



DROOGTE DOOR KLIMAATVERANDERING VOOR WATERSCHAP RIJN EN IJSSEL

Een inschatting van het effect op de grond- en oppervlaktewaterstanden

BSc Eindopdracht
Student: Simone de Roos
Interne begeleider: ir. K.D. Berends
Externe begeleider: G. van den Houten

BSc Civiele Techniek
University of Twente
28-06-2019



WATERBEHEER: VEILIG EN OP MAAT



Voorwoord

Mijn naam is Simone de Roos en ben 20 jaar oud. Voor de afsluiting van mijn Bachelor Civiele Techniek aan de University of Twente dient een eindopdracht te worden uitgevoerd bij een civieltechnisch bedrijf of civieltechnische instelling. De eindopdracht heeft een duur van 10 weken en wordt vastgelegd in een eindrapport. Ik heb mijn eindopdracht uitgevoerd bij Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) te Doetinchem.

Het onderwerp van deze eindopdracht was snel gevonden. Sinds de start van mijn opleiding heb ik affiniteit gekregen voor water en de huidige milieuproblematiek. Ik ben er erg geboeid door geraakt en had de wens om mijn eindopdracht hierop aan te sluiten. In mijn 10 weken stage heb ik de effecten van hydrologische droogte onderzocht op watergangen van het Waterschap. Het KNMI heeft klimaatverandering gekwantificeerd met onder andere veranderingen in neerslag en verdamping voor de periode tot 2100. Door toekomstige grondwaterstanden in te schatten die gebaseerd zijn op deze veranderingen, kon een verwachting worden gemaakt van de ontwikkeling van de grondwaterstanden. Daarnaast kon er een terugkoppeling worden gemaakt naar de waterhoogte in watergangen van WRIJ, waardoor de frequentie van droogval en laagwater kon worden bepaald en de eventuele verandering ten opzichte van de huidige situatie.

Het lastigste hierbij was om een goede correlatie vinden tussen peilbuizen (grondwaterstanden) en watergangen (waterstanden). Veel peilbuizen hebben een te grote afstand tot de watergang waardoor een correlatie vaak onvoldoende aanwezig was. Door hulp van mijn interne begeleider Koen en mijn externe begeleider Gert is het uiteindelijk gelukt om voor 15 meetstations correlaties te leggen.

Het onderzoek bestond voornamelijk uit het schrijven van scripts. Door het gebruik van het programmeerprogramma MATLAB konden in een korte tijd veel datareeksen worden onderzocht. Ik heb hierdoor mijn programmeervaardigheden aardig opgeschroefd en kan met een gerust hart zeggen dat het prima verlopen is ondanks de onwetendheid die ik voor de start van het onderzoek had.

Door wekelijks (mail)contact te houden met beide begeleiders heb ik veel vragen beantwoord kunnen krijgen. Hiervoor wil ik ze dan ook bedanken en draag daarom dit eindrapport op aan Koen en Gert.

Ook wil ik Frank graag bedanken, met wie ik het gros van de tijd mee kon rijden naar het kantoor.

Ik wil mijn RACE-commissie bedanken. Deze mensen hebben afgezien van het feit dat ik 10 weken op halve aanwezigheid aan de voorbereiding van de roeiwedstrijd heb gewerkt nooit geklaagd en altijd begrepen dat ik mijn best deed om te schipperen tussen Doetinchem, Winterswijk en Enschede. In het speciaal Lilian, die samen met mij de functie 'Commissaris Activisten' vervulde en de weken naar de roeiwedstrijd toe pas in de avonden met mij contact kon leggen.

Daarnaast wil ik natuurlijk mijn ouders bedanken voor de steun die ze me hebben gegeven en de mogelijkheid om weer bij hun in te trekken in Winterswijk gedurende deze stageperiode. Ik wil mijn moeder in het bijzonder bedanken omdat ze altijd haar auto ter beschikking heeft gesteld voor de keren dat ik 's avonds naar Enschede moest voor een commissievergadering.

Ten slotte wil ik mijn vrienden en huisgenoten bedanken, die, ondanks dat ik ze niet veel heb gezien gedurende deze stage, altijd veel interesse hebben getoond in de status van mijn onderzoek en mijn terugkeer naar Winterswijk hebben gerespecteerd. Bovendien hebben ze mij erg geholpen in de voorbereiding van dit onderzoek.

Ik hoop dat u net zo enthousiast raakt over dit onderzoek als dat ik ben, en ik wens u dan ook veel plezier tijdens het lezen van dit eindrapport!

Simone de Roos

12-6-2019, Doetinchem

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	4
1 Inleiding.....	5
Aanleiding	5
Doel	7
Onderzoeksvragen	7
Leeswijzer	7
2 Methodologie	8
Onderzoeksvraag 1	8
Onderzoeksvraag 2	8
Onderzoeksvraag 3	9
Onderzoeksvraag 4	15
Onderzoeksvraag 5	16
Onderzoeksvraag 6	17
Onderzoeksvraag 7	17
3 Resultaten	18
Onderzoeksvraag 1	18
Onderzoeksvraag 2	18
Onderzoeksvraag 3	20
Onderzoeksvraag 4	23
Onderzoeksvraag 5	26
Onderzoeksvraag 6	26
Onderzoeksvraag 7	29
4 Discussie.....	31
5 Conclusie	33
6 Aanbevelingen voor verder onderzoek	35
Geciteerde werken	36
Bijlagen	39
Bijlage I: Flow chart methodologie	40
Bijlage II: Casus ET_{act} en ET_{pot}	41
Bijlage III: Casus percolatie	44
Bijlage IV: Procentuele verandering bij KNMI-klimaatscenario's	51
Bijlage V: Meetstations	52
Bijlage VI: Onderzoeksvraag 1	54
Bijlage VII: Onderzoeksvraag 3	56
Bijlage VIII: Onderzoeksvraag 4	63

Bijlage IX: Onderzoeksvraag 5	64
Bijlage X: Onderzoeksvraag 6	65
Bijlage XI: Resultaten droogtemodel – dagen	70
Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages	74
Bijlage XIII: Resultaten droogtemodel – percentage histogrammen	78
Bijlage XIV: Onderzoeksvraag 7	80

Samenvatting

In dit eindrapport is de impact van klimaatverandering onderzocht op 15 watergangen die worden beheerd door Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ). Er is hierbij gebruik gemaakt van grondwaterstand-, waterstand- en weerobservaties, afkomstig van onder andere WRIJ en het KNMI, maar ook andere externe bronnen zijn geraadpleegd. Het onderzoek dient als indicatie voor WRIJ en heeft uitgezocht bij welke watergangen droogte door klimaatverandering tot 2100 de meeste impact zal gaan geven en in welke mate deze impact zich zal uiten.

Hierbij is er allereerst uitgezocht of er vaker droogte op zal treden door klimaatverandering. In deze eindopdracht is vermeld dat het KNMI geen jaarlijkse droogtetoeename kan ontdekken en dat de droogte van 2018 niet geweten kan worden aan klimaatverandering. Desalniettemin wordt onder invloed van klimaatverandering verwacht dat deze situatie vaker zal optreden. De herhalingsjijd van 2018 is namelijk volgens het KNMI bepaald op 30 jaar, maar met optreden van het klimaatscenario WH in de toekomst (dit is het droogste scenario) zal deze herhalingsjijd 10 jaar worden.

Om de invloed van deze klimaatverandering op de watergangen te onderzoeken, is het effect op de hydrologische droogte in kaart gebracht. Met hydrologische droogte wordt hierbij de extreem lage (grond)waterstanden of zelfs droogval bedoeld (uitdroging van de toplaag van de bodem en verdroging van vegetatie is buiten beschouwing gelaten). Waterstanden modelleren is lastig omdat het systeem van watergangen complex in elkaar zit. Daarom is een grondwater-tijdseriemodel toegepast dat al wordt gebruikt bij WRIJ. Het programma simuleert een tijdreeksgebaseerd grondwatermodel middels de verklarende reeksen neerslag en verdamping, en grondwaterobservaties. Een grondwatervoorspelling kan dan worden verkregen door de verklarende reeksen van het tijdreeksgebaseerde model aan te passen. Dit wordt gedaan door neerslag en verdamping te genereren tot 2100 en hieraan de KNMI-klimaatscenario's toe te voegen.

Met deze 5 verschillende grondwatervoorspellingen (onaangepast en vier klimaatscenario's) en de (lineaire) relatie tussen grondwaterstand en oppervlaktewater zijn waterstanden tot 2100 verkregen per watergangmeetstation. De relatie is hierbij bepaald aan de hand van grondwaterstand- en waterstandobservaties. Na het valideren van zowel de grondwatermodellen als de relaties bleven er 15 watergangen over voor het onderzoek.

De waterstanden van deze watergangen zijn onderzocht op drie verschillende droogteindicatoren: dagen met extreem lage waterstanden, dagen op of onder het meetminimum van het meetstation en dagen waarop de watergang was drooggevallen. Aangezien er slechts bij 4 van de 15 watergangen in de simulaties droogval optrad en bij 7 van de 15 watergangen dagen op of onder het meetminimum, is voor de conclusie gekeken naar extreem lage waterstanden die optreden bij elke watergang. Een dag is hierbij als droog gekenmerkt als de waterstand zich in de laagste 10% aan waterstanden bevindt, gebaseerd op een opgestelde normaalverdeling van de gemeten observaties. Door de procentuele verandering van elk klimaatscenario ten opzichte van het onaangepaste scenario te berekenen, kon inzicht worden verkregen in welke watergangen er het meest gevoelig zijn voor een klimaatverandering en daardoor ook frequenter droge dagen zullen hebben. Voor een overzicht van de resultaten van deze vergelijking wordt verwezen naar Tabel 3 op pagina 27. De watergangmeetstations staan hierbij op volgorde van meest naar minst gevoelig.

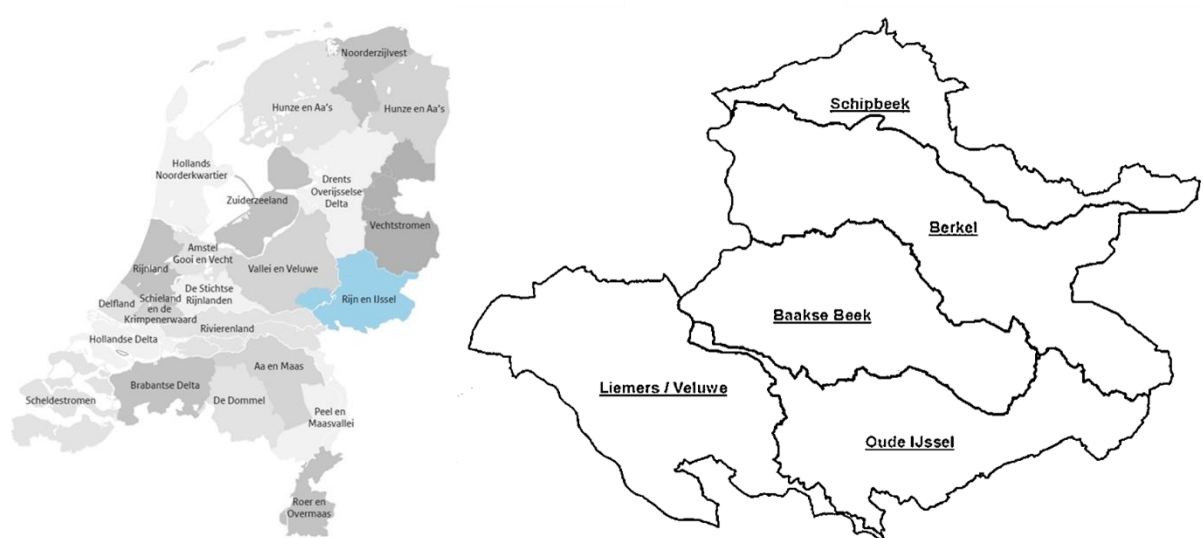
Om deze volgorde van klimaatgevoeligheid proberen te verklaren zijn de meetstations gekoppeld aan de bijbehorende watergangen met de bijbehorende gebiedskenmerken. De gebiedskenmerken grondsoort, hoogte en (sub)stroomgebiedgrootte zijn hierbij behandeld. Hieruit bleek dat watergangen gelegen in een fijn zandgebied (leemhoudend en/of zwavelhoudend) vaker bovenaan de rangschikking voorkwamen en dus gevoeliger zijn voor klimaatverandering dan watergangen in klei- of leemarm gebied. De klimaatgevoeligheid heeft geen relatie met de hoogte (m+NAP) van de onderzochte meetlocaties. Ook de vergelijking met de (sub)stroomgebiedgrootte heeft geen duidelijke relatie opgeleverd, alhoewel er een zwakke relatie is gevonden tussen kleinere stroomgebieden en klimaatgevoeligheid, maar dit kan ook liggen aan het feit dat kleinere stroomgebieden van WRIJ meer zandgronden bevatten dan de grote stroomgebieden. Om een duidelijke onafhankelijke relatie tussen stroomgebiedgrootte en klimaatgevoeligheid aan te tonen is meer onderzoek nodig waarbij meer watergangen worden meegenomen. Een vereiste hierbij is dat peilbuizen hun filters diep genoeg in de grond hebben zitten zodat ze ook de drogere periodes kunnen meten. Sommige peilbuizen van WRIJ hebben namelijk 2018 niet kunnen meten, waardoor het vormen van een relatie met een watergang dichtbij niet mogelijk was en deze watergang buiten beschouwing moest worden gelaten.

1 Inleiding

Het onderzoeksrapport start met een inleidend hoofdstuk, waarin de aanleiding, doel en onderzoeksvragen van het onderzoek nader worden toegelicht. Dit inleidende hoofdstuk eindigt met een leeswijzer.

Aanleiding

Tekort aan water is tegenwoordig een veelvoorkomend probleem. Dit komt omdat de bevolking op de aarde groeit en er meer water nodig is voor de landbouw en de populatie, maar ook doordat de aarde opwarmt en deze temperatuurstijging in warmere tijden ervoor zorgt dat de verdamping toeneemt. Deze droogte heeft invloed op zowel het oppervlaktewater als het grondwater, en kan leiden tot minder wateraanbod, verslechterde waterkwaliteit, misoogst en verstoorde leefomgevingen (Riebsame, et al., 1991). Daarom krijgt het begrijpen van droogte en het modelleren van zijn componenten meer en meer aandacht onder ecologen, hydrologen, meteorologen en landbouwwetenschappers (Mishra & Singh, 2011), zo ook het Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ).



Figuur 1 - Projectgebied WRIJ en haar stroomgebieden (Waterschap Rijn en IJssel (1), n.d.)

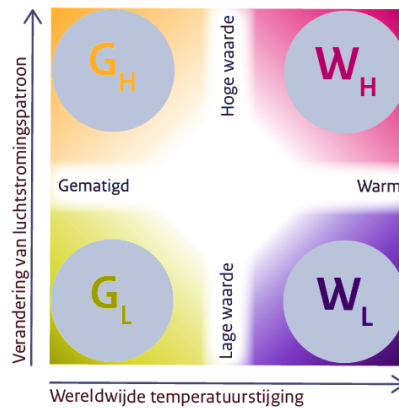
WRIJ beheert het grondwater en het oppervlaktewater in een gedeelte van oost-Nederland. Daarnaast zuivert het waterschap het afvalwater. Waterbeheer houdt voornamelijk in dat er voor voldoende en gezond water wordt gezorgd voor zowel mens, plant en dier. Het gebied van WRIJ en dus tevens het projectgebied van deze eindopdracht staat weergegeven in Figuur 1.

WRIJ heeft door de droogte van afgelopen zomer watergangen moeten inlaten uit de IJssel en Twentekanaal om de belangrijkste watergangen op peil te houden. Waterinlaat is echter niet mogelijk in 90% van het beheergebied door de hoogteligging. In deze BSc eindopdracht zal daarom worden onderzocht welke watergangen van WRIJ gevoelig zijn voor klimaatverandering en daardoor een groter risico hebben om frequenter droog te staan. Het onderzoek dient als handvat voor de maatregelen die in de toekomst zullen moeten worden genomen op het gebied van droogte en droogval. Klimaatverandering wordt meegenomen door middel van de KNMI-klimaatsscenario's.

Omdat het momenteel nog niet duidelijk is hoe het klimaat gaat veranderen tot 2100, heeft het KNMI deze scenario's opgesteld. Samen beschrijven ze de hoekpunten waarbinnen de klimaatverandering in Nederland zich, volgens de nieuwste inzichten, waarschijnlijk zal voltrekken (KNMI (1), 2015). Deze scenario's zijn opgesteld voor de periode vanaf 2036 tot 2100.

In dit onderzoek zijn alle vier klimaatscenario's onderzocht, en uiteindelijk zijn de uitkomsten met elkaar vergeleken.

In Figuur 2 staan de klimaatscenario's schematisch weergegeven. Scenario WH bevat de meeste verandering, scenario GL de miste. Tabel 1 geeft de verschillen voor Nederland aan.



Figuur 2 - KNMI-klimaatscenario's (KNMI (1), 2015)

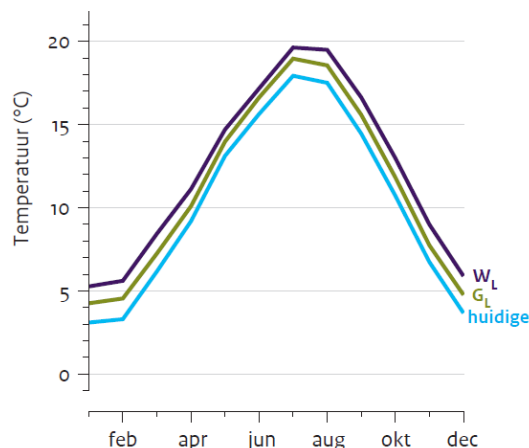
Tabel 1 - Verschil KNMI-klimaatscenario's (KNMI (1), 2015)

	Temperatuurstijging t.o.v. 1981-2010 [°C]		Invloed verandering luchtstromingspatroon
	2036 - 2065	2066 - 2100	
GL (Gematigd Laag)	1	1,5	Klein
GH (Gematigd Hoog)	1	1,5	Groot
WL (Warm Laag)	2	3,5	Klein
WH (Warm Hoog)	2	3,5	Groot

Verschil Gematigd en Warm

De bekendste factor die gepaard gaat met klimaatverandering is temperatuurstijging, variërend tussen 1 en 3,5 °C voor Nederland, maar ook nationaal kan de temperatuurstijging variëren. Het zuidoosten van Nederland zal bij klimaatscenario WH ongeveer 1 °C meer toenemen in temperatuur dan het noordwesten (KNMI (1), 2015).

Naast temperatuur zal ook neerslag gaan toenemen, en dan met name extreme neerslagintensiteiten. Dit is het gevolg van de toename van de hoeveelheid waterdamp in de lucht (KNMI (1), 2015). Extreme hagel komt in 2050 in warme scenario's ten minste twee keer zo vaak voor als in de referentieperiode 1981-2010 (KNMI (1), 2015).



Figuur 3 - Temperatuurcyclus in het huidige klimaat en het klimaat rond 2050 voor GL en WL (KNMI (1), 2015)

Verschil Laag en Hoog

Naast de temperatuur verandert mogelijk ook het luchtstromingspatroon. Windrichtingen tussen zuid en west, die in het huidige klimaat overheersen, komen in de winter vaker voor bij de GH- en WH-scenario's en minder vaak bij GL- en WL-scenario's (KNMI (1), 2015), resulterend in warmer en droger weer bij een H-scenario. L-scenario's zorgen daarentegen voor zachter en natter weer.

Doel

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van een verwachting bij welke watergangen van WRIJ vaker droogval zal optreden tot 2100. Dit wordt onderzocht door het simuleren van grondwaterstanden onder invloed van klimaatverandering en deze daarna terug te koppelen naar waterstanden in een watergang.

