

# Een systeem voor droogtemonitoring en vroegtijdige droogtewaarschuwing in Europa en Nederland

SAMUEL JONSON SUTANTO

*Droogte is één van de ernstigste natuurrampen in de wereld, met een enorme impact gemeten naar het aantal getroffen personen en economische schade. Eén van de meest effectieve manieren om de gevolgen van droogte te helpen verminderen is de ontwikkeling van een vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem (Drought Early Warning System; DEWS) op seizoensbasis. Helaas zijn in Nederland alleen droogtemonitoringsystemen beschikbaar die informatie verschaffen over klimatologische droogtecondities, bodemvochtgehalte en afvoermetingen. Het recent ontwikkelde ANYWHERE DEWS (ADEWS) heeft daarentegen aangetoond dat het over een aanzienlijke voorspellende waarde beschikt om droogte tot drie maanden vooruit te voorspellen en maakt het op die manier mogelijk om iets aan het gebrek aan droogtegevaarverwachtingen in Nederland te doen. De voorspellende kracht van ADEWS is het gevolg van het aggregeren van de voorspelde data van dagen naar een maand gecombineerd met het geheugen van hydrologische systemen. We merken hierbij op dat alle droogtewaarschuwingssystemen, inclusief ADEWS, alleen informatie verschaffen over droogte terwijl voorspellingen over de gevolgen van droogte nog ontbreken. De ontwikkeling van een waarschuwingssysteem over de impact van droogte op seizoensbasis zou prioriteit moeten krijgen op de nationale onderzoeksagenda.*

Artikel

## Inleiding

Droogte is een van de ernstigste weegerelateerde natuurrampen, met schade en verliezen vergelijkbaar met andere verwoestende natuurlijke catastrofes, zoals overstromingen of aardverschuivingen. In de afgelopen decennia is Europa getroffen door meerdere droogtes van formaat, bijvoorbeeld in 1976, 1989, 1991, 2003, 2015 (Van Lanen e.a., 2016) en 2018. De economische schade door droogte tussen 1976 en 2006 in de Europese Unie wordt geschat op meer dan 100 miljard euro (EU, 2007). In de Verenigde Staten wordt de totale economische schade door droogtes tussen 1980 en 2003 geschat op circa 144 miljard dollar, oftewel 41,2% van de totale kosten van alle weegerelateerde rampen (Ross en Lott, 2003). In andere voor droogte kwetsbare regio's, zoals Afrika en Azië, is de impact van droogte vooral groot in de landbouwsector. De landbouwsector neemt naar schatting meer dan 80% van de schade en verliezen door droogte voor zijn rekening (FAO, 2017). In Nederland is de economische schade in de landbouw door de droogte van 2018 geschat op 820 miljoen tot 1,4 miljard euro (Ecorys, 2019).

Om de gevolgen van droogteproblemen te verminderen, is een aantal pogingen gedaan om droogterisicomonitoring en *early warning systemen* (EWS; vroegtijdige waarschuwingssystemen) te ontwikkelen, bijvoorbeeld in de Verenigde Staten, het Caraïbisch Gebied, China, Australië en Afrika (Pozzi e.a., 2013). In de Verenigde Staten is het US drought monitoring and early warning system operationeel, dat zowel informatie levert over de huidige droogtecondities, alsmede een zes-maandse droogteverwachting geeft. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de Standardized Precipitation Index (Gestandaardiseerde Neerslagindex; SPI, McKee e.a., 1993) en afwijkingen in neerslag, temperatuur, bodemvochtgehalte en afvoer. Het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie heeft het European Drought Observatory (EDO) opgericht, dat real-time informatie verschaft over droogte en tot zeven dagen vooruit droogtewaarschuwingen geeft aan de hand van de SPI, afwijkingen in sneeuw- en bodemvochtgehalte en vegetatie-waterstress op Europese schaal (Sepulcre-Canto e.a., 2012). In Afrika zijn ten minste twee droogtemonitoringsnetwerken en vroegtijdige waarschuwingssystemen geïnstalleerd en operationeel. Het eerste systeem is de African Flood and Drought Monitor, ontwikkeld door de Land Surface Hydrology Group van Princeton University (Sheffield e.a., 2014), en het tweede systeem is het African Drought Observatory (Afrikaans Droogte Observatorium; ADO), ontwikkeld door het JRC (Barbosa e.a., 2013). Deze twee vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen in Afrika geven een waarschuwing op basis van de verwachte SPI tot een paar maanden vooruit als een van de droogte-indicatoren.

Hoewel er in verscheidene landen en continenten droogtemonitor- en EWS-platformen operationeel zijn, valt op te merken dat veel systemen alleen de huidige droogtecondities monitoren en meteorologische droogtevoorspellingen van maar enkele weken tot een maand vooruit leveren. In de huidige systemen zijn zowel de meteorologische droogteverwachtingen als de hydrologische droogteverwachtingen (zoals van bodemvochtgehalte, afvoer en afstromingsdroogte) op seizoensbasis nog steeds onderontwikkeld. De hoofdreden is dat meteorologische verwachtingen in het verleden de capaciteit misten om robuuste voorspellingen voor een tijdsbestek langer dan een dag of week te kunnen produceren (Vitart, 2004). Daarnaast vereist de hydrologische droogteverwachting een geavanceerd hydrologisch model van het landoppervlak, gevoed door de meteorologische verwachting. Derhalve is de voorspellende waarde van de droogteverwachtingen in hoge mate afhankelijk van de precisie van de meteorologische verwachtingen en de voorspellende waarde van het hydrologische model om tot een realistische simulatie te kunnen komen van de watercyclus van een groot gebied.

Recente ontwikkelingen in meteorologische modellen, die leiden tot een beter vermogen om seizoensverwachtingen te creëren, brengen nieuwe mogelijkheden voor de ontwikkeling van een vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis (Yuan e.a., 2013). Dit heeft geresulteerd in de totstandkoming van meerdere nieuwe vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen op seizoensbasis in Europa in de afgelopen vijf jaar op continentale en regionale schaal (Sutanto e.a., 2020a). De extreme droogtes waar Europa mee te kampen kreeg in 2015 en 2018 zouden de ontwikkeling van vroegtijdige droogtewaarschu-

wingsystemen op seizoensbasis kunnen aanwakkeren en de focus van onderzoeksaagenda's van sommige Europese landen kunnen verschuiven naar het geven van een hogere prioriteit aan droogte-onderzoek, inclusief de uitbreiding van droogteverwachtingen verder dan dagen en weken.

