

Hydrologische droogte in Nederland: van simulaties naar projecties met behulp van datagedreven methoden

SANDRA M. HAUSWIRTH, VINCENT BEIJK, MARC F. P. BIERKENS EN NIKO WANDERS

Artikel

Dit artikel bevat een uitgebreide samenvatting van het proefschrift 'Hydrological Droughts in the Netherlands: from Simulations to Projections'. Dit proefschrift kwam tot stand in een samenwerking tussen de Universiteit Utrecht en Rijkswaterstaat en werd geïnspireerd door de uitdagingen waarmee het waterbeheer in Nederland te maken krijgt tijdens de steeds vaker voorkomende perioden van droogte. In het proefschrift wordt gekeken of machine learning-technieken geschikt zijn voor het simuleren, voorspellen en projecteren van hydrologische droogten, en het kwantificeren van de effecten van waterbeheer op de mogelijke schade als gevolg van droogte. Door praktische inzichten te combineren met recente wetenschappelijke ontwikkelingen op het gebied van machine learning, wordt getoetst in hoeverre hybride modelbenaderingen gebruikt kunnen worden voor het waterbeheer in Nederland. Dit proefschrift laat bijvoorbeeld zien dat we nog veel kunnen winnen als we machine learning-technieken meer gaan toepassen in het operationele waterbeheer. De uitkomsten van dit onderzoek zijn ondertussen deels opgenomen in het operationele voorspellingssysteem van Rijkswaterstaat.

Het volledige proefschrift is beschikbaar onder: Hauswirth S. (2024), Hydrological Droughts in the Netherlands: from Simulations to Projections, Utrecht Studies in Earth Sciences, volume 305, <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/437427>

Inleiding

Droogte in Europa komt steeds vaker voor en kan door zijn langdurige en grootschalige karakter een grote impact hebben op de samenleving, zoals is gebleken uit de recente droogten van 2003, 2015, 2018 en 2022 (Stahl e.a., 2016; Blauhut e.a., 2022; Rakovec e.a., 2022; Tripathy en Mishra, 2023). De economische schade door droogte in verschillende sectoren bedraagt momenteel 9 miljard euro per jaar voor de EU en het VK, maar deze schade zal in de toekomst naar verwachting toenemen tot 12,2 miljard euro, mede als gevolg van de klimaatverandering (Cammalleri e.a., 2020; European Commission. Joint Research, 2020; Naumann e.a., 2021).

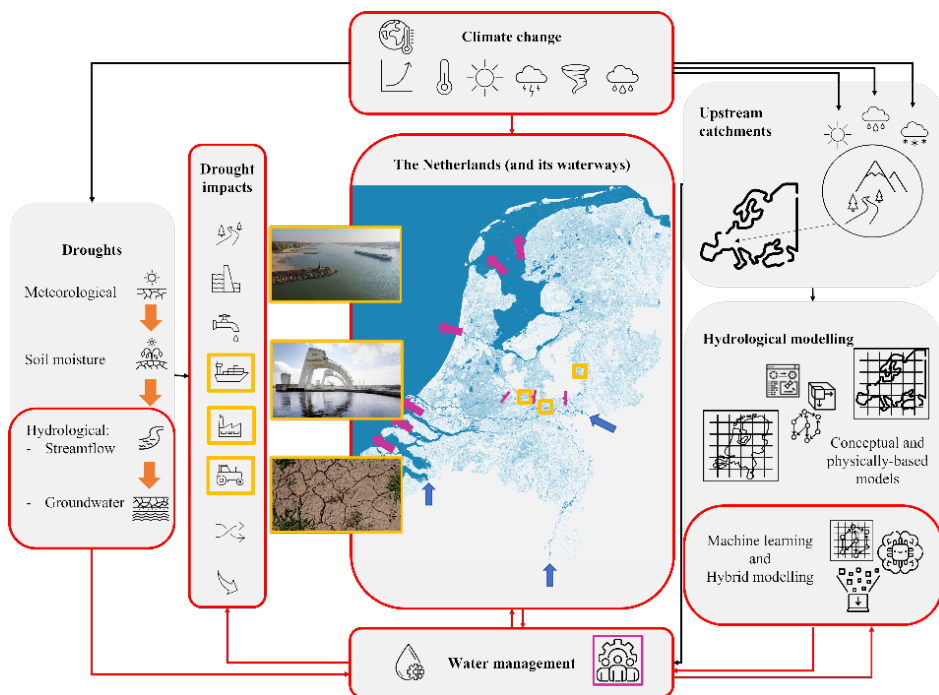
De afgelopen extreme droogtejaren hebben laten zien dat droogte en de gevolgen ervan grote uitdagingen kunnen vormen voor het waterbeheer, zelfs in regio's die gewoonlijk bekendstaan om hun waterbeschikbaarheid en gewoonlijk weinig last hebben van langdurige droogte. Een goed voorbeeld hiervan is Nederland, een land dat bekendstaat om zijn overvloed aan water en geavanceer-

