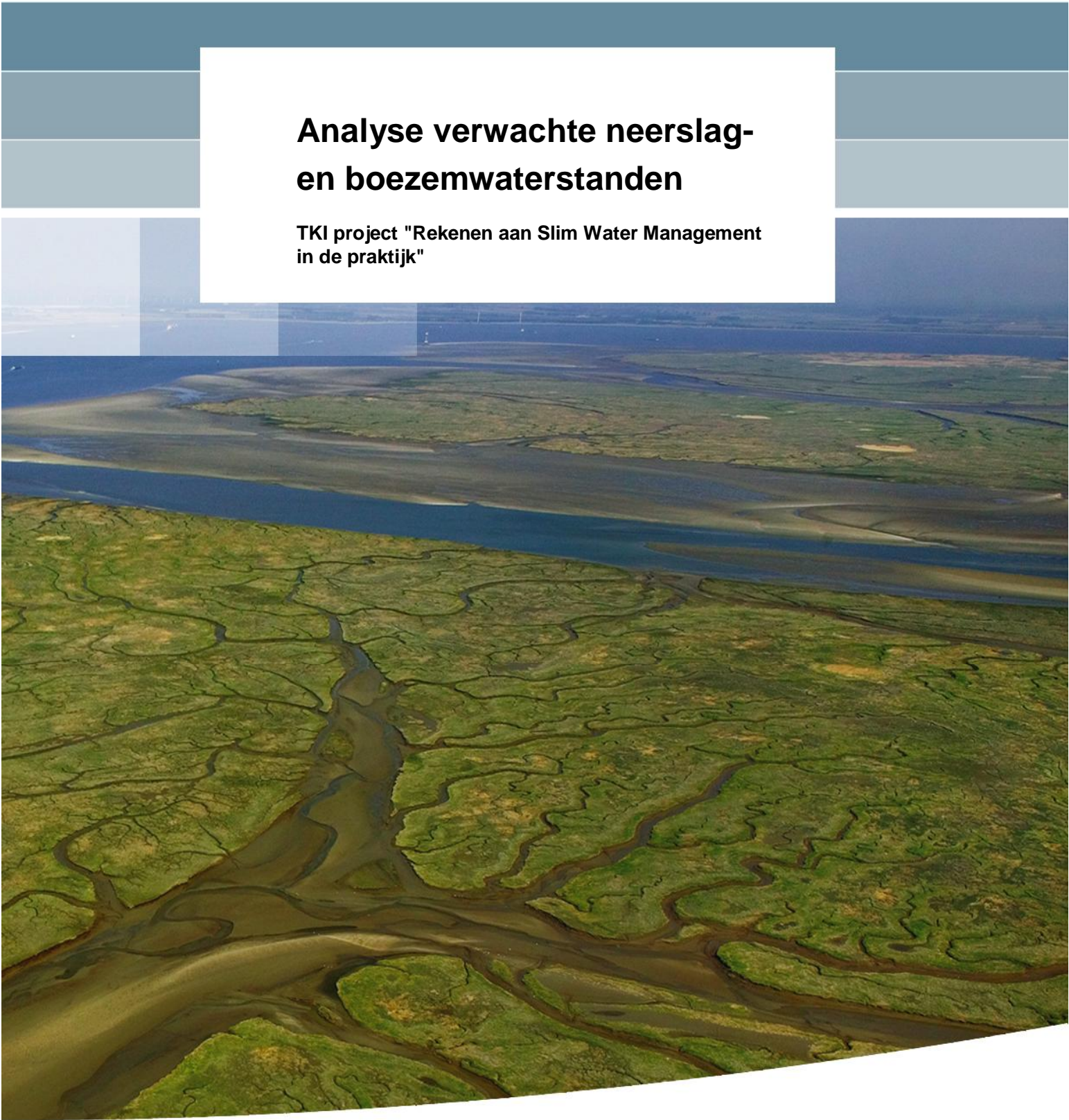


Analyse verwachte neerslag- en boezemwaterstanden

**TKI project "Rekenen aan Slim Water Management
in de praktijk"**



Analyse verwachte neerslag- en boezemwaterstanden

**TKI project "Rekenen aan Slim Water Management in de
praktijk"**

Klaas-Jan van Heeringen
Jan Verkade
Schalk-Jan van Andel (IHE)
Maurice Schmeits (KNMI)

1230452-005

Titel

Analyse verwachte neerslag- en boezemwaterstanden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Hoogheemraadschap van Rijnland	1230452-005	1230452-005-ZWS-0014	37

Trefwoorden

BOSBO3.0, hydrologie, real-time control, weersverwachting, ensembles, verificatie, alarmering gevaarlijk weer

Samenvatting

Het gebruik van ensembleverwachtingen is een beproefde en bewezen methode voor het schatten van de onzekerheid rondom het toekomstige weer en de neerslagsommen. Op dit moment wordt in het waterbeheer gebruik gemaakt van het middellange termijn ensemble van ECMWF-EPS. Uit vergelijking met de performance van ECMWF-EPS met GLAM-EPS blijkt dat GLAM-EPS beter scoort voor de eerste dag.

Met behulp van het ECMWF-EPS is een verificatieanalyse uitgevoerd op basis van neerslaggebeurtenissen en beslissingsregels met kansdrempels ten behoeve van automatische alarmering voor "gevaarlijk weer". De algemene conclusie is dat op basis van ECMWF-EPS neerslagverwachtingen, regio Schiphol, grofweg twee derde van kritische gebiedsgemiddelde neerslaggebeurtenissen tijdig kan worden verwacht (bijvoorbeeld 2 dagen van te voren). De resultaten op polderniveau laten zien, dat de ECMWF-EPS neerslagverwachtingen uitvoerlocatie Schiphol, voor een aantal van de waargenomen gebeurtenissen in de polders ook een goede voorwaarschuwing laat zien.

Automatische alarmering kan sterk worden verbeterd indien niet alleen naar de verwachte neerslag maar ook naar recente neerslag wordt gekeken. Daarom is een alarmeringsmodule ontwikkeld met een statistisch model. Dit model kan in BOSBO worden ingebouwd. De nieuwe module kijkt ook naar de historische neerslag, het al verpompte volume en de actuele boezemwaterstand. Hiermee biedt het een betere onderbouwing voor een eventueel weeralarm dan de methode die Rijnland momenteel hiervoor hanteert.

Deze alarmeringsmodule kan gebruikmaken van zowel ECMWF-EPS als GLAM-EPS verwachtingen. We adviseren om de GLAM-EPS-verwachtingen te gaan gebruiken, omdat die iets betere verwachtingen geeft voor de eerste dag, waarvoor deze alarmeringsmodule juist is bedoeld.

Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
3	Mrt. 2018	Klaas-Jan van Heeringen et.al		Albrecht Weerts		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding en context	1
1.2	Doel en aanpak van het deelonderzoek	2
1.3	Leeswijzer	2
2	Analyse van neerslagverwachtingen	3
2.1	GLAM-EPS data	3
2.2	Verificatie metrics	4
2.2.1	Brier (skill) score	4
2.2.2	Reliability diagrammen	5
2.2.3	Continuous ranked probability (skill) score	5
2.3	Vergelijkende verificatie van GLAM-EPS en ECMWF-EPS neerslagverwachtingen op stations	5
2.3.1	Vergelijkende verificatie voor een wintermaand (januari 2016)	6
2.3.2	Vergelijkende verificatie voor een zomermaand (juli 2015)	9
2.4	Verificatie van GLAM-EPS voor gebiedsgemiddelde neerslag	11
2.5	Conclusies en aanbevelingen	15
3	Analyse van alarmering met ECMWF-EPS-verwachtingen	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Ensemble neerslagverwachtingen van het European Centre for Medium-range Weather Forecasting	18
3.3	Specificaties van de verificatie analyse	19
3.4	Gebiedsgemiddelde neerslag	20
3.4.1	Neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag	20
3.4.2	Neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	23
3.4.3	Neerslagdrempel 30mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	24
3.5	Multi-day event thresholds	25
3.6	Verificatie van effectiviteit op polderniveau	26
3.7	Conclusies en aanbevelingen	27
4	Analyse voor operationele alarmeringen	29
4.1	Inleiding	29
4.2	Afleiding van het statistisch model	29
4.3	Implementatie	31
4.3.1	R-script	31
4.3.2	Delft-FEWS configuratie	32
5	Conclusies en Aanbevelingen	35
5.1	Samenvattende aanbevelingen	35
5.2	Algemene conclusies ten aanzien van ensembleverwachtingen	35
5.3	Aanbevelingen ten aanzien van het statistisch model	36
5.3.1	Aanbeveling 1: verificatie van gemaakte verwachtingen	36
5.3.2	Aanbeveling 2: keuze van beslisdrempel	36
5.3.3	Aanbeveling 3: verlenging van zichttijden	36
5.3.4	Aanbeveling 4: boezembelasting als te verklaren variabele	36

Literatuur	37
A GLAM-EPS verificatie	A-1
A.1 Stations	A-1
A.2 Rijnland gebiedsgemiddeld	A-3
B Resultaten ECMWF-EPS analyse	B-1
B.1 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag	B-1
B.2 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	B-2
B.3 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 3 dagen	B-3
B.4 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 4 dagen	B-4
B.5 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 5 dagen	B-5
B.6 Resultaten voor neerslagdrempel 30mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	B-6
B.7 Resultaten voor Gouwepolder, neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	B-7
B.8 Resultaten voor Hogeveense polder, neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen	B-8
C Detailresultaten statistisch model	C-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Het Hoogheemraadschap van Rijnland (verder "Rijnland" genoemd) is al sinds 1995 bezig met een geautomatiseerde aansturing van de boezemgemalen. Dit toenmalige ABR werd in 2004 vervangen door het zogenoemde BOSBO (beslisondersteuning beheer oppervlaktewater) waarbij het hart van de sturingsmodule werd gevormd door de Integrale Regelaar, ontwikkeld door Krijn-Jan Breur van de TU Delft.

Om diverse redenen heeft Rijnland gekozen voor een nieuwe generatie BOSBO, namelijk BOSBO3.0. De ontwikkeling van het sturingsmodel is uiteraard een belangrijk onderdeel van het BOSBO3.0 en is als pilotproject gedefinieerd onder de vlag van het TKI project "Rekenen aan Slim Water Management in de praktijk".

Het sturingsmodel is sterk afhankelijk van een goede neerslagverwachting. BOSBO3.0 maakt gebruik van neerslagverwachtingen van weermodellen van o.a. het ECMWF en het KNMI. Het gebruik van de neerslagverwachting is drieledig:

- 1 Als forcering van het neerslagafvoermodel dat de toevoer naar de boezem berekent en een automatisch, geoptimaliseerd, boezembelingsadvies genereert (RTC-Tools, 24 tot 48 uur vooruit)
- 2 Als forcering van het neerslagafvoer en boezemmodel in RTC-Tools, hetgeen een verwachting van de boezemstand oplevert onder normale bemalingsstrategie. Is de verwachte boezemstand te hoog dan kan dat een voorwaarschuwing zijn dat de gebruikelijke bemalingsstrategie niet voldoende zal zijn en dat bijvoorbeeld eerder dan normaal met pompen moet worden begonnen.
- 3 Als voorwaarschuwing op zichzelf: voor dusdanig extreme neerslag dat eerder pompen (en bemalen) nodig zal zijn om een overschrijding van gewenste boezemstand te voorkomen.

Het gebruik van de eerste toepassing wordt al voorbereid en uitgewerkt binnen het lopende TKI project van Deltares en wordt in deze notitie verder niet behandeld. Voor het gebruik van toepassing 2 en 3 is inzicht nodig in de kwaliteit van de neerslagverwachtingen en de resulterende boezemwaterstand-verwachtingen om beslisregels (waarschuwingregels) voor het eerder pompen vast te kunnen stellen.

Voorbeelden hiervan zijn: "Als ik een neerslagoverschrijdingsdrempel van 15mm/dag hanteer, hoe vaak geeft het weermodel dan een alarm, en hoe vaak is dat alarm dan terecht? Hoe vaak mist het weermodel een overschrijding?"

Of bijvoorbeeld voor nr. 2: "Als het gecombineerde neerslag- en boezemmodel een waterstandsverwachting hoger dan NAP-0.57 m geeft met een kans van 30%, hoe vaak is voormalen dan echt nodig, en hoe vaak valt het achteraf mee met de neerslagafvoer en was voormalen niet nodig geweest?"

De hoeveelheid terechte en onterechte waarschuwingen, en de hoeveelheid gemiste gebeurtenissen, zal verschillen per gehanteerde neerslagdrempel (15mm/dag, of 20mm/dag, of 30mm per 2 dagen, etc.), per boezemstand-drempelwaarde (NAP-0.60, -0.55, of -0.50, etc.) en per kanswaarde (10% kans versus 90% kans: grotere, vooraf geëiste zekerheid vertaalt zich in minder “false alarms” maar ook minder “hits”). De antwoorden op bovenstaande vragen zijn daarom van belang voor het vaststellen van de waarschuwingsregels, en het inschatten van de effectiviteit van dit gedeelte van het boezembeheer.

1.2 Doel en aanpak van het deelonderzoek

Om op bovenstaande vragen antwoord te kunnen geven, zijn de volgende onderwerpen onderzocht, die in het vervolg van dit rapport worden uitgewerkt:

- 1 Analyse van beschikbare, algemene verificatiescores voor neerslagverwachtingen van de te gebruiken weermodellen (GLAM-EPS tot 54 uur vooruit, ECMWF EPS tot 10 dagen vooruit) in vergelijking met de huidige standaard van HIRLAM, en vertaling van deze algemene kwaliteitsindicatoren naar wat deze betekenen voor het door Rijnland gewenste gebruik in het boezembeheer.
- 2 Opvragen en voorbereiden 2 jaar GLAM-EPS neerslagverwachtingen voor het beheergebied van Rijnland
- 3 Het gebruik van bovenstaande 2 jaar GLAM-EPS als invoer in het boezemmodel van Rijnland voor het genereren van 2 jaar boezemstandverwachtingen (met kansberekening: ensemble verwachtingen).
- 4 Analyse van bovenstaande resultaten voor een overzicht van mogelijke beslisregels en te verwachten effectiviteit. Dit leidt tot een voorstel voor beslisregels voor het hanteren van “gevaarlijk weer”.

Het onderzoek is uitgevoerd door Deltares (als penvoerder), KNMI en IHE Delft Institute for Water Education (voorheen UNESCO-IHE). De partijen hebben elk een deel van het onderzoek voor hun rekening genomen:

- KNMI heeft zich gericht op de algemene verificatie van GLAM-EPS en ECMWF-EPS verwachtingen
- IHE heeft zich gericht op verificatie van alarmeringen op basis van ECMWF-EPS verwachtingen voor Rijnland als geheel als ook voor een aantal polders
- Deltares heeft zich gericht op het operationele gebruik van GLAM-EPS-verwachtingen.

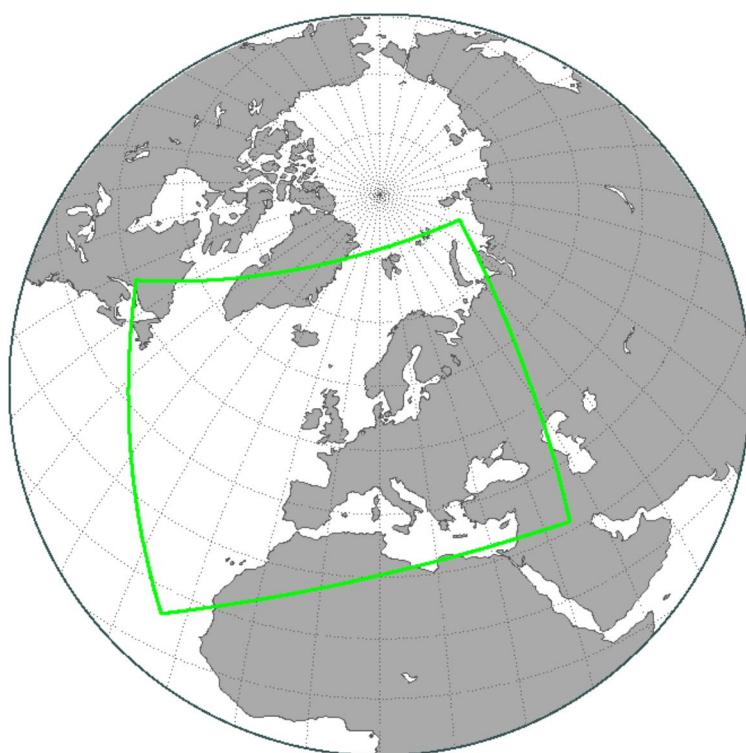
1.3 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk beschrijven we de resultaten van de verificatie van GLAM-EPS-neerslagverwachtingen, waarna in hoofdstuk 3 de resultaten voor het ECMWF-EPS product worden beschreven. Vervolgens onderzoeken we de mogelijkheid om te komen tot een zinvolle en snel te bepalen alarmering, waarna dit onderzoeksrapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Analyse van neerslagverwachtingen

2.1 GLAM-EPS data

Het Grand Limited Area Ensemble Prediction System (GLAM-EPS) is een product van het HIRLAM – ALADIN-consortium waar KNMI lid van is. De beschikbare modeldata heeft als analysetijd 00:00 UTC (en daarmee één van de vier normaliter operationeel beschikbare runs), voor de periode 1 oktober 2014 t/m 31 december 2016. Dit ensemble runt tot 54 uur vooruit met een uitvoertijdstap van 3 uur. In Figuur 2.1 is het totale GLAM-EPS-domein te zien.



Figuur 2.1 Domein van GLAM-EPS

Elk individueel ensemble bestaat uit 28 leden, die feitelijk opgebouwd zijn uit 4 onverstoorde (control) runs en 6x4 verstoorde runs, waarbij gebruik wordt gemaakt van een multi-model aanpak met 4 verschillende modelversies (HIRLAM met 2 verschillende convectieschema's en ALARO met 2 verschillende bodemschema's). Voor de verstoorde runs wordt gebruik gemaakt van 24 leden van het ECMWF EPS. In feite betreft het dus een dynamische *downscaling* van het ECMWF EPS naar hogere resolutie, d.w.z. van ~ 18 km voor ECMWF EPS naar ~ 8 km voor GLAM-EPS. Figuur 2.2 toont de gridcellen van GLAM-EPS binnen het beheergebied van Rijnland.

Bij GLAM-EPS wordt gebruik gemaakt van een zogenoemd *lagged* ensemble, d.w.z. dat 2 opeenvolgende runs gecombineerd worden tot een totaal ensemble van 52 leden (4 control runs en 12x4 verstoorde runs). In voorliggende studie hebben we echter bijna uitsluitend gebruik gemaakt van het *non-lagged* ensemble van 28 leden, met uitzondering van de verificatieresultaten in paragraaf 2.3.



Figuur 2.2 GLAM-EPS gridcellen voor het beheergebied van Rijnland

2.2 Verificatie metrics

2.2.1 Brier (skill) score

De Brier score (BS) is gedefinieerd als de gemiddelde kwadratische fout van de kansverwachtingen:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_j^f - p_j^o)^2,$$

waarbij N het totaal aantal gevallen is, p^f de verwachte kans en p^o het wel/niet optreden van de gebeurtenis; p^o kan dus uitsluitend de waarde 0 of 1 hebben. De Brier score is negatief georiënteerd, zodat perfecte verwachtingen een BS gelijk aan 0 hebben.

De Brier score van een verwachtingssysteem wordt vaak vergeleken met die van een referentiesysteem (BS_{ref}) en uitgedrukt in de vorm van een *skill score*, de Brier skill score (BSS):

$$BSS = \frac{BS - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}},$$

omdat de Brier score van perfecte verwachtingen (BS_{perf}) gelijk aan 0 is. Hierbij zijn de *sample* klimatologische relatieve frequenties gebruikt als referentieverwachtingen in deze studie.

2.2.2 Reliability diagrammen

Een andere veelgebruikte *metric* (maat) voor verificatie is het zogenoemde *reliability diagram* (zie bijv. Fig. 2.4), waarin de waargenomen relatieve frequenties worden getoond als functie van de 20 *gebinde* verwachte kansen (aangegeven door de symbolen). Voor *perfectly reliable* verwachtingen is de waargenomen frequentie gelijk aan de verwachte kans, zodat alle punten in het diagram op de diagonaal (de gestippelde lijn in Fig. 2.4) liggen. De gestreepte lijn in Fig. 2.4 geeft de zogenoemde no-skill lijn aan, wat betekent dat punten boven (onder) die lijn positief (negatief) bijdragen aan de skill (in termen van de BSS).

2.2.3 Continuous ranked probability (skill) score

Nog een veelgebruikte verificatiescore is de zogenoemde continuous ranked probability score (CRPS), een integrale score voor de hele kansverdeling die als volgt gedefinieerd is:

$$\text{CRPS} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} [F(y) - F_o(y)]^2 dy,$$

waarbij $F(y)$ de cumulatieve dichtheidsfunctie (CDF) voor een continue predictand y is en $F_o(y)$ een stapfunctie die gelijk is aan 0 als $y <$ waargenomen waarde en gelijk is aan 1 als $y \geq$ waargenomen waarde. Analoog aan de definitie van de BSS kan voor de CRPS ook een skill score gedefinieerd worden, namelijk de continuous ranked probability skill score (CRPSS):

$$\text{CRPSS} = 1 - \frac{\text{CRPS}}{\text{CRPS}_{\text{ref}}}.$$

2.3 Vergelijkende verificatie van GLAM-EPS en ECMWF-EPS neerslagverwachtingen op stations

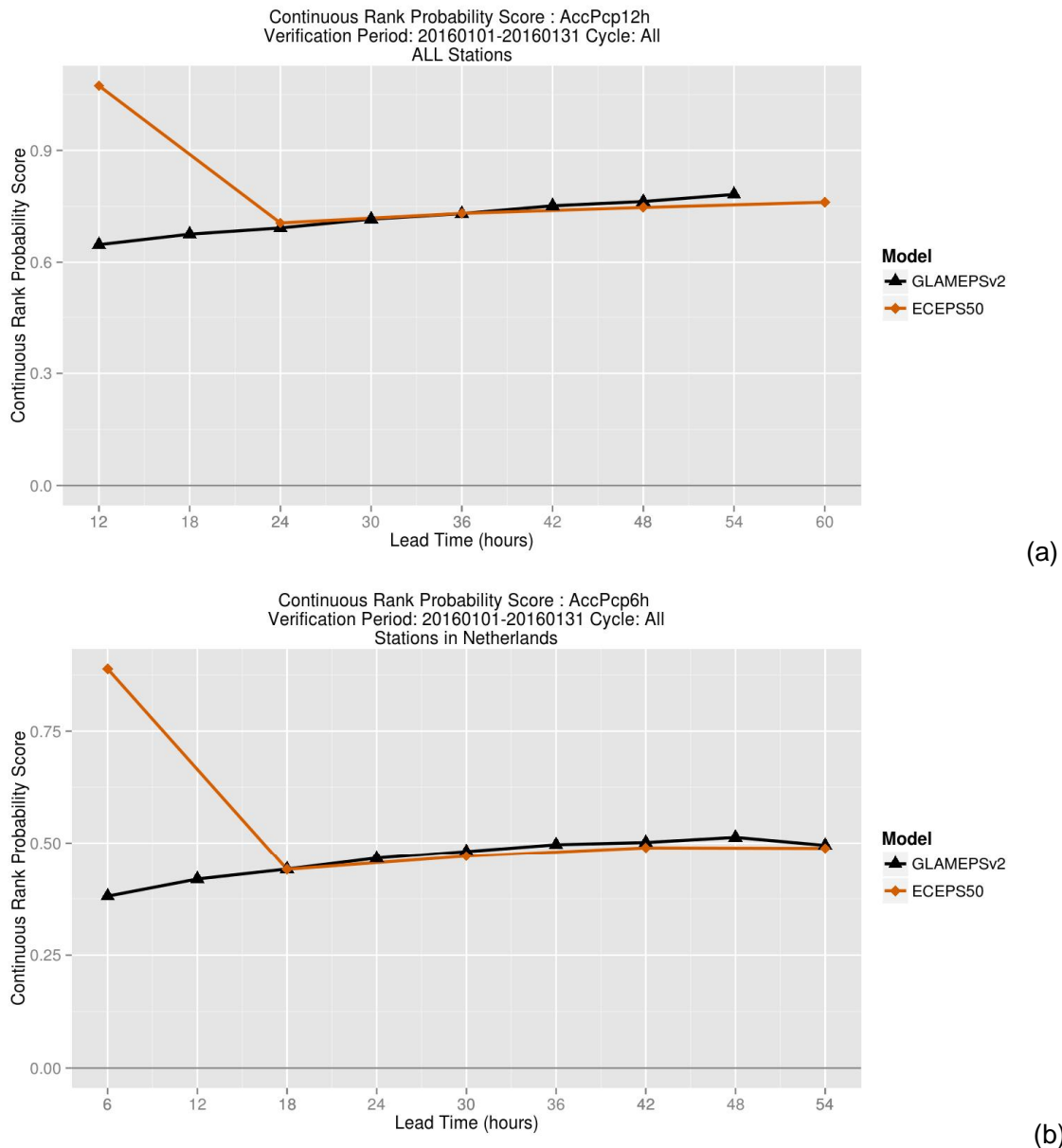
Het KNMI heeft de beschikking over de resultaten van een vergelijkende verificatie van de GLAM-EPS en ECMWF-EPS neerslagverwachtingen voor alle stations in Nederland en het hele GLAM-EPS domein (zie Figuur 2.1).

Hierbij is gebruik gemaakt van een aantal verificatie *metrics*: de Brier skill score (BSS), de continuous ranked probability score (CRPS) en reliability diagrammen, die in paragraaf 2.2.2 beschreven zijn. Merk op dat in deze paragraaf zowel het volledige GLAM-EPS van 52 leden geverifieerd is als alleen de 28 *non-lagged members* (zie ook Appendix A.1).

Deze verificatie is uitgevoerd op stationsniveau: voor een aantal meetstations is bekeken hoe de ECMWF- en GLAM-EPS-verwachtingen direct boven dat station zich verhouden tot de grondmetingen. Daarmee wordt enigszins voorbijgegaan aan het verschil in ruimtelijke resolutie van de twee producten. Er treedt namelijk een zogenaamd *double penalty* effect op wat in het nadeel van GLAM-EPS is. Het beheergebied van Rijnland wordt bedekt door een significant groter aantal GLAM-EPS-cellen dan ECMWF-EPS-cellen. Als de neerslagverwachtingen worden gebruikt om schattingen te maken van gebiedsgemiddelde neerslag, zullen die schattingen dus van elkaar kunnen verschillen. Een vergelijkende verificatie van neerslagverwachtingen op die ruimtelijke schaal is niet uitgevoerd. Als er reden is om aan te nemen dat een hogere resolutie tot betere schattingen zou leiden, zou er dus een niet-geïdentificeerd voordeel voor GLAM-EPS kunnen bestaan.

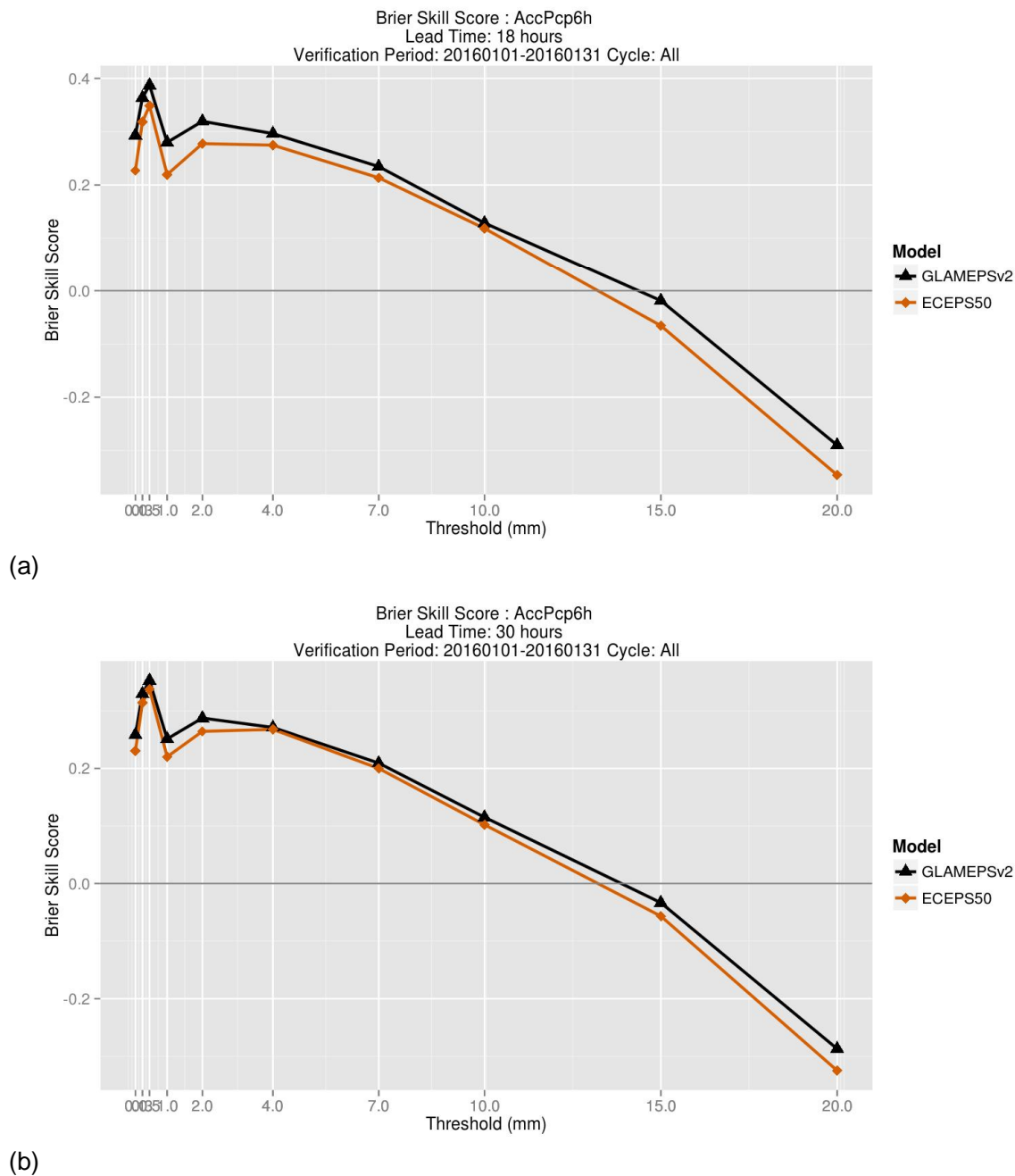
De vraag is of dat in het geval van het vlakke Rijnland ook zo zou/zal zijn. In paragraaf 2.3.1 worden de verificatieresultaten voor een wintermaand (januari 2016) getoond en in paragraaf 2.3.2 voor een zomermaand (juli 2015).

2.3.1 Vergelijkende verificatie voor een wintermaand (januari 2016)



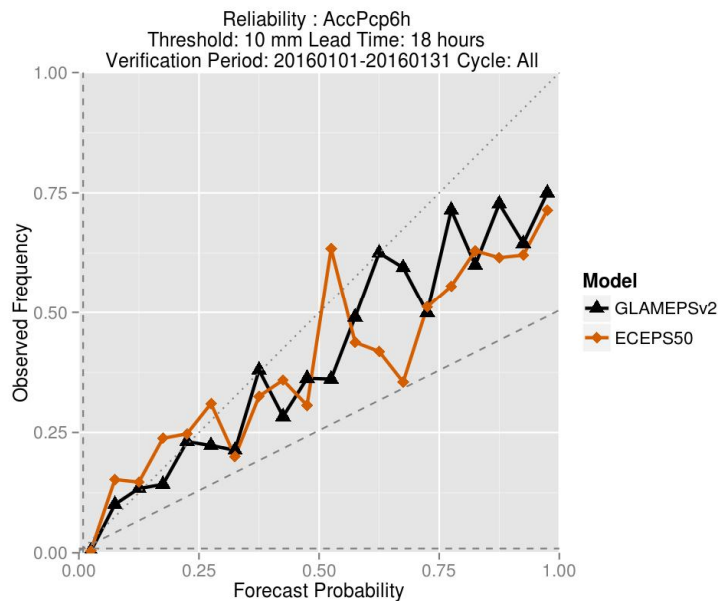
Figuur 2.3 CRPS als functie van de verwachtingstermijn voor GLAM-EPS (zwart) en ECMWF-EPS (oranje) voor (a) 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations en (b) 6-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations in Nederland op basis van data in januari 2016.

De CRPS voor de verwachtingen van januari 2016 wordt als functie van de verwachtingstijd getoond voor alle stations in Figuur 2.3a en voor de Nederlandse stations in Figuur 2.3b. Hieruit volgt dat de GLAM-EPS neerslagverwachting meer *skill* (d.w.z. lagere CRPS) heeft ten opzichte van ECMWF-EPS voor de verwachtingstermijn tot 18 of 24 uur. Daarna is de *skill* vergelijkbaar.