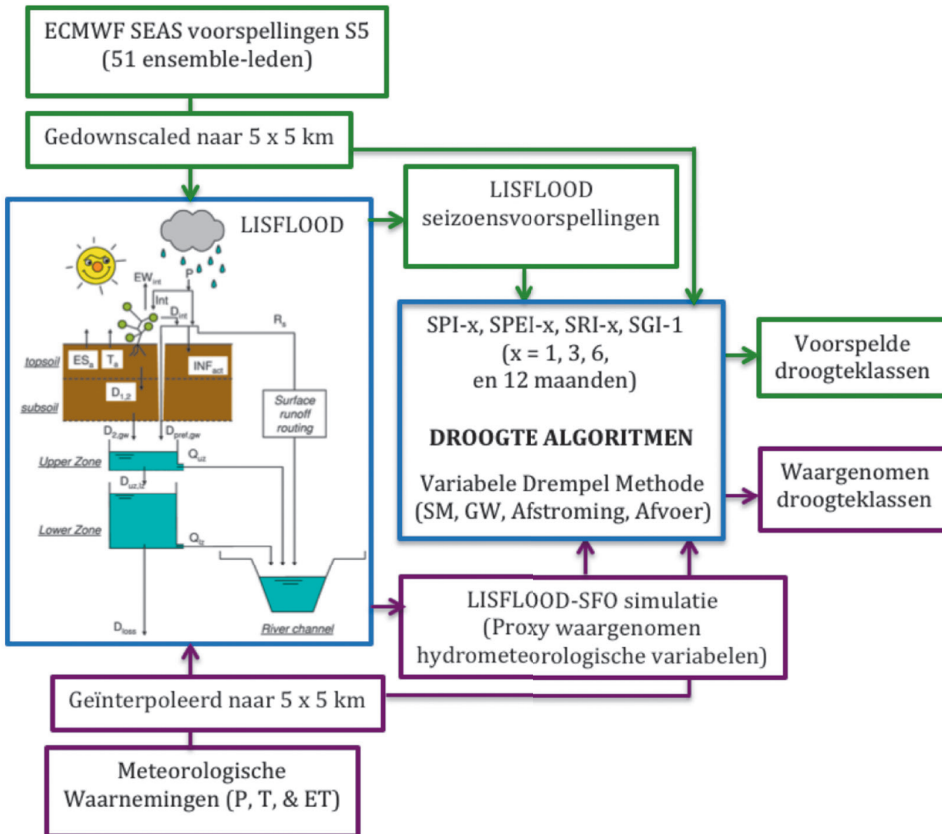
In dit artikel zullen we een samenvatting geven van de recente ontwikkeling van vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen op seizoensbasis in Europa op continentale schaal, inclusief Nederland. Twee kritische vragen komen bij de ontwikkeling van een vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen naar boven, namelijk "waar komt de voorspellende waarde van de seizoenlange droogteverwachting vandaan?" en "wat ontbreekt er in de onlangs ontwikkelde vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen?". Daarnaast geven we een voorbeeld waarin aangegeven wordt dat Nederland kan profiteren van de ontwikkeling van een Europees vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem.

## Droogtemonitoringssystemen en vroegtijdige waarschuwingssystemen in Europa

DEWS's op pan-Europees en landniveau zijn door meerdere organisaties en onderzoeksinstituten ontwikkeld. Op Europese schaal heeft het JRC het *European Drought Observatory* (EDO) ontwikkeld, in het kader van het *EU Water Scarcity and Drought Communication Program* uit 2007, om het optreden en de ernst van de droogte te monitoren en op die manier een bijdrage te leveren aan de mogelijke beperking van de impact ervan (<https://edo.jrc.ec.europa.eu>). Het EDO maakt gebruik van de *Combined Drought Indicator* (Gecombineerde Droogte-indicator; CDI), bestaande uit de SPI, afwijkingen in bodemvochtgehalte en de afwijkingen van de fractie geabsorbeerd fotosynthetisch actieve straling (fAPAR) als de basis voor zijn vroegtijdige droogtewaarschuwingssysteem (Sepulcre-Canto e.a., 2012). Daarnaast maakt het EDO een droogteverwachting aan de hand van de SPI en afwijkingen in bodemvochtgehalte tot respectievelijk drie maanden en zeven dagen vooruit, met een ruimtelijke resolutie van vijf kilometer met twee dagen vertraging. Dit betekent dat het EDO alleen tot drie maanden vooruit een waarschuwingssignaal geeft op basis van een meteorologische droogte, en er geen hydrologische droogtes worden voorspeld.

Het nieuwste vroegtijdige droogtewaarschuwingssysteem in Europa, dat een groot scala aan verschillende gebruikers kan dienen, is een droogteverwachtingssysteem ontwikkeld in het kader van het door de EU toegekende *ANYWHERE*-project (<http://anywhere-h2020.eu/>), als onderdeel van een *Multi-Hazard EWS* (MH-EWS) (Sutanto e.a., 2020a). Dit systeem is gebouwd op basis van de meteorologische verwachtingen verkregen van het *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF) SEAS 5 (zie Afbeelding 1 voor schets van het ANYWHERE DEWS). Het *ANYWHERE DEWS* (ADEWS) levert hydrometeorologische droogteverwachtingen op seizoensbasis, gebruikmakend van een breed spectrum aan droogte-indices die betrekking hebben op de meeste onderdelen van de watercyclus (neerslag, bodemvocht, afstroming, afvoer en grondwater). De ruimtelijke resolutie van het systeem is 5 bij 5 km op Europese schaal, gelijk aan het EDO. Het vermogen van ADEWS om droogte tot een paar maanden vooruit te voorspellen is tijdens de droogte in Europa van 2018 aangetoond (Sutan-

to e.a., 2020a). De droogte in de zomer van 2018 werd door ADEWS voorspeld aan de hand van verwachtingen uitgebracht vanaf mei 2018. Afbeelding 1b toont de verwachte voortdurende meteorologische droogte in Europa voor mei 2020, verkregen via ADEWS (1 maand vooruit). Zie Sutanto e.a. (2020a,b) voor gedetailleerde informatie over het ADEWS, inclusief data, methoden, producten en de voorspellende waarde.