de waterbeheer. Dit waterbeheer is met name ontworpen om schade en overlast door een teveel aan water te voorkomen. De afgelopen extreme droogte toonde aan dat het bestaande beheerssysteem verre van optimaal is voor waterbeheer tijdens droogte (Bartholomeus e.a., 2023). Met het oog op een toekomst met meer droogte (KNMI, 2021, 2023; van der Wiel e.a., 2024) wordt het duidelijk dat een verschuiving in het waterbeheer en een betere voorbereiding op droogte in de toekomst noodzakelijk is. Omdat droogten weken tot maanden kunnen duren, in tegenstelling tot overstromingen, zijn er voorzorgsmaatregelen nodig die vroegtijdig genomen kunnen worden op basis van langetermijnverwachtingen om zo de gevolgen van droogte te beperken. De effecten van droogte in Nederland zijn te zien in de scheepvaart, landbouw, industrie, energieproductie, drinkwaterwinning, dijkveiligheid, zoutwaterindringing, bodemdaling, natuur en biodiversiteit. Maatregelen in het waterbeheer om droogteschade te beperken volgen tijdens droogteperioden gewoonlijk de verdringingsreeks. De verdringingsreeks zorgt ervoor dat de meest kwetsbare sectoren het langst gespaard blijven. Idealiter zouden de meeste preventieve maatregelen echter zo vroeg mogelijk in het seizoen genomen moeten worden, wanneer ze het meest effectief zijn. Denk hierbij aan het vergroten van de wateropslag in het IJsselmeer. De toenemende frequentie en intensiteit van extreme droogte als gevolg van klimaatverandering benadrukt de noodzaak om beter te begrijpen waar de zwakke punten in het huidige watersysteem zitten en welke maatregelen kunnen worden genomen om de gevolgen van droogte in het hele land te beperken. De belangrijkste uitdaging is om beter voorbereid te zijn op toekomstige droogte met behulp van verbeterde modellering, voorspellingen, klimaatprojecties en adaptieve waterbeheersmaatregelen.

Doel

In dit proefschrift, dat is ontstaan uit een samenwerking tussen de Universiteit Utrecht en Rijkswaterstaat, is gewerkt aan de uitdagingen voor het huidige waterbeheer tijdens droogte in Nederland. Daarbij is onderzocht wat de meerwaarde is van datagedreven en hybride technieken voor de simulatie, seizoensvoorspelling en klimaatprojecties van hydrologische droogte en het mogelijke positieve effect van het gebruik daarvan op de effectiviteit van beheersmaatregelen (Afbeelding 1).

De belangrijkste uitdagingen hierbij waren om de modellen zo efficiënt en flexibel mogelijk te maken, zodat ze meerdere hydrologische variabelen kunnen simuleren en getraind kunnen worden met lokale informatie. Vervolgens werden de modellen getest om te kijken in hoeverre ze kunnen helpen om beter voorbereid te zijn op toekomstige droogte en de mogelijke positieve gevolgen van proactief waterbeheer te kwantificeren. Het eindresultaat is een modelsysteem dat extra informatie verschaft voor beter onderbouwde besluitvorming tijdens toekomstige droogtesituaties.



