

# EEN NIEUWE GRONDWATER DROOGTE-INDICATOR VOOR BOEZEMKADEN

EEN STATISTISCHE MAAT DIE DE EXTREMITEIT VAN  
DE GRONDWATERDROOGTE IN DE DIJK WEERGEeft



RAPPORT

2024  
06

EEN NIEUWE GRONDWATER DROOGTE-INDICATOR VOOR BOEZEMKADEN  
EEN STATISTISCHE MAAT DIE DE EXTREMITEIT VAN DE  
GRONDWATERDROOGTE IN DE DIJK WEERGEEFT

RAPPORT

2024

06

ISBN 978.94.6479.043.6



[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Bart Strijker

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Douwe Yska  
Stefan Loozen  
Erik Vastenburg  
Jannes Haanstra  
Theo Reuzenaar  
Henk van Hemert  
Oscar van Dam

COVERFOTO EURECO/Cyril Liebrand

VORMGEVING Buro Vormvast

STOWA STOWA 2024-06

ISBN 978.94.6479.043.6

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

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

# TEN GELEIDE

## **NIEUW ONTWIKKELDE DROOGTE-INDICATOR VOOR BOEZEMKADEN HELPT DIJKBEHEERDERS**

Met deze nieuwe droogte-indicator worden aan de ene kant onnodige inspanningen zoals droogte inspecties voorkomen en kunnen dijkbeheerders aan de andere kant sneller reageren bij gevaarlijke situaties. In tijden van droogte hebben waterbeheerders een goede indicator nodig om de juiste beslissingen te kunnen nemen. Deze nieuwe droogte-indicator helpt dijkbeheerders de werkelijke droogte in kaden te kunnen bepalen.

Droogte in boezemkaden is erg complex. Dat bleek wel in de droge zomers van 2018, 2019 en 2022. Toen gebruikten dijkbeheerder diverse meteorologische indicatoren zoals het neerslagtekort of de Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) om te bepalen of ze moesten opschalen op de crisisladder. Deze indicatoren geven echter alleen een indicatie over het tekort aan neerslag en/of het teveel aan (potentiële) verdamping. Ze geven geen uitsluitsel over de werkelijke droogte in de kaden. Uit de evaluaties van de voorgaande droge zomers bleek dat dijkbeheerders niet tevreden zijn over de huidige indicatoren. Een alternatieve methode was wenselijk.

De Hoogheemraadschappen Hollands Noorderkwartier en Schieland en de Krimpenerwaard ontwikkelden samen met Rijkswaterstaat en STOWA een alternatieve methode om de droogte in kaden te bepalen. Dit rapport beschrijft het model voor de alternatieve indicator: de grondwaterdroogte-indicator. De methode gebruikt meetgegevens van grondwaterstanden in boezemkaden om aan de hand van meerjaren statistiek te bepalen hoe uitzonderlijk de droogte op een bepaald moment is.

In een vervolgstudie wordt de methode verder uitgewerkt om hiervan een praktisch toepasbaar instrument voor dijkbeheerders en inspecteurs van boezemkaden te maken.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# DE STOWA IN HET KORT

## HOE WE WERKEN

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

## WAT WE ONDERZOEKEN

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

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

## WIE WE ZIJN

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

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

# EEN NIEUWE GRONDWATER DROOGTE- INDICATOR VOOR BOEZEMKADEN

## EEN STATISTISCHE MAAT DIE DE EXTREMITEIT VAN DE GRONDWATERDROOGTE IN DE DIJK WEERGEeft

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	DE STOWA IN HET KORT	
	INHOUD	
<b>1</b>	<b>INTRODUCTIE</b>	<b>1</b>
	1.1 Droogte-inspecties regionale keringen	1
	1.2 Doel	1
	1.3 Leeswijzer	1
<b>2</b>	<b>ACHTERGROND</b>	<b>3</b>
	2.1 Droogte bij dijken	3
	2.2 Inspectieprotocollen	4
	2.3 Het neerslagtekort	4
	2.4 Voorbeelden van neerslagtekort en droogte in keringen	5
	2.5 Tekortkoming neerslagtekort	6
<b>3</b>	<b>EEN NIEUWE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR</b>	<b>8</b>
	3.1 De essentie van de nieuwe droogte-indicator	8
	3.2 Aanpak	9
	3.2.1 Tijdreeksmodellen	10
	3.2.2 Grondwaterstatistiek	13
	3.3 Voorbeeld	13
	3.4 Gebruikte peilbuismetingen en tijdreeksmodellen	14
	3.5 Uitdroging verschillende dijken	16
	3.5.1 Variatie grondwaterdroogte-indicator	16
	3.5.2 Absolute droogte dijken	17
	3.6 Grenswaarden	19
	3.7 Afgekeurde modellen	20

<b>4</b>	<b>VOORBEELDUITWERKING</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	Versimpelde inspectieprotocollen	22
<b>4.2</b>	Enkele recente droge zomers	23
4.2.1	De zomer van 2022	23
4.2.2	De zomer van 2020	23
4.2.3	De zomer van 2019	24
<b>5</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>25</b>
<b>5.1</b>	Conclusies	25
<b>5.2</b>	Aanbevelingen	26
5.2.1	De toepassing in de praktijk	26
5.2.2	Verder onderzoek	26
<b>6</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>28</b>
<b>6.1</b>	Referenties	28
	<b>BIJLAGE</b>	<b>29</b>

# 1

## INTRODUCTIE

### 1.1 DROOGTE-INSPECTIES REGIONALE KERINGEN

De risico's van droogte voor veenkades kwamen aan het licht na de onverwachte dijkdoorbraken bij Wilnis en Terbregge in de zomer van 2003. Naar schatting zijn er in Nederland ongeveer 3.500 kilometer aan veenkades die gevoelig zijn voor droogte, welke voornamelijk in West- en Noord-Nederland voorkomen. Deze veenkaden zijn voornamelijk boezemkaden en overige keringen (polderkeringen). De naam veenkade doet vermoeden dat de kade volledig uit veen bestaat, maar deze kaden hebben vaak een heterogene en gelaagde opbouw met klei-, zand- en veenlagen. Boezemkades en polderkeringen keren wateren die sterk gereguleerd zijn, waarbij veelal permanent "hoge" waterstanden, tot enkele decimeters onder de kruin, aanwezig zijn.

Tijdens langaanhoudende droogte kan het veen uitdrogen en scheuren vormen. Dit levert een probleem op voor de stabiliteit van de keringen en dus waterveiligheid. Tijdens droge zomers inspecteren waterschappen de keringen op zoek naar schadebeelden, zoals vervormingen en scheuren. Dit vergt aanzienlijke inspanningen van de waterschappen. Voor het besluit tot inspectie wordt door waterschappen gekeken naar een indicator voor droogte, wat nu vaak het neerslagtekort is.

Uit eerdere droogte evaluaties, zoals de evaluatie na de droge zomer van 2018, kwam naar voren dat de waterschappen kritisch zijn op het gebruik van het neerslagtekort als maatstaf voor het bepalen van de start van de droogte-inspecties, aangezien het neerslagtekort niet direct is gekoppeld aan droogte binnen (veen)keringen (STOWA, 2019a). Om die reden is er behoefte aan een droogte-indicator die beter de droogtetoestand van de veenkeringen beschrijft.

Deze alternatieve indicator kan helpen de inspectie protocollen en het op- en afschalen van crisissituaties te verfijnen en beter te onderbouwen om onnodige inspanningen en de bijbehorende kosten te vermijden en te reageren op gevaarlijke droogtesituaties.

### 1.2 DOEL

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een nieuwe droogte-indicator die aansluit bij de werkelijke droogte in boezemkaden, gebruikmakend van metingen, ter ondersteuning van inspectie-protocollen tijdens droogteperioden.

### 1.3 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 beschrijft kort de achtergrond rond de droogteproblematiek bij boezemkaden, de huidige inspectieprotocollen en het gebruik van het neerslagtekort en haar tekortkomingen. Vervolgens gaat hoofdstuk 3 in op de nieuwe grondwaterdroogte-indicator. De essentie van de indicator en de aanpak om deze uit te rekenen wordt beschreven, waarna ook een voorbeeld wordt gegeven. De gebruikte metingen worden beschreven, evenals de variatie in uitdroging bij kaden. Als laatste worden grenswaarden en verschillende droogteniveaus,



behorend bij de mate van droogte, voorgesteld. Hoofdstuk 4 geeft een voorbeelduitwerking van de droogte-indicator. Hierin wordt het gebruik van de grondwaterdroogte-indicator en het neerslagtekort vergeleken voor de keuze tot inspectie voor enkele recente droge zomers. Als laatste staan in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen beschreven.

# 2

## ACHTERGROND

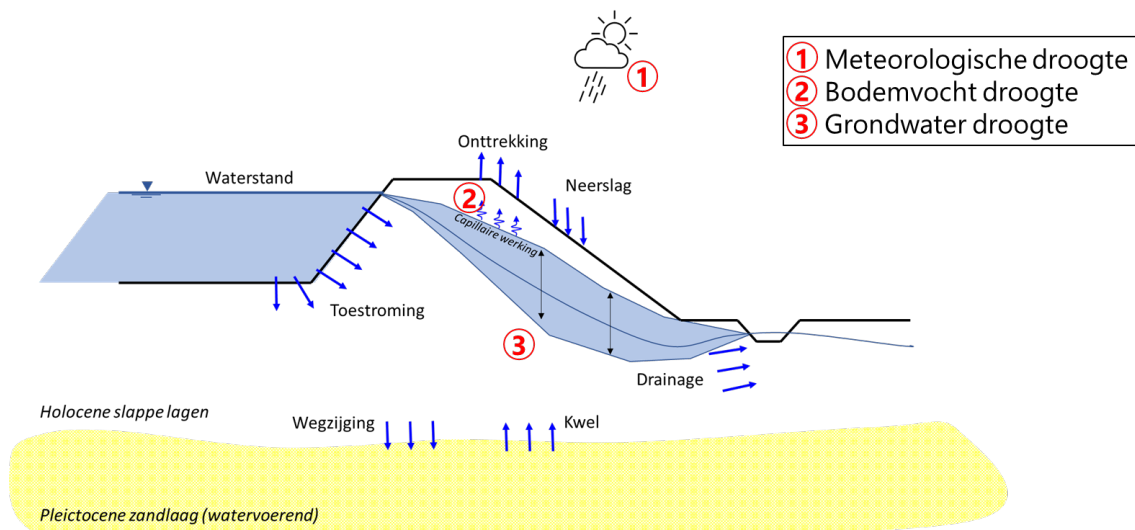
### 2.1 DROOGTE BIJ DIJKEN

Droogte is een complex fenomeen. In zijn simpelste vorm is het een gebrek aan water. Bij droogte in kaden gaat het dan om een gebrek aan water in de dijk wat kan leiden tot bijvoorbeeld scheurvorming, verzakkingen, vervormingen (met kortsluiting tot gevolg) en het opdrijven en horizontaal afschuiven van dijken (als gevolg van gewichtsverlies). Deze gevolgen van droogte ontstaan door een tekort aan bodemvocht (in de onverzadigde zone) en/of lage (freatische) grondwaterstanden in de dijk (de verzadigde zone). Beide kunnen gelinkt worden aan verschillende gevaren, maar hebben ook hun eigen manier van uitdrogen, welke ook interactie kunnen hebben met elkaar. De grondwaterstroming in een dijk is complex en de doorvertaling naar schaden ook, waarbij vele kennisleemtes zijn.

Momenteel worden inspecties afgestemd op het neerslagtekort of gecombineerd met de SPEI (Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index). Dit zijn meteorologische maten voor droogte, wat iets zegt over het gebrek aan neerslag en/of het teveel aan (potentiële) verdamping. Deze maten kunnen afwijken van de werkelijke droogte in de kade, waarmee beschikbaar bodemvocht en grondwater in de dijk wordt bedoeld. De grondwaterstanden in de dijk worden beïnvloed door onder andere de grondwateraanvulling, weerstand in de grond, toestroming vanuit de boezem, drainage richting de polder en kwel of wegzijging (zie Figuur 1). Deze fysische processen maken dat uitdroging in kaden anders kan zijn dan het beeld van het neerslagtekort.

Binnen dit project ontwikkelen we een indicator voor grondwaterdroogte (nummer 3 in Figuur 1), wetende dat de gevaren bij droogte ook afhangen van het bodemvocht. De ontwikkeling van deze indicator moet gezien worden als eerste stap om een verfijnd droogtebeeld bij boezemkaden te verkrijgen en droogte beter te duiden en te beheersen.

FIGUUR 1 VERSCHILLENDE DROOGTEMATEN IN EN ROND DE DIJK



## 2.2 INSPECTIEPROTOCOLLEN

Regionale keringen worden periodiek geïnspecteerd tijdens bijvoorbeeld de voorjaars- en/of najaarschouw. Daarnaast worden door de waterschappen inspecties uitgevoerd bij hoogwaters en droogte. Bij droogte-inspecties worden meestal alleen de droogtegevoelige keringen geïnspecteerd, welke geprioriteerd kunnen zijn op basis van kwetsbaarheid bij droogte (op basis van veiligheids-beoordelingen en aanwezigheid van organische grondsoorten).