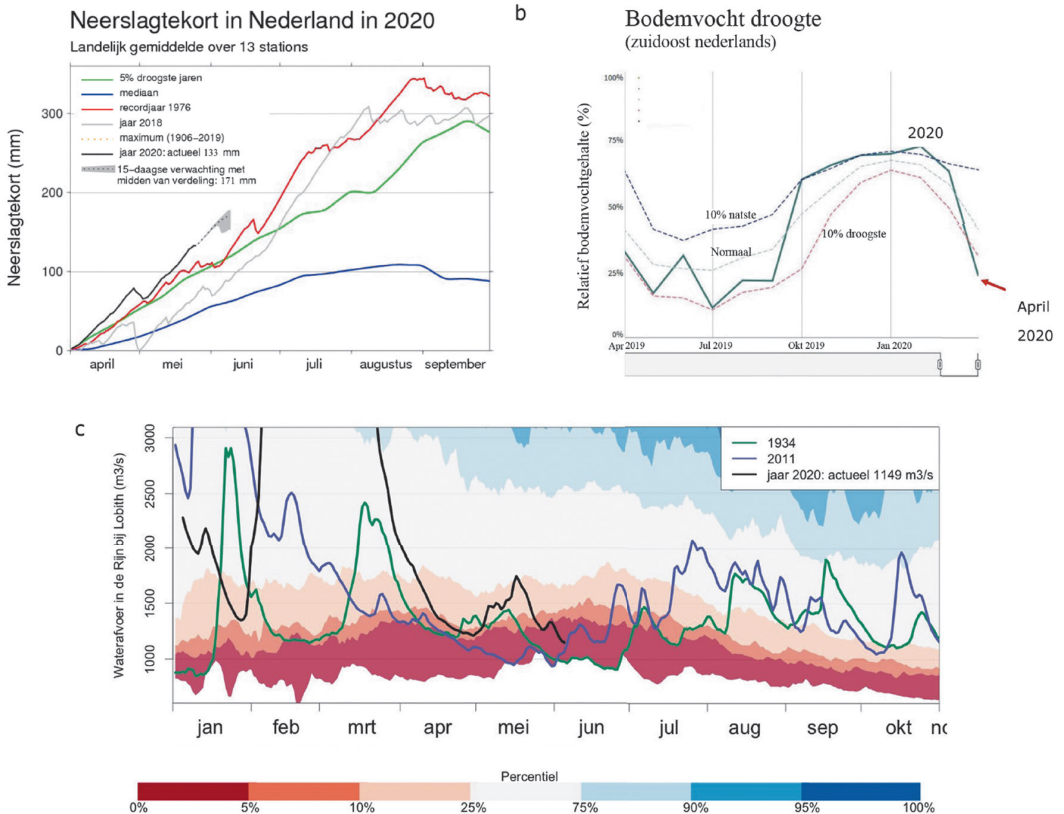


Afbeelding 1 Een algemene schets van het ANYWHERE-droogteverwachtingssysteem.

## Nederlandse droogtemonitoringsystemen en vroegtijdige waarschuwingssystemen

Droogtemonitoring in Nederland maakt momenteel gebruik van het potentiële neerslagtekort (Afbeelding 2a), het relatieve bodemvochtgehalte (Afbeelding 2b) en de afvoer van de Rijn bij Lobith en van de Maas bij Sint Pieter (Afbeelding 2c). Het potentiële neerslagtekort, online geleverd door het KNMI, toont het recente gemiddelde potentiële neerslagtekort van 13 weerstations in Nederland in vergelijking met de mediaan op de lange termijn (blauwe lijn), de extreem droge jaren 1976 (rood) en 2018 (grijs), en de 5% droogste jaren (groen). Het potentiële neerslagtekort wordt elke dag om tien uur 's ochtends geüpdate, waarbij ook een verwachting tot 15 dagen vooruit wordt geleverd ([https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/neerslagtekort\\_droogte](https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/neerslagtekort_droogte)). Een potentieel neerslagtekort geeft geen informatie over droogte, maar over het

klimatologische watertekort (cumulatieve potentiële verdamping min neerslag) tussen april en oktober. Dit systeem is echter het enige platform dat operationeel wordt gebruikt om droge condities te voorspellen voor de aankomende 15 dagen in Nederland.

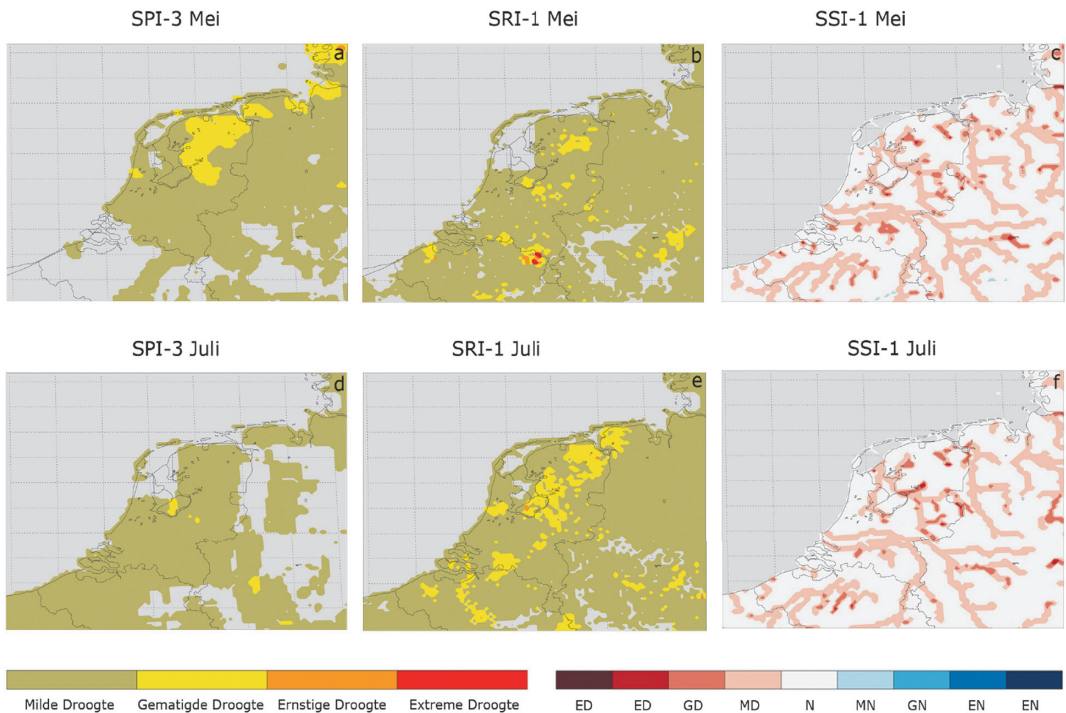


Afbeelding 2 Nederlandse droogtemonitoring en -verwachting: a) monitoring en verwachting van het potentiële neerslagtekort, gemeten aan de hand van de cumulatieve potentiële verdamping minus neerslag (bron: KNMI 24 mei 2020), b) bodemvochtmonitoring in Zuidoost-Nederland (bron: droogte NL door Future-Water), en c) Afvoermonitoring in de Rijn bij Lobith en in de Maas bij Sint Pieter (Bron: Rijkswaterstaat, 15 september 2020).

Afbeeldingen 2b en 2c laten voorbeelden zien van hydrologische droogtemonitoring in Nederland aan de hand van het bodemvochtgehalte (2b) en droogte in de afvoer van de Rijn bij Lobith (2c). De monitoring van droogte in bodemvochtgehalte geeft informatie van de bijna *real-time* bodemvochtcondities op 21 locaties in Nederland, van het verwelkingspunt (droog) tot verzadiging (nat) (<https://www.futurewater.nl/droogtenl/>). Dit systeem toont bovendien de verschillende percentielen van de bodemvochtcondities, waarmee wordt aangegeven of het bodemvochtgehalte hoger is dan de 10% natste maanden (zwarte stippellijn), normaal is (grijze stippellijn) of lager is dan de 10% droogste maanden (rode stippellijn) (Afbeelding 2b). Eenzelfde concept wordt ook toegepast bij het monitoren van droogte aan de hand van de afvoer van de Rijn bij Lobith. De afvoer bij Lobith op 3 juni 2020 was 1149 m<sup>3</sup>/s, die daarmee lager was dan

in de 5% droogste dagen (Afbeelding 2c). Dit betekent dat bij Lobith in juni een afvoerdroogte plaatsvond, indien het 5<sup>e</sup> percentiel als drempelwaarde voor droogte wordt genomen.

