

Meteorologische droogte afgemeten aan beregeningsgiften

JAN-PHILIP WITTE, JELMER NIJP, PAUL TORFS EN GÉ VAN DEN EERTWEGH

Het landgebruik en het waterbeheer in het landelijk gebied dienen anders te worden ingericht, dat is de breed gedragen conclusie nadat Nederland werd geconfronteerd met het extreem droge jaar 2018 en vervolgens met de zeer droge jaren die daarop volgden. Het KNMI gebruikt als droogtemaat onder andere het doorlopend potentieel neerslagtekort gedurende het groeiseizoen, dat bij het KNMI begint op 1 april. In dit artikel onderzoeken wij deze en andere maten voor meteorologische droogte. Dat doen we door de verschillende maten te vergelijken met een variabele die reageert op meteorologische droogte: de hoeveelheid beregening in de landbouw. Wanneer de start van het groeiseizoen wordt gedefinieerd aan de hand van het bereiken van een bepaalde temperatuursom, dan blijkt de maximale stijging van het doorlopend potentieel neerslagtekort de beste voorspeller van beregeningsgiften te zijn. Onder het KNMI-scenario 'Hoge uitstoot, droog' (Hd) zal het groeiseizoen in 2100 een maand eerder beginnen en zal dit tekort met ca. 125 mm zijn toegenomen, de hoeveelheid van vijf beregeningsgiften.

Artikel

Inleiding

Nog betrekkelijk kort geleden werd door het KNMI aangekondigd dat onze zomers door klimaatopwarming wel eens zeer veel droger kunnen worden (o.a. Van den Hurk e.a., 2006; Van den Hurk e.a., 2014). In de loop van het zeer droge jaar 2018 werd duidelijk dat toekomstscenario's ook werkelijkheid kunnen worden. Dat besef werd versterkt door de zeer droge jaren die daarop volgden: 2019, 2020 en 2022. Droogteschade aan gewassen (Van Asseldonk e.a., 2021) en aan natuur (Anonymous, 2020; Witte e.a., 2020; Witte, 2021) ontstond vooral op de zandgronden van de zuidelijke en oostelijke provincies, mede doordat aanvoer van oppervlaktewater daar maar beperkt mogelijk is. De vochtvoorziening van planten is er vooral afhankelijk van het weer. Provincies, waterschappen en terreinorganisaties van deze 'hogere zandgronden' lieten een omvangrijk onderzoek uitvoeren naar de gevolgen van de droge jaren en naar maatregelen om droogteschade zoveel mogelijk te beperken (www.droogteportaal.nl, Van den Eertwegh e.a., 2021; De Louw e.a., 2022; Van den Eertwegh e.a., 2022). Nu onlangs nieuwe scenario's met nog drogere zomers zijn verschenen (KNMI, 2023), is de aanpassing van het waterbeheer nog belangrijker geworden.

In navolging van Van Loon (2015) beschrijven Van den Eertwegh e.a. (2021) in hun studie een cascade van drie vormen van droogte. Het begint met meteorologische droogte, een langdurige periode met weinig neerslag en een hoge

potentiële verdamping. Die meteorologische droogte plant zich voort in de wortelzone van planten, waar de hoeveelheid bodemvocht zodanig afneemt dat planten niet meer voldoende water kunnen opnemen om potentieel te transpireren: bodemvochtdroogte. Ten slotte werkt het gebrek aan neerslag door op de grondwaterstand en de afvoer van grondwater naar beken en andere oppervlaktewateren: hydrologische droogte. De voortplanting van het weer in deze cascade wordt met vertraging doorgegeven: veel neerslag vermindert direct de meteorologische droogte, voor verdamping op een potentieel niveau moet eerst de bodemvochtvoorraad worden aangevuld, en pas als de bodem op veldcapaciteit is herstellen de grondwaterstanden en beekafvoeren. Dat hydrologisch herstel duurt het langst; voor een traag systeem als de Veluwe zijn daar jaren voor nodig.

Maar het begint dus met meteorologische droogte. Het KNMI gebruikt daarvoor vier maten, waaronder de Standardized Precipitation Index (*SPI*) en de Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (*SPEI*). De twee andere maten bespreken we later in dit artikel. In *SPI* en *SPEI* worden meteorologische gegevens over een bepaalde voorgaande periode, bijvoorbeeld 1, 3 of 6 maanden, geschaald naar het weer van een langere periode, bijvoorbeeld 30 jaar (Vicente-Serrano e.a., 2010). De uitkomst is een dimensieloos getal, waarbij een waarde kleiner dan -2,0 duidt op een extreme droge periode, en een waarde tussen de -2,0 en -1,5 op een zeer droge periode. Het voordeel van deze statistische maten is dat ze internationaal veel worden gebruikt, wat handig is voor de communicatie, en dat ze droogte op een relatieve manier uitdrukken ten opzichte van het lokale weer. Zo kan het in de Noorse kustplaats Bergen voor die locatie extreem droog zijn, in statistisch opzicht net zo extreem als in bijvoorbeeld Madrid; de *SPI* en *SPEI* drukken dat goed uit. In dit voordeel schuilt ook een beperking: droogte in Bergen, met een gemiddelde neerslag van 2250 mm/jaar, is in absolute zin onvergelijkbaar met een droogte in Madrid, waar gemiddeld 420 mm/jaar aan neerslag valt. Voor het beoordelen van de gevolgen van een meteorologische droogte voor de landbouw en de natuur liggen deze relatieve maten daarom niet voor de hand, zelfs niet in een klein land als Nederland, omdat daarbinnen al klimatologische verschillen bestaan (Wolters e.a., 2011). Zeker voor de landbouw is het van belang te weten of er in absolute zin voldoende water beschikbaar is, want iedere millimeter die het gewas niet potentieel kan transpireren betekent, via de 'water-use efficiency of productivity', een vrijwel evenredig verlies aan gewasopbrengst (De Wit, 1958).

In dit artikel onderzoeken we daarom een aantal absolute meteorologische droogtematen; maten die worden uitgedrukt in millimeter waterschijf. De kwaliteit van deze maten beoordelen we door ze te vergelijken met een variabele die reageert op droogte: de beregeningsgift. Aanname achter onze analyse is dat de beregeningsgift hoger is naarmate het groeiseizoen meteorologisch droger is.