Onderzoeksvragen

Om tot het doel te komen zullen de volgende onderzoeksvragen in dit rapport worden behandeld:

Inventarisatiefase

- 1) Hoe zal de droogte-indicator worden gedefinieerd?
- 2) Hoe uitzonderlijk was de hydrologische droogte van 2018 in vergelijking met normaal?
- 3) Hoe kan een droogtemodel worden opgesteld?

Modelfase

Vervolg van onderzoeksvraag 3: het opstellen van het droogtemodel.

Validatiefase

- 4) Kan hydrologische droogte acceptabel worden gesimuleerd?

Slotfase

- 5) Wat is de meest extreme waarde voor de laagste grondwaterstand?
- 6) Beïnvloeden gebiedskenmerken de gevoeligheid voor hydrologische droogte?
- 7) Welke watergangen van WRIJ zullen naar verwachting in de toekomst door klimaatverandering vaker droog komen te staan?

Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk wordt de gebruikte methodologie beschreven. Daaropvolgend komt Hoofdstuk 3, waarin de resultaten van het onderzoek staan. In Hoofdstuk 4 staat de discussie, Hoofdstuk 5 bevat de conclusie en het laatste hoofdstuk beschrijft aanbevelingen voor verder onderzoek. Het rapport eindigt met de geciteerde werken en de bijlagen.

2 Methodologie

In dit hoofdstuk staat de methodologie van het uitgevoerde onderzoek beschreven. De onderzoeksmethode bestaat uit vier fasen: voorbereidende fase, modelfase, validatiefase en slotfase. De modelfase bevat geen onderzoeksvragen maar geeft uitleg over de opzet van het droogtemodel.

Het hele onderzoek inclusief de verschillende stappen staat schematisch weergegeven in Bijlage I: Flow chart methodologie.

Inventarisatiefase

Onderzoeksvraag 1

Hoe wordt de droogteindicator gedefinieerd?

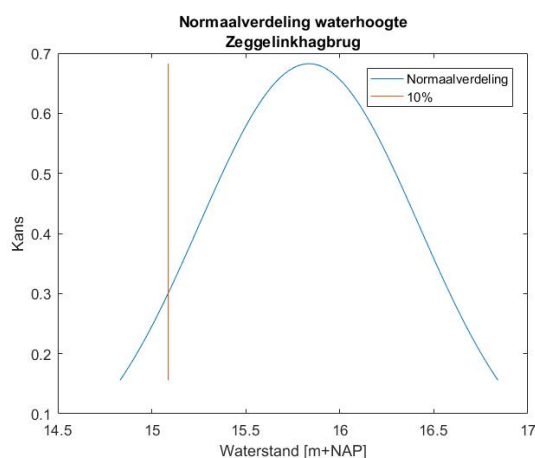
Om te bepalen of er kan worden gesproken over een droge dag of een droge periode, is een droogte-indicator gedefinieerd. Met deze droogte-indicator werden verschillende jaren en periodes van droogte met elkaar vergeleken. Daarnaast kan het verschil tussen de simulatie en de observatie in kaart worden gebracht.

Onderzoeksvraag 2

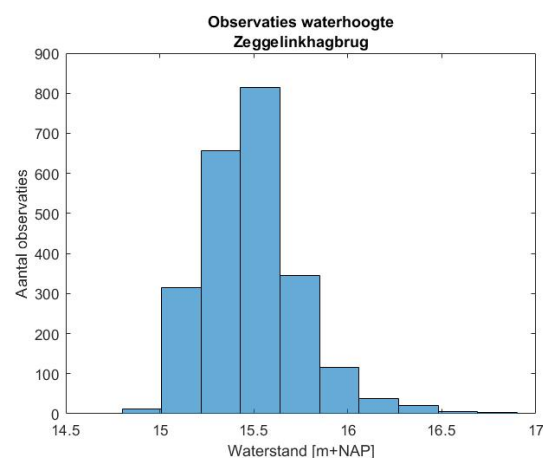
Hoe uitzonderlijk was de hydrologische droogte van 2018 vergeleken met normaal?

Na het definiëren van droogte is onderzocht in hoeverre 2018 een droog jaar was, en of dit optreden is gebaseerd op toeval of dat de kans op voorkomen van een droogte zoals 2018 jaarlijks toeneemt. Voor het beantwoorden van deze onderzoeksvraag is er onderscheid gemaakt in meteorologische droogte en hydrologische droogte, waarbij voor beide de mate van droogte is bepaald aan de hand van de droogte-indicator uit onderzoeksvraag 1.

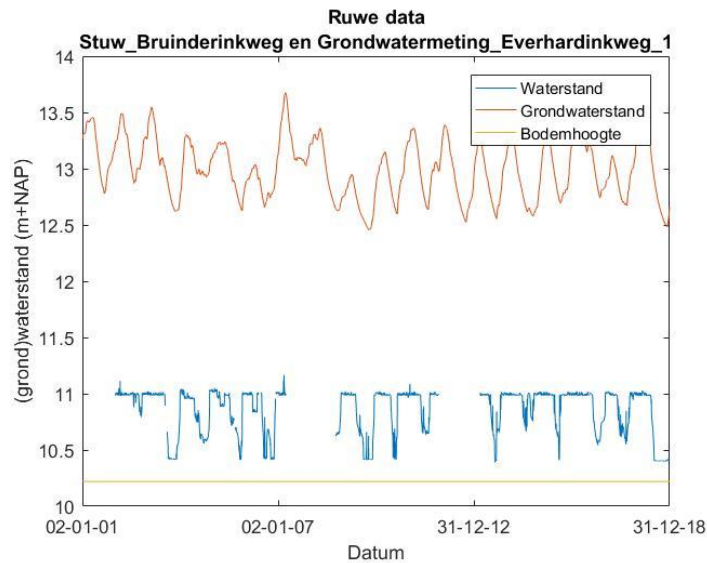
Met hydrologische droogte wordt droogval bedoeld. Echter, het meten van droogval is erg lastig aangezien meetstations niet voldoende bereik hebben om droogval te meten. Voor de meetstations die een groter bereik hebben om te meten wordt een dag gekwantificeerd als droog met behulp van het opstellen van een normaalverdeling. Uit de observaties tot en met 2018 is een normaalverdeling gemaakt, en met deze verdeling kan de meest voorkomende waterstand worden bepaald, maar ook de minst voorkomende. Hiermee kan de waterstand worden bepaald die dient als een keerpunt voor de laagst voorkomende 10% aan waterstanden. Om een dag als een hydrologisch droge dag te bestempelen, zal dus worden gekeken naar het aantal dagen waarbij de waterstand in de laagste 10% van voorkomen zit. Een voorbeeld van zo'n normaalverdeling is te zien in Figuur 4, welke gebaseerd is op het aantal observaties te zien in Figuur 5. Niet voor elk meetstation is de waterstand normaal verdeeld, maar voor dit onderzoek is aangenomen van wel.



Figuur 4 - Normaalverdeling "Zeggelinkhagbrug"



Figuur 5 - Observaties waterstanden "Zeggelinkhagbrug"



Figuur 6 - Voorbeeld meetminimum

Niet alle meetstations hebben een groot meetbereik om droogval of extreem lage waterstanden te meten en zullen vaker de waterstand op het meetminimum meten. Voor deze meetstations is het opstellen van een normaalverdeling niet accuraat genoeg. Naast het bepalen van de laagste 10%, is voor deze meetstations een dag als droge dag gekenmerkt als de waterstand gelijk is aan het meetminimum. Een voorbeeld van zo'n meetstation is te zien in Figuur 6. De waterstand wordt 'afgekapt' bij een waarde van 10,4 m+NAP. Dit is het meetminimum.

Veel van dit soort dataverwerking is gedaan met MATLAB. MATLAB is een technische programmeeromgeving die grote hoeveelheden data effectief kan verwerken.

Tot slot worden histogrammen gemaakt die per geobserveerd jaar het aantal droge dagen in kaart brengt. Hierbij kon worden afgelezen of 2018 in lijn van verwachting was en er dus sprake is van een trend, of dat de uitschieter van 2018 niet in het plaatje past en berust op toeval. Als er een duidelijke toename kan worden afgelezen aan droogte per jaar is er sprake van een trend. Hierbij is het van belang dat niet per se elk jaar een toename aan droogte moet hebben ten opzichte van het jaar daarvoor, maar ongeveer per blok van 5 jaar er wel een toename te zien is. Bij een random verdeling is er sprake van toeval.

Onderzoeksvraag 3

Hoe kan een droogtemodel worden opgesteld?

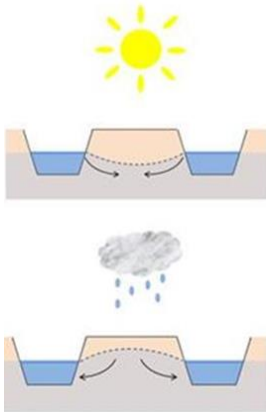
Na het bepalen van de droogte-indicator en de droogte van 2018, is er onderzocht hoe een droogtemodel kan worden opgesteld. Droogtemodelleren is een vrij onbekend gebied en staat nog in de kinderschoenen (Mishra & Singh, 2011). Om te onderzoeken of de methodologie in deze eindopdracht een realistische methodologie is, is er een literatuuronderzoek uitgevoerd om te achterhalen hoe een droogtemodel kan worden opgesteld en hoe het is gedaan in het verleden. De focus lag hierbij op het verzamelen van informatie over al voltooide modellen en methodes, en ook de benodigde parameters. In de modelfase hieronder staat de methodologie van het droogtemodel beschreven.

Modelfase

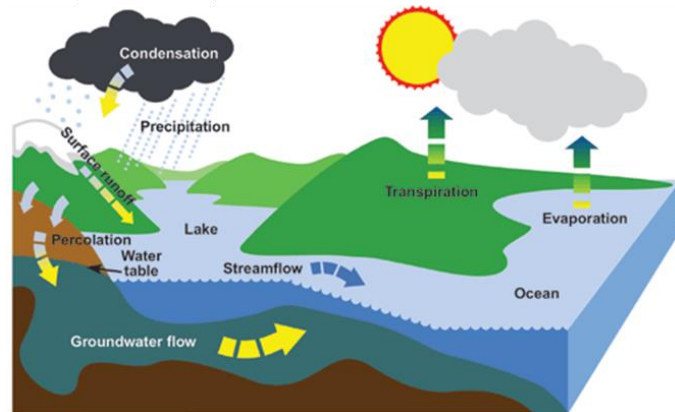
Na het uitvoeren van het literatuuronderzoek in onderzoeksvraag 3 kan een droogtemodel worden opgesteld. De methodologie van dit droogtemodel wordt in de Modelfase beschreven.

Het droogtemodel: Menyanthes en MATLAB

De hoogte van de grondwaterstand is afhankelijk van neerslag. Als de grondwaterstand hoger is dan de waterstand in het oppervlaktewater, zal water van het grondwater naar het oppervlaktewater stromen. Dit proces kan ook vice versa optreden. De grondwaterstand normaalgesproken even hoog als de hoogte van het oppervlaktewater (Figuur 7). Het is dus afhankelijk van neerslag en verdamping in hoeverre er wateruitwisseling plaatsvindt.



Figuur 7 - De grondwatercyclus
(Gemeente Krimpen aan den IJssel, n.d.)



Figuur 8 - De hydrologische cyclus (Kornfeld, 2015)

Met de antwoorden van onderzoeksvraag 1, 2 en 3 is een droogtemodel opgesteld. Het doel van dit droogtemodel is het opstellen van een verwachting voor hydrologische droogte, en hierbij zijn waterstanden van belang. Echter, het simuleren van zowel grond- als oppervlaktewater in één model is te complex om uit te voeren in een periode van 10 weken. Enkel grondwaterstanden daarentegen niet, en omdat er een relatie bestaat tussen grondwaterstanden en waterstanden is ervoor gekozen om grondwaterstanden te simuleren en deze terug te koppelen naar waterstanden. Het droogtemodel is dus een combinatie van het grondwatermodelprogramma Menyanthes (voor het simuleren van grondwaterstanden) en het programmeerprogramma MATLAB (voor onder andere het terugkoppelen naar waterstanden).

Grondwatermodel in Menyanthes

Menyanthes simuleert grondwaterstanden aan de hand van geobserveerde grondwaterstanden en verklarende reeksen (neerslag- en verdampingswaarden). Menyanthes ‘fit’ een tijdreeksmodel dat het beste past bij de geobserveerde grondwaterstanden. Nadat dit tijdreeksgebaseerde grondwatermodel is opgesteld, kan het worden gebruikt om door middel van klimaatverwachtingen de toekomstige grondwaterstanden te bepalen. De verklarende reeksen worden aangepast en het model wordt gerund voor deze aanpassing met de parameters bepaald in het tijdreeksmodel. Menyanthes werkt met een dagelijkse tijdseenheid.

Omdat meetstations in de watergangen geen grondwaterstanden meten, is voor de geobserveerde grondwaterstanden de dichtstbijzijnde peilbuis genomen. Deze peilbuisdata is afkomstig van WRIJ (Waterschap Rijn en IJssel (2), 2019), Vitens Lizard (Vitens Lizard, 2019) of streek De Liemers (Liemers Grondwater, 2019).

Dagelijkse neerslagwaarden komen van het KNMI, welke zijn uitgedrukt in mm/dag (KNMI (2), 2019) (KNMI (3), 2019). Voor verdamping was er keuze tussen ET_{pot} (KNMI (2), 2019) en ET_{act} (Hydrologic, n.d.). Het verschil tussen deze twee is dat ET_{pot} (potentiële verdamping) geen afname van verdamping meeneemt als gevolg van tekort aan water en ET_{act} (actuele verdamping) wel. Dit is vooral van belang in tijden van droogte, waarbij het verdampingsproces afneemt omdat de hoeveelheid vocht in de grond ook afneemt. Dit is een soort sponseffect: een droge spons laat ook minder water gaan dan een vochtige spons. De verwachting is dus dat bij het gebruik van ET_{act} als verklarende reeks in Menyanthes, de grondwaterstanden in droogteperioden accurater zullen zijn gesimuleerd. Om dit te testen is er een casus uitgevoerd waarbij enerzijds ET_{act} en anderzijds ET_{pot} als verklarende reeks wordt gebruikt. Deze casus is uitgevoerd op peilbuis “Gemaal Hackfort – Harmsen” omdat deze peilbuis de langste onafgebroken observaties bevat. Beide modellen (ET_{act} en ET_{pot}) zijn gebaseerd op dezelfde lengte tijdreeksen: 1-1-2016 tot 11-04-2019.

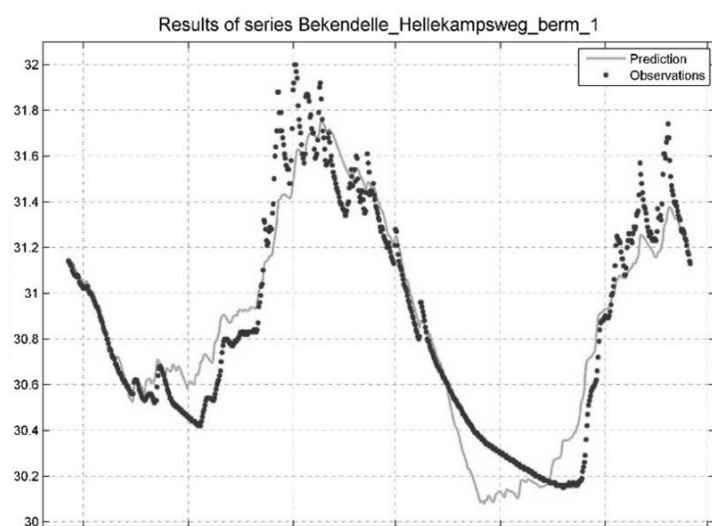
Extrapoleren in Menyanthes

Na het opstellen van de stochastische modellen per peilbuis in Menyanthes, zijn de verklarende reeksen (o.b.v. klimaatverwachtingen) uitgebreid van tot 2019 naar tot 2100. Neerslag is een erg variabel fenomeen, en de hoeveelheid neerslag die zal gaan vallen is afhankelijk van wat er de dagen daarvoor is gevallen: de kans op een grote hoeveelheid neerslag gedurende een erg droge periode is klein. Lastig aan een neerslaggenerator is dat deze de neerslagcurve niet meeneemt, maar neerslag random genereerd op basis van wat er maximaal drie dagen ervoor is gevallen. Omdat er in dit onderzoek wordt gekeken naar een periode van ongeveer 80 jaar aan aaneengeschaalde neerslag, moeten de neerslaghoeveelheden op elkaar zijn afgestemd en de jaarlijkse neerslagcurven dus passend bij het WRIJ-gebied. Om deze 'interannual variability' zo klein mogelijk te houden, is ervoor gekozen om de tijdreeksen die tot en met 31-12-2018 zijn gemeten te herhalen tot 2100, vaak is dit een stuk of drie keer. Het herhalen van observaties is een prima methode om er zeker van te zijn dat er gebruik wordt gemaakt van reële weercurven die ooit al eens zijn voorgekomen in het gebied. Klimaatverandering is aan deze tijdreeksen toegevoegd door middel van de KNMI-klimaatscenario's (KNMI (1), 2015). Voor de periode 2036 – 2065 en 2066 – 2100 zijn neerslag en verdamping per GL, GH, WL, en WH-scenario verkregen door de gegeven procentuele veranderingen van het KNMI (Bijlage IV: Procentuele verandering bij KNMI-klimaatscenario's). Verdamping is per jaar per periode aangepast. Verandering van neerslag is bekend per seizoen per periode (KNMI (4), 2014). De neerslag- en verdampingswaarden zijn dus voor elk klimaatscenario exact hetzelfde tot 2036. Vanaf 2036 worden de klimaatscenario's toegevoegd. De parameters van elk grondwatermodel zijn ook gelijk aan elkaar omdat deze gebaseerd zijn op observaties tot 2019 en de observaties niet verschillen per klimaatscenario.

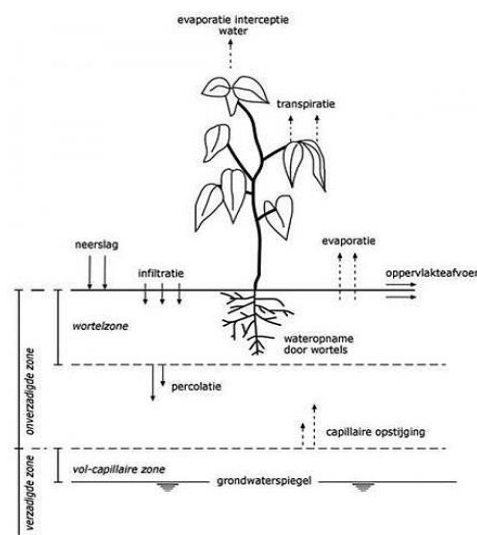
Uiteindelijk zijn er per peilbuis dus vijf verschillende grondwatersimulaties. Een onaangepast scenario, waarbij de verklarende reeksen zijn herhaald tot 2100 maar er geen klimaatverandering is toegevoegd, en de vier klimaatscenario's GL, GH, WL en WH.

Percolatie

Menyanthes kan grondwaterstanden accuraat simuleren, maar de percolatie van de neerslag wordt niet meegenomen (dit is het infiltreren van neerslag door de ondergrond naar het grondwater). Deze percolatie heeft een dusdanige invloed op de grondwaterstanden in tijden van droogte (onder andere door het eerdergenoemde sponseffect). Daarom is een casus uitgevoerd waarbij deze percolatie-aanpassing wel wordt geïmplementeerd in Menyanthes (als pre-processing op de modelinvoer), om er zo achter te komen of het betere grondwatermodellen levert en of het van toepassing kan zijn op alle peilbuizen van WRIJ.