De afvoerdroogtemonitors bij Lobith en Sint Pieter (in respectievelijk de Rijn en de Maas) zijn alleen online beschikbaar ten tijde van watertekort of droogte (bijv <https://waterberichtgeving.rws.nl/LCW/droogtedossier/droogtemonitors-2020>, Afbeelding 2c). De Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) is verantwoordelijk voor de uitgave van het droogterapport zolang er sprake is van watertekort. Hoewel bodemvocht- en afvoerdroogtemonitoring van belang kunnen zijn bij het aangeven van aanhoudende droge situaties, verschaffen deze systemen echter niet genoeg informatie om het droogteverloop voor de eerstvolgende maanden te voorspellen. De seizoensgebonden droogtevoorspellingen zijn nog niet in gebruik genomen als operationele programma's door Rijkswaterstaat of waterschappen.



*Afbeelding 3 De ANYWHERE-droogteverwachting voor Nederland en omliggende gebieden voor de zomer van 2020. De voorspelde zwaarteklasse van de droogte (mediaan van de 51 ensemble-leden), gebruik makend van (a,d) de Gestandaardiseerde Neerslagindex met 3-maandse accumulatieperiode (SPI-3), (b,e) de Gestandaardiseerde Afstromingsindex met 1-maandse accumulatieperiode (SRI-1) en (c,f) de Gestandaardiseerde Afvoerindex met 1-maandse accumulatieperiode (SSI-1) voor de maanden mei (boven) en juli 2020 (onder), verkregen uit de verwachting van 2 mei 2020. Geen droogte wordt aangegeven met een grijze kleur, voor een milde droogte (MD) zijn de gestandaardiseerde indices tussen 0 en -1, gematigde droogte (GD) betekent gestandaardiseerde indices tussen -1 en -1.5, ernstige droogte (ED) is voor gestandaardiseerde indices tussen -1.5 en -2 en extreme droogte (EN) is voor gestandaardiseerde indices <-2.*

Het gebruik van vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen met hoge resolutie (zoals ADEWS) op Europese schaal kan helpen een begin te maken met de levering van seizoensgebonden droogteverwachtingen in Nederland. Afbeelding 3 toont de verwachte lente- en zomerdroogtes in 2020 die zich in Nederland en omliggende regio's voordeden, gebruik makend van verwachtingen gestart op 2 mei 2020 voor de maanden mei (doorlooptijd = 1 maand) en juli (doorlooptijd = 3 maanden). De verwachting was dat de voorspelde gematigde droogte in Noord-Nederland in mei 2020, geïllustreerd door de SPI-3 (Afbeelding 3a) zou verzwakken tot een milde droogte drie maanden later (Afbeelding 3d). De voorspelde Standardized Runoff Index met 1-maandse accumulatieperiode (Gestandaardiseerde Afstromingsindex; SRI-1) toonde in mei 2020 extreem droge situaties in Zuidoost-Nederland, dicht tegen de Belgische grens en gematigde droogte in sommige andere delen van het land (Afbeelding 3b). Voor juli 2020 werd verwacht dat de droogte zou verergeren van mild naar gematigd in veel gebieden ten noorden van de Waal (Afbeelding 3e), hoewel er geen verergering van de meteorologische droogte werd voorspeld voor juli 2020 (Afbeelding 3d). Dit zou kunnen worden verklaard door de vertraging tussen meteorologische droogte en hydrologische droogte, ook wel bekend als droogtepropagatie (Van Loon e.a., 2012). Droogtevoorspellingen getoond aan de hand van de Standardized Streamflow Index (Gestandaardiseerde Afvoerindex; SSI-1) voor grote rivieren in Nederland als de Waal, Maas en IJssel zijn zichtbaar in de ADEWS-verwachtingen (Afbeeldingen 3c en 3f). Het was de verwachting dat alle rivieren een staat van milde droogte zouden vertonen, met in sommige riviertakken een gematigde droogte in mei 2020 (Afbeelding 3c). Een verergering van de afvoerdroogte werd voorspeld voor een aantal riviertakken in juli 2020 (Afbeelding 3f).

## De herkomst van de seizoens-droogtevoorspellingstechnieken

Een van de belangrijkste vragen over de ontwikkeling van een vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis, vanuit een eindgebruikersperspectief bekeken, is "wat is de voorspellende waarde van het vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis?" Met andere woorden, hoeveel maanden vooruit kan droogte worden voorspeld? Over het algemeen zijn eindgebruikers beter op de hoogte van weers- en/of hydrologische verwachtingen, zoals neerslag- en afvoerverwachtingen, dan van droogteverwachtingen. Velen zullen veronderstellen dat het onmogelijk is om droogte een aantal maanden vooruit te voorspellen, aangezien weersverwachtingen maar voor een paar dagen tot een week voorspellende waarde hebben (bijvoorbeeld Cui e.a., 2012). Alvorens deze vraag te beantwoorden, is het belangrijk op te merken dat droogteverwachtingen (zoals verwachte droogte in neerslag en afvoer) verschillen van hydrometeorologische verwachtingen zelf (bijvoorbeeld een neerslagverwachting en afvoerverwachting). Droogteverwachtingen vereisen één aanvullende stap ten opzichte van de voorspelde tijdreeks van een hydrometeorologische variabele. In deze extra stap wordt het gebruik van droogte-indices, zoals de gestandaardiseerde indices of een drempelwaarde, meegenomen in de voorspelde hydrometeorologische variabelen om daarmee droogte te identificeren (Tallaksen en Van Lanen, 2004). Dit betekent een voorspelling van weinig of geen neerslag en hogere temperaturen dan normaal door conventionele weers-

verwachtingssystemen, als onderdeel van hun reeks aan weersverwachtingsproducten, niet zou moeten worden aangemerkt als een droogteverwachting.

Om de vraag te beantwoorden over hoeveel maanden vooruit en hoe goed droogte kan worden voorspeld, moeten we het type droogte definiëren; is het een meteorologische of een hydrologische droogte? Over het algemeen hebben hydrologische droogteverwachtingen een hoge voorspelbaarheid tot twee tot drie maanden vooruit, wat veel langer is dan voor weersvoorspellingen. Meteorologische droogteverwachtingen, veelal in de vorm van de verwachte droogte in neerslag en neerslagtekort (neerslag min verdamping) zijn minder goed dan hydrologische droogteverwachtingen (zoals droogte in afstroming, afvoer of grondwater). Een meteorologische droogte kan doorgaans goed worden voorspeld tot twee maanden vooruit, terwijl een hydrologische droogte tot drie maanden vooruit kan worden voorzien (Sutanto e.a., 2020b). Zodoende is de volgende vraag die op zou kunnen komen: waarom hebben droogteverwachtingen een significant betere voorspellende waarde van een maand tot een seizoen vooruit in vergelijking met weersverwachtingen, die niet verder dan dagen tot weken komen, terwijl de input van droogtevoorspellingen meteorologische verwachtingen zijn? Waarom werkt de beperkte voorspellende waarde van een neerslagverwachting niet direct door in de droogteverwachting?