Afbeelding 1 Overzicht van onderwerpen, belangrijkste uitdagingen en hun verbanden die in het proefschrift aan de orde komen (rood). Verschillende aspecten en verbanden zijn onderzocht: simulatie, seizoensvoorspelling en projectie van hydrologische droogten met behulp van datagestuurde en hybride methoden, evenals verkenning van mogelijkheden om met proactief waterbeheer een aantal gevolgen van droogte in Nederland te verzachten.

Ontwikkelde methodes en resultaten

Machine learning-framework

In een eerste stap werden verschillende machine learning-modellen getest op hun nauwkeurigheid bij het simuleren van diverse hydrologische variabelen voor verschillende locaties in Nederland (Hauswirth e.a., 2021). Alle technieken zijn gebaseerd op een simpele modelopzet en met minimale invoergegevens: de afvoeren van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Eijsden, neerslag en temperatuur van De Bilt en waterstanden van de Noordzee bij Hoek van Holland. Deze beperkte invoer is gekozen om deze methoden later relatief makkelijk om te kunnen zetten naar een operationeel systeem voor droogtevoorspelling. Hydrologische variabelen zoals rivierafvoer, waterdiepte, watertemperaturen, en grondwaterstanden zijn gesimuleerd en vergeleken met beschikbare metingen. De verschillende machine learning-modellen, waaronder eenvoudige multi-lineaire regressie, lasso regressie, decision trees, random forests en long short-term memory (LSTM) modellen, lieten over het algemeen goede resultaten zien voor deze hydrologische variabelen, waarbij er weinig verschillen zaten tussen de verschillende typen modellen. De nauwkeurigheid van de modellen was minder voor hydrologische extremen, zoals droogte, omdat er voor deze situaties

relatief weinig observaties beschikbaar zijn. Deze minder goede simulaties voor droogte konden deels verbeterd worden met extra informatie over het historische operationele waterbeheer. De toename in nauwkeurigheid was wel beperkt omdat een groot deel van die informatie al indirect in de historische metingen zit die gebruikt werden om de modellen te trainen. Desalniettemin is de nauwkeurigheid van de geteste datagedreven modellen veelbelovend genoeg om toegepast te kunnen worden in seizoensvoorspellingen ten behoeve van het operationele waterbeheer.

