

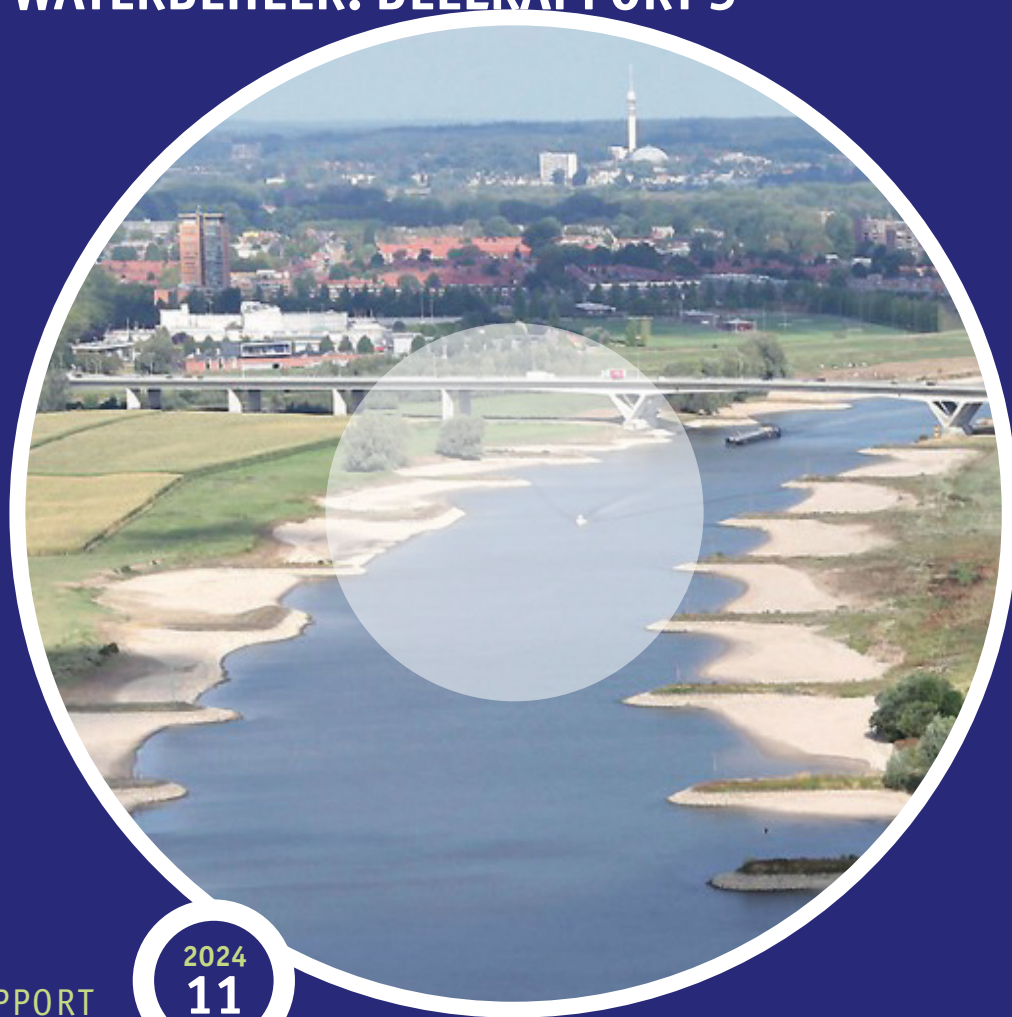


Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

stowa

NUT EN NOODZAAK VAN SEIZOENS-VERWACHTINGEN

METEO-ONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN HET WATERBEHEER: DEELRAPPORT 5



RAPPORT

2024

11

NUT EN NOODZAAK VAN SEIZOENS-VERWACHTINGEN
METEO-ONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN HET WATERBEHEER: DEELRAPPORT 5

RAPPORT

2024

11

ISBN 978.94.6479.064.1



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Ruud Hurkmans, HKV Lijn in water
Dorien Lugt, HKV Lijn in water
Michiel Pezij, HKV Lijn in water

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Michelle Talsma, STOWA
Frank van der Bolt, Waterschap Aa en Maas
Matthijs van den Brink, Rijkswaterstaat
Jochem Fritz, Hoogheemraadschap van Delfland
Joost Heijkers, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Jeroen Hermans Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Helena Pavelkova, Waterschap Limburg
Jannes Schenkel, Waterschap Noorderzijlvest
Rudolph Versteeg, Waterschap Zuiderzeeland.
Frank Weerts, Waterschap Rivierenland

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2024-10
ISBN 978.94.6479.058.0

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

SAMENVATTING

Dit rapport is Deelrapport 5 van het STOWA project 'Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer,' en betreft de beoordeling van kwaliteit van weersverwachtingen. Het project bestaat in totaal uit 5 deelrapporten, te weten:

- Deelrapport 1: Beoordeling neerslagstatistiek
- Deelrapport 2: Buienselectie stedelijk gebied
- Deelrapport 3: Droogtestatistiek
- Deelrapport 4: Weersverwachtingen
- Deelrapport 5: Seizoensverwachtingen

Droogte en zoetwaterbeschikbaarheid is een actueel thema. Het is belangrijk voor beleids- en uiteindelijke investeringsbesluiten om het risico van droogte goed inzichtelijk te hebben. Inzicht in de verwachte lange-termijn ontwikkelingen is daarbij zeer relevant.

Meteorologische instituten als het ECMWF produceren reeds geruime tijd (sub-) seizoenale verwachtingen. Deze verwachtingen bieden inzicht in de te verwachten weerdynamiek op (sub-) seizoenale tijdschalen tot zeven maanden in de toekomst. Deze verwachtingen bieden daarom, in theorie, inzicht in de ontwikkeling van watersystemen op de middellange termijn via verwachtingen van neerslag, temperatuur, en verdamping.

Seizoensverwachtingen worden echter nog niet veelvuldig toegepast in het Nederlandse waterbeheer. Doel van dit rapport is daarom om een overzicht te geven van de state-of-the-art van meteorologische seizoenverwachtingen en inzicht te bieden in kansrijke toepassingen in het Nederlandse waterbeheer. We beschrijven wat het Nederlandse waterbeheer reeds doet met de verwachtingen en wat het Nederlandse waterbeheer er mee zou kunnen in de toekomst en wat daarvoor nodig is.

Het ECMWF levert vanaf 2017 elke maand een ensembleverwachting van 51 globale seizoenverwachtingen van zeven maanden in de toekomst, genaamd SEAS5. SEAS5 heeft een ruimtelijke resolutie van 0.25° (ongeveer 25 km). De SEAS5-verwachting bevat verwachtingen van de dagelijkse neerslagsom, variabelen om de referentiegewasverdamping uit te rekenen en andere variabelen zoals windsnelheid.

De voorspelkracht van meteorologische seizoenverwachtingen in Nederland is beperkt tot enkele weken vooruit. Meteorologische seizoenverwachtingen hebben in Nederland dus relatief weinig meerwaarde ten opzichte van reguliere verwachtingen op de middellange termijn van enkele weken. In andere gebieden, waar het weer bijvoorbeeld sterk beïnvloed wordt door grootschalige fluctuaties als El-Nino, kan dit anders zijn en zijn verwachtingen tot zeven maanden vooruit wél zinvol. In West-Europa is dat echter niet geval en een horizon van ongeveer twee weken doorgaans gezien als maximale, verwachtingshorizon voor atmosferische processen (Lorenz, 1969).

Echter tonen de verschillende studies en projecten genoemd in dit rapport aan dat er wel degelijk meerwaarde zit in het gebruik van de meteorologische verwachtingen om inzicht te bieden in de ontwikkeling van hydrologische variabelen als rivierafvoer en grondwaterstanden tot 1 à 2 maanden vooruit. De voorspellende kracht wordt mede veroorzaakt door het relatief lange geheugen van deze systemen. Deze voorspelhorizon biedt Nederlandse waterbeheerders relevante informatie voor het operationele waterbeheer. Deze rapportage biedt naast inzicht in de voorspelkracht seizoensverwachtingen van meteorologische en hydrologische variabelen, een overzicht van onderzoeken waar toepassing voor het Nederlands waterbeheer zijn of worden onderzocht.

DE STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt Stowa zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die Stowa beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van Stowa in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

NUT EN NOODZAAK VAN SEIZOENS-VERWACHTINGEN

METEO-ONDERZOEK TEN BEHOEVE VAN HET WATERBEHEER: DEELRAPPORT 5

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
	INHOUD	
1	INLEIDING	1
	1.1 Achtergrond en doelstelling	1
	1.2 Uitgangspunten	2
2	DATA EN METHODEN	3
	2.1 ECMWF SEAS5	3
	2.2 Bepaling van de nauwkeurigheid	4
	2.2.1 Quantile matching	4
	2.2.2 Bepaling nauwkeurigheid of “forecast skill”	5
3	KWALITEIT METEOROLOGISCHE VERWACHTINGEN	6
	3.1 Gemiddelde verwachtingen	6
	3.2 Individuele verwachtingen	7
	3.3 Conclusie	9

4	WAT KUNNEN WE ER AL MEE?	10
4.1	Voorbeeld: seizoenale rivierafvoerverwachtingen	11
4.2	Voorbeeld: seizoenale grondwaterverwachtingen	12
5	WAT ZOULDEN WE ERMEE WILLEN?	14
5.1	Overzicht	14
5.2	Schaal van toepassingen	14
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	15
6.1	Conclusies	15
6.2	Aanbevelingen: wat is er nodig?	16
7	REFERENTIES	17

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND EN DOELSTELLING

In de afgelopen jaren hebben STOWA, HKV en KNMI in nauwe samenspraak met de waterschappen gewerkt aan het ontwikkelen en ontsluiten van informatie over het weer in Nederland ten behoeve van het waterbeheer. Deze samenwerking heeft geresulteerd in een reeks producten die middels rapportages en het webportaal www.meteobase.nl hun weg naar de Nederlandse waterbeheerders hebben gevonden. Kennisontwikkeling op het gebied van meteorologie in het waterbeheer verdient blijvende aandacht. Het is immers de meteorologie die aan de basis staat van de waterhuishoudkundige inrichting van Nederland. Ook is het klimaat aan veranderingen onderhevig.