Methode

Gegevens

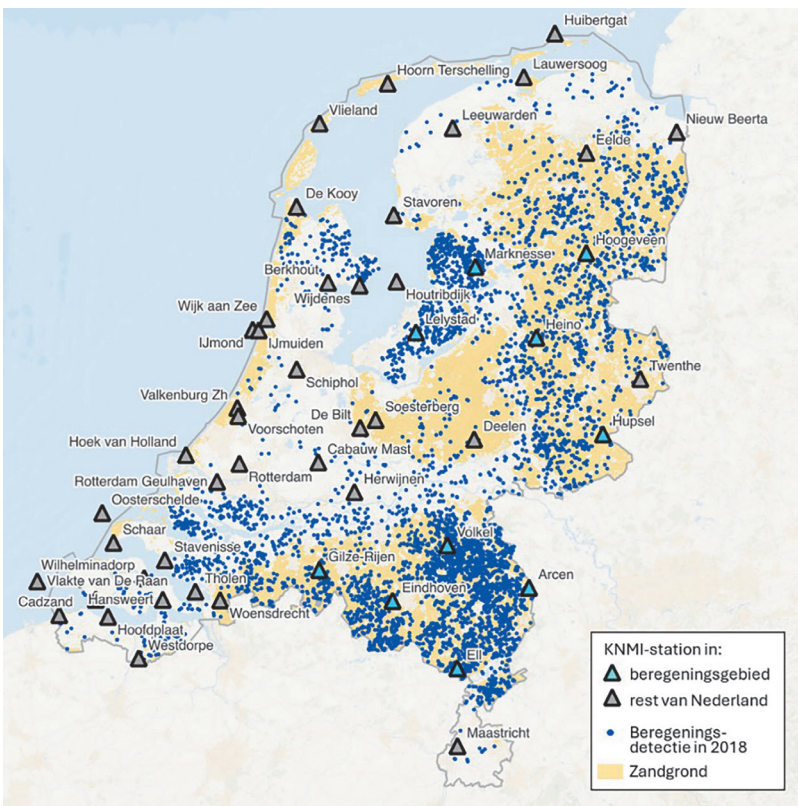
Voor de beregeningsgiften gebruiken we de schattingen van Wageningen Economic Research voor de jaren 2001-2021 (Van der Meer, 2023). Deze zijn ge-

baseerd op een steekproef van circa 1500 land- en tuinbouwbedrijven in heel Nederland, het zogenaamde 'bedrijveninformatienet', waarvan de resultaten statistisch zijn geëxtrapoleerd naar heel Nederland. Tabel 1 geeft de door Van der Meer (2023) vermelde beregeningshoeveelheden.

Tabel 1. Beregeningsgiften (Mm³) in de periode 2001-2021 volgens Van der Meer (2023).

jaar gift	jaar gift	jaar gift	jaar gift	jaar gift	jaar gift	jaar gift	jaar gift
2001 43	2004 45	2007 37	2010 80	2013 66	2016 38	2019 215	
2002 43	2005 36	2008 35	2011 79	2014 40	2017 80	2020 269	
2003 155	2006 89	2009 53	2012 22	2015 68	2018 264	2021 44	

We spitsen onze analyse toe op meteorologische gegevens uit het gebied waar het meest wordt beregend (hierna: 'beregeninggebied') en dat dus domineert in de cijfers van Tabel 1. Dit gebied leiden we indicatief af van de aanwezigheid van beregeningshaspels en sproeiers, waargenomen, zie kader, op satellietbeelden uit 2018 (Afbeelding 1). Het gaat om de Flevopolders en de hogere zandgronden in het oosten en zuiden van ons land.



Afbeelding 1 Met satellietbeelden gedetecteerde beregeningshaspels en sproeibomen op satellietbeelden uit 2018 (Terink e.a., 2023) en de in deze studie geselecteerde meteorologische stations met complete meetreeksen voor de periode 2001-2021.

Voor onze analyse hebben we voor de periode 2001-2021 dagwaarden nodig van neerslag, referentiegewasverdamping volgens Makkink en gemiddelde dagtemperatuur. De meteorologische stations die zulke lange reeksen hebben en die we representatief achten voor het beregeningsgebied zijn: Markenese, Lelystad, Hogeveen, Heino, Hupsel, Volkel, Gilze-Rijen, Eindhoven, Arcen en Ell (Afbeelding 1). Uit deze 10 stations berekenen we gebiedsgemiddelde dagwaarden om daar de droogtematen van af te leiden.

Detectie haspels en sproeiers

Op basis van een remote sensing algoritme (AquaNet van StellaSpark) zijn voor 2018 automatisch haspels en actieve sproei-installaties gedetecteerd. Daarbij is gebruikgemaakt van composietbeelden van het Netherlands Space Office. Zo'n beeld is samengesteld uit satellietfoto's met hoge resolutie die op afzonderlijke momenten zijn gemaakt. De composietbeelden waren er voor drie perioden in 2018: 1 mei t/m 31 mei, 1 juni t/m 15 juli en 16 juli t/m 31 augustus.

De maanden april en september ontbreken, respectievelijk de start en het einde van het irrigatie seizoen. Daarnaast kunnen sproei-installaties gemist zijn door bewolking of doordat ze niet aanstonden. Kortom, het aantal zichtbare en gedetecteerde sproeiers is minimaal.

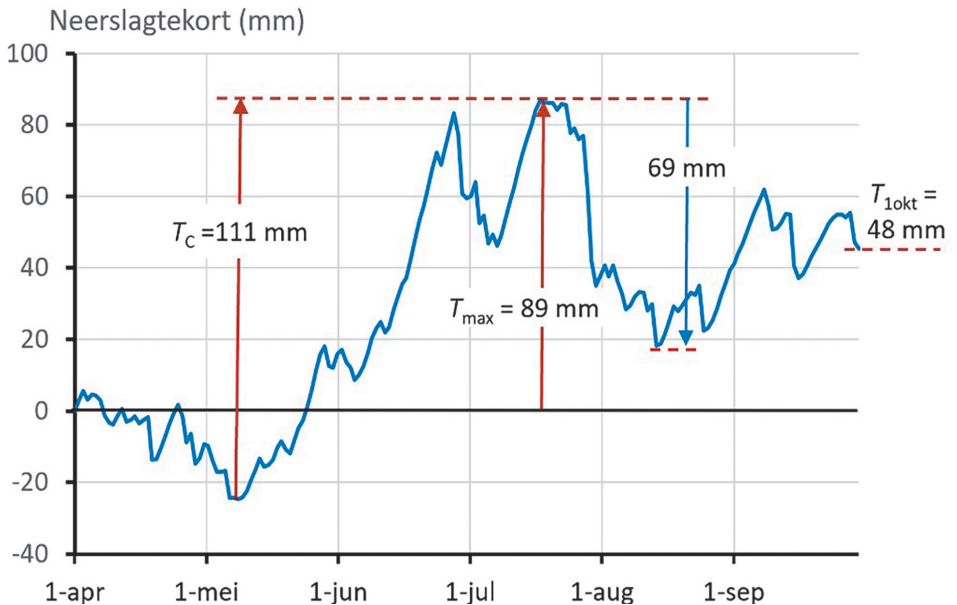
Voor meer informatie, zie Terink e.a. (2023).