Figuur 9 - Menyanthes grondwatermodel 'Bekendelle Hellekampsweg berm'



Figuur 10 - Dwarsprofiel ondergrond (Nannes, n.d.)

Percolatie is het verplaatsen van de neerslag naar het grondwater door de onverzadigde zone (Figuur 10). De snelheid van deze percolatie is afhankelijk van de porositeit, doorlatendheid en laagdikte van de grondsoort. Hoe groter de porositeit, hoe meer volume water er zich in de bodem kan bevinden en hoe sneller het water het grondwater bereikt.

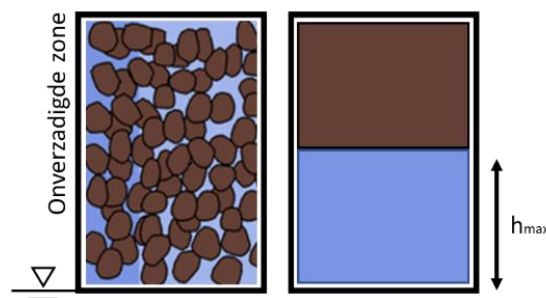
Figuur 9 geeft een voorbeeld uit 2018. De licht grijze lijn is het grondwatermodel uit Menyanthes, de zwarte stipjes zijn de geobserveerde grondwaterstanden. Zoals te zien is aan de observaties, vakt de grondwaterstand in de zomer af. Invloed van neerslag is niet meer zo sterk aanwezig ten opzichte van de winter: pieken zijn nagenoeg niet meer aanwezig in de zomer. Dit heeft te maken met de verzadigdheid van de grond. Echter, Menyanthes neemt aan dat neerslag en verdamping direct in contact staan met het grondwater. Met andere woorden: de onverzadigde zone wordt niet meegenomen. Bij het optreden van of neerslag of verdamping, zal dit gelijk te zien zijn in het grondwaterpeil.

In deze eindopdracht is aangenomen dat bij het invoeren van de percolatie in Menyanthes, het grondwatermodel in droge periodes accuratere resultaten zal geven. Het implementeren van percolatie in Menyanthes is gedaan aan de hand van een 'bakjesmodel'. De onverzadigde zone is aangenomen als een 'bakje' met een bepaalde porositeit. Onder het 'bakje' bevindt zich het grondwater.

In Figuur 11 is de grondwaterstand schematisch weergegeven met het bijbehorende symbool (omgekeerde driehoek). De maximale waterstand die aanwezig kan zijn in onverzadigde zone is bepaald aan de hand van de porositeit en de worteldiepte (Figuur 11). De porositeit is bekend. De worteldiepte is een variabele en is ingeschat.

$$\text{worteldiepte} = h_{\text{onverzadigde zone}}$$

$$h_{\text{max}} = \text{worteldiepte} * \text{porositeit}$$



Figuur 11 - Bepaling hoogte 'bakje'

Menyanthes gebruikt als input neerslag, verdamping en geobserveerde grondwaterstanden. Om de percolatie toe te voegen aan Menyanthes zullen dus de neerslag- en verdampingswaarden moeten worden afgevlakt. Het modelprogramma zelf is dus niet aangepast, maar de input is aangepast. Ze hebben dan nog steeds direct invloed op de grondwaterstand, en omdat ze geen pieken meer zullen bevatten is de verwachting dat dit ook zal worden teruggezien in de grondwaterstanden voor deze droogteperiode. De mate van deze afvlakking is bepaald aan de hand van de pF-waarde van de grond.

Bodemvochtigheid van de bodemvochtzone wordt uitgedrukt in pF. De pF is een maat voor de zuigspanning die nodig is om water te onttrekken (door een plant) uit de bodem. Hoe vochtiger de bodem, hoe hoger pF.

Bij $pF \leq c.a. 1.7$ is de grond volledig verzadigd met water. De poriën waarin zich water kan bevinden zijn gevuld. Bij $pF \geq c.a. 4.2$ is het verwelkingspunt bereikt. De wortels in de bodem nemen water niet meer op. Een voorbeeld van een pF-curve is te zien in Figuur 12.

Door aan het begin van de dag de pF-waarde te bepalen, kan de volumecapaciteit van het 'bakje' voor die dag worden berekend. Als deze volumecapaciteit groter is dan dat er daadwerkelijk bij komt ($P - ET$), wordt de waterstand van het bakje aan het einde van de dag $h_{\text{eind}} = h_{\text{begin}} + P - ET$. Als de volumecapaciteit aan het begin van de dag kleiner is dan $P - ET$, zal het 'bakje' 100% gevuld raken en is $h_{\text{eind}} = h_{\text{max}}$. De beginwaterstand de volgende ochtend (t) is dan gelijk aan h_{eind} van $t-1$.

Een (aangepast) stuk uit de MATLAB-code is hieronder weergegeven. Allereerst worden de beginwaarden h_{max} en de beginstand gegeven. Daarna wordt per dag de pF-waarde berekend door de vulling van die dag samen met de neerslag en verdamping. Daarna wordt een figuur zoals Figuur 13 geplot, die de vulling weergeeft per dag. Droge dagen met een $pF > 3.0$ worden gefilterd (aanpassingsrijen) en de neerslag en verdamping voor deze dagen aangepast volgens Figuur 14.

```

%% Aanname begindag = 40% gevuld
h_max = wortelzone.*(porositeit./100);           % [mm]
h = 0.4 .* h_max;                                % hbegin [mm]

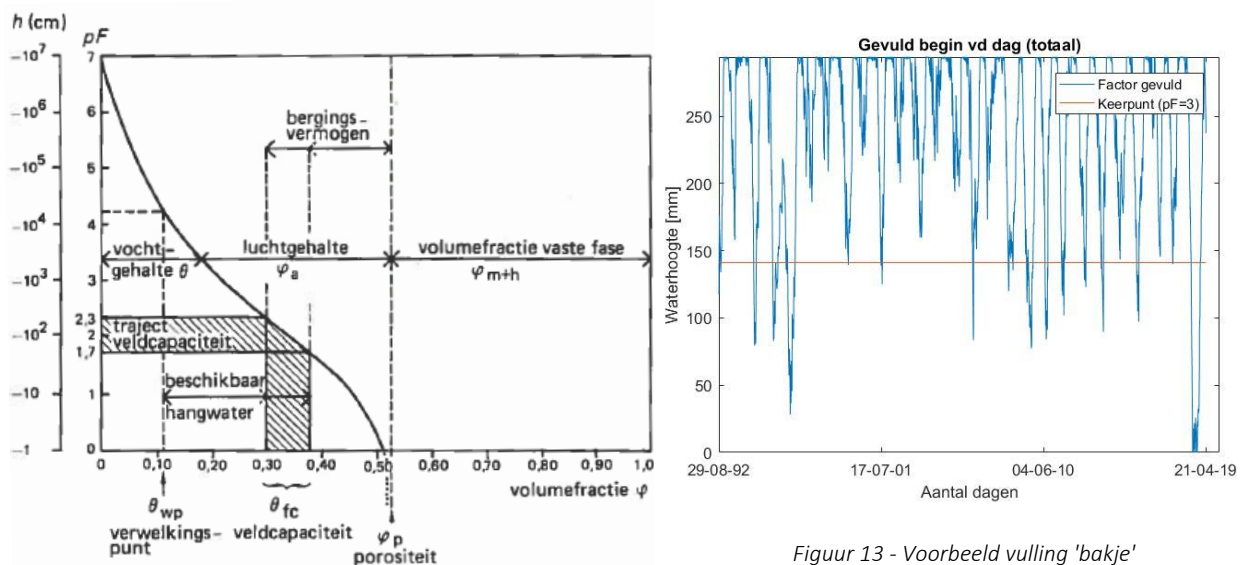
%% pF per dag bepalen a.d.h.v. lineaire formule y=ax+b waarbij x = h(t) en b = maxpF = 4.2
(100% gevuld geeft pF = 1.7, 0% gevuld geeft pF = 4.2)
a = (maxpF - minpF) ./ (-h_max);
pF(t) = (a .* h(t)) + maxpF;                    % h(t) is hierbij hbegin

if pF(t) <= 1.5 && pF(t) >= 1.0
    volume fractie water = ((pF(t) - [P12(2)])/[P12(1)]) ./ 100;
    added = P(t) - ET(t);                         % [mm]
    if added > (1 - volume fractie water) .* h_max % als P meer is dan beschikbaar volume
        h = h_max;                                % h_eind [mm]
    else
        h = added + h;                             % h_eind [mm]
    end
end

%% ET en P aanpassen
for u = aanpassingsrijen
    aanpassingsfactor = (maxpF - pF(u)) ./ (maxpF - minpF); % dagen waarbij pF > 3.0
    Menyanthes_ET(u) = ET(u) .* aanpassingsfactor;          % zie Figuur 14
    Menyanthes_P(u) = P(u) .* aanpassingsfactor;
end

```

Uiteindelijk komt een dergelijke grafiek uit MATLAB, die de waterstand weergeeft van het 'bakje' per dag (Figuur 13). Zoals te zien zijn er relatief veel dagen waarop het 'bakje' 100% gevuld is (waterstand = $y_{\max}$). De neerslag- en verdampingswaarden zijn op de dagen waarop de waterhoogte in het 'bakje' kleiner is dan het keerpunt worden afgevlakt. Bij het kiezen van een kleinere worteldiepte zal het 'bakje' meer dagen vol komen te zitten, en bij het kiezen van een grotere worteldiepte minder.

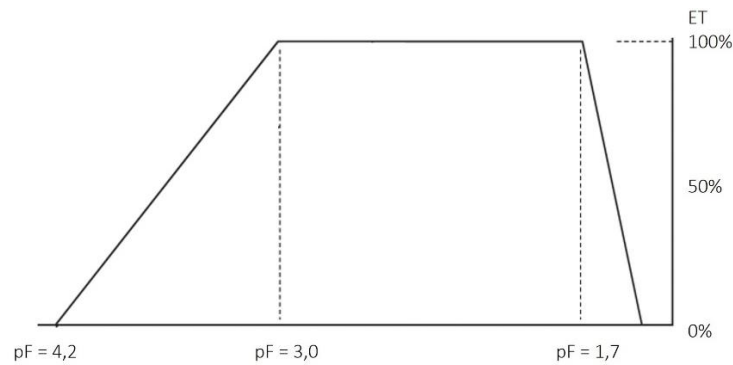


Figuur 12 - Voorbeeld pF-curve (Locher & de Bakker, 1990)

Figuur 13 - Voorbeeld vulling 'bakje'

Bij dagen waarop $3.0 < pF < 4.2$ nemen de neerslag- en verdampingswaarden lineair af ten opzichte van de druk volgens de Feddes-curve. In Figuur 14 is de Feddes-curve van verdamping te zien.

Zoals te zien, zal er ook een verandering tussen $pF = 0$ en $pF = 1.7$ plaats moeten vinden. Echter wordt deze verandering in deze eindopdracht niet meegenomen omdat de focus ligt op de droge periodes en afvlakking in natte periodes dus niet nodig is.



Figuur 14 - Feddes-curve verdamping

Om te kijken of deze toevoeging van percolatie daadwerkelijk de gewenste resultaten op gaat leveren in Menyanthes is er een casus uitgevoerd. De peilbuis die is gebruikt is “Bekendelle Hellekampsweg Berm”, dit omdat bij deze peilbuis het verschil tussen de geobserveerde en gesimuleerde grondwaterstanden in zomer 2018 goed waar te nemen is.

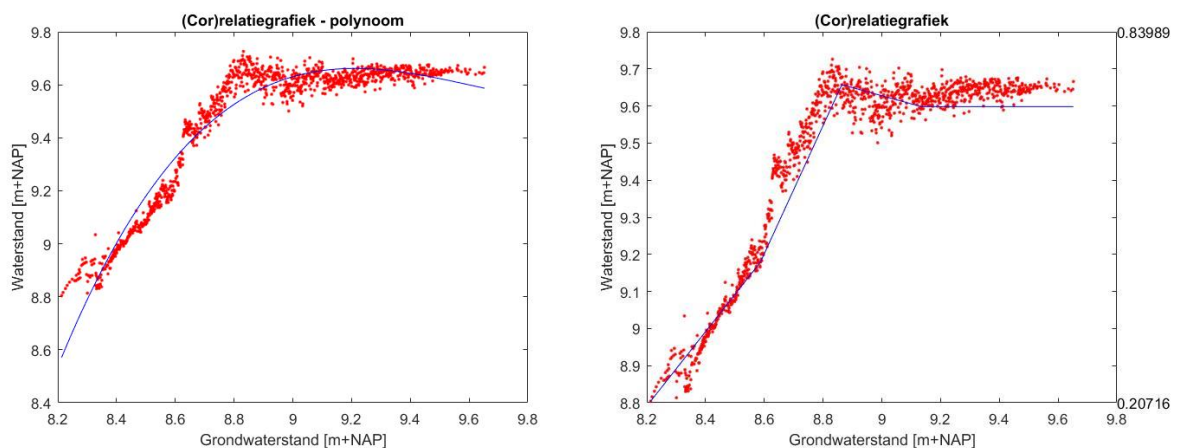
Het aanpassen van de dagelijkse neerslag- en verdampingswaarden is in MATLAB gebeurt. Het implementeren en aanpassen van het grondwatermodel in Menyanthes. De uitwerking van de casus is te vinden in Bijlage III: Casus percolatie. Hier zijn de neerslag- en verdampingswaarden op dagen waarbij de bodem $pF > 3,0$ aangepast. Omdat de enige onbekende parameter de worteldiepte is, is er in de casus gekeken naar wat de meest gunstige worteldiepte is waarbij de neerslag- en verdampingswaarden kunnen worden aangepast (per meetstation). Dit is de worteldiepte waarbij het grondwatermodel in Menyanthes het beste overeenkomt met de observaties.

Relatie grondwater - oppervlaktewater

Door de grondwatersimulaties uit Menyanthes terug te koppelen naar waterstanden, en daarna naar ‘droogte’-histogrammen aan de hand van de droogte-indicator, kan de impact van klimaatverandering tussen de meetstations worden vergeleken door de verandering ten opzichte van het onaangepaste scenario te onderzoeken.

Voor de relatie tussen grondwaterstand en waterstand is geobserveerde data tot en met 2018 gebruikt. Deze zijn tegen elkaar uitgezet tot een relatiegrafiek. Een voorbeeld van zo’n relatiegrafiek is te zien in Figuur 15.

De trendlijn door de (cor)relatiegrafiek wordt bepaald aan de hand van een derdegraads polynoom die MATLAB automatisch kan fitten. Door het op peil houden van de waterstanden van WRIJ, hebben veel (cor)relatiegrafieken een horizontale afbuiging. Aan de hand van de helling van de gefitte polynoom kan worden bepaald op welk punt de knik tussen de stijgende en horizontale lijn zit. Er is aangenomen dat het keerpunt zich bevindt bij een helling kleiner dan 0,1. Het stijgende lineaire lijnfragment wordt daarna opgesplitst in drie stukken, met alle drie hetzelfde aantal observaties (= rode stippen). De relatiegrafieken zijn gemaakt op basis van de gehele meetreeks. Er is dus niet gekozen om een bepaald jaar te gebruiken om de correlatie op te baseren. Dit omdat bij het gebruik van alleen 2018 de relatiegrafieken niet beter werden geacht.



Figuur 15 - Aanpak (cor)relatiegrafiek opstellen. Links: derdegraads polynoom. Rechts: lineaire lijnen uit polynoom.

Zoals te zien, kan er worden aangenomen dat de relatie tussen grondwater en oppervlaktewater lineair is. Om deze correlatie te kwantificeren, is de Pearson's correlatiecoëfficiënt (r) berekend. Deze is een maat voor de sterkte van het lineaire verband tussen twee variabelen x en y en wordt als volgt berekend (Sincich, et al., 2016):

$$SS_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}$$

$$SS_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$$

$$SS_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

$$r = \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xx}SS_{yy}}}$$

De coëfficiënt is dimensieloos en heeft een waarde tussen -1 en +1. Dichtbij 0 betekent weinig tot geen lineair verband, dichtbij -1 of +1 veel lineair verband. +1 staat voor een positieve samenhang (toename x geeft toename y), en -1 voor een negatieve (toename x geeft afname y of omgekeerd). De r -waarde is in de (cor)relatiegrafiek rechts bovenin weergegeven.

Hierbij zijn ontbrekende dagen en dagen waarop de waterstand gelijk is aan het meetminimum niet meegenomen.

Validatiefase

[Onderzoeksvraag 4](#)

Kan hydrologische droogte acceptabel worden gesimuleerd?

Na het maken van de grondwatermodellen in Menyanthes, het simuleren van de grondwaterstanden tot 2100 en het verkrijgen van de bijbehorende waterstanden in MATLAB (samengenomen 'het droogtemodel'), is het droogtemodel getest op zijn validiteit.

Niet elk watergangmeetstation is geschikt om in dit onderzoek te gebruiken. Hieronder staat een opsomming waarop watergangmeetstations zijn gefilterd.

De volgende meetstations zijn buiten beschouwing gelaten:

- Watergangmeetstations in regio's waar water wordt ingelaten vanuit het Twentekanaal;
- Watergangmeetstations in de Oude IJssel tussen Doesburg en Gaanderen;
- Watergangmeetstations in de Berkel tussen Stuw Lochem en Stuw Beekvliet;
- Watergangmeetstations die niet actief zijn of geen continue metingen hebben;
- Watergangmeetstations die geen bovenstroomse waterstand meten;
- Watergangmeetstations met minder dan twee jaar aan data;
- Watergangmeetstations die zich niet bevinden in het WRIJ-gebied;
- Watergangmeetstations met afvoer in 2018;
- Watergangmeetstations zonder correlatie met een peilbuis (dit wordt pas bepaald in de Validatiefase).

Ook voor de peilbuizen die zijn gebruikt in het maken van grondwatermodellen en correlaties zijn eisen opgesteld. Peilbuizen moeten 2018 gemeten hebben (sommige peilbuizen hebben een gat in de tijdreeksen vanaf voorjaar tot najaar 2018). Ze moeten starten met observeren vanaf 1-1-2018 of eerder, om zo in ieder geval één jaar aan observaties te hebben voor het opstellen van het grondwatermodel. En ten slotte moeten de peilbuizen gecorrigeerd zijn met één of meerdere watergangmeetstations.

Validatie van de grondwatermodellen gebeurt in Menyanthes zelf, door het weergeven van de EVP en RMSE-waarden. Het model wordt geaccepteerd als de EVP (= explained variance percentage) boven de 70% is (Von Asmuth, et al., 2011). De EVP wordt uitgerekend door de volgende formules (van der Hauw, 2012):

$$EVP = \frac{\sigma_{h(t)}^2 - \sigma_{n(t)}^2}{\sigma_{h(t)}^2} * 100\%$$

Waarbij:

$\sigma_{h(t)}^2$ = variantie van de grondwaterstanden (geobserveerd en gesimuleerd) en

$\sigma_{n(t)}^2$ = variantie van de residuen (variantie van de grondwaterstanden: bij een goedwerkend model random reeks)

Ook zal de RMSE (= root mean square error oftewel 'afwijking') niet te groot mogen zijn. Hiervoor zijn geen verdere restricties gesteld, maar een afwijking van 50 centimeter is vanzelfsprekend te groot.