Het moment van starten van de droogte-inspecties en de intensiteit van inspecteren verschilt per waterschap. Het startmoment van inspecteren is bij de meeste waterschappen gelinkt aan het neerslagtekort (of een andere meteorologische maat). In de STOWA handreiking inspectie waterkeringen (STOWA, 2008) is geadviseerd om vanaf een neerslagtekort van 150 mm te starten met de voorbereidingen van de inspectie en vanaf 175 mm te starten met inspecteren, gebaseerd op het draaiboek voor droogtegevoelige kaden (STOWA, 2005).

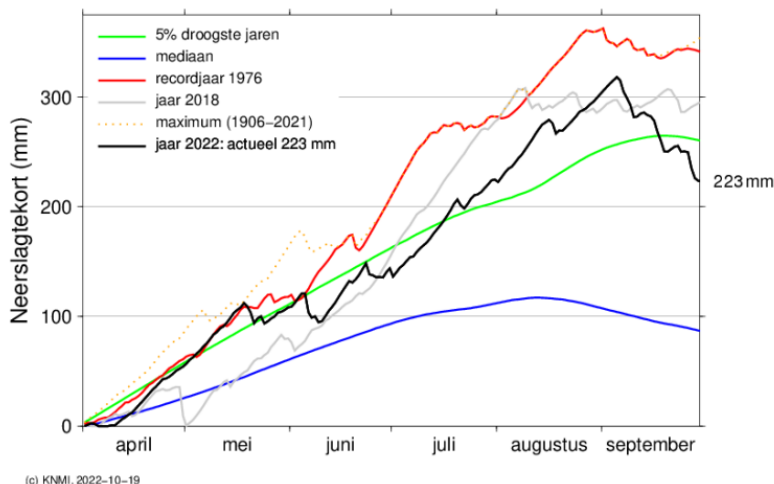
Dit zijn richtlijnen en waterschappen wijken ook hiervan af en hebben hun eigen drempelwaarden voor inspecties op basis van ervaringen en waarnemingen in hun beheergebied.

Het neerslagtekort wordt gebruikt als een indicator voor droogte, maar de waterschappen kijken verder dan dit. Waarnemingen van dijkbeheerders en meldingen van inwoners (lekkages en scheuren) zijn ook onderdeel om een droogtebeeld te vormen. Een droogte-indicator is een hulpmiddel en is niet een maat waar blind op gevaren wordt, maar kan wel helpen voor het inrichten van protocollen en een onderbouwing geven van op- en afschalen van de organisatie. Daarom is er een behoefte om de droogte-indicator te verfijnen waar mogelijk.

## 2.3 HET NEERSLAGTEKORT

Het neerslagtekort wordt veel gebruikt om droogte te monitoren (zie Figuur 2). Het wordt berekend door het verschil tussen de gevallen neerslag en de referentiegewasverdamping dagelijks te sommeren en dit gedurende het hydrologisch zomerseizoen van elk jaar (van 1 april t/m 30 september). De bruikbaarheid van het neerslagtekort hangt af van de toepassing.

**FIGUUR 2** HET VERLOOP IN DE TIJD VAN HET NEERSLAGTEKORT IN MM, GEMIDDELD OVER 13 STATIONS VERSPREID OVER NEDERLAND, VOOR ENKELE DROGE JAREN (1976, 2018 EN 2022) EN STATISTISCHE KENMERKEN (5% DROOGSTE JAREN EN MEDIAAN)



Waterschappen maken veelal gebruik van het neerslagtekort in hun beheergebied als droogte-indicator. Dit kan wezenlijk verschillen van het landelijk gemiddelde neerslagtekort. Voor het gebruik van het neerslagtekort voor droogte-inspecties van dijken leven onder de waterschappen meerdere vragen:

- Vanaf welk tekort gaan we inspecteren?
- Wat is het effect van een droge of natte winter voorafgaand aan de droge periode?
- Het heeft de afgelopen weken veel geregend, maar het neerslagtekort is nog hoog. Moeten we inspecteren?
- Is langdurig geen regen met weinig verdamping hetzelfde als zo af en toe wel regen met veel verdamping?
- Draagt een intensieve zomerbui wel bij aan vernatting van de kering?
- Wanneer kunnen we stoppen met inspecteren?

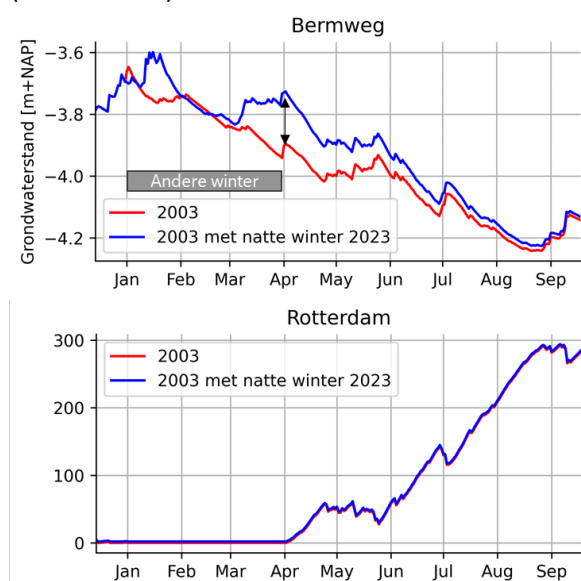
Sommige van deze vragen gelden voor elke indicator voor droogte, maar een nieuwe droogte-indicator kan enkele tekortkomingen van het neerslagtekort als droogte-indicator ondervangen.

## 2.4 VOORBEELDEN VAN NEERSLAGTEKORT EN DROOGTE IN KERINGEN

In Figuur 3 en Figuur 4 zijn twee voorbeelden weergegeven die het verschil tussen het neerslagtekort en de droogte in de kade duidelijk maken.

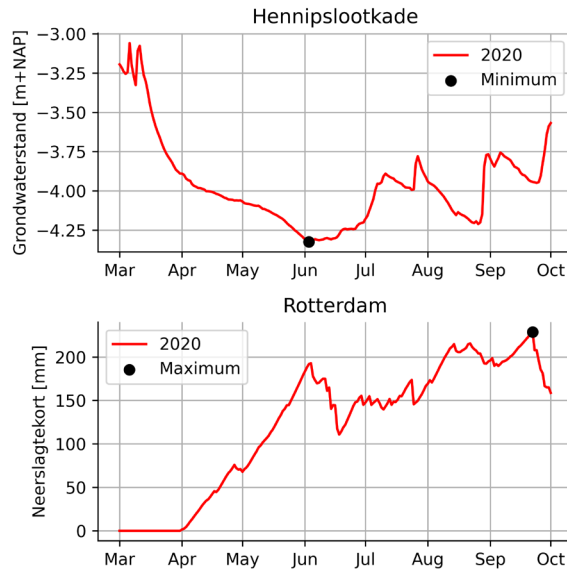
De bovenste grafiek in Figuur 3 toont de gemodelleerde grondwaterstanden bij de Bermwegkade (gelegen in het beheergebied van Hoogheemraadschap van Schieland & de Krimpenerwaard) tijdens de droge zomer van 2003 op basis van de neerslag en verdamping bij het KNMI-station te Rotterdam (rode lijn). Dit betreft een tijdreeksmodel, zoals deze later in dit rapport staat beschreven. Voorafgaand aan de droge zomer van 2003 viel er ook weinig neerslag in de wintermaanden januari t/m maart. Wanneer in deze maanden meer neerslag was gevallen, namelijk zoveel als in 2023, zie je dat de grondwaterstanden veel hoger waren in april (start zomer) en dit ook doorwerkt verder in de zomer (blauwe lijn). Dit verschil wordt niet zichtbaar bij het neerslagtekort dat pas vanaf 1 april begint met tellen (onderste grafiek), maar heeft wel invloed op de droogte in de kade.

**FIGUUR 3 HET EFFECT VAN EEN DROGERE WINTER IN 2003 OP DE GRONDWATERSTANDEN (BOVENSTE GRAFIEK) EN HET NEERSLAGTEKORT (ONDERSTE GRAFIEK)**



In Figuur 4 zijn de gemeten grondwaterstanden bij de Hennipslootkade (ook gelegen in het beheergebied van Hoogheemraadschap van Schieland & de Krimpenerwaard) en het neerslagtekort in het jaar 2020 weergegeven. De maximale droogte in de dijk (laagste grondwaterstand) vindt plaats begin juni, terwijl de maximale meteorologische droogte eind september plaatsvindt. Neerslag en verdamping zijn de drijvende krachten van de grondwaterstand in de dijk, maar de manier waarop vernatting en verdroging plaatsvindt is niet hetzelfde als de cumulatieve som van neerslag minus verdamping.

**FIGUUR 4** HET VERLOOP VAN DE GRONDWATERSTAND BIJ DE HENNIPSLOOTKADE (BOVENSTE GRAFIEK) EN HET NEERSLAGTEKORT (ONDERSTE GRAFIEK), WAARBIJ TE ZIEN IS DAT DE MAXIMALE DROOGTE OP VERSCHILLENDE MOMENTEN PLAATSVINDT. NEERSLAG EN VERDAMPING WERKEN ANDERS DOOR IN DE DIJK, DAN WAARMEE BIJ HET NEERSLAGTEKORT REKENING WORDT GEHOUDEN



## 2.5 TEKORTKOMING NEERSLAGTEKORT

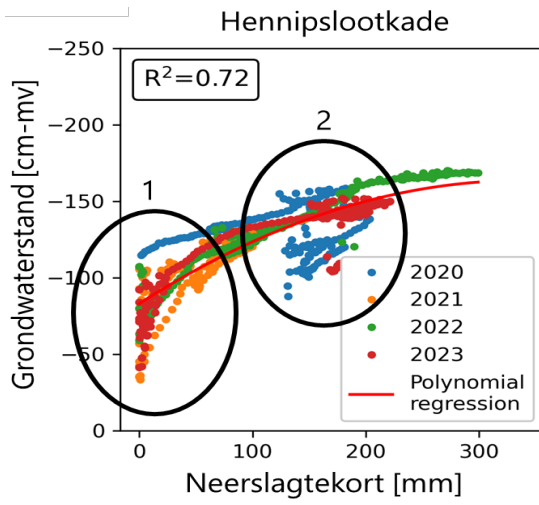
Wanneer we grondwaterstanden in een dijk vergelijken met het neerslagtekort heeft het neerslagtekort twee belangrijke tekortkomingen:

1. **Dijken kunnen ook met beperkte verdamping al uitdrogen.** De uitdroging van dijken, in termen van de grondwaterstand, wordt met name veroorzaakt door het uitblijven van neerslag. In de winter en het voorjaar kan een dijk al uitdrogen, terwijl dit niet wordt meegenomen bij het neerslagtekort.
2. **De reactie van grondwater is complexer dan de cumulatieve som van neerslag en verdamping.** De beweging van water in de dijk wordt gedreven door neerslag en verdamping, maar door verschillende fysische processen (zie Figuur 1) kan de uitdroging en herbevochtiging in kaden anders zijn dan het beeld van het neerslagtekort.

Deze tekortkomingen komen naar voren bij zowel modelberekeningen (Figuur 3 en Figuur 4) als bij metingen (Figuur 5). Met de nieuwe droogte-indicator proberen we deze tekortkomingen te ondervangen met een indicator die informatie geeft over de grondwaterdroogte bij de kaden.

FIGUUR 5

DE GEMETEN GRONDWATERSTAND BIJ DE HENNIPSLOOTKADE (LANGS DE RINGVAART IN HET BEHEERGEBIED VAN HHSK) UITGEZET TEGENOVER HET NEERSLAGTEKORT. DE CIRKELS GEVEN TWEE OPVALLENDEHEDEN AAN: 1) DE GRONDWATERSTAND KAN BIJ DE START VAN HET NEERSLAGTEKORT VARIËREN EN 2) DE GRONDWATERSTAND KAN VARIËREN BIJ DEZELFDE HOEVEELHEID NEERSLAGTEKORT DOORDAT NEERSLAG DE KADE OP EEN ANDERE MANIER VERNAT



# 3

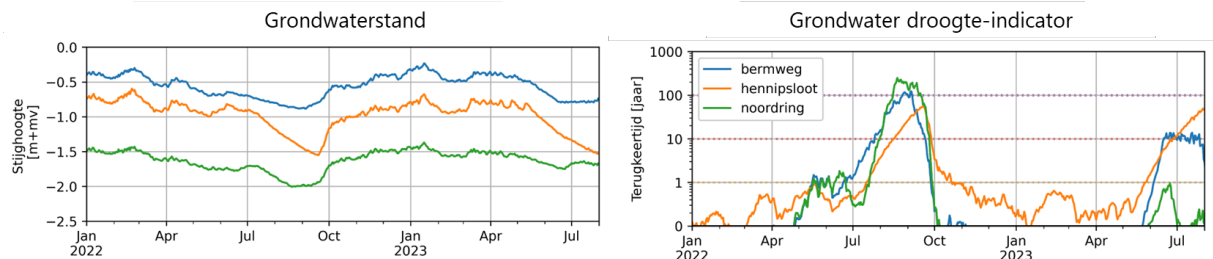
## EEN NIEUWE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR

### 3.1 DE ESSENTIE VAN DE NIEUWE DROOGTE-INDICATOR

De nieuwe droogte-indicator is een grondwaterdroogte-indicator en geeft een inschatting van **hoe extreem de grondwaterstand is** in een kade op een bepaalde plek.