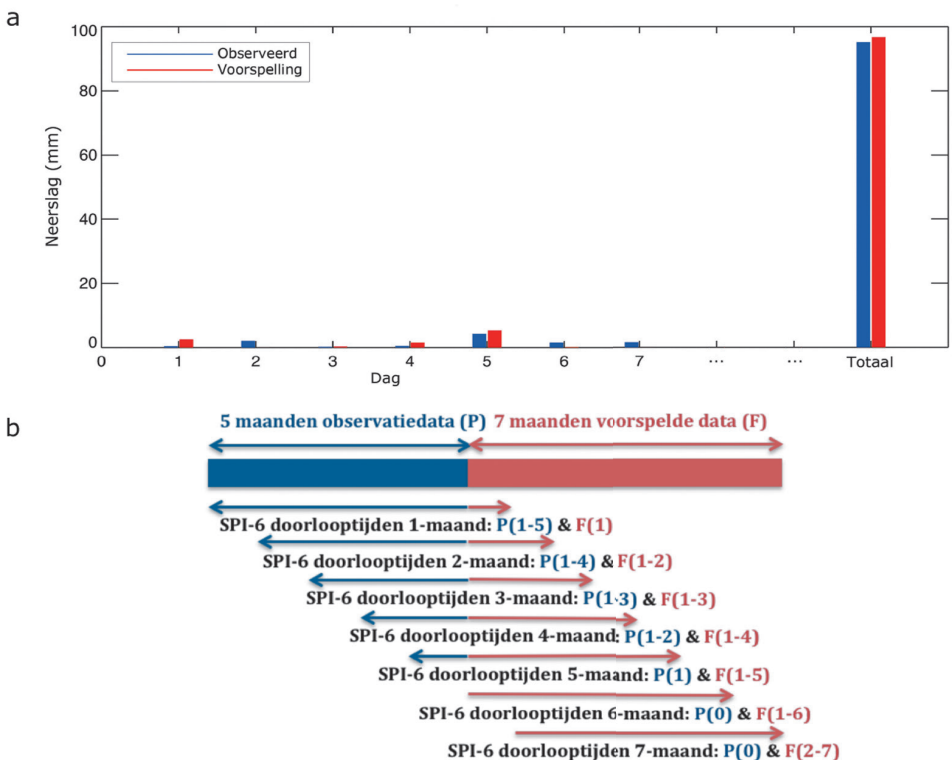
Er zijn minstens twee hoofdredenen waarom droogtevoorspellingen beter presteren dan weersverwachtingen. De eerste is de tijdsresolutie die gebruikt wordt in de droogteanalyse, meestal een maand, en de tweede is het geheugen van hydrologische systemen. Beide spelen een vitale rol in het bepalen van de voorspellende waarde van een droogtevoorspelling. De droogtebepaling, zoals de SPI voor droogte in neerslag, berekent droogte aan de hand van de afwijking van maandelijkse neerslagwaarden lager dan de langetermijn-neerslagmediaan voor elke maand. Vervolgens wordt een kansverdeling gefit op de maandelijkse neerslagdataset, die getransformeerd wordt naar een normaalverdeling zodat de mediane SPI voor het gebied en gewenste periode gelijk is aan nul (zie Mckee e.a., 1993 voor een gedetailleerde berekening). Derhalve zijn positieve SPI-waarden groter dan de mediane neerslag en negatieve SPI-waarden lager dan de mediane neerslag. Wanneer de SPI lager is dan nul wordt aangenomen dat een droogtesituatie plaatsvindt, die eindigt als de SPI weer positief wordt. Droogte bepaald aan de hand van de SPI wordt doorgaans onderverdeeld in vier klassen, te weten (i) milde droogte:  $0 > SPI \geq -1$ ; (ii) gematigde droogte:  $-1 > SPI \geq -1.5$ ; (iii) ernstige droogte:  $-1.5 > SPI \geq -2$ ; en (iv) extreme droogte:  $SPI \leq -2$ . Hetzelfde principe geldt voor een hydrologische droogteverwachting, bijvoorbeeld voor droogte in afstroming en afvoer, respectievelijk bepaald aan de hand van de SRI (Gestandaardiseerde Afstromingsindex) en SSI (Gestandaardiseerde Afvoerindex). De SSI en een drempelmethode, toegepast op een 30-daagse Moving Average (30DMA), worden in het algemeen gebruikt om de droogte in afvoer te bepalen (bijvoorbeeld Yuan e.a., 2013). Het toepassen van een 30DMA is effectief voor het gladstrijken van dagelijkse afvoerdata naar maandelijkse data. Het samenvoegen van de voorspelde data van dagen naar maanden verbetert de voorspellende waarde. Een aantal voorgaande studies die de technieken van hydrometeorologische seizoensverwach-



tingen hebben bestudeerd, hebben daarnaast gebruik gemaakt van wekelijkse (submaandelijke) of maandelijke gemiddelden (Arnal e.a., 2018).

Afbeelding 4a geeft een voorbeeld van dagelijks voorspelde neerslag, gebruik makend van seizoensverwachtingen geïnitieerd op 1 januari 2019, en gerasterde neerslagobservaties in een rastercel in de buurt van Keulen, Duitsland. Beide tijdreeksen zijn afkomstig van het *European Flood Alert System* (Europese Hoogwaterwaarschuwingssysteem; EFAS), wat gebruikt wordt in ADEWS. Afbeelding 4 laat zien dat, op dagelijkse basis, de verwachtingen het voorkomen van neerslag voor de eerste paar dagen relatief goed kunnen voorspellen. Echter, de verwachtingen onder- of overschatten de hoeveelheid neerslag en missen de neerslagtiming (zoals dag 6 en 7). Een goede overeenkomst is zichtbaar voor neerslagsituaties op de derde en vijfde dag, met respectievelijk 0,2 en 4,3 mm in de geobserveerde neerslaghoeveelheden en 0,3 en 5,3 mm in de verwachting. De voorspellende waarde van dagelijkse neerslagverwachting neemt af na een week (Cui e.a., 2012). De verwachte totale neerslaghoeveelheid van januari 2019 komt echter goed overeen met de observatie, met een verschil van 1,6 mm tussen de geobserveerde en verwachte situatie.