Om de relatie tussen grondwaterstand en waterstand te valideren zullen de uitkomsten gebaseerd op geobserveerde waterstanden gelijk moeten zijn aan de uitkomsten gebaseerd op gesimuleerde waterstanden. Waterstanden worden niet direct gesimuleerd, maar worden verkregen uit de gesimuleerde grondwaterstanden uit Menyanthes. Dit wordt gedaan aan de hand van relatiegrafieken (Figuur 15). Door de grondwaterstandsimulaties tot 2019 uit Menyanthes terug te koppelen naar waterstanden aan de hand van de relatiegrafieken, worden waterstandsimulaties verkregen tot 2019. Hierna wordt de droogte bepaald van de waterstandsimulaties tot 2019 in vergelijking met de droogte van de waterstandobservaties tot 2019, aan de hand van de droogte-indicator uit onderzoeksvraag 1. Als er evenveel droogte in de watergang is geobserveerd als dat er is gesimuleerd, is de relatie tussen grondwaterstand en waterstand accuraat. Hierbij is gekeken naar de aanwezigheid van dezelfde droogtepieken in zowel observaties als simulaties, en daarnaast een niet te groot verschil in droogte. Ook moeten vanzelfsprekend de EVP en de RMSE van het grondwatermodel in Menyanthes als valide zijn bevonden.

Slotfase

Onderzoeksvraag 5

Wat is de meest extreme waarde van de laagste grondwaterstand?

Omdat grondwater en oppervlaktewater aan elkaar zijn gerelateerd, is het van belang om te weten hoe veel verder het grondwater mogelijk nog kan zakken in toekomstige droge periodes op basis van de weersverandering. Dit kan worden gedaan door een extreem droog jaar in Menyanthes te runnen en de laagste gesimuleerde grondwaterstand te vergelijken met de laagste geobserveerde grondwaterstand. Meteorologisch gezien is het droogste jaar ooit gemeten 1976, met een maximaal gemeten neerslagtekort van 363 mm (KNMI (5), n.d.). De droogste zomer ooit gemeten is 2018 (KNMI (6), 2018). Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden zal er een jaar moeten worden gebruikt nog droger dan 1976 en 2018. Voor een 'nieuw' extreem droog jaar zijn een extreem droog jaar aan neerslag en verdamping nodig. Omdat er een 'nieuw' extreem droog jaar nodig is voor het beantwoorden van deze onderzoeksvraag, en een bepaalde verminderingfactor om de geobserveerde neerslag tot 'nieuwe' extreme neerslag te maken niet bestaat en niet te gronden is, is er voor deze onderzoeksvraag gekozen om gebruik te maken van neerslaggenerator WeaGETS (Chen & Brissette, 2012). Hier is een neerslagcurve van bijvoorbeeld 80 jaar en de 'interannual variability' namelijk niet zo zeer van belang, omdat de interesse ligt bij een extreem droge periode waarbij extreem droge grondwaterstanden voorkomen. WeaGETS is een MATLAB-script met als output een x-aantal jaar aan neerslag en temperatuur, gebaseerd op een y-aantal jaar aan geobserveerde neerslag en temperatuur. Omdat zowel neerslag als temperatuur nodig zijn, zijn enkel de KNMI-metstations Deelen en Hupsel gebruikt om neerslag te simuleren (zij meten neerslag en temperatuur tegelijkertijd). In dit onderzoek is neerslag gegenereerd op basis van geobserveerde neerslag en temperatuur vanaf 1-1-2000 (y-aantal jaar aan observaties), om er zeker van te zijn dat er geen trend in deze tijdreeks aanwezig is en de data nog steeds accuraat is. Bij een langere datareeks is de kans namelijk groter op een inwendige verandering van weer: 40 jaar geleden was het weer anders dan nu. Ook moeten een paar parameters worden gekozen, welke staan beschreven in Bijlage IX: Onderzoeksvraag 5.

Op basis van de 19-jarige tijdreeks is er 1000 jaar aan neerslag gegenereerd.

Volgens WRIJ blijft verdamping vrij stabiel over tijd, en daarom is ervoor gekozen om de verdamping van 2018 voor 1000 jaar te herhalen. Hierbij is verdamping dus onafhankelijk van neerslag. Deze verdamping is de potentiële verdamping, afkomstig van het KNMI (KNMI (2), 2019).

Uiteindelijk bestaat de gesimuleerde tijdreeks uit 1000 jaar aan neerslag en verdamping. Voorafgaand aan deze tijdreeks werden alle observaties aan neerslag- en verdampingswaarden toegevoegd, om hierop het grondwatermodel in Menyanthes te baseren. Percolatie is niet meegenomen.

Onderzoeksvraag 6

Beïnvloeden gebiedskenmerken de intensiteit van hydrologische droogte?

Na de validatiefase zijn voor elk meetstation de 'droogte'-histogrammen opgesteld door middel van de droogte-indicator. Hieruit is bepaald welke meetstations gevoeliger zijn voor klimaatverandering en welke wat minder. Voor het beantwoorden van deze onderzoeksvraag is er gekeken naar diverse gebiedskenmerken die eventueel deze rangschikking kunnen verklaren. De gebiedskenmerken grondsoort, hoogte en (sub)stroomgebiedgrootte zijn onderzocht bij het beantwoorden van deze onderzoeksvraag. Aan elk meetstation is de bijbehorende grondsoort, hoogte en (sub)stroomgebiedgrootte gekoppeld, waarna is onderzocht of er sprake is of een bepaald gebiedskenmerk vaker voorkomt bovenaan of onderaan de rangschikking. De hypothese hierbij is dat watergangen in een zandgrond gevoeliger zullen zijn voor klimaatverandering en daardoor vaker droog zullen komen te staan tot 2100 in vergelijking met nu. Dit is gebaseerd op het feit dat zandgronden poreuzer zijn dan bijvoorbeeld kleigronden, en dus zal de invloed van het weer vrij snel terug te zien zijn in de (grond)waterstanden.

Onderzoeksvraag 7

Welke watergangen van WRIJ zullen vaker droog komen te staan in de toekomst door klimaatverandering?

Tenslotte is de laatste onderzoeksvraag beantwoord met de uitgebreide histogrammen tot 2100 gemaakt in onderzoeksvraag 6. Ook zijn de watergangen vergeleken met hun situaties in de zomer van 2018: stonden watergangen die uit dit onderzoek als klimaatgevoelig naar voren kwamen ook droog vorig jaar?

3 Resultaten

Na het bepalen van de methodologie en het afbakenen van het onderzoek, is het onderzoek uitgevoerd. In dit hoofdstuk staan de bijbehorende resultaten beschreven.

Inventarisatiefase

In de inventarisatiefase zullen onderzoeksvraag 1, 2 en 3 worden beantwoord. Na het beantwoorden van deze onderzoeksvragen zal er genoeg informatie zijn verzameld om het droogtemodel op te stellen.

Onderzoeksvraag 1

Hoe wordt de droogte-indicator gedefinieerd?

In deze eindopdracht is de droogte-indicator gedefinieerd als ‘aantal droge dagen per jaar’. Er is gekeken naar twee typen droogte om te bepalen of een dag kan worden gezien als een droge dag: extreme droogte en kritieke droogte. Extreme droogte is hierbij gedefinieerd als droogval of extreem lage waterstanden, waarbij de waterdiepte in de watergang gelijk is aan 0,0 m, behoort bij de laagste 10% aan waterstanden (gebaseerd op observaties tot 2019) of onder het meetminimum is. Om een beter beeld te krijgen van kritieke droogte en zijn formulering, is er een interview afgenomen bij ecooloog van het WRIJ. Dit interview kan worden teruggelezen in Bijlage VI: Onderzoeksvraag 1. Hieruit is gebleken dat voor een watergang niet per se weinig afvoer of een lage waterstand zal zorgen voor een kritiek scenario, maar vooral een lage zuurstofconcentratie. Om preciezer te zijn, bij een zuurstofconcentratie lager dan 6 mg/liter zullen waterfauna in een kritiek scenario terecht komen waarbij voor sommige waterfauna een uur in deze omstandigheden al fataal kan zijn. Hieruit kan dus worden aangenomen dat om de kritieke droogte te bepalen, de dagelijkse zuurstofconcentraties van het water nodig zijn. Echter, WRIJ beschikt niet over dagelijkse zuurstofconcentraties, en zuurstofconcentraties afleiden uit dagelijkse waterkwantiteitsmetingen is niet mogelijk, ook omdat andere parameters (waaronder temperatuur) meespelen in het bepalen van de zuurstofhoeveelheden in het water. Daarom is ervoor gekozen om de kritische droogte in dit onderzoek buiten beschouwing te laten, en zal er alleen worden gekeken naar de extreme droogte (droogval of extreem lage waterstanden).

Om te kunnen onderzoeken hoe extreme droogte verschilt over tijd, zal de droogte-indicator worden gedefinieerd als ‘aantal droge dagen per jaar’, waarna later wordt verwezen als hydrologische droogte. Er is gekozen voor de tijdstap van een dag omdat Menyanthes ook met deze tijdstap te werk gaat. Er wordt onderscheid gemaakt in jaren om zo een bepaalde trend te kunnen ontdekken. Een dag wordt hierbij als droog gezien als:

- de gemiddelde waterstand van die dag zich in de laagste 10% aan waterstanden bevindt;
- de gemiddelde waterstand onder het meetminimum ligt;
- de gemiddelde waterstand gelijk of lager is dan de bodemhoogte van de watergang.

De bodemhoogte van elke watergang is bepaald aan de hand van de legger. Dit is de theoretisch gemiddelde bodemhoogte, en is voor elke watergang verwerkt in een ArcGIS-laag beschikbaar bij WRIJ.

Onderzoeksvraag 2

Hoe uitzonderlijk was de hydrologische droogte van 2018 vergeleken met normaal?

Om antwoord te krijgen op onderzoeksvraag 2 zal eerst de meteorologische droogte van 2018 onderzocht worden op basis van literatuur en daarna de hydrologische droogte van 2018 op basis van de observaties van WRIJ.

Meteorologische droogte

Meteorologische droogte per jaar wordt in neerslagtekort per jaar uitgedrukt. Neerslagtekort is het verschil tussen verdamping en neerslag. Als er meer verdamping optreedt dan neerslag spreekt men van een neerslagtekort. In 2018 lag het landelijk gemiddelde op 309 mm (Sluiter, et al., 2018). Dit betekent dat er gemiddeld voor 309 mm aan regen moet vallen zonder enige verdamping om de meteorologische droogte weer op peil te krijgen. Door dit neerslagtekort behoort het jaar 2018 in de top 5 van droogste jaren ooit gemeten. Landelijk zonder koppositie

want 1976 blijft hier het droogste jaar ooit gemeten met een maximaal neerslagtekort van 363 mm (KNMI (5), n.d.). Voor het WRIJ-gebied is 2018 wel het droogste jaar ooit gemeten met een maximaal neerslagtekort van bijna 400 mm (Waterschap Rijn en IJssel (3), 2019). De herhalingstijd van een jaar zoals 2018 is momenteel 30 jaar. Ter vergelijking: het recordjaar 1976 heeft een landelijke herhalingstijd van 90 jaar en is dus zeldzamer (Sluijter, et al., 2018). Met optreden van het klimaatscenario WH in de toekomst (dit is het droogste scenario) zal de herhalingstijd van een droogte zoals 2018 verkleinen van 30 naar 10 jaar (Sluijter, et al., 2018) en dus vaker optreden.

Een andere toelichting van het KNMI op de droogte van 2018 is dat de droogte niet door klimaatverandering is opgetreden, maar door een hoge luchtdruk boven zuidelijk Scandinavië. Het KNMI herkent geen stijgend patroon of een trend. Dit betekent dat de kans op een droge zomer zoals die van 2018 tot nu toe niet veranderd door het versterkte broeikaseffect, en dus dat 2018 inderdaad een meteorologisch droog jaar geweest, maar ook een toevallige uitschieter.

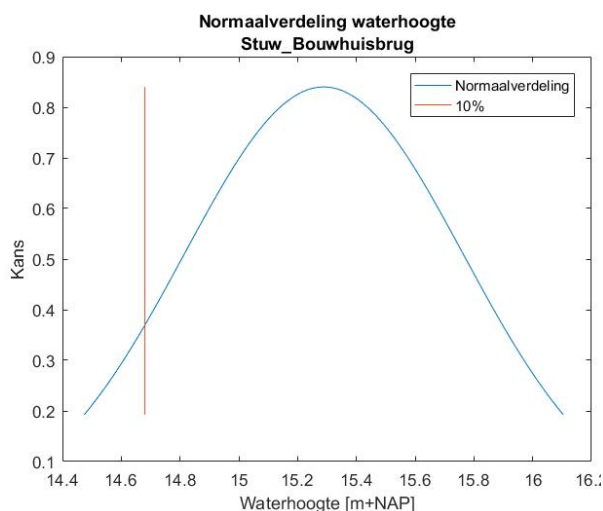
Hydrologische droogte

Om te bepalen of 2018 hydrologisch gezien toevallig was of juist in lijn van verwachting, worden de observaties van watergangmeetstations van WRIJ onderzocht.

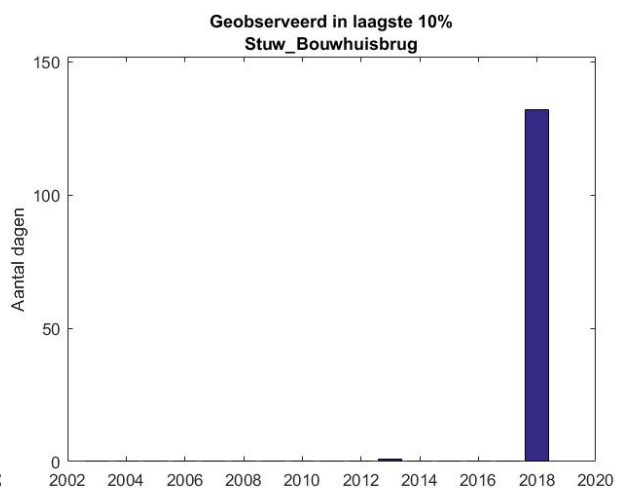
Watergangmeetstations voeren waterstandmetingen uit. De lengte van deze waterstandmetingen varieert van maar een paar jaar aan meetreeksen tot 30 jaar of nog langer. Om de hydrologische droogte van 2018 te bepalen is een watergangmeetstation gekozen met een lange periode aan observaties, om zo te bepalen of 2018 in de lijn van observaties afwijkt of juist te verwachten was.

Voor “Stuw Bouwhuisbrug” is het meetminimum niet duidelijk te onderscheiden en daarom zal er worden gekeken naar het aantal dagen waarop de waterstand bij de laagste 10% aan geobserveerde waterstanden behoort. Dit zal worden gedaan aan de hand van een normaalverdeling, zoals uitgelegd staat in Hoofdstuk 2. De normaalverdeling van 10% voor “Stuw Bouwhuisbrug” staat weergegeven in Figuur 16.

De meest-voorkomende waterstand op deze meetlocatie ligt tussen de 16,4 en 16,7 m+NAP. Als een waterstand onder de 15,943 m+NAP dan valt deze in de laagste 10% gemeten waterstand van dit meetstation. Door dit dagelijks te achterhalen, kan het aantal droge dagen per jaar worden bepaald. In Figuur 17 is dit weergegeven voor meetstation “Stuw Bouwhuisbrug”.

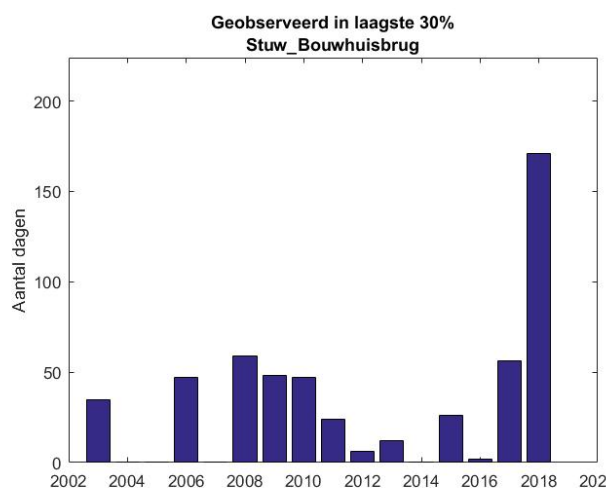


Figuur 16 - Normaalverdeling "Stuw Bouwhuisbrug"

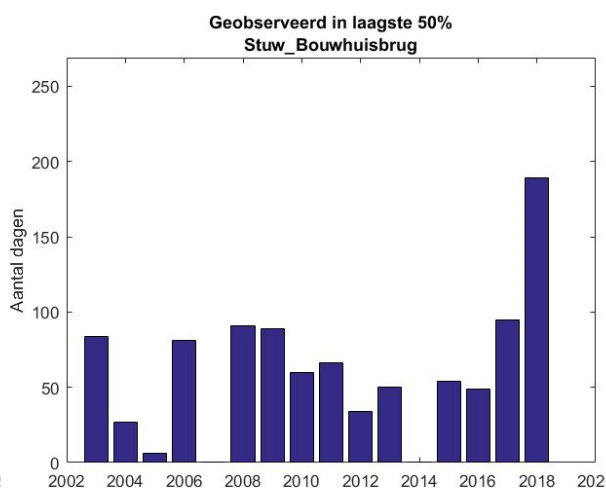


Figuur 17 - Aantal dagen waterstand in laagste 10% "Stuw Bouwhuisbrug"

Zoals te zien in Figuur 17 is 2018 voor dit meetstation een uitschieter geweest, maar de vraag is of deze uitschieter ook in lijn van verwachting is. Bij het onderzoeken van andere percentages in plaats van 10% valt er geen trend te ontdekken (Figuur 18 en Figuur 19). Wel kan er een soort 'aanloop' worden ontdekt vanaf 2015 naar 2018 toe. Deze aanloop wordt ook bij andere meetstations onderscheiden, maar er wordt aangenomen dat dit ook op toeval gebaseerd is.



Figuur 18 - Aantal dagen waterstand in laagste 30% "Stuw Bouwhuisbrug "



Figuur 19 - Aantal dagen waterstand in laagste 50% "Stuw Bouwhuisbrug "

De droogte van 2018 was hydrologisch gezien niet voorspelbaar. Er is geen trend te ontdekken vanaf het begin van de metingen naar nu. Dit is in overeenstemming met het KNMI, dat ook meteorologisch gezien geen afnemende trend in neerslag ontdekt maar juist een toenemende (Figuur 26) (Klimaatgek, 2018). De reden hiervoor kan zijn dat de samplegrootte te klein is om een goede trend te ontdekken. De kans bestaat dat als er naar een langere tijdreeks wordt gekeken (zeg 100 tot 200 jaar) er wel een stijgende lijn van hydrologische droogte kan worden onderscheiden.

Desondanks is er wel bewijs gevonden dat 2018 een uitzonderlijk droog jaar was ten opzichte van normaal. Er zijn veel droogterecords gebroken en ook bij elk watergangmeetstation is 2018 één van de droogste jaren ooit gemeten.

Onderzoeksvraag 3

Hoe kan een droogtemodel worden opgesteld?

Naast het definiëren van de droogte-indicator en de intensiteit van de droogte van 2018, is het van belang om te controleren of de methodologie van dit onderzoek een reële methodologie is. Hiervoor is literatuur over dit onderwerp nageslagen. De volgende rapporten over droogte modelleren zijn onderzocht:

1. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis (IPCC, 2013)
2. Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature... (de Vries, et al., 2014)
3. Drought prediction till 2100 under RCP 8.5 climate change scenarios for Korea (Park, et al., 2015)
4. Will drought events become more frequent and severe in Europe? (Spinoni, et al., 2018)
5. Drought modelling – A review (Mishra & Singh, 2011)

Rapport 1 is een algemeen rapport over klimaatverandering modelleren en wordt gebruikt ter introductie. In rapport 2 wordt uitgelegd hoe het KNMI de zeespiegelstijging van de Noordzee aan de Nederlandse kust heeft bepaald tot 2100. Rapport 3 en 4 leggen uit hoe meteorologische droogte kan worden bepaald door neerslag tot 2100 te genereren uit een neerslaggenerator. Rapport 5 is een algemeen rapport over droogte modelleren, waarbij verschillende rapporten over dit onderwerp zijn onderzocht en onderbouwd.