De absolute grondwaterstand is in elke kade anders, als gevolg van lokale kenmerken die ruimtelijk variëren door de heterogene ondergrond. Maar wanneer naar de extremititeit van de grondwaterstand wordt afgeleid, kan de droogte in kaden eenduidiger met elkaar vergeleken worden (zie Figuur 6). De extremititeit wordt uitgedrukt in een terugkeertijd en is een relatieve maat. Door de droogte uit te drukken in een terugkeertijd heeft de gebruiker ook meteen inzicht in hoe extreem de situatie is.

**FIGUUR 6** ILLUSTRATIEF VOORBEELD HOE DE ABSOLUTE GRONDWATERSTAND IN VERSCHILLENDE DIJKEN VARIËERT (LINKS), TERWIJL DE EXTREMITEIT VAN DE GRONDWATERSTANDEN EENDUIDIGER ZIJN DOORDAT HET EEN RELATIEVE MAAT IS (RECHTS). OOK BIJ DE ONTWIKKELING VAN DE EXTREMITEIT IS NOG VARIATIE, DOORDAT NIET ELKE DIJK OP DEZELFDE MANIER UITDROOGT



De basis van de grondwaterdroogte-indicator zijn peilbuismetingen, welke met een tijdreeksmodel en neerslag- en verdampingsreeksen vertaald worden naar de extremititeit van de grondwaterstand.

Voordat in de volgende paragraaf wordt uitgelegd hoe het grondwaterdroogte-indicator precies tot stand komt, is het goed om te weten dat de indicator op meerdere manieren gebruikt kan worden, waarbij in grote lijnen twee opties zijn:

- 1. Gebruik direct peilbuismetingen:** de grondwaterdroogte-indicator wordt bepaald door gebruik te maken van peilbuismetingen in het beheergebied. Op deze manier weet je op een aantal plekken de droogte in je beheergebied en kan een meetnetwerk ingericht worden om een ruimtelijk beeld te krijgen van de droogte in het beheergebied.
- 2. Gebruik een model dat indirect peilbuismetingen gebruikt:** de grondwaterdroogte-indicator bij een willekeurige kade kan ingeschat worden door gebruik te maken van metingen van de lokale neerslag en verdamping en beschikbare tijdreeksmodellen. Deze tijdreeksmodellen zijn gebaseerd op peilbuismetingen in boezemkaden op andere plekken en geven de mogelijke reactie van de grondwaterstand weer. Hierbij wordt verondersteld dat het gedrag van die dijk op die ene plek wordt beschreven door de beschikbare tijdreeksmodellen.

**Binnen dit onderzoeksproject is gekozen om de model-optie uit te werken**, waarbij de peilbuismetingen worden gebruikt om tijdreeksmodellen op te zetten die vervolgens gebruikt worden op andere locaties met andere lokale neerslag en verdamping. Het voordeel van deze aanpak is dat je 1) ook op plekken waar niet wordt gemeten een schatting krijgt van de droogte en 2) je ook gebruik kan maken van KNMI-voorspellingen om een beeld te krijgen van de droogte-ontwikkeling in de nabije toekomst.

Het tijdreeksmodel beschrijft de grondwaterstand en uitdroging als gevolg van neerslag en verdamping. De grondwaterstand kan hierbij variëren per kade (zie ook Figuur 6).

De onderzoeksvragen die hierbij komen kijken zijn: Wanneer voor het model wordt gekozen, welk tijdreeksmodel gebruik je voor welke kade? Hier kan een keuze in gemaakt worden door dijkvakken of polders op te delen in typen en daar een tijdreeksmodel aan toe te kennen. Een alternatief is om kaden niet op te delen, en te werken met een bandbreedte van de droogte-indicator door gebruik te maken van alle beschikbare tijdreeksmodellen of de tijdreeksmodellen binnen een bepaald beheergebied.

### 3.2 AANPAK

Voor de uitleg over hoe de grondwaterdroogte-indicator tot stand komt, beschouwen we eerst één kade waar peilbuismetingen beschikbaar zijn en hoe deze meting kan worden gebruikt om ook op een andere plek de droogte-indicator af te leiden. In de komende paragrafen gaan we dieper in op de gebruikte peilbuismetingen, de tijdreeksmodellen en het afleiden van de grondwaterstand-statistiek.

Op basis van de meetreeks kan een tijdreeksmodel opgesteld worden dat de relatie legt tussen neerslag en verdamping en de grondwaterstand, waarbij lokale neerslag- en verdampinggegevens<sup>1</sup> worden gebruikt. Door dit tijdreeksmodel te belasten met een langjarige neerslag- en verdampingsreeks, wordt een langere grondwaterstandreeks verkregen. Vervolgens worden binnen de langjarige grondwaterreeksen de minima geselecteerd waarop een extreme waardeverdeling wordt gefit om de grondwaterstandstatistiek<sup>2</sup> te verkrijgen. Het tijdreeksmodel van deze ene kade kan gebruikt worden om op elke plek in Nederland de grondwaterstand te schatten op basis van de lokale neerslag en verdamping (historisch of voorspeld) op die plek. Het gaat er niet om dat op deze plek de absolute grondwaterstand klopt (deze kan 5 meter hoger of lager liggen), want de grondwaterstand vertalen we nog naar de relatieve droogtemaat, namelijk de extremiteit van de grondwaterstand door gebruik te maken van de grondwaterstandstatistiek. Deze stappen staan procesmatig weergegeven in Figuur 7.

Op deze manier kan met een tijdreeksmodel op plek X de grondwaterdroogte-indicator op plek Y verkregen worden (op basis van de lokale neerslag en verdamping). Op plek Y kan ook een **bandbreedte van de grondwaterdroogte-indicator** verkregen worden, wanneer we meerdere beschikbare tijdreeksmodellen van verschillende dijken gebruiken.

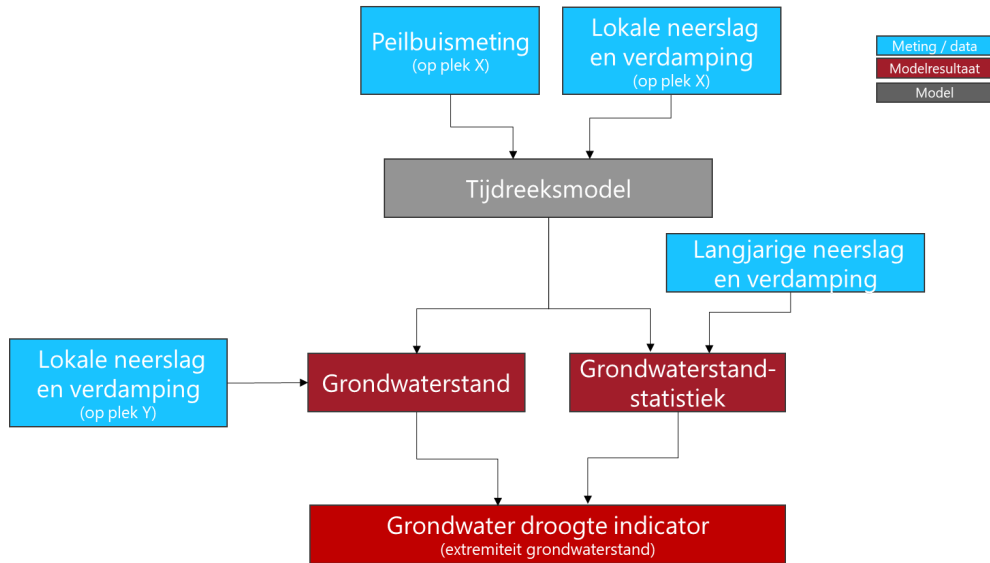
Door de nieuwe grondwaterdroogte-indicator voor verschillende modellen en/of locaties te berekenen kan inzicht worden verkregen in de gevoeligheid van de indicator en de variatie in uitdroging van kaden.

- 1 De neerslaggegevens zijn afkomstig van [www.meteobase.nl](http://www.meteobase.nl) en gebaseerd op RADAR gegevens van het KNMI die aan meetwaarden van 216 grondstations zijn gekoppeld. De lokale verdampingsdata is verkregen door triangulaire interpolatie tussen verschillende KNMI weerstations.
- 2 De statistiek geeft aan wat de terugkeertijd is van verschillende grondwaterstanden, ook wel frequentieel genoemd.



FIGUUR 7

OVERZICHT VAN DE GEBRUIKTE MEETDATA, MODELLEN EN MODELRESULTATEN VOOR HET AFLEIDEN VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR. DIT OVERZICHT LAAT ZIEN HOE METINGEN OP PLEK X GEBRUIKT KUNNEN WORDEN OM DE EXTREMITEIT VAN DE GRONDWATERSTAND IN EEN KADE AF TE LEIDEN OP PLEK Y



### 3.2.1 TIJDREEKSMODELLEN

Tijdreeksmodellen worden gebruikt om relaties tussen verschillende variabelen te leggen en in een breed scala aan vakgebieden toegepast. In deze studie is gefocust op de fysische modellen, waarbij we gebruik maken van het Python package Pastas wat geohydrologische tijdreeksen analyseert, gebruik makend van de PIRFICT-methode (Collenteur, 2019). Een PIRFICT-model verklaart de grondwaterstand aan de hand van variabelen (e.g. neerslag, verdamping en buitenwaterstand) waarvan de bijdrage aan de grondwaterstand wordt verkregen door te vermenigvuldigen met een *impulse response functie*. In zijn algemene vorm wordt dit als volgt geschreven:

$$h(t) = \sum_{m=1}^M h_m(t) + d + r(t)$$

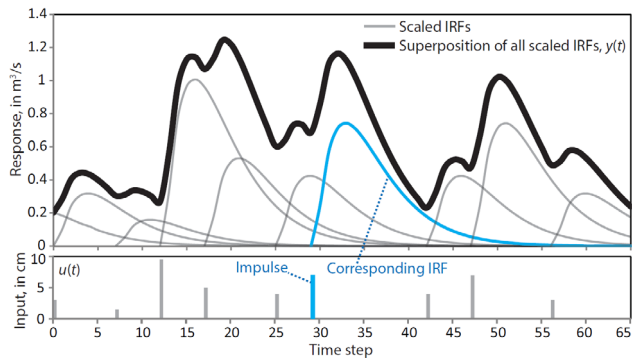
waar de gemeten grondwaterstand is (verklaarde tijdreeks),  $h_m(t)$  de bijdrage van invloed  $m$  (verklarende tijdreeks),  $d$  het basisniveau van het model (soms ook drainagebasis genoemd) en  $r(t)$  zijn de modelresiduen. Met de modelresiduen, het deel van de meetreeks dat niet kan worden beschreven door het deterministische deel van het tijdreeksmodel, wordt in deze studie niets gedaan. Het algemene principe van het PIRFICT-model is weergegeven in Figuur 8, waarbij de te verklaren variabele (in ons geval de grondwaterstand) wordt beschreven door het bij elkaar optellen van response functies die het resultaat zijn van impulsen. Wiskundig ziet dat er als volgt uit:

$$h_m(t) = \int_{t=-\infty}^t S_m(\tau) \theta_m(t - \tau) d\tau$$

Waarbij  $S_m$  de tijdreeks is van variabele  $m$  en  $\theta_m(t)$  de impuls response functie voor variabele  $m$ .

