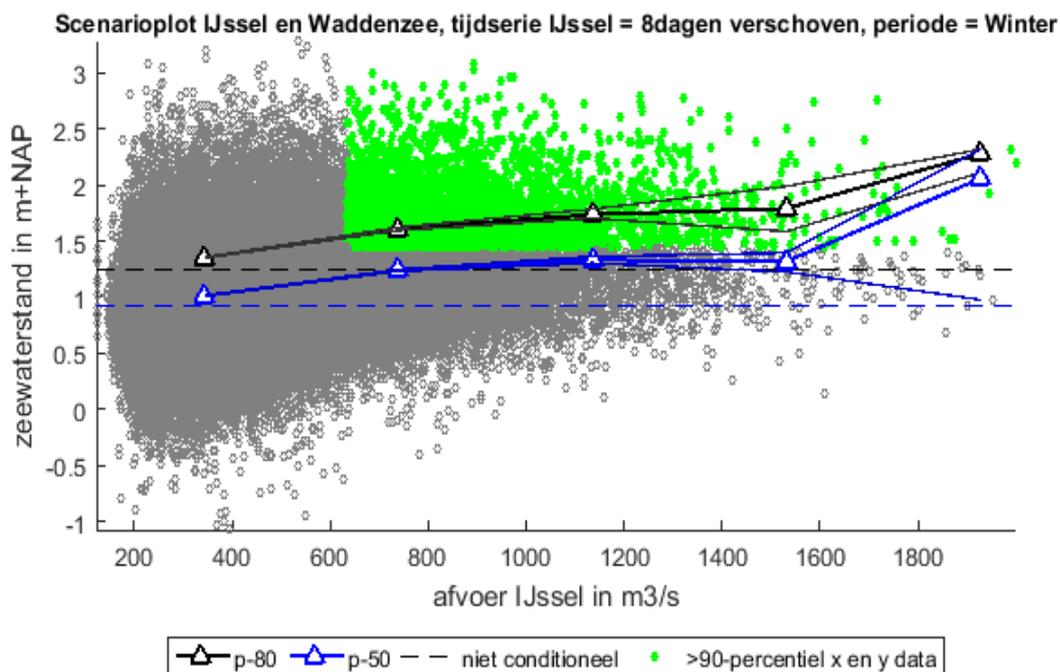
#### 4.5 Overige statistische afhankelijkheidsanalyse

In de vorige paragraaf is gekeken naar de volgorde van verschillende parameters. In deze paragraaf wordt bij een bepaalde tijdsvertraging de statistische afhankelijkheid geplot.

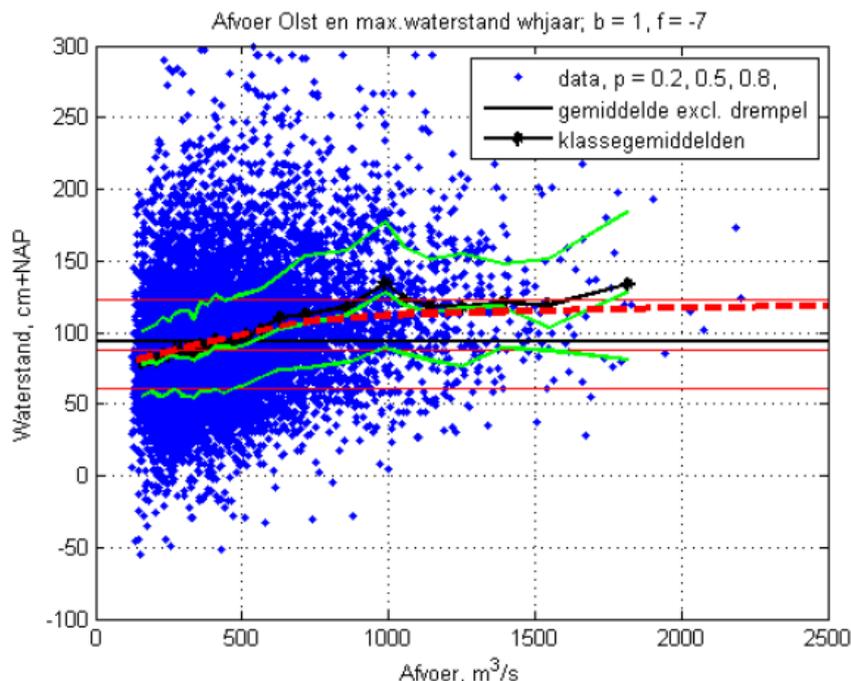
##### 4.5.1 IJsselafvoer en Waddenzeewaterstand