Onder impuls van het Deltaprogramma Zoetwater en aangewakkerd door de droge zomers van 2018, 2019 en 2020 is zoetwaterbeschikbaarheid een actueel thema. Het is belangrijk voor beleids- en uiteindelijke investeringsbesluiten om het risico van droogte goed inzichtelijk te hebben. Inzicht in de verwachte langetermijnontwikkelingen is daarbij zeer relevant. STOWA is daarom een onderzoek gestart naar het verdiepen van de kennis over seizoenverwachtingen gericht op neerslag en verdamping.

Meteorologische instituten als het ECMWF produceren reeds geruime tijd (sub-) seizoenale verwachtingen. Deze verwachtingen bieden inzicht in de te verwachten weerdynamiek op (sub-) seizoenale tijdschalen tot zeven maanden in de toekomst. Deze verwachtingen bieden daarom, in theorie, inzicht in de ontwikkeling van watersystemen op de middellange termijn via verwachtingen van neerslag, temperatuur, en verdamping.

Seizoenverwachtingen worden echter nog niet veelvuldig toegepast in het Nederlandse waterbeheer. Verschillende aspecten spelen hier mogelijk een rol:

- De voorspelkracht van state-of-the-art meteorologische (sub-) seizoenale verwachtingen is vooralsnog beperkt in Europa; Dat wordt ook bevestigd door het ECMWF: *“At the S2S time range, the predictability of meteorological surface variables over Europe is in general quite low, although this depends on the spatial and temporal scales. This limits the use of S2S predictions of such variables for decision-making”*.
- Er bestaat soms een onrealistische wens rondom de mogelijkheden van seizoenverwachtingen. Deze verwachtingen dienen niet op eenzelfde manier ingezet te worden als huidige weersverwachtingen voor kortere termijnen. De verwachtingen bieden inzicht in droger of natter worden omstandigheden in de nabije toekomst. Daarentegen dienen deze verwachtingen niet gebruikt te worden om te voorspellen op welke dagen het regent over 3 maanden.
- Er zijn momenteel nog weinig use cases bekend waarin het nut van (sub-) seizoenale verwachtingen aangetoond wordt.

Recent onderzoek heeft echter uitgewezen dat de combinatie van meteorologische (sub-) seizoensverwachtingen met hydrologische modellen wel degelijk leidt tot zinvolle informatie. Voor rivierafvoer is dit bijvoorbeeld aangetoond voor winterperioden door Arnall et al. (2018) en Hurkmans et al (2023). Het ECMWF zegt hierover: *“However, for many catchment areas the skill of sub-seasonal to seasonal hydrometeorological forecasts, e.g. of river discharge and water levels of rivers and lakes, depends to a considerable extent on hydrological initial conditions, such as snow, soil moisture and groundwater storage”*.

Doel van dit rapport is daarom om een overzicht te geven van de state-of-the-art van meteorologische seizoensverwachtingen en inzicht te bieden in kansrijke toepassingen in het Nederlandse waterbeheer. We beschrijven wat het Nederlandse waterbeheer reeds doet met de verwachtingen en wat het Nederlandse waterbeheer er mee zou kunnen in de toekomst en wat daar voor nodig is.

1.2 UITGANGSPUNTEN

Er bestaan diverse definities van subseizoenale en seizoenale verwachtingen. We gebruiken de volgende definities:

- **Subseizoenale verwachtingen:** Dit type verwachtingen bieden inzicht in meteorologische ontwikkelingen twee tot zes weken in de toekomst;
- **Seizoenale verwachtingen:** dit type verwachtingen bieden inzicht in de meteorologische ontwikkelingen op seizoenale schaal (tot 7 maanden in de toekomst);
- **Weersverwachtingen:** De veelgebruikte gebruikte weersverwachtingen die geleverd worden door weerdiensten als het KNMI bieden over het algemeen inzicht in de verwachting met een lead time van twee weken.

Daarnaast focussen we in dit rapport op operationele toepassingen in het waterbeheer.

2

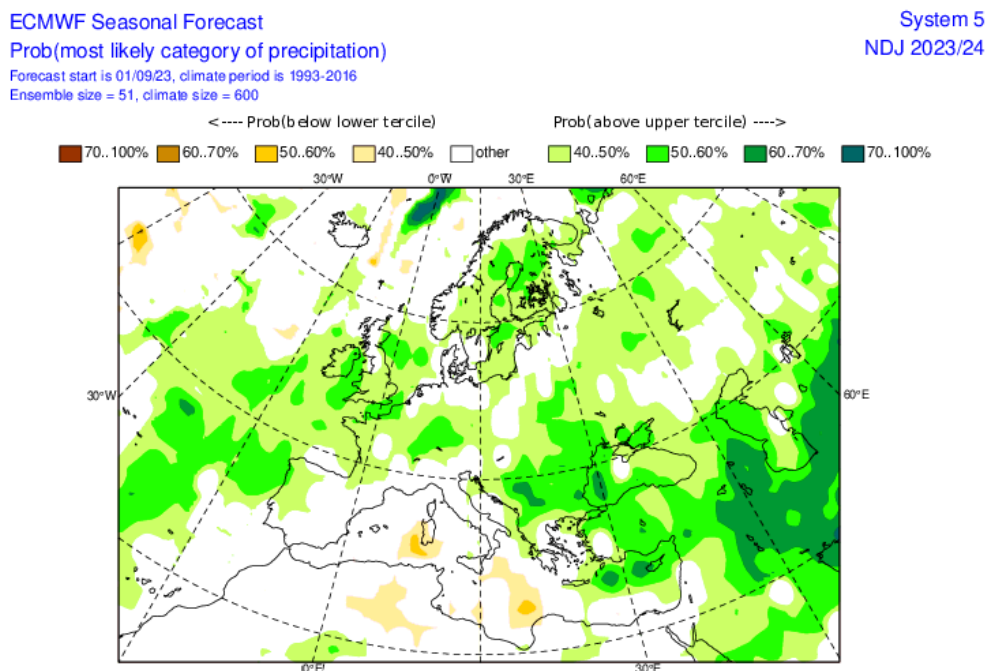
DATA EN METHODEN

2.1 ECMWF SEAS5

De SEAS5-verwachtingen van het ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) vormen sinds 2017 de huidige state-of-the-art op het gebied van seizoenverwachtingen. Het ECMWF is een belangrijke leverancier van (sub-) seizoenale verwachtingen in Europa (Johnson et al., 2019). Het ECMWF levert vanaf 2017 elke maand een ensembleverwachting van 51 globale seizoenverwachtingen van zeven maanden in de toekomst. SEAS5 heeft een ruimtelijke resolutie van 0.25° (ongeveer 25 km). De SEAS5-verwachting bevat verwachtingen van de dagelijkse neerslagsom, variabelen om de referentiegewasverdamping uit te rekenen en andere variabelen zoals windsnelheid. Voor het Nederlandse waterbeheer wordt de SEAS5-verwachting maandelijks opgeleverd aan het begin van de maand. Dat betekent dat elke maand een zevenmaandelijke verwachting beschikbaar komt. Een voorbeeld is zichtbaar in Figuur 1. Het figuur geeft de verwachte seizoenontwikkeling van de totale neerslagsom weer voor de maand november. Deze verwachting is uitgegeven begin september. Volgens deze verwachting is het waarschijnlijk dat de totale neerslagsom in grote delen van Europa hoger dan een gemiddelde novembermaand gaat zijn.

FIGUUR 1

TERCIEL-PLOT VAN DE VERWACHTE SEIZOENONTWIKKELING VAN NEERSLAG (BRON: [HTTPS://CHARTS.ECMWF.INT](https://charts.ecmwf.int))



De onzekerheid van verwachtingen neemt toe naarmate de verwachtingstermijn langer is. Het ECMWF maakt een schatting van de onzekerheid door middel van een pluimverwachting. In het geval van SEAS5 bevat deze pluim 51 individuele modelrealisaties. Deze realisaties worden gecreëerd door de initiële modeltoestand te verstoren.

In het Nederlandse waterbeheer wordt vaak de referentiegewasverdamping volgens Makkink toegepast. De SEAS5-verwachting levert niet direct de Makkink-referentiegewasverdamping. Wel worden de variabelen *dagelijkse gemiddelde temperatuur op 2 m (t2m)* en *de kortgolvlige inkomende straling (surface solar radiation downward, ssrd)* geleverd, waarmee de Makkink-verdamping berekend kan worden volgens De Bruin (1987):

$$ET_{ref} = \frac{0.66 * \frac{s}{s + \gamma} * K_{in}}{2.45 * 10^6}$$

Waarin:

ET_{ref} is de referentiegewasverdamping volgens Makkink;

γ is de psychrometerconstante (circa 0.66 mbar/ °C op zeeniveau);

K_{in} is de kortgolvlige inkomende zonnestraling;

s kan berekend worden door:

$$s = \frac{6.1078 * 17.294 * 237.73}{(237.73 + T)^2} * \exp\left(\frac{17.294 * T}{273.73 + T}\right)$$

Met:

T is de temperatuur in °C.