FIGUUR 8

**SUPERPOSITIE VAN OPEENVOLGENDE IMPULS-RESPONSFUNCTIES. ELKE RESPONSEFUNCTIE (BOVENSTE GRAFIEK) IS HET RESULTAAT VAN EEN IMPULS (ONDERSTE GRAFIEK) VAN DE INVOERREEKS  $U(t)$  EN WORDT GESCHAALD DOOR DE OMVANG VAN DIE IMPULS. (FIGUUR UIT LONG, 2015)**



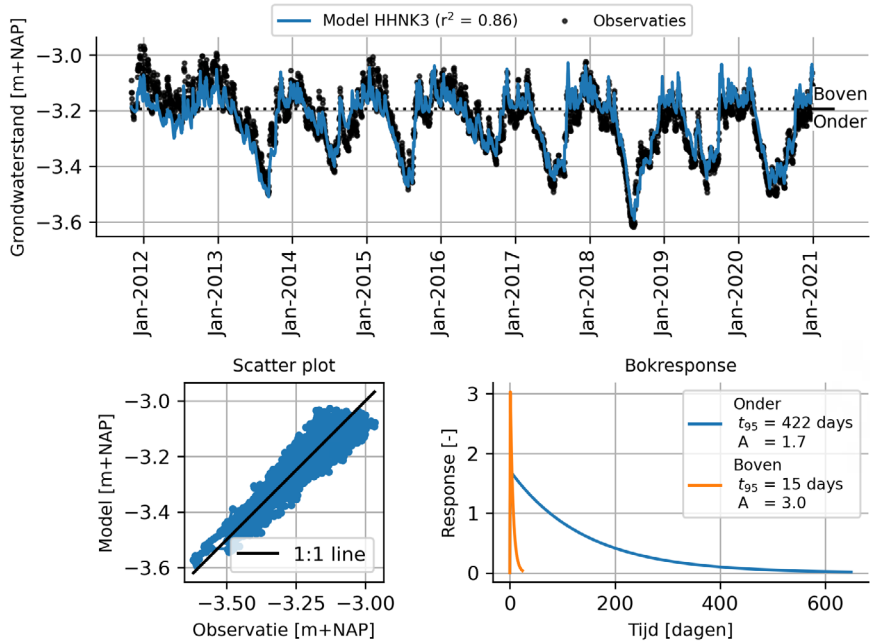
### TARSO-MODELLEN

In HKV (2023) zijn verschillende type response functies en modelconcepten (lineaire en niet-lineaire recharge modellen) toegepast op drie boezemkaden bij Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard, waarbij het TARSO-model het best presteert. Dit type tijdreeksmodel wordt ook gebruikt in deze studie. Voor het opzetten van de modellen is de volledige meetreeks gebruikt voor de kalibratie en er is geen validatie van de modellen uitgevoerd om zoveel mogelijk gebruik te maken van de beperkt beschikbare metingen.

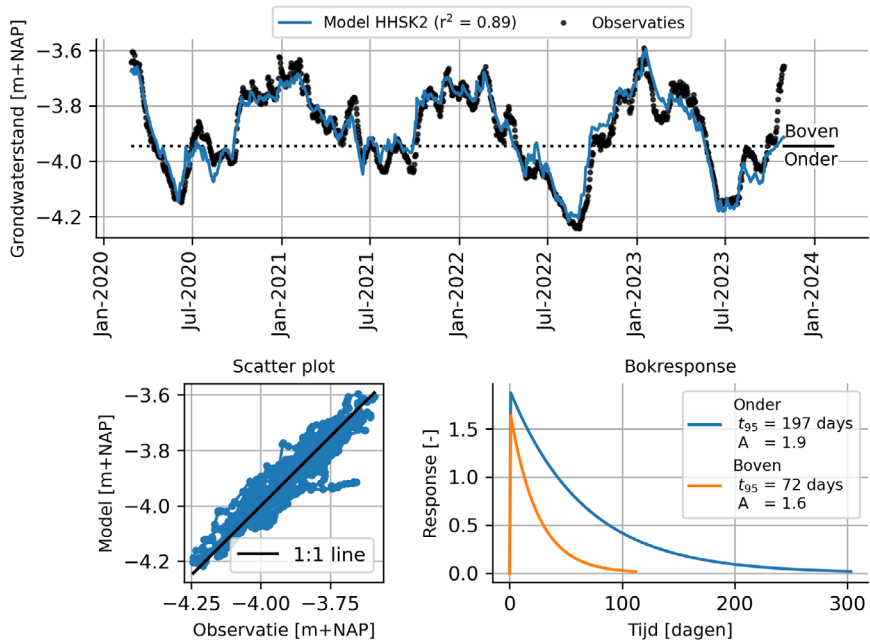
Het TARSO-model houdt rekening met drempel niet-lineariteit in grondwatersystemen, waarbij de stijghoogteresponse verschilt over de diepte. De reactie van de grondwaterstand op neerslag en verdamping wordt beschreven door **twee impuls response functie**, één voor de grondwater-respons voor de natte situatie (bovenlaag) en één voor de grondwaterrespon voor de droge situatie (onderlaag). Voor meer details over tijdreeksmodellen wordt verwezen naar STOWA (2021), Collenteur (2019) en HKV (2023).

In Figuur 9 en Figuur 10 zijn voor twee verschillende kaden de het resultaat van de tijdreeksmodellen weergegeven, waarbij de grondwaterstandfluctuaties goed verklaard worden (bovenste grafieken). Ook zijn de gefitte impuls response functies te zien (rechts onder) en zijn de observaties uitgezet tegenover het modelresultaat (links onder). Bij deze twee dijken reageren de grondwaterstanden verschillend op neerslag en verdamping, wat terug te zien is in de impuls response functies.

**FIGUUR 9** EEN VOORBEELD VAN HET TIJDREEKSMODEL BIJ DE BEEMSTER ZUID (HHNK3) DIE DE GRONDWATERSTANDEN IN DIJKEN VERKLAREN A.D.H.V. ALLEEN NEERSLAG EN VERDAMPING. BOVENSTE GRAFIEK TOONT HET MODELRESULTAAT EN DE OBSERVATIES, DE ONDERSTE GRAFIEKEN TONEN DE VERGELIJKING TUSSEN METING EN MODEL (RECHTS) EN DE GEFITTE IMPULSE RESPONSE FUNCTIES VAN HET TARSO-MODEL (LINKS)



**FIGUUR 10** EEN VOORBEELD VAN HET TIJDREEKSMODEL BIJ DE BERMWEG (HHSK2) DIE DE GRONDWATERSTANDEN IN DIJKEN VERKLAREN A.D.H.V. ALLEEN NEERSLAG EN VERDAMPING. BOVENSTE GRAFIEK TOONT HET MODELRESULTAAT EN DE OBSERVATIES, DE ONDERSTE GRAFIEKEN TONEN DE VERGELIJKING TUSSEN METING EN MODEL (RECHTS) EN DE GEFITTE IMPULSE RESPONSE FUNCTIES VAN HET TARSO-MODEL (LINKS)

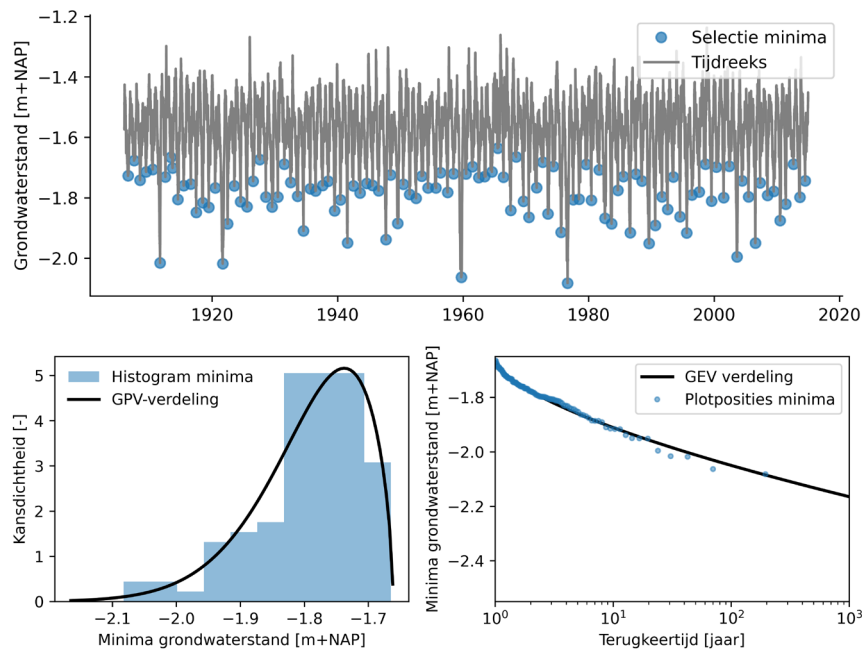


### 3.2.2 GRONDWATERSTATISTIEK

Door tijdreeksmodellen te belasten met 108-jaar neerslag- en verdampingsreeksen (bij De Bilt) worden langjarige grondwaterstandreeksen verkregen (STOWA, 2019b).

Deze langjarige neerslag- en verdampingsreeksen zijn gecorrigeerd voor klimaatverandering en zijn een representatie van het huidige klimaat. Door minima te selecteren met een minimale tijdsduur tussen aangrenzende pieken van 183 dagen wordt onafhankelijkheid gegarandeerd (zie bovenste grafiek). Vervolgens worden pieken met een terugkeertijd van 2 jaar of minder frequent gebruikt om een GPV-verdeling te fitten. De frequent voorkomende gebeurtenissen worden niet meegenomen in deze fit, omdat we hoofdzakelijk geïnteresseerd zijn in extremer droogte en dit visueel gezien de fit ten goede komt.

**FIGUUR 11** BOVENSTE GRAFIEK LAAT DE SELECTIE VAN MINIMA ZIEN IN EEN GRONDWATERREEKS, WAARNA ALLEEN MINIMA MET EEN TERUGKEERTIJD GROTER DAN 2 JAAR WORDEN GEBRUIKT OM EEN GPV-VERDELING TE FITTEN



De grondwaterstatistiek wordt vervolgens gebruikt om de extremiteit van de huidige of voorspelde gemodelleerde grondwaterstand te bepalen. Het resultaten lichten we toe met een voorbeeld.

### 3.3 VOORBEELD

Op basis van de beschreven methode kan de grondwaterdroogte-indicator afgeleid worden op basis van neerslag en verdamping op elke locatie in Nederland. Als voorbeeld kijken we nu naar de grondwaterdroogte-indicator op basis van de neerslag en verdamping bij het KNMI-station van Rotterdam en het tijdreeksmodel van de Bermwegkade. In Figuur 12 is de ontwikkeling van de grondwaterdroogte-indicator en het neerslagtekort voor de zomers 2022 en 2023 weergegeven.

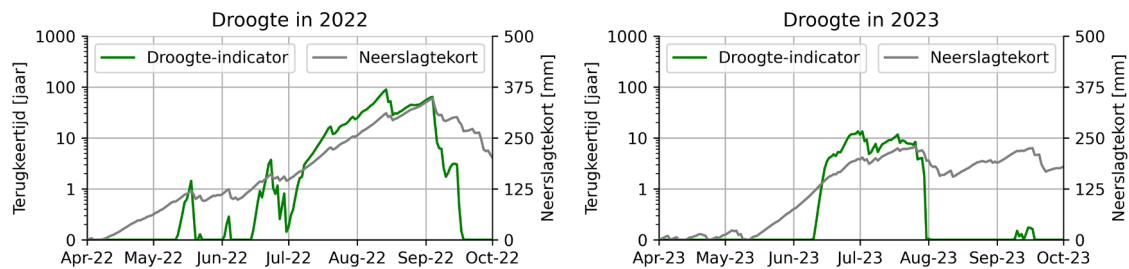
In de verlopen van het neerslagtekort en de grondwaterdroogte-indicator zijn bij beiden duidelijk uitdroging tijdens zomers en het effect van neerslag zichtbaar. Ook zijn er verschillen, waarbij de belangrijkste zijn:

- Het neerslagtekort in 2022 piekt begin september, terwijl de grondwaterdroogte-indicator in augustus het maximum bereikt. In de tussenliggende periode valt er neerslag wat in werkelijkheid de kade minder droog maakt dan het neerslagtekort aangeeft. De neerslag en

verdamping drogen de kade op een andere manier uit dan het neerslagtekort aanneemt (cumulatieve som).

- Na een droge zomer kan het neerslagtekort lange tijd hoog blijven en duurt het herstel erg lang (tot het neerslagtekort laag of nul is). Het neerslagtekort is niet goed bruikbaar voor deze late zomer. De grondwaterdroogte-indicator geeft een beter beeld hoe de droogte herstelt, waarbij de grondwaterstand in werkelijkheid veel sneller naar de normale situatie terugkeert (de grondwaterdroogte-indicator wordt veel sneller minder extreem).