Het principe van de afhankelijkheidsanalyse is als volgt. In Figuur 4.14 is een puntenwolk van alle gecombineerde realisaties van de twee onderzochte parameters weergegeven, in dit voorbeeld de afvoer en de zeewaterstand. De stippelijnen geven verschillende kwantielen van de afvoer op de y-as weer (50- en 80%). De doorgetrokken lijnen met driehoekjes geven diezelfde kwantielen weer, maar dan voor de set observaties conditioneel op de afvoer. Bij het eerste driehoekje worden dus enkel de gecombineerde realisaties meegenomen waarvoor geldt  $Q > 350$  m<sup>3</sup>/s. Wanneer de twee parameters volledig onafhankelijk zijn, moeten de zwarte driehoekjes (ongeveer) over de stippelijnen lopen. Wanneer dit niet het geval is en ze er boven liggen is er een positieve correlatie (kans op samenvallen extremen groter is dan bij de onafhankelijke case), wanneer ze eronder liggen een negatieve correlatie (kans op samenvallen extremen kleiner dan bij onafhankelijke case). Verder geven de doorgetrokken blauwe en zwarte lijnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de percentiel-waarden aan.

In het figuur is te zien dat de puntenwolk convergeert naar een waarde van circa 1,5 m+NAP. Zeer hogere IJsselafvoeren komen in het figuur niet voor in combinatie met lage zeewaterstanden, ofwel de kans hierop is zeer klein. Ook in HKV (2015) is uitgegaan van deze aanname (zie Figuur 4.15). Voor afvoeren boven de 1000 m<sup>3</sup>/s, is er een constante relatie met de zeewaterstand.



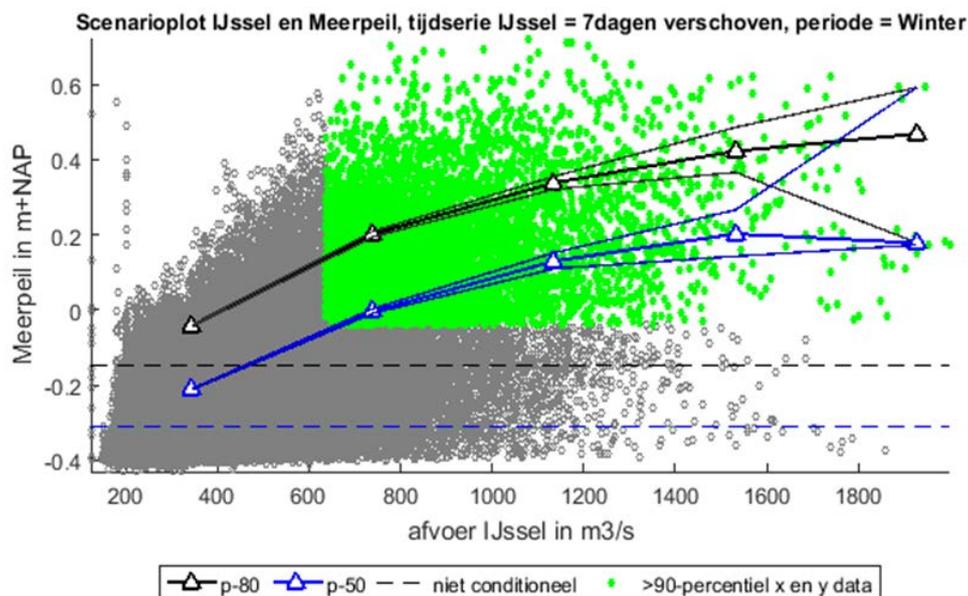
Figuur 4.14 Afvoer zeewaterstand uitgezet tegen de IJsselaflow, waarbij de tijdreeks 8 dagen achter loopt op de IJssel. De punten zijn groen gekleurd, wanneer deze groter zijn dan het 90-percentiel. De blauwe en zwarte driehoekjes geven respectievelijk het 50- en 80-percentiel conditioneel aan de afvoer. En de doorgetrokken blauwe en zwarte lijnen geven het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de percentiel-waarden.