2.2 BEPALING VAN DE NAUWKEURIGHEID

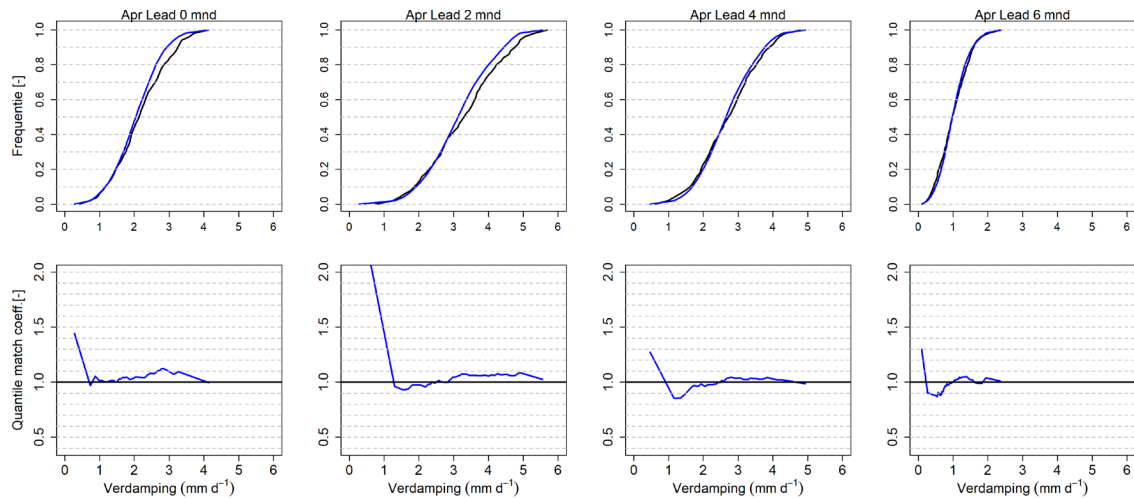
Om de nauwkeurigheid van SEAS5 te bepalen hebben we het archief van seizoenverwachtingen gedownload dat ECMWF heeft opgesteld. ECMWF heeft dat archief samengesteld door voor de periode van 1993-2015 historische verwachtingen te genereren. Deze verwachtingen bestaan uit ensembles met 25 leden. We vergelijken deze met het Meteobase-archief voor zowel neerslag als referentiegewasverdamping volgens Makkink. Via Meteobase zijn sinds 2000 radargegevens van neerslag beschikbaar, welke zijn gecombineerd met grondstations. Gegevens van referentiegewasverdamping, die beschikbaar zijn via Meteobase, zijn geïnterpoleerd vanuit grondstations met IDW (inverse distance weighting), zie Versteeg et al. (2012) voor meer details. We gaan voor de analyses uit van de periode 2000-2015 om de verwachtingen te kunnen vergelijken met een consistente dataset.

Om seizoenverwachtingen en observaties met elkaar te vergelijken verwijderen of verkleinen we de bias (de structurele afwijking) door nabewerking van de seizoenverwachtingen. Bias-correctie is belangrijk omdat de gebruikte weermodellen relatief grofmazig zijn en belangrijke processen op een versimpelde manier berekenen. De systematische fouten die hierdoor ontstaan kunnen we verkleinen door bias-correctie. Ook zijn de modellen mondiaal en dus niet specifiek afgeregeld op het Nederlandse klimaat. Door Nederlandse datasets te gebruiken bij de correctie optimaliseren we de verwachtingen voor de Nederlandse situatie. We volgen daarbij Wetterhall et al. (2015) en passen de techniek *quantile matching* toe. Deze nabewerking kan in operationeel gebruik ook worden toegepast.

2.2.1 QUANTILE MATCHING

Quantile matching (QM) is een relatief eenvoudige techniek waarbij de cumulatieve dichtheids-functie van de verwachtingen naar die van de observaties toe wordt gecorrigeerd. We bepalen voor elke verwachting de gemiddelde neerslag en verdamping per maand en middelen ook over de beschikbare jaren (2000-2015). Hetzelfde doen we met de observaties. Beide datasets zijn ruimtelijk gemiddeld over Nederland. Het resultaat is een waarde van de verwachting en van de observatie per kalendermaand en per maand in de verwachtingshorizont. We verdelen de datasets in bins van 2%-percentielen. Een voorbeeld om dit te verduidelijken is te zien in Figuur 2.

FIGUUR 2 BIAS-CORRECTIE VAN DE REFERENTIEGEWASVERDAMPING VOOR DE MAAND APRIL VOOR VIER VERWACHTINGSHORIZONTEN (0, 2, 4 EN 6 MAANDEN VOORUIT). DE BOVENSTE RIJ LAAT DE VERWACHTE (BLAUW) EN GEOBSERVEERDE (ZWART) CUMULATIEVE VERDELINGEN ZIEN, DE ONDERSTE RIJ DE CORRECTIEFUNCTIES



De bovenste rij in Figuur 2 laat de verdelingen zien voor referentiegewasverdamping voor de maand april en vier verwachtingshorizonten, met de waarde van de verdamping op de horizontale as en de relatieve frequentie ervan op de verticale as. De correctiefactor die nodig is om de verdeling van de verwachting naar die van de observaties toe te corrigeren is weergegeven op de onderste rij en is berekend door de verwachting te delen door de observatie. In dit geval is de verwachting gegeneerd op 1 april en betreft de verwachting met een lead time van vier maanden dus de verwachting voor de maand augustus.

2.2.2 BEPALING NAUWKEURIGHEID OF “FORECAST SKILL”

Net als in Hurkmans et al. (2023) beschouwen we de nauwkeurigheid van de verwachtingen op twee manieren: gemiddeld over het gehele archief en voor individuele verwachtingen. Bij het bepalen van de nauwkeurigheid van verwachtingen is het gebruikelijk te middelen over een groot aantal gevallen. Echter leidt dat onterecht vaak tot de conclusie dat de verwachtingen te weinig informatie bieden, omdat de nauwkeurigheid van verwachtingen sterk kan variëren. Dit terwijl in individuele gevallen, zeker bij extreme situaties, verwachtingen zeker relevante informatie kunnen bieden.

Om de nauwkeurigheid te duiden in gemiddelde zin gaan we uit van een veelgebruikte maat, de Continuous Ranked Probability Score (CRPS; Matheson en Winkler, 1976). De CRPS vergelijkt de volledige verdelingen van de verwachting en observatie en niet maar één aspect ervan. De CRPS is daarmee ook geschikt voor ensemble-verwachtingen zoals SEAS5. Door de CRPS te vergelijken met de CRPS-score van de referentieverwachting ontstaat de CRPSS (de Continuous Ranked Probability Skill Score). Deze score is positief als de seizoensverwachting beter is dan de referentie. Om te beoordelen of de bias-correctie zijn werk goed heeft gedaan laten we ook de gemiddelde fout (Mean Error of ME) zien.

Individuele verwachtingen vergelijken we in de vorm van terciël-waarden zoals in Figuur 1. We berekenen voor elke maand en verwachtingshorizont in het archief de 33%- en 66%-percentielen in welk terciël de observatie en de verwachting vallen. 0-33% is daarbij ‘minder dan normaal’, 66-100% is ‘meer dan normaal’ en 33%-66% is ‘normaal’.

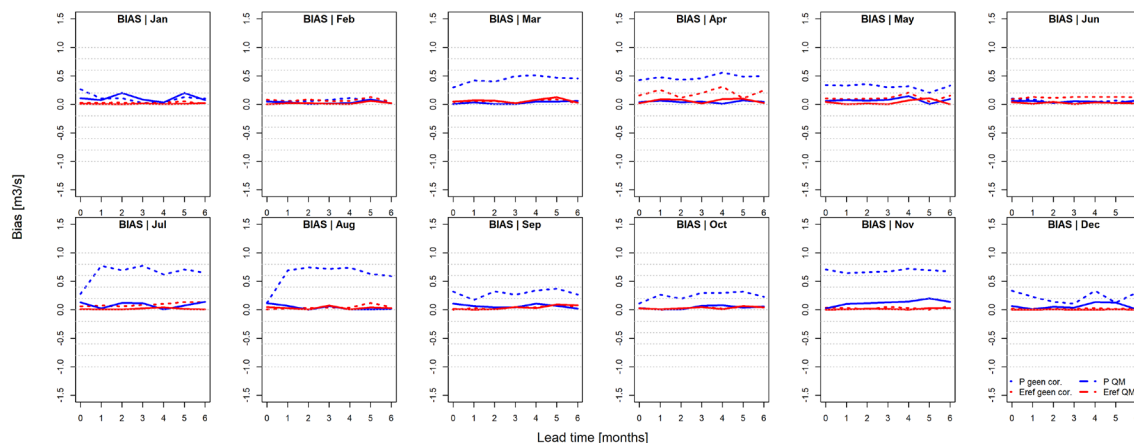
3

KWALITEIT METEOROLOGISCHE VERWACHTINGEN

3.1 GEMIDDELTE VERWACHTINGEN

We vergelijken eerst de gemiddelde fout van de verwachtingen. Deze fout is weergegeven in Figuur 3. De rode lijnen geven verdampingsverwachtingen en de blauwe de neerslagverwachtingen. Gestippelde lijnen tonen de ruwe verwachtingen en de vaste lijnen de verwachtingen na bias-correctie. De maanden waarvoor resultaten weergegeven zijn, zijn nu niet de maanden waarin de verwachting is gegeneerd, maar waarvoor de verwachting geldt. Oftewel, de verwachting voor augustus met een lead-time van zes maanden is opgesteld in februari.