**FIGUUR 12 EEN VOORBEELD VAN HET VERLOOP VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR (LINKER Y-AS) EN HET NEERSLAGTEKORT (RECHTER Y-AS) O.B.V. DE NEERSLAG EN VERDAMPING BIJ KNMI-STATION ROTTERDAM VOOR DE JAREN 2022 EN 2023. HET GEBRUIKTE TIJDREEKSMODEL VOOR HET AFLEIDEN VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR IS DIE VAN DE BERMWEGKADE**



### 3.4 GEBRUIKTE PEILBUISMETINGEN EN TIJDREEKSMODELLEN

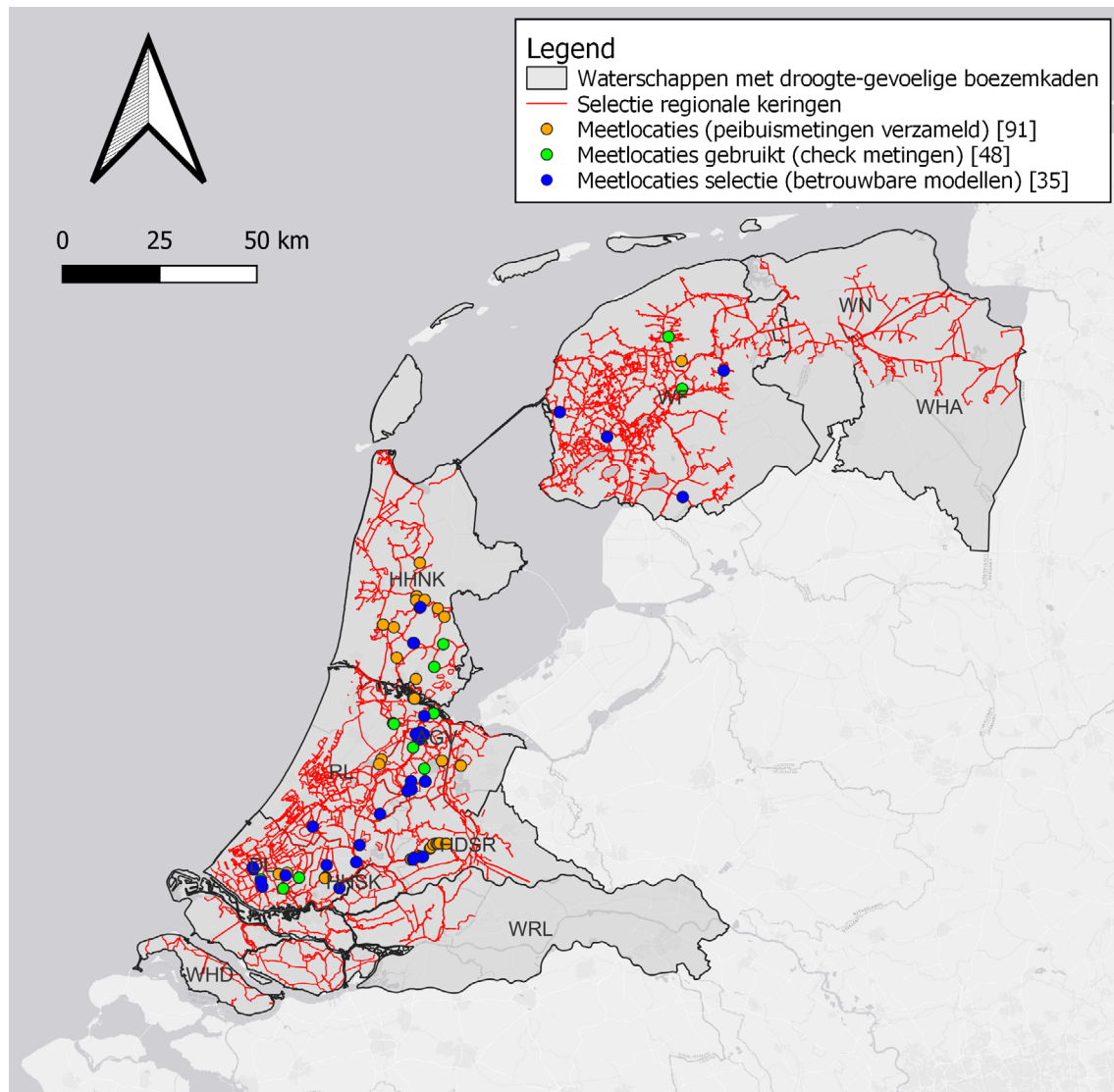
De droogte kan ruimtelijk variëren binnen een beheergebied als gevolg van variatie in neerslag. Deze variatie in neerslag kan rekening mee gehouden worden door gebruik te maken van de KNMI-neerslagradars die de ruimtelijke neerslag in Nederland meet met een resolutie van 1km bij 1km. In de praktijk wordt dit gebruikt door (sommige) waterschappen om een verfijnd beeld te krijgen van de droogte in hun gebied. Ook kan droogte ruimtelijk variëren doordat de reactie van de grondwaterstand in dijken kan verschillen, waarbij de ene dijk sneller uitdroogt dan de ander. Deze droogtevariëte in dijken is weinig over bekend. Door tijdreeksmodellen bij meerdere boezemkaden te beschouwen kan deze variatie wel beschouwd worden. Een vervolgstap is kijken of te onderscheiden is welke type dijken sneller uitdrogen dan anderen, door te kijken naar kenmerken als dijkprofiel, verval of ondergrond.

In totaal zijn er op 91 meetlocaties peilbuismetingen verzameld, waarvan er op 48 locatie de metingen langer dan 2,5 jaar zijn en visueel gezien geen vreemd gedrag vertonen, zoals drift, het ontbreken van variatie of onverklaarbare sprongen. Ook is gekeken bij elke locatie of het wel daadwerkelijk een dijk betreft en de peilbuis in de taludzone staat (tussen binnenkruin en teen). Dit is de meest relevante zone voor stabiliteit waar ook de meeste dynamiek is te verwachten. Bij meetlocaties kunnen meerdere peilbuismetingen beschikbaar zijn en in totaal zijn er bij deze 48 locaties voor 122 peilbuismetingen tijdreeksmodellen opgesteld. Vervolgens worden alleen **betrouwbare modellen geselecteerd**, waarvoor twee criteria zijn opgesteld:

1. Een minimale goodness-of-fit: De verklaarde variantie ( $r^2$ ), een maat die aangeeft hoe goed het model de variatie in de grondwaterstand kan verklaren, moet gelijk of groter zijn dan 0.7.
2. De 95% responstijd van het model mag niet langer zijn dan de lengte van de meetreeks. Dit is een impliciete eis aan de lengte van de tijdreeks ten opzichte van de responstijd. Wanneer het model een lange responstijd heeft, is ook een langere meetreeks nodig om een model op te zetten die de respons / dynamiek kan verklaren.

Van de 48 gebruikte locaties zijn voor 35 locaties modellen beschikbaar die aan de gestelde criteria voldoen. Deze locaties zijn verspreid over 7 waterschappen (zie Tabel 1). Deze modellen beschrijven de variatie in de grondwaterstand aan de hand van neerslag en verdamping en geven een beeld hoe de geohydrologische respons kan verschillen bij boezemkaden. Deze groep modellen worden in het vervolg gebruikt.

**FIGUUR 13** KAART MET ALLE VERZAMELDE, GEBRUIKTE (>2.5 JAAR EN VISUELE CHECK) EN GESELECTEERDE (VOLDOET AAN BETROUWBAARHEIDSCRITERIA) MEETLOCATIES BIJ BOEZEMKADEN



**TABEL 1** AANTAL GESELECTEERDE LOCATIES PER WATERSCHAP WAARVOOR BETROUWBARE MODELLEN ZIJN OPGESTELD

Waterschap	Aantal locaties met betrouwbare modellen
De Stichtse Rijnlanden	3
HHS van Delfland	6
Schieland en de Krimpenerwaard	3
HH van Rijnland	3
HH Amstel, Gooi en Vecht	13
HH Hollands Noorderkwartier	3
Wetterskip Fryslân	4
<b>Totaal</b>	<b>35</b>

### 3.5 UITDROGING VERSCHILLENDE DIJKEN

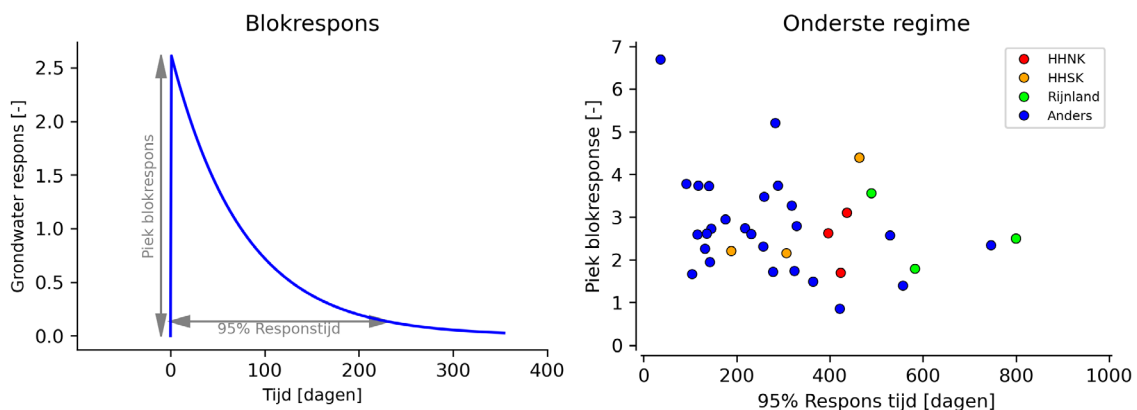
Eerder is een voorbeeld gegeven van de grondwaterdroogte-indicator voor één boezemkade. Met de geselecteerde groep modellen is gekeken hoe de grondwaterdroogte-indicator varieert bij verschillende kaden en deze variatie te duiden (paragraaf 3.5.1). Aanvullend is in paragraaf 3.5.2 gekeken naar de absolute droogte die ook een rol speelt bij de droogteproblematiek.

#### 3.5.1 VARIATIE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR

Tijdens droge zomers bepaalt de impuls respons functie, voortaan blokrespons, van het onderste regime van het TARSO-model de manier waarop de grondwaterstand daalt. Deze blokrespons is gekenmerkt door de piek van de blokrespons en de 95% responstijd (zie de linker grafiek in Figuur 14). De piek van de blokrespons geeft de grondwaterstandverhoging aan wanneer het op één dag 1 mm zou regenen: een piek blok respons van 4 houdt in dat de grondwaterstand 4 mm omhooggaat als het in een dag 1 mm regent. De 95% responstijd zegt wat over het geheugen van de dijk en hoelang het duurt voordat deze grondwaterstandverhoging of verlaging is uitgewerkt.

Die piekblokrespons en 95% responstijd variëren per dijk (zie rechter grafiek in Figuur 14), waaraan de variatie in de grondwaterdroogte-indicator gelinkt kan worden.

**FIGUUR 14** LINKS: VISUALISATIE VAN DE PIEK BLOKRESPONS EN DE 95% RESPONSTIJD VAN DE IMPULS RESPONSE FUNCTIE. RECHTS: HOE DEZE KENMERKEN VAN DE IMPULS RESPONSE FUNCTIE VERSCHILLEN BIJ DE DIJKEN, WAARBIJ DE KADEN BIJ ENKELE HOOGHEEMRAADSCHAPPEN ZIJN UITGELICHT T.O.V. DE KADEN BIJ ANDERE WATERSCHAPPEN

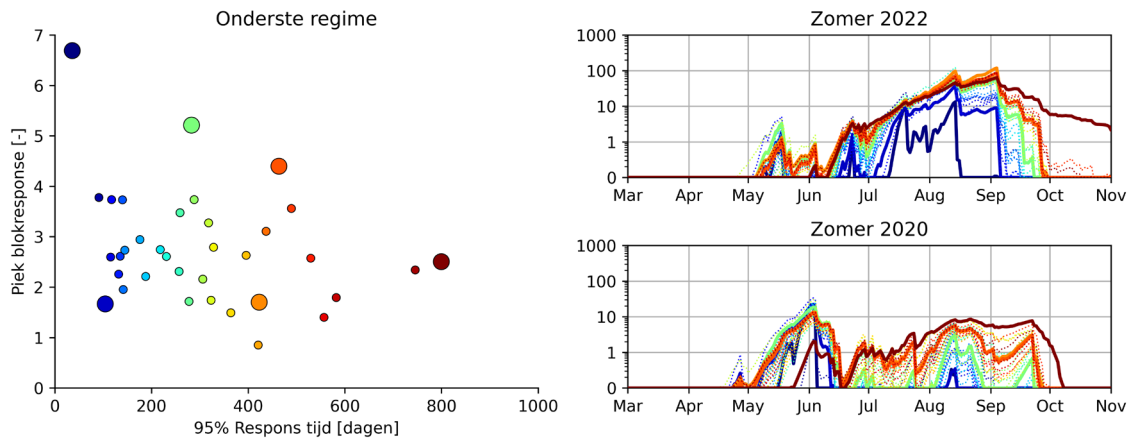


De variatie in de grondwaterdroogte-indicator hangt voornamelijk af van de 95% responstijd, het geheugen van de dijk. Wanneer het geheugen van de dijk groot is, houdt de droogte in de dijk langer aan dan als het geheugen kort is (zie Figuur 15). Dit klinkt tegenstrijdig, omdat ook geredeneerd kan worden dat een dijk langzamer leegloopt na een natte winter. Echter, de impuls waarmee de response functie vermenigvuldigd wordt om het effect op het grondwater te modelleren is het neerslagoverschot waar naast neerslag ook verdamping in zit. Dit betekent dat tijdens zomer ook uitdroging langer aanhoudt. De grondwaterdroogte-indicator bij de kade met de hoogste 95% response tijd (**donkerrode** punt en lijn in Figuur 15) blijft het langst een hoge waarde houden ná de droge zomer. De grondwaterstand kan lang weg blijven zaken, terwijl als het geheugen kort is, de grondwaterstand snel een minimum bereikt en niet veel lager komt (zie paragraaf 3.5.2).

Eén kade wijkt sterk af van de rest, een kade bij Wetterskip Fryslan, welke een 95% responstijd heeft van slechts één maand. Door dit korte geheugen droogt de kade zeer beperkt uit en herstelt deze ook sneller ná de droogte dan de rest.