Verkenning van proactief waterbeheer om de gevolgen van droogte te beperken

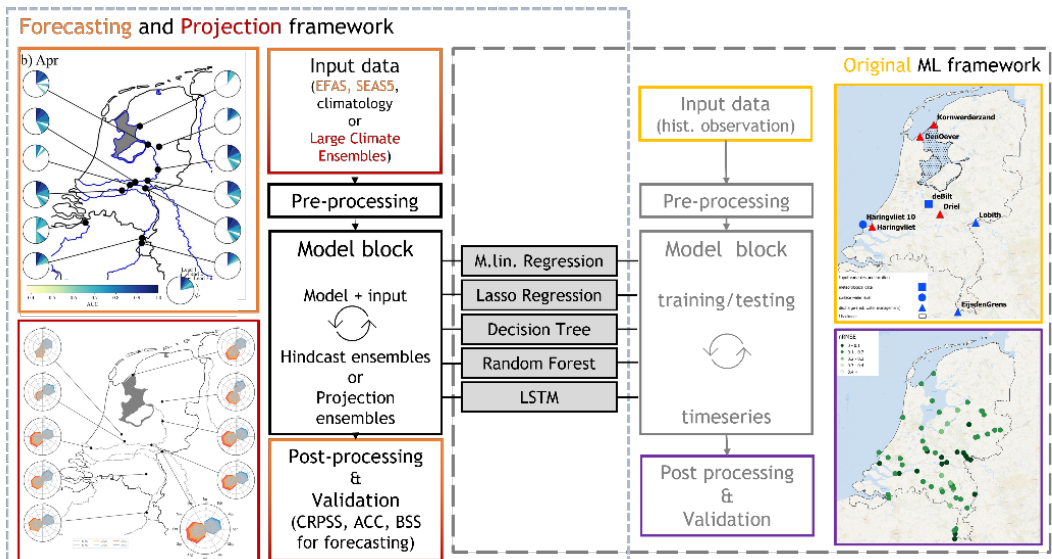
Om de potentie van proactief waterbeheer bij het beperken van de gevolgen van droogte te bestuderen, werd een modelexperiment ontworpen waarbij, voor het eerst in Nederland, technieken voor machine learning, waterbeheersmaatregelen en droogteschadefuncties zijn gecombineerd. De casus die hierbij werd beschouwd is het beheer van de stuw bij Driel, waarbij de gevolgen voor de scheepvaart (Waal en Lek), energievoorziening (Lek) en water voor de landbouw (IJssel naar het IJsselmeer) moeten worden afgewogen. Hoewel de noodzaak van deze informatie steeds duidelijker wordt door de extreme gebeurtenissen vanuit het verleden, vormde de beperkte (of gebrek aan) beschikbaarheid van gegevens over zowel het daadwerkelijk uitgevoerde beheer van de stuw bij Driel als de opgetreden droogteschade een enorme uitdaging. Voor de beheersopties van de stuw is er gekeken naar historische afvoeren benedenstrooms van Driel op basis van metingen. Wat de gevolgen van droogte betreft, is er gekeken naar drie grote rivieren en berekend hoe de gevolgen van droogte beperkt kunnen worden op basis van beschikbare informatie uit interne documenten van Rijkswaterstaat, zoals de geschatte afvoeren waarbij droogteschade optreedt voor verschillende riviervakken, die helpen om eenvoudige impactfuncties te maken, en de afvoersimulaties van het machine learning-model met onder andere de mogelijke scenario's voor waterbeheer. Deze studie heeft aangetoond dat er mogelijkheden zijn om de gevolgen van droogte te verminderen door middel van adaptief waterbeheer en door water anders te verdelen over de grote rivieren, aangezien de gebruikte scenario's iets andere beheersplannen omvatten dan de waargenomen plannen. Het voordeel van het gebruik van machine learning is de mogelijkheid tot snelle scenarioverkenning. Ook is gebleken dat er nog ruimte is voor verbetering als er meer informatie beschikbaar komt over het daadwerkelijke beheer van de stuw en de droogteschade die bij bepaalde beslissingen hoort. Daarbij blijft het de vraag of wijzigingen en aanpassingen in het waterbeheer voldoende zullen zijn om de uitdagingen van klimaatverandering de baas te kunnen blijven. Dit omdat de ernst van de droogte steeds vaker grenzen zal overschrijden waarbij bestaande maatregelen ineffectief zullen zijn om schade te voorkomen.

Hybride framework voor seizoensvoorspellingen en projecties

Om ook in de toekomst beter voorbereid te zijn op droogte is er gekeken naar middellange- en langetermijnsimulaties met behulp van seizoensvoorspellingen en projecties voor toekomstige klimaatverandering. Hiervoor werden de historische observaties in de modelopzet vervangen door seizoensvoorspellingen en

projecties uit een groot klimaatensemble. De machine learning-modellen, die oorspronkelijk waren getraind op historische waarnemingen, werden opnieuw gebruikt zonder nieuwe training van de modellen, deze keer met gegevens van grootschalige fysisch-gebaseerde hydrologische modellen, waardoor de modelopzet in een hybride model veranderde (Afbeelding 2).