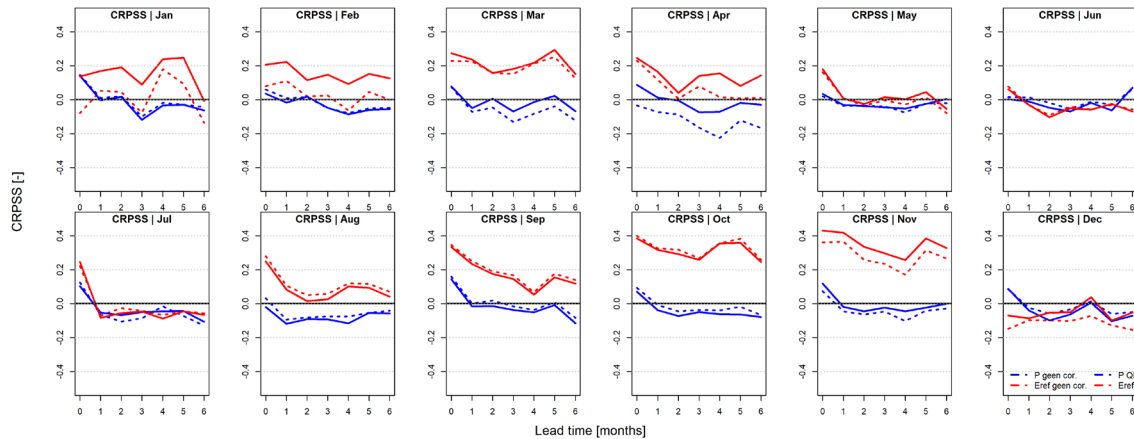
FIGUUR 3 BIAS VAN DE VERWACHTING TEN OPZICHTE VAN OBSERVATIES UITGEZET TEGEN DE VERWACHTINGSHORIZON, VOOR DE TWAALF KALENDERMAANDEN



In de ruwe verwachtingen wordt neerslag structureel overschat in vrijwel alle maanden. Deze systematische afwijking is door de correctie bijna volledig gecorrigeerd. Voor verdamping is de bias veel kleiner. Alleen in de maanden april tot en met augustus wordt verdamping licht overschat in de verwachtingen. Ook deze bias is vrijwel volledig gecorrigeerd.

Figuur 4 laat de CRPSS-scores zien voor de ruwe (gestippelde) en gecorrigeerde (vaste) verwachtingen. Hierbij is de klimatologie (gemiddelde waarden per maand, over alle jaren gezien) van de observaties gebruikt als referentie. Bij negatieve waarden is de klimatologie dus een betere voorspeller dan de seizoensverwachting.

FIGUUR 4 CRPSS-SCORE VOOR DE RUWE (GESTIPPELDE LIJN) EN GECORRIGEERDE (VASTE LIJN) VERWACHTINGEN



Voorals voor neerslag zijn de scores laag. Alleen gedurende de eerste maand zijn de scores licht positief. Daarna is doorgaans de klimatologie een betere voorspeller. Bias-correctie met QM verhoogt doorgaans de score, met name in maart en april. Echter zijn er gevallen waar de ruwe verwachting een licht hogere score geeft dan de gecorrigeerde verwachting (augustus, september, oktober). Dit kan te maken hebben met de relatief korte dataset (16 jaar).

Referentiegewasverdamping vertoont een zeer sterke jaarlijkse gang en door de aggregatie naar maanden zijn de dag-tot-dag variaties uitgemiddeld. De CRPS-scores van referentiegewasverdamping zijn daarom aanmerkelijk hoger dan voor neerslag, met name voor de maanden augustus t/m november en januari t/m april. In de maanden mei, juni en juli kunnen de fluctuaties veel groter zijn en is de forecast-skill ook lager. Hier is het patroon vergelijkbaar met dat van neerslag – alleen positieve waarden in de eerste maand. In december zijn de waarden laag en is de klimatologie (ook) een relatief goede voorspeller voor verdamping.

Voor verdamping is het effect van de bias-correctie op de forecast-skill het grootst in de maanden november t/m februari, ook al was deze in de maanden april t/m juli in absolute zin groter (Figuur 2). Voor de maanden met weinig verdamping heeft bias-correctie dus positief effect op de kwaliteit van de verwachting.

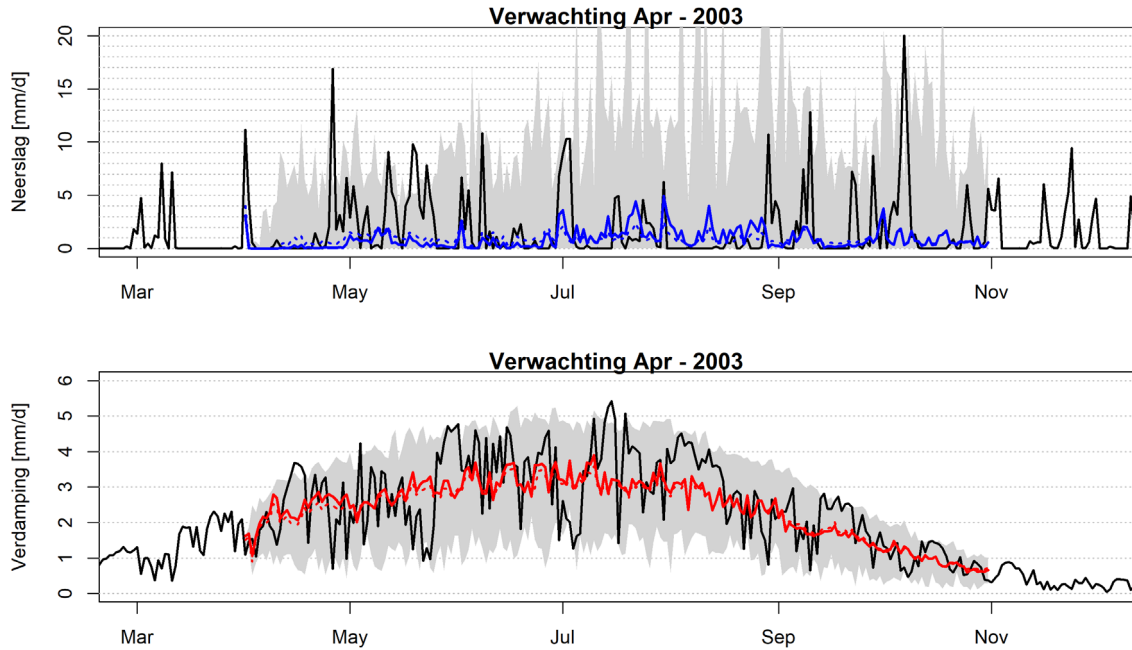
3.2 INDIVIDUELE VERWACHTINGEN

Als voorbeeld geeft Figuur 5 de verwachting weer van 1 april voorafgaand aan een relatief droge zomer (2003). De spreiding van het ensemble geeft goed de bandbreedte weer waarbinnen de observaties vallen. De mediane waarde van het ensemble is (logischerwijs) lager en is geen goede maat voor het daadwerkelijk verloop.

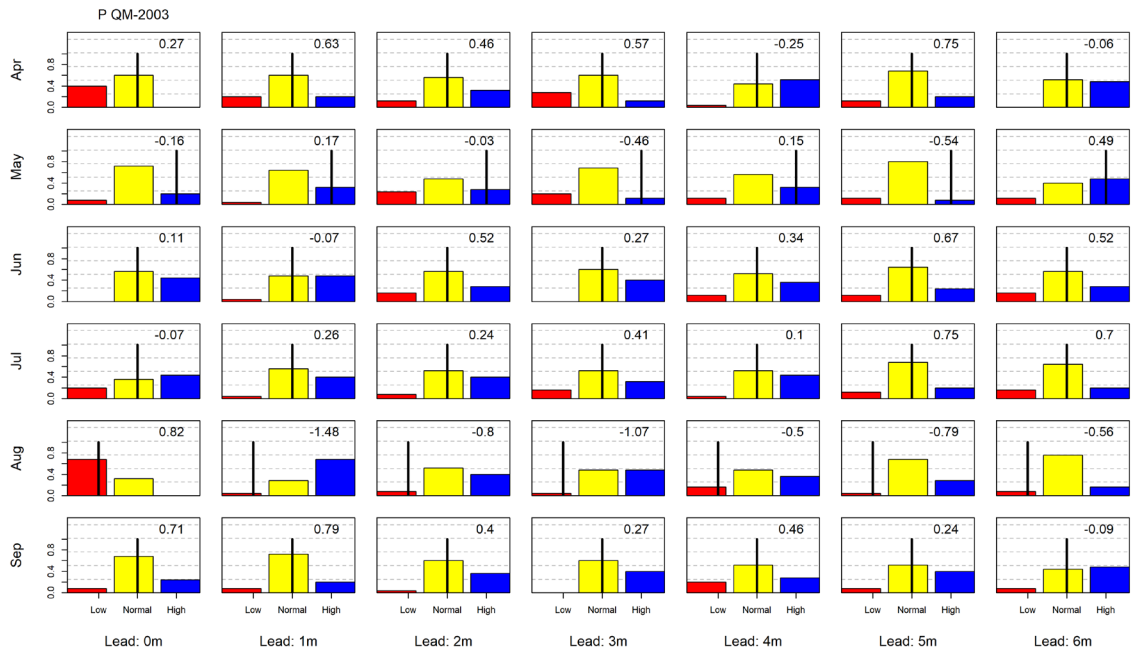
Het is moeilijk om uit Figuur 5 een daadwerkelijke verwachting af te leiden. Voor hetzelfde jaar (2003) tonen Figuur 6 en Figuur 7 daarom tercieplots voor neerslag en referentiegewasverdamping. De panelen hiervan geven van boven naar beneden de kalendermaanden weer (hier alleen voor april tot en met september) en van links naar rechts de verwachtingshorizon. De rechterkolom geeft dus steeds de verwachting weer die zeven maanden oud is. Binnen elk paneel vormt elke balk het deel van het ensemble dat binnen het lage tercie ('minder dan normaal'), het middelste tercie ('normaal') of het hoge tercie ('meer dan normaal') valt. Het getal geeft de *ranked probability skill score* (RPSS) weer; een variant van de CRPSS die voor