Droogtematen

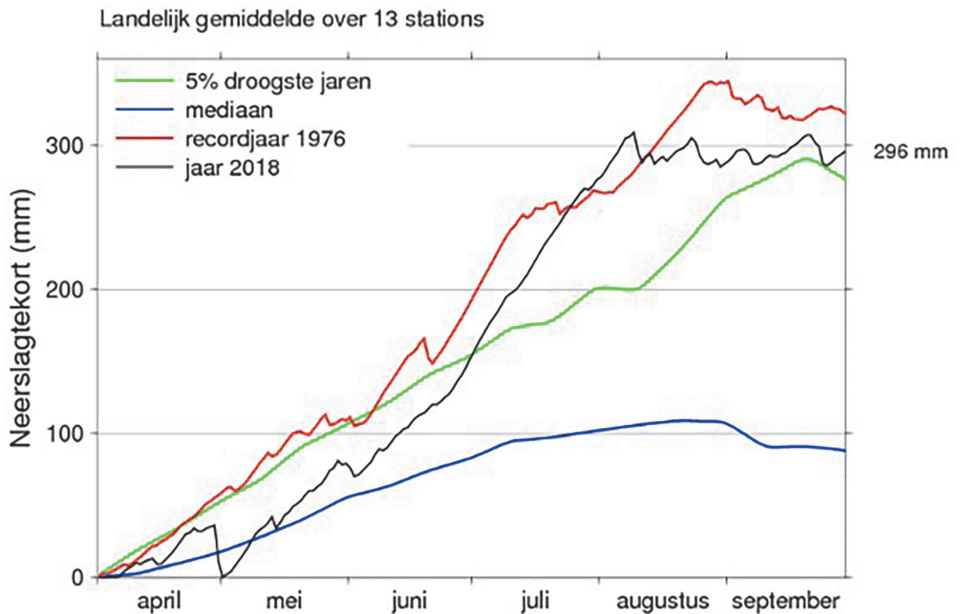
De eerste droogtemaat die we analyseren is het doorlopend potentieel neerslagtekort over het groeiseizoen (1 april tot en met 30 september), dus het tekort bij de start van de dag 1 oktober. Deze waarde, $T_{1\text{okt}}$, is het verschil over het groeiseizoen van de referentiegewasverdamping volgens Makkink en de neerslag (Afbeelding 2). $T_{1\text{okt}}$ werd vroeger, en nu soms nog steeds, gezien als een goede droogtemaat. Bovendien presenteert het KNMI in haar grafieken van het tekort na ieder seizoen ook deze variabele (Afbeelding 3), wat in ieder geval de suggestie wekt dat het een informatieve eindscore is voor de seizoendroogte.

De tweede maat, de maximale waarde van het doorlopend potentieel neerslagtekort T_{max} , gebruikt het KNMI ook op zijn website. Aanname is weer dat het groeiseizoen begint op 1 april en eindigt op 30 september (Afbeelding 2).

De derde maat, T_c (Afbeelding 2 en Afbeelding 4) is de grootste stijging van het doorlopend potentieel neerslagtekort die van 1 april tot en met 30 september gevonden kan worden. Anders dan bij de vorige methode doen negatieve waarden van het doorlopend potentieel neerslagtekort mee bij de berekening. T_c werd voor het eerst voorgesteld door Van Boheemen (1980) en later overgenomen door de voorloper van de huidige Technische Commissie Grondwaterbeheer, de Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven (CoGroWa, 1984) (vandaar het onderschrift C in T_c). CoGroWa (1984, p. 61) liet zien dat het berekende vochttekort in de bodem van een hangwaterprofiel beter correleert met



Afbeelding 2 Verloop van het doorlopend potentieel neerslagtekort in 2005 (gemiddelde over het beregeningsgebied) en daarvan afgeleid drie droogtematen: het doorlopend tekort op 1 oktober ($T_{10kt} = 48$ mm), het maximale tekort ($T_{max} = 89$ mm, bereikt op 18 juli) en de maximale stijging van het tekort sinds 1 april ($T_C = 111$ mm). De maximale daling van het tekort, een maat voor een natte periode in het groeiseizoen, bedraagt 69 mm.