Het is belangrijk op te merken dat droogteverwachtingen geen gedetailleerd weersverloop van dag tot dag nodig hebben, zoals vereist in weersvoorspelling-



Afbeelding 4 a) Geobserveerde en voorspelde dagelijkse neerslag voor januari 2019 in een rastercel bij Keulen, Duitsland, verkregen via EFAS, en b) opstapeling van geobserveerde en voorspelde neerslagdata in de berekening van de SPI met 6-maandse accumulatieperiode (SPI-6).

gen op de middellange termijn (10-daagse verwachtingen). In plaats daarvan hebben droogtevoorspellingen schattingen van maandelijkse of seizoensgemiddelde weersverwachtingen nodig, die informatie geven over of het komende seizoen natter, droger, warmer of kouder dan normaal zal zijn (Weisheimer en Palmer, 2014). Zij sluiten goed aan bij het doel van weerverwachtingen en droogtebenaderingen die gebruikt worden om de maandelijkse weerafwijking van de normaalwaarden te identificeren. Bovendien zijn weersverwachtingen op seizoensbasis (langetermijnverwachtingen) van wezenlijk belang voor droogtevoorspellingen, aangezien langer vooruit moet worden gekeken, uiteenlopend van maanden tot een seizoen, vanwege de geleidelijke aard van droogte (Tallaksen en Van Lanen, 2004).

De rol van het geheugen van stroomgebieden is ook essentieel bij het ontwikkelen van de droogteverwachtingstechnieken. Hoewel droogtevoorspellingen gebruik maken van een maandelijkse tijdsresolutie, is de voorspellende waarde van meteorologische droogte-indicatoren bij een SPI met een 1-maandse accumulatieperiode (SPI-1), vanwege de chaotische aard van de atmosfeer, nog steeds vrij laag (Sutanto e.a., 2020b). De SPI-1 bestaat uit maar één maand aan voorspelde neerslagdata en in de berekening van de droogte-indices zijn er geen metingen toegevoegd. De technieken kunnen verbeterd als metingen in de verwachtingen wordt opgenomen, bijvoorbeeld bij het gebruik van SPI-x, met een accumulatieperiode x langer dan 1 maand.

Afbeelding 4b laat zien hoe geobserveerde en voorspelde data zijn gecombineerd om de SPI-6 te berekenen met verschillende doorlooptijden. Maandelijks observatiedata van de laatste vijf maanden en maandelijkse voorspelde data van één tot zeven maanden vooruit zijn nodig om de droogte met SPI-6 te kunnen berekenen. Als voorbeeld: vijf maanden aan observatiedata zijn gemengd met de eerste maand met verwachtingsdata om een mogelijke droge situatie in de eerste maand te voorspellen (doorlooptijd = 1). Om een eventuele droge situatie in de tweede maand (doorlooptijd = 2) met hetzelfde accumulatie-niveau ( $x = 6$ ) te voorspellen, worden 4 maanden aan observatiedata en 2 maanden aan verwachtingsdata gemengd, en zo verder voor de overige maanden (zie Afbeelding 4b). Derhalve bevatten meteorologische droogteverwachtingen met  $x > 1$  maand gegevens van de metingen vanwege het gebruik van voorafgaande observaties bij de voorspellingen.

De voorspellende waarde van hydrologische droogteverwachtingen (bijvoorbeeld gebruikmakend van de SRI-1 en de Gestandaardiseerde Grondwaterindex, SGI-1) is echter altijd hoger dan die van de meteorologische droogteverwachtingen (zoals SPI-1), zelfs als geen observatiedata wordt ingebracht (Sutanto e.a., 2020b). Dit komt doordat hydrologische droogtes worden beïnvloed door de opslag van water (in bodems en grondwater), dat het effect van de drijvende krachten zoals neerslag bundelt, verzwakt, verlengt en vertraagt (Van Loon e.a., 2012). Echter zou men zich moeten realiseren dat veel stroomgebieden in Nederland vrijwel geen opslagcapaciteit hebben door een beperkte drooglegging en hun locatie, onder zeeniveau. Hydrologische droogtevoorspellingen met 1-maandse accumulatieperiode (bijvoorbeeld SRI-1 en SGI-1) hebben een

soortgelijke voorspellende waarde als meteorologische droogteverwachtingen met 3-maandse accumulatieperiode (zoals SPI-3), die drie maanden aan voorafgaande metingen bevatten (Sutanto e.a., 2020b). De voorspellende waarde zal zelfs hoger zijn als er langere accumulatieperioden worden gebruikt in de hydrologische verwachtingen. Daarom wordt de ontwikkeling van hydrologische droogteverwachtingen aangemoedigd. Meteorologische droogteverwachtingen waarvoor voorafgaande observatiedata ( $x > 1$  maand) zijn gebruikt, kunnen een alternatief zijn als hydrologische droogteverwachtingen niet beschikbaar zijn (Sutanto e.a., 2020b).

## **Toekomstige ontwikkelingen van vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen**

Huidige droogtemonitoringssystemen en vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen over de wereld, inclusief het recente ADEWS, kunnen eindgebruikers alleen informatie bezorgen over actuele en verwachte droogtecondities. Hoewel het vroegtijdige droogtewaarschuwingssysteem tot een paar maanden vooruit droogtes kan voorspellen, ontbreekt nog informatie over de impact van deze toekomstige droge situaties. Het is namelijk mogelijk dat droogte niet leidt tot problemen, bijvoorbeeld als er geen blootstelling of kwetsbaarheid is. Droogtegevaar, blootstelling en kwetsbaarheid zijn drie belangrijke componenten die vaak worden gebruikt om droogterisico's te bepalen. Het koppelen van de droogtekans aan de gevolgen is noodzakelijk om de risico's in beeld te brengen en belangrijk voor het maken van besluiten en risicomanagement.

Voor watermanagers, beleidsmakers en andere belanghebbenden is er een vitale behoefte om informatie geleverd te krijgen over de verwachte impact van droogtesituaties, in plaats van alleen over droogtegevaren. De informatie over verwachte droogte-impact kan van onschatbare waarde zijn bij het plannen van een tijdige respons vanuit het perspectief van droogtemanagement. De ontwikkeling van een vroegtijdig waarschuwingssysteem over droogte-impact moet daarom worden gezien als een topprioriteit op de onderzoeksagenda, in het bijzonder omdat het aannemelijk is dat, in de context van klimaatverandering, droogte-impact frequenter zal voorkomen en ernstiger zal zijn (Wanders e.a., 2015).

De ontwikkeling van de European Drought Impact Inventory (Europese Droogte Impact Inventaris; EDII) in de afgelopen jaren brengt nieuwe mogelijkheden om droogte-impact te kunnen voorspellen (Blauhut e.a., 2015). Machine learning-technieken worden gebruikt om gerapporteerde droogte-impacts te koppelen aan onderliggende gevaren (bottom-up aanpak). Blauhut e.a. (2015) en Bachmair e.a. (2016) waren één van de eersten om deze relatie te onderzoeken, aan de hand van de gestandaardiseerde droogte-indices en de EDII-database. Echter, deze studies reconstrueerden condities uit het verleden en zijn nog niet gebruikt voor droogte-impactverwachtingen. De eerste onderzoeken op het gebied van de droogte-impactverwachtingen zijn uitgevoerd door Sutanto e.a. (2019 en 2020c). Hun resultaten tonen aan dat het voorspellen van droogte-impact over het algemeen uitvoerbaar is, met voorspellende waarde tot drie maanden vooruit, afhankelijk van het aantal gerapporteerde impacts en de duur van de droogte. Zij concludeerden dat een goed voorspellend droogte-impactmodel

niet kan worden ontwikkeld in een gebied met een beperkt aantal gerapporteerde impacts.