individuele verwachtingen berekend kan worden. Net als bij de CRPSS geeft een positieve waarde aan dat de verwachting beter is dan de klimatologie. De zwarte lijn geeft het terciel aan waarbinnen de observatie viel.

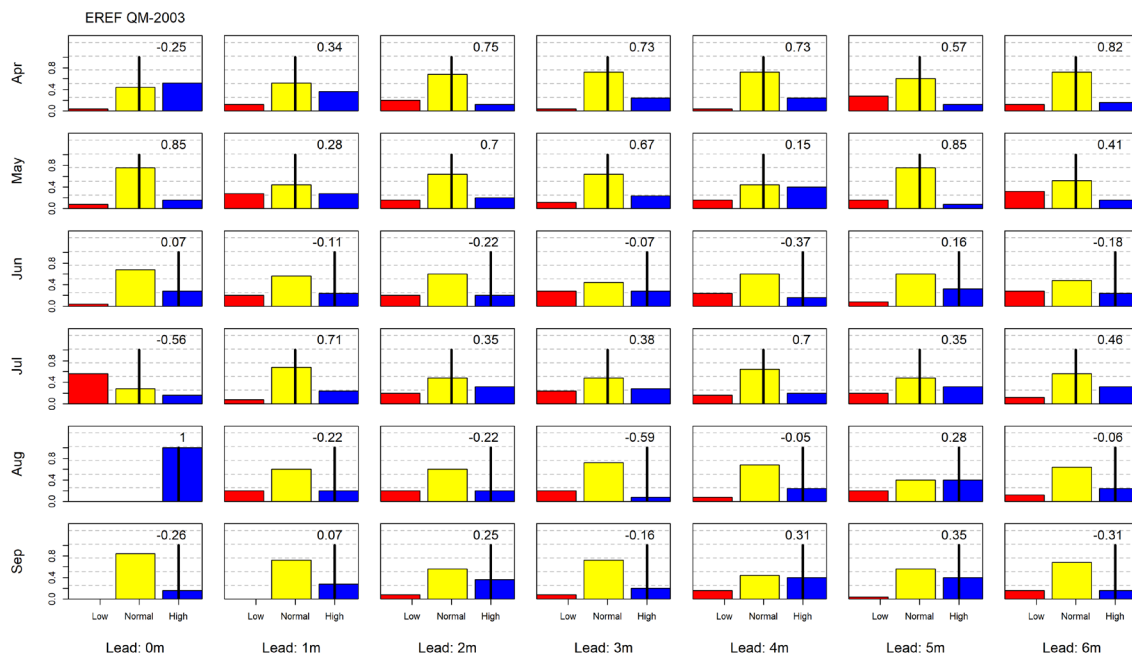
FIGUUR 5 VERWACHTING VOOR APRIL 2003 VOOR NEERSLAG (BOVEN) EN VERDAMPING (ONDER). OBSERVATIES ZIJN WEERGEVEN IN ZWART; DE GESTIPPELDE EN DOORGETROKKEN LIJN ZIJN RESPECTIEVELIJK DE MEDIAANE WAARDEN VAN DE RUWE EN BIAS-GECORRIGEEDE VERWACHTINGEN. HET GRIJZE GEBIED GEEFT DE SPREIDING VAN HET ENSEMBLE WEER



FIGUUR 6 TERCIELPLOT VOOR GECORRIGEEDE NEERSLAG VOOR 2003. VERTICAAL WORDEN KALENDERMAANDEN GETOOND, MET HORIZONTAAL DE BIJBEHORENDE VERWACHTINGSHORIZON. DE ZWARTE VERTICALE STREEP GEEFT DE OPGETREDEN SITUATIE WEER



IGUUR 7 ALS FIGUUR 6 MAAR DAN VOOR REFERENTIEGEWASVERDAMPING. VERTICAAL WORDEN KALENDERMAANDEN GETOOND, MET HORIZONTAAL DE BIJBEHORENDE VERWACHTINGSHORIZON. DE ZWARTE VERTICALE STREEP GEEFT DE OPGETREDEN SITUATIE WEER



Uit Figuur 6 en Figuur 7 blijkt dat vaak het onderscheid tussen de drie tercielen (balken) van een verwachting beperkt is en dat het grootste deel van het ensemble vaak in het middelste terciel, de klimatologie, valt. Het onderscheidend vermogen van de verwachting is beperkt en daarmee ook de praktische bruikbaarheid. Alleen in extreme gevallen, zoals augustus 2003, springt een van de tercielen eruit: augustus 2003 was extreem droog en dat bleek zowel in de neerslag – als in de verdampingsverwachting in diezelfde maand. In de maanden vóór augustus 2003 waren daar echter nog geen aanwijzingen voor.

3.3 CONCLUSIE

De resultaten in dit hoofdstuk laten zien dat de nauwkeurigheid van meteorologische seizoensverwachtingen in Nederland relatief beperkt is. Voor neerslag heeft de seizoensverwachting voor de komende maand in de meeste maanden (behalve juni en augustus) meerwaarde ten opzichte van klimatologie. Langer vooruit presteert de seizoensverwachting niet beter dan klimatologie. Voor verdamping geldt dezelfde conclusie voor de maanden mei t/m juli. In de overige maanden augustus t/m april, met uitzondering van december, zien we ten opzichte van klimatologie meerwaarde langer vooruit, waarbij deze wel afneemt met toenemende lead times. In de maand december is verdamping doorgaans laag en presteert klimatologie beter.

Samengevat hebben meteorologische seizoensverwachtingen vooral voorspelkracht in de eerste paar weken, net zoals de reguliere ECMWF EPS verwachtingen, en hebben ten opzichte daarvan dus weinig meerwaarde. Dat is anders voor hydrologische verwachtingen zoals rivierafvoer en grondwaterstand, waarbij ook het hydrologisch geheugen een rol speelt. Hier gaan we op in in Hoofdstuk 4.

4

WAT KUNNEN WE ER AL MEE?

Op basis van een rondgang langs de Nederlandse waterbeheerders is een overzicht gemaakt van studies en projecten waarin seizoenale verwachtingen gebruikt zijn in Nederland, zie Tabel 1. De tabel is aangevuld met relevante studies op Europese schaal. Meteorologische seizoenverwachtingen worden momenteel met name ingezet om inzicht te bieden in:

- Seizoenale ontwikkeling van (Europese) rivierafvoeren;
- Seizoenale ontwikkeling van grondwaterstanden;
- Seizoenale ontwikkeling van de regionale watervraag;
- Seizoenale ontwikkeling van wateraanbod IJsselmeer.

Zoals verwacht gaan deze studies met name in op hydrologische systemen met een geheugen, gericht afvoeren, grondwaterstanden en wateraanbod. Ter illustratie beschrijven we een tweetal voorbeelden in paragrafen 4.1 en 4.2.