Figuur 4.15 Verband tussen afvoer Olst (feitelijk bij Ketelmeer) en de maximale dagwaterstand te Den Oever. In dit geval wordt de afvoer 7 dagen later beschouwd dan de waterstand te Den Oever. (HKV, 2015).

#### 4.5.2 IJsselafvoer en Meerpeil

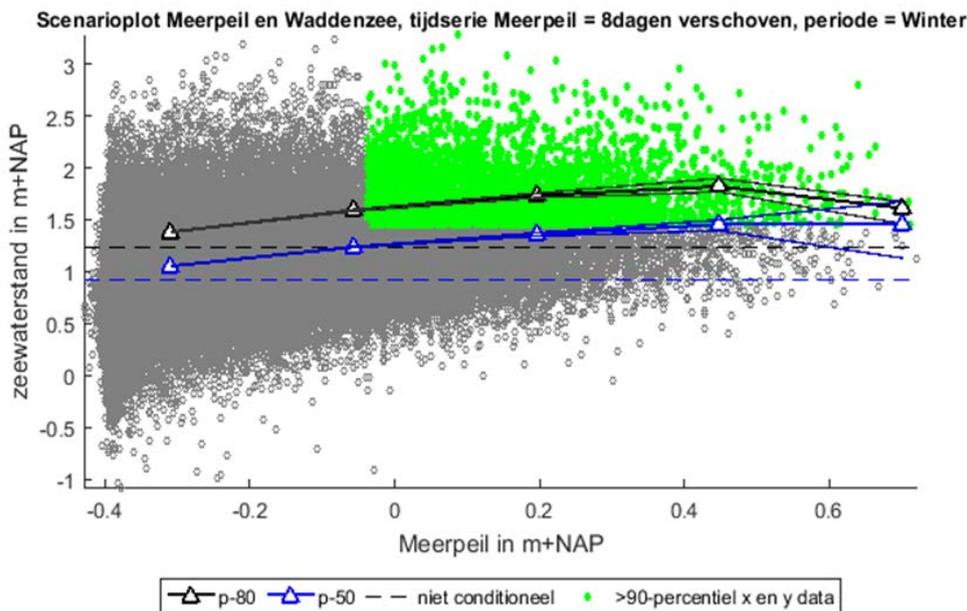
De correlatie-plot tussen meerpeil en IJsselafvoer is weergegeven in Figuur 4.16, de kans op hoge meerpeilen wordt steeds groter naarmate de IJsselafvoer toeneemt. Wel is de bandbreedte neemt de onzekerheid sterk toe bij afvoeren boven de 1200 m<sup>3</sup>/s. De doorgetrokken lijnen gaat steeds verder uit elkaar lopen.



Figuur 4.16 Afvoer IJssel uitgezet tegen het meerpeil, waarbij de tijdreeks 7 dagen achter loopt op de IJssel (rondjes). De rondjes zijn groen gekleurd, wanneer deze groter zijn dan het 90-percentiel. De blauwe en zwarte driehoekjes geven respectievelijk het 50- en 80-percentiel conditioneel aan de afvoer. En de doorgetrokken blauwe en zwarte lijnen geven het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de percentiel-waarden.