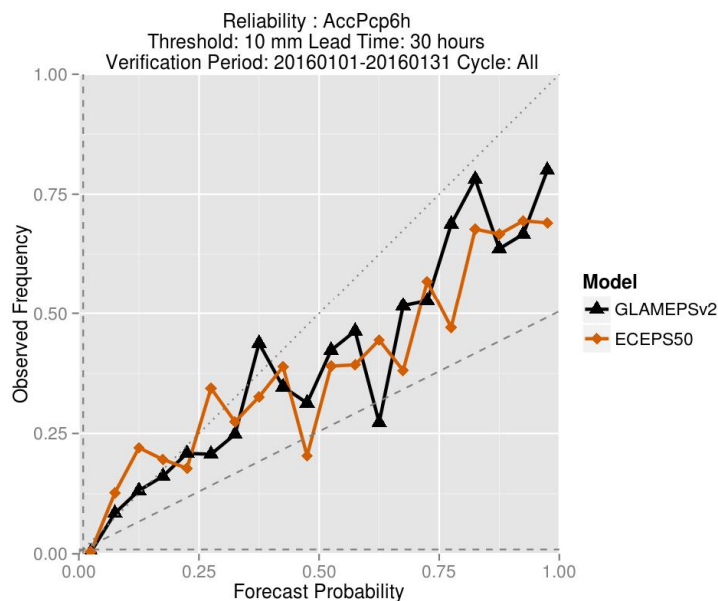


(b) Figuur 2.4 BSS als functie van de neerslagdrempel voor GLAM-EPS (zwart) en ECMWF-EPS (oranje) 6-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations en (a) een 18-h en (b) een 30-h verwachtingstermijn op basis van data in januari 2016.

Kijken we naar de Brier skill scores van 6-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations als functie van de neerslagdrempel voor de 18-h (Figuur 2.4a) en 30-h verwachtingstermijn (Figuur 2.4b), dan zien we dat de GLAM-EPS neerslagverwachtingen meer *skill* (d.w.z. hogere BSS) hebben dan die van ECMWF-EPS en dat ze *skillful* zijn voor drempels < 15 mm/6 h. De bijbehorende reliability diagrammen voor een drempel van 10 mm/6 h staan in Figuur 2.5, waaruit afgeleid kan worden dat de GLAM-EPS neerslagverwachtingen meer *reliable* zijn (d.w.z. dat de meeste punten in de figuur dicht bij de diagonaal liggen) dan die van het ECMWF-EPS.



(a)

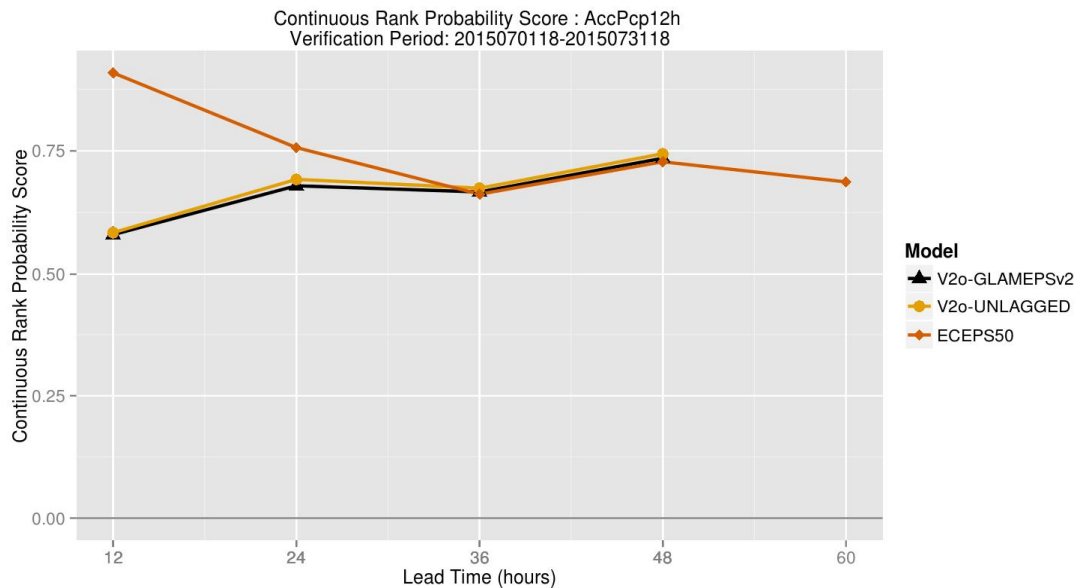


(b)

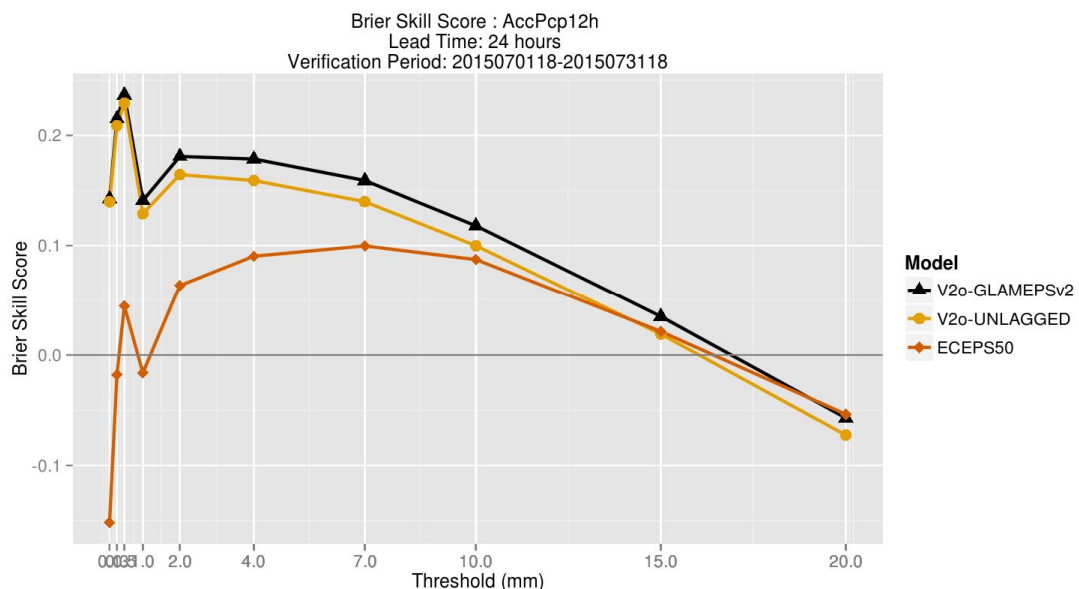
Figuur 2.5 Reliability diagram voor een neerslagdrempel van 10 mm/6 h voor GLAM-EPS (zwart) en ECMWF-EPS (oranje) 6-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations en (a) een 18-h en (b) een 30-h verwachtingstermijn op basis van data in januari 2016.

2.3.2 Vergelijkende verificatie voor een zomermaand (juli 2015)

De CRPS voor de verwachtingen van juli 2015 wordt als functie van de verwachtingstijd getoond voor alle stations in Figuur 2.6. Hieruit volgt dat de GLAM-EPS neerslagverwachtingen meer *skill* (d.w.z. lagere CRPS) hebben dan die van ECMWF-EPS voor de verwachtingstermijn tot in ieder geval 24 uur. Daarna is de CRPS vergelijkbaar.

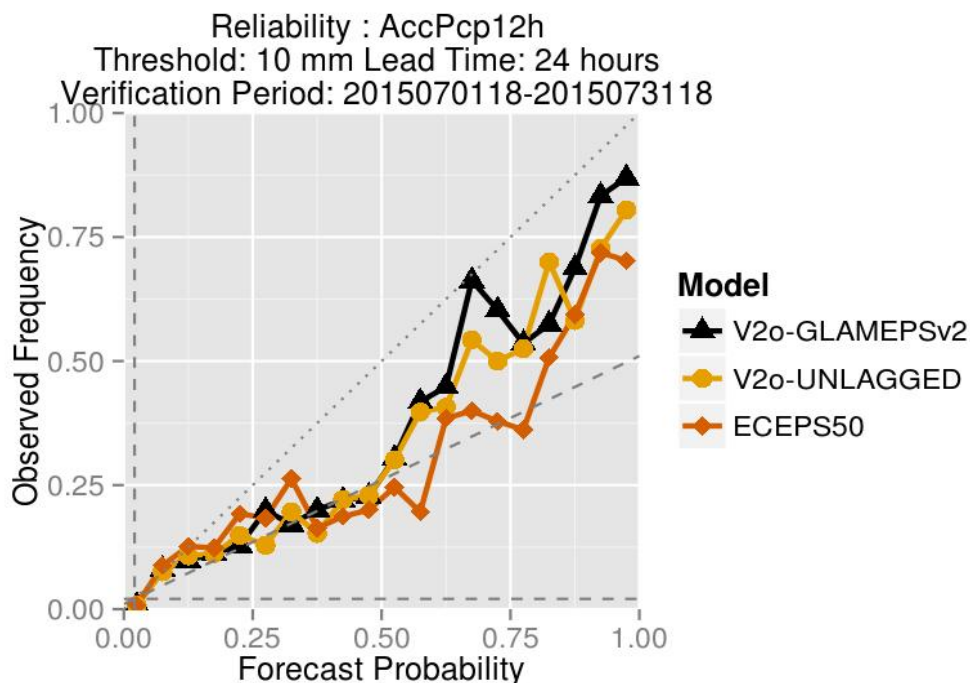


Figuur 2.6 CRPS als functie van de verwachtingstermijn voor het volledige GLAM-EPS (zwart), het 'unlagged' deel (geel) en ECMWF-EPS (oranje) voor 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations op basis van data in juli 2015.



Figuur 2.7 BSS als functie van de neerslagdrempel voor het volledige GLAM-EPS (zwart), het 'unlagged' deel (geel) en ECMWF-EPS (oranje) voor 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations en een 24-h verwachtingstermijn op basis van data in juli 2015.

In Figuur 2.7 worden de Brier skill scores van 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations als functie van de neerslagdrempel en voor de 24-h verwachtingstermijn getoond. Hieruit volgt dat de GLAM-EPS neerslagverwachtingen meer *skill* (d.w.z. hogere BSS) hebben dan die van ECMWF-EPS en dat ze *skillful* zijn voor drempels < 15 mm/12 h. Het bijbehorende reliability diagram voor een drempel van 10 mm/12 h staat in Figuur 2.8, waaruit kan worden afgeleid dat de GLAM-EPS neerslagverwachtingen dichter bij de diagonaal liggen en dus meer *reliable* zijn (d.w.z. dat voorspelde frequenties beter overeenkomen met geobserveerde frequenties voor de verschillende bins) dan die van het ECMWF-EPS.

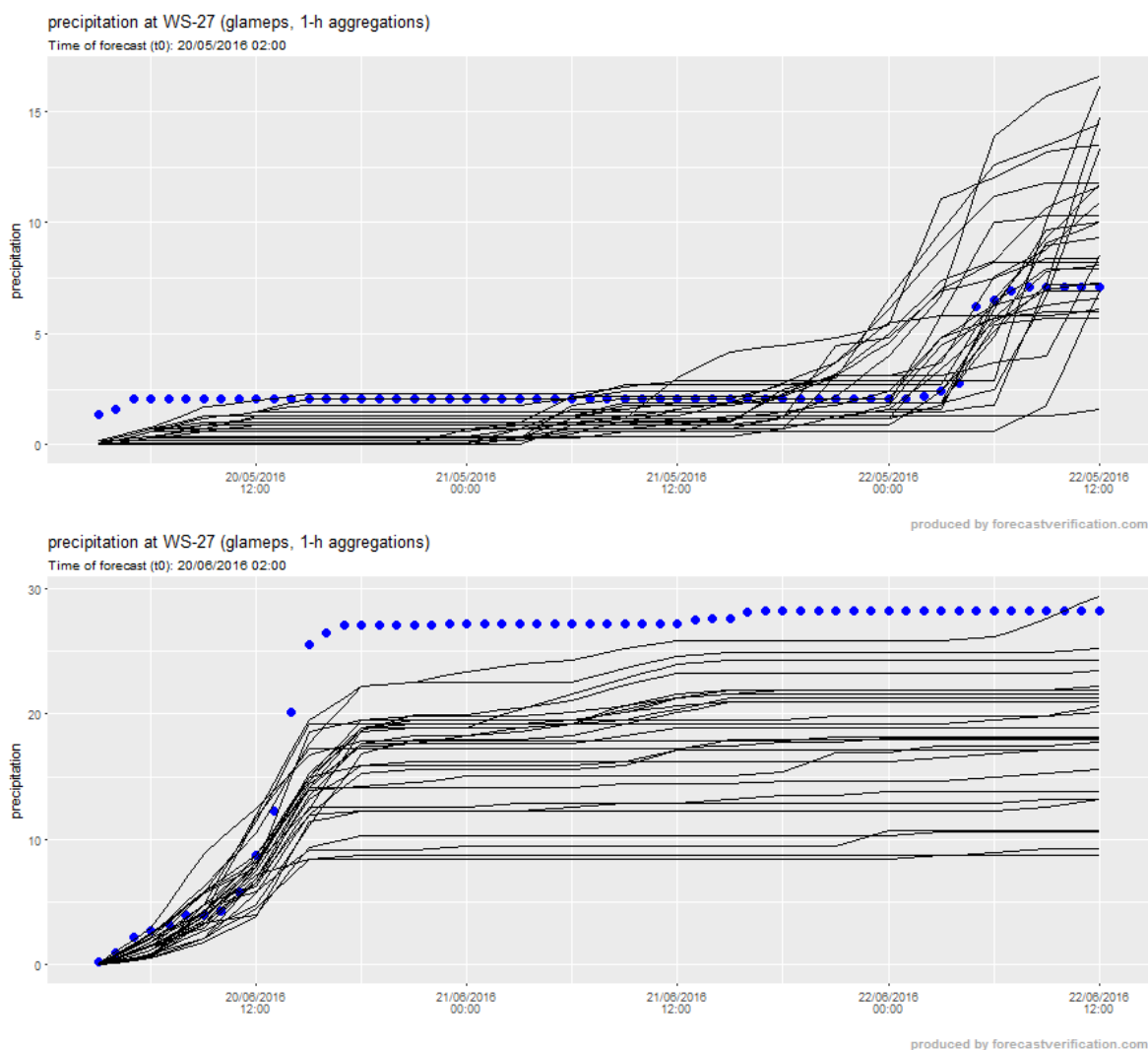


Figuur 2.8 Reliability diagram voor een neerslagdrempel van 10 mm/12 h voor het volledige GLAM-EPS (zwart), het 'unlagged' deel (geel) en ECMWF-EPS (oranje) voor 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations en een 24-h verwachtingstermijn op basis van data in juli 2015.

2.4 Verificatie van GLAM-EPS voor gebiedsgemiddelde neerslag

Een vergelijkbare verificatie van de GLAM-EPS verwachtingen is uitgevoerd voor de gebiedsgemiddelde neerslag voor het beheergebied van Rijnland. Hierbij is alleen het *non-lagged* ensemble van 28 leden gebruikt en als “waarheid” een gekalibreerde radardataset (Overeem et al, 2009), nadat de uurlijkse waarden zijn geaggregeerd tot 3-uur waarden.

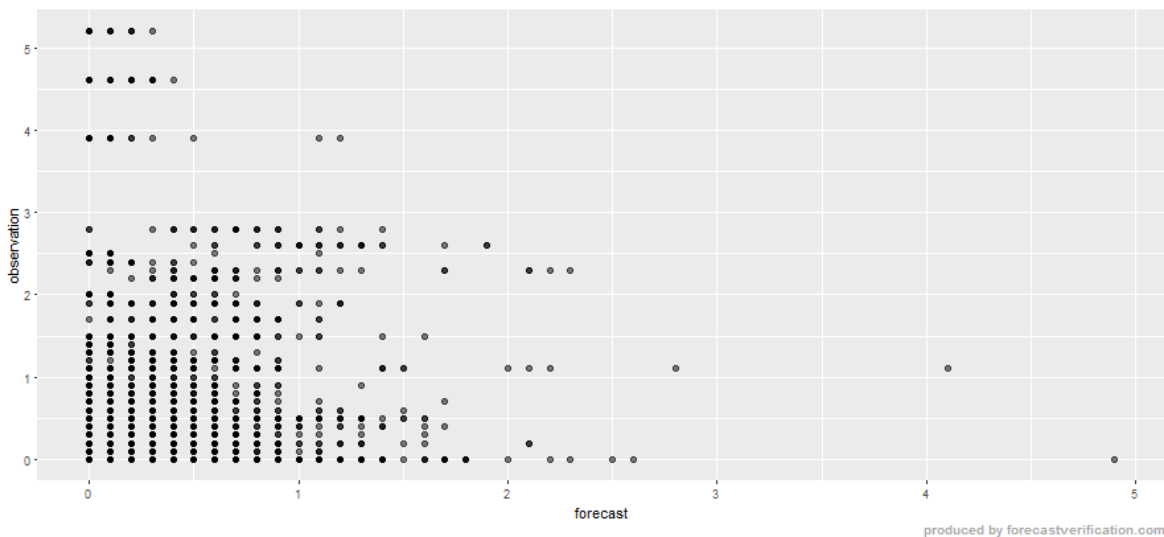
Zo is voor elke individuele verwachting een analyse mogelijk van de performance. Twee voorbeelden hiervan zijn in de onderstaande figuur getoond. De bovenste verwachting van 20 mei 2016 toont het verloop van de geaccumuleerde neerslag voor elk ensemble-lid en de werkelijk opgetreden neerslag. Bij deze verwachting is zichtbaar dat de “werkelijke” neerslag toevallig ongeveer in het midden uit is gekomen. Bij de tweede verwachting is dat niet het geval: uiteindelijk is daar de werkelijk gevallen neerslag groter dan dat 27 van de 28 ensemble-leden hadden verwacht. Dat past bij het karakter van ensembleverwachtingen: elk van de intervallen tussen twee ensemble-leden hebben een gelijke kans van voorkomen. Ook de buitenste ‘intervallen’ (het gebied ónder het onderste ensemble-lid en het gebied bóven het bovenste ensemble-lid) hebben een kans van voorkomen die gelijk is aan de kans van voorkomen van een interval tussen twee ensemble-leden.



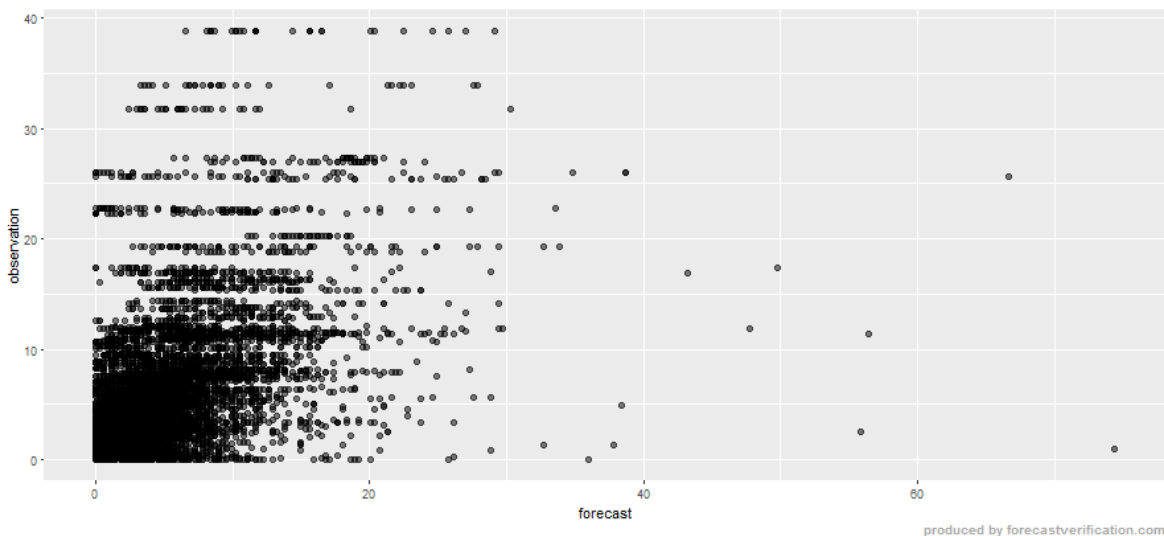
Figuur 2.9 Vergelijking van enkele neerslagverwachtingen (lijnen) met werkelijke neerslag (blauwe bolletjes)

De onderstaande figuren tonen *scatterplots* van de waargenomen neerslagsom versus de verwachte neerslagsom voor een tweetal aggregatieperioden (3 en 24 uur). We zien een aantal verschillen:

- 1 De neerslagsommen op de beide assen zijn een orde-groote verschillend. Dat is eenvoudig te verklaren: in 24 uur valt minimaal even veel, maar vaker veel méér neerslag dan in een periode van 3 uur die onderdeel uitmaakt van diezelfde 24 uur.
- 2 Bij de 3-uurssommen is duidelijk zichtbaar dat neerslagsommen worden afgerond op één-tiende millimeter. Bij de 24-uurssommen is dat op het eerste gezicht minder evident.
- 3 De scatters van de 24-uurssommen lijken zich iets meer te concentreren rond de diagonale 1:1-lijn (waar geldt: waarneming is gelijk aan verwachting). Echter, om die conclusie te trekken, kunnen we ons niet verlaten op een blik op de scatters alléén. De reden is dat we niet goed kunnen zien hoeveel punten op elkaar liggen.



Figuur 2.10 Scatterplots met vergelijking van verwachte en waargenomen neerslagsom over komende 3 uur



Figuur 2.11 Scatterplots met vergelijking van verwachte en waargenomen neerslagsom over komende 24 uur

In onderstaande figuren worden zogenoemde “skill scores” getoond. Bij die scores relateren we de kwaliteit van de beschouwde neerslagverwachting aan een zogenoemde “naïeve verwachting”. Die verwachting is in dit geval de klimatologie. Als we kijken naar de beschikbare metingen, weten we dat er in bijv. 10% van de gevallen méér dan 5 mm neerslag valt in 3 uur tijd, in bijv. 20% méér dan 4 mm per 3 uur, etc. (NB: dit zijn fictieve getallen!). Anders gezegd: zónder weermodellen van het KNMI en het ECMWF maar mét een archief van neerslagwaarnemingen of mét de Enkhuizer Almanak¹, zouden we ook een kansverwachting van neerslag kunnen maken: een zogenoemde “klimatologische verwachting”. De “skill” van de GLAM-EPS- en ECMWF-verwachtingen vertellen ons dan hoeveel beter of slechter die verwachtingen zijn dan deze klimatologische verwachting of de Enkhuizer Almanak.

De onderstaande figuren tonen de Brier Skill Scores en de Continuous ranked probability skill scores. De aard van die scores -en dus ook van de *skill* scores – verschilt.

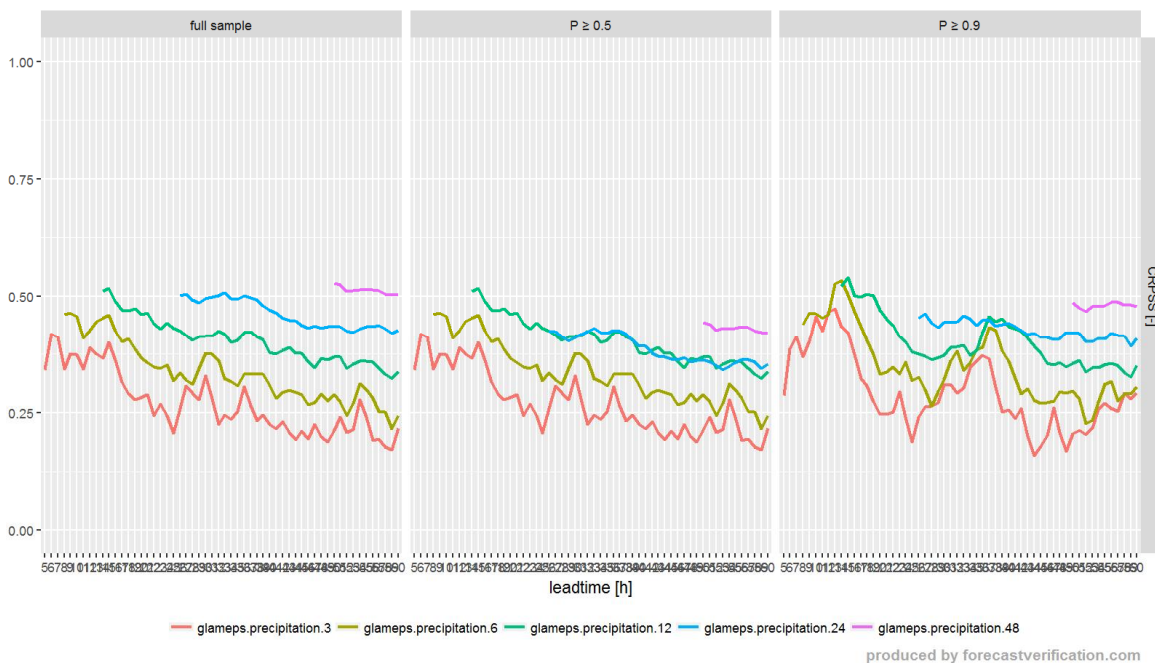
De Brier Score (paragraaf 2.2.1) zegt iets over de fout in de verwachte kansen op een vooraf gedefinieerde gebeurtenis. Die gebeurtenis kan bijvoorbeeld zijn: overschrijding van een neerslagdiepte van 15 mm in een periode van 3 uur. In onderstaande figuren wordt die gebeurtenis gedefinieerd als percentiel van de klimatologische verdeling. Het 90^e percentiel vertegenwoordigt dan de neerslagdiepte/tijd die in 90% van de gevallen onderschreden wordt. Anders gezegd: in 10% van de gevallen nemen we een grotere neerslagdiepte waar. De Brier Score zegt dan iets over de gemiddelde kwadratische fout in de verwachte kansen op overschrijding van het bewuste percentiel (zie paragraaf 2.2.1).

De CRPS (paragraaf 2.2.3) is niet gebaseerd op gebeurtenissen. Bij de CRPS gaat het om een vergelijk tussen de cumulatieve kansverwachting (een S-curve met neerslagdiepte op de horizontale as en de bijbehorende over- of onderschrijdingskans op de verticale as) en de waarneming. Die laatste wordt een geblokte-S curve. Bij onderstaande CRPS figuren worden scores getoond voor meerdere deelverzamelingen van de totaal beschikbare dataset. Die deelverzameling wordt dan bepaald door een percentiel van de klimatologie. De $P \geq 0.90$ laat dan de CRPS zien voor dat deel van de dataset waarbij de waarneming groter is dan het 90^e percentiel uit de klimatologie. We moeten er dan wel rekening mee houden dat bij toenemende waarde van P, de beschouwde deelverzameling steeds kleiner wordt. Daarmee neemt ook de onzekerheid (van de berekende waarde van die *metric*) toe. Die onzekerheid is in dit project niet geschat en niet getoond.

¹ Te bestellen voor €7,95 plus verzendkosten via www.almanak.nl



Figuur 2.12 Brier skill score voor de kans op gebeurtenissen "Overschrijding van het 50^e percentiel uit de klimatologische verdeling" (links) en "Overschrijding van het 90^e percentiel uit de klimatologische verdeling" (rechts) voor aggregatieperioden van 3, 6, 12, 24 en 48 uur.



Figuur 2.13 Continuous ranked probability skill score voor de volledige dataset (links) en de deelverzamelingen die worden gedefinieerd door waarnemingen hoger dan 50% van de klimatologische verdeling (midden) en 90% van de klimatologische verdeling (rechts) voor aggregatieperioden van 3, 6, 12, 24 en 48 uur.

Uit deze figuren kunnen we het volgende concluderen:

- De Brier Skill Score en de Continuous Ranked Probability Skill Score van de beschouwde verwachtingen is altijd positief. Anders gezegd: de GLAM-EPS-neerslagverwachtingen zijn beter dan die van klimatologie (of de “Enkhuizer Almanak”).
- De *skill* van de verwachtingen neemt af met toenemende zichttijd.
- De *skill* van de verwachtingen neemt toe met toenemende lengte van de aggregatieperiodes. 24-uurs-aggregaties zijn beter te schatten dan 3-uursaggregaties. Dit komt omdat eventuele fouten in de timing van een bui sterker doorwerken in kleinere aggregatieperiodes.
- De BSS neemt af met toenemende extremitet van de beschouwde neerslaggebeurtenissen. De kans op overschrijding van een extreem hoge neerslagdiepte (rechtergrafiek in Figuur 2.12; $P \geq 0.9$) is moeilijker vast te stellen dan de kans op overschrijding van een minder extreem hoge neerslagdiepte (linker-figuur; $P \geq 0.5$). Voor CRPSS is dit niet per sé het geval. Hier hebben we, bij de beschouwing van *skill*, te maken met het feit dat de kwaliteit van de klimatologische verwachting sterk afneemt bij toenemende waarde van P . Daarom zien we vaak dat CRPSS toeneemt bij kleinere deelverzamelingen waarbij het aandeel van de individuele waarnemingen op de totaalscore toeneemt.

2.5 Conclusies en aanbevelingen

Uit bovenstaande verificatieresultaten kunnen we het volgende concluderen:

- GLAM-EPS-verwachtingen hebben *skill* boven klimatologie voor alle beschouwde zichttijden, alle beschouwde aggregatieperiodes, alle beschouwde deelverzamelingen (bij CRPSS) en alle gedefinieerde neerslaggebeurtenissen (bij BSS).
- Hoewel de BSS en CRPSS-lijnen van GLAM-EPS bijna altijd bóven die van het ECMWF liggen (en bij *skill* geldt: hoger is beter), is op basis van de hier uitgevoerde analyse niet vast te stellen of die verschillen statistisch significant zijn.
- Een mogelijke uitzondering op het voorgaande is de verwachting voor de zeer korte termijn: 6 uur voor de 6-uurssommen en 12u voor de 12-uurssommen. In die gevallen zijn de CRPS en BS scores duidelijk in het voordeel van GLAM-EPS.

Over het algemeen kan dan ook worden geconcludeerd dat de *skill* van de GLAM-EPS-neerslagverwachtingen voor de overlappende periode (0-54 uur) beter (eerste dag, met name voor de zomer) of vergelijkbaar (tweede dag) is dan c.q. met het ECMWF-EPS.

Het lijkt dan ook nuttig om de ensembleverwachtingen te gaan gebruiken, in ieder geval om de onzekerheid voor de kortetermijnverwachting te weten en daarop zo nodig te kunnen anticiperen.

Op dit moment is GLAM-EPS alleen beschikbaar voor de rijksoverheid. Voor waterschappen als Rijnland moet door KNMI een uitsnede worden gemaakt voor Nederland en dient KNMI deze uitsnede te gaan leveren. GLAM-EPS blijft nog tot medio 2019 operationeel draaien. Tegen die tijd zal het worden vervangen door het nieuwe hoge-resolutie (2.5 km) ensemble HarmonEPS op basis van het Harmonie-Arome model. Dit model is niet-hydrostatisch en heeft daarmee een betere fysische beschrijving van convectieve neerslag.

In het geval een keuze gemaakt zou moeten worden tussen de GLAM-EPS en ECMWF-EPS-producten, zouden in aanvulling op bovenstaande conclusies nog de volgende overwegingen meegenomen kunnen worden:

- Het effect van de neerslagverwachtingen op verwachtingen van boezembelasting. Het “geheugen van het watersysteem” en het niet-lineaire, hydrologisch gedrag zouden de verschillen teniet kunnen doen. Dit is in voorliggende studie niet beschouwd. En het gaat in het waterbeheer niet om de neerslagverwachting maar om de optredende boezemwaterstanden die volgen uit het samenspel van boezembelasting en mogelijke, tijdige inzet van boezemgemaal.
- De zichttijden van de verschillende producten: 54 uur voor GLAM-EPS en ~15 dagen voor ECMWF-EPS. Dit biedt eventueel de mogelijkheid om een zogenoemde *blend* te gebruiken: één neerslagschatting die gemaakt is door GLAM-EPS en ECMWF-producten te combineren. Daar horen aanvullende overwegingen bij die hier niet zijn benoemd. Eén van de overwegingen is tot wanneer de neerslagproducten nog ‘skill’ hebben.
- De respectievelijke kosten van het betrekken van de twee producten (zoals bijvoorbeeld initiële kosten, leveringskosten, licentiekosten).

De levensduur van de producten: die van GLAM-EPS is eindig (tot medio 2019). KNMI ontwikkelt, als alternatief voor GLAM-EPS, een ensembleproduct op basis van het Harmonie-Arome model (HarmonEPS).