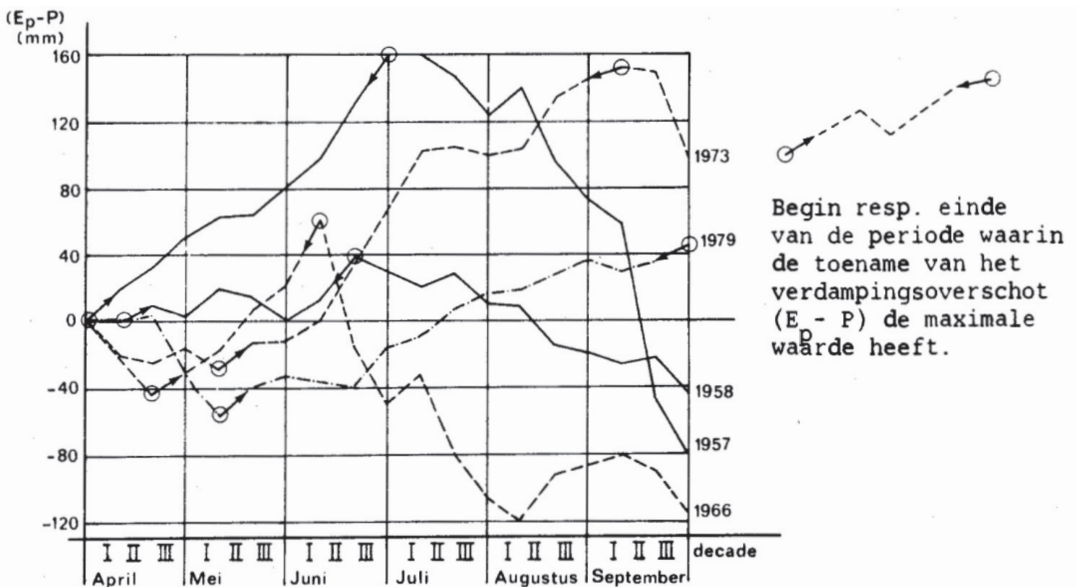


(c) KNMI, 2018-10-20

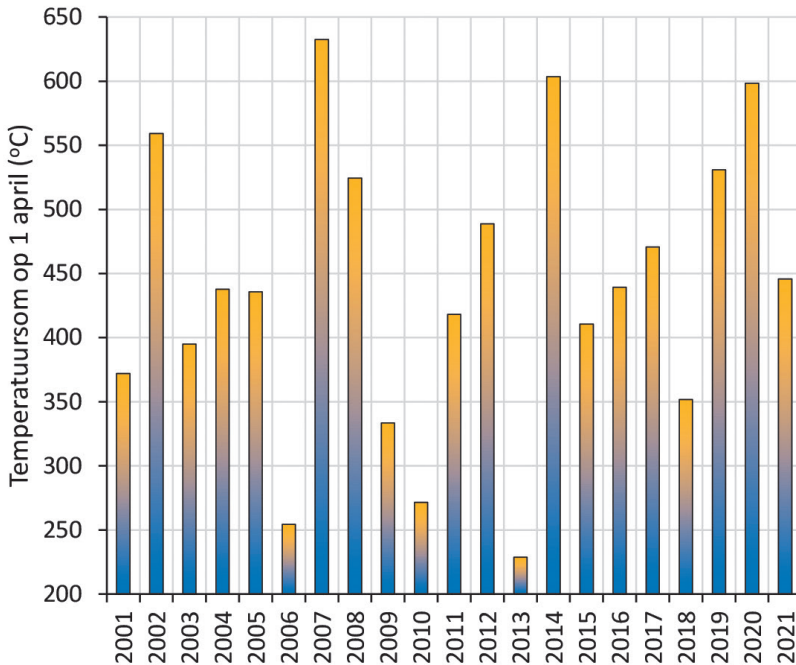
Afbeelding 3 Voorbeeld van een KNMI-grafiek van het doorlopend potentieel neerslagtekort. De waarde aan het eind van het veronderstelde groeiseizoen staat in de grafiek altijd vermeld (in dit geval: $T_{10kt} = 296$ mm).

T_C dan met $T_{10\text{okt}}$. Omdat het berekende vochttekort gebaseerd werd op dezelfde meteorologische gegevens als waarmee T_C en $T_{10\text{okt}}$ werden vastgesteld, kunnen we dit resultaat niet beschouwen als bewijs voor de superioriteit van deze droogtemaat.

De vierde maat gaat weer uit van de grootste stijging van het doorlopend potentieel neerslagtekort, alleen begint het groeiseizoen nu niet op 1 april, want in werkelijkheid kan het voorjaar, afhankelijk van de temperatuur, eerder of later starten. In de nieuwe maat laten we het groeiseizoen daarom starten bij het bereiken van een bepaalde temperatuursom. Deze som wordt berekend door alle dagtemperaturen boven nul vanaf 1 januari bij elkaar op te tellen. De temperatuursom wordt in de landbouw gebruikt om vast te stellen wanneer het zinvol is om mest uit te rijden en als maat voor de fenologische toestand van het gewas (De Gooijer en Jagtenberg, 1968; Willekens e.a., 1998). Het groeiseizoen in onze nieuwe maat, T_{C440} , begint op de dag dat een temperatuursom van 440 °C wordt bereikt. Deze grenswaarde hebben we berekend als gemiddelde temperatuursom op 1 april over de jaren 2001-2021 van alle 30 meteorologische stations in Nederland waarvan het KNMI volledige tijdreeksen (2001-2021) op zijn website beschikbaar heeft gesteld (Afbeelding 5). Op deze manier sluiten we aan bij de traditionele definitie van de start van het groeiseizoen (1 april voor heel Nederland), alleen verschuiven we de startdatum naar voren of naar achteren naarmate het voorjaar warmer dan wel kouder is. Zo'n flexibele definitie van het voorjaar is misschien wenselijk nu het klimaat aan een aanzienlijke verandering onderhevig is.



Afbeelding 4 Uit CoGroWa (1984), waarin de berekeningswijze van het doorlopend potentieel neerslagtekort T_C (=verdampingsoverschot, hier aangegeven met ' $Ep-P$ ') over de periode april tot en met september voor een vijftal jaren wordt uitgelegd.



Afbeelding 5 Gemiddelde temperatuursom op 1 april voor de periode 2001-2021, berekend uit waarnemingen op 30 meteorologische stations, verdeeld over Nederland (Afbeelding 1). Het gemiddelde over deze jaren en stations bedraagt 440 oC.

Statistische analyse

De relatie van iedere droogtemaat T met de beregeningsgift B hebben we onderzocht met een lineaire, een exponentiële en een kwadratische functie, alle drie met en zonder snijpunt. Hieruit bleek dat de lineaire functie niet voldoet, het snijpunt de resultaten verbetert en de kwadratische en exponentiële functie nagenoeg gelijk presteren. We hebben de kwadratische functie ($B = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$) gekozen omdat die lineair is in de coëfficiënten en dus makkelijk met de kleinste kwadratenmethode kan worden gefit. Als maat voor de gefitte samenhang tussen droogtemaat en gewasopbrengst gebruiken we de verklaarde variantie (R^2) en als maat voor de afwijking van de gewasopbrengst en de gefitte functie de 'root mean square error' (RMSE). Beide kengetallen zijn functies van de variantie van de residuen.