Dit is een regionale kering, gelegen langs de Leyen, die hoofdzakelijk uit zand bestaat (de enige binnen de geselecteerde modellen) wat verklaart waarom de responstijd zeer kort is (veel hogere doorlatendheid dan veen en klei). Deze kade laten we in de vervolg figuren buiten beschouwing en voor het afleiden van de grondwaterdroogte-indicator gebruiken we peilbuismetingen en tijdreeksmodellen van 34 boezemkaden.

**FIGUUR 15** DE KENMERKEN VAN DE BLOKRESPONS VOOR DE VERSCHILLENDE DIJKEN (LINKS), WAARBIJ DE KLEUREN OVEREENKOMEN MET DE LIJNEN VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR (RECHTS). ZES DIJKEN ZIJN UITGELICHT MET EEN GROTER BOLLETJE (LINKS) EN EEN DIKKERE LIJN (RECHTS). HET KLEURVERLOOP IS GELINKT AAN DE 95% RESPONSTIJD



#### VERKLARING VARIATIE

Binnen deze studie is kort gekeken of de variatie in de response functies gelinkt kon worden aan dijkenkenmerken (helling en ondergrond), maar door tijdgebrek is dit geen volledige analyse geworden. Hierom wordt aanbevolen om dit nog verder uit te zoeken, om te kijken of bepaalde dijkenkenmerken ervoor zorgen dat de grondwaterstand verder kan uitdrogen dan andere kaden.

#### 3.5.2 ABSOLUTE DROOGTE DIJKEN

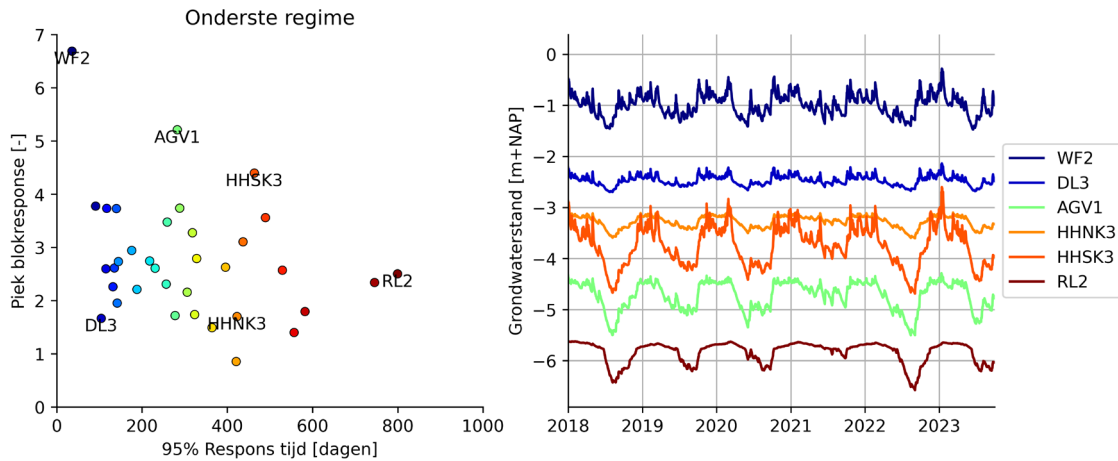
De grondwaterdroogte-indicator is een relatieve droogte-maat, maar ook de absolute droogte speelt een rol bij de droogteproblematiek; in welke mate de grondwaterstand in absolute zin daalt. Het kan relatief gezien heel droog zijn, waarmee wordt bedoeld dat de grondwaterstand zeer extreem is en zelden voorkomt, maar dit zegt niet direct iets over de absolute droogte. Die zeer extreme grondwaterstand die bijvoorbeeld eens in de 100 jaar voorkomt, kan 50cm onder de gemiddeld jaarlijks optredende grondwaterstand liggen, maar ook 200cm. Hierom is ook de absolute droogte relevant.

In sommige gevallen daalt de grondwaterstand niet veel verder wanneer het extremer wordt. Dit is terug te zien in de grondwaterstandreeksen (Figuur 16), waarbij de minimale grondwaterstand bij de kade WF2 of DL3 nauwelijks verschilt door de jaren heen. Bij andere kaden daalt de grondwaterstand flink tijdens een droge zomer, zoals bij RL2 en HHSK3. Een maat wat de absolute droogte kenmerkt is decimeringswaarde, wat de steilheid van de frequentielijn weergeeft. Het is de grondwaterstandsafname bij een 10x kleinere kans. De decimeringswaarde bij WF2 en DL3 zijn klein en is de grondwaterstandsafname in extreme situaties zeer beperkt (zie Figuur 17).

De decimeringswaarde van een kade wordt bepaald door zowel de 95% responstijd en de piek blokrespons, zoals is te zien in Figuur 17.



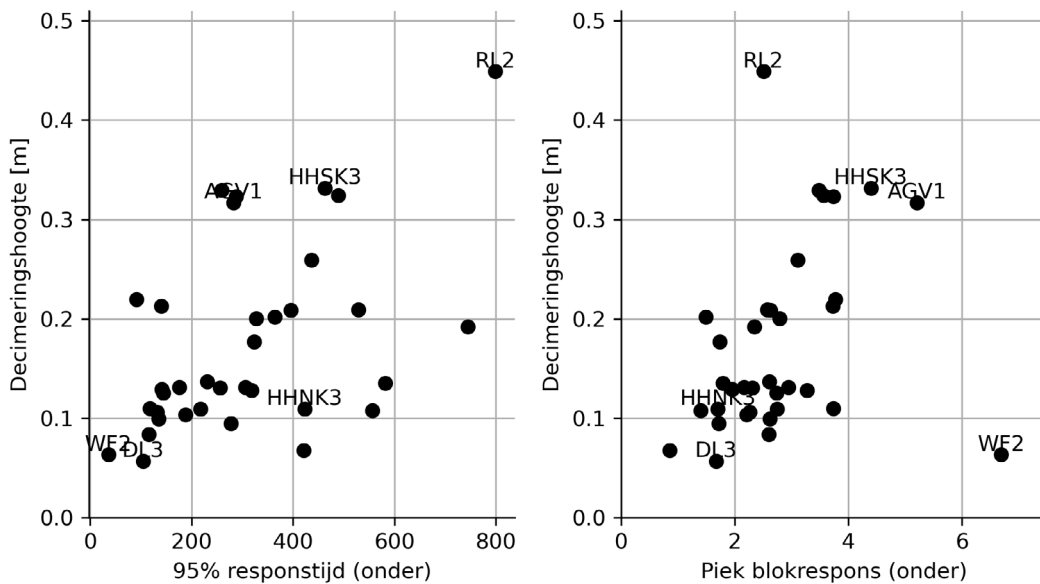
**FIGUUR 16** LINKS: KENMERKEN VAN DE BLOKRESPONS VAN HET ONDERSTE REGIME VAN HET TARSO-MODEL. RECHTS: DE GEMODELLEERDE GRONDWATERSTANDSREEKSEN O.B.V. NEERSLAG EN VERDAMPING BIJ ROTTERDAM



De kaden die absoluut gezien het meeste kunnen uitdrogen (kaden met de hoogste decimeringswaarden) hebben een hoge 95% responstijd en een hoge piek blokrespons. De droogte-indicator is een relatieve droogte maat, waarbij we zagen dat de 95% responstijd de voornaamste bepalende factor is. Wanneer een dijk een lage piekblokrespons heeft, daalt de grondwaterstand in absolute zin minder dan een dijk met een hoge piekblokrespons (wanneer beiden dezelfde 95% responstijd hebben), maar hebben beiden een vergelijkbaar verloop van de grondwaterdroogte-indicator.

**De kaden die vanuit waterhuishoudkundige perspectief het meest droogtegevoelig zijn, zijn kaden met een lange 95% responstijd en een hoge piek blokrespons.** Dit zijn kaden die het langst en absoluut het meest kunnen uitdrogen.

**FIGUUR 17** DE DECIMERINGSWAARDE VAN DE AFGELEIDE GRONDWATERSTATISTIEK UITGEZET TEGENOVER DE 95% RESPONSTIJD (LINKS) EN DE PIEK BLOKRESPONS (RECHTS) VOOR VERSCHILLENDE DIJKEN. ZOWEL DE RESPONSTIJD ALS DE PIEK BLOKRESPONS HEBBEN INVLOED OP DE DECIMERINGSWAARDE VAN DE GRONDWATERSTAND



### 3.6 GRENSWAARDEN

In de praktijk zijn signaal- of grenswaarden nuttig ter onderbouwing van protocollen voor het op- en afschalen van de organisatie om waakzaam te zijn, te inspecteren en waar nodig maatregelen te nemen. Ook is het een manier om de ernst van de situatie te duiden om zo mensen binnen en buiten de organisatie alert te maken en te waarschuwen. Het neerslagtekort wordt al tientallen jaren gebruikt om droogte te duiden en hebben keringbeheerders een gevoel voor wanneer bij droogte schadebeelden ontstaan. Deze ervaring bestaat (nog) niet voor de nieuwe grondwaterdroogte-indicator en kan worden opgedaan door het te gebruiken.

Wel geeft het getal zelf al een risico-beeld, doordat het informatie geeft over hoe vaak gemiddeld deze grondwaterdroogte voorkomt (e.g. één in de 10 jaar) en direct informatie geeft over de ernst van de situatie. Alleen, hoe extreem moet het zijn, voordat een waterschap opschaaft? Het is lastig om hier direct antwoord op te geven, maar een vergelijking met het neerslagtekort kan wel een indicatie geven van grenswaarden. In Tabel 2 zijn de maximale neerslagtekorten in verschillende jaren weergegeven (bij het KNMI station Rotterdam) en de mediaan en bandbreedte van de maximale grondwaterdroogte-indicator in datzelfde jaar.

Om de droogtesituatie te duiden zijn voor de grondwaterdroogte-indicator drie drempelwaarden gekozen, namelijk één per 1, 10 en 100 jaar, wat overgangen zijn naar een nieuw droogteniveau:

- Een grondwaterdroogte-indicator kleiner dan 1 betekent dat deze omstandigheden gemiddeld gezien jaarlijks voorkomen: een **normale situatie**. Wordt de indicator groter dan 1 kan de situatie als droger dan gemiddeld gezien, ofwel **matig droog**.
- Als we kijken naar de bandbreedte van de grondwaterdroogte-indicator zien we dat gemiddeld een grondwaterdroogte-indicator van 10 wordt bereikt bij een Neerslagtekort van ~175mm, wat voor HHSK de grenswaarde is voor opschaling. Hierom gebruiken we het getal 10 als drempelwaarde tot inspectie, waarbij de situatie **ernstig droog** wordt. Deze droogte komt minder vaak voor dan gemiddeld eens in de 10 jaar.
- Wanneer de grondwaterdroogte-indicator boven de 100 komt, wordt de situatie kritiek. Veel boezemkaden hebben een norm hebben van circa 1/100 kans<sup>3</sup> per jaar, wat betekent dat de droogtesituatie richting de normsituatie van de belasting komt. Deze droogte komt zelden voor.

Voor de voorbeelduitwerking worden de grenswaarden, zoals in Figuur 18 zijn weergegeven, gebruikt.

FIGUUR 18

DROOGTENIVEAUS EN DREMPELWAARDEN VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR OM DE DROOGTE TE DUIDEN



3 Dit is een overschrijdingskans van een maximale waterstand die de kering veilig moet kunnen keren. Voor droogtesituatie is deze normering wat ongelukkig, omdat voor de veiligheid de waterstandsfluctuaties in deze situatie irrelevant zijn.