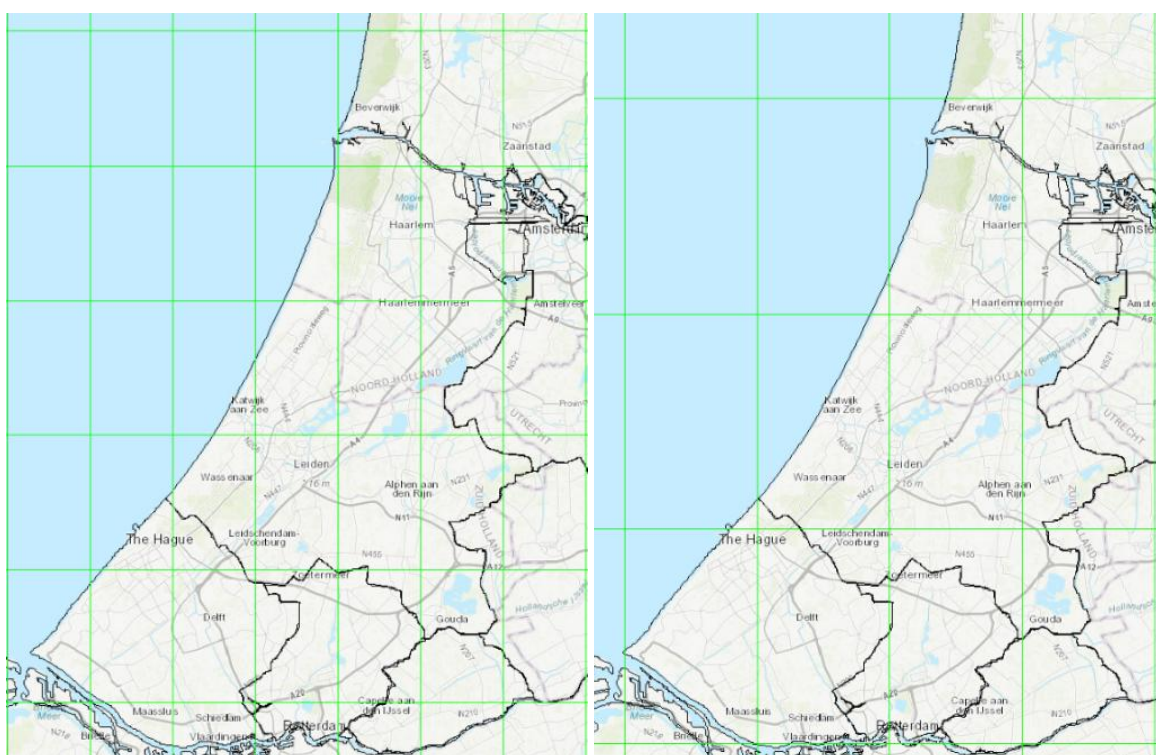
3 Analyse van alarmering met ECMWF-EPS-verwachtingen

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van de effectiviteit van huidige en alternatieve alarmeringsregels voor kritische neerslaggebeurtenissen op basis van de huidige ECMWF ensemble neerslagverwachtingen. Dit behandelt dus waarschuwingen op basis van alleen neerslagvoorspellingen. Het meenemen van recente voorgeschiedenis van gevallen neerslag en verwachte boezembelasting wordt in hoofdstuk 4 behandeld.

Voor de periode van 1 oktober 2014 tot en met 31 december 2016 zijn neerslagverwachtingen voor KNMI uitvoerlocatie Schiphol vergeleken met gebiedsgemiddelde gekalibreerde radarneerslag (Overeem et al, 2009) van Rijnland. Merk op dat hierbij de locatie Schiphol niet een zuivere puntlocatie is, maar het gemiddelde van de omliggende cellen in het modelgrid.

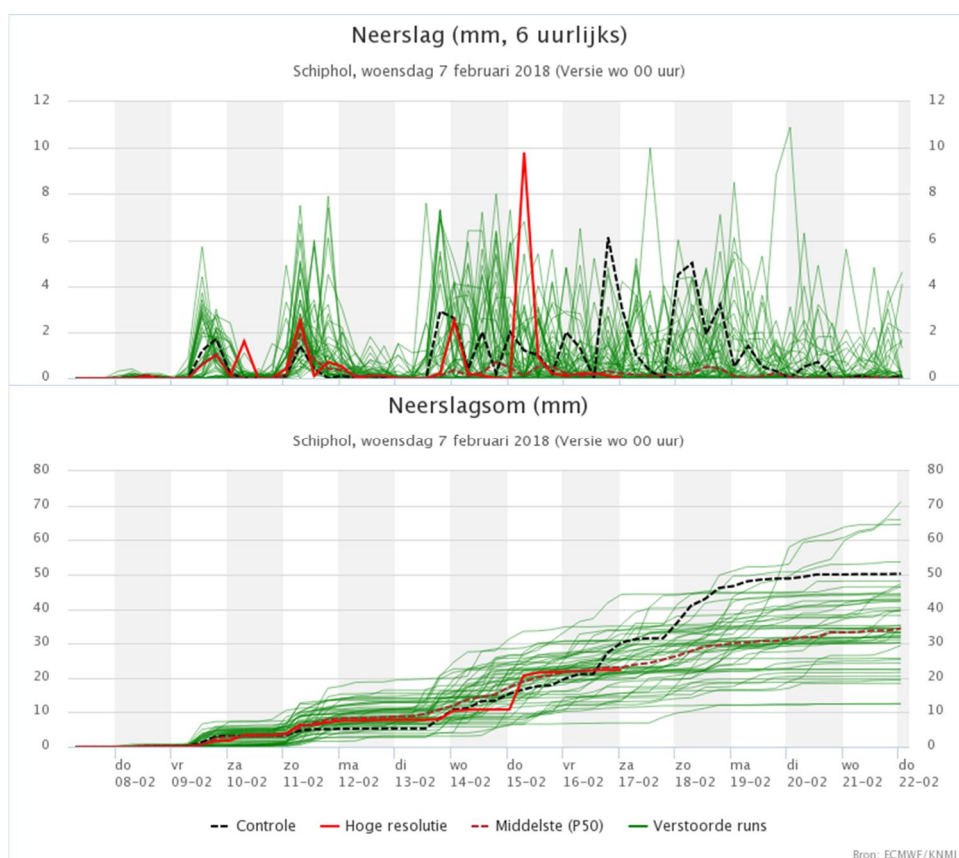
De effectiviteit van alarmeringsregels, zoals "de ensemble neerslagverwachting voor 48 uur geeft 20% kans op 15 mm/dag in 24 uur", wordt gepresenteerd. De resultaten kunnen door Rijnland worden gebruikt om de effectiviteit van het huidige alarmeringsbeleid te duiden (ook al komen de nu door Rijnland gebruikte neerslagvoorspellingen niet direct van het KNMI). Het hoofdstuk eindigt met aanbevelingen over beslissingsregels voor alarmering op basis van ECMWF ensemble neerslagverwachtingen.



Figuur 3.1 Ligging van ECMWF modelgrids: links deterministisch en rechts het ensemble grid

3.2 Ensemble neerslagverwachtingen van het European Centre for Medium-range Weather Forecasting

Een ensemble verwachting is de *state-of-the-art* techniek om een bandbreedte weer te geven van bijvoorbeeld de verwachte neerslag, met daarbij de kans van optreden. Ensembleverwachtingen onderscheiden zich van statistische kansverwachtingen, door elke dag de stromingsafhankelijke onzekerheid mee te nemen op basis van de laatste metingen en welke weersystemen zich de komende dagen kunnen voordoen. Waar en wanneer en welke weersystemen kunnen optreden wordt bepaald met een meteorologisch model. Het mooie hiervan is dat niet alleen 'onzekerheid' wordt weergegeven, maar het ook blijkt als een relatief stabiele weersituatie leidt tot goed te verwachten weer voor de komende dagen, dus 'zekerheid'. Om één ensembleverwachting te maken wordt dat model meerdere keren gedraaid, steeds met iets aangepaste beginwaarden en parameterwaarden (want daarvan weten we ook de precieze waarden niet). Het European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) maakt op deze manier (2 keer per dag) een ensembleverwachting van 50 verstoorte leden ('members'). Het ECMWF probeert dat zo te doen, dat elk van die 50 leden een even grote kans van optreden heeft. Grofweg gezegd, als bijvoorbeeld 10 leden (van de 50) voor de komende 24 uur een neerslag van 15 mm of meer verwachten, dan is de verwachte kans 20%. Als de leden dicht bij elkaar zitten, is de verwachting relatief zeker, als de leden ver van elkaar af zitten is het weer boven onze locatie even moeilijker te verwachten en relatief onzeker.



Figuur 3.2 ECMWF-EPS, ensemble neerslagverwachting voor KNMI uitvoerlocatie Schiphol. Elk van de 50 groene lijnen heeft een even grote verwachte kans van optreden

De ensembleverwachtingen ('ensemble prediction system: EPS') van het ECMWF kijken 15 dagen vooruit. Voor het beheer van de boezem van Rijnland, en dan vooral om te bepalen of er moet worden voorgemalen om een te hoge boezemstand te voorkomen, wordt vooral gekeken naar neerslagverwachtingen voor de komende 5 dagen tot maximaal 10 dagen. Het KNMI levert de ECMWF-EPS verwachtingen voor een aantal locaties in Nederland. Voor Rijnland is de meest representatieve uitvoerlocatie Schiphol.

Figuur 3.2 laat de resulterende ensemble neerslagverwachting zien. Door een bepaald aantal dagen vooruit te kijken en een neerslagdrempel en kansdrempel af te spreken, kunnen waarschuwingen worden gegenereerd voor grote hoeveelheden neerslag die mogelijk tot een stijging in de boezemstand zullen leiden. In de komende paragrafen wordt de effectiviteit van dergelijke waarschuwingen geanalyseerd.

3.3 Specificaties van de verificatie analyse

Voor de analyse in dit hoofdstuk zijn de gegevens gebruikt zoals weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Gebruikte gegevens

Data Periode 1 oktober 2014 - 31 december 2016	Tijdstap
ECMWF-EPS neerslagverwachtingen voor KNMI uitvoerlocatie Schiphol (06240)	6 uur
Radar neerslagmetingen, gebiedsgemiddeld en twee polders	1 uur

Het archief van ruim twee jaar verwachtingen wordt steeds doorzocht op basis van een bepaalde alarmeringsregel. Alarmeringsregels variëren in verwachtingshorizon (hoeveel dagen vooruit), neerslagdrempel (bijvoorbeeld 15mm/24uur), en kansdrempel (bijvoorbeeld: de verwachte kans moet 10% of meer zijn dat de neerslagdrempel wordt overschreden).

Omdat de beoogde toepassing is om te alarmeren voor grote hoeveelheden neerslag en daaropvolgend waterbezwaar op de boezem, wordt in deze analyse scherp gekeken naar of het begin van de extreme neerslag goed wordt verwacht. Als de neerslag te laat wordt verwacht, is er geen tijd meer om voor te malen. Als de neerslag te vroeg wordt verwacht, en er wordt voorgemalen, dat is de boezemstand langer dan nodig lager dan normaal. Door de verwachte neerslagoverschrijdingen te vergelijken met de gemeten neerslaggebeurtenissen (op basis van gekalibreerde radar), kan worden nagegaan hoe vaak een bepaalde alarmeringsregel zou hebben geleid tot een goede waarschuwing, een gemiste gebeurtenis, een te vroege waarschuwing, of een te late waarschuwing. Tabel 3.2 geeft weer hoe in dit onderzoek de waarschuwingen zijn gekwalificeerd.

Tabel 3.2 Kwalificatie van waarschuwingen

Kwalificatie	Omschrijving
Hit	begin van event is tot op 12 uur van te voren en 6 uur te laat nauwkeuring verwacht
Hit - early	begin van event is verwacht, maar meer dan 12 uur te vroeg
Hit - late	begin van event is verwacht, wel nog tijdens het event, maar meer dan 6 uur te laat
Missed event	event is niet verwacht (gedurende de gemeten overschrijding was er geen overschrijding in de verwachtingen)
False alarm	verwachting gaf event aan, terwijl de metingen geen event lieten zien (geen overschrijding van de neerslagdrempel)

De verificatie van de effectiviteit van alarmeringsregels op basis van ECMWF-EPS neerslagverwachtingen is begonnen met voor Rijnland herkenbare regels. Vervolgens is onderzocht hoe de effectiviteit varieert als verder vooruit wordt gekeken, voor andere neerslagdrempels, en voor andere kansdrempels. Tot slot is op aanvraag van Rijnland, met het oog op lokale wateroverlast, de effectiviteit van de verwachtingen onderzocht voor twee polders. Samengevat, zijn de verificatie analyses verricht zoals aangegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Overzicht analyses

Verificatie analyses uitgevoerd voor:
Verwachtingen van 1 tot en met 5 dagen
Neerslagdrempels van 15 mm/dag, 30 mm/dag, 30 mm/48 uur, en 30 mm/72 uur
Kansdrempels (percentielen) van 0 tot en met 100%
Gebiedsgemiddelde neerslag Rijnland, Gouwepolder, Hogeveensepolder

De resultaten van deze analyses worden volgens de zelfde indeling hieronder gepresenteerd. Van een paar beslissingsregels zijn de resultaten uitvoerig weergegeven met tabellen en grafieken, ter illustratie. Van de overige beslissingsregels worden enkel de conclusies van de effectiviteit beschreven. De tabellen en grafieken met de resultaten van deze beslissingsregels, zijn opgenomen in de Annex B.

3.4 Gebiedsgemiddelde neerslag

3.4.1 Neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag

Van oktober 2014 t/m december 2016 laat de gekalibreerde radarneerslag 33 gebeurtenissen zien van 15mm in 24uur gebiedsgemiddeld boven Rijnland. De tabel hieronder laat zien hoeveel van deze gebeurtenissen één dag van te voren ('1-day forecast') goed waren verwacht, hoeveel gemist, en hoeveel *false alarms* het waterschap zou hebben gekregen. Elke kolom in de tabel laat dit zien voor een andere kansdrempel. De laatste kolom van de tabel geeft bijvoorbeeld aan dat als je alleen zou waarschuwen als de verwachte kans op overschrijding ('probability of exceedance') van 15mm 100% is, met andere woorden alleen als alle 50 leden van het ensemble boven de 15mm zitten, dat dan alle gebeurtenissen zouden worden gemist. Kijken we daarentegen naar de kolom van 2%, waarin met name de hoogste verwachting in het ensemble leidend is voor het geven van een waarschuwing, dan zien we dat van de 33 gebeurtenissen er 27 verwacht waren (19 met het begin nauwkeurig verwacht, 3 te vroeg, en 5 te laat). Zes gebeurtenissen wordt ook dan niet voor gewaarschuwd.

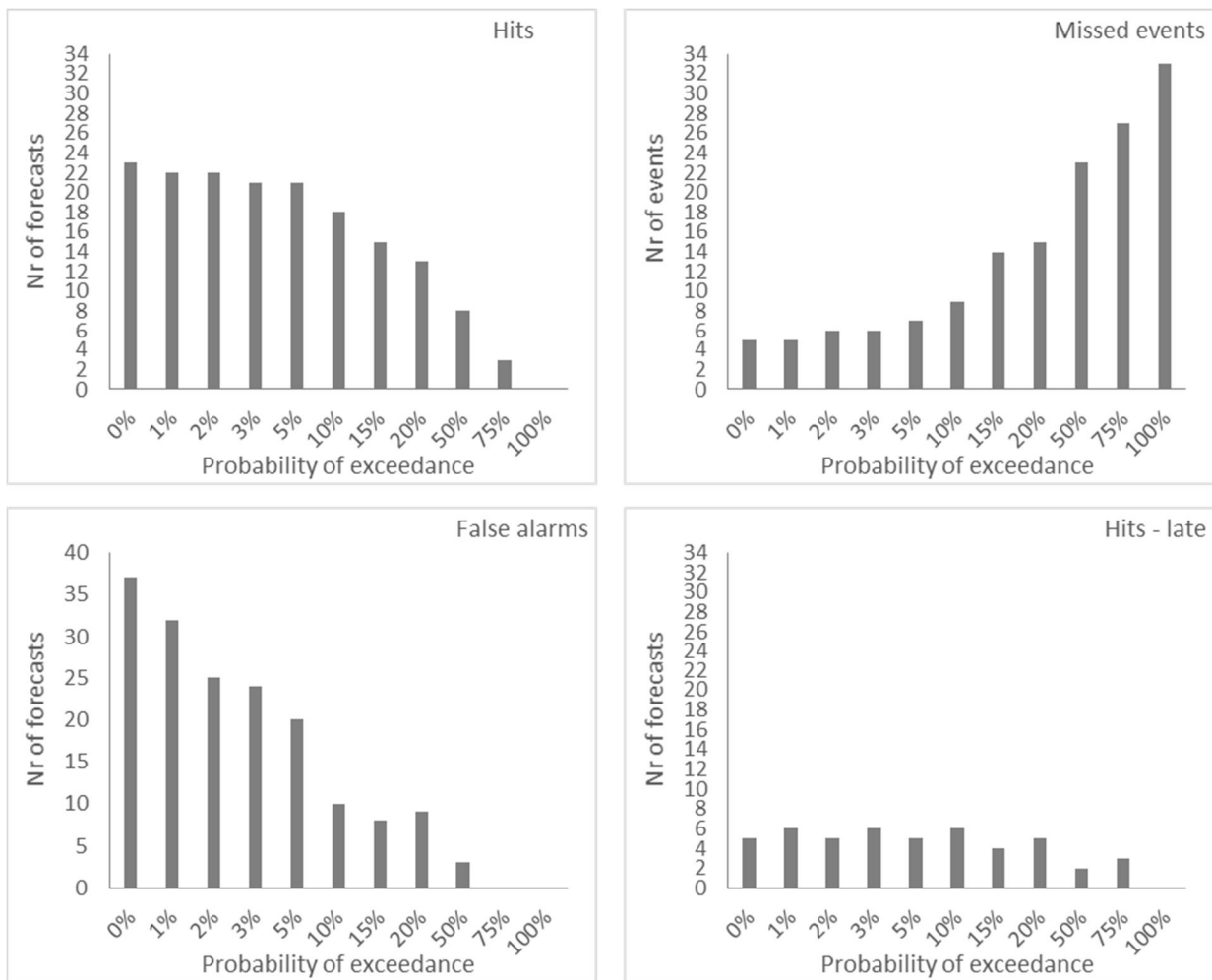
Op 25 andere momenten zou er een waarschuwing zijn ontvangen waarna de gemeten neerslag onder de 15mm per 24uur bleef (zie Tabel 3.2 in de vorige sectie voor de kwalificaties van de waarschuwingen). De tabel geeft dus de basisresultaten van elke verificatie-analyse van een waarschuwingsregel. Patronen zijn daaruit lastiger te halen; vandaar dat de informatie ook in grafieken is weergegeven. Figuur 3.3 laat in één oogopslag zien hoe het aantal goede waarschuwingen en *false alarms* afneemt met een hogere kansdrempel, en het aantal gemiste gebeurtenissen dus toeneemt. Het laatste kwadrant, rechtsonder, laat zien van hoeveel van de verwachte gebeurtenissen de start van de overschrijding te laat was verwacht. Dit omdat dat als voorwaarschuwing dan zijn waarde kan verliezen.

Figuur 3.3 laat zien dat voor de waarschuwingsregels voor 1 dag van te voren, voor een overschrijding van 15mm/24uur, voor kansdrempels van 10% en hoger het aantal goede verwachtingen sterk af begint te nemen. Grofweg kan twee derde van de neerslaggebeurtenissen van 15mm per dag goed worden verwacht met ECMWF-EPS.

Tabel 3.4 Resultaten Neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag

Probability of exceedance	1 -day forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events										
	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	20	19	19	18	18	16	13	12	8	3	0
Hits - early	3	3	3	3	3	2	2	1	0	0	0
Hits - late	5	6	5	6	5	6	4	5	2	3	0
Missed events	5	5	6	6	7	9	14	15	23	27	33
False alarms	37	32	25	24	20	10	8	9	3	0	0

Voor al de figuren geldt dat alleen de verticale as van de False Alarms afwijkend is. Dit is expres gedaan omdat er soms veel meer false alarms zijn, wat vervolgens alle andere assen op gelijk moeilijk af te lezen maakt.

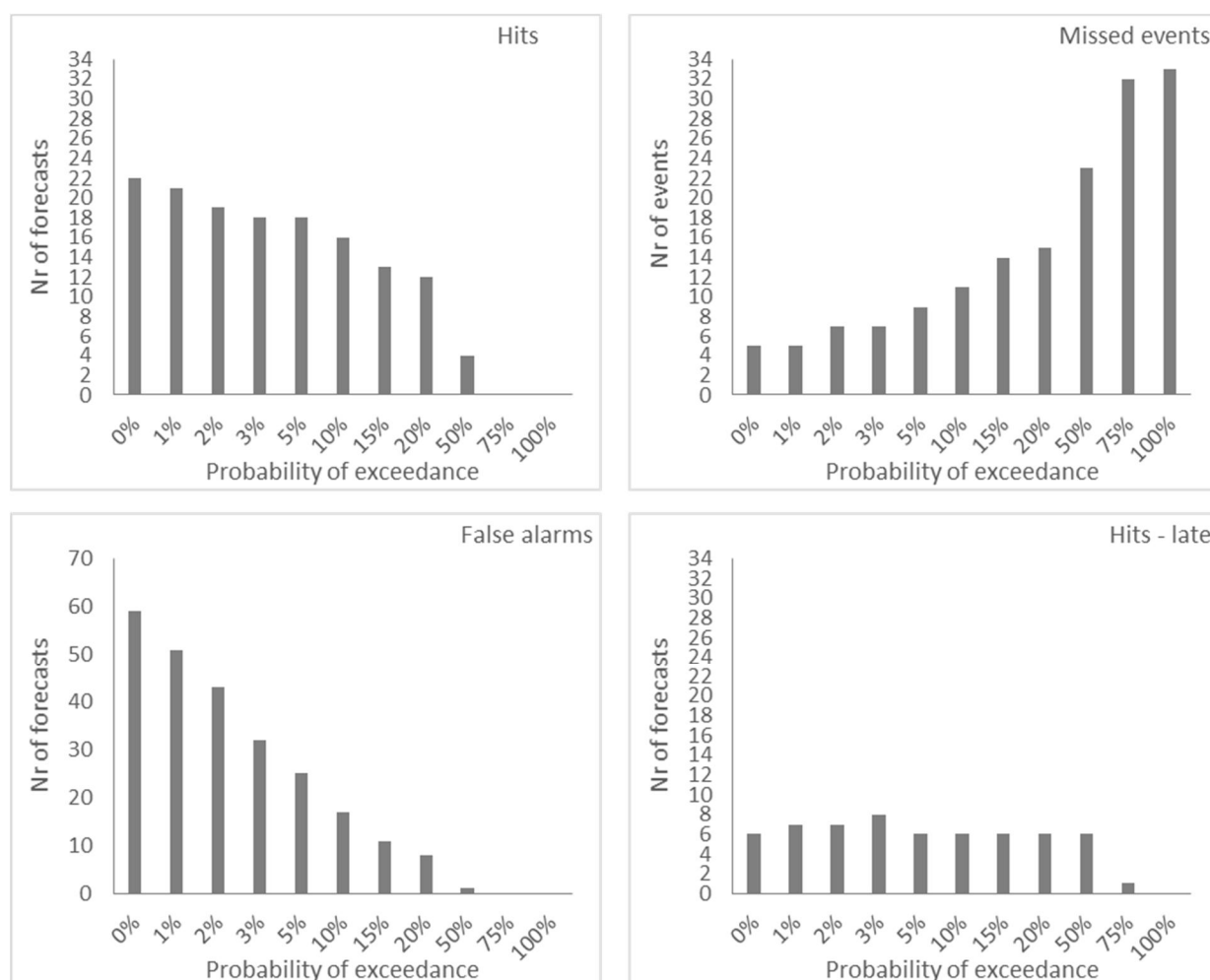


Figuur 3.3 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag

3.4.2 Neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

Als volgende stap kunnen we de effectiviteit van 1-dag voorwaarschuwen, vergelijken met 2 dagen vooruit waarschuwen. De verificatieresultaten voor 2 dagen vooruit zijn in Figuur 3.4 op dezelfde wijze gepresenteerd. Het aantal goede verwachtingen neemt voor de kansdrempel van 5% iets af van 21 voor 1-dag vooruit, naar 18 voor 2 dagen vooruit. Bij twee dagen vooruit zijn er ook meer *false alarms* voor 5%. Het aantal *false alarms* neemt snel af met elke hogere kansdrempel (Figuur 3.4, linksonder).

Figuur 3.4 laat zien dat 2-dagen van te voren, grofweg iets minder dan twee derde van de gebeurtenissen van 15mm of meer per dag, kan worden verwacht, mits kansdrempels rond de 5% worden gebruikt.



Figuur 3.4 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

3.4.3 Neerslagdrempel 30mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

Kijken we naar een hogere neerslagdrempel, bijvoorbeeld 30mm/24uur, dan blijkt dat in de metingen dat maar 4 keer voorkomt in de ruim twee jaar historie (oktober 2014 - december 2016). Deze gebeurtenissen zijn weergegeven in Tabel 3.5. Tabel 3.6 laat zien dat deze gebeurtenissen niet goed worden verwacht met ECMWF-EPS verwachtingen voor uitvoerlocatie Schiphol. Van de 4 gebeurtenissen wordt er slechts 1 verwacht, en dan nog maar met een minimale kans, en het begin van de overschrijding wordt in dat geval nog te laat verwacht. Ook uit de verificatie van de verwachtingen van 1-dag, 3-dagen, 4-dagen, en 5-dagen vooruit, volgt dat maximaal maar 1 van de 4 overschrijdingen van 30mm/24uur wordt verwacht.

Tabel 3.5 Gemeten neerslaggebeurtenissen van 30mm/24uur of meer, gebiedsgemiddeld Rijnland.

Begin	Eind
04/09/2015 17:00	05/09/2015 12:00
23/06/2016 04:00	23/06/2016 00:00
21/08/2016 11:00	22/08/2016 04:00
03/10/2016 02:00	03/10/2016 09:00

Tabel 3.6 Resultaten Neerslagdrempel 30mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

Probability of exceedance	2 -day forecast 30 mm in 1 days threshold 4 events										
	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hit - early	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hit - late	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Missed event	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
False alarm	14	11	8	6	6	5	2	1	0	0	0

3.5 Multi-day event thresholds

Naast neerslagdrempels per 24 uur, kan ook worden gekeken naar drempels voor totale neerslag over meerdere dagen. De resultaten voor 30mm/48uur en 30mm/72uur zijn hieronder weergegeven in Tabel 3.7 en Tabel 3.8.

Gebeurtenissen van 30mm/48uur komen een stuk vaker voor dan 30mm/24uur. Tussen oktober 2014 en december 2016 zijn er 14 gebeurtenissen van 30mm/48uur waargenomen. Tabel 3.7 laat zien dat van 14 gebeurtenissen er maximaal 6 goed kunnen worden verwacht. De events kunnen wel goed zichtbaar zijn in de verwachtingen, maar een overschrijding van 30mm/48uur wordt niet vaak verwacht. Bij een kansdrempel van 6 procent worden bijvoorbeeld maar 12 waarschuwingen afgegeven, waarvan 7 *false alarms* waren (Tabel 3.7, kolom 6%).

Voor een neerslagdrempel van 30mm/72 uur, neemt het aantal gemeten gebeurtenissen iets toe naar 17 events (Tabel 3.8). Het aantal goede verwachtingen neemt echter snel toe naar maximaal 11, 3 dagen vooruit verwacht (let op, omdat het een accumulatie over drie dagen betreft, kan de neerslag al de zelfde dag beginnen).

Tabel 3.7 Resultaten Neerslagdrempel 30mm/48uur, verwachtingshorizon 2 dagen

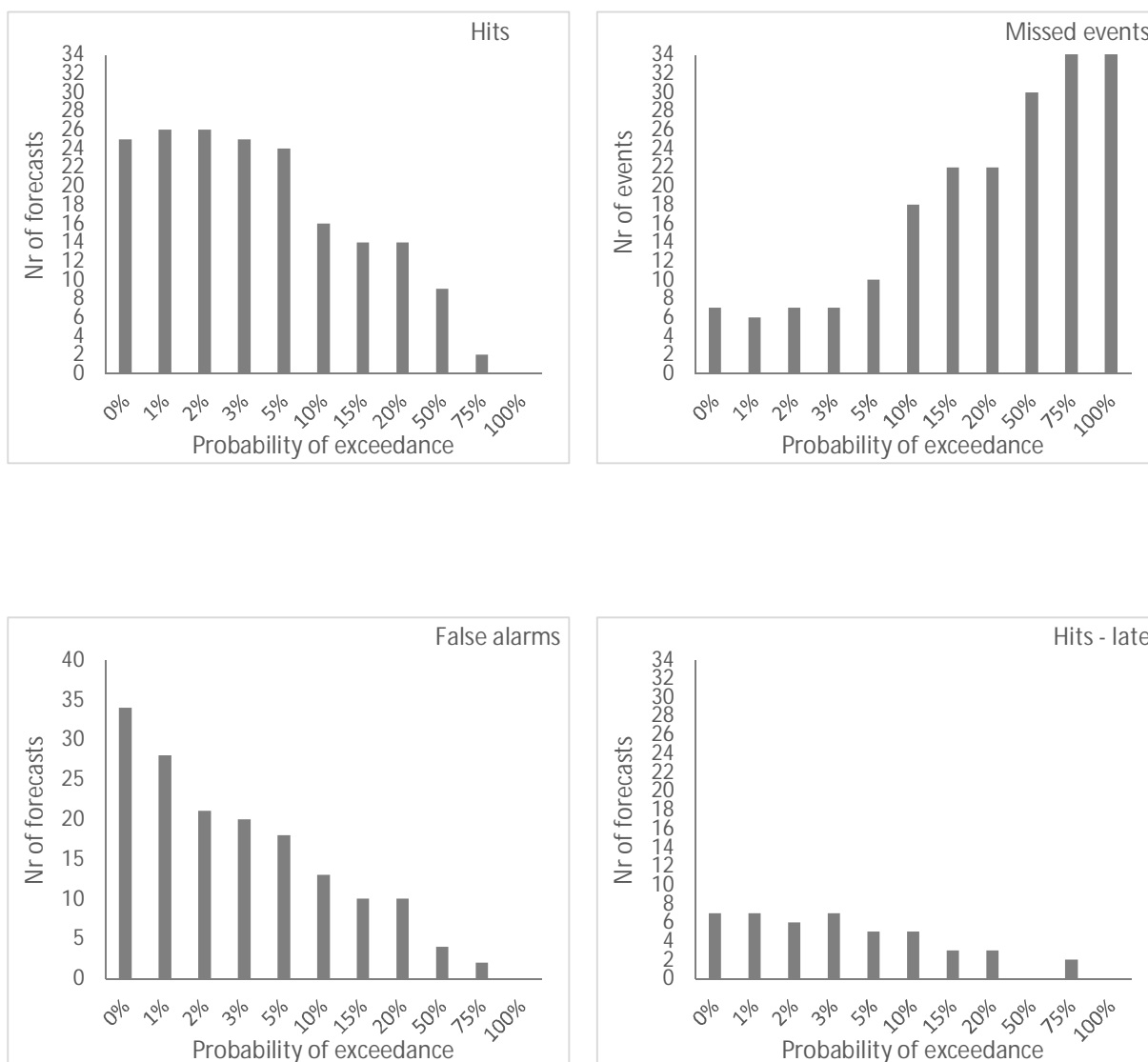
	2 -day forecast 30 mm in 2 days threshold 14 events										
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	0
Hits - early	4	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0
Hits – late	3	2	2	3	2	2	0	0	0	0	0
Missed events	5	8	8	8	9	10	12	12	13	13	14
False alarms	22	17	14	9	7	5	4	3	1	0	0

Tabel 3.8 Resultaten Neerslagdrempel 30mm/72uur, verwachtingshorizon 3 dagen

	3 -day forecast 30 mm in 3 days threshold 17 events										
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hit	5	5	5	5	4	3	5	2	0	0	0
Hit - early	6	5	4	4	2	1	0	0	0	0	0
Hit - late	3	4	4	4	6	7	6	3	1	1	0
Missed event	3	3	4	4	5	6	6	12	16	16	17
False alarm	46	33	26	24	22	14	6	5	1	0	0

3.6 Verificatie van effectiviteit op polderniveau

Naast de verificatie voor gebiedsgemiddelde neerslag voor heel Rijnland, is ook gekeken naar de uitwerking op polderniveau. De gekalibreerde radarneerslag boven Gouwepolder en Hogeveensepolder is hiervoor vergeleken met dezelfde ECMWF-EPS neerslagverwachtingen (uitvoerlocatie Schiphol). Wat daarbij verwacht werd en bevestigd is, is dat de gemeten neerslag iets meer extremen laat zien. Voor de neerslagdrempel van 15mm/24uur bijvoorbeeld 39 gebeurtenissen voor Gouwepolder, tegen 33 gebeurtenissen gebiedsgemiddeld Rijnland. Opvallend en gunstig is dat het aantal goede verwachtingen in de zelfde orde grootte is, en zelfs nog iets hoger voor Gouwepolder (Figuur 3.5). Het patroon is ook vergelijkbaar met een sterke afname in goede verwachtingen bij kansdrempels van 10% en hoger (van 24 naar 16 goede verwachtingen: Figuur 3.5 linksboven). De resultaten voor Hogeveensepolder laten hetzelfde patroon zien, met iets minder gemeten en goed verwachte gebeurtenissen (Annex B).