Op basis van hun verklaarde varianties vergelijken we de droogtematen. Of verschillen tussen droogtematen vervolgens ook significant zijn, beoordelen we aan de hand van de varianties van de residuen. Dat doen we met een eenvoudige permutatietest: een test waarin droogtecijfers willekeurig, met teruglegging, worden herschikt over de jaren. We voeren de test echter streng uit, namelijk door bij iedere permutatie 6 willekeurig geselecteerde jaren (van de 21) ongemoeid te laten, zodat het effect van uitschieters wordt onderdrukt. Die wegen door het kwadratische karakter van een variantie namelijk zwaar mee in de kleinste kwadratenmethode en zouden daardoor de significantie van de verschillen kunnen beïnvloeden. De procedure wordt 5000 maal herhaald, zodat

een stabiele kansverdeling van de berekende residuvarianties ontstaat. Met die kansverdelingen wordt vervolgens berekend wat de kans p is dat de gemiddelde varianties van twee droogtematen van elkaar verschillen. Bij $p < 0,05$ beschouwen we het verschil als significant en is de ene droogtemaat sterker gerelateerd aan de beregeningsgift dan de andere.

Resultaten

Tabel 2 toont de berekende vier droogtematen. Ongeacht de droogtematen zijn de jaren 2018, 2019 en 2020 het droogst, gevolgd door 2003 en 2009. De vroegste start van het groeiseizoen is 9 maart (2007) en de laatste start is 26 april (2013).

De vier maten zijn sterk gecorreleerd, zowel gemeten met Pearson correlatie als met Spearman rangcorrelatie (Tabel 3). De correlatie van T_{10kt} met de andere drie maten is het laagst. Dat vooral T_{max} , T_C en T_{C440} sterk samenhangen is logisch omdat die worden bepaald door het maximale doorlopend neerslagtekort in het groeiseizoen en ze alleen van elkaar verschillen in de ondergrens vanaf waar de droogtemaat wordt berekend.

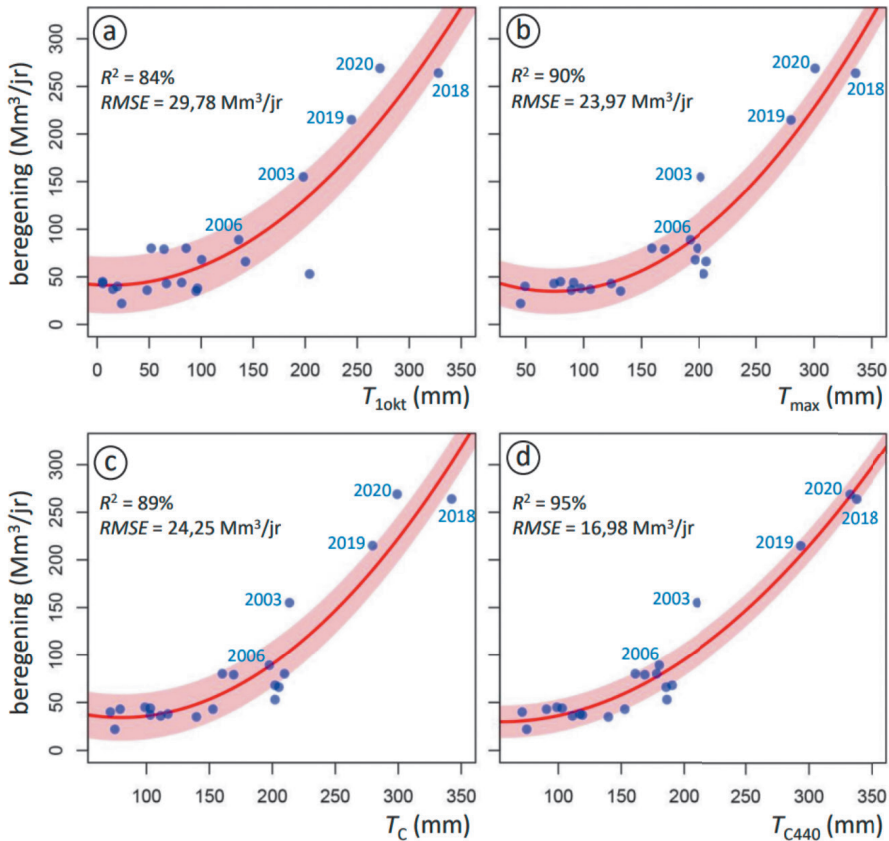
Afbeelding 6 geeft het verband tussen de vier droogtematen en de toegediende beregeningshoeveelheid in 2001-2021, met vermelding van de vijf jaren met de hoogste giften. Statistieken die de kwaliteit van de relatie beschrijven (R^2 en $RMSE$) staan in de figuur vermeld. Alle regressielijnen zijn significant ($p < 0,05$), wat aangeeft dat ze gebruikt kunnen worden om de relaties te beschrijven. Op basis van de verklaarde variantie presteert T_{10kt} het slechtst, zijn T_{max} en T_C ongeveer gelijkwaardig en beschrijft T_{C440} de beregening het beste. Het verschil tussen T_{max} en T_{10kt} is echter niet significant ($p = 0,09$), het verschil tussen T_C en T_{10kt} evenmin ($p = 0,13$). T_{C440} scoort daarentegen significant beter dan de andere drie maten ($p = 0,00, 0,03$ en $0,01$ voor respectievelijk T_{10kt} , T_{max} en T_C).

Tabel 2. Vier droogtematen voor het beregeningsgebied en de datums waarop de temperatuursom van 440 oC en het maximale doorlopende tekort werden bereikt.

	droogtemaat (mm)				datum		droogtemaat (mm)				datum		
	T_{10kt}	T_{max}	T_C	T_{C440}	440	max	T_{10kt}	T_{max}	T_C	T_{C440}	440	max	
2001	5	124	153	153	7-apr	1-aug	2012	24	46	75	75	26-mrt	10-sep
2002	67	74	79	91	17-mrt	30-jun	2013	143	207	205	186	26-apr	6-sep
2003	198	202	214	211	12-apr	27-sep	2014	20	49	71	71	14-mrt	4-jul
2004	5	80	99	99	2-apr	17-jun	2015	101	196	202	190	9-apr	13-aug
2005	48	89	111	111	2-apr	18-jul	2016	96	97	117	117	3-apr	28-sep
2006	136	192	198	180	25-apr	29-jul	2017	86	159	160	161	30-mrt	27-jun
2007	15	106	103	119	9-mrt	6-mei	2018	328	336	342	338	9-apr	20-sep
2008	95	132	140	140	16-mrt	6-jul	2019	244	280	280	294	22-mrt	22-sep
2009	204	205	202	186	11-apr	28-sep	2020	272	301	299	333	10-mrt	22-sep
2010	52	199	210	178	20-apr	25-jul	2021	81	91	103	103	31-mrt	26-sep
2011	64	170	169	169	2-apr	11-jul							

T_{10kt}	81	80	81
89	T_{max}	98	98
88	99	T_c	97
90	98	98	T_{C440}

Tabel 3. Correlatie (%) tussen droogtematen; boven Spearman Rs (blauw), onder Pearson R (rood).