#### 4.5.3 Meerpeil en Waddenzee waterstand

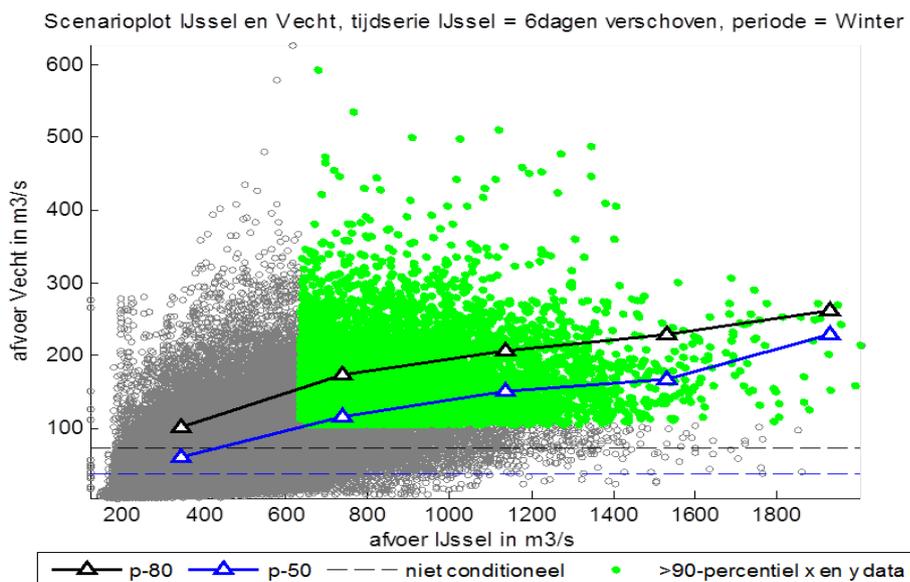
Net als bij de IJsselafvoer-zeewaterstand convergeert ook het figuur van de Meerpeil-zeewaterstand (Figuur 4.17). Tijdens een hoog meerpeil is er een grote kans op een verhoogde zeewaterstand, echter, de combinatie van heel hoge zeewaterstand en heel hoge meerpeil is zeldzaam.



Figuur 4.17 Zeewaterstand uitgezet tegen het meerpeil, waarbij de tijdreeks 8 dagen achter loopt op de het meerpeil (rondjes). De rondjes zijn groen gekleurd, wanneer deze groter zijn dan het 90-percentiel. De blauwe en zwarte driehoekjes geven respectievelijk het 50- en 80-percentiel conditioneel aan de afvoer. En de doorgetrokken blauwe en zwarte lijnen geven het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de percentielwaarden.

#### 4.5.4 IJssel- en Vechtafvoer

In Figuur 4.18 is de correlatie tussen de IJssel- en Vechtafvoer weergegeven bij een tijdsverschuiving van 6 dagen. Te zien is dat de correlatie toeneemt bij hogere afvoeren, wel is de onzekerheid groot, de rondjes beslaan een groot gebied van het figuur.



Figuur 4.18 Afvoer Vecht uitgezet tegen de IJsselaflow, waarbij de tijdreeks 6 dagen later wordt geschouwd dan de IJsselaflow (rondjes). De rondjes zijn groen gekleurd, wanneer deze groter zijn dan het 90-percentiel. De blauwe en zwarte driehoekjes geven respectievelijk het 50- en 80-percentiel conditioneel aan de afvoer.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### Conclusies resultaten en validatie modeltrein RACMO

De RACMO-modellentrein genereert een 800-jarige synthetische reeks van IJsselmeerpeilen die goed op de metingen liggen. Ook de tussenresultaten van de modellentrein, de Vechtafvoer en wind, geven een goede benadering van de metingen. Waar wel verschillen te vinden zijn is het tussenresultaat van de neerslag en opzet. Bij het gebruik van de resultaten dient rekening gehouden te worden met de volgende tekortkomingen:

- De extremere neerslagbuien wordt in RACMO onderschat, dit werkt door in de regionale- en IJsselafvoer. Bij de IJsselafvoer is de onderschatting voornamelijk terug te zien bij afvoeren met een herhalingsdij groter dan 10 jaar. Verwacht wordt dat hiermee ook de extreme RACMO meerpeilen, die buiten het meetbereik vallen, ook licht onderschat worden.
- De opzet (zeewaterstand-getij), welke gegenereerd zijn door WAQUA, geven een afwijkingen. Omdat de opzet bij Den Oever wordt overschat en bij Kornwerderzand onderschat, lijkt het effect op het meerpeil beperkt.