Figuur 3.5 Resultaten voor Gouwepolder, neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

3.7 Conclusies en aanbevelingen

De verificatieanalyse van alarmeringsregels op basis van voorspelde neerslaggebeurtenissen laat zien welke regels voor Rijnland effectief zijn en welke niet. Naast een overzicht van het aantal goede verwachtingen, wordt ook duidelijk hoeveel *false alarms* er te verwachten zijn.

Het gaat hierbij om alarmering op basis van alleen neerslagvoorspellingen. Recente voorgeschiedenis van gemeten neerslag en de verwachte boezembelasting worden in hoofdstuk 4 meegenomen.

De algemene conclusie is dat op basis van alleen ECMWF-EPS neerslagverwachtingen, uitvoerlocatie (regio) Schiphol, grofweg twee-derde van kritische gebiedsgemiddelde neerslaggebeurtenissen tijdig kan worden verwacht. Hiervoor moet dan bijvoorbeeld een regel worden gehanteerd van:

"Als de voorspelde kans op overschrijding van 15mm neerslag in de komende 24 uur 5% of meer is, dan geef ik een alarm af".

De analyse laat zien dat bij deze beslisregel ongeveer 40% van de waarschuwingen "false" geweest zou zijn, dus dat de werkelijk gevallen neerslag uiteindelijk niet de 15 mm overschreed ("false alarm").

De resultaten laten duidelijk zien dat voorzichtig moet worden omgegaan met neerslagdrempels van rond de 30mm/24uur of hoger. Dergelijk hoge drempels voor gebiedsgemiddelde van Rijnland komen maar weinig voor en worden niet goed verwacht met de ECMWF-EPS verwachtingen voor locatie Schiphol.

De drempel van 15mm/24uur kwam in de analyseperiode (oktober 2014 - december 2016) 33 keer voor hetgeen misschien weer te vaak, te normaal is, voor Rijnland. Neerslagdrempels tussen de 15 en 30 mm/24 uur, of drempels geaccumuleerd over meerdere dagen, verdienen dan aanbeveling.

Ook wat betreft de kansdrempel komt duidelijk naar voren dat voor het behalen van een hoog percentage goede en tijdige waarschuwingen, op basis van de ECMWF-EPS neerslagverwachtingen uitvoerlocatie Schiphol, naar lage drempels moet worden gekeken (10% en minder). Hogere kansdrempels leiden weliswaar tot minder *false alarms*, maar er zullen dan ook beduidend meer echte gebeurtenissen zonder waarschuwing (*misses*) opkomen.

Bovenstaande bevindingen leiden naar een neerslagdrempel van 20mm/24uur en een kansdrempel van 5% als geschikte drempels voor voorwaarschuwen op basis van ECMWF EPS neerslagvoorspellingen uitvoerlocatie Schiphol.

Het meewegen van de recente voorgeschiedenis van gemeten neerslag en de verwachte boezembelasting wordt in het volgende hoofdstuk gepresenteerd.

Tot slot laten de resultaten op polderniveau zien, dat de ECMWF-EPS neerslagverwachtingen uitvoerlocatie (regio) Schiphol, voor een aantal van de waargenomen gebeurtenissen in de polders ook een goede voorwaarschuwing laat zien.

Het voordeel van de hier en in de Annex B gepresenteerde resultaten is dat het Rijnland de mogelijkheid biedt zelf een beslisregel uit te kiezen op basis van de door hen gewenste balans tussen aantal gewaarschuwde events en aantal *false alarms*.

Een verificatieanalyse als in dit hoofdstuk beschreven, kan worden uitgevoerd voor elk neerslag- en hoogwater- verwachtingssysteem. Op deze manier kunnen waarschuwingsregels geïnformeerd worden vastgesteld en worden verrassingen met het uitblijven van alerts of een overlast aan *false alarms* voorkomen.

4 Analyse voor operationele alarmeringen

4.1 Inleiding

Op dit moment hanteert Rijnland de volgende criteria voor gevaarlijk weer, waarbij wordt geanticipeerd op dit gevaarlijke weer door te gaan voormalen:

- In de winterperiode 15 mm voor de komende 24 uur
- In de zomerperiode 30 mm voor de komende 24 uur

Deze criteria houden geen rekening met onzekerheid van de neerslagverwachtingen en worden ook door de peilbeheerders dan ook als onvoldoende betrouwbaar beschouwd. Daarbij speelt ook dat de criteria al helemaal geen rekening houden met de voorgeschiedenis (reeds gevallen neerslag) en beschikbare middelen (beschikbare boezemgemaalcapaciteit).

Met de beschikbaarheid van ensembleverwachtingen uit GLAM-EPS en/of ECMWF-EPS is het beter mogelijk om de onzekerheid in de weersverwachting mee te nemen. Echter, daarnaast moet ook de voorgeschiedenis en beschikbare gemaalcapaciteit worden meegenomen.

In het ideale geval worden de volledige ensembles doorgerekend met het sturingsmodel en daaruit de verwachte waterstanden berekend, maar dat is te rekenintensief. Daarom is gezocht naar een methode om het risico op gevaarlijk weer in te kunnen schatten op basis van een andere en snellere aanpak. Die is gevonden in het toepassen van een statistisch model.

4.2 Afleiding van het statistisch model

In een statistisch model worden processen niet beschreven volgens de bekende regels van de fysica (zoals neerslagafvoer en hydraulische processen), maar via bekende correlaties. Die correlaties zijn afgeleid uit beschikbare, bekende historische data en zijn vaak zeer eenvoudig van aard (lineaire relaties zoals $Y=aX+b$). Deze relaties worden vervolgens toegepast op de actuele situatie.

Om te komen tot een statistisch model is het nodig om de bekende correlaties te kennen en die te kwantificeren. Dit is ingewikkelder gebleken dan het op het eerste gezicht lijkt. Immers, het lijkt logisch om gevaarlijk weer te kwantificeren als een situatie waarbij de boezempeilen te hoog worden. In dat geval moet een relatie worden gezocht tussen het verwachte boezempeil (over 24 uur) en andere causale parameters. Dat lijkt mogelijk omdat de beschikbare data bestaat uit:

- Gesimuleerde waterstanden (m NAP)
- Gesimuleerde boezembelasting (m^3/s)
- Neerslagverwachtingen (mm, ensemble)
- Neerslagmetingen (mm)
- Pompdebieten van de boezemgemalen (m^3/s , gesommeerd)

De verwachte waterstand is dan een functie van deze parameters. Echter, het blijkt dat (en dat is ook wel logisch) de waterstand op de boezem (vooral voor normale situaties) slecht te verklaren is uit de genoemde verklarende variabelen. Het nog uit te voeren pompregime is namelijk een grote factor in de resulterende waterstand. Zeker in het normale bereik is hier een sterke afhankelijkheid zichtbaar tussen dag en nacht. Immers, normaal gesproken wordt vooral overdag gemalen.

Daarom is gekozen om niet de verwachte waterstand als indicatie voor gevaarlijk weer te hanteren, maar de benodigde totale inzet van boezemgemalen, gemiddeld voor de komende 24 uur. Dit is gedaan door een aantal combinaties van verklarende variabelen te testen:

- 1 Recente neerslag en toekomstige neerslag m.b.v. een lineair model
- 2 Recent pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag m.b.v. een lineair model
- 3 Recent pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag en uur van de dag m.b.v. een lineair model
- 4 Recent pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag, uur van de dag en actuele waterstand m.b.v. een lineair model
- 5 Recente neerslag en toekomstige neerslag (test 1) m.b.v. Quantile Regression
- 6 Recent pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag en actuele waterstand m.b.v. Quantile Regression

Merk op dat het lineaire model uit gaat van een normaalverdeling (met een mediaan en daaromheen gelijke standaardafwijking naar boven en beneden). Het statistisch model m.b.v. Quantile Regression gaat uit van de werkelijke waargenomen verdeling.

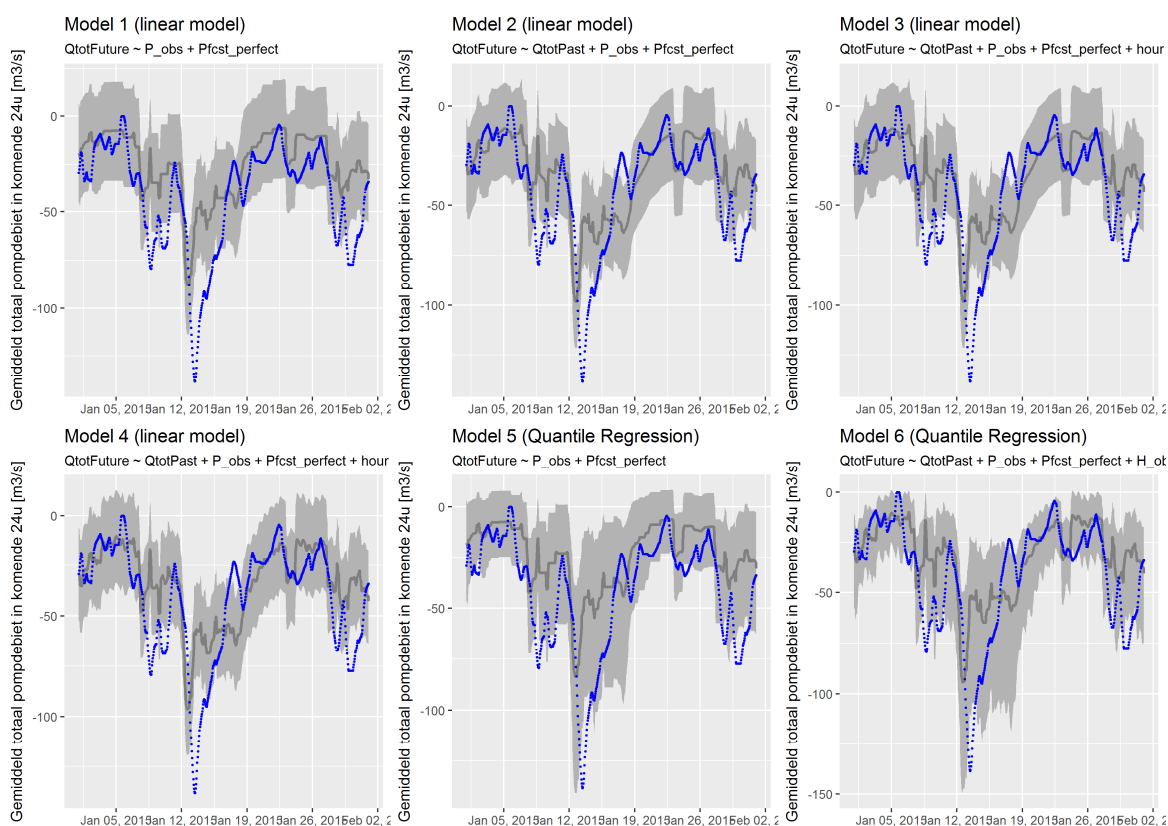
De historische, recente neerslag is geaccumuleerd over de afgelopen 5 dagen en het pompdebiet is gemiddeld over diezelfde periode. De verwachte neerslag en pompdebiet betreffende de accumulatie en gemiddelde over de komende 24 uur. Merk op dat de training van het statistisch model is gedaan met werkelijk gevallen neerslag. In de praktijk is de verwachte neerslaghoeveelheid niet 100% goed en zal het resultaat van het statistisch model dus minder goed zijn.

Ten aanzien van de beschikbare dataset van 2014 t/m 2016 is er de aanname dat het historische pompdebiet goed is uitgevoerd en dat zich geen bijzondere incidenten hebben voorgedaan die het normale beheer hebben verstoord.

De resultaten van deze testruns zijn in detail per maand weergegeven in Annex C. In onderstaande Figuur 4.1 weergegeven.

Merk op dat het statisch model is afgeleid van de volledige beschikbare dataset en dat geen onafhankelijke verificatie van het afgeleide model is uitgevoerd. Dit is wel degelijk gewenst, maar was in het kader van dit onderzoek niet meer mogelijk.

Op basis van een visuele beoordeling van de resultaten is gekozen voor het 6^e model als beste model om mee door te gaan. De lineaire, normaal verdeelde modellen zijn te breed (want symmetrisch) verdeeld en daarmee minder goed in de praktijk toe te passen.



Figuur 4.1 Resultaten van de vergelijkende testruns voor januari 2015, met in blauw het gemeten 24-uurs gemiddelde pompdebiet, grijze lijn de mediaan met daaromheen in grijs de bandbreedte van het gewenste pompdebiet

4.3 Implementatie

4.3.1 R-script

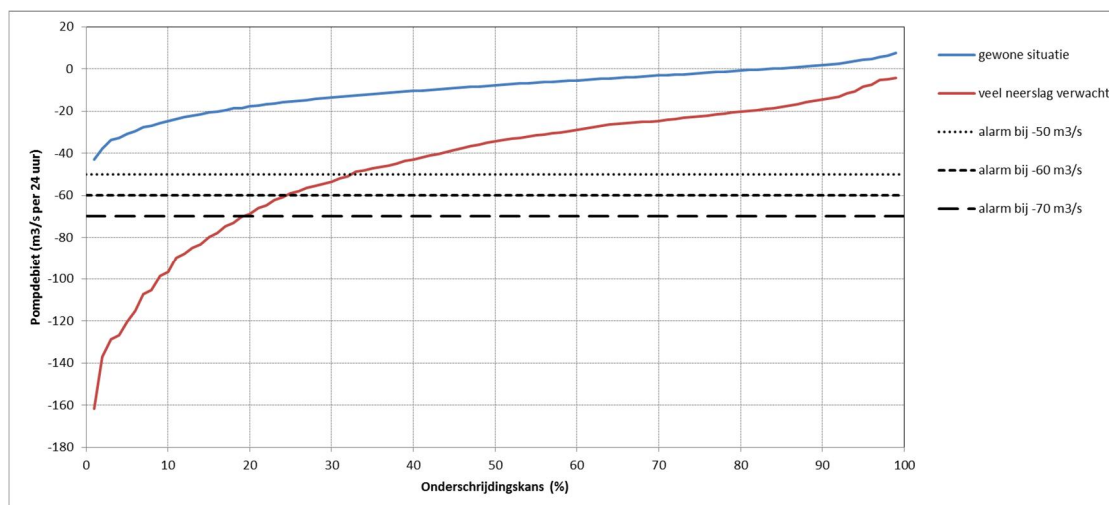
Het statistisch model is gebouwd in de script-taal R (zie website <https://www.r-project.org>). Dit model draait direct onder de Delft-FEWS applicatie, die de basis is van BOSBO3.0.

Het script maakt gebruik van de standaard R distributie (nu is versie 3.4.0 gebruikt), aangevuld met een “delftfews” package waarmee functies voor het inlezen en schrijven van in- en uitvoerbestanden in Delft-FEWS formaat worden aangeboden.

Het model draait voor elk individueel ensemble-lid en bepaalt voor elk lid het gewenste pompdebiet voor de komende 24 uur. Aannemend dat elk individueel ensemble-lid even waarschijnlijk is, wordt vervolgens het gemiddelde genomen van de kansverdelingen voor elk lid en dit resultaat is de kansverdeling voor de totale verwachte benodigde pompinzet, gemiddeld voor de komende 24 uur.

Vervolgens wordt de kans op overschrijden aangegeven voor de volgende waarden:

- $Q = -50 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q = -60 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q = -70 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 4.2 Voorbeeld van cumulatieve kansverdeling van de alarmeringsberekening voor een tweetal situaties met een normale (blauw) en grote (rood) verwachte hoeveelheid neerslag. De rode lijn kruist duidelijk de alarmniveaus.

Als deze kansen groter dan 0% worden, is er verhoogde kans op gevaarlijk weer, zoals weergegeven in een voorbeeld in de bovenstaande Figuur 4.2. Voor de situatie met veel verwachte neerslag (rode lijn) is er een kans van 50% dat meer dan 34 m³/s moet worden gepompt en een kans van 20% dat de grenswaarde van 70 m³/s wordt overschreden.

Binnen de sturingsmodule kan op basis van het wel of niet actief zijn van een bepaald alarmniveau automatisch een bepaald regime worden gekozen.

4.3.2 Delft-FEWS configuratie

De afhandeling voor alarmen is in de Delft-FEWS configuratie. Deze is nu geconfigureerd zoals weergegeven in de onderstaande Tabel 4.1. Merk op dat dit 24-uursgemiddelde waarden zijn en daarom veel lager dan de daadwerkelijke, momentane gemaalcapaciteit. Uiteraard kan deze naar believen worden uitgebreid dan wel worden gewijzigd in de Delft-FEWS configuratie.

Tabel 4.1 Alarmeringen zoals momenteel geconfigureerd binnen Delft-FEWS

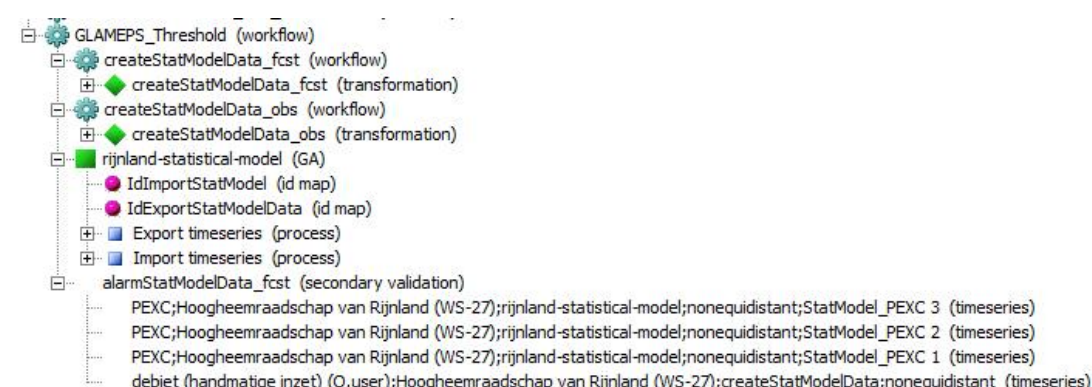
Pompdebiet (m ³ /s)	Laag alarm	Hoog alarm
-50	<50%	>50%
-60	<25%	>25%
-70	<10%	>10%

Binnen Delft-FEWS is een workflow geconfigureerd genaamd GLAM-EPS_Threshold. Deze workflow kan elk uur worden gedraaid en sowieso worden gedraaid (via een trigger) op het moment dat een nieuwe GLAM-EPS verwachting binnenkomt.

De workflow draait op een stand-alone testomgeving in circa 3-5 seconden, waarbij de meeste tijd zit in het opstarten van R.

De workflow voert de volgende – op zich logische – taken uit:

- 1 Aggregeren van de verwachte neerslag voor komende 24 uur naar T0
- 2 Bepalen van de statistieken van het ensemble (min, max, gemiddelde en mediaan)
- 3 Bepalen van de actuele representatieve boezemwaterstand
- 4 Aggregeren van de gevallen neerslag (op basis van de op dat moment zo goed mogelijk beschikbare data uit Hydronet) over de afgelopen 120 uur
- 5 Bepalen van de gemiddelde boezemafvoer over de afgelopen 24 uur
- 6 Draaien van het R-script
- 7 Draaien van de alarmeringsmodule



Figuur 4.3 Opzet van de workflow binnen Delft-FEWS

Ten behoeve van het draaien van het R-script is één referentie toegevoegd aan de global.properties, namelijk een referentie naar de R software: R_EXE=....

De alarmeringsmodule genereert een tweetal log eventcodes, op basis waarvan Delft-FEWS een alarmeringsmail kan versturen. Deze zijn:

- Weeralarm.laag
- Weeralarm.hoog

Ook kan binnen de sturingsmodule zelf op basis van het wel of niet actief zijn van een bepaald alarmniveau een bepaald regime worden gekozen.

5 Conclusies en Aanbevelingen

5.1 Samenvattende aanbevelingen

Op basis van in het voorliggende rapport uitgevoerde analyse raden we het volgende aan:

- 1 Opname van GLAMEPS ensemble-weersverwachtingen in het operationele systeem.
- 2 Opname van de huidige versie van het statistische model als voorwaarschuwing voor gevaarlijk weer.
- 3 Doorontwikkeling van het statische model zodat een hogere kwaliteit mag worden verwacht.

5.2 Algemene conclusies ten aanzien van ensembleverwachtingen

Het gebruik van ensembleverwachtingen is een beproefde en bewezen methode voor het inschatten van de onzekerheid rondom het toekomstige weer en de neerslagsommen. Met name deze neerslagsommen zijn van belang voor het waterbeheer.

Op dit moment wordt in het waterbeheer al wel gebruik gemaakt van het middellangetermijn ensemble van ECMWF-EPS. Uit vergelijking met de performance van ECMWF-EPS met GLAM-EPS blijkt dat GLAM-EPS beter scoort voor de eerste dag.

Met behulp van het ECMWF-EPS is een verificatieanalyse uitgevoerd op basis van neerslaggebeurtenissen en beslissingsregels met kansdrempels ten behoeve van automatische alarmering voor "gevaarlijk weer". Deze analyse laat zien dat inzichtelijk kan worden gemaakt welke regels voor Rijnland effectief zijn en welke niet. Naast een overzicht van het aantal goede verwachtingen, is ook duidelijk hoeveel *false alarms* er te verwachten zijn. De algemene conclusie is dat op basis van ECMWF-EPS neerslagverwachtingen, regio Schiphol, grofweg twee derde van kritische gebiedsgemiddelde neerslaggebeurtenissen tijdig kan worden verwacht (bijvoorbeeld 2 dagen van te voren).

De resultaten op polderniveau laten zien, dat de ECMWF-EPS neerslagverwachtingen uitvoerlocatie Schiphol, voor een aantal van de waargenomen gebeurtenissen in de polders ook een goede voorwaarschuwing laat zien.

Automatische alarmering kan sterk worden verbeterd indien niet alleen naar de verwachte neerslag maar ook naar de historische neerslag wordt gekeken. Daarom is een alarmeringsmodule ontwikkeld met een statistisch model. Dit model kan in BOSBO worden ingebouwd. De nieuwe module kijkt ook naar de historische neerslag, het reeds verpompte volume en de actuele boezemwaterstand. Hiermee biedt het een veel betere onderbouwing voor een eventueel weeralarm dan de methode die Rijnland momenteel hanteert.

Deze alarmeringsmodule kan gebruikmaken van zowel ECMWF-EPS als GLAM-EPS verwachtingen. We adviseren om de GLAM-EPS-verwachtingen te gaan gebruiken, omdat die iets betere verwachtingen geeft voor de eerste dag, waarvoor deze alarmeringsmodule juist is bedoeld.

Op dit moment wordt GLAM-EPS alleen operationeel geleverd aan Rijkswaterstaat. Voor waterschappen als Rijnland moet door KNMI een uitsnede worden gemaakt voor Nederland en dient KNMI deze uitsnede te gaan leveren.

5.3 Aanbevelingen ten aanzien van het statistisch model

5.3.1 Aanbeveling 1: verificatie van gemaakte verwachtingen

Bij het opzetten van het statistisch model is een aantal configuraties getest. De resultaten van de diverse configuraties zijn op het oog beoordeeld. Om een beter beeld te krijgen van de kwaliteit van de (met het statistische model) gemaakte verwachtingen, moeten deze objectief worden geverifieerd.

Een dergelijke verificatie zou bestaan uit een aantal stappen: (1) hind-casten van verwachtingen; (2) creëren van paren van verwachtingen en bijbehorende waarnemingen; (3) analyse. De analyse-stap zou onder andere ROC-diagrammen moeten bevatten: een grafische weergave van de *hit rate* versus de *false alarm rate*.

5.3.2 Aanbeveling 2: keuze van beslisdrempel

Het statistisch model resulteert in een kansverdeling. Die wordt vertaald in de kans op overschrijding van een aantal peilen. Als deze kansverwachting gebruikt gaat worden om een binair besluit te nemen, zal een daartoe geschikt criterium gedefinieerd moeten worden. Zo'n criterium zou bijvoorbeeld kunnen zijn: "we ondernemen actie als de kans op overschrijding van het kritisch afvoerniveau (bijvoorbeeld: $Q = -50 \text{ m}^3/\text{s}$) tenminste gelijk is aan 20%". Het definiëren van het criterium omvat dan in elk geval de volgende acties:

- Het definiëren van de "actie".
- Het bepalen van de combinatie van kritisch afvoerniveau en bijbehorend kanscriterium. Bij de keuze van het kanscriterium moet in overweging genomen worden dat bij hogere kansen zowel het aantal *hits* als het aantal *false alarms* zal afnemen. Immers, effectief wordt meer zekerheid vóóraf vereist. De hoogte van de kansdrempel moet dan worden bepaald door te analyseren hoe de aantallen *hits* en *false alarms* zich ontwikkelen als functie van de gekozen kansdrempel², en die aantallen te wegen met de gevolgen ervan.

5.3.3 Aanbeveling 3: verlenging van zichttijden

Het huidige statistisch model maakt een verwachting van het benodigde pompdebiet over een periode van 24 uur tussen nu (i.e., de huidige *time zero*) en 24 uur van nu. Mogelijk is het interessant om ook verwachtingen te maken voor andere zichttijden zoals 6u, 12u, 18u, 36u en 48u.

5.3.4 Aanbeveling 4: boezembelasting als te verklaren variabele

In het huidige statistische model is "toekomstig pompdebiet" de te verklaren variabele. Eigenlijk wordt een model gemaakt van het gedrag van de peilbeheerder in de periode waarover het model is gekalibreerd. Een mogelijk alternatief hiervoor is *boezembelasting*. Het voordeel van deze keuze zou zijn dat er niet een model wordt gemaakt van menselijk handelen maar van een kenmerk van het fysische systeem. Aangenomen mag worden dat er dan minder sprake zal zijn van inhomogeen gedrag.

² Deze analyse hangt nauw samen met de gesuggereerde verificatie-exercitie.

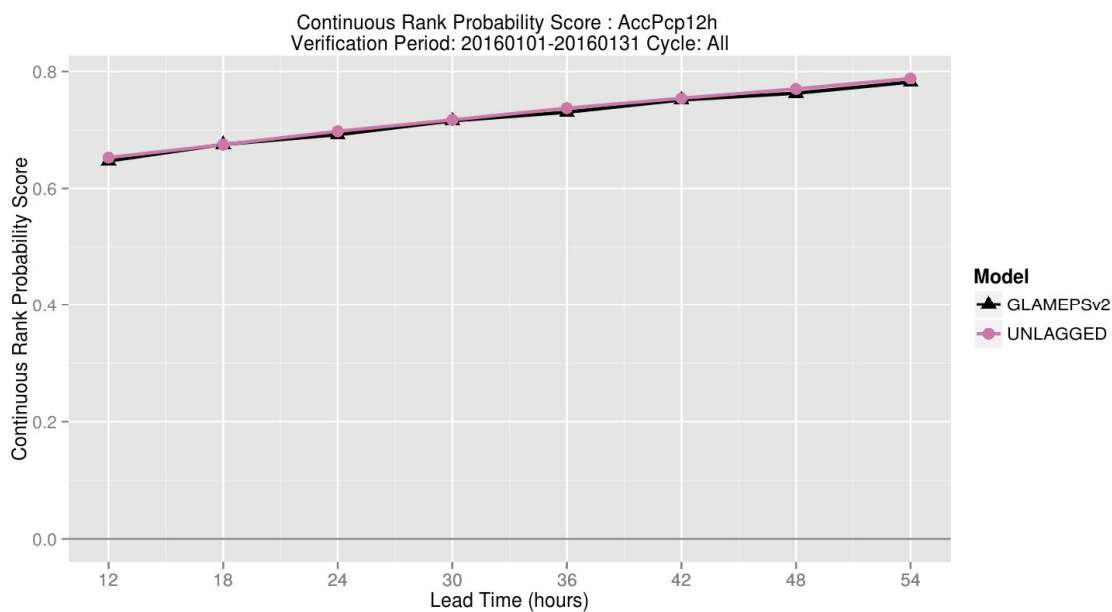
Literatuur

Overeem, A., I. Holleman, and A. Buishand, 2009: [Derivation of a 10-Year Radar-Based Climatology of Rainfall](https://doi.org/10.1175/2009JAMC1954.1). *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1448–1463, <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1954.1>

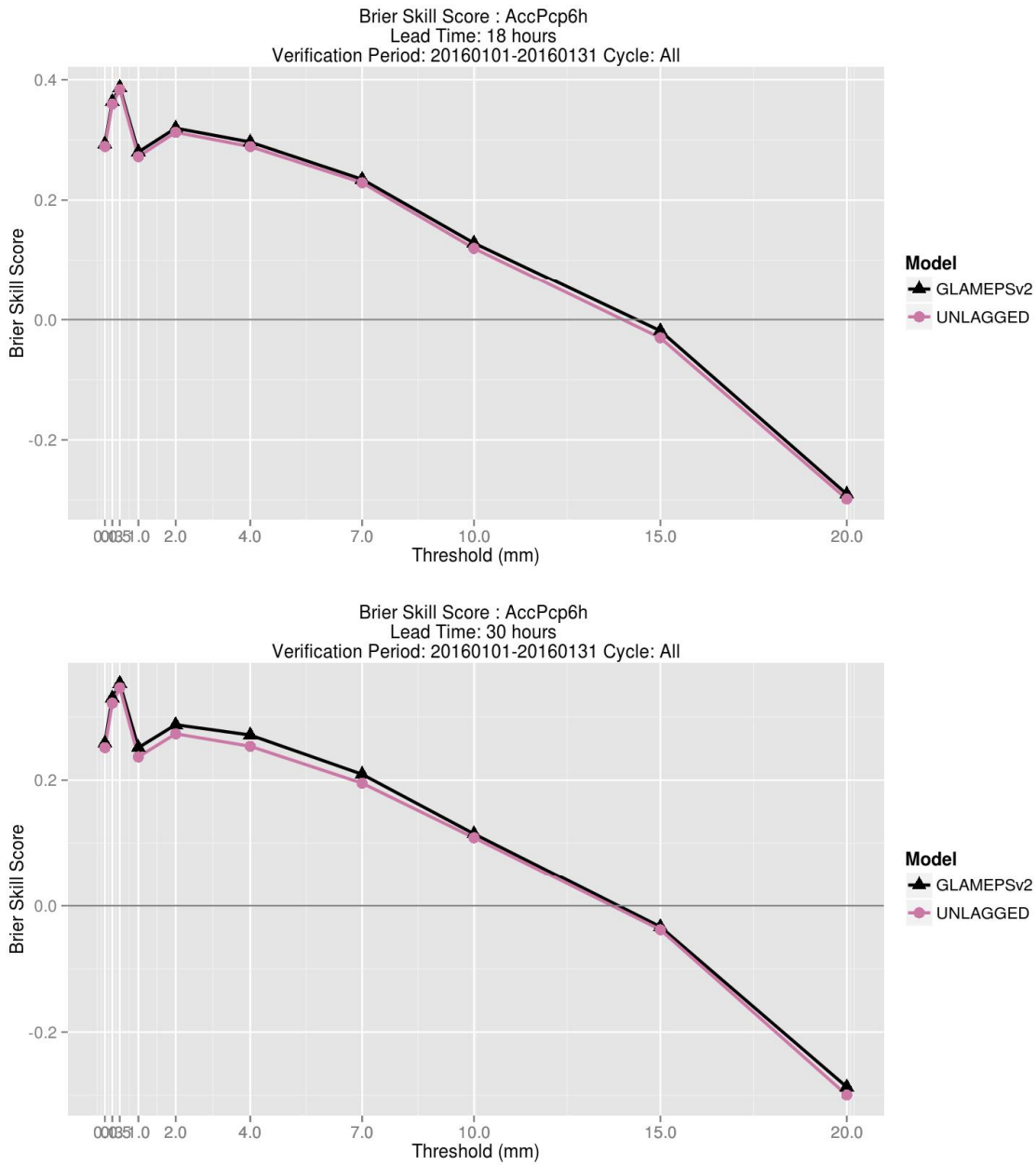
Verkade, J.S., 2015: Estimating real-time predictive hydrological uncertainty. Doctoral thesis Delft University of Technology. <http://dx.doi.org/10.4233/uuid:a7e8ac36-4bdb-4231-a11e-d46778b2ae4a>

A GLAM-EPS verificatie

A.1 Stations

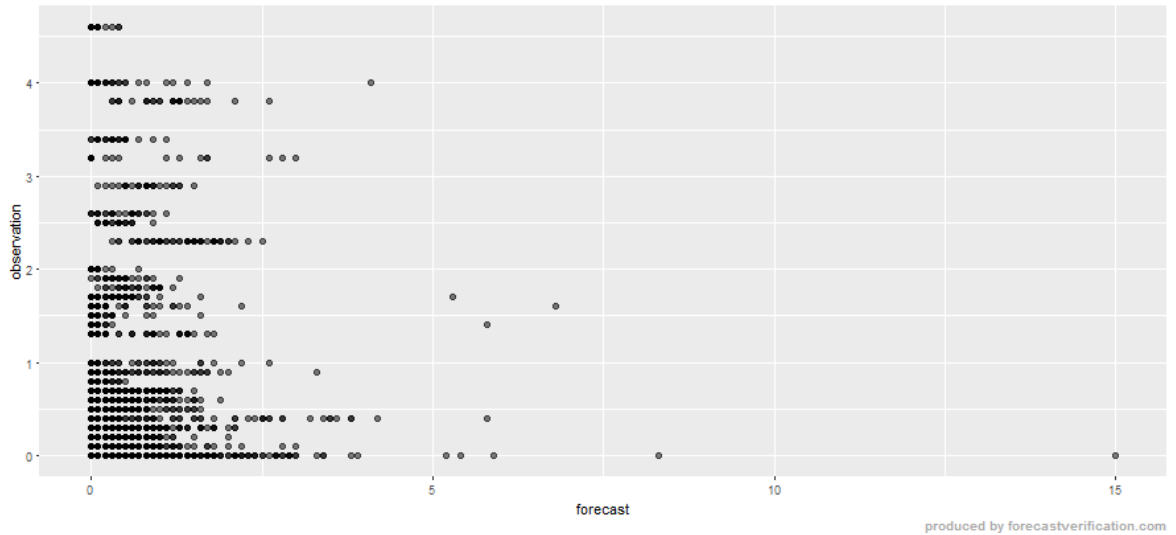


Figuur A.1. CRPS als functie van de verwachtingstermijn voor het volledige GLAM-EPS (zwart) en het 'unlagged' deel (lila) voor de 12-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen voor alle stations op basis van data in januari 2016.