Afbeelding 6 Relatie tussen vier droogtematen en beregeningshoeveelheid.

Discussie

Kanttekeningen bij de analyse

In de berekening van de maximale toename van het doorlopend potentieel neerslagtekort (T_c en T_{C440}) worden negatieve waarden van dat tekort meegerekend. Natte perioden met een doorlopend potentieel neerslagoverschot tellen dus mee (Afbeelding 4). Door Van Boheemen (1980) is deze keuze niet beargumenteerd. In CoGroWa (1984, p.60) is de argumentatie dat neerslagoverschotten aan het begin en/of aan het einde van het groeiseizoen "geen invloed [hebben] op de grootte van de eventuele vochttekorten". We menen dat dit enige toelichting behoeft. Stel dat het groeiseizoen begint met regenbuien. De bodem is dan op veldcapaciteit en het neerslagoverschot zal weliswaar ten goede komen aan de grondwateraanvulling, maar niets bijdragen aan de vergroting van de beschikbare hoeveelheid bodemvocht. Die hoeveelheid begint pas te slinken zodra de verdamping de neerslag overtreft. En veel neerslag aan het

eind van het groeiseizoen, resulterend in een daling van het doorlopend potentieel neerslagoverschot, zal ervoor zorgen dat de dan bereikte hoogste waarde van het tekort (dus T_{\max}) niet meer overtroffen kan worden. Terecht dus dat Co-GroWa (1984) perioden met een doorlopend potentieel neerslagoverschot aan het begin of eind van het groeiseizoen niet uitsluit van de berekening.

Er zit een fysische logica achter het sterk stijgende verband tussen droogtemaat en beregeningsgift: een kleine meteorologische droogte kan goed worden opgevangen door het vochtleverend vermogen van de bodem. Pas boven een pF van ca. 3,0 gaat het gewas last krijgen van de droogte en die droogtestress neemt exponentieel toe met afnemend vochtgehalte.

In de afgelopen jaren is de mogelijkheid om het land te beregenen toegenomen doordat agrariërs, geconfronteerd met de droogte, beregeningsinstallaties hebben aangeschaft (Van der Boon, 2020). Doordat de toename in beregeningscapaciteit samenvalt met de toegenomen droogte hebben wij de variabele 'jaar' niet kunnen onderscheiden als extra verklarende factor voor de hoeveelheid beregening. Het anticiperend boerenverstand is mogelijk wel een verklaring voor het feit dat de beregeningsgift in 2018 lager was dan op basis van de regressielijnen kan worden verwacht, en in 2019 en 2020 juist hoger (Afbeelding 6). Met andere woorden: de droogte van 2018 was aanleiding om beregeningsinstallaties aan te schaffen, zodat in de twee jaar daarna meer dan voorheen kon worden beregend.

We hebben nog onderzocht of de relaties tussen droogtematen en beregeningshoeveelheid verbeteren door ook rekening te houden met natte perioden binnen het groeiseizoen. In die perioden neemt immers de beregeningsbehoefte af doordat de bodemvochtvoorraad wordt aangevuld. Tevens kan dan natschade aan het gewas optreden. De intensiteit van natte perioden berekenden we als de maximale daling van de droogtemaat in het groeiseizoen (Afbeelding 2). Deze maximale daling blijkt geen toegevoegde waarde te bieden in het verklaren van de beregeningsgift.

De resultaten van onze analyse hangen af van de selectie van meteorologische stations. Daarvoor gebruikten we 10 stations die voorkomen in het gebied waar het meest wordt beregend, ca. de helft van Nederland (Afbeelding 1). Andere selecties blijken echter niet te leiden tot wezenlijk andere uitkomsten: het is telkens T_{C440} die beter presteert dan T_C en T_{\max} en die weer beter dan $T_{1\text{okt}}$. Als we bijvoorbeeld de analyse overdoen met gemiddelde waarden van alle 30 meteorologische stations waarvan complete meetreeksen (2001-2021) bestaan, dan worden de statistieken weliswaar minder, maar blijven de verschillen tussen de maten overeind. De verklaarde varianties van $T_{1\text{okt}}$, T_{\max} , T_C en T_{C440} worden dan $R^2 = 72, 87, 85$ en 95% (in plaats van $84, 90, 89$ en 95%).

Welke droogtemaat verdient de voorkeur?

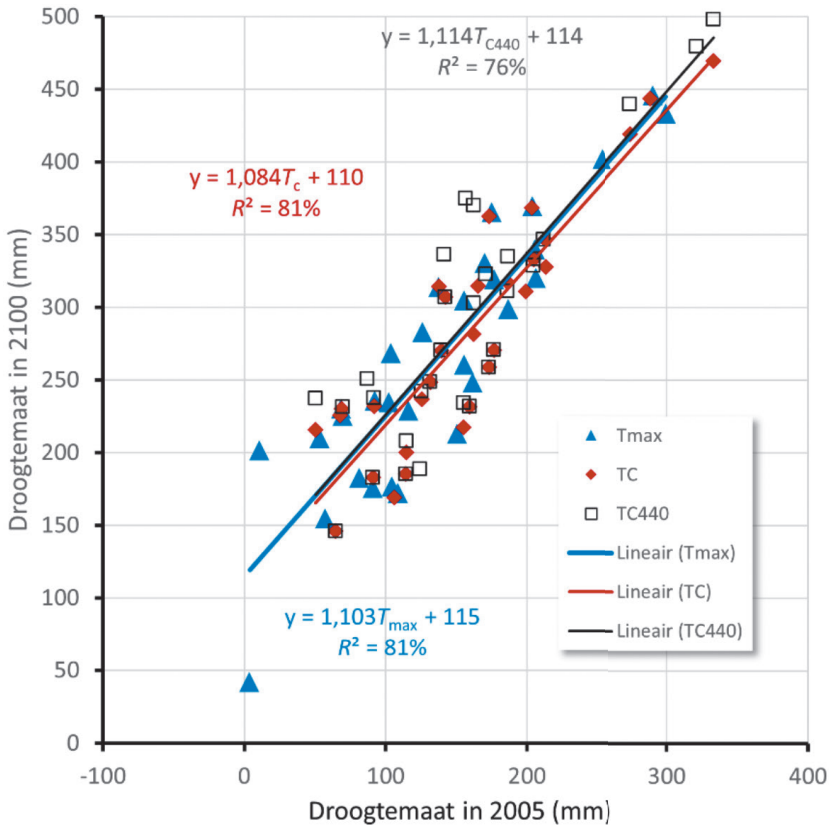
Op basis van de relaties met de beregeningsgift en met het oog op klimaatverandering is het wenselijk om de maximale toename van het doorlopend potentieel neerslagtekort met een temperatuursomafhankelijke start van het