In Bijlage VII: Onderzoeksvraag 3 staat per rapport het literatuuronderzoek beschreven. In deze paragraaf wordt alleen het resultaat van dit literatuuronderzoek gegeven.

Kort gezegd bestaat het droogtemodel van deze eindopdracht uit het genereren van klimaataangepaste neerslag en verdamping voor de periode tot 2100, deze neerslag en verdamping plotten in een grondwatermodel in Menyanthes, en vanuit de gesimuleerde grondwaterstanden de hydrologische droogte bepalen in de watergang.

Bij het beantwoorden van onderzoeksvraag 3 is er dan ook gezocht naar een onderzoek die nagenoeg dezelfde aanpak gebruikt als deze eindopdracht, en dan met name de terugkoppeling van grondwater naar

oppervlaktewater. Dit is niet gevonden, maar er zijn wel onderzoeken gevonden die op sommige onderdelen sterk overlappen met de aanpak genoemd in deze eindopdracht.

De overeenkomst met het rapport van Mishra & Singh (2011) zijn de belangrijke input-parameters. Ook in deze eindopdracht zal er gekeken worden naar neerslag, afvoer, berging, waterstand en grondwaterstand. Daarnaast is de aanpak die wordt gebruikt (tijdreeksanalyse en lange-termijn analyse) een aangeraden analyse die genoemd wordt door de auteurs. De beoogde aanpak die geformuleerd staat in Hoofdstuk 2 is dus aangeraden om droogte mee te modelleren.

Een andere overeenkomst is dat er onderscheid wordt gemaakt tussen de perioden van klimaatscenario's (rond 2011-2040, 2041-2070 en 2071-2100), en dat de onderzoeken van Park et al. (2015) en Spinoni et al. (2018) op regionale schaal werken, en het dus wel mogelijk is om een droogte-onderzoek op regionale schaal uit te voeren.

Toch is er wel een klein verschil aanwezig: de droogte-indicator. Alle onderzoeksrapporten die zijn behandeld maken gebruik van droogte-indicatoren die zijn aanbevolen in het rapport van Mishra & Singh (2011). Het gebruik van deze droogteindicatoren is effectief en er is al veelvuldig gebruik van gemaakt. Echter kan voor deze eindopdracht niet één van deze droogte-indicatoren worden gebruikt, omdat het aanwijzen van een droge dag wordt gedaan op basis van waterstanden en niet op basis van meteorologische data.

Ook wordt er geen gebruik gemaakt van dagelijkse droogtebepaling. Een maandelijks bepaling is volgens de onderzoeksrapporten de kleinst mogelijke schaal. Echter, omdat de input in Menyanthes dagelijks moet zijn, zal de droogte-indicator ook dagelijks moeten worden bepaald.

In deze eindopdracht zullen de variabelen neerslag en verdamping niet uit een (stochastisch) model worden gehaald, maar uit een tijdreeksanalyse. Deze manier, het vermijden van GCM's, wordt afgeraden door Mishra & Singh (2011) omdat GCM's volgens hen de beste voorspelling kan geven op het gebied van meteorologie en ook De Vries et al. (2014), Park et al. (2015) en Spinoni et al. (2018) maken geen gebruik van tijdreeksanalyse maar van GCM's. Echter, het onder de knie krijgen van GCM's kost veel tijd en zal niet lukken in een tijdsbestek van 10 weken en daarnaast zal een periode van 80 jaar grotere 'interannual variability' bevatten. Daarom is de keuze gemaakt om voor het droogtemodel gebruik te maken van het herhalen van tijdreeksen. Onderzoeksvraag 5 zal wel gebruik maken van een GCM. Dit omdat bij deze onderzoeksvraag het niet van belang is om een lange tijdreeks aan jaren te vormen, maar één droog jaar.

Het onderzoek van De Vries et al. (2014) genereert geen neerslag en verdamping tot 2100 maar heeft zich puur gefocust op temperatuurverandering ten opzichte van variabelen. Deze temperatuur is niet gegenereerd tot 2100 maar De Vries et al. (2014) hebben gebruik gemaakt van de temperatuursveranderingen ten opzichte van normaal en hieruit distributies gemaakt. Hier ligt nog een verschil met deze eindopdracht, want De Vries et al. (2014) laten de temperatuur en variabelen lineair toenemen in een periode, maar in deze eindopdracht wordt voor de gehele periode (30 jaar) de neerslag en verdamping met hetzelfde percentage aangepast, wat trapsgewijs is.

Al met al kan er gezegd worden dat ondanks de afwijkende manier van het verkrijgen van neerslag- en verdampingswaarden, en de link tussen grondwater en oppervlaktewater (wat ervoor heeft gezorgd dat de droogte-indicator zelf geformuleerd is en niet gebaseerd is op al eerder-gebruikte droogte-indicatoren), de aanpak in het algemeen overeenkomt met hoe andere onderzoeken op het gebied van droogte zijn opgesteld. De valkuilen van de aanpak van deze eindopdracht zullen zijn op het gebied van schaal en accuraatheid. Het is lastig om tot 2100 neerslag- en verdampingswaarden te verkrijgen die zijn gebaseerd op relatief korte historische tijdreeksen en dagelijkse bevindingen.

Modelfase

Na het afronden van de Inventarisatiefase kan er worden begonnen aan het opstellen van het droogtemodel. Hiervoor worden verschillende MATLAB-scripts gebruikt, die hieronder kort worden toegelicht. Het percolatiemodel staat beschreven in Bijlage III: Casus percolatie, hieronder staat alleen de conclusie van de casus.

Casus ET_{act} en ET_{pot} (HydroNET model)

De website van HydroNET geeft per grid van 1x1 km² een tijdreeks aan ET_{act}. Allereerst wordt voor elk weermeetstation gekeken in welke grid-ID van HydroNET deze gelegen is. Dan zullen de tijdreeksen worden gedownload op de website van HydroNET die horen bij deze grid-ID voor de langst mogelijke periode aanwezig. Daarna worden de tijdreeksen met behulp van het script in MATLAB gekoppeld aan de naam van het weerstation, en wordt de data opgeslagen in een weerstation-format die kan worden gelezen door Menyanthes.

Zoals te lezen valt in Bijlage II: Casus ET_{act} en ET_{pot} geeft het gebruik van ET_{act} geen verbetering ten opzichte van het gebruik van ET_{pot} voor de casus. Daarom zal in dit onderzoek KNMI's ET_{pot} worden gebruikt. Wat wel een verbetering oplevert bij het gebruik van ET_{act} ten opzichte van ET_{pot} is de vorm van de grondwatercurve, maar de pieken zijn nog steeds aanwezig.

Casus Percolatie

Na het uitvoeren van de percolatiecasus kan er worden gezegd dat het implementeren van de percolatie-aanpassing in Menyanthes geslaagd is. De aanpassing werkt niet goed in de wintermaanden voor peilbuizen die worden gedraineerd, maar omdat voor deze eindopdracht de zomermaanden van belang zijn kunnen gedraineerde peilbuizen toch gebruikt worden.

Desondanks moet er wel een kleine kanttekening worden gemaakt, want het implementeren van de percolatie in Menyanthes vergt tijd en uitzoekwerk. Door de onbekende worteldiepte zullen modellen met elkaar moeten worden vergeleken en daarnaast moet de grondsoort van de grond in het gebied van de peilbuis zorgvuldig worden uitgekozen en eventueel ook worden vergeleken. Er kan namelijk geen verklaring worden gevonden voor de verschillen in worteldiepten (Tabel 11 in Bijlage III: Casus percolatie). Zowel het vergelijken van de ligging als het type meetreeks gaf geen duidelijkheid.

Daarnaast zullen de gegenereerde weergegevens moeten worden afgevlakt, en dit neemt veel tijd in beslag. Om deze redenen is er besloten om de percolatie alleen toe te voegen bij de peilbuizen van WRIJ, en niet bij de peilbuizen die extern worden verkregen. Ook is er een selectie gemaakt van de worteldiepten 100, 300, 600 en 1000 voor de kalibratie, en zal er niet worden gekeken naar andere worteldiepten. De uitslagen hiervan zijn te vinden in Tabel 14 in Bijlage V: Meetstations.

Weergeneratiemodel

Met dit MATLAB-script wordt allereerst de data van het KNMI-weerstation ingeladen. Er wordt onderscheid gemaakt in een neerslagstation (meet alleen neerslag), of weerstation (meet zowel neerslag als verdamping). Hierna worden de datums afgelezen en gecheckt op ontbrekende dagen. Mochten er datums missen, dan worden deze toegevoegd met een neerslag- en/of verdampingswaarde van 'NaN'. Nadat deze stap is uitgevoerd zal het script de schrikeldagen filteren en de data laten beginnen bij de eerste 1 januari gemeten, en laten eindigen bij 31-12-2018. Dit is vereist omdat het anders niet mogelijk is om in MATLAB matrixen met jaren als kolommen te maken. Hierna wordt bepaald hoeveel keer de data moet worden herhaald om tot een tijdreeks tot 2100 te komen, en wordt de data herhaald. De dagen die overblijven (dus langer dan 1-1-2100 zijn) worden verwijderd.

Nadat het opstellen van een tijdreeks tot 2100 gelukt is, zullen de vier klimaatscenario's worden toegevoegd. Dit wordt gedaan aan de hand van twee periodes. Tot en met 2035 blijven de tijdreeksen onaangepast. Vanaf 1-1-2036 tot 1-1-2066 zal de eerste aanpassing worden gedaan, en vanaf 1-1-2066 tot 1-1-2100 de tweede. De aanpassing wordt gedaan door de neerslag- of verdampingswaarde te vermenigvuldigen met een bepaald percentage, gegeven door het KNMI (zie Bijlage IV: Procentuele verandering bij KNMI-klimaatscenario's). Voor verdamping is dit percentage per periode per klimaatscenario verschillend. Dit betekent dat er 4x2=8 verschillende percentages zijn. Voor neerslag is dit per seizoen per periode per klimaatscenario. Dit betekent dat hiervoor 4x4x2=32 verschillende percentages zijn.

Uiteindelijk zijn er dus 5 verschillende tijdreeksen: een onaangepaste en vier met klimaatscenario's. Deze tijdreeksen worden opgeslagen in vijf aparte bestanden met een weerstation-format die kan worden gelezen door Menyanthes. In Menyanthes worden dan de grondwatersimulaties uitgevoerd per klimaatscenario.

Droogtemodel

Het droogtemodel wordt gebruikt om de verkregen (gesimuleerde) grondwaterstanden te onderzoeken op de droogte-indicatoren en terug te koppelen aan waterstanden.

Het droogtemodel werkt vanuit een Excel-bestand, waarin onder andere staat wat de bodemhoogte is, of er sprake is van een zichtbaar meetminimum en welk watergangmeetstation is gekoppeld met welke peilbuis.

Allereerst worden de observaties van het watergangmeetstation en de peilbuis ingeladen, en wordt er van de watergangobservaties een normaalverdeling gemaakt. Door een opgegeven percentage (in deze eindopdracht 10%) kan uit deze verdeling de waterstand worden gehaald waarbij de laagste 10% is bereikt. Hierna wordt een 'aantal droge dagen'-histogram gemaakt op basis van de 10% en eventueel ook een 'aantal dagen op meetminimum'-histogram.

Nadat dit is afgerond worden de grondwaterobservaties en watergangobservaties gecombineerd tot één tabel (startend op eerste 1 januari waarop ze beide meten), en wordt deze 'ruwe' data geplot in een figuur. Hierna wordt de 'ruwe' data aangepast. De dagen met ontbrekende informatie worden gefilterd, en als er duidelijk sprake is van een meetminimum worden ook deze dagen verwijderd. Ook deze aangepaste data wordt geplot. Later wordt de (cor)relatiegrafiek opgesteld op basis van deze data. Nadat de (cor)relatiegrafiek is opgesteld, worden de gesimuleerde grondwaterstanden uit Menyanthes ingeladen en worden hierbij de bijbehorende gesimuleerde waterstanden bepaald aan de hand van de (cor)relatiegrafiek. Uiteindelijk worden ook hiervoor per klimaatscenario dezelfde histogrammen opgesteld als bij de watergangobservaties aan het begin van het script.

Validatiefase

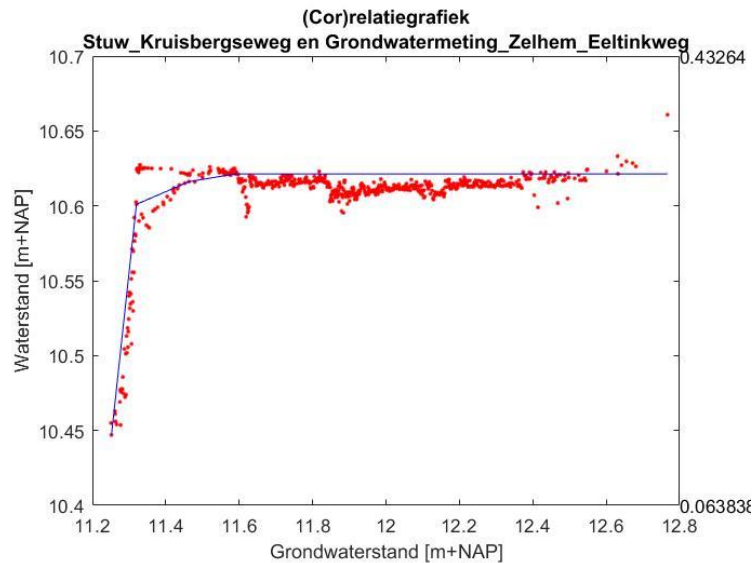
Onderzoeksvraag 4

Kan hydrologische droogte acceptabel worden gesimuleerd?

Omdat de grondwatermodellen voor de klimaatscenario's (GL, GH, WL en WH) worden opgesteld op basis van observaties, en ze allemaal de observaties tot 2019 bevatten, zullen de parameters van de grondwatermodellen aan elkaar gelijk zijn en de grondwaterstanden dus variëren op basis van de verschillende verklarende reeksen van neerslag en verdamping. In Tabel 17 in Bijlage VIII: Onderzoeksvraag 4 staan de validatiewaarden voor de grondwatermodellen. De peilbuizen waarbij de percolatie is toegevoegd hebben een worteldiepte vermeld. Zoals te zien hebben alle modellen een EVP boven 70%, en een RMSE niet groter dan 0,214 m. De modellen geven dus accurate grondwaterstanden bij het extrapoleren.

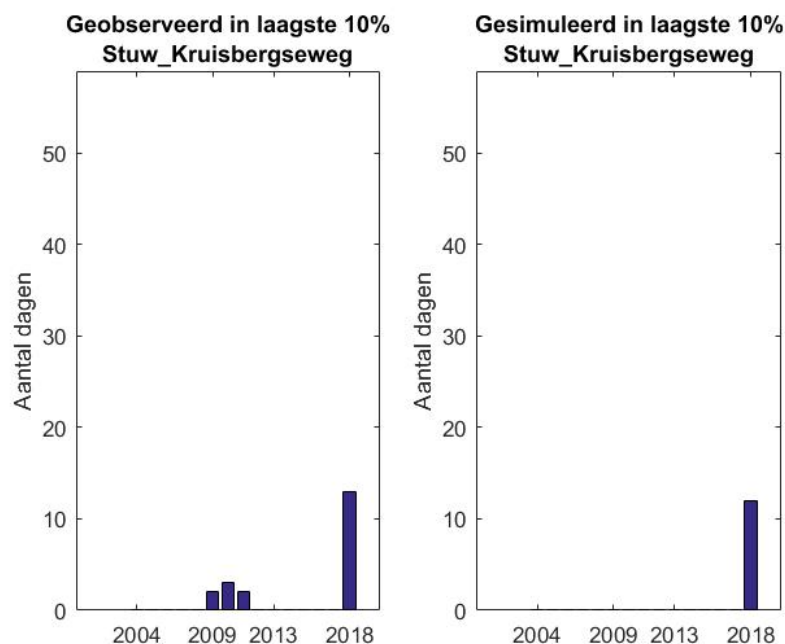
Nadat de grondwatermodellen voor elk klimaatscenario zijn geëxtrapoleerd, worden de verkregen grondwaterstanden in MATLAB geïmplementeerd en worden de waterstanden verkregen middels de relatiegrafieken.

De relatiegrafieken worden gevalideerd door de gesimuleerde grondwaterstanden tot 2019 uit Menyanthes terug te koppelen naar waterstanden en nieuwe 'aantal droge dagen per jaar'-histogrammen te maken. Hieronder in Figuur 20 is de relatiegrafiek weergegeven met de minst goede trendlijn, om zo te laten zien dat deze ook nog steeds accurate waterstanden simuleert. De meetstations van deze relatie zijn "Stuw Kruisbergseweg" en "Grondwatermeting Zelhem Eeltinkweg" met een r-waarde van 0,432 (waarde is te vinden rechts bovenin Figuur 20).



Figuur 20 - (Cor)relatiegrafiek "Stuw Kruisbergseweg" en "Grondwatermeting Zelhem Eeltinkweg"

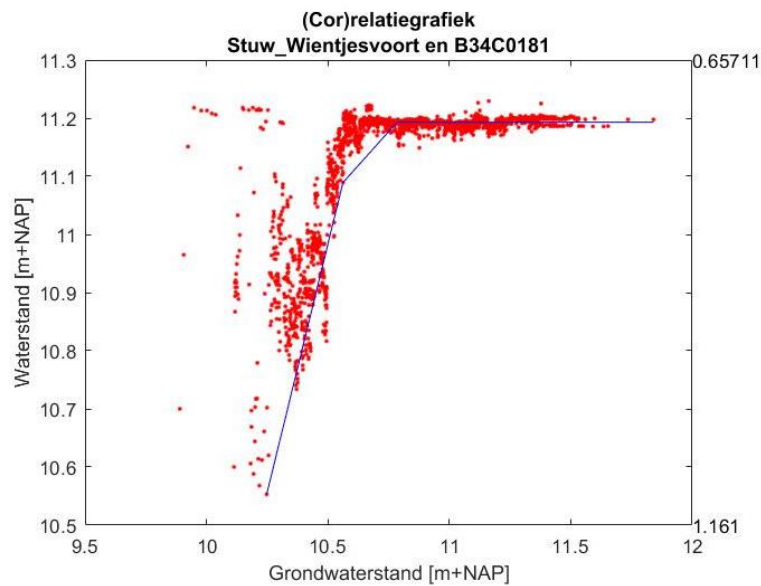
Ondanks deze lage correlatie, geeft de (cor)relatiegrafiek wel accurate waterstanden. In Figuur 21 staan de histogrammen van het aantal dagen waarbij de waterstanden in de laagste 10% bevinden. Het linker histogram is gebaseerd op de geobserveerde waarden. Het rechter histogram is gebaseerd op de gesimuleerde waterstanden die zijn verkregen door de terugkoppeling met de gesimuleerde grondwaterstanden uit Menyanthes en de (cor)relatiegrafiek. In beide figuren kan worden gezien dat de piek van 2018 goed terugkomt in de simulatie. De kleinere pieken in 2008, 2009 en 2010 zijn niet terug te zien, maar omdat het maar om een paar dagen gaat valt deze afwijking te verwaarlozen en wordt de (cor)relatie nog als accuraat beschouwd.