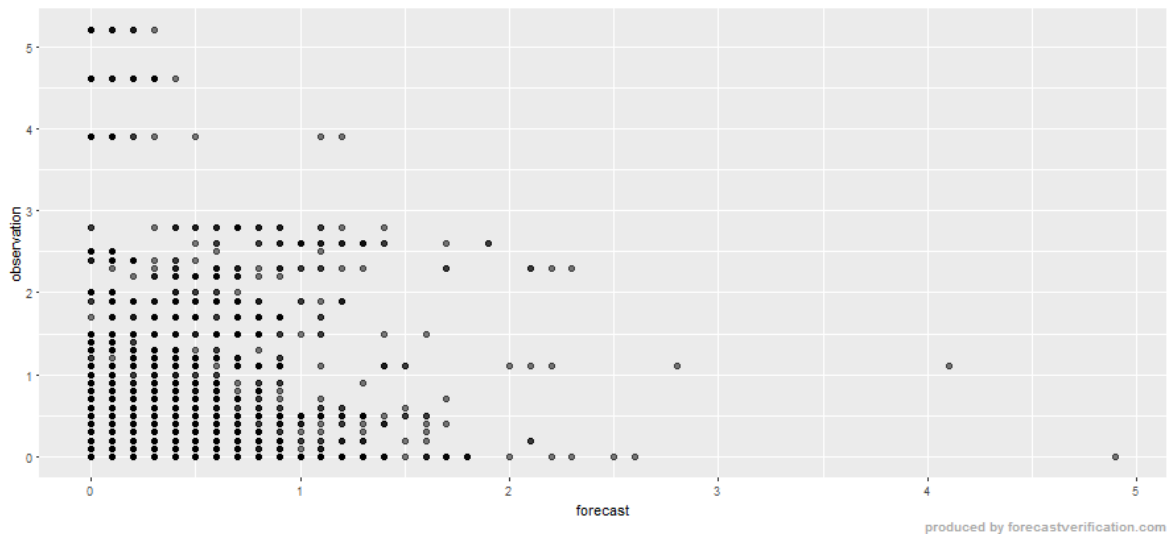


Figuur A.2 BSS als functie van de neerslagdrempel voor de 6-h geaccumuleerde neerslagverwachtingen op basis van het volledige GLAM-EPS (zwart) en het 'unlagged' deel (lila) voor alle stations en (a) een 18-h en (b) een 30-h verwachtingsstermijn op basis van data in januari 2016.

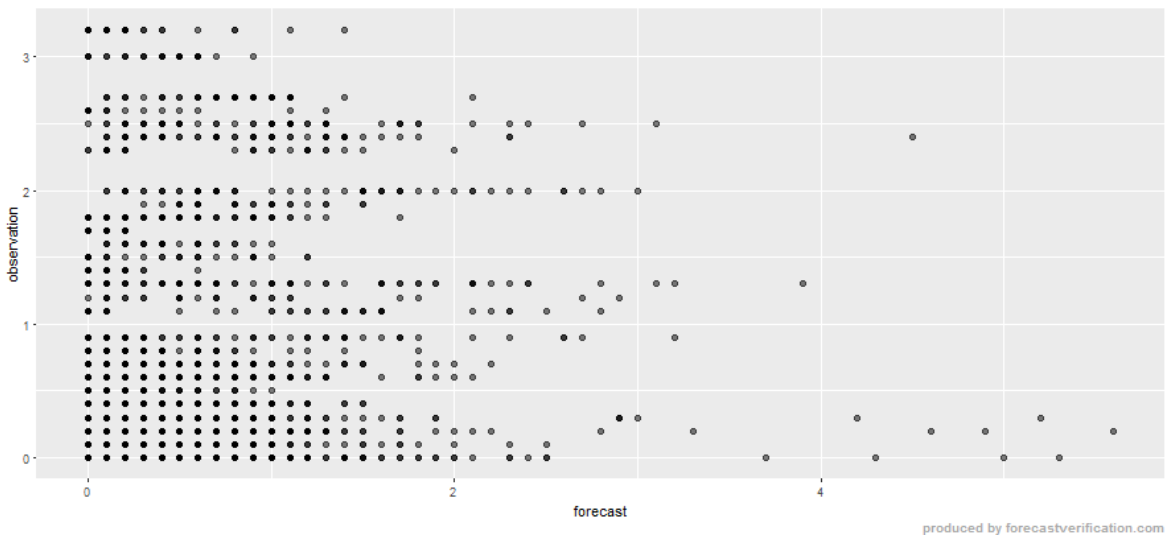
A.2 Rijnland gebiedsgemiddeld



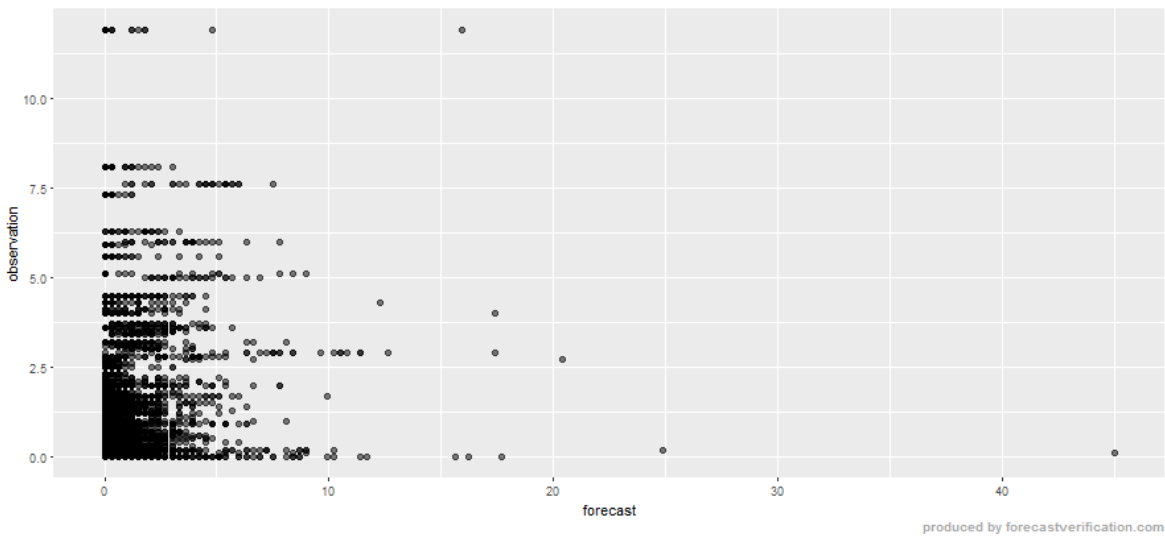
Figuur A.31 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 1 uur, lead time 24 uur



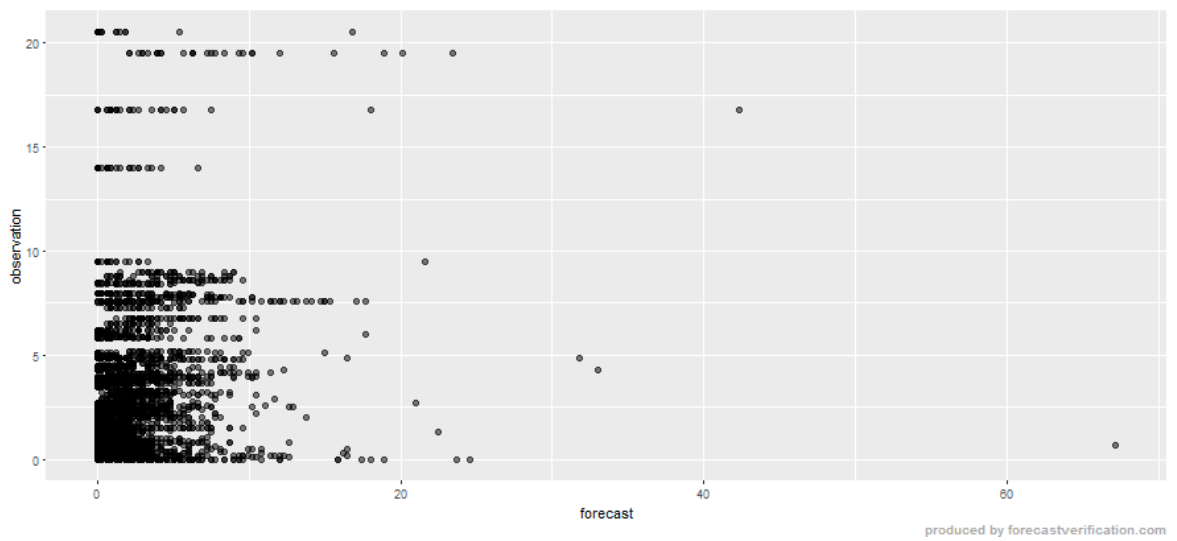
Figuur A.42 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 1 uur, lead time 3 uur



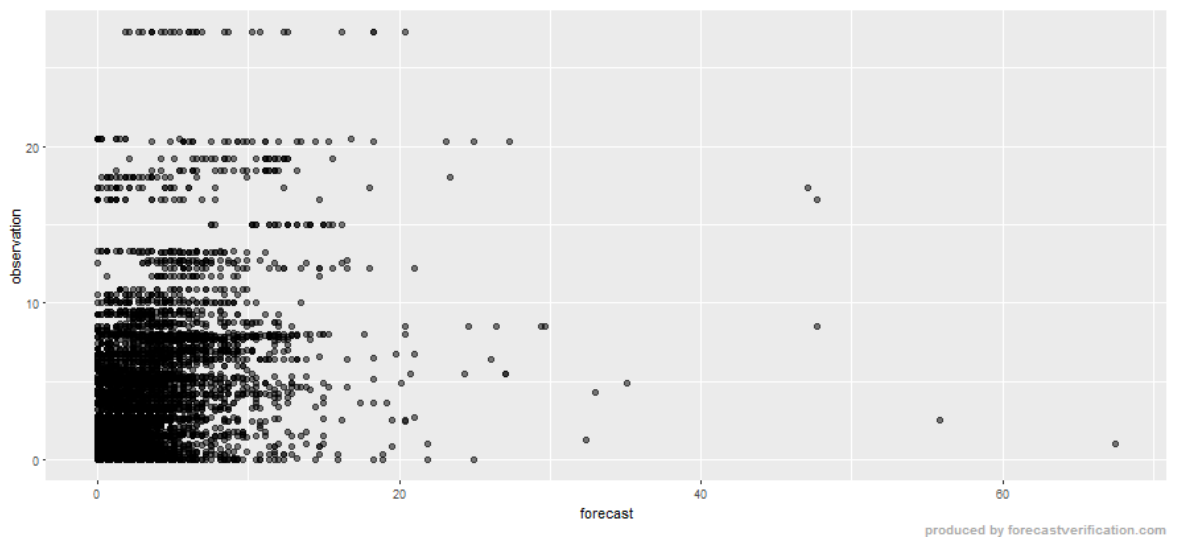
Figuur A.5 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 1 uur, lead time 6 uur



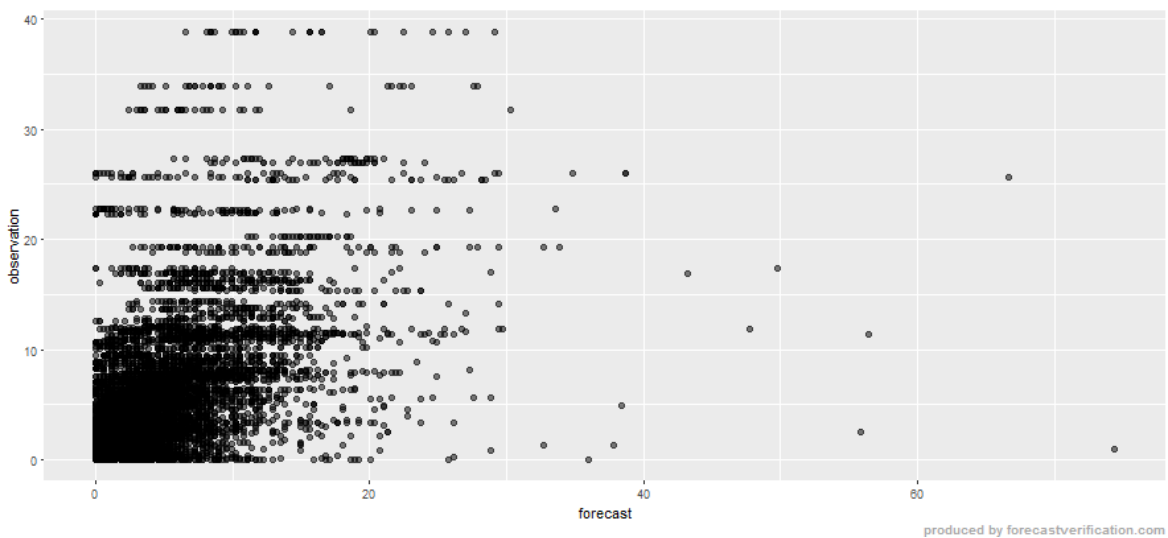
Figuur A.63 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 3 uur, lead time 24 uur



Figuur A.7 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 6 uur, lead time 24 uur



Figuur A.84 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 12 uur, lead time 24 uur



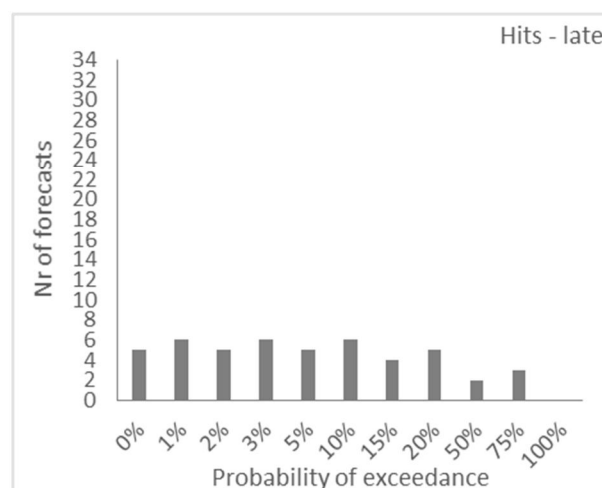
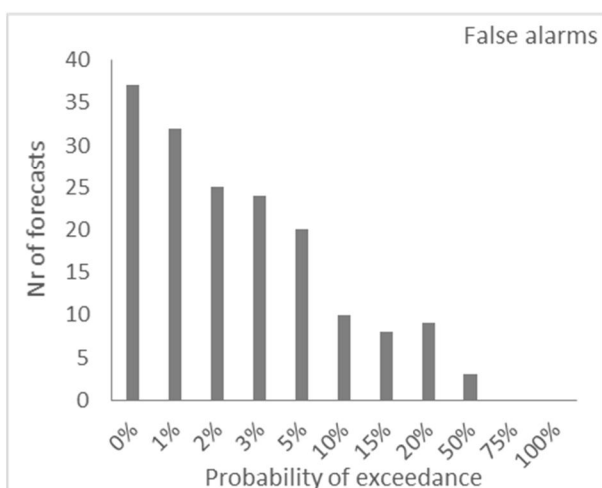
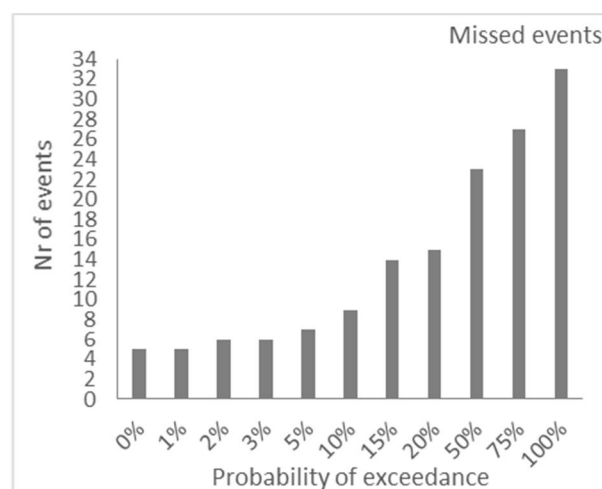
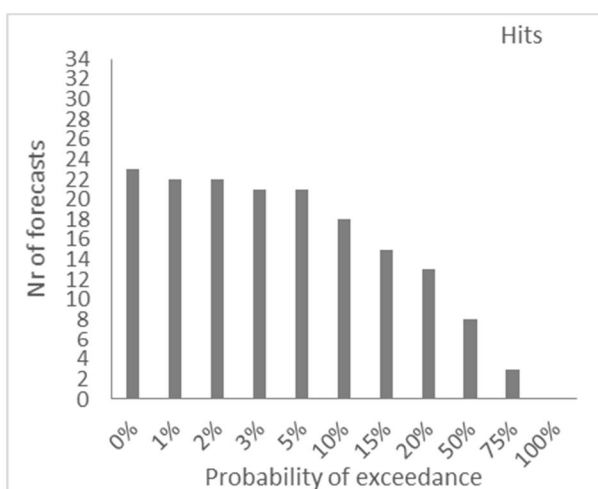
Figuur A.95 Scatterplot van verwachte en werkelijke neerslag, aggregatie 24 uur, lead time 24 uur

B Resultaten ECMWF-EPS analyse

B.1 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 1 dag

-day
1 forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events

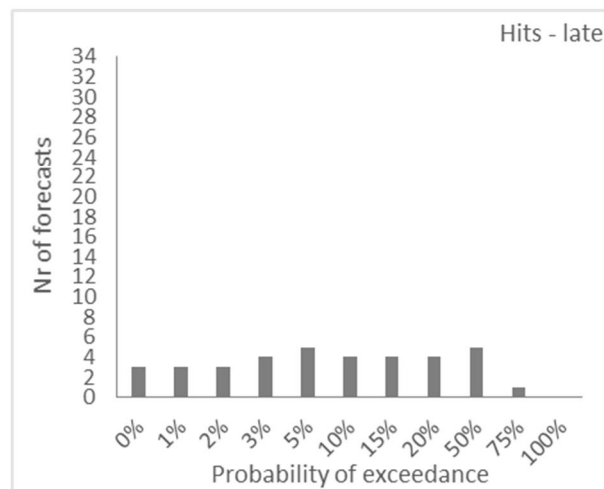
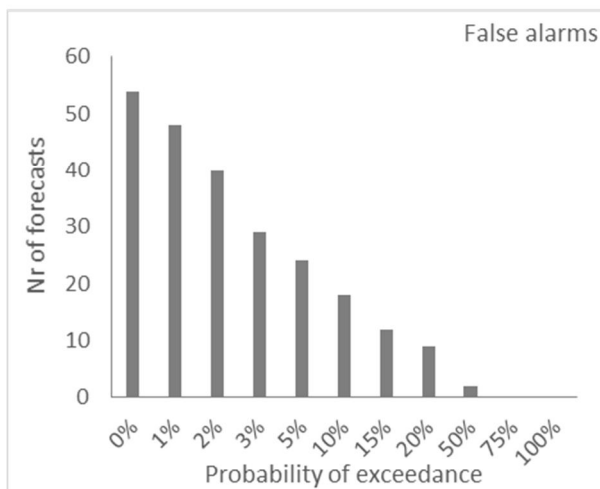
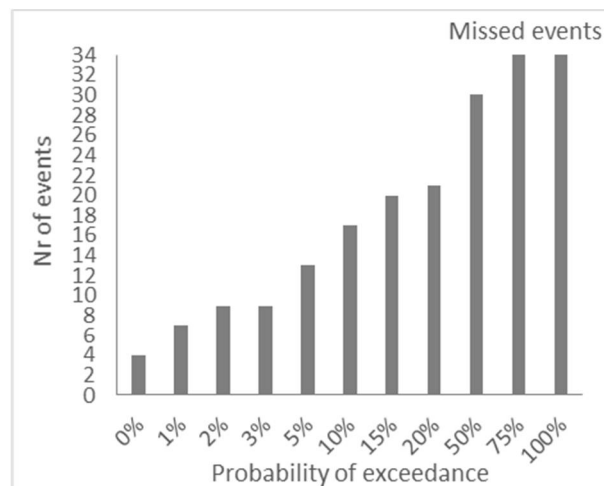
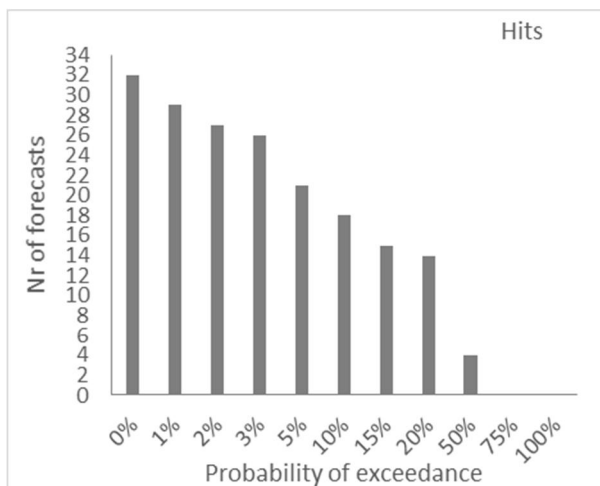
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	20	19	19	18	18	16	13	12	8	3	0
Hits - early	3	3	3	3	3	2	2	1	0	0	0
Hits - late	5	6	5	6	5	6	4	5	2	3	0
Missed events	5	5	6	6	7	9	14	15	23	27	33
False alarms	37	32	25	24	20	10	8	9	3	0	0



B.2 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

2 -day forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events

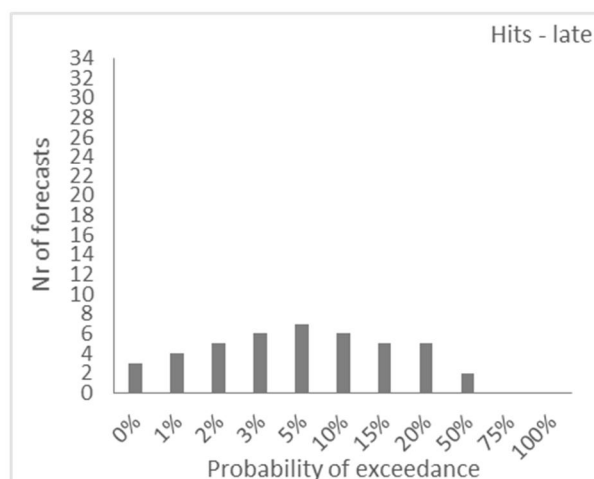
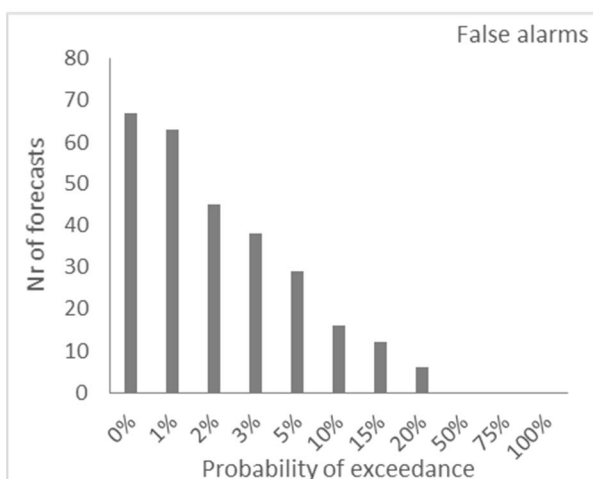
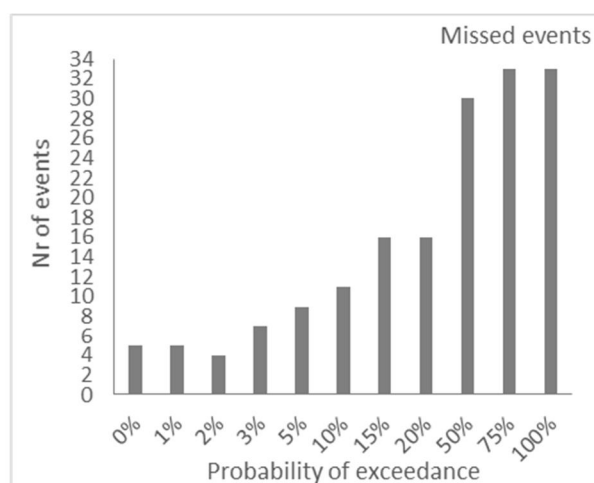
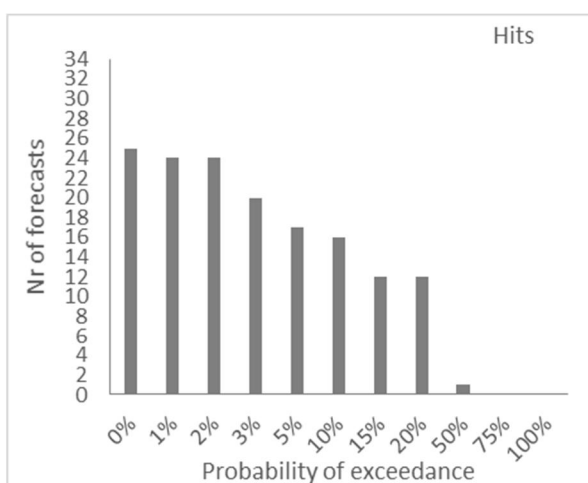
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	16	15	16	15	16	15	12	11	4	0	0
Hits - early	6	6	3	3	2	1	1	1	0	0	0
Hits - late	6	7	7	8	6	6	6	6	6	1	0
Missed events	5	5	7	7	9	11	14	15	23	32	33
False alarms	59	51	43	32	25	17	11	8	1	0	0



B.3 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 3 dagen

-day
3 forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events

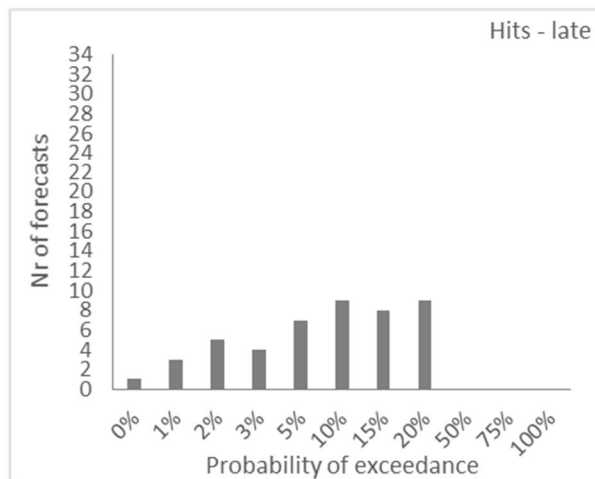
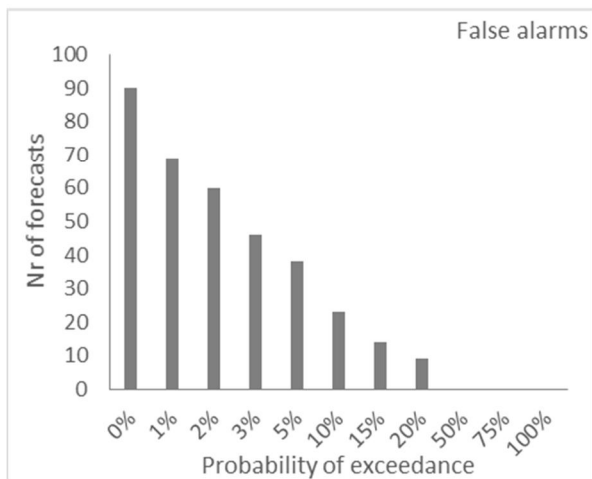
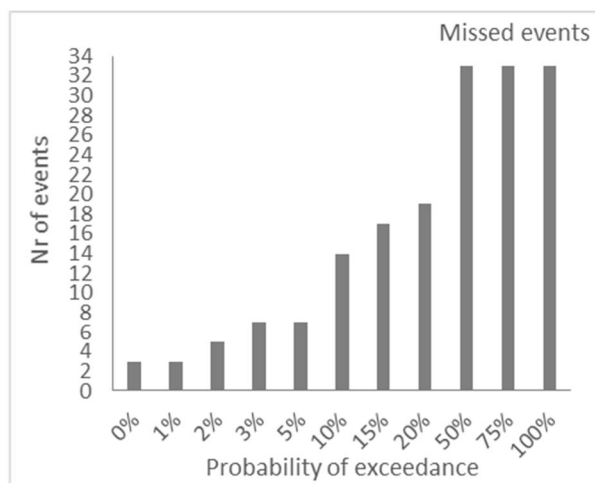
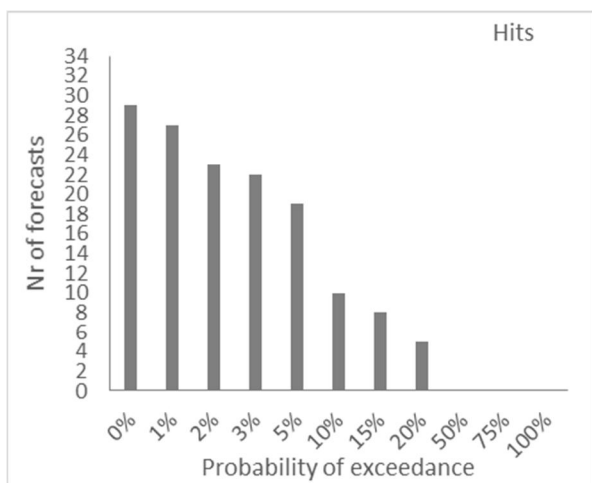
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	16	17	19	16	15	14	10	11	1	0	0
Hits - early	9	7	5	4	2	2	2	1	0	0	0
Hits - late	3	4	5	6	7	6	5	5	2	0	0
Missed events	5	5	4	7	9	11	16	16	30	33	33
False alarms	67	63	45	38	29	16	12	6	0	0	0