Op het gebied van seizoensvoorspellingen is het model getest met behulp van historische seizoensvoorspellingen, die gevalideerd zijn met observaties (Hauswirth e.a., 2023a). Deze historische voorspellingen toonden aan dat de modellen hydrologische droogte één tot twee maanden vooruit kunnen voorspellen. De kwaliteit van de voorspellingen was het beste in het voorjaar wanneer de initiële hydrologische omstandigheden een belangrijke rol spelen. De datagedreven modellen leerden algemene afvoersignalen te onderscheiden, zoals de piek van de sneeuwmelt die met name wordt bepaald door de hoeveelheid sneeuw bovenstrooms. Een andere conclusie was dat dit hybride model het mogelijk maakte om seizoensvoorspellingen te maken met een vergelijkbare kwaliteit als de operationeel gebruikte fysieke voorspellingsmodellen. Dit terwijl de rekentijd en datavereiste van dit soort hybride modellen een stuk lager liggen en het dus mogelijk maakt om meer verschillende scenario's te verkennen in korte tijd.



Afbeelding 2 Overzicht van het oorspronkelijke machine learning-framework voor de historische setting en de hybride versie ervan (voor voorspellingen en projecties). De gele en paarse secties markeren de oorspronkelijke inputvariabelen en doellocatie (afvoerlocaties als voorbeeld). De oranje en rode secties markeren de lokale voorspelling en projecties die zijn gemaakt via de hybride opzet. Voor meer gedetailleerde informatie en uitleg over de resultaten, zie (Hauswirth e.a., 2023a) en (Hauswirth e.a., 2023b).

De implementatie van grote klimaatensembles in de modelopzet gaf informatie over de veranderingen in rivierafvoeren onder verschillende klimaatscenario's op een meer regionale tot lokale schaal dan gebruikelijk (Hauswirth e.a., 2023b). Hoewel de grote klimaatensembles het mogelijk maken om extreme gebeurtenissen gedetailleerder te bestuderen, door de vele realisaties die beschikbaar zijn in vergelijking met die in de waarnemingen, vormt dit ook een uitdaging omdat veel van deze extreme hydrologische gebeurtenissen nog niet eerder zijn waargenomen. Om hiermee om te gaan, is er een statistische nabewerking ontwikkeld die gebruikmaakt van verdeling van extremen in de historische gegevens. Vervolgens is de informatie over die verdeling gebruikt om schattingen te maken van toekomstige hydrologische extremen. Hoewel deze aanpak beperkingen heeft, bleek de eenvoud van de implementatie en het gebruik voor lokale toepassingen toch voldoende voordelen te hebben. Mede omdat de lokale karakteristieken gebruikt kunnen worden voor het maken van lokale projecties die een toegevoegde waarde hebben voor het waterbeheer in de toekomst. Dit experiment met grote klimaatensembles laat zien dat droogte waarschijnlijk zal toenemen in Nederland, met een aantal duidelijke regionale patronen. Verder vinden er verschuivingen plaats in de piek van het droogte-seizoen tussen de verschillende regio's in Nederland, wat waarschijnlijk ook gevolgen heeft voor de toekomstige impact van droogte, waarbij de tekorten bijvoorbeeld vroeger in het seizoen liggen of met een hogere frequentie voorkomen.

Beschikbaarheid van lokale informatie, van grote tot lokale schaal

Voor beide benaderingen, seizoensvoorspellingen en projecties, is het grote voordeel dat het hybride model de mogelijkheid biedt om grootschalige simulaties en grote hoeveelheden gegevens te vertalen naar lokale analyses. In principe is dit een vorm van een statistische neerschaling, die echter wel verschilt van conventionele benaderingen omdat de lokale kennis en historische waarnemingen beter worden geïntegreerd. Daarmee vergroten deze methodes de beschikbaarheid van lokale informatie, die gebruikt kan worden voor toekomstig beleid en beheer van droogte.