**TABEL 2** DE MAXIMALE WAARDEN VOOR HET NEERSLAGTEKORT EN DE NIEUWE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR VOOR ENKELE JAREN O.B.V. NEERSLAG EN VERDAMPING BIJ ROTTERDAM, GESORTEERD OP HET MAXIMALE NEERSLAGTEKORT IN HET JAAR. DE KLEUREN KOMEN OVEREEN MET DE DROOGTENIVEAUS ZOALS IN FIGUUR 18 ZIJN WEERGEGEVEN

Jaar	Neerslagtekort	Grondwaterdroogte-indicator	
		Mediaan	Bandbreedte
2022	347	68	122 - 36
2018	314	72	178 - 28
1995	300	44	88 - 20
2003	292	40	100 - 16
1990	262	22	40 - 14
2015	250	14	20 - 8
1989	244	8	10 - 2
2009	243	4	10 - 2
1994	242	14	20 - 8
2006	241	22	46 - 14
2023	230	14	44 - 6
2020	229	14	34 - 6
1996	223	6	22 - 2
2010	210	6	10 - 4
2019	209	4	10 - 0
2013	197	4	8 - 4
2017	189	6	10 - 6
2011	184	6	14 - 0
1997	179	2	8 - 0
2001	174	4	6 - 0
2014	169	4	6 - 2
1988	168	2	4 - 0
1991	159	4	6 - 0
2016	158	0	4 - 0
1992	154	2	6 - 0
1993	153	4	6 - 0

### 3.7 AFGEKEURDE MODELLEN

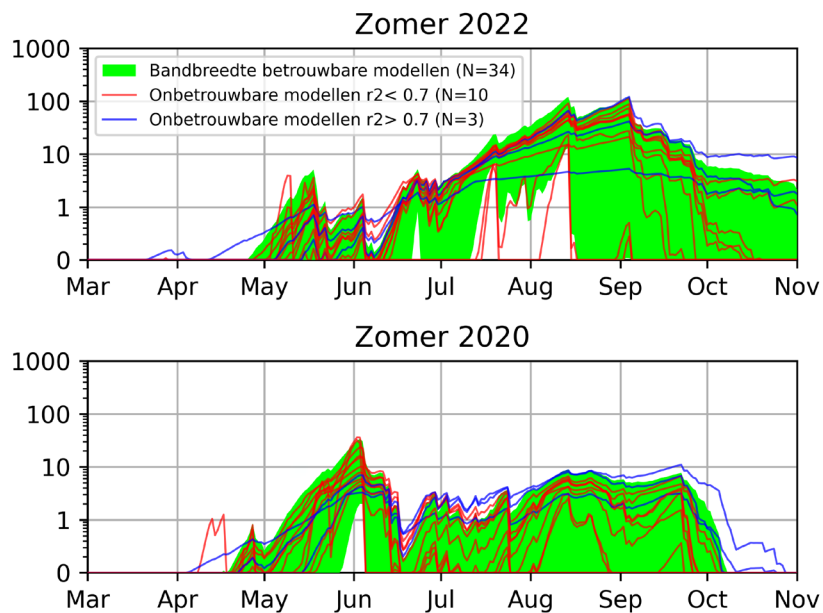
Van de in totaal 48 locaties, zijn bij 13 locaties (27%) de modellen onbetrouwbaar. Van deze 13 locaties hebben de modellen bij 3 locaties een  $r^2$  groter dan 0.7 (zie Bijlage A1), wat aangeeft dat het model redelijkerwijs de grondwaterstanden kan verklaren, en bij 10 locaties een  $r^2$  kleiner dan 0.7 (zie Bijlage A2) wat inhoudt dat het model niet goed de grondwaterstanden verklaart.

De redenen dat modellen niet goed de grondwaterstanden kunnen verklaren kunnen uiteenlopend zijn. Het kan onder anderen komen door dat de grondwaterstand nauwelijks fluctueert (en de kleine fluctuaties moeilijk te modelleren zijn), foute metingen van de grondwaterstand of neerslag en de variatie van de grondwaterstand is complexer dan met het model is te beschrijven (neerslag en verdamping of andere verklarende variabelen beïnvloeden op een andere manier de grondwaterstand).

Modellen met een  $r^2$  groter dan 0.7 kunnen de grondwaterstand wel goed verklaren, maar zijn onbetrouwbaar doordat de modelparameters niet goed geschat kunnen worden; de meetreeksen relatief kort ten opzichte van de responstijd van de modellen.

Door deze modellen niet te gebruiken, missen we wellicht uitdrogingsgedrag van kaden. Eerder zagen we dat modellen met een lange responstijd het meest uitdrogen (absoluut en relatief), wat betekent dat juist onbetrouwbare modellen kaden zijn die het meest uitdrogen. Er is gekeken of grondwaterdroogte-indicator van de onbetrouwbare modellen binnen de bandbreedte vallen van de betrouwbare modellen (zie Figuur 19). De onbetrouwbare modellen liggen grotendeels binnen de bandbreedte van de betrouwbare modellen, wat aangeeft dat we wat betreft deze droogte-indicator niet gedrag missen. De kade waarvan de droogte-indicator het meest boven de bandbreedte ligt is 'WF5' (zie Bijlage A1 voor de modelresultaten van deze kade). Dit is een kade, waarbij het herstel ná extreem droge zomers erg lang duurt en zelfs meerdere jaren kan bestrijken, volgens het model. Of dat daadwerkelijk zo is, is lastig te zeggen, omdat er geen metingen zijn tijdens deze extreem droge zomers. Gezien de modelparameters in relatie tot de lengte van de meetreeks, is dit niet met zekerheid te zeggen en laten we deze kade buiten beschouwing.

**FIGUUR 19** BANDBREEDTE VAN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR O.B.V. DE BETROUWBARE MODELLEN EN HET VERLOOP VAN DE ONBETROUWBARE MODELLEN VOOR TWEE ZOMERS



# 4

## VOORBEELDUITWERKING

### WORKSHOP DECEMBER 2023

In december 2023 heeft een workshop plaatsgevonden, waarbij het gebruik van de nieuwe droogte-indicator is besproken met eindgebruikers (o.a. met waterveiligheidsadviseurs en dijkbeheerders van de waterschappen HHSK en HHNK, Rijkswaterstaat en de STOWA). Bij deze workshop zijn enkele historisch opgetreden droge zomers beschouwd, waarin geïnspecteerd is. Hierbij is het droogte-beeld o.b.v. het neerslagtekort en de nieuwe droogte-indicator vergeleken en naast de werkelijke inspecties gelegd. Er is een discussie gevoerd over de bruikbaarheid en de aansluiting bij het droogte-beeld van de dijkbeheerders. Deze voorbeelduitwerking is een samenvatting van de uitkomsten van de workshop.

### 4.1 VERSIMPELDE INSPECTIEPROTOCOLLEN

Om het gebruik van de nieuwe grondwaterdroogte-indicator te testen is gekeken naar drie recente droge zomers bij het Hoogheemraadschap van Schieland & de Krimpenerwaard: 2019, 2020 en 2022. Tijdens deze droge zomers zijn inspecties bij HHSK uitgevoerd op het moment dat het neerslagtekort een bepaalde grenswaarde overschrijdt, zoals de meeste waterschappen dat doen. De ontwikkeling van het droogte-beeld dat tot stand komt via het neerslagtekort en de nieuwe grondwaterdroogte-indicator is vergeleken, waarbij de twee droogte-indicatoren verschillende inspectieperioden kunnen aanduiden. Verder is het interessant om dit te vergelijken met de werkelijke inspecties, omdat de droogte-indicator ter ondersteuning van keuzes is, maar ook wordt er in de praktijk van afgeweken op basis van het droogtebeeld buiten.

In deze voorbeelduitwerking is een versimpeld inspectieprotocol gebruikt, waarbij twee wekelijkse inspecties worden gestart wanneer het Neerslagtekort boven dan 175 mm komt, zoals ook in de STOWA-richtlijnen staat voorgeschreven. Afschaling en stoppen van inspecties gebeurt in de praktijk wanneer schadebeelden afnemen, terwijl het neerslagtekort nog wel boven de 175mm kan liggen. In dit voorbeeld is niet gekeken naar variatie van de neerslag en verdamping in het gebied (of gebiedsgemiddelde waarden), maar alleen naar de neerslag en verdamping bij Rotterdam. Deze waarden zijn redelijk representatief voor wat er in het gebied gebeurt en zijn goed als vergelijking van de droogte-indicatoren.

Wel wordt rekening gehouden in de variatie in droogte bij dijken (zie paragraaf 3.5). Voor de start van inspectie wordt voor de grondwaterdroogte-indicator een drempelwaarde van één per 10 jaar gebruikt, waarbij een kade deze drempelwaarde overschrijdt.

## 4.2 ENKELE RECENTE DROGE ZOMERS

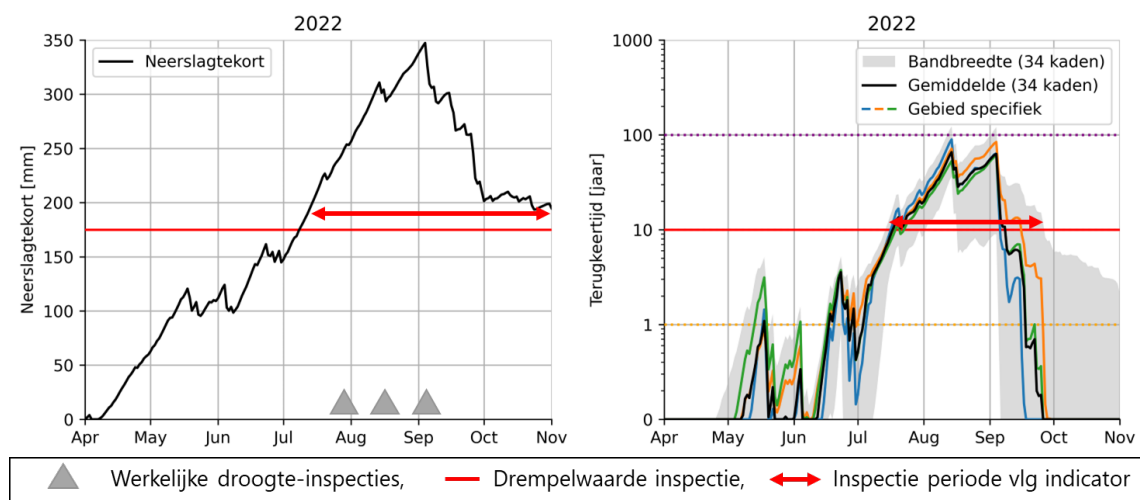
### 4.2.1 DE ZOMER VAN 2022

De zomer van 2022 is recent de meest extreme droge zomer. Het neerslagtekort bij Rotterdam bereikte 350 mm begin september na een zeer warme, extreem zonnige en droge zomer. HHSK heeft in deze zomer drie inspectiemomenten gehad tussen eind juli en begin september.

De start van de inspectie voor beide droogte-indicatoren was vergelijkbaar geweest, namelijk halverwege juli. Wat opvallend is, is dat het neerslagtekort tot eind oktober boven 175 mm blijft. Dit geeft aan dat het nog droog is, terwijl de grondwaterdroogte-indicator al sneller onder de drempelwaarde van 10 valt. Het gemiddelde van de grondwaterdroogte-indicator ligt eind september voor de meeste kaden al onder de één, nadat er bijna 150 mm neerslag is gevallen.

De dijkbeheerders gaven tijdens de workshop aan dat het afschalen van de crisisorganisatie vaak lastig is, omdat het neerslagtekort na een droge zomer lang hoog blijft wat doet vermoeden dat er nog steeds droogte is in het gebied. De grondwaterdroogte-indicator sluit beter aan bij de observaties van de dijkbeheerders.

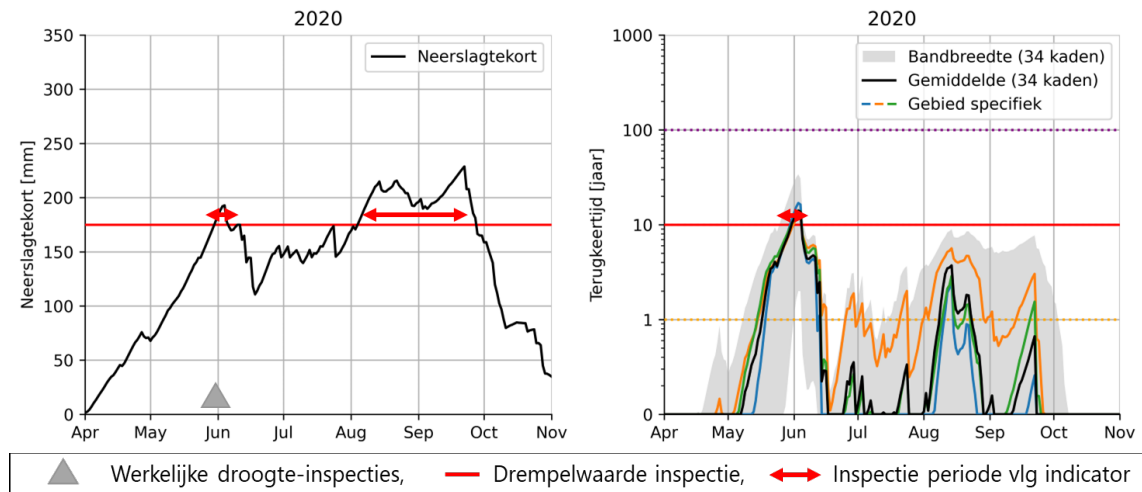
FIGUUR 20 HET VERLOOP VAN HET NEERSLAGTEKORT (LINKS) EN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR (RECHTS) IN 2022



### 4.2.2 DE ZOMER VAN 2020

Vanaf halverwege maart tot eind mei was het erg droog in 2020, met voorafgaand een vrij natte winter. Het neerslagtekort bereikte zijn maximum eind september, terwijl de grondwaterdroogte-indicator piekte begin juni. De werkelijke droogte-inspecties vonden begin juni plaats. Volgens het neerslagtekort zou ook later in het jaar geïnspecteerd moeten worden, wanneer opnieuw de 175 mm wordt overschreden, maar vanwege de toen geldende het Corona-maatregelen en de weersverwachtingen is toen besloten om niet opnieuw een inspectierond uit te voeren. De grondwaterdroogte-indicator bevestigt dit beeld. De neerslag die in de maanden juni en juli viel heeft de kade voldoende nat gemaakt om onder de getalswaarde 10 te blijven. Wel kwam de grondwaterdroogte-indicator boven de 10 eind mei/begin juni. Door ook naar weersverwachtingen te kijken, kon wellicht voorzien worden dat het later ging regenen en de droogte afnam, waardoor inspecties niet nodig waren.