B.4 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 4 dagen

-day
4 forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events

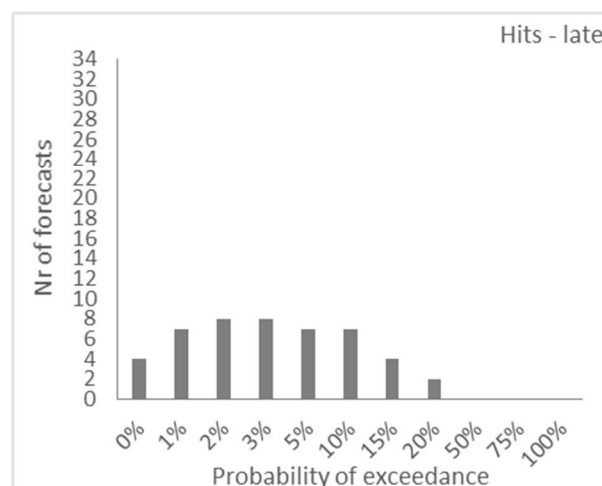
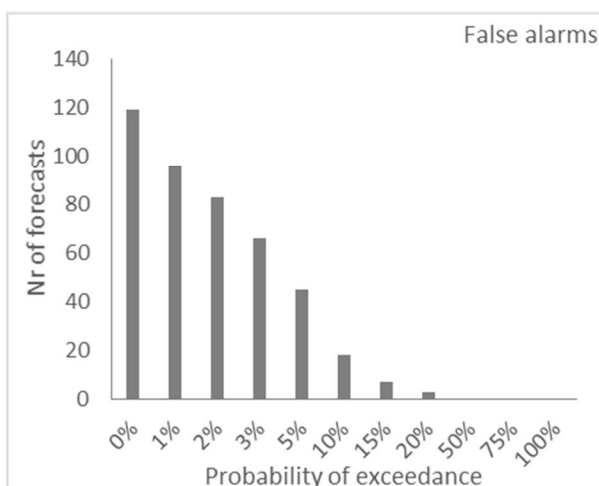
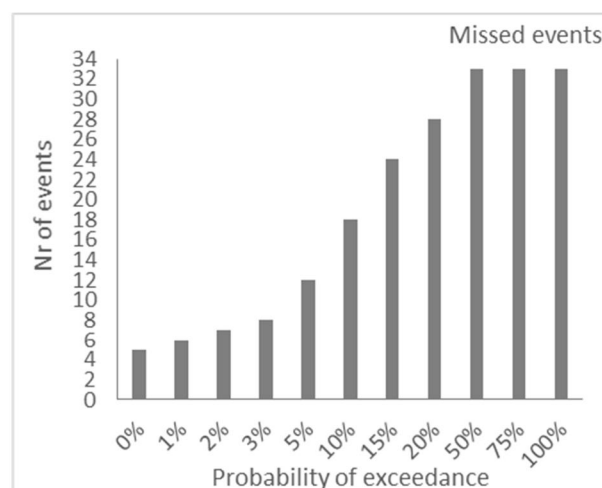
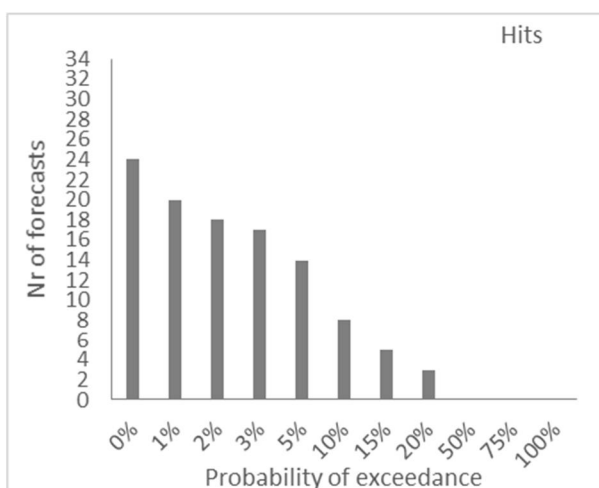
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	17	19	19	18	16	9	7	4	0	0	0
Hits - early	12	8	4	4	3	1	1	1	0	0	0
Hits - late	1	3	5	4	7	9	8	9	0	0	0
Missed events	3	3	5	7	7	14	17	19	33	33	33
False alarms	90	69	60	46	38	23	14	9	0	0	0



B.5 Resultaten voor neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 5 dagen

-day
5 forecast 15 mm in 1 day threshold 33 events

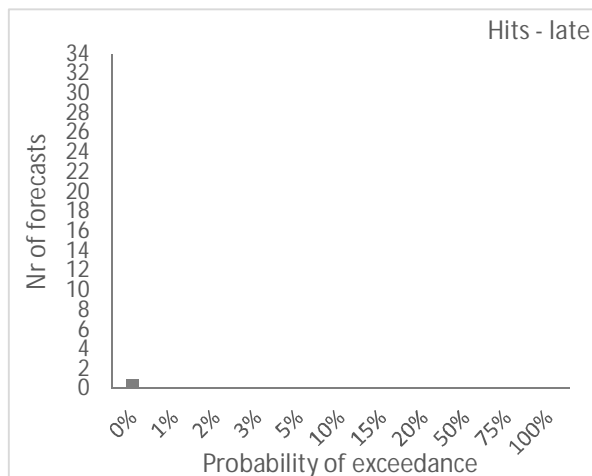
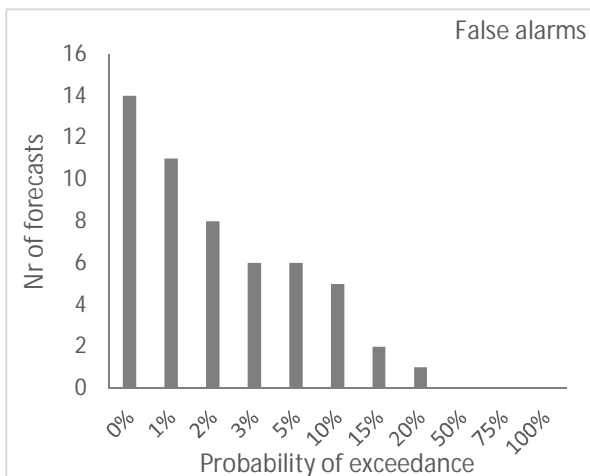
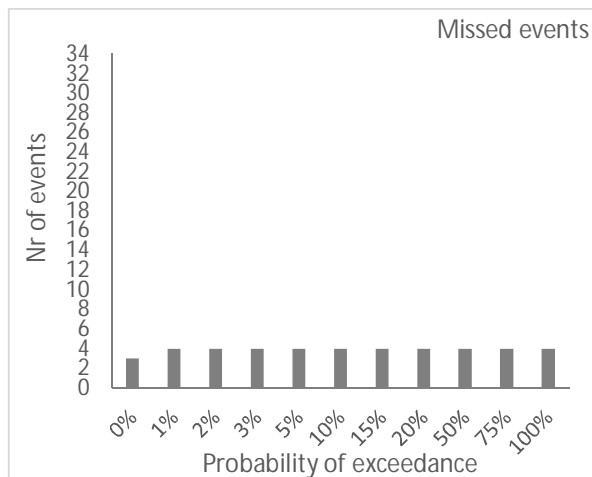
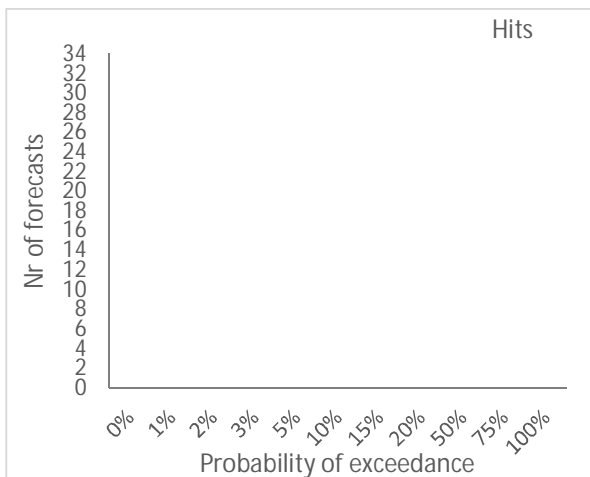
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	14	13	13	12	9	7	4	2	0	0	0
Hits - early	10	7	5	5	5	1	1	1	0	0	0
Hits - late	4	7	8	8	7	7	4	2	0	0	0
Missed events	5	6	7	8	12	18	24	28	33	33	33
False alarms	119	96	83	66	45	18	7	3	0	0	0



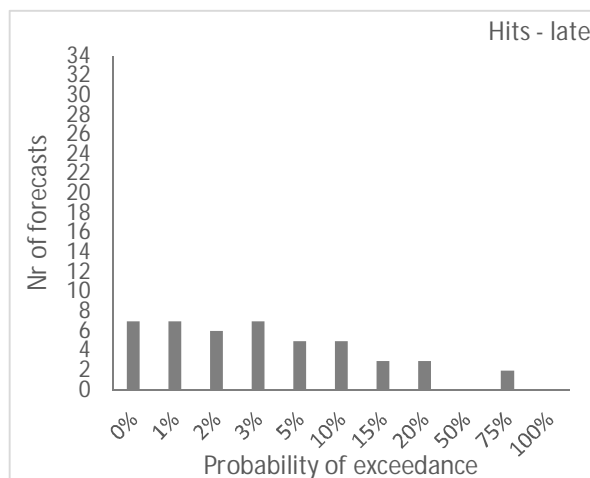
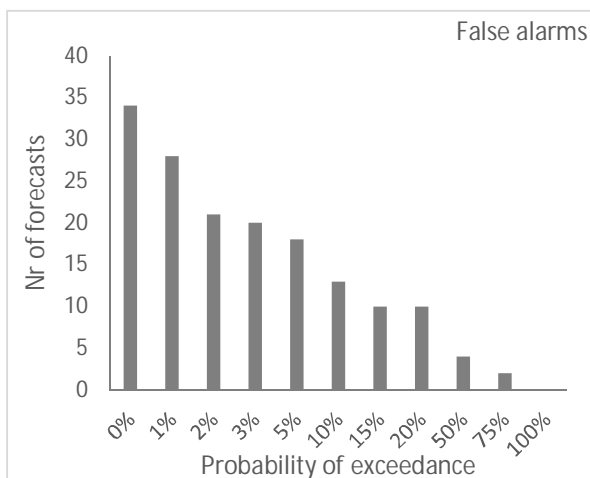
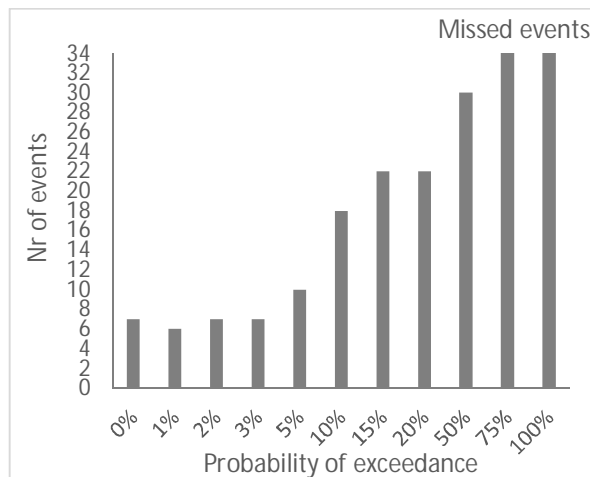
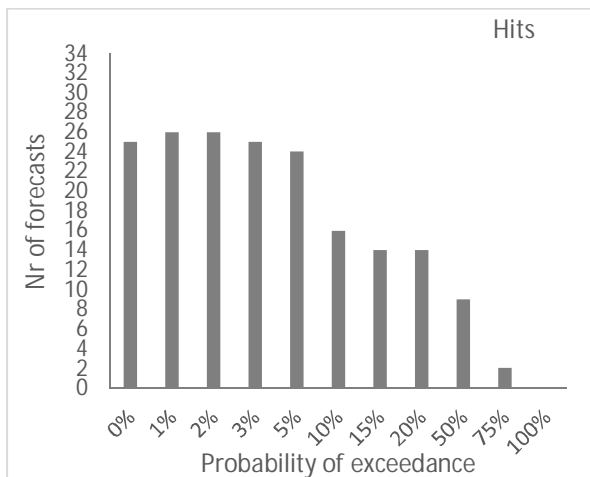
B.6 Resultaten voor neerslagdrempel 30mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

2 -day forecast 30 mm in 1 day threshold 4 events

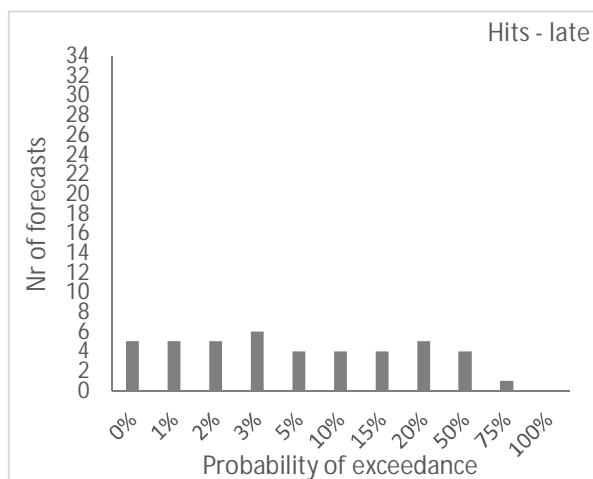
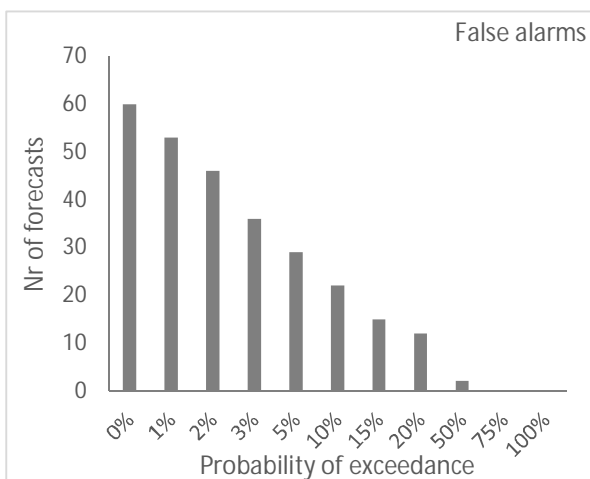
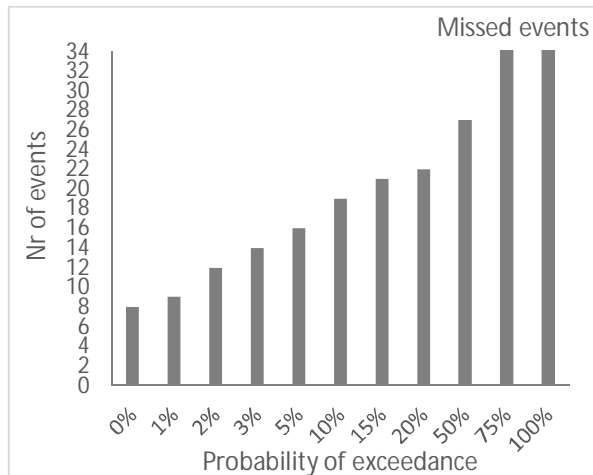
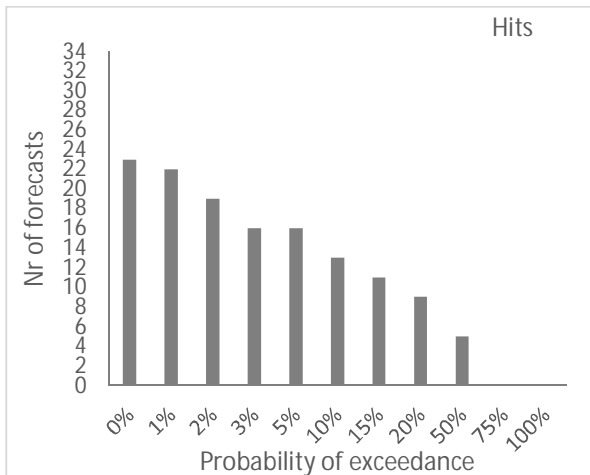
Probability of exceedance	0%	1%	2%	3%	5%	10%	15%	20%	50%	75%	100%
Hits	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hits - early	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hits - late	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Missed events	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
False alarms	14	11	8	6	6	5	2	1	0	0	0



B.7 Resultaten voor Gouwepolder, neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen



B.8 Resultaten voor Hogeveense polder, neerslagdrempel 15mm/24uur, verwachtingshorizon 2 dagen

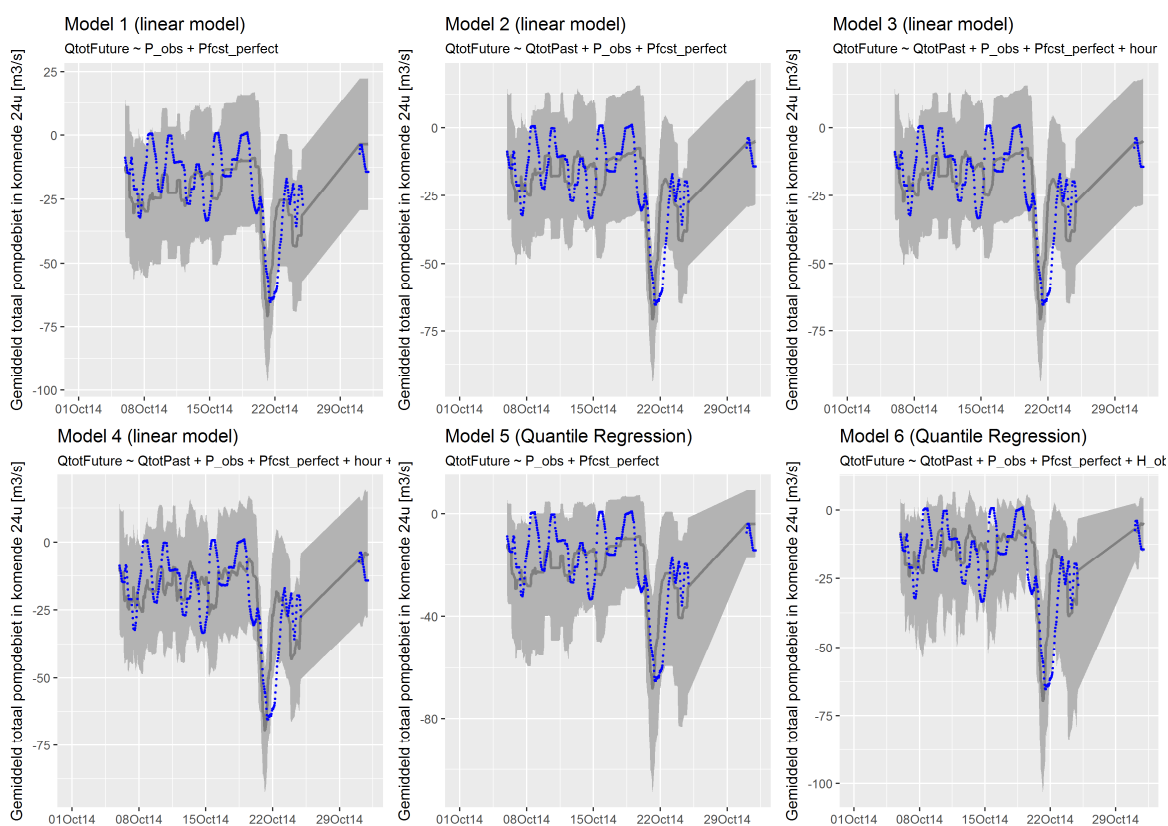


C Detailresultaten statistisch model

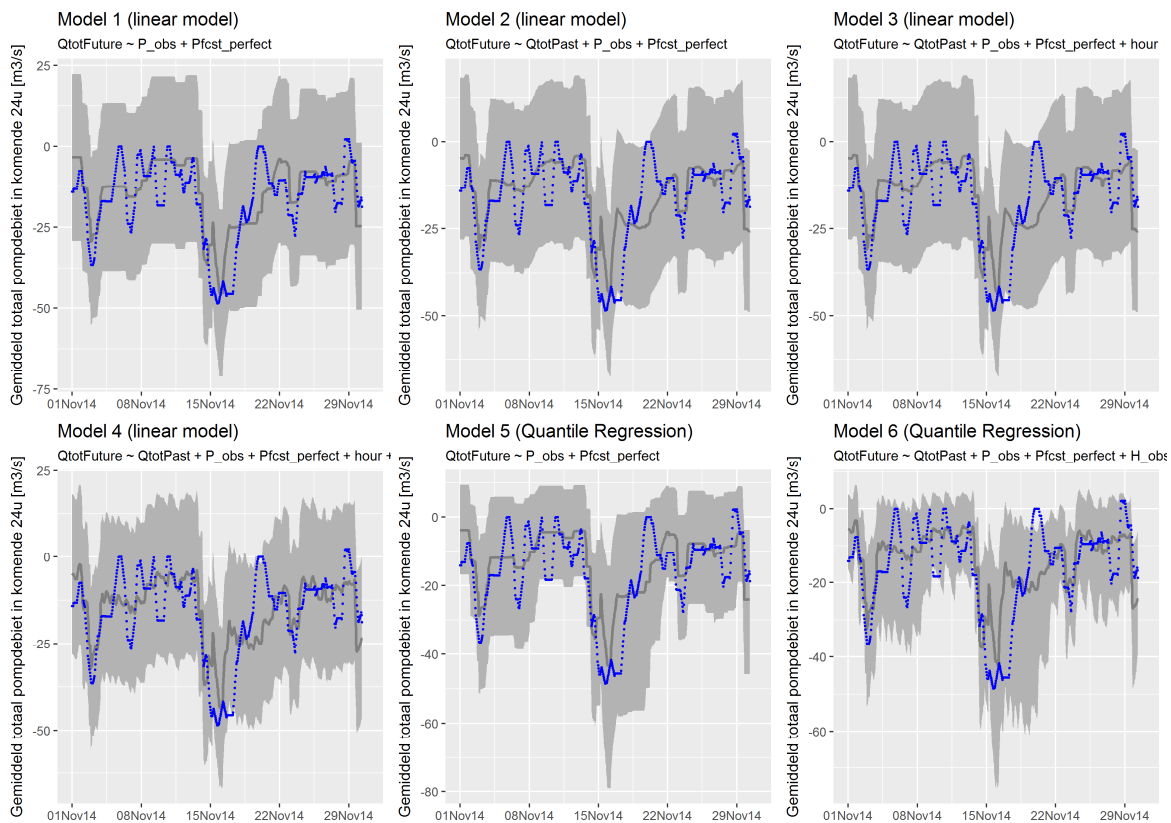
Dit volgende combinaties van verklarende variabelen voor het benodigde pompdebiet (gemiddeld voor de komende 24 uur) zijn getest:

- 4 Recente neerslag en toekomstige neerslag m.b.v. een lineair model
- 5 Recente pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag m.b.v. een lineair model
- 6 Recente pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag en uur van de dag m.b.v. een lineair model
- 7 Recente pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag, uur van de dag en actuele waterstand m.b.v. een lineair model
- 8 Recente neerslag en toekomstige neerslag (test 1) m.b.v. Quantile regression
- 9 Recente pompdebiet, recente neerslag en toekomstige neerslag en actuele waterstand m.b.v. Quantile regression

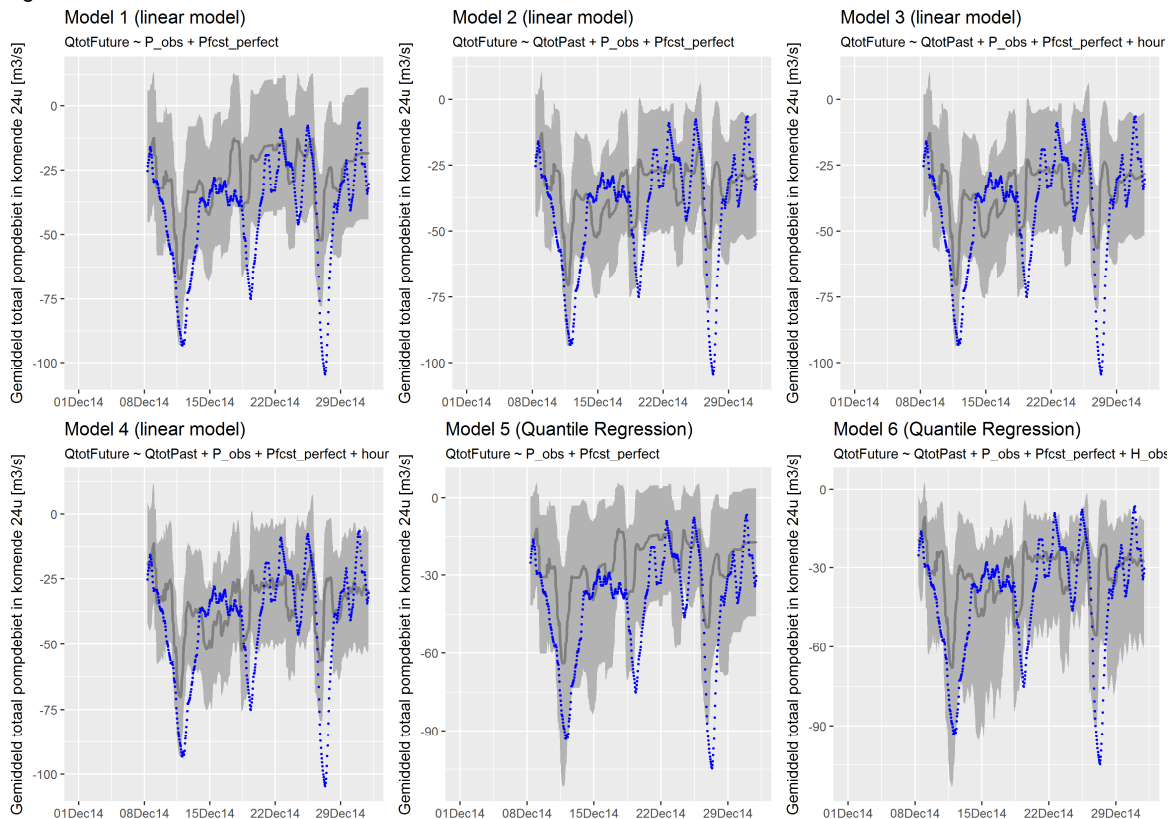
In de onderstaande figuren zijn per maand van de analyseperiode (okt 2014 t/m dec 2016) weergegeven.



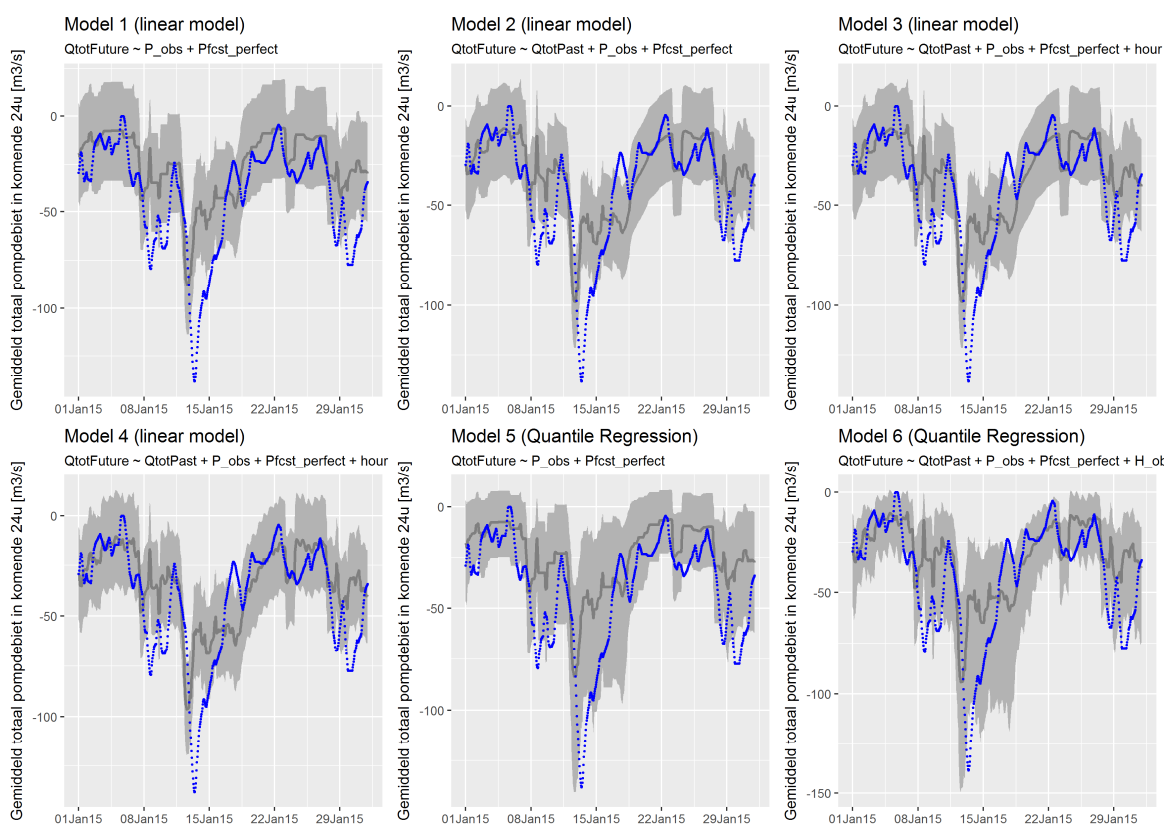
Figuur C.1 Resultaten voor oktober 2014



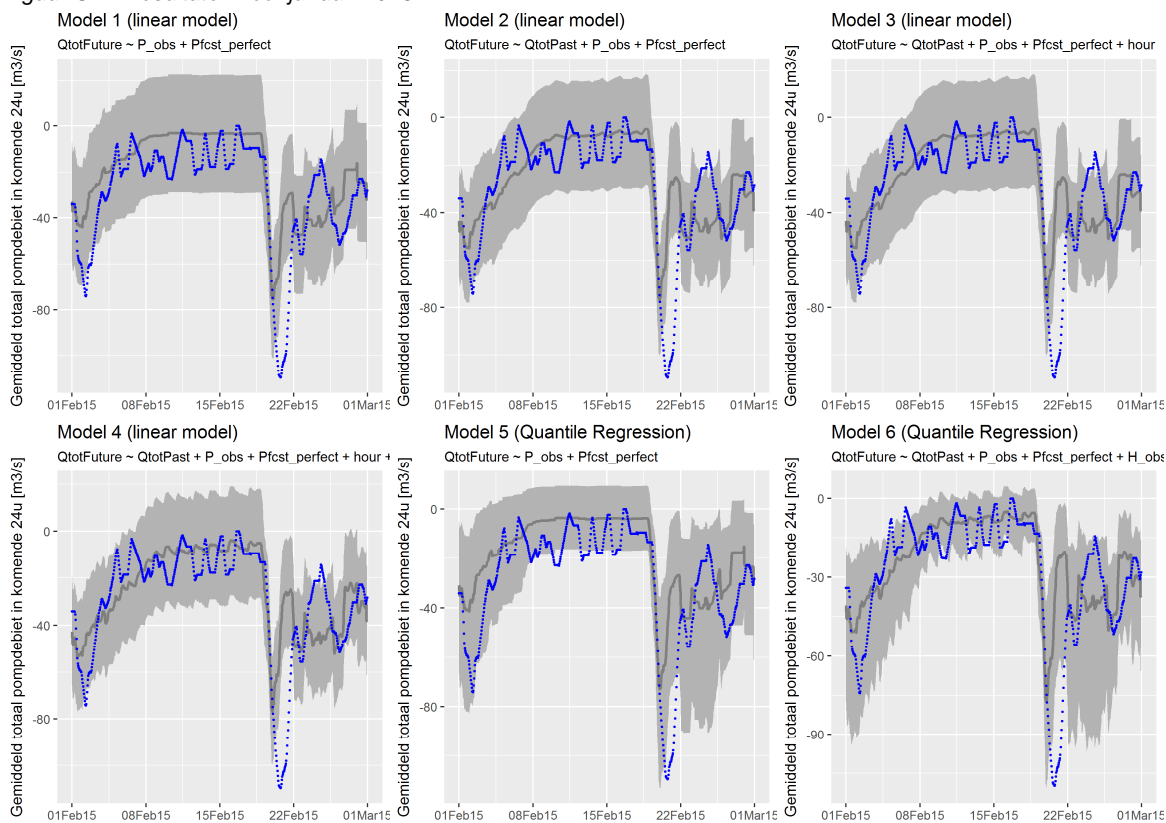
Figuur C.2 Resultaten voor november 2014



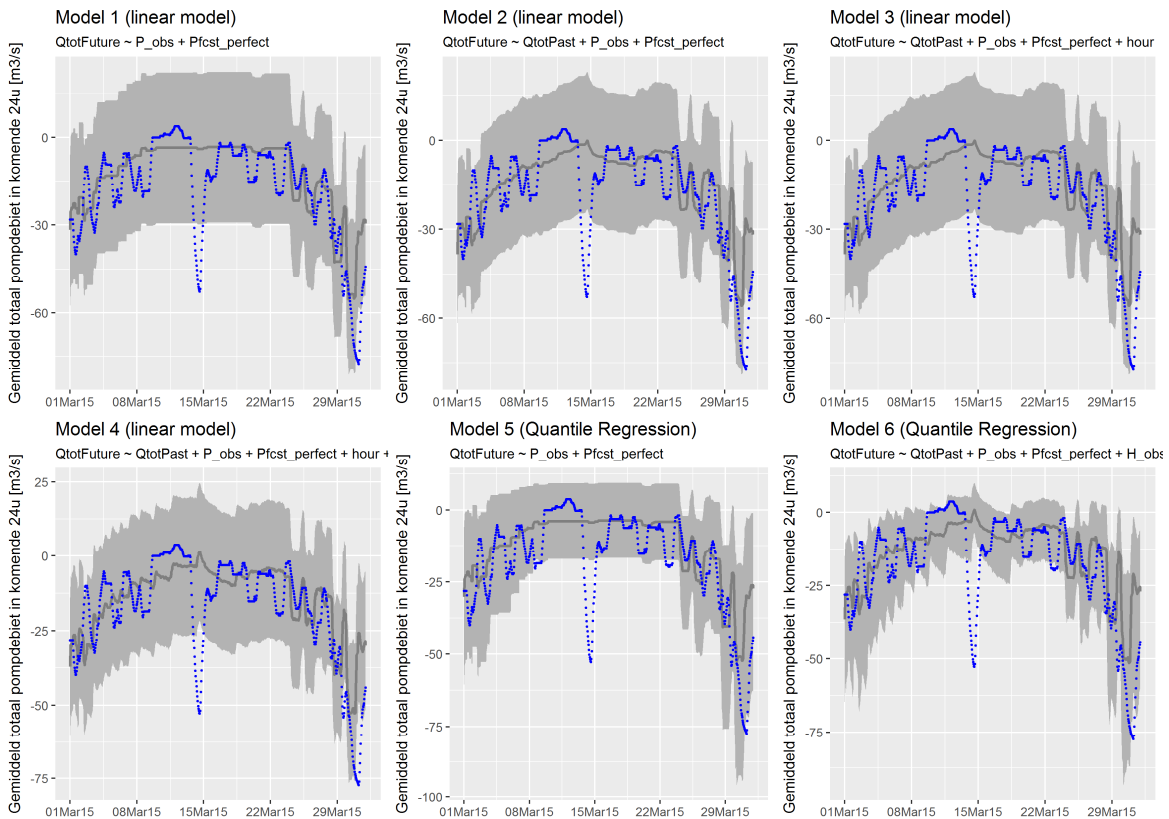
Figuur C.3 Resultaten voor december 2014