TABEL 1 OVERZICHT VAN PROJECTEN WAAR (SUB-) SEIZOENSVERWACHTINGEN WORDEN INGEZET

Studie	Variabele	Variabele(n) SEAS5	Toepassing	Model
Arnal et al (2018)	Rivierafvoer in winterperioden	Neerslag en verdamping	Seizoensverwachtingen Europese rivieren	Lisflood
Honingh et al. (2020)	Grondwaterstand	Neerslag en verdamping	Seizoensverwachting van grondwaterstanden	AMIGO
Waterschap Limburg en HKV (2023)	Grondwaterstand	Neerslag en verdamping	Seizoensverwachting van grondwaterstanden	Pastas
Van den Brink (2020)	Zeewaterstanden	Windsnelheid	Berekenen klimatologie van extreme zeewaterstanden	HARMONIE en DCSM
Valk en Van den Brink (2020)	Windsnelheid	Windsnelheid	Inschatten van extreme windsnelheden	SEAS5
De Gier (2021)	Afvoer, grondwaterstand en verdampingstekort	Neerslag en verdamping	Langetermijn hydrologische verwachtingen op regionale schaal	WALRUS
Hurkmans et al. (2023)	Rivierafvoer	Neerslag en verdamping	Beheer IJsselmeerpeil op basis van de afvoer-verwachting van de IJssel	EFAS, E-HYPE en HTESSSEL
Hauswirth et al. (2023) en RWSoS Rivieren	Rivierafvoer	Neerslag, luchtdruk, verdamping, windsnelheid	Seizoenale afvoerwachtingen voor hoofdwatersysteem	Machine-learning-model
Vaessen (2021)	Rivierafvoer	Neerslag en verdamping	Seizoenale verwachting Rijnafvoer	Wflow
RWSoS IWP	Watervraag IJsselmeergebied	Neerslag en verdamping ¹	Inschatten van de watervraag aan het IJsselmeer voor operationeel peilbeheer	Empirische relatie
RWSoS IWP	Rivierafvoer	Neerslag en verdamping ¹	Seizoenale verwachting Maas- en Rijnafvoer	HBV
Watervraagprognose-tool	Watervraag IJsselmeergebied	Neerslag en verdamping ¹	Inschatten van de watervraag aan het IJsselmeer voor operationeel peilbeheer	Afgeleide relaties van het LHM
Verbrugge (2023) ²	Rivierafvoer	Neerslag en verdamping	Seizoenale verwachting Rijnafvoer	Wflow
Deng (2023) ³	Rivierafvoer	Neerslag en verdamping	Seizoenale verwachting Rijnafvoer	LSTM
Bertini (2023) ⁴	Maandtotalen neerslag	Neerslag	Seizoenale neerslagverwachting beheergebied Waterschap Rijnland	Machine-learning-methodiek

1 In deze projecten wordt het Extended Range-product van ECMWF gebruikt in plaats van SEAS5.

2 Publicatie nog niet beschikbaar.

3 Publicatie nog niet beschikbaar.

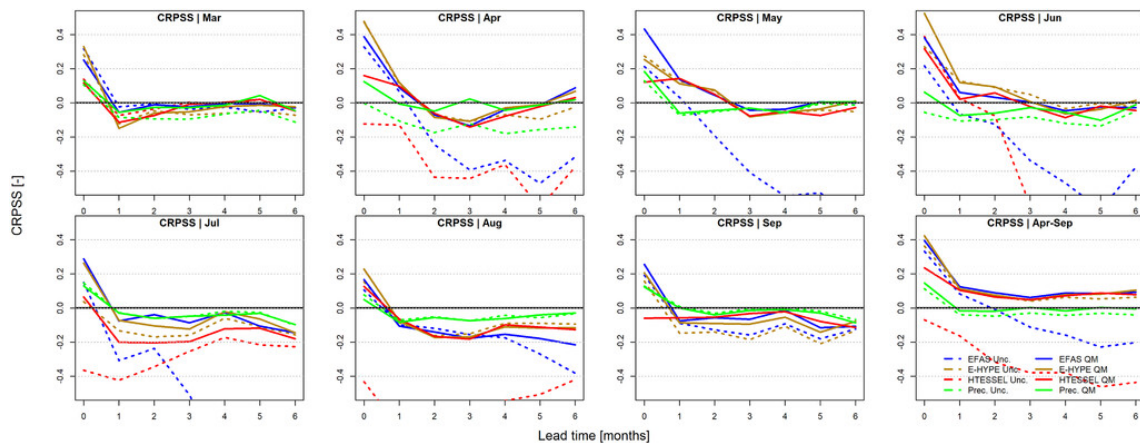
4 Publicatie nog niet beschikbaar.

4.1 VOORBEELD: SEIZOENALE RIVIERAFVOERVERWACHTINGEN

In het project SWM-EVAP zijn de meteorologische verwachtingen uit Hoofdstuk 3 omgezet doorgerekend met een drietal modellen om verwachtingen te genereren voor de afvoer van de Rijn bij Lobith. De drie modellen zijn EFAS (European Flood Awareness System), HYPE, het hydrologische model van het Zweedse instituut SMHI, en HTESEL, het model van het ECMWF. Voor deze systemen zijn soortgelijke analyses uitgevoerd als in Hoofdstuk 3. Voor details over deze studie verwijzen we naar Hurkmans et al. (2023). Enkele resultaten hieruit bespreken we ook hier.

Figuur 8 laat de CRPSS-score voor de afvoer en de gemiddelde neerslag over het Rijnstroomgebied zien, op dezelfde manier als Figuur 4. Gemiddeld over alle beschikbare jaren is de CRPSS ook hier vaak negatief voor langere verwachtingshorizonten dan een tot twee maanden. In het voorjaar is dat niet zo: door de bijdrage van sneeuw uit de Alpen is dan de afvoer drie tot vier maanden vooruit voorspelbaar. De scores voor neerslag zijn vrijwel hetzelfde als in Figuur 4.

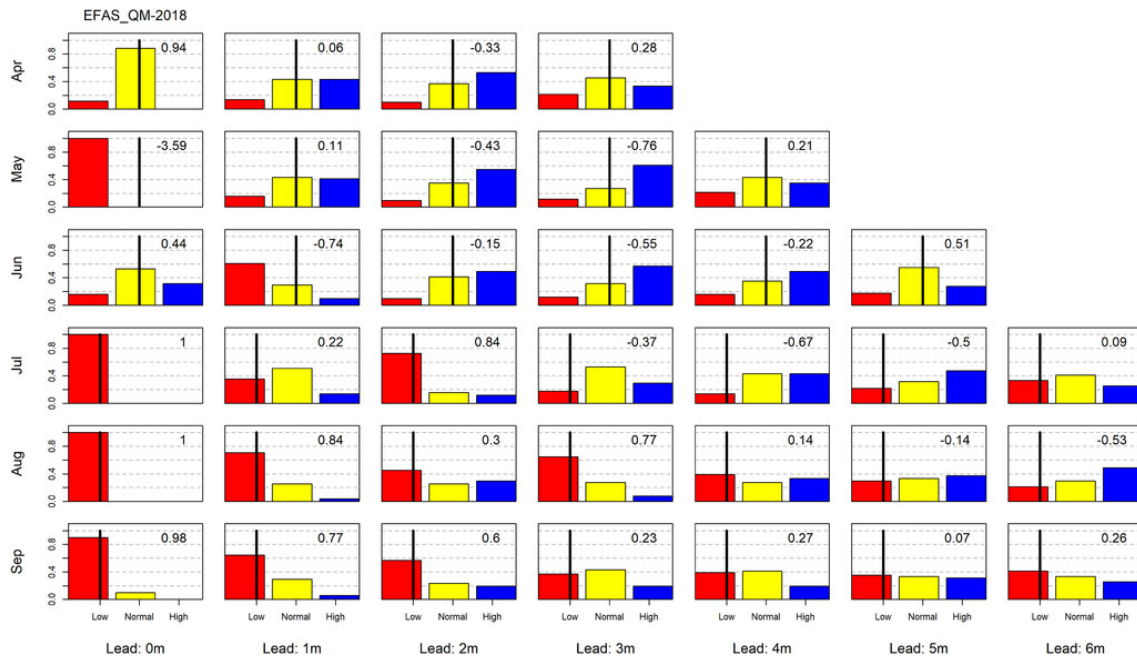
FIGUUR 8 CRPSS VOOR EEN AANTAL AFVOERMODELLEN (BLAUW, ROOD, EN BRUIN) EN DE GEMIDDELTE NEERSLAG OVER RIJNSTROOMGEBIED (GROEN). GESTIPPTELIJNEN ZIJN RUWE VERWACHTINGEN, DOORGETROKKEN LIJNEN ZIJN GECORRIGEERD MET QM. BRON: HURKMANS ET AL. (2023)



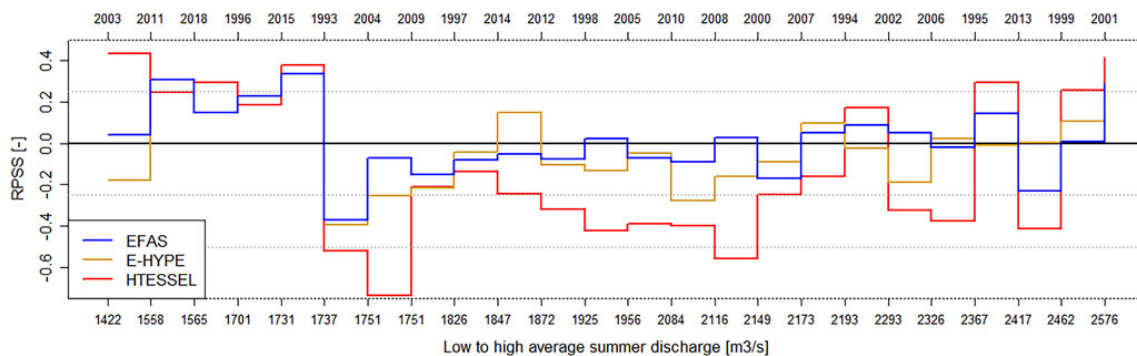
Figuur 9 laat een tercielploot zien zoals in Figuur 6, maar dan voor rivierafvoer in 2018. Hoewel de zomerafvoer in gemiddelde zin nauwelijks verwachtingskwaliteit heeft na één maand, is in verwachtingen vanaf mei al consistent te zien dat de afvoer in de zomer van 2018 laag zou worden. We illustreren dit voor de verwachting voor de maand augustus van 2018, de vijfde rij in het figuur. De verwachting met een lead time van 0 maanden, oftewel de verwachting die beschikbaar is gekomen in augustus 2018, laat zien dat droge condities verwacht worden. De rode balk domineert immers. Het paneel hier rechts van (augustus op de verticale as, lead time één maand op de horizontale as, geeft de verwachting voor augustus 2018 weer die in juli 2018 beschikbaar is gekomen. Opnieuw is te zien dat droge condities, de rode balk, het meest waarschijnlijk zijn. Dezelfde inzichten zijn voor augustus zichtbaar tot en met een lead time van drie maanden, oftewel de verwachting die beschikbaar kwam in mei 2018.