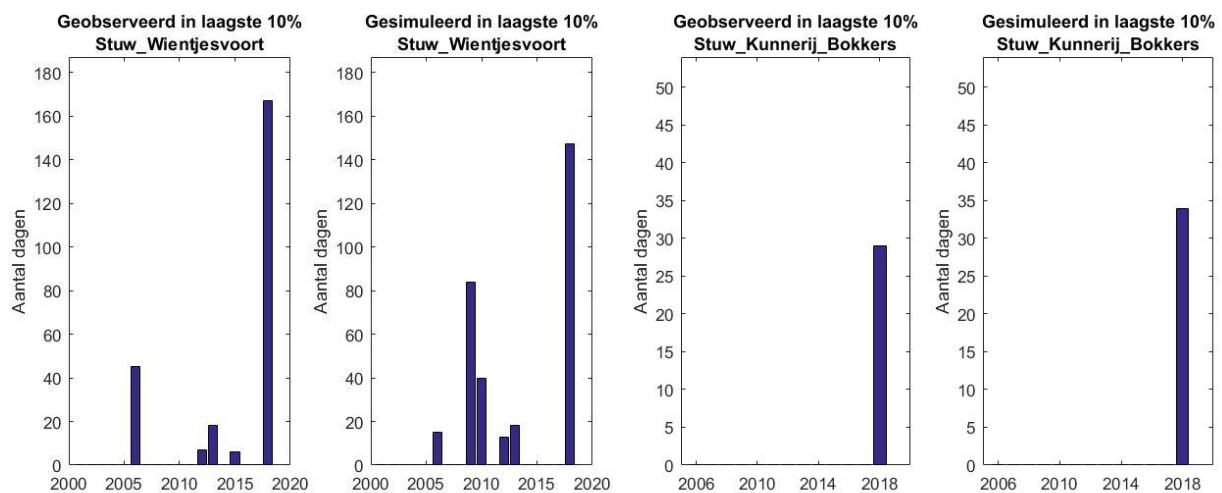
Figuur 21 - Histogram laagste 10% "Stuw Kruisbergseweg" - slechtste correlatie door r-waarde

De (cor)relatiegrafiek met de grootste afwijking is die van "Stuw Wientjesvoort" en peilbuis "B34C0181" met een afwijking van 1,161 m. Bij het zien van de (cor)relatiegrafiek kan deze grote afwijking als nihil worden gezien omdat het wordt veroorzaakt door een paar verwaarloosbare observaties (Figuur 21). Het verschil tussen simulatie en observatie is te zien in Figuur 23. Zoals te zien is hier ook sprake van een kleine afwijking, maar over het algemeen zijn de geobserveerde pieken ook terug te zien in de simulatie.

De beste (cor)relatie is tussen “Stuw Kunnerij Bokkers” en “Batsdijk Kunnerij PB 11”. De gesimuleerde droge dagen komen, ondanks een paar dagen, overeen met de geobserveerde droge dagen (Figuur 24).



Figuur 22 - (Cor)relatiegrafiek "Stuw Wientjesvoort" en peilbuis "B34C0181"



Figuur 23 - Histogram laagste 10% "Stuw Wientjesvoort"
Slechte correlatie door afwijking

Figuur 24 - Histogram laagste 10% "Stuw Kunnerij Bokkers"
Beste correlatie

De grondwatermodellen in Menyanthes hebben allemaal een EVP hoger dan 70% en een afwijking onder de 0,214 m. De grondwatermodellen in Menyanthes zijn dus accuraat genoeg.

Na het valideren van de droogtemodellen (combinatie van grondwatermodellen in Menyanthes en relatiegrafieken in MATLAB) zijn de modellen met een slechte correlatie gefilterd. De overgebleven relaties en dus ook alle droogtemodellen zijn hierdoor als valide bevonden. De overgebleven meetstations zijn te zien in Bijlage V: Meetstations. De maximale afwijking uit de relatiegrafieken voor de gesimuleerde waterstanden is 1,61 m, wat voor een relatief kleine afwijking zorgt in de ‘aantal droge dagen’-histogrammen

Slotfase

In de slotfase worden onderzoeksvragen 4, 5 en 6 beantwoord, gebruik makend van de resultaten verkregen uit de gevalideerde droogtemodellen.

Onderzoeksvraag 5

Wat is de meest extreme waarde van de laagste grondwaterstand?

In Menyanthes is voor 1000 jaar aan grondwaterstanden gesimuleerd. In Tabel 2 staan de resultaten weergegeven. Percolatie is voor geen enkele peilbuis toegevoegd. De laagste grondwaterstanden die voor 1000 jaar gesimuleerd zijn, zijn verkregen uit de grondwatermodellen gebaseerd op ofwel Deelen ofwel Hupsel. Tussen haakjes staat het jaar van voorkomen. Het gemiddelde verschil is 0,20 m, en staat onderaan de tabel weergegeven.

Tabel 2 - Resultaten verschil laagste observaties en laagste simulaties

Peilbuis	Bron	Weerstation	Laagste grondwaterstand geobserveerd in 2018 [m+NAP]	Laagste grondwaterstand 1000 jaar [m+NAP] (gesimuleerd jaar-nummer)	Verskil [m+NAP]
Batsdijk-Kunnerij_PB_11	WRIJ	Hupsel	15,77	15,39 (2168)	0,38
Gemaal_Hackfort_-_Makkink	WRIJ	Hupsel	7,97	7,70 (2168)	0,27
Grondwatermeting_Zelhem_Eeltinkweg	WRIJ	Hupsel	11,25	10,92 (2168)	0,33
Gemaal_Hackfort_-_Harmsen	WRIJ	Hupsel	8,03	7,77 (2168)	0,26
B33H1522	Vitens Lizard	Deelen	7,19	6,91 (2574)	0,28
B34C0181	Vitens Lizard	Deelen	9,77	9,69 (2863)	0,08
B34D0335	Vitens Lizard	Hupsel	17,80	17,65 (2168)	0,15
B40F0488	Vitens Lizard	Deelen	11,10	10,99 (2863)	0,11
B41A0553	Vitens Lizard	Deelen	14,43	14,24 (2602)	0,19
B41E0336	Vitens Lizard	Hupsel	28,79	28,51 (2168)	0,28
ZV26	Liemers Grondwater	Deelen	8,46	8,38 (2602)	0,08
ZV31	Liemers Grondwater	Deelen	8,92	8,88 (2602)	0,04
Gemiddeld					0,20

Uit Tabel 2 kan er gehaald worden dat het jaar met de meest lage gesimuleerde grondwaterstanden gebaseerd op weerstation Hupsel 2168 is, met een gesimuleerde neerslagsom van 545 mm en de verdamping hetzelfde als 2018. Voor Deelen is dit 2602, met een neerslagsom van 839 mm. Ter vergelijking: de neerslagsom van 2018 was gemiddeld 607 mm (KNMI (7), 2019).

Onderzoeksvraag 6

Beïnvloeden gebiedskenmerken de intensiteit van hydrologische droogte?

Om te testen of de uitkomsten van het droogtemodel ook te verklaren zijn, wordt er onderzocht of bepaalde gebiedskenmerken voor een groter risico op droogte of juist een kleiner risico op droogte zorgen. De gebiedskenmerken grondsoort, (sub)stroomgebiedgrootte en hoogte worden onderzocht.

Hiervoor worden eerst de 'aantal droge dagen'-histogrammen uitgebreid met de resultaten tot 2100. Dit is gedaan door voor een onaangepast scenario en de klimaatscenario's GL, GH, WL en WH tot 2100 het aantal droge dagen te runnen (aantal droge dagen = lager dan 10%, onder het meetminimum of droogval). De resultaten hiervan staan weergegeven in Bijlage XI: Resultaten droogtemodel – dagen. Voor dit onderzoek zal er gekeken worden naar de afwijking van deze jaarlijkse resultaten ten opzichte van het jaarlijkse resultaat in het onaangepaste scenario. Het onaangepaste scenario heeft hierbij een percentage van 100%, en de afwijking kan hierboven zitten (meer droge dagen) of hieronder (minder droge dagen). Het meetstation met de grootste afwijking ten opzichte van 100% is dus het gevoeligste voor klimaatverandering. De uitkomsten in percentages in plaats van dagen kunnen worden bekeken in Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages. In onderstaande tabel (Tabel 3) staan de resultaten van Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages gerangschikt op basis van hun resultaten. Het bovenste

meetstation wijkt het meeste af van het onaangepaste scenario, het onderste meetstation het minste. Met andere woorden: het bovenste meetstation is het meest gevoelig voor klimaatverandering en het onderste het minst.

Iedere kolom staat voor een klimaatscenario, en ook is het gemiddelde van alle klimaatscenario's samen weergegeven in de meest rechter kolom. Zoals te zien, verschillen de kolommen niet veel van elkaar. Dit betekent dat de meetstations die het meest gevoelig zijn, over het algemeen gevoelig zijn voor klimaatverandering en niet per se voor een specifieke klimaatverandering. In Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages is onderscheid gemaakt in het wel en niet toevoegen van de percolatie. Het blijkt dat het wel of niet toevoegen van de percolatie vooral invloed heeft op de percentages van het aantal droge dagen per jaar ten opzichte van het scenario waarbij geen klimaatverandering is toegepast. Dit maakt echter niet veel verschil in de volgorde van risicovolste meetstation naar minst risicovolste in Tabel 3. In Tabel 3 staat de versie met percolatie weergegeven.

In deze paragraaf zullen de resultaten uit het aantal dagen waarbij de waterstand zich in de laagste 10% bevond worden gebruikt. Dit aangezien niet bij elk meetstation een duidelijk meetminimum af te lezen is, en ook droogval niet is opgetreden bij elk meetstation. Daarnaast konden de resultaten van het meetstation “Zeggelinkhagbrug” niet worden meegenomen in deze vergelijking omdat het onaangepaste scenario uit 0 droge dagen bestond, en er hieruit geen percentage kon worden afgeleid voor het aantal droge dagen door de klimaatscenario's.

Tabel 3 - Resultaten droogtemodel

Percentage aantal dagen waterstand in laagste 10% t.o.v. aantal dagen zonder klimaatscenario [%]									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
217	Stuw Kruisbergseweg	217	Stuw Kruisbergseweg	239	Stuw Kruisbergseweg	309	Stuw Bouwhuisbrug	242	Stuw Kruisbergseweg
149	Gemaal Methen	174	Stuw Bouwhuisbrug	179	Stuw Bouwhuisbrug	294	Stuw Kruisbergseweg	200	Stuw Bouwhuisbrug
146	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	166	Gemaal Methen	169	Gemaal Methen	232	Gemaal Methen	179	Gemaal Methen
138	Stuw Bouwhuisbrug	154	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	156	Gemaal Wip-Inn	216	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	160	Gemaal Wip-Inn
135	Gemaal Wip-Inn	150	Gemaal Wip-Inn	141	Stuw Kunnerij Bokkers	209	Gemaal Zumpe	158	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek
134	Stuw Kunnerij Bokkers	137	Stuw Kunnerij Bokkers	136	Gemaal Zumpe	200	Gemaal Wip-Inn	151	Gemaal Zumpe
126	Gemaal Zumpe	134	Gemaal Zumpe	119	Gemaal t' Klooster	194	Stuw Kunnerij Bokkers	151	Stuw Kunnerij Bokkers
113	Gemaal t' Klooster	120	Gemaal t' Klooster	116	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	142	Gemaal t' Klooster	124	Gemaal t' Klooster
108	Stuw Wientjesvoort	118	Stuw Wientjesvoort	114	Stuw Wientjesvoort	132	Stuw Wientjesvoort	118	Stuw Wientjesvoort
103	Stuw Horsterkamp	112	Stuw Horsterkamp	109	Stuw Horsterkamp	126	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	110	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek
100	Overlaat De Kip	110	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	103	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	125	Stuw Horsterkamp	112	Stuw Horsterkamp
100	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	103	Gemaal Hackfort - vopo pomp	101	Overlaat De Kip	110	Gemaal Hackfort - vopo pomp	103	Gemaal Hackfort - vopo pomp
95	Stuw Bruinderinkweg	101	Overlaat De Kip	99	Gemaal Hackfort - vopo pomp	103	Overlaat De Kip	101	Overlaat De Kip
98	Gemaal Hackfort - vopo pomp	92	Stuw Bruinderinkweg	86	Stuw Bruinderinkweg	79	Stuw Bruinderinkweg	91	Stuw Bruinderinkweg

Wat opvalt, is dat “Stuw Kruisbergseweg” een uitschieter is, en dat de rest van de meetstations met hun waarden vrij dichtbij elkaar blijven.

Grondsoort

Door de meetstations te koppelen aan de grondsoorten van hun locaties, is er onderzocht of grondsoort een rol speelt in de gevoeligheid van een meetstation op klimaatverandering. De uitwerking hiervan staat weergegeven in Bijlage X: Onderzoeksvraag 6.

Hieruit kan worden opgemaakt dat meetstations (en dus ook watergangen) gelegen in een zandgebied het meest gevoelig zijn voor klimaatverandering en dus het meeste risico lopen op droogval. Om specifieker te zijn: fijn lemig zand en fijn zand met lichte zwavel staan erg bovenaan in Tabel 19.

Hoogte

Door achter de meetstations de hoogte in m+NAP te zetten, kan er worden onderzocht of watergangen die een groter risico hebben op droogte ook juist hoog- of laaggelegen zijn. Resultaten hiervan zijn ook te vinden in Bijlage X: Onderzoeksvraag 6.

Hieruit kan worden opgemaakt dat hoogte in principe geen rol speelt in de mate van gevoeligheid voor klimaatverandering. Er kan geen overeenkomst worden ontdekt.

(Sub)stroomgebiedgrootte

Voor elk meetstation is het substroomgebied en de bijbehorende grootte bepaald. Om een overzichtelijke tabel te maken, is ervoor gekozen om de substroomgebiedgrootten te rangschikken van klein naar groot. Hetzelfde is gedaan voor de vijf hoofdstroomgebieden van WRIJ. Wederom zijn de resultaten hiervan te vinden in Bijlage X: Onderzoeksvraag 6.

Uit de substroomgebieden kan geen verklaring worden getrokken omdat de groottes van de substroomgebieden te veel variëren in de tabel.

Bij het gebruik van de vijf hoofdstroomgebieden viel op dat het grootste stroomgebied van WRIJ, de Berkel, twee keer onderaan de tabel staat en het een na kleinste stroomgebied, de Oude IJssel, twee keer relatief bovenaan. Dit kan berusten op toeval, en daarom is het onderzoeken van 15 meetstations onderzoeken te klein om hierover betrouwbare conclusies te trekken. Ook was er tussen de 15 meetstations geen enkele gelegen in de Schipbeek, wat het kleinste stroomgebied is van WRIJ. Het is te verwachten dat bij onderzoeken van meer meetstations waarvan een paar in ieder geval gelegen in de Schipbeek de resultaten duidelijker zullen worden. Voor dit onderzoek zijn hiervoor niet genoeg meetstations bruikbaar.

Meetminimum

Bij het sorteren van de resultaten op meetminimum verschilt de volgorde in meetstations niet dusdanig veel met wat er staat weergegeven in Tabel 3, hoogstens één plaats. Natuurlijk missen er wel een paar meetstations omdat deze niet duidelijk een meetminimum meten (zie Hoofdstuk 2).

Droogval

Wat geldt voor het meetminimum geldt niet voor droogval. Hier verschilt de volgorde met wat er staat weergegeven in Tabel 3, zie Tabel 4. “Gemaal Hackfort – vopo pomp” is hierbij als risicovolste geconcludeerd, terwijl dit meetstation als een van de laagste staat weergegeven in Tabel 3. De andere drie meetstations staan wel op goede volgorde. Er zijn een paar redenen te bedenken om dit mee proberen te verklaren.

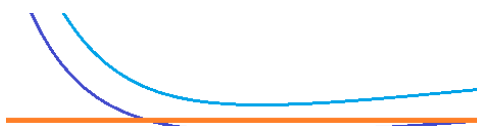
Allereerst kan de bodemhoogte uit het ArcGIS-bestand niet helemaal kloppen of is het gebruik van alleen de legger onvoldoende en heeft het gebruik van metingen de voorkeur. De bodem die gebruikt is voor “Gemaal Hackfort – vopo pomp” kan namelijk te hoog zijn en daardoor het aantal dagen droogval te groot. Deze verklaring is in dit geval geen goede verklaring, omdat “Gemaal Hackfort – vopo pomp” zo hoog is geëindigd door het verschil met het scenario waarbij geen klimaatscenario’s zijn toegevoegd en bij dit ongepaste scenario is dezelfde bodemhoogte gebruikt.

Ook kan het gebruik van de percolatie de afwijkende volgorde verklaren. “Gemaal Hackfort – vopo pomp” is namelijk het enige meetstation in deze reeks waarbij de peilbuis percolatie is gebruikt. De percolatie vlak de grondwatercurve in droogteperiodes af, waardoor er minder pieken ontstaan. Hierdoor zijn de grondwaterstanden (en dus ook de waterstanden) in deze periodes stabiel en meer afgevlakt waardoor het aantal dagen waarbij de waterstand op of onder de bodemhoogte uitkomt groter kan zijn en minder variabel. Het onaangepaste scenario bevat ook de percolatie, maar het kan wel zo zijn dat de gesimuleerde waterstanden hiervoor net iets boven de bodemhoogte uitkwamen, en met de klimaatscenario’s toegevoegd de waterstanden iets lager uitvielen tot de bodemhoogte. Klimaatscenario’s zijn voornamelijk zichtbaar in de pieken van het watermodel, en met toepassing

van de percolatie kan dit effect worden versterkt. Dit effect is afgebeeld in Figuur 25. De bovenste lichtblauwe lijn is het onaangepaste scenario waarbij de waterhoogte tot net iets boven de bodem komt (oranje lijn). De onderste donkerblauwe lijn is een klimaatscenario, waarbij de waterhoogte tot net iets onder de bodemhoogte komt. Er wordt dus verwacht dat de percolatie de reden is van het hoog uitvallen van het meetstation “Gemaal Hackfort – vopo pomp”.

Tabel 4 - Resultaten droogval

Percentage aantal dagen droogval t.o.v. aantal dagen zonder klimaatscenario [%]									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
133	Gemaal Hackfort - vopo pomp	147	Gemaal Hackfort - vopo pomp	136	Gemaal t' Klooster	228	Gemaal Hackfort - vopo pomp	156	Gemaal Hackfort - vopo pomp
125	Gemaal t' Klooster	130	Gemaal t' Klooster	118	Stuw Horsterkamp	162	Stuw Wientjesvoort	136	Gemaal t' Klooster
112	Stuw Horsterkamp	122	Stuw Wientjesvoort	115	Gemaal Hackfort - vopo pomp	152	Gemaal t' Klooster	127	Stuw Wientjesvoort
112	Stuw Wientjesvoort	118	Stuw Horsterkamp	111	Stuw Wientjesvoort	133	Stuw Horsterkamp	120	Stuw Horsterkamp



Figuur 25 - Verklaring afwijking "Gemaal Hackfort - vopo pomp"

Onderzoeksvraag 7

Welke watergangen van WRIJ zullen vaker droog komen te staan in de toekomst door klimaatverandering?

Uiteindelijk kunnen de meetstations en de resultaten verkregen uit onderzoeksvraag 6 worden gekoppeld aan watergangen. In Bijlage XIV: Onderzoeksvraag 7 staan kaarten afgebeeld met alle onderzochte meetstations en hun bijbehorende (bovenstroomse) watergangen en peilbuizen. De nummering van de meetstations is gedaan op basis van de volgorde van Tabel 3. Peilbuizen zijn genummerd en omcirkeld. Watergangmeetstations zijn driehoeken. Uit onderzoeksvraag 6 bleek dat de onderzochte watergangen gelegen in een gebied van fijn zand met leem of lichte zwavel het gevoeligst zijn voor klimaatverandering.