FIGUUR 21 HET VERLOOP VAN HET NEERSLAGTEKORT (LINKS) EN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR (RECHTS) IN 2020

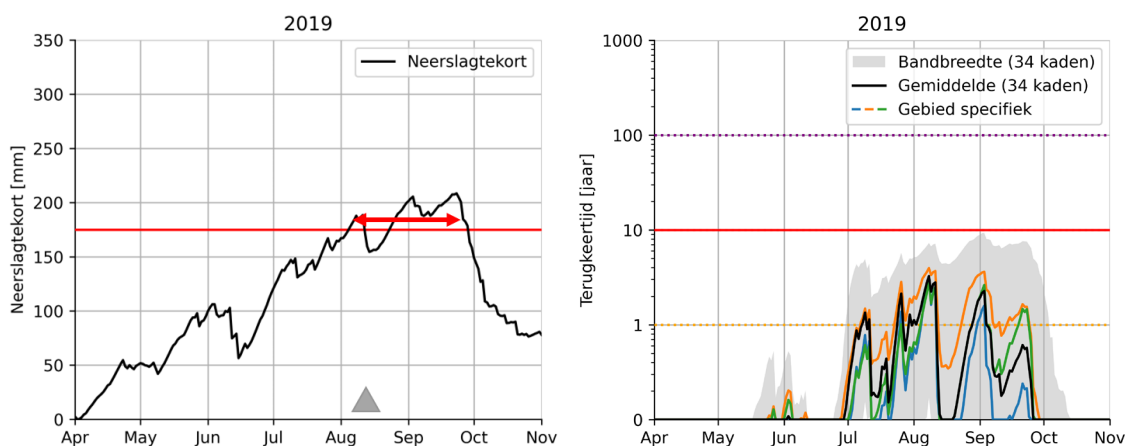


#### 4.2.3 DE ZOMER VAN 2019

De zomer van 2019 was zeer warm, zeer zonnig en aan de droge kant. Het was een buiige zomer, wat ook duidelijk is terug te zien in het neerslagtekort; het neerslagtekort loopt gestaag op met een grilliger patroon dan de andere zomers (veel ups en downs). Uiteindelijk vindt in dit jaar het maximale neerslagtekort plaats eind september en zijn in augustus droogte-inspecties uitgevoerd, toen de drempelwaarde van 175mm wordt overschreden.

Als we kijken naar de grondwaterdroogte-indicator blijft deze onder de drempelwaarde voor inspectie en zouden geen droogte-inspecties zijn uitgevoerd. Dit komt doordat in deze buiige zomers de verdroging van de dijken niet hetzelfde verloopt als de cumulatieve som van neerslag minus verdamping, het neerslagtekort (zie ook Figuur 22).

FIGUUR 22 HET VERLOOP VAN HET NEERSLAGTEKORT (LINKS) EN DE GRONDWATERDROOGTE-INDICATOR (RECHTS) IN 2019



# 5

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 CONCLUSIES

Een nieuwe droogte-indicator is ontwikkeld die een beeld geeft van de werkelijke droogte in boezemkaden. Deze grondwaterdroogte-indicator geeft de extremiteit van de grondwaterstand in termen van terugkeertijden. Een getalswaarde van 10 geeft aan dat de grondwaterstand in de dijk gemiddeld eens in de 10 jaar voorkomt. Met deze nieuwe droogte-indicator proberen we tekortkomingen van het neerslagtekort te ondervangen, namelijk dat 1) dijken zonder verdamping ook al uitdrogen (of dijken drogen uit door het uitblijven van neerslag) en 2) de reactie van de grondwaterstand wordt gedreven door neerslag en verdamping, maar is complexer dan de cumulatieve som van neerslag en verdamping. Een bijkomend voordeel van de nieuwe droogte-indicator is dat het getal zelf al een beeld geeft over de ernst van de situatie, namelijk hoe vaak gemiddeld deze droogte voorkomt. Ook kan met deze nieuwe droogte-indicator rekening gehouden met de variatie in uitdroging bij boezemkaden als gevolg van geohydrologische verschillen, terwijl dit bij het neerslagtekort niet mogelijk is.

Met de ontwikkelde methode kan de grondwaterdroogte-indicator geschat worden voor elke dijk in Nederland, op basis van de lokale neerslag en verdamping. Deze schatting is gebaseerd op peilbuismetingen bij 34 boezemkaden verspreid over Noord- en West-Nederland, waarvoor tijdreeksmodellen zijn opgezet die response van de grondwaterstand beschrijven. Op basis van de droogte-extremiteit en vergelijking met het neerslagtekort, zijn vier droogteniveaus afgeleid (normaal, matig, ernstig en kritiek) waarbij een grondwaterdroogte-indicator van 10 (een grondwaterdroogte die gemiddeld eens in de 10 jaar voorkomt) is gekozen als drempelwaarde voor de start van inspectie en het droogteniveau ernstig wordt. Wanneer de droogte verder toeneemt richting de normsituatie (grondwaterdroogte-indicator van 100) wordt het droogteniveau kritiek.

De grondwaterdroogte-indicator is toegepast bij enkele historisch opgetreden droge zomers (2022, 2020 en 2019) waar droogte-inspecties plaatsvonden binnen het beheergebied van HHSK, welke de STOWA-richtlijnen voor droogte-inspecties volgen. Hierbij is het droogtebeeld op basis van het neerslagtekort en de nieuwe droogte-indicator vergeleken en naast de werkelijke inspecties gelegd, waarbij de belangrijkste bevindingen zijn:

- De droogte-inspectie startte in de zomers van 2022 en 2020 op ongeveer hetzelfde moment, terwijl tijdens de zomer van 2019 de drempelwaarde voor inspectie bij de grondwaterdroogte-indicator niet is behaald. Dit komt doordat de droogte in de kaden beperkt is door de buiige zomer. Door in werkelijkheid ook te kijken naar weersverwachtingen waren wellicht de inspecties in 2020 ook onnodig geweest, doordat aankomende buien de droogte verlaagden.
- De grondwaterdroogte-indicator laat zien dat de droogte in de kering sneller herstelt dan het neerslagtekort aangeeft. Dit sluit aan bij veldwaarnemingen en ook de werkelijke werkwijze van waterschappen. Op deze manier helpt de grondwaterdroogte-indicator ter onderbouwing voor het afschalen van de crisisorganisatie bij de waterschappen.



## 5.2 AANBEVELINGEN

### 5.2.1 DE TOEPASSING IN DE PRAKTIJK

- **Ontwikkel een web-viewer** waarbij de grondwaterdroogte-indicator en neerslagtekort continue te bekijken is (historisch en ook voorspelling). Op deze manier kunnen gebruikers de twee indicatoren zelf vergelijken (en de verschillen ervaren) en krijgen ze gevoel voor de getalswaarden. Dit is belangrijk om ook draagvlak te hebben voor de drempelwaarden voor het op- en afschalen van de crisissituatie.
- De grondwater statistiek wordt afgeleid met een langjarige neerslag en verdampingsreeks. Wanneer het klimaat verandert, verandert in principe ook de grondwaterstatistiek. Als een grondwaterstand van -0.5 m+NAP een terugkeertijd van 10 jaar had, kan dat in de toekomst een terugkeertijd van 2 jaar hebben. Dit is het nadeel van een relatieve droogte-maat. Daarom wordt geadviseerd om **voor nu de grondwaterdroogte-indicator af te leiden op basis van het huidige klimaat** en niet elk jaar opnieuw statistiek af te leiden voor het nieuwe klimaat. Dit kan in de toekomst heroverwogen worden, wanneer meer extremere zomers hebben plaatsgevonden en ook meer ervaring is opgedaan met deze nieuwe indicator.

### 5.2.2 VERDER ONDERZOEK

- **Onderzoek of er een verband is tussen dijk-kenmerken en de response functies.** Op deze manier kan wellicht ook vanuit een belastingperspectief inzicht gekregen worden, welke dijken kwetsbaar zijn voor droogte en welke niet. Een eerste verkennende analyse liet geen verband zien tussen helling en de response functies. De helling van een dijk is in sommige gevallen ook niet zo eenvoudig af te leiden als het lijkt door bijvoorbeeld de aanwezigheid van binnenbermen. Met een grondigere analyse kan hier wellicht meer uitgehaald worden, maar ook de conclusie dat er geen duidelijk verband is tussen de impuls response functies en dijkkenmerken kan een relevante conclusie zijn.
- Binnen dit project zijn peilbuismetingen verzameld en tijdreeksmodellen opgezet. Betrouwbare tijdreeksmodellen zijn in een 'database' gezet welke de geohydrologische response van boezemkaden beschrijft. **Laat dit een levende database zijn, welke aangevuld kan worden met meer metingen en tijdreeksmodellen** om zo het begrip van de grondwaterstanden in boezemkaden te verbeteren.
- **Vergelijk de ontwikkeling van schadebeelden uit inspecties met verschillende droogte-indicatoren** om zo de aansluiting met veldwaarnemingen te beoordelen. Hierbij moet wel bedacht worden dat schadebeelden een vertekend beeld kunnen tonen, doordat deze alleen maar aanwezig zijn op momenten dat er geïnspecteerd wat tot nog toe altijd is gedaan op basis van het neerslagtekort.
- In deze studie is een nieuwe droogte-indicator ontwikkeld. Eenzelfde aanpak kan gebruikt worden voor de **natte situatie bij dijken, waarbij de extremiteit van de hoge grondwaterstand in termen van terugkeertijden wordt uitgedrukt**. Op dit moment worden inspecties bij regionale keringen bij de natte situatie veelal gelinkt aan de waterstanden in de boezem, terwijl bekend is dat de directe neerslag een grote rol speelt bij de stabiliteit. Om de ernst van de situatie in te schatten kan ook de extremiteit van hoge grondwaterstanden bepaald worden.
- De nieuwe grondwaterdroogte-indicator geeft, zoals de naam doet vermoeden, de grondwaterdroogte weer en niet het bodemvochtdroogte. **Het bodemvocht is eveneens een belangrijke factor bij de droogte-problematiek van dijken, maar is niet beschouwd.** Een link tussen bodemvocht en grondwater is te verwachten, maar deze relatie is onbekend. Eerdere analyses bij het project Droogtemonitoring van de STOWA lieten zien

dat bodemvocht en grondwaterstand zich redelijk onafhankelijk van elkaar lijken te gedragen, waarbij gebrek aan neerslag een grondwaterstand doet dalen, maar bodemvocht meer wordt gedreven door de aanwezigheid van verdamping.

# 6

## REFERENTIES

### 6.1 REFERENTIES

Collenteur, R. A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S. A., & Schaars, F. (2019). Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*, 57(6), 877-885.

STOWA, 2005. Naar een draaiboek van droogtegevoelige kaden

STOWA, 2008. Handreiking inspectie waterkeringen.

STOWA, 2019a. Evaluatie droge zomer 2018 waterkeringen. Auteur: Britt van Haastregt.

STOWA, 2019b, Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019, rapport 19-2019.

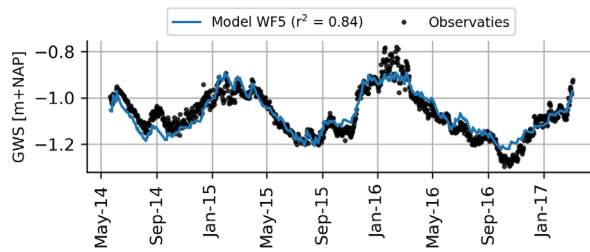
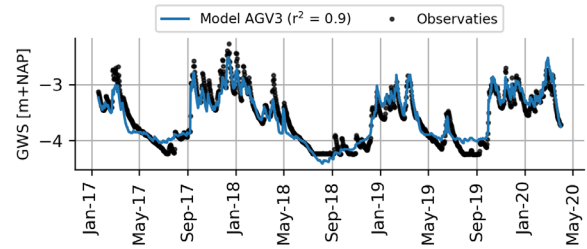
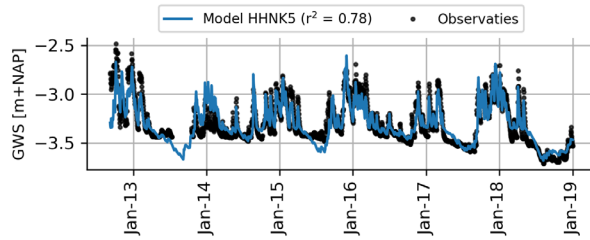
STOWA, 2021. Handleiding tijdreeksanalyse. ISBN 978.90.5773.939.2

HKV, 2023. Tijdreeksanalyse boezemkaden. *Tijdreeksanalyse van freatische lijnen in boezemkaden in het beheergebied van HHSK*. PR4877.10, Auteur: Bart Strijker

# BIJLAGE

## A AFGEKEURDE MODELLEN

### A.1 ONBETROUWBAAR $R^2 > 0.7$



**A.2 ONBETROUWBAAR R2 < 0.7**