De 800-jarige tijdreeks van IJsselmeerpeilen is samengesteld uit 16 individuele members van elk 50 jaar. De frequentielijnen van de individuele members laten zien dat de tijdreeksen te kort zijn om betrouwbare statistiek af te leiden. Hiermee wordt de meerwaarde van het gebruik van het volledige ensemble aangetoond.

### Conclusies coïncidentie IJsselmeer

Coïncidentie speelt een belangrijke rol bij het tot stand komen van hoge IJsselmeerpeilen. De inzichten rondom coïncidentie en tijdsvertraging volgens 800-jarige-RACMO-tijdreeksen komen overeen met de metingen. Nieuw hierbij is dat er gekeken is naar correlatie tussen de spuistremmingen en de hoeveelheid neerslag. Duidelijk is te zien dat de plot convergeert; bij een toenemende stremmingsduur neemt de kans op hoge neerslaghoeveelheden af, maar bij langdurige spuistremmingen valt er altijd een minimum hoeveelheid neerslag.

Hoge IJsselmeerpeilen komen voor tijdens extreme IJsselafvoeren, echter uit de conclusies in dit rapport is gebleken dat ook de gevoeligheid voor de zeewaterstand niet onderschat mag worden. De RACMO-tijdreeks laat spuistremmingen van maximaal 200 uur zien, dit betekent dat er 8 achtereenvolgende dagen niet gespuid kan worden.

### Aanbevelingen RACMO

Deze studie heeft aangetoond dat de RACMO reeks potentie biedt voor het genereren van bruikbare synthetische reeksen, maar dat er enkele tekortkomingen zijn. Om meer vertrouwen te krijgen in de resultaten wordt aanbevolen om RACMO op de volgende punten:

- Verbeteren RACMO invoerreeksen, bij de neerslag dient aandacht te worden besteed aan de natte periode en bij de zeewaterstand aan de correctheid van het getijde en opzet in het WAQUA model.
- De toegepaste modellentrein kan verbeterd worden door de afvoer van Olst direct te bepalen uit de HBV-SOBEL run en niet te werken met correctiefactoren. Daarnaast is het aan te bevelen om de neerslag-afvoerrelaties van de regio's te verbeteren.

Indien blijkt dat de RACMO modellentrein geschikt is voor het heden, dan kan deze ook ingezet worden voor toekomstige klimaatprojecties. Naast de hier gebruikte RACMO reeks voor het huidige klimaat is er een RACMO klimaatprojecties beschikbaar met zichtjaar 2075-2125.

## 6 Referenties

Deltares, 2016

Coïncidentie IJsselmeer, N.Kramer, Deltares memo, 1230042-006-ZWS-003, 15 december 2016.

Deltares, 2016a

Coïncidentie IJsselmeer- Analyse top 27 hoogste meerpeilen, N.Kramer, Deltares memo, 1230042-006-ZWS-003, 28 november 2016.

Deltares, 2017

Coïncidentie IJsselmeer: Genereren synthetische tijdserie van IJsselmeerpeilen Nienke Kramer, Daniel Bachman Deltares rapport 11200537-008.

Deltares, 2017b

Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017, T.Botterhuis, J. den Bieman, H. Chbab, 1230087-005.

HKV, 2015

Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied Hoofdrapport van model DEZY, Chris Geerse, Bastiaan Kuijper, PR3013.10 mei 2015.

IMPRES, 2017, Concept, Intermediate Report – Advances in novel concepts in hydrometeorological risk assessments v.06, H. de Moel et al., HORIZON 2020.