Een beeld als in 2018 is heel positief, een dergelijke lange periode van voorspelbaarheid komt niet voor alle extremen voor. Het blijkt echter wel dat de voorspelbaarheid doorgaans groter wordt naarmate de gebeurtenis extremer wordt. Figuur 10 laat de gemiddelde verwachtingskwaliteit per jaar zien voor jaren die gesorteerd zijn van jaren met een extreem lage tot jaren met een extreem hoge afvoer. Vooral bij periodes met lage afvoer, maar in mindere mate ook in jaren met extreem hoge afvoer, is de gemiddelde kwaliteit hoger.

FIGUUR 9 ALS FIGUUR 6, MAAR DAN VOOR AFVOER BIJ LOBITH IN 2018. BRON: HURKMANS ET AL., (2023). VERTICAAL WORDEN KALENDERMAANDEN GETOOND, MET HORIZONTAAL DE BIJBEHOORENDE VERWACHTINGSHORIZON. DE ZWARTE VERTICALE STREEP GEEFT DE OPGETREDEN SITUATIE WEER



FIGUUR 10 GEMIDDELDE VERWACHTINGSKWALITEIT PER JAAR VAN JAREN MET LAGE (LINKS) NAAR HOGE AFVOEREN (RECHTS). BRON: HURKMANS ET AL. (2023)



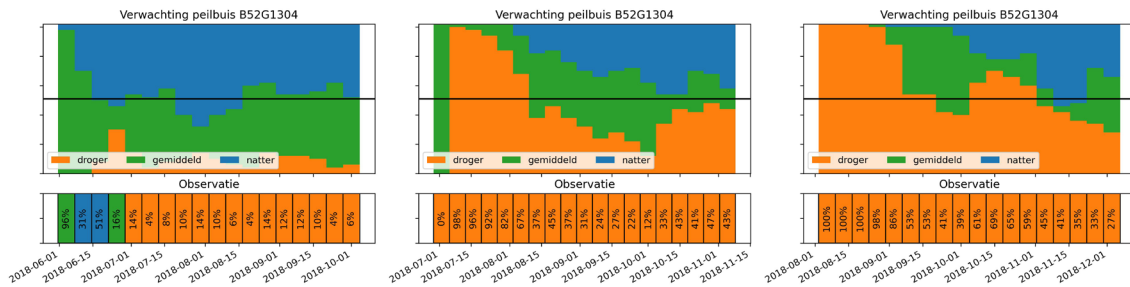
4.2 VOORBEELD: SEIZOENALE GRONDWATERVERWACHTINGEN

Voor een aantal grondwatermeetpunten in het beheergebied van Waterschap Limburg zijn recent seizoenverwachtingen ontwikkeld. Deze verwachtingen worden berekend door middel van het combineren van de SEAS5-neerslag- en referentiegewasverdamping met een tijdreeksmodel gemaakt met het open-source Python-pakket Pastas, dat ontwikkeld wordt door Artesia en de TU Delft (Collenteur et al., 2019).

Figuur 11 toont een voorbeeld voor peilbuis B52G1304 in Limburg. Dit figuur heeft enige uitleg nodig. Er zijn drie panelen zichtbaar. Elk paneel geeft de zevenmaandelijke verwachting weer voor de peilbuis. De verwachtingen zijn geaggregeerd van dagwaarden naar weekwaarden. Het linkerpaneel geeft de verwachting weer die op 1 juni 2018 beschikbaar is gekomen. Het tweede paneel geeft de verwachting weer voor 1 juli 2018 en het derde paneel geeft de verwachting weer voor 1 augustus 2018. De kleuren geven weer of de verwachte situatie droger of natter dan de gemiddelde situatie voor deze peilbuis is. Het onderste blok

in de panelen geeft de geobserveerde situatie weer. Het bovenste blok geeft de verwachte ontwikkeling per ensemblerealisatie weer. Als voorbeeld: als de meerderheid van de verticaal gestapelde ensemblerealisaties oranje zijn, is dat een indicatie dat de grondwaterstanden uit gaan zakken ten opzichte van de gemiddelde situatie voor die tijd in het jaar. In het onderste paneel is tevens weergegeven welk percentage van de ensemblerealisaties de juiste verwachting genereerde.

FIGUUR 11 VOORBEELD VAN SEIZOENSVERWACHTINGEN VAN FREATISCHE GRONDWATERSTANDEN VOOR DE ZOMER VAN 2018



Deze informatie biedt het waterschap inzicht in de verwachte seizoenale ontwikkeling van freatische grondwaterstanden. Echter wordt hier ook de limitaties van de seizoenverwachtingen zichtbaar. De droge periode van 2018 wordt ongeveer een maand van tevoren zichtbaar in de seizoenverwachtingen. Hoewel de seizoenverwachtingen dus informatie bieden op tijds-horizonten tot zeven maanden in de toekomst, is de voorspelkracht beperkt tot 1 à 2 maanden in de toekomst.

Zelfde resultaten zijn zichtbaar voor de projecten die zich richten op rivierafvoeren, zoals Hurkmans et al. (2023) en Hauswirth et al. (2023). Ook voor bodemvocht en gewasopbrengst worden vergelijkbare resultaten geboekt. Door Boas et al. (2023) werd een landoppervlakte-interactiemodel gebruikt dat gewasopbrengsten simuleert gevoed met seizoenverwachtingen tot 7 maanden vooruit. Ook hierbij werden maanden vooruit al positieve en negatieve extremen verwacht.

5

WAT ZOULDEN WE ERMEE WILLEN?

5.1 OVERZICHT

Binnen het CLINT-project is een inventarisatie uitgevoerd naar wensen van Nederlandse waterbeheerders voor toepassingen van seizoenverwachtingen. Het resultaat van deze inventarisatie is weergegeven in Tabel 2. De wensenlijst beslaat een breed scala aan waterbeheeraspecten. Dat laat zien dat op meerdere vlakken inzicht gewenst is in langetermijntwikkeling van watersystemen.

TABEL 2 OVERZICHT MOGELIJKE TOEPASSINGEN SEIZOENSVERWACHTINGEN

Vraagstuk	Problematiek	Benodigde informatie
Wateraanvoer	<ul style="list-style-type: none"> Onvoldoende extern water beschikbaar om te voorzien aan wateraanvoervraag. 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte beschikbaarheid wateraanvoerwater
Watervraag regionaal Systeem	<ul style="list-style-type: none"> Door droogte stijgt de watervraag van een regionaal systeem (landbouw, industrie, natuur, etc.) aan oppervlaktewater i.v.m. aanvoer 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte afwijking watervraag t.o.v. normaal, eventueel uitgesplitst per functie.
Transportsector	<ul style="list-style-type: none"> Droogval grote waterlopen. 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte waterstand en afvoer voor grote waterlopen.
Gewassen en natuur	<ul style="list-style-type: none"> Uitzakkend bodemvocht leidt tot verminderde gewasgroei-> behoefte berekening groei. (Droge) natuur raakt beschadigd. Uitzakkende grondwaterstand. Behoud ecologische kwaliteit lastig bij droogte. 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte afwijking bodemvocht t.o.v. normaal Actuele en verwachte afwijking grondwaterstand t.o.v. normaal Indicatoren ecologische kwaliteit
Beken en sloten	<ul style="list-style-type: none"> Beken en sloten vallen droog bij langdurige meteorologische droogte en/of lage grondwaterstanden. Door lage waterstanden kunnen oevers scheuren of inzakken. Vissensterfte bij droogval van beken 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte (grond-) waterstand en afvoer voor beken en sloten Actueel en verwacht beschikbaarheid wateraanvoerwater
Bodemdaling	<ul style="list-style-type: none"> Onherstelbare inklinking hoogveen. 	<ul style="list-style-type: none"> Actuele en verwachte grondwaterstanden in veengebied.
Waterkwaliteit	<ul style="list-style-type: none"> Doorspoelingbehoefte gedurende droge tijden in lageregelegen Nederland. Ontwikkeling blauwalgbacterie en botulisme. 	<ul style="list-style-type: none"> Indicator blauwalg en botulisme.

5.2 SCHAAL VAN TOEPASSINGEN

Meteorologische seizoenverwachtingen geven met name richting aan de algemene verwachte veranderingen van ons weersysteem. Hierbij moet gedacht worden aan vragen als: wordt het natter of droger? Wordt het kouder of warmer? De verwachtingen zijn niet bedoeld om gedetailleerde en gelokaliseerde verwachtingen te maken. Zo dient men de verwachtingen niet in te zetten om de neerslag over exact 40 dagen te voorspellen. Wel geven de verwachtingen een indicatie van de totale neerslagsom over deze periode. Verder zijn de verwachtingen momenteel bruikbaar op nationale tot regionale schalen. In de praktijk betekent dat dat een waterschap geen gedetailleerd ruimtelijk onderscheid kan maken in hun beheergebied op basis van seizoenverwachtingen.