groeiseizoen (T_{C440}) te gebruiken als meteorologische droogtemaat. Om de keuze tussen de drie beste methoden verder te kunnen onderbouwen ($T_{1\text{okt}}$ laten we wegens ondermaatse prestaties verder buiten beschouwing), berekenen we voor weerstation De Bilt de droogtematen onder het huidige klimaat en onder het scenario 'Hoge uitstoot, droog' (Hd) voor het zichtjaar 2100. Daarvoor gebruiken we de door het KNMI verstrekte meetreeksen (<https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/>) voor de jaren 1991-2020 (huidige klimaat, hierna aangeduid als '2005'), en de naar 2050 getransformeerde meetreeksen van deze jaren (KNMI '23 scenario's). Voor de 2100-reeksen geeft het KNMI geen referentiegewasverdamming, zodat we deze grootheid zelf berekenen uit de getransformeerde kortgolvlige inkomende straling en luchttemperatuur.

Uit onze analyse blijkt dat een temperatuursom van 440 °C in 2100 in De Bilt 19 tot 43 dagen eerder zal worden bereikt, met een gemiddelde van 28 dagen. Geen enkel groeiseizoen begint bij het klimaat van 2100 meer in april (23 maart is de laatste datum) en in 13 van de 30 jaren valt de start in februari, met als vroegste datum 15 februari. De dag waarop het doorlopend potentieel neerslagtekort maximaal is, valt 0 tot 122 dagen later, gemiddeld 37 dagen. In 3 van de 30 jaar valt dat tekort in het klimaat van 2100 na 30 september, wat een reden is om in de berekening van T_{C440} het groeiseizoen te verlengen tot 1 december. De dag waarop het doorlopend potentieel neerslagtekort maximaal is, valt dan nog steeds 0 tot 122 dagen later, maar nu gemiddeld 39 dagen; de laatste datum is dan 26 oktober.

Het toekomstige klimaat en de daarmee samenhangende verlenging van het groeiseizoen heeft grote consequenties voor de meteorologische droogtematen: T_{max} stijgt onder het droge scenario Hd in De Bilt gemiddeld met 94%, T_C met 79% en T_{C440} met 84%. De verandering van de drie maten met toenemende droogte gaat heel gelijk op, zie Afbeelding 7: ongeacht de droogtegraad van het jaar zal de droogte in 2100 met ca. 115 mm plus 10% zijn toegenomen, gemiddeld 125 mm, de hoeveelheid van vijf beregeningsgiften. En droger dan 2018 komt in 2100 eens in de drie á vier jaar voor. Aangezien de verbanden tussen beregening en de drie maten grotendeels overeenkomen (Afbeelding 6b, 6c, 6d), zijn de gevolgen van deze extra watervraag vergelijkbaar: het lijkt daarvoor weinig uit te maken welke maat we kiezen.

Om inhoudelijke redenen verdient T_{C440} echter de voorkeur. Ten eerste presteert deze maat significant beter dan de andere door ons onderzochte maten. Ten tweede is deze maat fysisch beter te begrijpen, met een start van het voorjaar die afhangt van de temperatuursom. En ten derde zou een voordeel kunnen zijn dat T_{C440} meer variatie in droogte tussen de jaren weergeeft, zichtbaar in Afbeelding 7 in de uitschieters naar boven en de lagere verklaarde variantie. Of de keuze voor T_{C440} werkelijk de beste is, zou definitief vastgesteld kunnen worden aan de hand van meetgegevens van variabelen die niet door het waterbeheer worden beïnvloed. Denk aan opbrengstcijfers van niet beregende grondwateronafhankelijke percelen.



Afbeelding 7 Verandering in drie droogtematen (T_{\max} , T_c en T_{C440}) in 2100 ten opzichte van 2005. Gebaseerd op getransformeerde meetreeksen van 1990-2020 van weerstation De Bilt. Iedere markering correspondeert met een bepaald jaar.

Conclusies

1. Voor zover we weten is dit de eerste studie waarin maten voor meteorologische droogte zijn gevalideerd aan meetgegevens.
2. Het doorlopend potentieel neerslagtekort op 1 oktober, $T_{1\text{okt}}$, is in ons onderzoek de minst geschikte maat gebleken om de meteorologische droogtegraad van jaren te karakteriseren.
3. In onze studie vertoonde de maat van Van Boheemen (1980) en CoGroWa (1984), te weten de maximale stijging van het doorlopend potentieel neerslagtekort in een groeiseizoen van 1 april tot 1 oktober, T_c , geen meerwaarde ten opzichte van de veel eenvoudigere maat die het KNMI gebruikt: het maximum van het doorlopend potentieel neerslagtekort in het groeiseizoen, T_{\max} .
4. Om verwarring te voorkomen en informatie te verschaffen over de actuele meteorologische droogte, zou het KNMI er goed aan doen iedere dag in het groeiseizoen de dan geldende waarde voor T_{\max} te presenteren in haar grafieken van het doorlopend potentieel neerslagtekort.
5. Op grond van onze studie zijn er echter voldoende redenen om de voorkeur aan T_{C440} te geven: de maximale stijging van het doorlopend potentieel neerslagtekort.

slagtekort, waarbij de start van het groeiseizoen begint na het bereiken van een temperatuursom van 440 °C. Een nadeel is dat deze maat wat minder eenvoudig te begrijpen is, maar er zijn ook voordelen aan verbonden:

- a. T_{C440} vertoonde in onze studie de beste relatie met berekeningsgiften, waarbij de verschillen met de andere maten significant waren.
- b. De maat is klimaatbestendig, met een groeiseizoen dat bijvoorbeeld in 2100 ca. een maand eerder begint dan nu (om vast te blijven houden aan 1 april als begin van het groeiseizoen valt moeilijk te verdedigen).
- c. T_{C440} laat iets meer dan de andere maten de droogteverschillen tussen de jaren zien.