Relevantie en conclusie

In dit proefschrift zijn een aantal uitdagingen voor het waterbeheer tijdens droogte aangepakt door inzichten uit het werkveld te combineren met recente wetenschappelijke ontwikkelingen op het gebied van datagebaseerd modelleren. De belangrijkste wetenschappelijke resultaten omvatten de ontwikkeling van een operationeel model, de integratie van menselijke besluitvorming en handelen in datagedreven modellen, en verbeterde seizoensvoorspellingen en klimaatprojecties op basis van datagedreven technieken. Verder zien we dat het mogelijk wordt om hydrologische simulaties met meer lokale relevantie te maken. Voor bijvoorbeeld seizoensvoorspellingen en klimaatprojecties kunnen we beter doorrekenen wat de lokale gevolgen zijn door gebruik te maken van de lokale gegevens. Uiteindelijk zorgt dit voor een beter begrip van de lokale impact van waterbeheer en verbeterde paraatheid en inzicht door voorspellingen en projecties. Dit proefschrift toont de potentie van datagedreven en hybride modelbenaderingen voor droogtemonitoring, droogtevoorspellingen en

droogteprojecties. Tegelijkertijd toont dit werk aan hoe waterbeheerders hun operationele waterbeheer kunnen optimaliseren met de implementatie van deze datagedreven technieken om de nadelige gevolgen van toekomstige droogte te verminderen.

Literatuur

- Bartholomeus, R.P., K. Van Der Wiel, A.F. Van Loon, M.H.J. Van Huijgevoort, M.T.H. Van Vliet, M. Mens, S. Muurling-van Geffen, N. Wanders en W. Pot** (2023) Managing water across the flood-drought spectrum - experiences from and challenges for the Netherlands; in: *Cambridge Prisms: Water*, vol, pag 1-22 %U https://www.cambridge.org/core/product/identificator/S2755177623000047/type/journal_article.
- Blauhut, V., M. Stoelzle, L. Ahopelto, M.I. Brunner, C. Teutschbein, D.E. Wendt, V. Akstinas, S.J. Bakke, L.J. Barker, L. Bartošová, A. Briede, C. Cammalleri, K.C. Kalin, L. De Stefano, M. Fendeková, D.C. Finger, M. Huysmans, M. Ivanov, J. Jaagus, J. Jakubínský, S. Krakovska, G. Laaha, M. Lakatos, K. Manevski, M. Neumann Andersen, N. Nikolova, M. Osuch, P. van Oel, K. Radeva, R.J. Romanowicz, E. Toth, M. Trnka, M. Urošev, J. Urquijo Reguera, E. Sauquet, A. Stevko, L.M. Tallaksen, I. Trofimova, A.F. Van Loon, M.T.H. van Vliet, J.-P. Vidal, N. Wanders, M. Werner, P. Willems en N. Živković** (2022) Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management; in: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol 22, no 6, pag 2201-2217 %U <https://nhess.copernicus.org/articles/22/2201/2022/>.
- Cammalleri, C., G. Naumann, L. Mentaschi, G. Formetta, G. Forzieri, S. Gosling, B. Bisselink, A. De Roo en L. Feyen** (2020) Global warming and drought impacts in the EU: JRC PESETA IV project : Task 7. LU: Publications Office %U <https://data.europa.eu/doi/10.2760/597045>.
- European Commission. Joint Research, C.** (2020) Global warming and drought impacts in the EU: JRC PESETA IV project : Task 7; <https://data.europa.eu/doi/10.2760/597045>, LU.
- Hauswirth, S.M.** (2024) Hydrological Droughts in the Netherlands: from Simulations to Projections using Data-Driven Methods, Utrecht Studies in Earth Sciences, volume 305.
- Hauswirth, S.M., M.F.P. Bierkens, V. Beijk en N. Wanders** (2021) The potential of data driven approaches for quantifying hydrological extremes; in: *Advances in Water Resources*, vol 155, pag 104017 %U <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030917082100172X>.
- (2023a) The suitability of a seasonal ensemble hybrid framework including data-driven approaches for hydrological forecasting; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 27, no 2, pag 501-517 %U <https://hess.copernicus.org/articles/27/501/2023/>.
- Hauswirth, S.M., K. van der Wiel, M.F.P. Bierkens, V. Beijk en N. Wanders** (2023b) Simulating hydrological extremes for different warming levels—combining large scale climate ensembles with local observation based machine learning models; in: *Frontiers in Water*, vol 5 %U <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frwa.2023.1108108>, pag.
- KNMI** (2021) KNMI Klimaatsignaal '21 - Hoe het klimaat in Nederland snel ver-

andert, 72. De Bilt: KNMI.