De voorspellende waarde van de droogte-impactfuncties bij het gebruik van de bottom-up aanpak hangt sterk af van de kwaliteit en kwantiteit van de impactdatabase, de voorspelde impacts en de methode, bijvoorbeeld machine learning. Daarom zouden de beheerders van vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen impact-functies moeten ontwikkelen, te beginnen met het ontwikkelen van een omvangrijke droogte-impactdatabase die alle relevante getroffen sectoren omvat en voldoende ruimtelijke en temporele resoluties heeft.

Een andere methode om droogtegevolgen te voorspellen is met het gebruik van een deterministisch impactmodel (top-down aanpak). Deze aanpak is echter gelimiteerd tot specifieke impacts, zoals specifieke gewastypen. Een deel van de impacts is mogelijk minder goed te kwantificeren. Een combinatie van een bottom-up aanpak, aangevuld met een top-down aanpak is dan een manier om het voorspellen van droogtegevolgen te verbeteren.

## Conclusies

De droogtemonitoringsystemen en vroegtijdige droogtewaarschuwingssystemen die op het moment in Nederland worden gebruikt om gevolgen van droogte te minimaliseren zijn alleen geschikt om actuele droge situaties te observeren en droogtecondities tot 15 dagen vooruit te voorspellen. Een vroegtijdig droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis dat veelomvattende droogtes van een maand tot een seizoen vooruit kan voorspellen bestaat nog niet. Een recent onderzoek van Sutanto e.a. (2020b) over droogteverwachtingen, dat gebruik maakt van het recent ontwikkelde Europese vroegtijdige droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis (ADEWS), toont dat het ADEWS in het algemeen in Europa aanzienlijke voorspellende waarde heeft, tot drie maanden vooruit. Echter, ADEWS geeft alleen informatie over kans op droogte; er wordt nog geen droogte-impact voorspeld. De ontwikkeling van een droogtewaarschuwingssysteem op seizoensbasis die droogte-impacts kan voorspellen wordt daarom aanbevolen en zou een topprioriteit moeten krijgen op de nationale onderzoeksagenda, zoals ook aangegeven in de United Nations Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-30 (Poljanšek e.a., 2017). Hoewel niet specifiek genoemd in het rapport van het advies van de wetenschappelijke commissie Beleidstafel Droogte fase 2, uitgebracht in december 2019, (<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/brieven/2019/12/18/bijlage-2-advies-wetenschappelijke-commissie-beleidstafel-droogte>), stelt de commissie voor om rekening te houden met de recente ontwikkelingen op het gebied van operationele droogte(-impact)verwachtingen, onder meer gebaseerd op de projecten van Wageningen University & Research (WUR) en collega's (bijvoorbeeld Sutanto e.a., 2019; 2020a; 2020c). Deze onderzoeken tonen aan dat het voorspellen van droogtegevevaren en -impact tot enkele maanden vooruit haalbaar is, afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare impactdata. Met de ontwikkeling van een database van droogte-impacts zou een stap voorwaarts te maken zijn richting het doen van seizoensvoorspellingen van droogtegevevaren alsmede verwachtingen van droogte-impact. Dit zou kunnen worden uitgevoerd in het kader

van een geïntegreerd kennisprogramma over droogte dat in diverse bestaande onderzoeksprogramma's kan worden opgenomen, zoals het NWO-topsectorenbeleid, de NWA en het NKWK, zoals voorgesteld door genoemde commissie.

Een vroegtijdig waarschuwingssysteem (EWS) voor droogte(gevolg) kan waterbeheerders helpen bij het ontwikkelen van een Nederlands systeem voor droogte-management en mitigatie tot een aantal maanden vooruit, wanneer een aankomende droogte is voorzien. Een aantal voorbeelden van maatregelen die mogelijk dankzij een lange voorspelhorizon zijn:

1. Beheer van het hoofdsysteem van oppervlaktewater om het waterniveau in het IJsselmeer op hoog droogteniveau te krijgen en te houden;
2. Laag-Nederland: tijdige informatie leveren voor watervragende sectoren om voor te kunnen bereiden op eventuele watertekorten;
3. Hoog-Nederland zou meer informatie hebben om water vast te houden hoog in het systeem ("haarvaten"); het is altijd lastig om een balans te vinden tussen te veel water (afvoeren) en te weinig (vasthouden);
4. Hoog-Nederland: tijdige verboden op grondwateronttrekkingen of de introductie van verboden voor irrigatie. Dit is vooral van belang voor landbouw dicht bij droogtegevoelige natuurgebieden;
5. Om het algemene publiek te informeren, zoals bij de weersverwachting.

### Softwarebeschikbaarheid en overige informatie

De EFAS-data zijn beschikbaar via een COPERNICUS open-datalicentie (<https://doi.org/10.24381/cds.e3458969>). In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het EFAS-systeem versie 2. De analyses van de droogte-indices via dynamische verwachtingen, zoals het SFO, zijn opgeslagen in het *4TU Centre for Research Data* met doi:10.4121/uuid:3ac082ab-15e7-4521-8d47-5128b0e0d239. De vertaling van het manuscript van Engels naar Nederlands is mogelijk gemaakt met de hulp van Wouter de Vries en Claudia Brauer.

### Dankwoord

De auteur zou graag willen bedanken: Henny van Lanen (Wageningen Universiteit), voor zijn grote bijdrage en begeleiding tijdens vorige onderzoeken, en Remko Uijlenhoet (Wageningen Universiteit) voor zijn steun en ideeën om dit artikel te schrijven. De auteur zou graag zijn dank willen uitspreken richting Fredrik Wetterhall (ECMWF), Veit Blauhut (University of Freiburg), Niko Wanders (Universiteit Utrecht), Xavi Lloret (HYDS), Tessa van Hateren (Wageningen Universiteit), en Melati van der Weert (MSc-student aan Wageningen Universiteit) voor hun samenwerking in vorige onderzoeken. Dit onderzoek werd financieel gesteund door het ANYWHERE-project (subsidieovereenkomst no.: 700099), toegerekend binnen het Horizon 2020 onderzoeks- en innovatieprogramma van de EU.

### Literatuur

**Arnal, L., Cloke, H. L., Stephens, E., Wetterhall, F., Prudhomme, C., Neumann, J., Krzeminski, B. en F. Pappenberger** (2018) Skilful seasonal forecasts of streamflow over Europe?; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, pag 22, 2057–2072, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2057-2018>.