6

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

Doelstelling van dit onderzoek was het nut van de seizoensverwachtingen voor het waterbeheer te bepalen. We noemen de belangrijkste conclusies:

De voorspelkracht van meteorologische seizoensverwachtingen in Nederland is beperkt tot enkele weken vooruit. Meteorologische seizoensverwachtingen hebben in Nederland dus relatief weinig meerwaarde ten opzichte van reguliere verwachtingen op de middellange termijn van enkele weken. In andere gebieden, waar het weer bijvoorbeeld sterk beïnvloed wordt door grootschalige fluctuaties als El-Nino, kan dit anders zijn en zijn verwachtingen tot zeven maanden vooruit wél zinvol. In West-Europa is dat echter niet geval en een horizon van ongeveer twee weken doorgaans gezien als maximale, verwachtingshorizon voor atmosferische processen (Lorenz, 1969).

Echter tonen de verschillende studies en projecten genoemd in dit rapport aan dat er wel degelijk meerwaarde zit in het gebruik van de meteorologische verwachtingen om inzicht te bieden in de langetermijnontwikkeling van hydrologische variabelen als rivierafvoer en grondwaterstanden. De voorspellende kracht wordt mede veroorzaakt door het relatief lange geheugen van deze systemen.

Hoewel seizoensverwachtingen informatie bieden voor de komende maanden, is de werkelijke voorspelkracht voor deze hydrologische variabelen veelal gelimiteerd tot 1 à 2 maanden in de toekomst. Deze voorspelhorizon biedt Nederlandse waterbeheerders echter al relevante informatie die bruikbaar is in het operationele waterbeheer.

In het recent verleden zijn er reeds verschillende projecten geweest die gericht waren op gebruik van seizoenale meteorologische verwachtingen in het Nederlandse waterbeheer, zoals weergegeven in Tabel 1. Daarnaast zijn er momenteel meerdere studies die zich richten op de toepassing van seizoenale meteorologische verwachtingen in het Nederlandse waterbeheer. Ook hebben waterbeheerders meerdere mogelijke toepassingen geïdentificeerd, zoals is weergegeven in Tabel 2. Toepassing van deze verwachtingen is dus groeiend in Nederland.

6.2 AANBEVELINGEN: WAT IS ER NODIG?

We voorzien diverse mogelijkheden voor het gebruik van seizoenale meteorologische verwachtingen. We noemen een aantal belangrijke aspecten:

ONDERZOEK DE HYDROLOGISCHE VOORSPELKRACHT

Het is noodzakelijk dat er meer studies beschikbaar komen waarin de meerwaarde van seizoenverwachtingen aangetoond wordt. Dat kan op onderzoeksvlak, maar ook via (pilot-) projecten bij waterbeheerders. Goede voorbeelden zijn de implementaties van de afvoerverwachtingen in de operationele FEWS-systemen van Rijkswaterstaat en het onderzoek naar grondwaterverwachtingen bij Waterschappen Aa en Maas en Limburg. Tabel 2 geeft verschillende voorbeelden van mogelijk toekomstige onderwerpen.

ONDERZOEK NAAR BIAS-CORRECTIE METEOROLOGISCHE VERWACHTINGEN

Meteorologische seizoenale verwachtingen vereisen een correctie voordat deze toepasbaar zijn voor het Nederlandse waterbeheer. De klimatologie van de seizoenverwachtingen zijn namelijk gebaseerd op modellen zoals die van het ECMWF en deze sluiten niet altijd goed aan bij de Nederlandse praktijk qua minima en maxima. Van Oldenborgh (2006) stelde reeds dat de meteorologische seizoenverwachtingen moeten worden nabewerkt om tot een zinvolle verwachting te komen. Ook zien we dat in vrijwel alle studies en projecten die zijn beschreven in Tabel 1 een bias-correctie is uitgevoerd. De voorspelkracht van de hydrologische verwachtingen kan hierdoor sterk verbeterd worden. In de correctiefactoren die doorgaans worden berekend door bias-correctiemethoden kunnen patronen worden onderzocht. Zo blijkt uit Figuur 2 bij lage verdampingshoeveelheden een onderschatting ten opzichte van metingen, die toeneemt met de verwachtingshorizon. Het onderzoeken van verschillen tussen bijvoorbeeld seizoenen en horizonten geeft een beeld van omstandigheden waarin het model beter of slechter presteert. Mogelijk kunnen deze dan ook worden verklaard door fysische processen; zo wordt verdamping onder bewolkte omstandigheden vaker onderschat door weermodellen omdat de bewolking te weinig straling doorlaat in het model (zie Deelrapport 4).

Er bestaan verschillende technieken voor een zogeheten bias-correctie. Hierbij kan gedacht worden aan lineaire schaling, quantile mapping en verscheidene machine-learning-methodieken. Het verdient aanbeveling om bij toepassing van seizoenverwachtingen bias-correctie uit te voeren. Echter ontbreekt momenteel een eenduidige methodiek om deze correctie uit te voeren. Er is momenteel expertkennis noodzakelijk om een keuze voor een correctiemethode te maken.

7

REFERENTIES

Arnal, A. Cloke, H.L., Stephens, E., Wetterhal, F., Prudhomme, C., Neumann, J. Kreminski, B. en Pappenberger, F. (2018) Skilful seasonal forecasts of streamflow over Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 22: 4. Pp 2057-2072. doi:10.5194/hess-22-2057-2018.

Boas, T., Bogena, H. R., Ryu, D., Vereecken, H., Western, A., & Hendricks Franssen, H. J. (2023). Seasonal soil moisture and crop yield prediction with fifth-generation seasonal forecasting system (SEAS5) long-range meteorological forecasts in a land surface modelling approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(16), 3143-3167.

Bruno Soares, M. and Dessai, S. (2015) Exploring the use of seasonal climate forecasts in Europe through expert elicitation. *Climate Risk Management* 10: 8-16.

Collenteur, R.A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S.A., Schaars, F. (2019) Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*. doi: 10.1111/gwat.12925.
De Bruin, H., 1987. From Penman to Makkink. In: Hooghart, C. (Ed.), *Evaporation and Weather: Proceedings and Information*. Vol. 28. TNO committee on Hydrological Research: The Hague, pp. 5-30.

De Bruin, H.A.R. (1987) From Penman to Makkink. In: Hooghart, J.C., Ed., *Proceedings and Information: TNO Committee on Hydrological Research N°39*. The Netherlands Organization for Applied Scientific Research TNO, Den Haag, 5-31.

De Gier, L. (2021) Hydrological drought forecasting in the Netherlands with a rainfall-runoff model and forecasted weather data. Msc. Thesis. Wageningen University.

Matheson, J. E., and R. L. Winkler, 1976: Scoring rules for continuous probability distributions. *Manage. Sci.*, 22, 1087 – 1096, <https://doi.org/10.1287/mnsc.22.10.1087>.

Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., Tietsche, S., Decremmer, D., Weisheimer, A., Balsamo, G., Keeley, S.P.E., Mogensen, K., Zuo, H. and Monge-Sanz, B.M. (2019) SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system, *Geosci. Model Dev.*, 12, 1087 – 1117, doi:10.5194/gmd-12-1087-2019.

Hauswirth, S.M., Bierkens, M.F.P., Beijk, V. en Wanders, N. (2023) The suitability of a seasonal ensemble hybrid framework including data-driven approaches for hydrological forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences* 27. Pp501-517. doi:10.5194/hess-27-501-2023

Honingh, D., Hurkmans, R.T.W.L. en Groot, S. (2020) De toepasbaarheid van ECMWF-seizoensverwachtingen voor het voorspellen van grondwaterstanden. *Stromingen*.

Hurkmans, R. T., van den Hurk, B., Schmeits, M., Wetterhall, F., & Pechlivanidis, I. G. (2023). Seasonal streamflow forecasting for fresh water reservoir management in the Netherlands: an assessment of multiple prediction systems, *Journal of Hydrometeorology*, 24(7) <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0107.1>.

Lorenz, E.N. (1969) The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*. 21, 289 – 307.

Soares, M.B. en Dessai, S. (2015) Exploring the use of seasonal climate forecasts in Europe through expert elicitation. *Climate Risk Management* 10, pp8-16, doi:10.1016/j.crm.2015.07.001.

Vaessen, C. (2021). Seasonal streamflow forecasting for the Rhine using wflow_sbm, MSc. internship report, Wageningen University, December 2021.

Valk, C.F. en Van den Brink, H.W. (2020). Estimation of wind speeds with very high return periods from large datasets generated by weather prediction models: statistical aspects. KNMI scientific reports WR 2020-01.

Van den Brink, H.W. (2020) Het gebruik van de ECMWF-seizoensverwachtingen voor het berekenen van de klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust. TR-385. KNMI: De Bilt.

Van Oldenborgh, G.J. (2006) Maand- en seizoensverwachtingen. *Meteorologica* 15. Volume 4. Pp 25-28.

Wetterhall, F., Winsemius, H. C., Dutra, E., Werner, M., & Pappenberger, E. (2015). Seasonal predictions of agro-meteorological drought indicators for the Limpopo basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2577-2586.