In Tabel 5 staat de samengenomen rangschikking weergegeven voor de klimaatscenario's.

Ter extra controle zijn de resultaten van onderzoeksvraag 7 vergeleken met de drooggevallen watergangen van zomer 2018. Watergangen die uit dit onderzoek als kwetsbaar zijn aangeduid, zullen ook in 2018 moeten hebben drooggestaan. In het ArcGIS-archief van WRIJ is een kaartlaag beschikbaar met alle drooggevallen watergangen van zomer 2018.

Bij alle onderzochte watergangen was in de zomer van 2018 sprake van droogval. Alleen de Groenlose Slinge bij meetstation “Zeggelinkhagbrug” had destijds nog water staan. Dit klopt met de simulaties uit het droogtemodel, aangezien het droogtemodel tot 2036 geen droge dagen heeft gesimuleerd voor dit meetstation en er dus ook geen droge dagen zijn geobserveerd. Dit maakte wel dat “Zeggelinkhagbrug” hierdoor niet kon worden meegenomen in het onderzoek en uit de selectie is gehaald bij onderzoeksvraag 6.

Om toch een plek in de rangschikking te schatten voor “Zeggelinkhagbrug”, is er gekeken naar het aantal droge dagen in Bijlage XI: Resultaten droogtemodel – dagen. Het verschil tussen de klimaatscenario's en het onaangepaste scenario is niet dusdanig veel. Door deze twee redenen samen te nemen (geen droogval tot 2100 en weinig verschil in droge dagen) kan worden geconcludeerd dat klimaatverandering niet veel invloed zal uitoefenen op de Groenlose Slinge, en dat deze ergens onderaan in Tabel 5 zal moeten worden geplaatst.

Tabel 5 - Conclusie

Gemiddelde percentage aantal dagen droogval t.o.v. aantal dagen zonder klimaatscenario [%]						
Watergangmeetstation	Watergang	Situatie zomer 2018 bovenstroms	Grondsoort	Hoogte [m+NAP]	Stroomgebied	
242	Stuw Kruisbergseweg	Droogval	Veen	11,21	Baakse Beek	
200	Stuw Bouwhuisbrug	Droogval	Zand fijn: lemig	15,98	Oude IJssel	
179	Gemaal Methen	Droogval	Zand fijn: lichte zwavel	11,86	Liemers / Veluwe	
160	Gemaal Wip-Inn	Droogval	Zand fijn: lichte zwavel	11,87	Liemers / Veluwe	
158	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	Droogval	Zand fijn: lemig	10,09	Baakse Beek	
151	Gemaal Zumpe	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	12,85	Oude IJssel	
151	Stuw Kunnertij Bokkers	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	17,82	Baakse Beek	
124	Gemaal t' Klooster	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	16,98	Baakse Beek	
118	Stuw Wientjesvoort	Droogval	Klei evt op zand	13,51	Baakse Beek	
112	Stuw Horsterkamp	Droogval	Klei evt op zand	12,40	Baakse Beek	
110	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	8,87	Baakse Beek	
103	Gemaal Hackfort - vopo pomp	Droogval	Klei evt op zand	10,13	Berkel	
101	Overlaat De Kip	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	29,91	Berkel	
91	Stuw Bruinderinkweg	Droogval	Zand fijn: leemarm / zwak lemig	11,69	Baakse Beek	
±100	Zeggelinkhagbrug	Afvoerstop				

4 Discussie

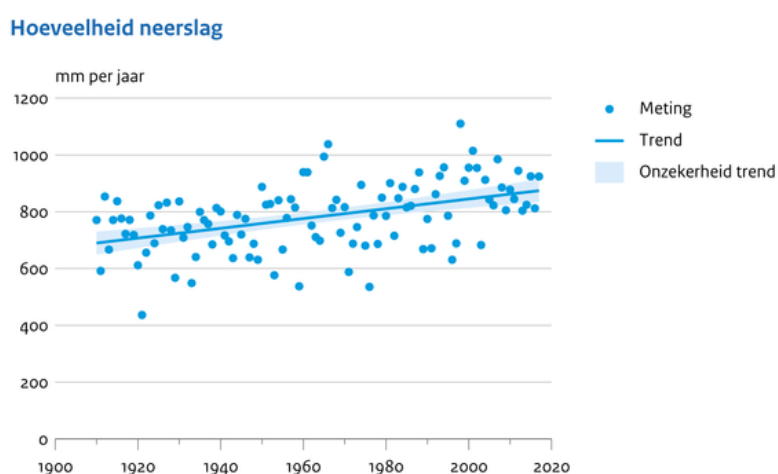
In dit hoofdstuk zal worden stilgestaan bij de onderzoeksonderdelen met onverwachte en verwachte resultaten, maar ook bij de onderdelen die meer aandacht vereisen of punten van discussie bevatten.

In het onderzoeksvoorstel zijn twee soorten droogte gedefinieerd: extreme en kritische droogte. Uit het interview met een ecooloog van WRIJ blijkt dat een kritisch scenario optreedt bij gebrek aan zuurstof en niet per se bij gebrek aan water. Aangezien zuurstofconcentraties niet regelmatig worden gemeten en de meetstations niet direct naast de watergangmeetstations staan is er besloten om kritieke droogte buiten beschouwing te laten. Het onderzoek richt zich dus enkel op waterkwantiteit voor de mensheid en niet op waterkwaliteit voor de ecologie.

Een andere kanttekening die moet worden geplaatst is voor de percolatie. Deze is onderzocht voor elke WRIJ-peilbuis en uiteindelijk gebruikt voor drie van deze peilbuizen. Maar Menyanthes simuleert incidenteel de grondwaterstanden te hoog en percolatie helpt hier niet altijd bij.

Daarnaast zijn de meetstations/peilbuizen gebruikt in de casussen niet hetzelfde als de meetstations gebruikt in het onderzoek. Dit komt doordat de casussen zijn uitgevoerd aan het begin van de stage en nog niet alle filtering had plaatsgevonden. Om dit te verhelpen zouden de casussen nog eens uitgevoerd moeten worden met de meetstations na het filteren. Het tijdsbestek van dit onderzoek liet niet toe om nogmaals de casussen uit te voeren. Bovendien mag ervan uit worden gegaan dat de uitslagen van de casussen relevant zijn voor heel het WRIJ-gebied en dus alle meetstations/peilbuizen.

De 1000-jaar aan neerslagwaarden uit onderzoeksvraag 5 zijn gebaseerd op observaties vanaf 1-1-2000. Hierbij is klimaatverandering niet meegenomen terwijl er wel een trend is ontdekt door het KNMI (Figuur 26). Klimaatverandering zou kunnen worden meegenomen door de gemiddelde vermeerderingsfactor tot 2100 af te leiden uit Figuur 26 en deze te vermenigvuldigen met de neerslag uit de 1000 gesimuleerde jaren.



Figuur 26 - Jaarlijkse hoeveelheid neerslag: observaties en verwachting (KNMI (8), 2018)

Er zal dan meer neerslag optreden en de gesimuleerde grondwaterstanden vallen dan hoger uit, wat volgens de figuur van het KNMI accurater zal zijn.

Ook is het aantal (1000 jaar) een uit de lucht gegrepen getal en had als enige functie een 'nieuw' nooit-voorgekomen droog jaar genereren. Een langere periode gaf misschien nog drogere jaren, maar zou te lang duren om in Menyanthes en MATLAB te implementeren.

Een algemene opmerking is dat het weer niet tot 2100 kan worden voorspeld. Daarom is het weer dat tot 2019 is geobserveerd herhaald tot 2100 en daaraan zijn klimaatscenario's toegevoegd. Dit betekent dat de resultaten van het onderzoek niet gelden als een voorspelling, maar eerder gelden als een indicatie. Het aantal droge dagen zal niet met de werkelijkheid overeenkomen, maar omdat dezelfde neerslag en verdamping is gebruikt voor elke simulatie, geeft het aantal droge dagen wel een overzicht van welke meetstations een groter risico hebben ten opzichte van de verschillende klimaatscenario's. Histogrammen die aantonen dat de tweede periode (2066 –

2100) daadwerkelijk meer droge dagen bevat dan de eerste periode (2036 – 2065) staan weergegeven in Bijlage XIII: Resultaten droogtemodel – percentage histogrammen.

Een ander punt is dat bij het genereren (herhalen) van het weer tot 2100 is het jaar 1976 meegenomen. Echter, zoals eerder aangegeven is dit jaar een toevallige uitschieter met een herhalingsperiode van 90 jaar en niet in lijn van verwachting. Door 1976 mee te nemen wordt ongeveer elke 40 jaar weer net zo droog als in 1976 en komt de herhalingsperiode in de gegenereerde tijdreeks dus niet helemaal met de werkelijkheid overeen.

Ten slotte wordt er nog aangekaart dat de onzekerheid van het onderzoek niet voldoende is bepaald. De gebruikte bodemhoogte heeft een onzekerheid en deze is niet meegenomen. Ook zit er een onzekerheid in de gesimuleerde grondwaterstanden van Menyanthes. Deze onzekerheid is wel bepaald in Menyanthes zelf, maar is niet gebruikt in het onderzoek. Daarnaast is bij onderzoeksvraag 5 gebruik gemaakt van het verschil tussen laagst geobserveerde grondwaterstand en laagst gesimuleerde grondwaterstand, wat een bepaalde onzekerheid met zich mee brengt omdat observatie met simulatie wordt vergeleken. Deze onzekerheid kon worden verminderd door het gebruik van laagst gesimuleerde grondwaterstanden in 2018 en laagst gesimuleerde grondwaterstand voor 1000 jaar te vergeleken. Helaas was dit niet meer mogelijk op het laatst, omwille van technische redenen.

Alles overziend kan er gezegd worden dat het doel van dit onderzoek, namelijk erachter komen welke watergangen van WRIJ vaker droog komen te staan door klimaatverandering, is behaald. Ook de hypothese klopt met het uiteindelijke resultaat. De hypothese was namelijk dat watergangen in zandgronden het meest kwetsbaar zijn voor klimaatverandering en extreem lage waterstanden. Deze watergangen hebben de meeste uitwisseling tussen grondwater en oppervlaktewater, en zand op zichzelf is poreus wat de invloed van neerslag en verdamping groter maakt.

5 Conclusie

2) Hoe uitzonderlijk was de hydrologische droogte van 2018 vergeleken met normaal?

De droogte van 2018 is nog maar net achter de rug, en nu al wordt 2019 beschouwd als een nieuw recordjaar door de media (Redactie Duurzaam Nieuws, 2019). Het klinkt alsof elk jaar droger lijkt te worden. Dit onderzoek heeft echter laten zien dat 2018 niet volgens voorspelling bleek te zijn en dat klimaatverandering nog niet wordt teruggevonden in de hydrologie.

1) Hoe wordt de droogteindicator gedefinieerd?

3) Hoe kan een droogtemodel worden opgesteld?

Desondanks kan er misschien toch een trend worden ontdekt als er een lange periode wordt onderzocht waarbij invloed van het klimaat beter zichtbaar is. In dit onderzoek is geprobeerd hydrologische droogte te voorspellen door het effect van klimaatverandering op watergangen te simuleren. Dat is gedaan door een droogtemodel op te stellen waarbij de (lineaire) relatie tussen grondwater en oppervlaktewater is gebruikt. Deze lineaire relatie is opgesteld door de (grond)waterobservaties verkregen uit peilbuizen en watergangmeetstations tot 2019. Grondwaterstanden tot 2100 zijn gesimuleerd in Menyanthes op basis van passende neerslag en verdamping voor klimaatscenario GL, GH, WL en WH en een onaangepast scenario waarbij geen klimaatverandering optreedt. Waterstanden tot 2100 zijn verkregen door de relatiegrafieken en de gesimuleerde grondwaterstanden. Van de waterstanden zijn het aantal droge dagen tot 2100 bepaald, waarbij een dag als droog werd gezien als een waterstand bij de laagste 10% van voorkomen zit.

4) Kan hydrologische droogte acceptabel worden gesimuleerd?

Hydrologische droogte kan zo acceptabel worden gesimuleerd, maar er moeten restricties worden opgesteld waaraan de meetstations en de modellen moeten voldoen om te worden gebruikt in het onderzoek. Voorbeelden hiervan zijn het volledig geobserveerd hebben van 2018 en voldoende accuraatheid van het grondwatermodel en de correlatiegrafieken.

Het resultaat van het droogtemodel is een rangschikking van meest naar minst risicovolste meetstation, welke uiteindelijk 15 meetstations zijn. De rangschikking is gemaakt door de droge dagen van de klimaatscenario's te vergelijken met de droge dagen van het onaangepaste scenario. Het meetstation met de meeste verandering ten opzichte van het onaangepaste scenario is het gevoeligst voor klimaatverandering en loopt daarmee het grootste risico op lage waterstanden met een hogere herhalingstijd.

In Tabel 5 pagina 46 staat de samengenomen rangschikking weergegeven voor de klimaatscenario's.

5) Wat is de meest extreme waarde van de grondwaterstand?

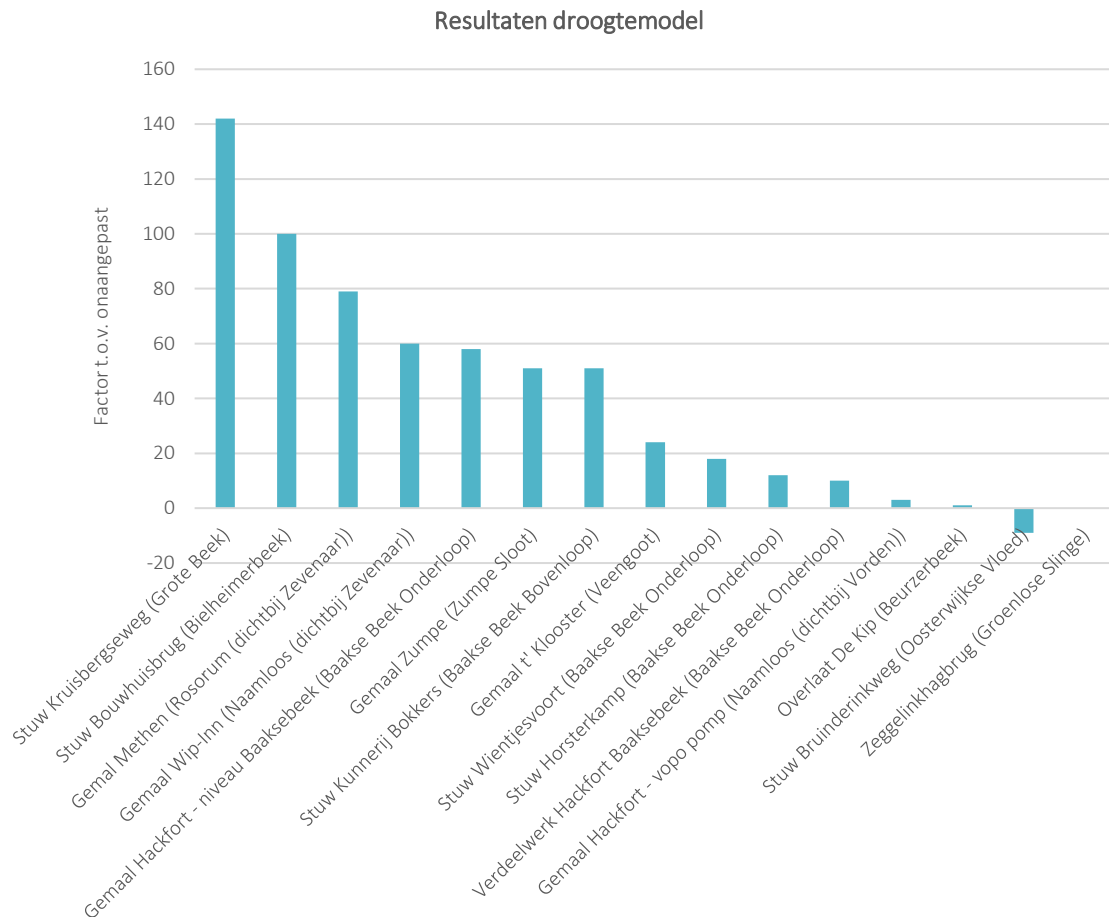
Naast het opstellen van het droogtemodel is er ook gekeken naar hoeveel lager de grondwaterstanden nog kunnen zakken ten opzichte van 2018. Dit is gedaan door 1000 jaar aan neerslag en verdamping te genereren, en van het droogste jaar de gesimuleerde grondwaterstanden te vergelijken met 2018. Hieruit is gebleken dat gemiddeld de grondwaterstand nog rond zo'n 10-20 cm kan zakken ten opzichte van de grondwaterstanden van 2018. De maximale zakking per peilbuis staat weergegeven in Tabel 2 op pagina 26.

6) Beïnvloeden gebiedskenmerken de intensiteit van hydrologische droogte?

Ten slotte zijn de resultaten uit het droogtemodel vergeleken met de gebiedskenmerken grondsoort, hoogte en stroomgebiedgrootte. Watergangen in een gebied met zandgrond (leem- en zwavelhoudend) blijken een grotere kans te hebben op het voorkomen van lagere waterstanden dan watergangen in een klei- of leemarmgebied (Tabel 5). Het meetminimum met het grootste risico op extreme waterstanden door klimaatverandering is gelegen in een veengebied, maar omdat er maar één meetstation in een veengebied is onderzocht kunnen hieruit geen directe verklaring worden getrokken. Er kon tevens geen directe verklaring worden getrokken uit de hoogtevergelijking. Ook stroomgebiedgrootte leek geen invloed te hebben. Desalniettemin lijkt het alsof de wat kleinere stroomgebieden (Oude IJssel en Baakse Beek) vatbaarder zijn voor klimaatverandering dan het grootste stroomgebied van WRIJ, de Berkel. Maar om hier een uitgesproken resultaat op te krijgen zijn 15 meetstations onvoldoende en zal er een groter aantal moeten worden onderzocht, waarbij elk stroomgebied door minimaal drie meetstations is vertegenwoordigd.

7) Welke watergangen van WRIJ zullen vaker droog komen te staan in de toekomst door klimaatverandering?

Concluderend kon in een grafiek worden getoond welke van de 15 onderzochte watergangen van WRIJ een grotere impact van klimaatverandering zullen voelen en dus ook hoogstwaarschijnlijk vaker droog komen te staan. In onderstaande grafiek (Figuur 27) staat deze rangschikking weergegeven, waarbij de watergangen rond de 0 weinig invloed van de klimaatverandering zullen ondervinden ten opzichte van de situatie momenteel (geen klimaatverandering), en watergangen met een waarde boven 100 een verdubbeling van hun aantal droge dagen per jaar ten opzichte van de situatie momenteel (geen klimaatverandering).



Figuur 27 - Resultaten droogtemodel

6 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Deze eindopdracht heeft onderzoeksvragen beantwoord ingaand op verschillende aspecten van droogtemodelle- ren. Toch zijn er nog een paar factoren waar meer onderzoek of data voor vereist is. Die factoren worden in deze paragraaf kort benoemd.

Allereerst de onverwachte uitkomst van de verdampingscasus. De hypothese voor deze casus was dat ET_{act} een betere fit in het grondwatermodel zou geven dan ET_{pot} . Dit bleek niet het geval. ET_{act} gaf een iets betere vorm curve maar de pieken waren nog steeds aanwezig. Bij het toevoegen van de percolatie kunnen deze pieken worden afgevlakt. Een goede vervolgstudie zou dus kunnen zijn om de percolatie toe te voegen in Menyanthes, voor zowel ET_{pot} als ET_{act} en deze met elkaar te vergelijken. De verwachting is dat ET_{act} in combinatie met percolatie een nog betere fit geeft dan ET_{pot} in combinatie met percolatie, wat in deze eindopdracht is gebruikt.