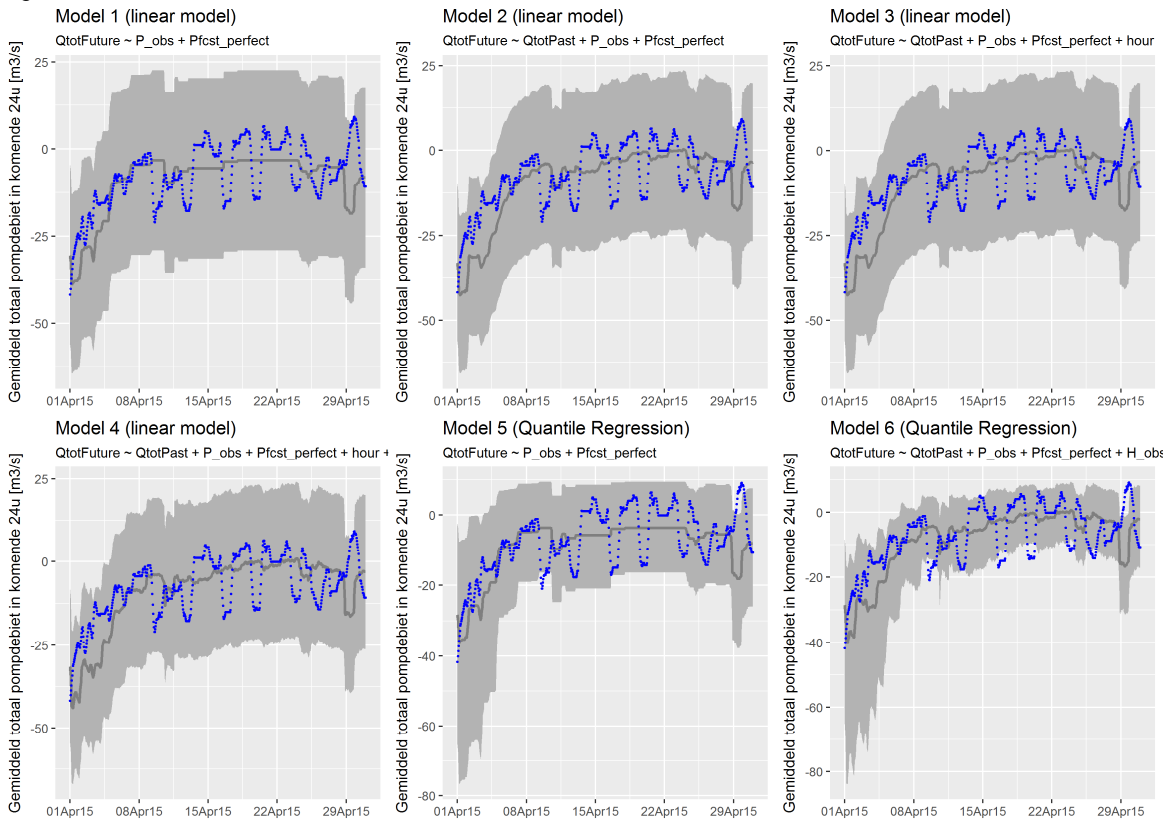
Figuur C.4 Resultaten voor januari 2015



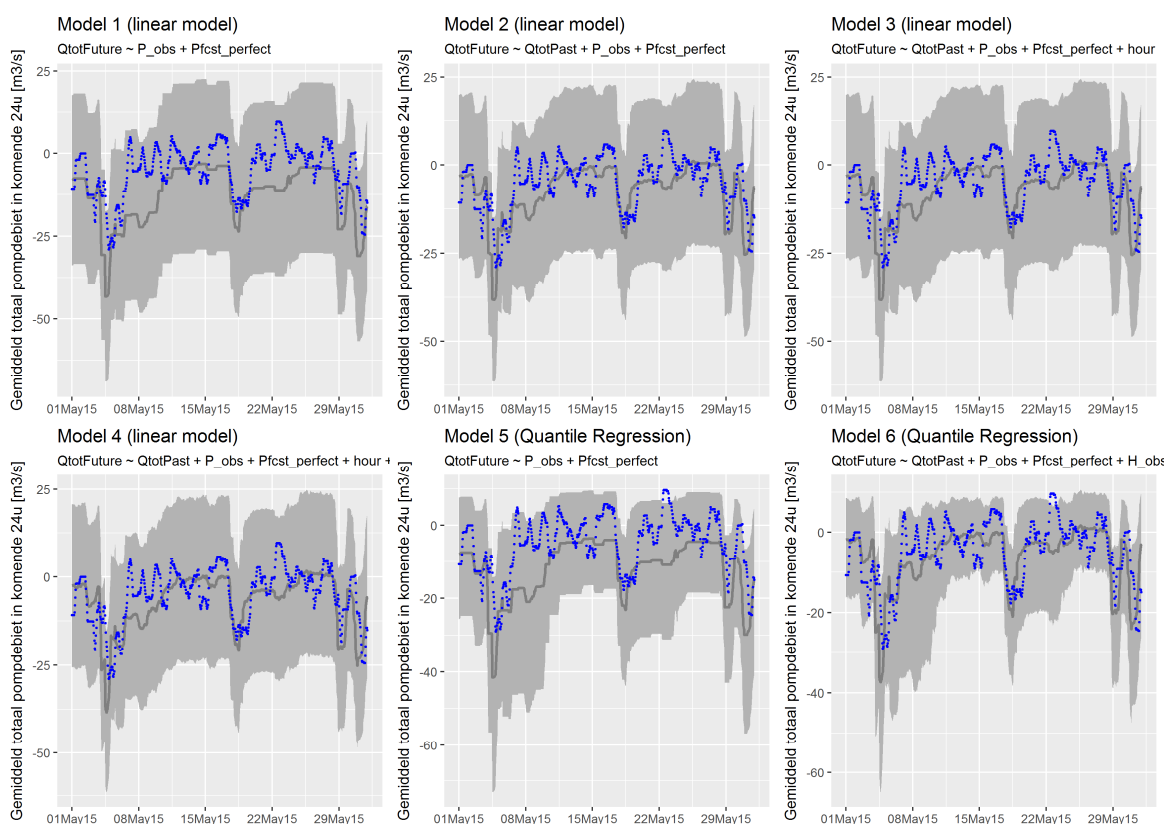
Figuur C.5 Resultaten voor februari 2015



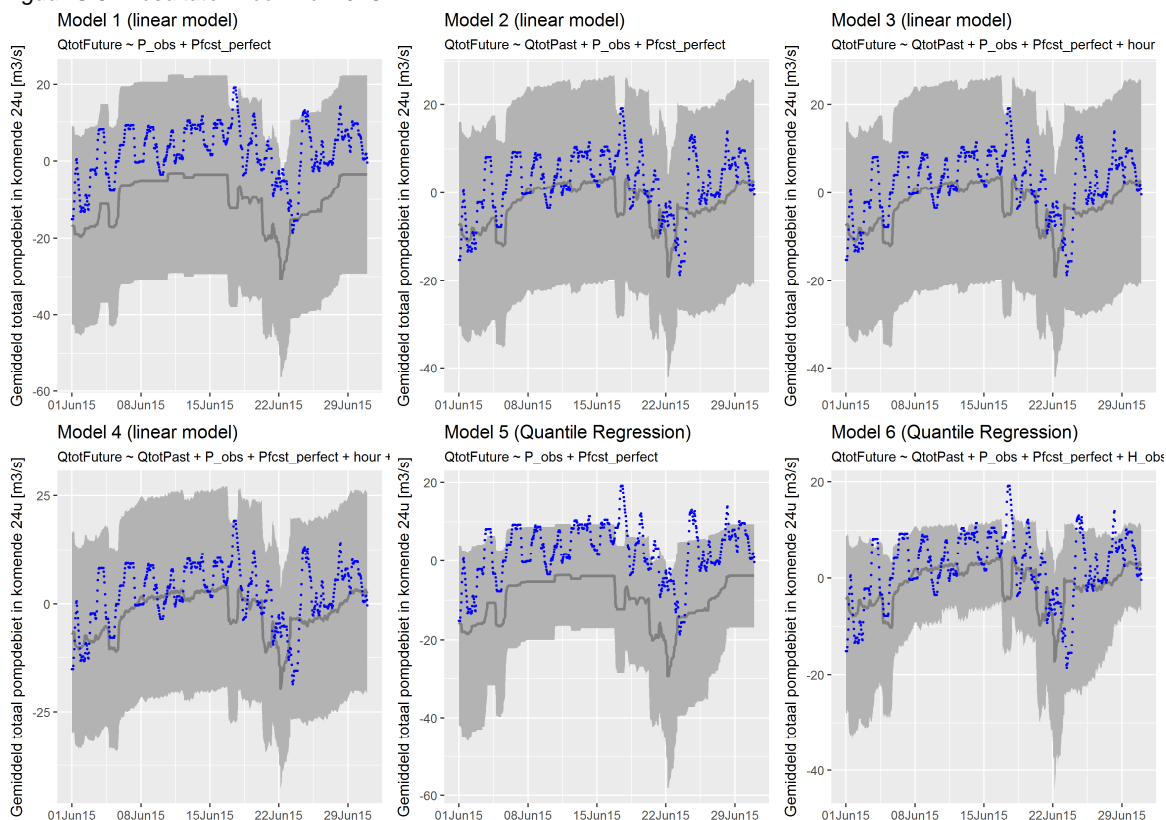
Figuur C.6 Resultaten voor maart 2015



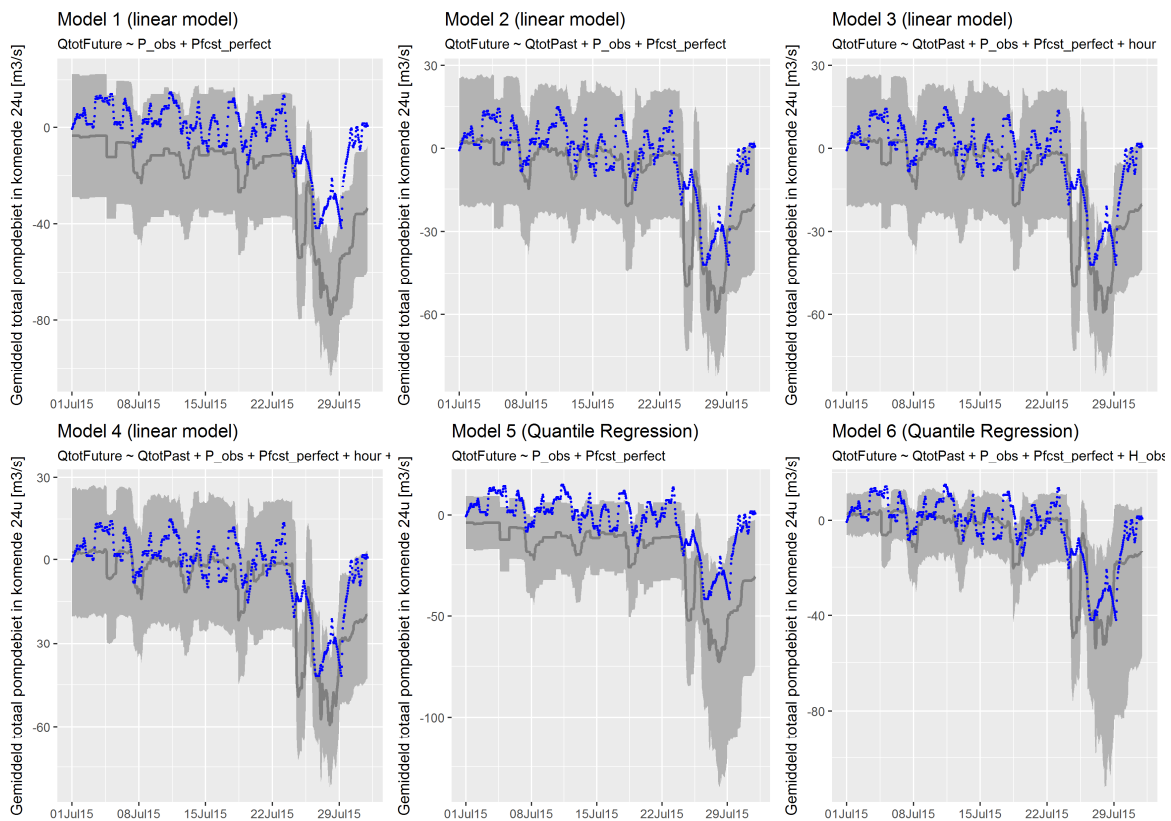
Figuur C.7 Resultaten voor april 2015



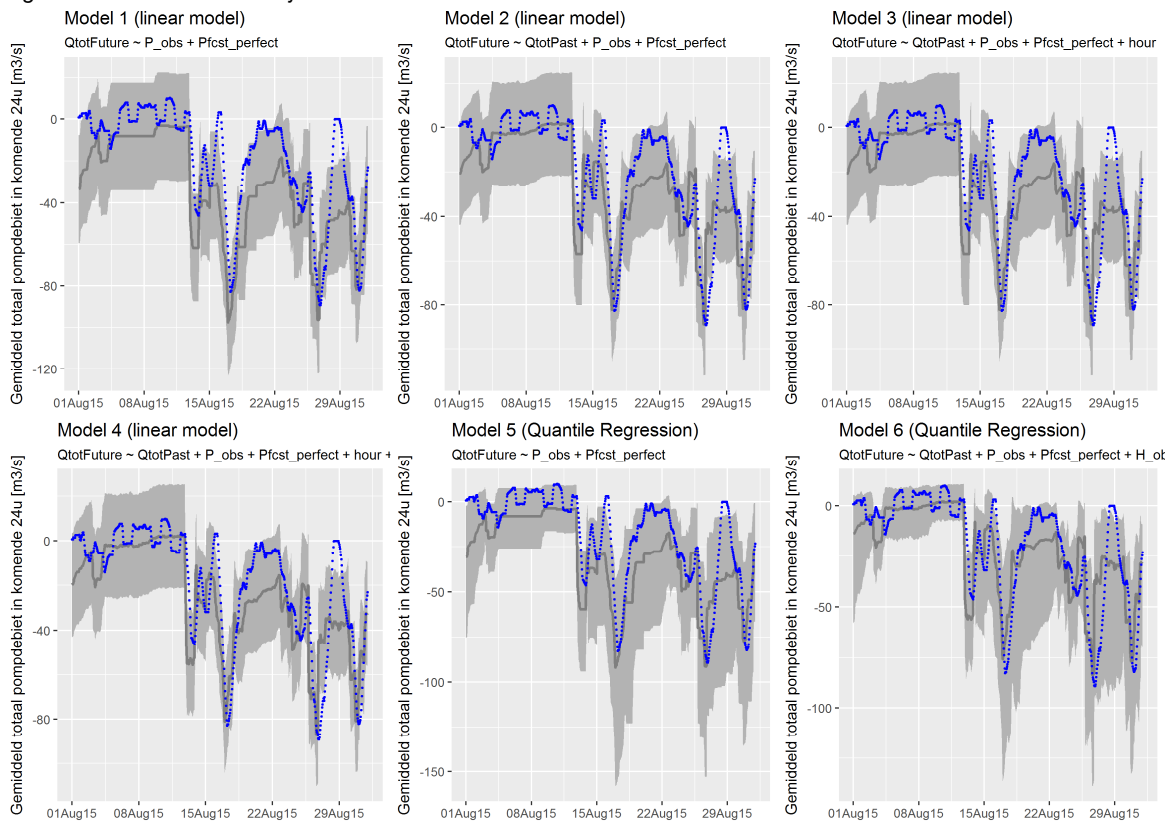
Figuur C.8 Resultaten voor mei 2015



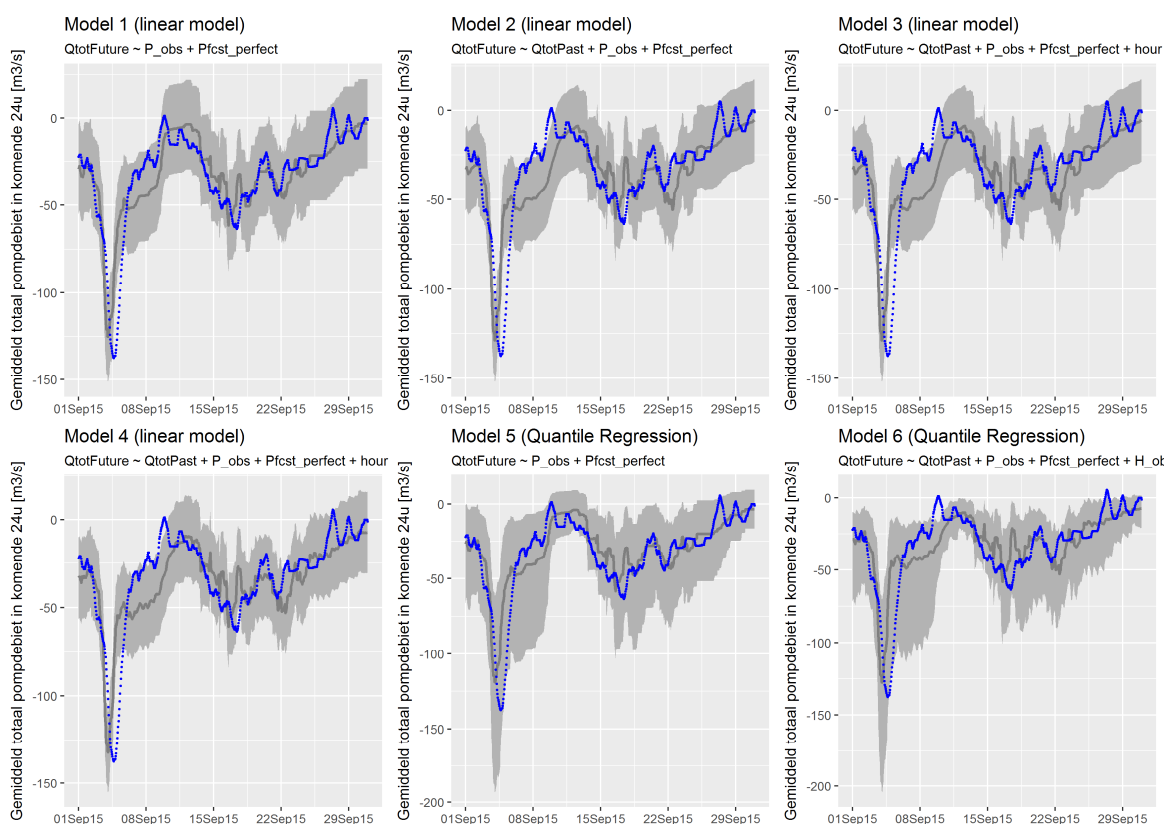
Figuur C.9 Resultaten voor juni 2015



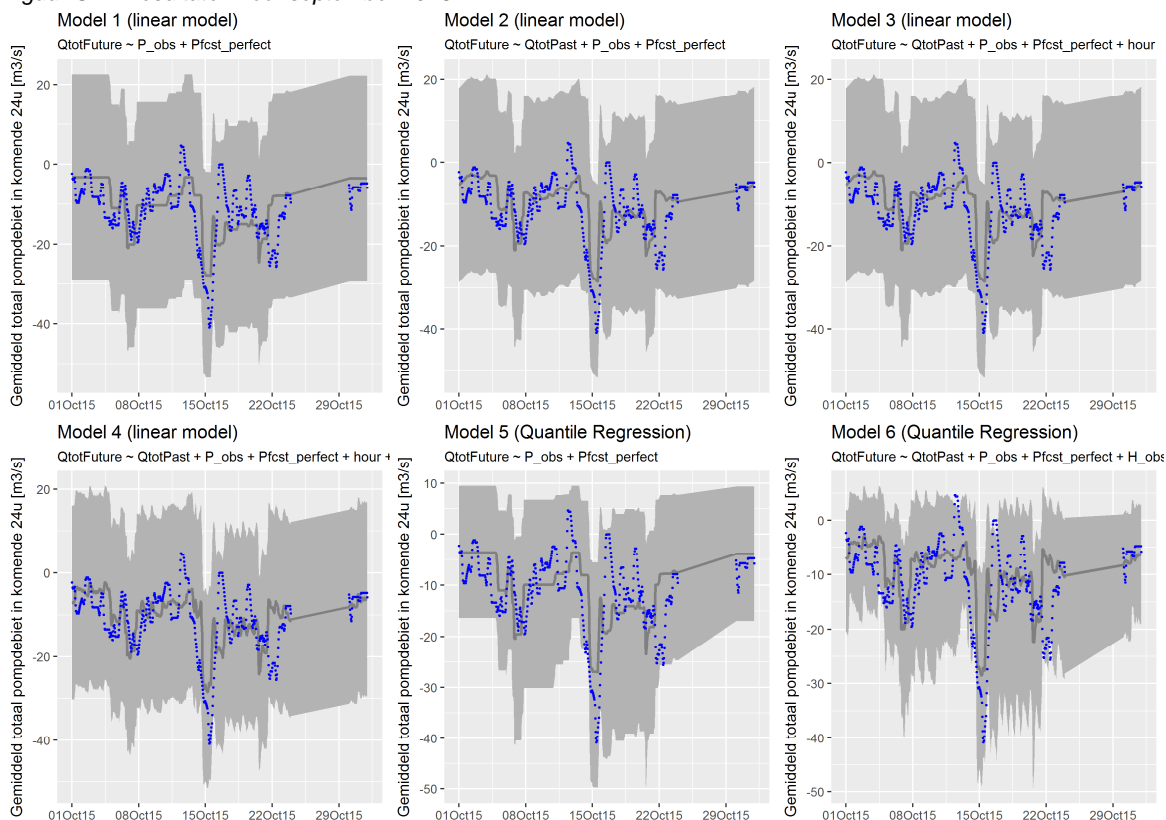
Figuur C.10 Resultaten voor juli 2015



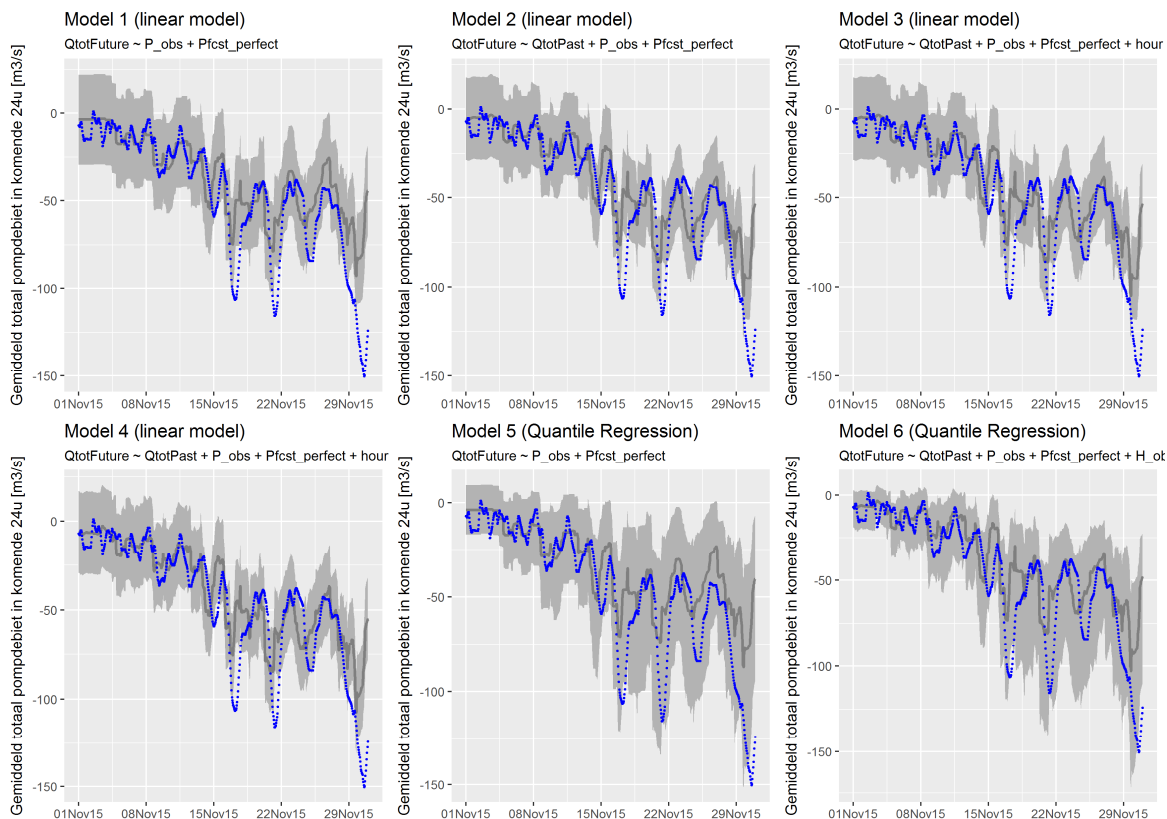
Figuur C.11 Resultaten voor augustus 2015



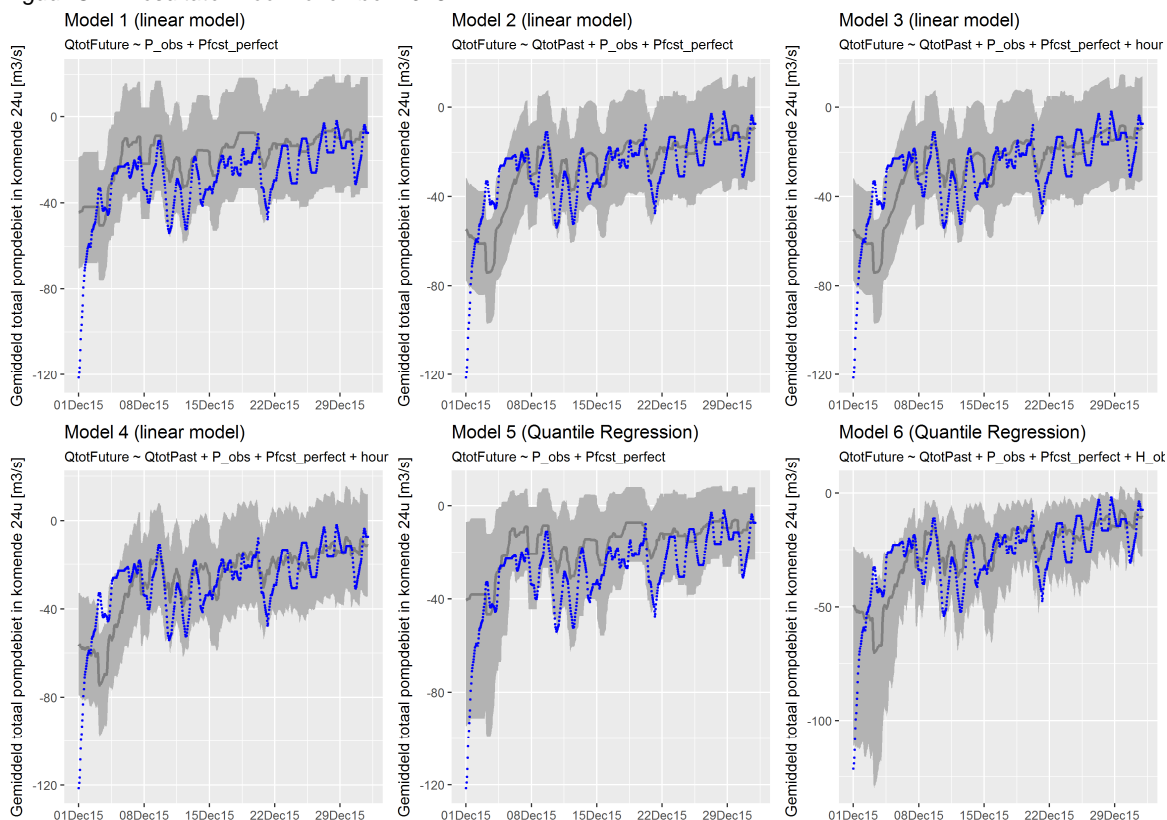
Figuur C.12 Resultaten voor september 2015



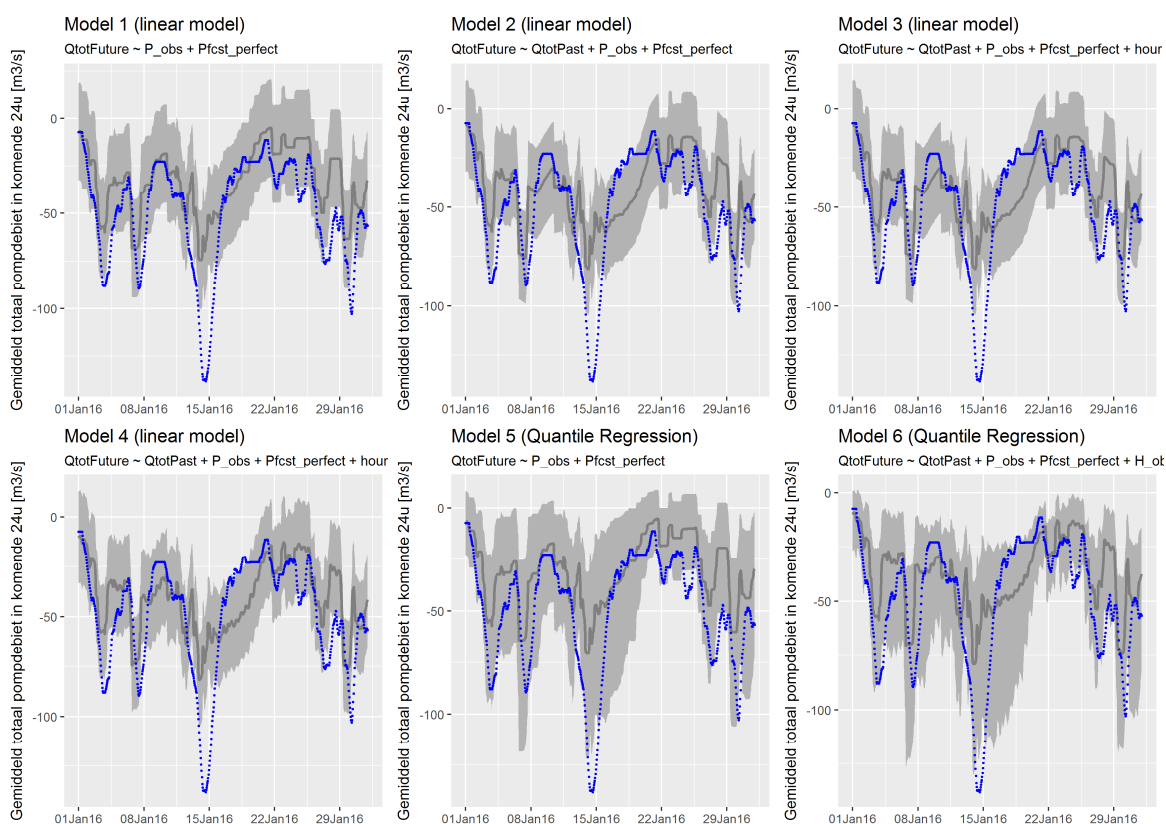
Figuur C.13 Resultaten voor oktober 2015