——— (2023) KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland. De Bilt: KNMI-Publicatie 23-03.

Naumann, G., C. Cammalleri, L. Mentaschi en L. Feyen (2021) Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming; in: *Nature Climate Change*, vol 11, no 6, pag 485-491 %* 2021 The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Limited %U <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01044-3>.

Rakovec, O., L. Samaniego, V. Hari, Y. Markonis, V. Moravec, S. Thober, M. Hanel en R. Kumar (2022) The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe; in: *Earth's Future*, vol 10, no 3, pag e2021EF002394 %U <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021EF002394>.

Stahl, K., I. Kohn, V. Blauhut, J. Urquijo, L. De Stefano, V. Acácio, S. Dias, J.H. Stagge, L.M. Tallaksen, E. Kampragou, A.F. Van Loon, L.J. Barker, L.A. Melsen, C. Bifulco, D. Musolino, A. de Carli, A. Massarutto, D. Assimacopoulos en H.A.J. Van Lanen (2016) Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports; in: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol 16, no 3, pag 801-819 %U <https://nhess.copernicus.org/articles/16/801/2016/>.

Tripathy, K.P. en A.K. Mishra (2023) How Unusual Is the 2022 European Compound Drought and Heatwave Event?; in: *Geophysical Research Letters*, vol 50, no 15, pag e2023GL105453 %* © 2023. The Authors. %U <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023GL105453>.

van der Wiel, K., J. Beersma, H. van den Brink, F. Krikken, F. Selten, C. Severijns, A. Sterl, E. van Meijgaard, T. Reerink en R. van Dorland (2024) KNMI'23 Climate Scenarios for the Netherlands: Storyline Scenarios of Regional Climate Change; in: *Earth's Future*, vol 12, no 2, pag e2023EF003983 %* © 2024 The Authors. *Earth's Future* published by Wiley Periodicals LLC on behalf of American Geophysical Union. %U <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023EF003983>.

Summary Hydrological Droughts in the Netherlands: from Simulations to Projections using Data-Driven Methods

Droughts in Europe have become more frequent and recent examples such as the droughts of 2003, 2015, 2018, and 2022 highlight their impact. The past few extreme droughts showed that even countries that are usually less affected by droughts, due to their high natural water availability, are increasingly experiencing drought-related challenges. A prime example is the Netherlands, usually known for its abundance of water and advanced water management system. While this system was originally designed to prevent floods and reduce flood impacts, the past extreme droughts have shown that this design choice leads to additional drought impacts. This made it clear that a shift in water management strategies is needed to improve drought preparedness for future drought events.

This extended abstract, based on a PhD thesis that was a joint collaboration between Utrecht University and Rijkswaterstaat (the National Water Authority of the Netherlands), addresses the current water management challenges rela-

ted to drought events in the Netherlands by exploring the potential of machine learning techniques for simulating, forecasting and projecting hydrological droughts, and the efficacy of proactive water management in mitigating potential drought impacts.

By combining practical insights from stakeholders with recent scientific developments, showing the prospect and strength of such collaborations, this thesis highlights the potential of machine learning techniques and hybrid modelling approaches to improve hydrological modelling for drought monitoring, forecasting and projections and calls on water managers to advance the state-of-the-art of operational water management through the use of machine learning techniques to reduce future drought impacts in the Netherlands.

Auteurs

SANDRA M. HAUSWIRTH

Utrecht University, Department of Physical Geography
s.m.hauswirth@uu.nl

VINCENT BEIJK

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
vincent.beijk@rws.nl

MARC F.P. BIERKENS

Utrecht University, Department of Physical Geography
Deltares, Unit Subsurface and Groundwater
m.f.p.bierkens@uu.nl

NIKO WANDERS

Utrecht University, Department of Physical Geography
n.wanders@uu.nl