- Bachmair, S., Svensson, C., Hannaford, J., Barker, L. J. en K. Stahl** (2016) A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, pag 2589–2609, <https://doi.org/10.5194/hess-20-2589-2016>.
- Barbosa, P., Naumann, G., Valentini, L., Vogt, J., Dutra, E., Magni, D. en A. De Jager** (2013) A Pan-African map viewer for drought monitoring and forecasting; in: *14<sup>th</sup> Waternet Symposium, Dar es Salaam, Tanzania*, 30 October to 1 November, 4 pp.
- Blauhut, V., Gudmundsson, L. en K. Stahl** (2015) Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts; in: *Environ. Res. Lett.*, 10, 014008, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014008>.
- Cui, B., Toth, Z., Zhu, Y. en D. Hou** (2012) Bias correction for global ensemble forecast; in: *Weather and Forecasting*, Vol. 27, pag 396-410, doi:10.1175/WAF-D-11-00011.1.
- ECORYS** (2019) Economische schade door droogte in 2018; Bijlage 1 Rapport Economische schade door droogte in 2018, Rijksoverheid, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/12/18/bijlage-1-rapport-economische-schade-door-droogte-in-2018>, geraadpleegd on 11 Juni 2020).
- EU** (2007) Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European union, Communication from the commission to the European Parliament and the Council; European Commission, DG Environment, Brussels.
- FAO** (2017) The impact of disasters on agriculture and food security; Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN:978-92-5-108962-0.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. en J. Kleist** (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scale; in: *Proc. Eighth Conf. on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., pag 179–184.
- Poljanšek, K., Marín Ferrer, M., De Groeve, T., Clark, I., Faivre, N., Peter, D., Quevauviller, P. K., Boersma, K. E., Krausmann, E., Murray, V., Papadopoulos, G. A., Salamon, P., Simmons, D. C., Wilkinson, E., Casajus Valles, A., Doherty, B. en D. Galliano** (2017) Science for disaster risk management 2017: Knowing better and losing less; EU Joint Research Centre Rep., 60 pp., <https://doi.org/10.2760/451402>.
- Pozzi, W., Sheffield, J., Stefanski, R., Cripe, D., Pulwarty, R., Vogt J. V., Heim, R. R., Brewer, M. J., Svoboda, M., Westerhoff, R., van Dijk, A. I. J. M., Lloyd-Hughes, B., Pappenberger, F., Werner, M., Dutra, E., Wetterhall, F., Wagner, W., Schubert, S., Mo, K., Nicholson, M., Bettio, L., Nunez, L., van Beek, R., Bierkens, M., de Goncalves, L. G. G., de Mattos, J. G. Z. en R. Lawford** (2013) Toward global drought early warning capability; in: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, pag 776-785, doi:10.1175/BAMS-D-11-00176.1.
- Ross, T. en N. Lott** (2003) A climatology of 1980–2003 extreme weather and climate events; National Climatic Data Center Technical Report No. 2003-01, NOAA/ NESDIS, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H. en J. Vogt** (2012) Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe; in: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, pag 3519–3531, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>.

- Sheffield, J., Wood, E. F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., Olang, L., Amani, A., Ali, A., Demuth, S. en L. Ogallo** (2014) A drought monitoring and forecasting system for sub-shara African water resources and food security; in: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, pag 861-882, doi:10.1175/BAMS-D-12-00124.1.
- Sutanto, S. J., Van der Weert, M., Wanders, N., Blauhut, V. en H. A. J. Van Lanen** (2019) Moving from drought hazard to impact forecasts; in: *Nat. Commun.*, 10, 4945, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12840-z>.
- Sutanto, S. J., Van Lanen, H. A. J., Wetterhall, F. en X. Lloret** (2020a) Potential of pan-European seasonal hydro-meteorological drought forecasts obtained from a Multi-Hazard Early Warning System; in: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, pag 368–393, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0196.1>.
- Sutanto, S. J., Wetterhall, F. en H. A. J. Van Lanen** (2020b) Hydrological drought forecast outperform meteorological drought forecasts; in *Environmental Research Letters*, 15, 084010, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8b13>.
- Sutanto, S. J., van der Weert, M., Blauhut, V. en H. A. J. Van Lanen** (2020c) Skill of large-scale seasonal drought impact forecasts; in: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, pag 1595–1608, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1595-2020>.
- Tallaksen, L. M. en H. A. J. Van Lanen** (2004) Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater; in: *Developments in Water Science*, vol. 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam, the Netherlands.
- Van Lanen, H. A. J., Laaha, G., Kingston, D. G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J-P., Vlnas, R., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R. J., Gailliez, S., Wong, W. K., Adler, M-J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M., Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stage, J. H. en A. F. Van Loon** (2016) Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case; in: *Hydrol. Process.*, 30, pag 3097-3104, doi:10.1002/hyp.10838.
- Van Loon, A. F., Van Huijgevoort, M. H. J. en H. A. J. Van Lanen** (2012) Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, pag 4057–4078, doi:10.5194/hess-16-4057-2012.
- Vitart, F** (2004) Monthly forecasting at ECMWF; in: *Mon. Wea. Rev.*, 132, pag 2761–2779, <https://doi.org/10.1175/MWR2826.1>.
- Wanders, N., Wada, Y. en H. A. J. Van Lanen** (2015) Global hydrological droughts in the 21<sup>st</sup> century under a changing hydrological regime; in: *Earth Syst. Dynam.*, 6, pag 1-15, doi:10.5194/esd-6-1-2015.
- Weisheimer, A. en T. N. Palmer** (2014) On the reliability of seasonal climate forecasts; in: *J. R. Soc. Interface*, Vol. 11, 20131162, <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.1162>.
- Yuan, X., Wood, E. F., Roundy, J. K. en M. Pan** (2013) CFSv2-based seasonal hydroclimatic forecasts over the conterminous United States; in: *J. Climate*, 26, pag 4828–4847, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00683.1>.

## Summary A system for drought monitoring and drought early warning in Europe and the Netherlands

*Drought is one of the most damaging natural hazards, with tremendous impacts regarding the number of affected people and economic losses. One of the most effective strategies to help reduce the impacts of drought is developing a seasonal drought early warning system (DEWS). In the Netherlands, however, only drought monitoring systems that provide information on precipitation deficit, soil moisture, and streamflow measurement are available. Nevertheless, the recent ANYWHERE DEWS (ADEWS) has proved to have considerable skill to predict drought up to 3 months ahead and offers a possibility to fill the gap in forecasting drought hazards in the Netherlands. The high skill of ADEWS stems from the accumulation or smoothing of the forecasted data from days to a month and the memory of the hydrological systems. All drought early warning systems, including ADEWS, only provide information on drought hazards, whereas drought impact forecasting is still missing. The development of a seasonal drought impact EWS must receive priority on the national research agenda.*

### Auteur

SAMUEL JONSON SUTANTO

Gastmedewerker, Leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer

Wageningen University & Research

samuel.sutanto@wur.nl