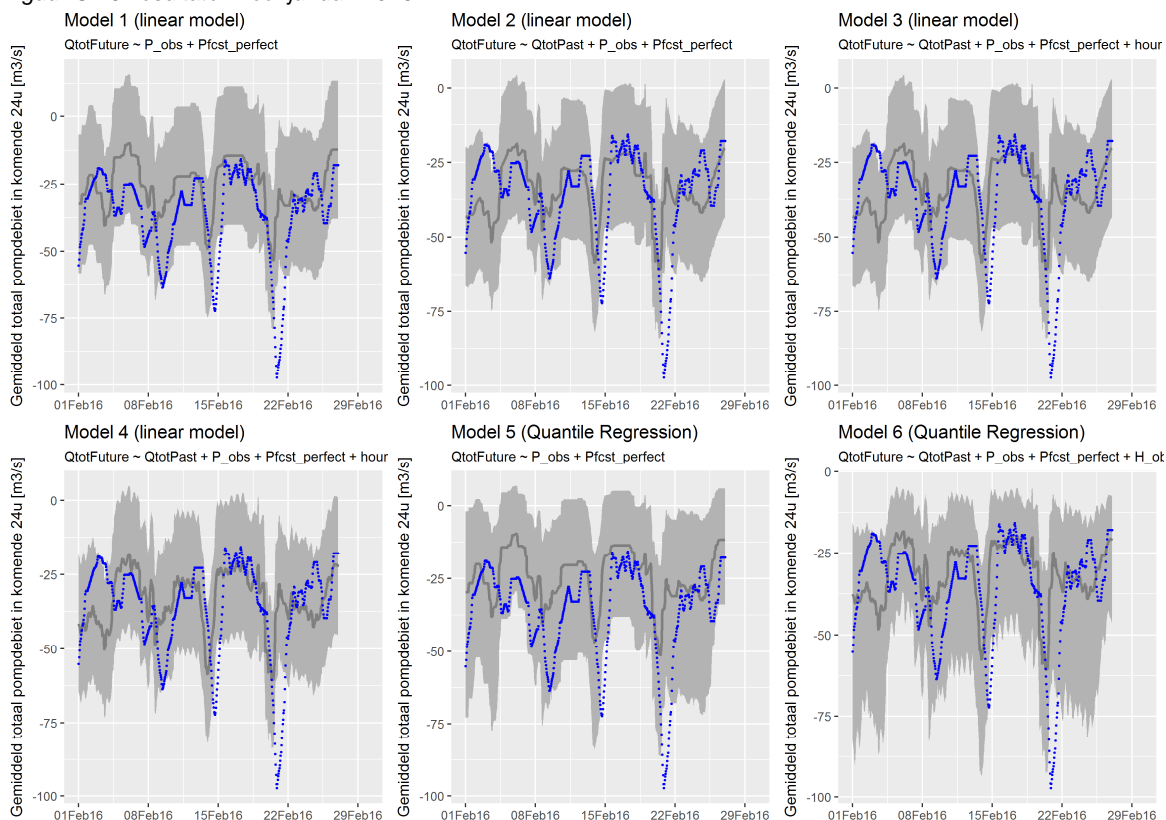
Figuur C.14 Resultaten voor november 2015



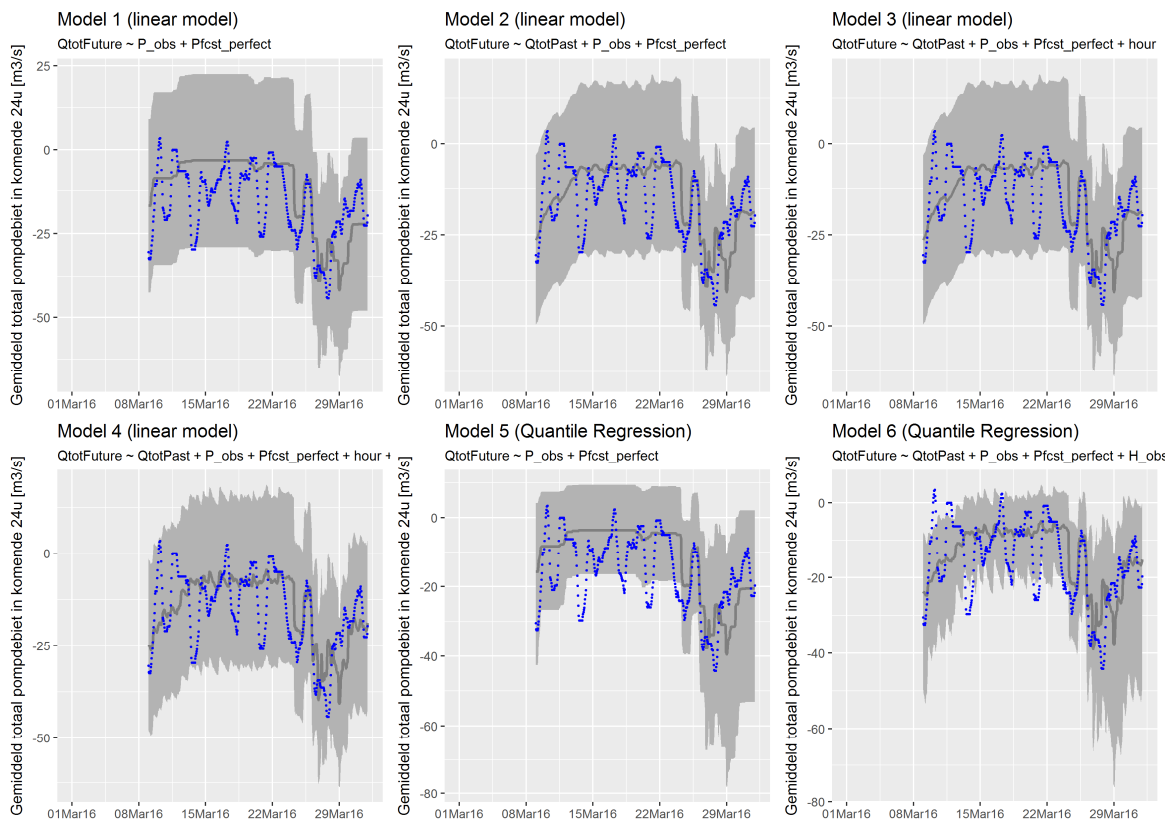
Figuur C.15 Resultaten voor december 2015



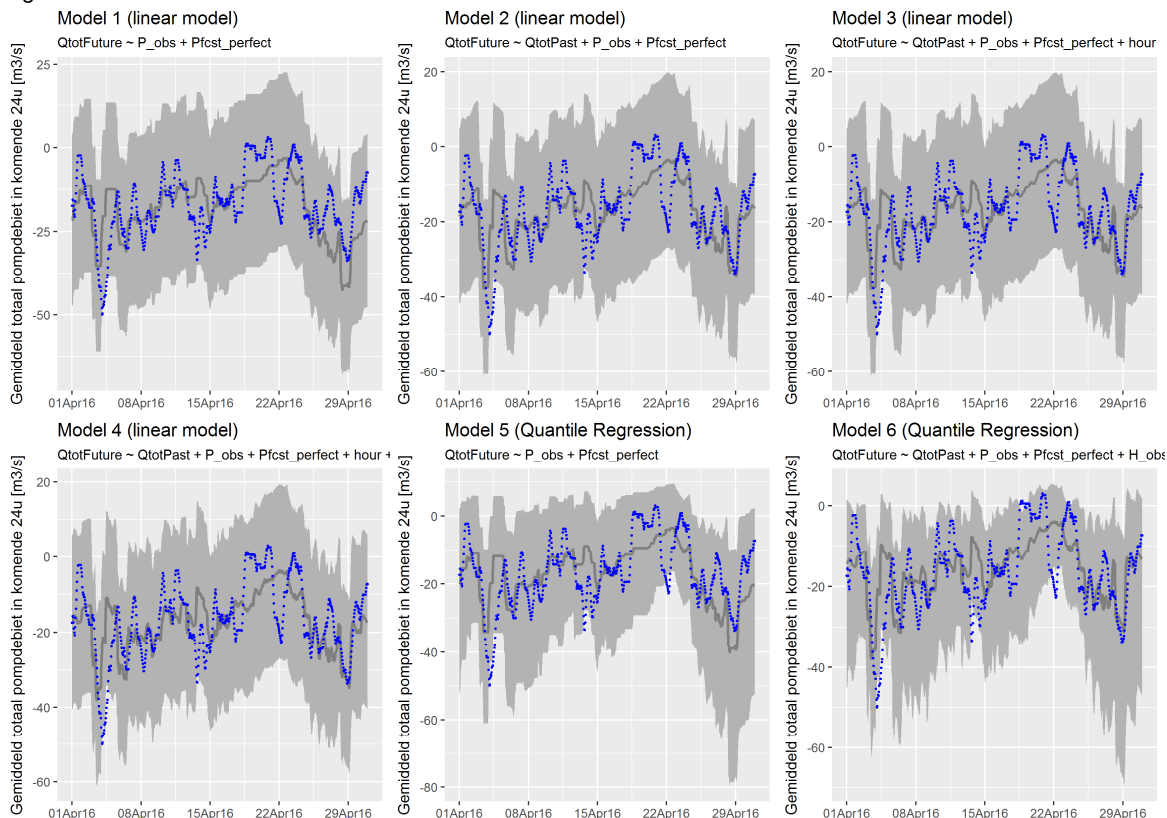
Figuur C.16 Resultaten voor januari 2016



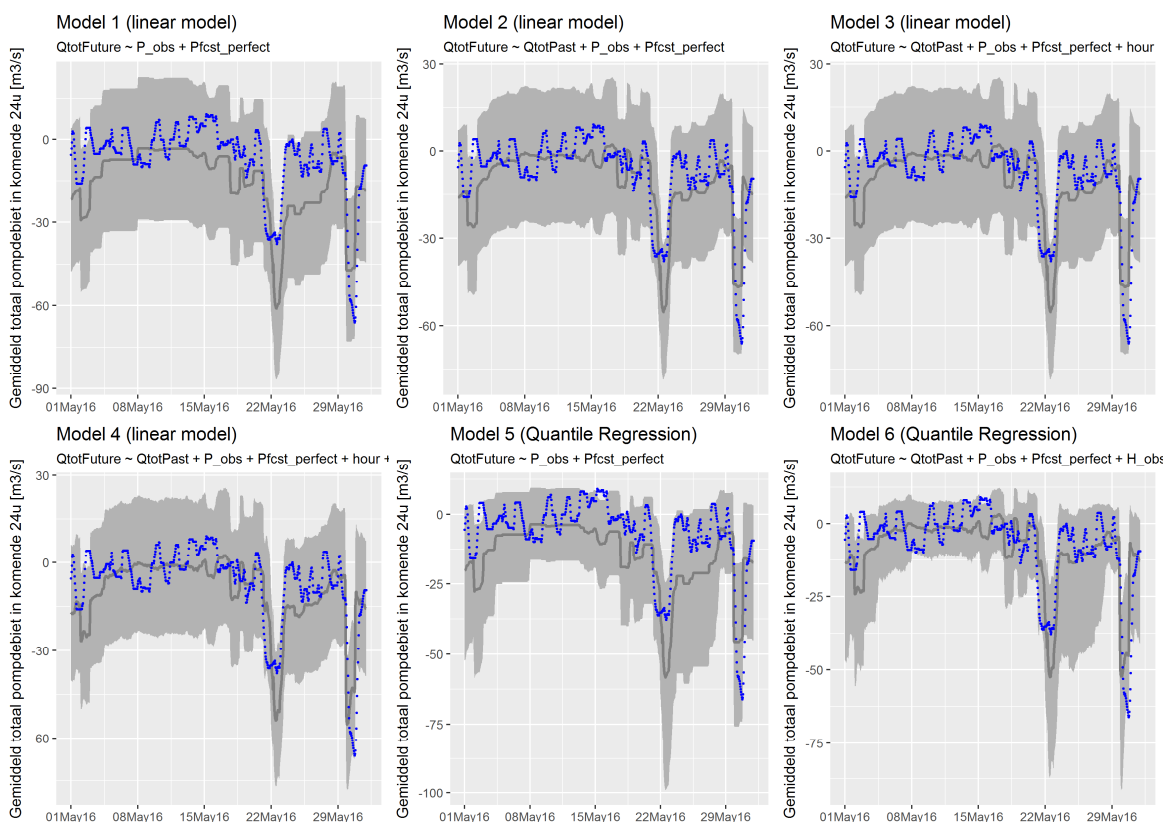
Figuur C.17 Resultaten voor februari 2016



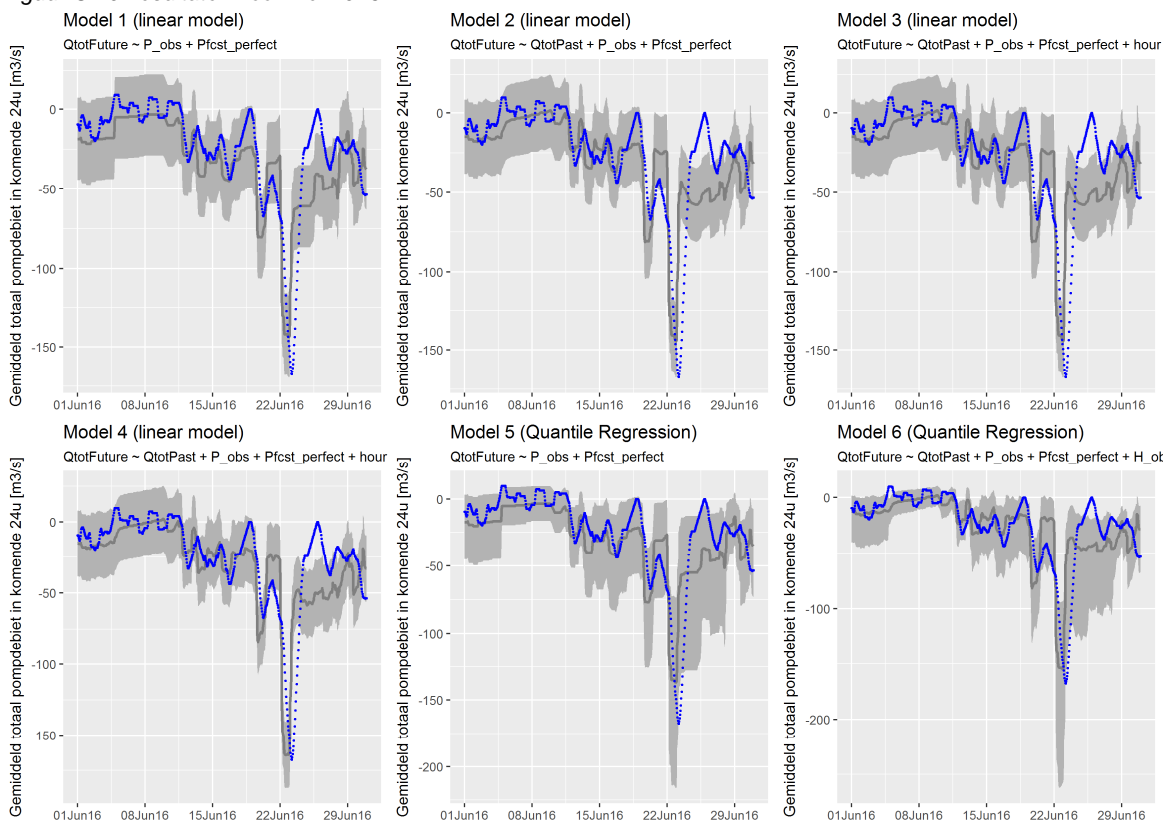
Figuur C.18 Resultaten voor maart 2016



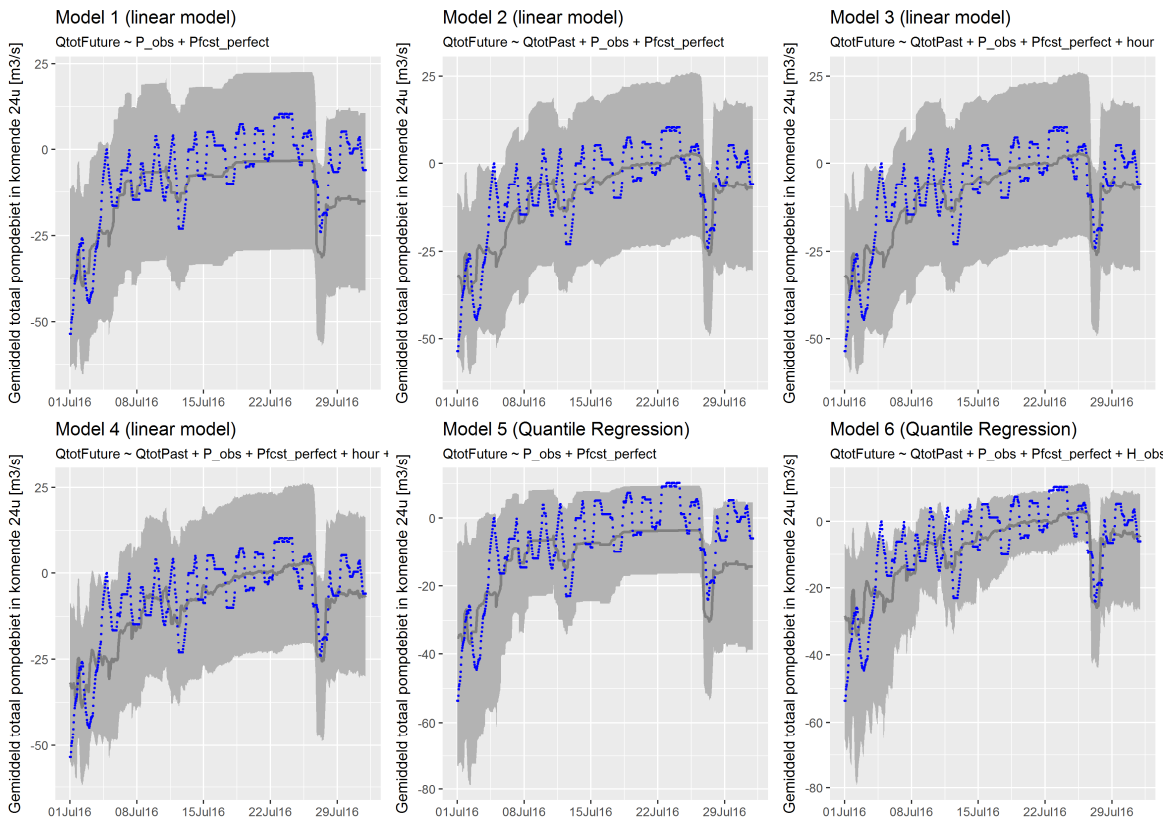
Figuur C.19 Resultaten voor april 2016



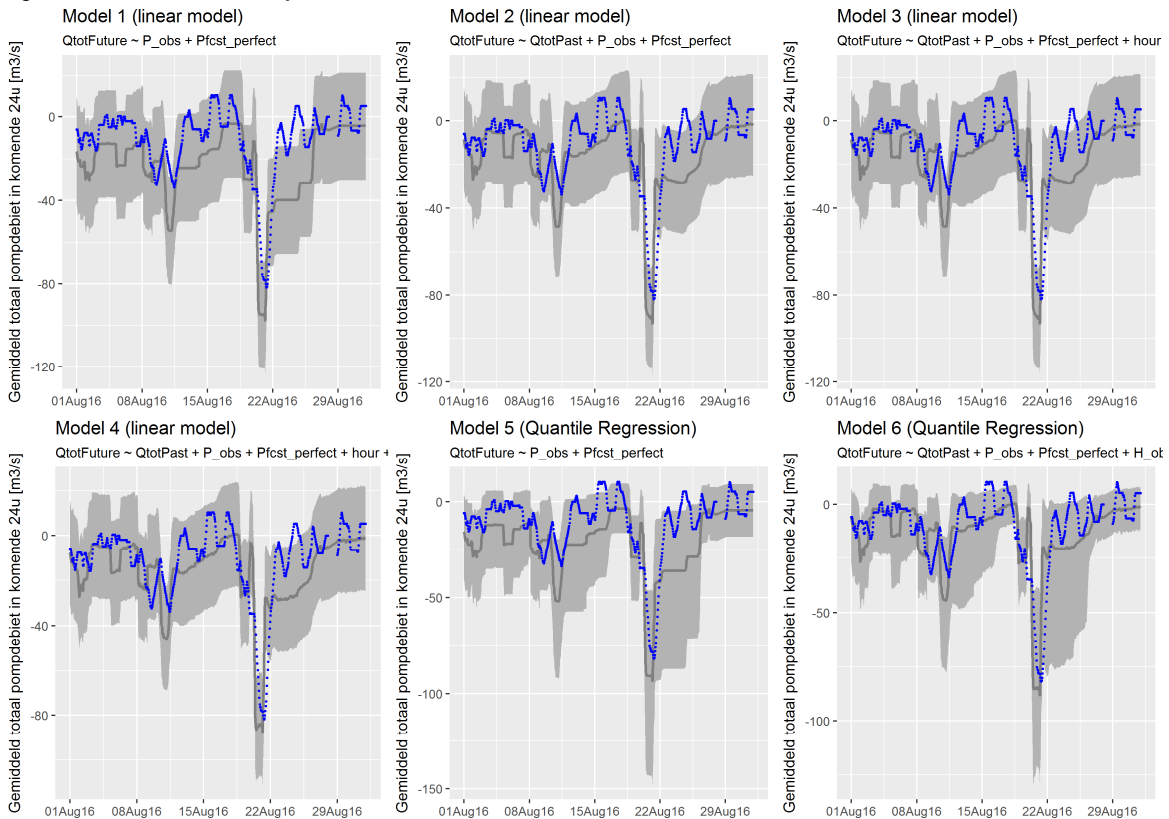
Figuur C.20 Resultaten voor mei 2016



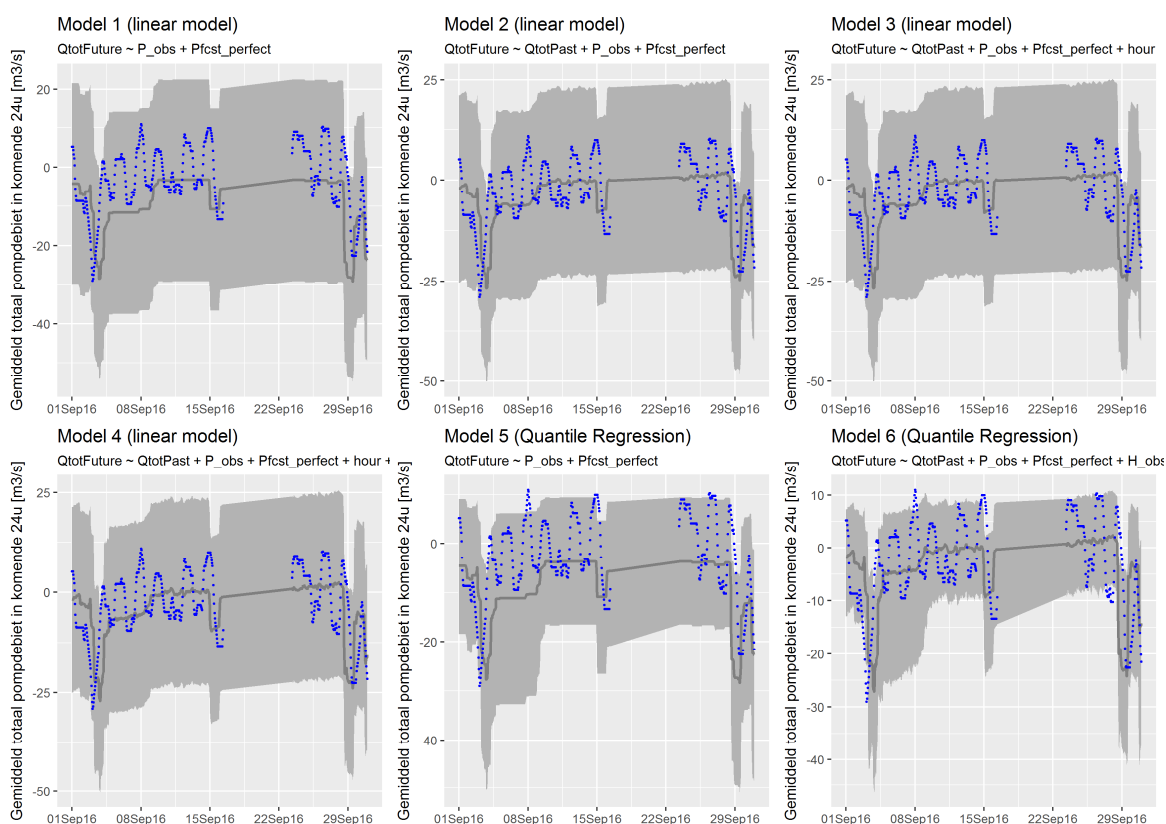
Figuur C.21 Resultaten voor juni 2016



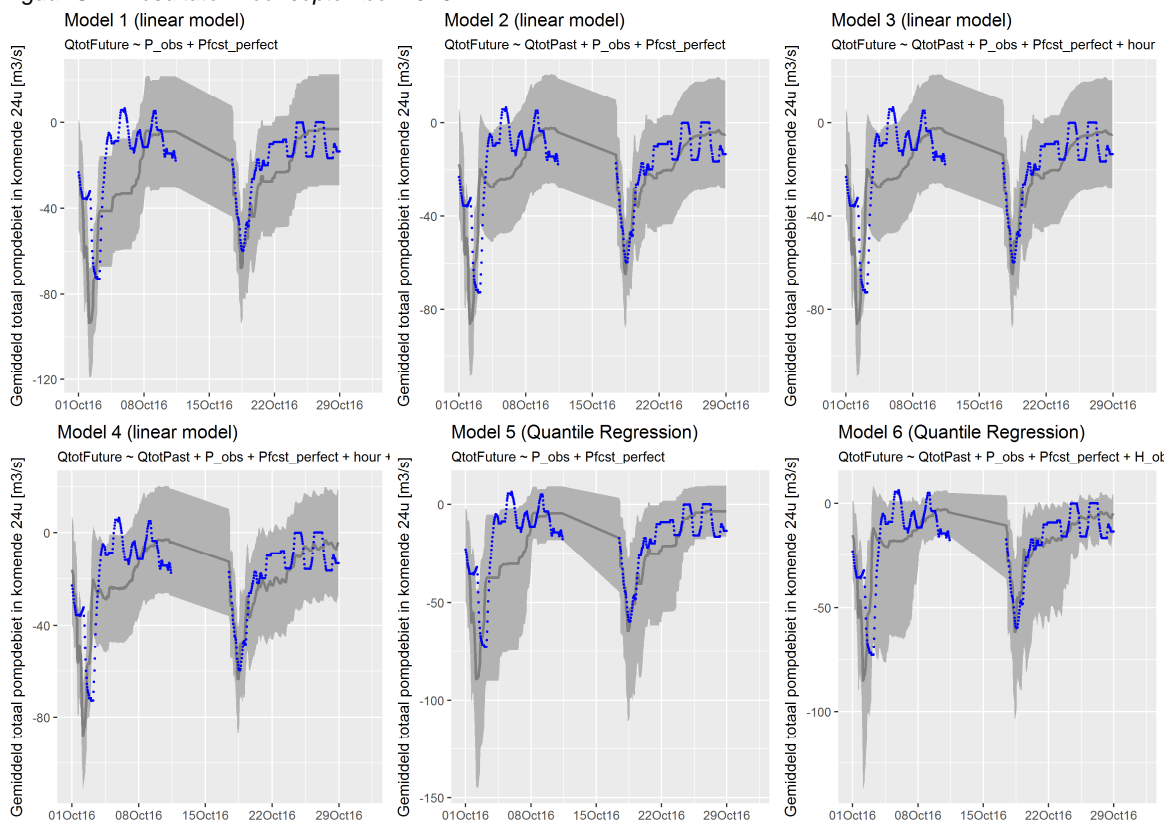
Figuur C.22 Resultaten voor juli 2016



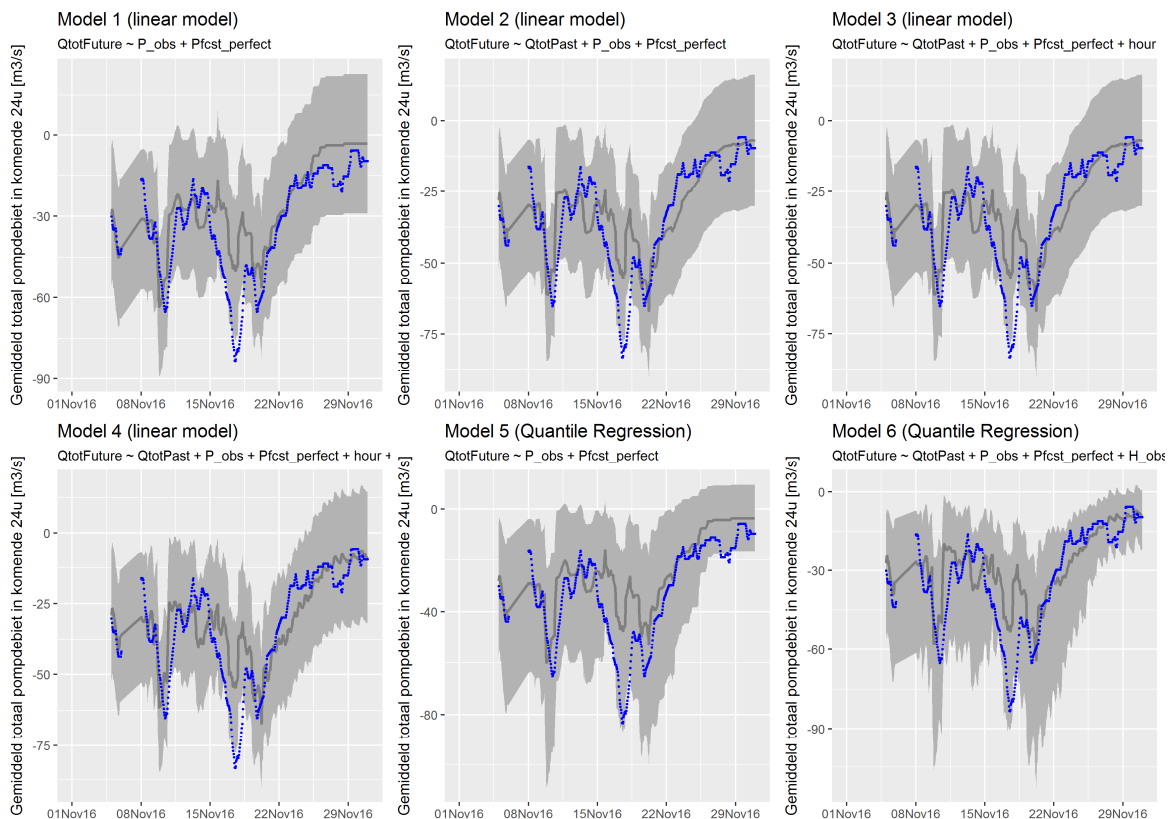
Figuur C.23 Resultaten voor augustus 2016



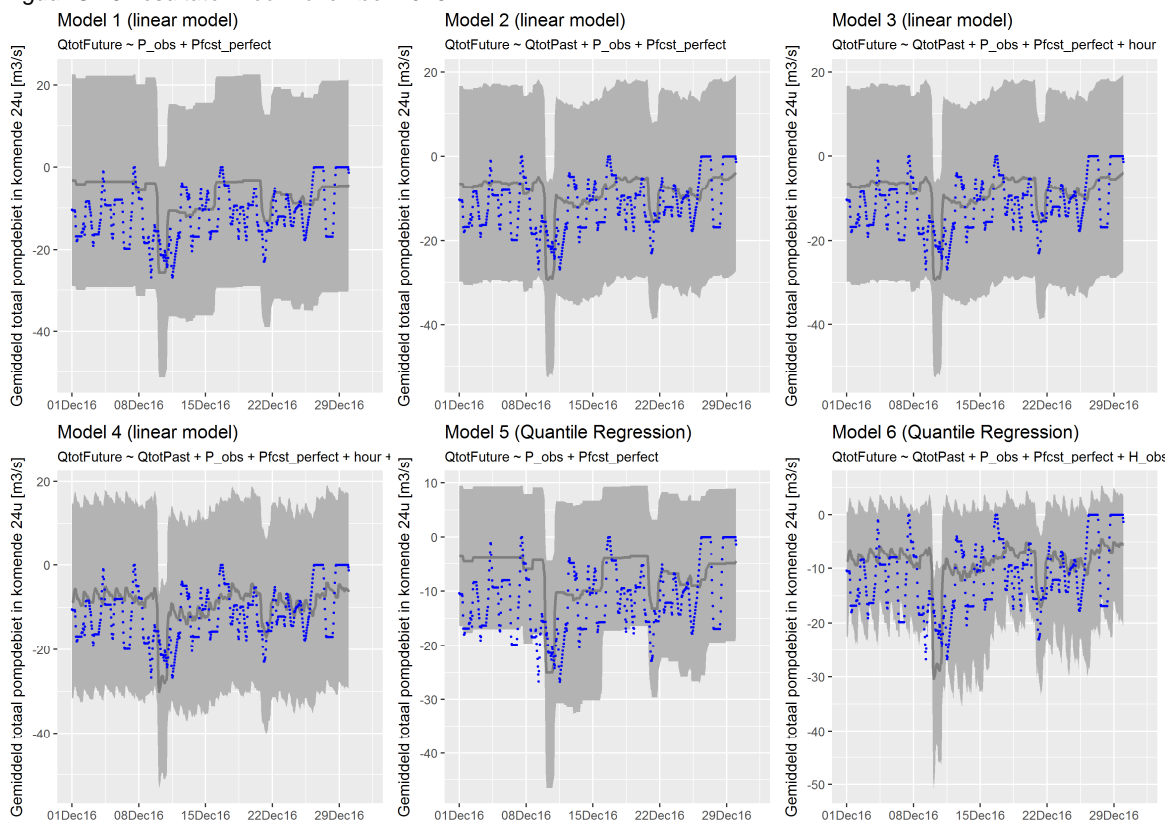
Figuur C.24 Resultaten voor september 2016



Figuur C.25 Resultaten voor oktober 2016



Figuur C.26 Resultaten voor november 2016



Figuur C.27 Resultaten voor december 2016