Dankwoord

Wij danken Dion van Deijl en Wilco Teerink van KnowH2O voor hun bijdragen aan dit artikel.

Literatuur

- Anonymous** (2020) Terugblik op de droogte van 2020. Natuurmonumenten, LandschappenNL, Wereld Natuur Fonds.
- Asseldonk, M. van, R. Stokkers, J. Jager en R. van der Meer** (2021) Economische schade landbouw als gevolg van droogte in 2018 en 2019. WUR, Wageningen Economic Research.
- Boheemen, P.J.M. van** (1980) Seizoen- en piekbehoefte aan kunstmatige watervoorziening bij gras-, aardappelen en tuinbouwgewassen. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- Boon, V. van der** (2020) Droogte? Sla een eigen grondwaterbron. In *Het Financieële Dagblad*, 2 juni 2020, pag 18-19.
- CoGroWa** (1984) Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking. Commissie Grondwaterwet waterleidingbedrijven – werkgroep Landbouwkundige aspecten.
- Eertwegh, G.A.P.H. van den, P. de Louw, J.P.M. Witte, M. van Huijgevoort, R. Bartholomeus, D. van Deijl, J.C. van Dam, J. Hunink, I. America, J. Pouwels, P. Hoefsloot en J. de Wit** (2021) Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen. Eindrapport Projectteam Droogte Zandgronden Nederland. KnowH2O, KWR, Deltares, WUR, HSS, FWE.
- Eertwegh, G.A.P.H. van den, J.P.M. Witte en P. de Louw** (2022) Droogte in de zandgebieden van Hoog-Nederland. Wie is er na de droogte van 2018 aan zet?; in: *Water Governance*, vol 2022, no 1, pag 54-57.
- Gooijer, H. de en J.D. Jagtenberg** (1968) De temperatuursom als criterium voor de datum van stikstof strooien op grasland in het voorjaar. Proefstation voor de akker-en weidebouw.
- Hurk, B. van den, A. Klein Tankink, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger en S. Drijfhout** (2006) KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands; KNMI, De Bilt.
- Hurk, B., van den, P. Siegmund en A.K. Tank** (2014) KNMI'14: Climate Change Scenarios for the 21st Century-a Netherlands Perspective; KNMI.
- KNMI** (2023) KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland.

Loon, A.F. van (2015) Hydrological drought explained; in: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol 2, no 4, pag 359-392.

Louw, P.G.B. de, J.P.M. Witte, G.A.P.H. van den Eertwegh, R.P. Bartholomeus, J. Pouwels en J.C. Hunink (2022) Beter bestand tegen droogte: oplossingsrichtingen voor een hydrologisch goed functionerend grondwatersysteem in de zandgebieden van Nederland; in: *Stromingen*, vol 28, no 1, pag 3-21.

Meer, R.W. van der (2023) Watergebruik in de land- en tuinbouw, 2021. Berekeningen op basis van het Bedrijveninformatienet. Wageningen Economic Research.

Terink, W., D. van Deijl, G. van den Eertwegh, S. Wonink en J. Brombacher (2023) Een nieuwe kaart van potentieel beregende percelen in 2018 voor toepassing binnen het NHI. Combinatie van bestaande informatie en kennis ter realisatie van een nieuwe en gevalideerde kaart. KnowH2O & eLeaf.

Vicente-Serrano, S.M., S. Beguería en J.I. López-Moreno (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index; in: *Journal of climate*, vol 23, no 7, pag 1696-1718.

Willekens, A., J. van Orshoven en J. Feyen (1998) Estimation of the phenological calendar, Kc-curve and temperature sums for cereals, sugar beet, potato, sunflower and rapeseed across Pan Europe, Turkey, and the Maghreb countries by means of transfer procedures; in: *Contract*, vol no 13118-97, pag 07.

Wit, C.T. de (1958) Transpiration and crop yields; Pudoc, Wageningen.

Witte, J.P.M. (2021) Gevolgen van de droogte van 2018 voor de vegetatie van natuurgebieden op de Hogere Zandgronden van Nederland, afgeleid van het Landelijk Meetnet Flora. FWE.

Witte, J.P.M., D. van Deijl en G.A.P.H. van den Eertwegh (2020) Gevolgen voor de natuur van de droge jaren 2018 en 2019; resultaten van een enquête onder deskundigen. Deelrapport van het project: Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. FWE & KnowH2O.

Wolters, D., C. Homan en J. Bessembinder (2011) Ruimtelijke klimatologische verschillen binnen Nederland. Koninklijk Nederlands meteorologisch instituut.

Summary Meteorological Drought Measures Derived from Irrigation Doses

Land use and water management in rural areas must be organized differently, that is the widely supported conclusion after the Netherlands was confronted with the extremely dry year of 2018 and subsequently with the very dry years that followed. The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) uses, among other things, the precipitation deficit during the growing season as a measure of meteorological dry spells. In this article, we examined other measures of meteorological drought. We did this by comparing different drought measures with a variable that responds to meteorological drought: the amount of irrigation in agriculture. When the start of the growing season is defined based on reaching a temperature sum of 440 °C, the maximum increase in the potential cumulative precipitation deficit appears to be the best predictor of irrigation doses. Under the KNMI scenario 'High emissions, dry' (Hd), the growing season will start one month earlier in 2100 and this deficit will have increased by approximately 125 mm, the amount of five irrigation doses.

Auteurs

JAN-PHILIP. M. (FLIP) WITTE
Flip Witte Ecohydrologie
flip.witte@ecohydrologie.nl

JELMER NIJP
KWR Watercycle Research Institute
jelmer.nijp@kwrwater.nl

PAUL J.J.F. TORFS
pjff.torfs@gmail.com

GÉ A.H.P. VAN DEN EERTWEGH
KnowH2O
eertwegh@knowH2O.nl