In de percolatiecasus was er sprake van twee verschillende onbekende parameters: de grondsoort en de wortel- diepte. Het bepalen van de grondsoort was goed te doen aan de hand van 'Bodemkaart NL2017'. Het bepalen van de worteldiepte daarentegen kostte veel tijd omdat er per worteldiepte werd gerund en daarna gekalibreerd in MATLAB. Een kaart met gegeven worteldiepten maakt het mogelijk om dit proces sneller te laten verlopen.

Ten derde is het gewenst om meer dan 15 meetstations te onderzoeken. Het was in deze eindopdracht niet mo- gelijk om meer meetstations te gebruiken vanwege slechte correlatie maar ook vanwege datatekort. Relatief veel peilbuizen in het WRIJ-gebied hebben de droogte van 2018 niet kunnen meten doordat hun filters te hoog zijn gelegen. Mocht de kans zich voordoen om in de toekomst toch de grondwaterstanden in deze droge perioden te meten, zou het onderzoek nogmaals kunnen worden uitgevoerd en zullen er meer meetstations kunnen worden onderzocht.

Een ander aspect dat meer onderzoek vergt is wateronttrekking of kwelwater in combinatie met het onderzoek. Het onderzoek heeft het onttrekken van (grond)water indirect meegenomen omdat het is gebaseerd op data die deze onttrekkingen bevat, maar dat heeft ook een keerzijde. Sommige relatiegrafieken konden slecht worden verklaard, en zijn daardoor achterwege gelaten. Bij het beter begrijpen van afwijkende curves, die worden veroor- zaakt door bijvoorbeeld continue wateronttrekking op die locatie, of door kwelwater aanwezig op die locatie, kon- den wellicht meer meetstations worden onderzocht.

Als laatste is het wenselijk om bij een vervolgstudie ook de onzekerheid van de waarden mee te nemen. Dat is om tijdsredenen niet gedaan in deze eindopdracht, maar zou wel kunnen worden gedaan voor opdrachten met een tijdsbestek van bijvoorbeeld een half jaar. Het gaat hierbij om de afwijking van grondwaterstanden in Menyanthes, de onzekerheid van de relatie tussen grondwater en oppervlaktewater in MATLAB en de onzekerheid van de nor- maalverdeling van de watergang in MATLAB.

Geciteerde werken

- Byun, H.-R. & Wilhite, D., 1999. *Objective Quantification of Drought Severity and Duration*, University of Nebraska - Lincoln: Drought Mitigation Center Faculty Publications.
- Chen, Brissette & Leconte, 2012. WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Procedia Environmental Sciences*, 2012(13), pp. 2222-2235.
- Chen, J. & Brissette, F., 2012. *Stochastic Weather Generator WeaGETS*. [Online]
Available at: <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29136-stochastic-weather-generator-weagets>
[Geopend 13 6 2019].
- de Vries, H., Katsman, C. & Drijfhout, S., 2014. *Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways*, Nederland: 10P Publishing.
- de Vries, H., Katsman, C. & Drijfhout, S., 2014. *Supplemental Material - Constructing Scenarios of Regional Sea Level Change for Various Temperature Pathways*, Nederland: 10P Publishing.
- Dogan, S., Berktaç, A. & Singh, V., 2012. Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 11, november 2012(470-471), pp. 255-268.
- eLEAF, n.d.. *Algorithms*. [Online]
Available at: https://eleaf.com/?page_id=3171
[Geopend 9 5 2019].
- Gemeente Krimpen aan den IJssel, n.d.. *Wat is grondwater*. [Online]
Available at: <https://www.krimpenaandenijssel.nl/Wat-is-grondwater>
[Geopend 13 6 2019].
- Heim, R., 2002. *A review of twentieth-century drought indices used in the United States*, plaats onbekend: American Meteorological Society.
- Hydrologic, n.d.. *HydroNET Homepage*. [Online]
Available at: <https://www.hydronet.nl/>
[Geopend 9 6 2019].
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Kim, D.-W., Byun, H.-R. & Choi, K.-S., 2009. Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 11, november 2009(378), pp. 1-12.
- Klimaatgek, 2018. *Droogte*. [Online]
Available at: <https://klimaatgek.nl/wordpress/2018/07/20/droogte/>
[Geopend 2 6 2019].
- KNMI (1), 2015. *KNMI Klimaatscenario's voor 2014 (herziene versie)*, Utrecht: KNMI.
- KNMI (2), 2019. *Daggegevens*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>
[Geopend 6 5 2019].
- KNMI (3), 2019. *Dagwaarden Neerslagstations*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>
[Geopend 6 5 2019].

- KNMI (4), 2014. *Cijfers*. [Online]
Available at: <http://www.klimaatsscenarios.nl/kerncijfers/>
[Geopend 24 5 2019].
- KNMI (5), n.d.. *Droogte*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/droogte>
[Geopend 2 6 2019].
- KNMI (6), 2018. *Warmste zomer in drie eeuwen*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/warmste-zomer-in-drie-eeuwen>
[Geopend 20 6 2019].
- KNMI (7), 2019. *KNMI*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2018/jaar>
[Geopend 14 6 2019].
- KNMI (8), 2018. *Jaarlijkse hoeveelheid neerslag in Nederland, 1910-2017*. [Online]
Available at: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0508-jaarlijkse-hoeveelheid-neerslag-in-nederland>
[Geopend 28 5 2019].
- Kornfeld, I., 2015. *Californias Drought and the Hydrological Cycle*. [Online]
Available at: <http://itzchakkornfeld.com/2015/08/09/californias-drought-and-the-hydrological-cycle/>
[Geopend 13 6 2019].
- Liemers Grondwater, 2019. *Kaart*. [Online]
Available at: <https://liemers.grondwater.nl/kaart>
[Geopend 9 6 2019].
- Locher, W. & de Bakker, H., 1990. *Bodemkunde van Nederland - Deel 1*. 2e red. Den Bosch: Malmberg.
- Met Office, n.d.. *What is an ensemble forecast?*. [Online]
Available at: <https://www.metoffice.gov.uk/research/weather/ensemble-forecasting/what-is-an-ensemble-forecast>
[Geopend 7 5 2019].
- Mishra, A. & Singh, V., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 14 9, september 2010(391), pp. 202-216.
- Mishra, A. & Singh, V., 2011. Drought modeling - A review. *Journal of Hydrology*, 31 3, juni 2011(403), pp. 157-175.
- Nannes, L., n.d.. *Beschikbaarheid van water in fysiologische processen*. [Online]
Available at: https://www.researchgate.net/figure/Figuur-1-beschikbaarheid-van-water-in-fysiologische-processen_fig1_283458940
[Geopend 12 6 2019].
- Park, C.-K., Byun, H.-R., Deo, R. & Lee, B.-R., 2015. Drought prediction till 2100 under RCP 8.5 climate change scenarios for Korea. *Journal of Hydrology*, 7, juli 2015(526), pp. 221-230.
- Redactie Duurzaam Nieuws, 2019. *Hoe droog wordt de zomer van 2019?*. [Online]
Available at: <https://www.duurzaamnieuws.nl/hoe-droog-wordt-de-zomer-van-2019/>
[Geopend 12 6 2019].
- Riebsame, W., Changnon, S. & Karl, T., 1991. *Drought and Natural Resource Management in the United States: Impacts and Implications of the 1987 - 89 drought*, Boulder: Westview Press.
- Sincich, McClave & Knypstra, 2016. *Statistiek*. Groningen: Pearson Benelux.
- Sluijter, R. et al., 2018. *Droogterapport 2018*, De Bilt: KNMI.

Spinoni, J. et al., 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe?. *International Journal of Climatology*, 9 10, maart 2018(38), pp. 1718-1736.

van der Hauw, K., 2012. *NHV*. [Online]

Available at:

https://www.nhv.nu/uploads/fileservice/stromingen/attachment/2012_2%20Waterproject%20Ruinen%20-%20interventieanalyse%20met%20Menyanthes.pdf

[Geopend 26 6 2019].

Vitens Lizard, 2019. *Map*. [Online]

Available at:

[https://vitens.lizard.net/nl/map/topography,assetgroup\\$9c2d7b6,wmslayer\\$bd6b024/point/@52.6350,5.9324,8/-2Days0Hours+0Days3Hours](https://vitens.lizard.net/nl/map/topography,assetgroup$9c2d7b6,wmslayer$bd6b024/point/@52.6350,5.9324,8/-2Days0Hours+0Days3Hours)

[Geopend 9 6 2019].

Von Asmuth, Maas, Knotters & Leunk, 2011. *Menyanthes User Manual - Version 2.x.b.u (beta)*, Nieuwegein: 11.

Waterschap Rijn en IJssel (1), n.d.. *Stroomgebieden WRIJ*. [Online]

Available at: <https://www.wrij.nl/statisch/>

[Geopend 13 6 2019].

Waterschap Rijn en IJssel (2), 2019. *Overzicht Meetstations*. [Online]

Available at: <https://waterdata.wrij.nl/index.php?wat=overzicht&type=alle>

[Geopend 6 5 2019].

Waterschap Rijn en IJssel (3), 2019. *Dashboard Weer en Water*. [Online]

Available at:

<http://wrij.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=82cacb64a02e4e60aadb66d30e7127c4>

[Geopend 20 6 2019].

Wikipedia, 2019. *RCP scenario's*. [Online]

Available at: https://nl.wikipedia.org/wiki/RCP_scenario%27s

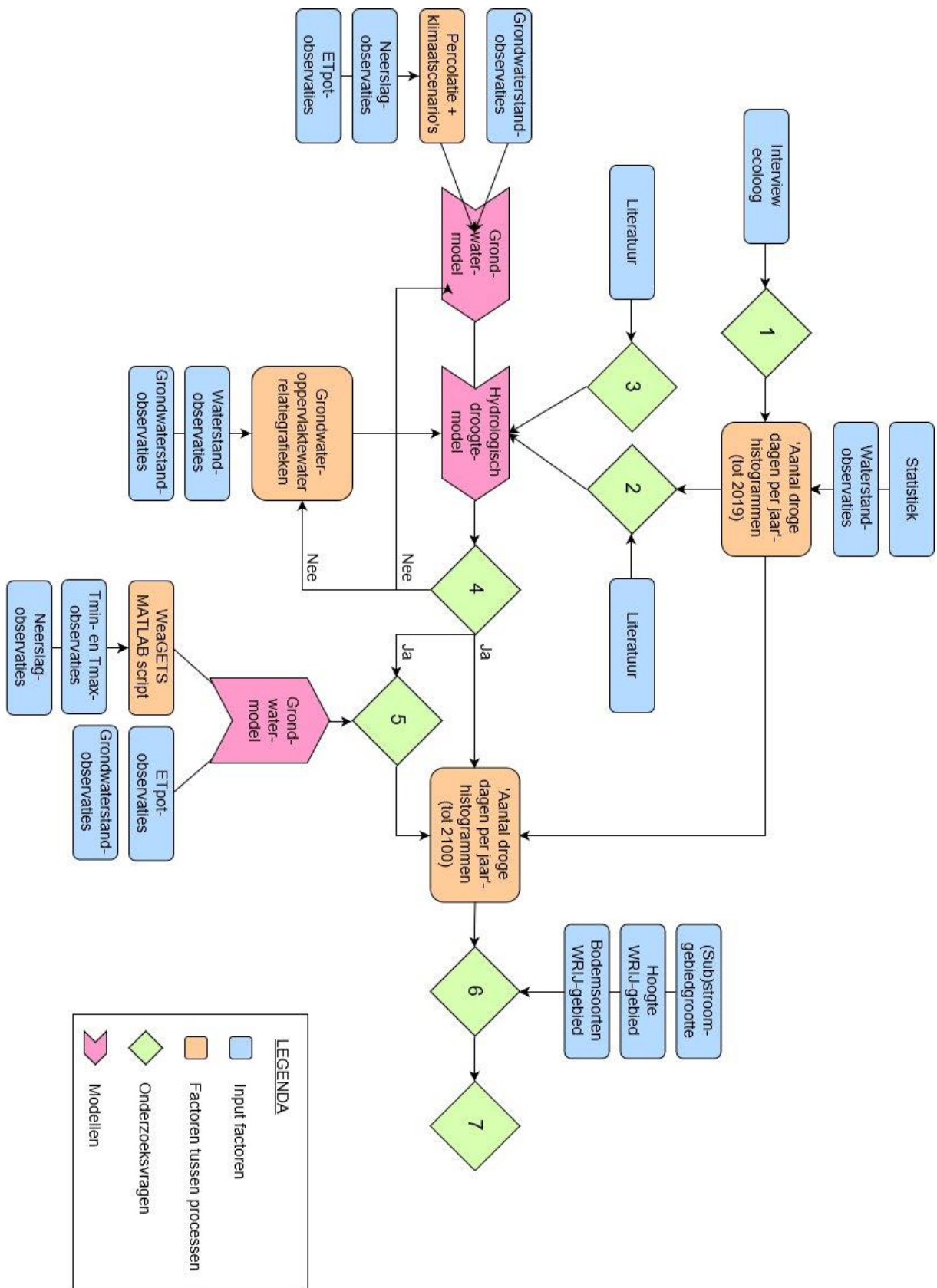
[Geopend 6 5 2019].

Wu, H., Hayes, M., Wilhite, D. & Svoboda, M., 2005. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, 18 3, maart 2005(25), pp. 505-520.

Bijlagen



Bijlage I: Flow chart methodologie



Figuur 28 - Flow chart methodologie

Bijlage II: Casus ET_{act} en ET_{pot}

Peilbuis: Gemaal Hackfort - Harmsen

Periode: 1 januari 2016 – 11 april 2019

Verklarende reeksen: Hengelo prec en Hupsel evap

Grid HydroNET: poly 1697

De verdampingswaarden van Hupsel evap (ET_{pot}) zullen met verdampingswaarden uit HydroNET voor grid poly 1697 worden vergeleken (ET_{act}).

Doel:

Het doel van deze casus is het vergelijken van twee verschillende grondwatermodellen van dezelfde peilbuis: de één gebruik makende van ET_{pot} en de ander gebruik makende van ET_{act} . Het grondwatermodel dat de beste fit geeft in tijden van droogte zal bepalen welke vorm van verdamping zal worden gebruikt voor de rest van de grondwatermodellen in Menyanthes.

De potentiële verdamping is afkomstig van het KNMI en wordt ook wel Makkink-verdamping genoemd (KNMI (2), 2019).

De actuele verdamping is gehaald van de website HydroNET, verkregen door WRIJ (Hydrologic, n.d.). Deze website visualiseert onder andere de 'eLeaf evapotranspiration', oftewel de actuele verdamping. eLeaf bepaalt deze verdamping op basis van drie algoritmes (eLEAF, n.d.).

Het eerste algoritme van HydroNET beschrijft de energiebalans op het aardoppervlak. De hoeveelheid energie van de zon wordt bekeken, waarna er wordt bekeken hoeveel van deze energie 'verloren' gaat aan de atmosfeer en hoeveel van deze energie wordt gebruikt voor de processen op aarde. De energie die hierna overblijft wordt beschouwd als input om de actuele evapotranspiratie van te bepalen. De uiteindelijke output van het eerste algoritme is vegetatiegroei [kg/ha] en waterbenodigdheid van de vegetatie [mm/week].

Het tweede algoritme zorgt ervoor dat er voldoende meteorologische data beschikbaar is om de berekeningen voor uit te voeren. Alleen KNMI-meetstations zijn niet genoeg, en daarom worden ook satellieten en andere fysische condities gebruikt. Output is temperatuur, windsnelheid en relatieve vochtigheid per grid van 250x250 m². Het laatste algoritme bepaalt irrigatiecondities die boeren kunnen gebruiken om hun irrigatie op af te stemmen. Er wordt gekeken naar de waterbeschikbaarheid en naar de waterbenodigdheid van de vegetatie. Dit wordt ook berekend per grid. Een grid heeft in dit algoritme een oppervlakte van 1x1 km².

Input MATLAB:

- Dagelijkse aangepaste verdampingswaarden (HydroNET)

Input Menyanthes:

- Dagelijkse neerslagwaarden (KNMI)
- Dagelijkse (aangepaste) verdampingswaarden (MATLAB)
- Geobserveerde grondwaterstanden (WRIJ)

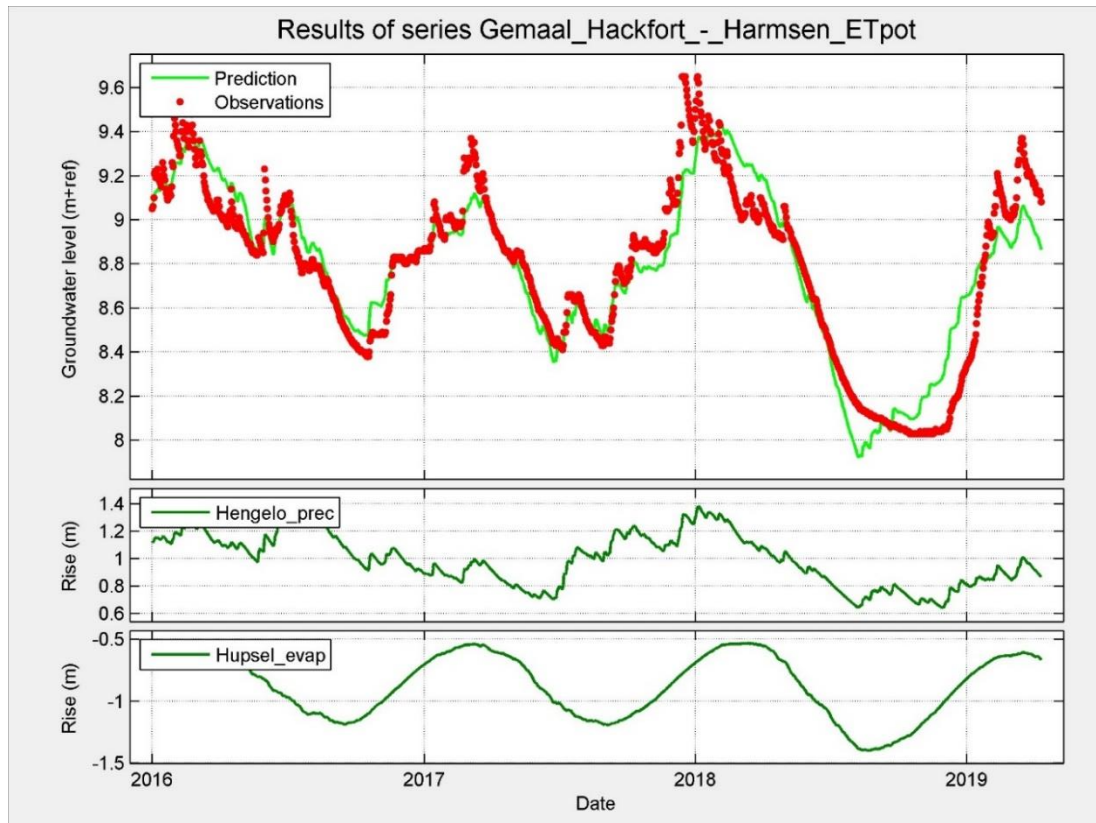
Stappenplan:

1. Bepaal het grid-nummer aan de hand van ArcGIS.
2. Download voor dit grid-nummer de eLeaf evapotranspiration-waarden in HydroNET (dit is ET_{act}).
 - Semisolon seperated!
 - Per dag
3. Verander de gedownloade Excel-bestand tot input-waardig voor MATLAB.
 - Maak van alle waarden de getalnotatie "Tekst"

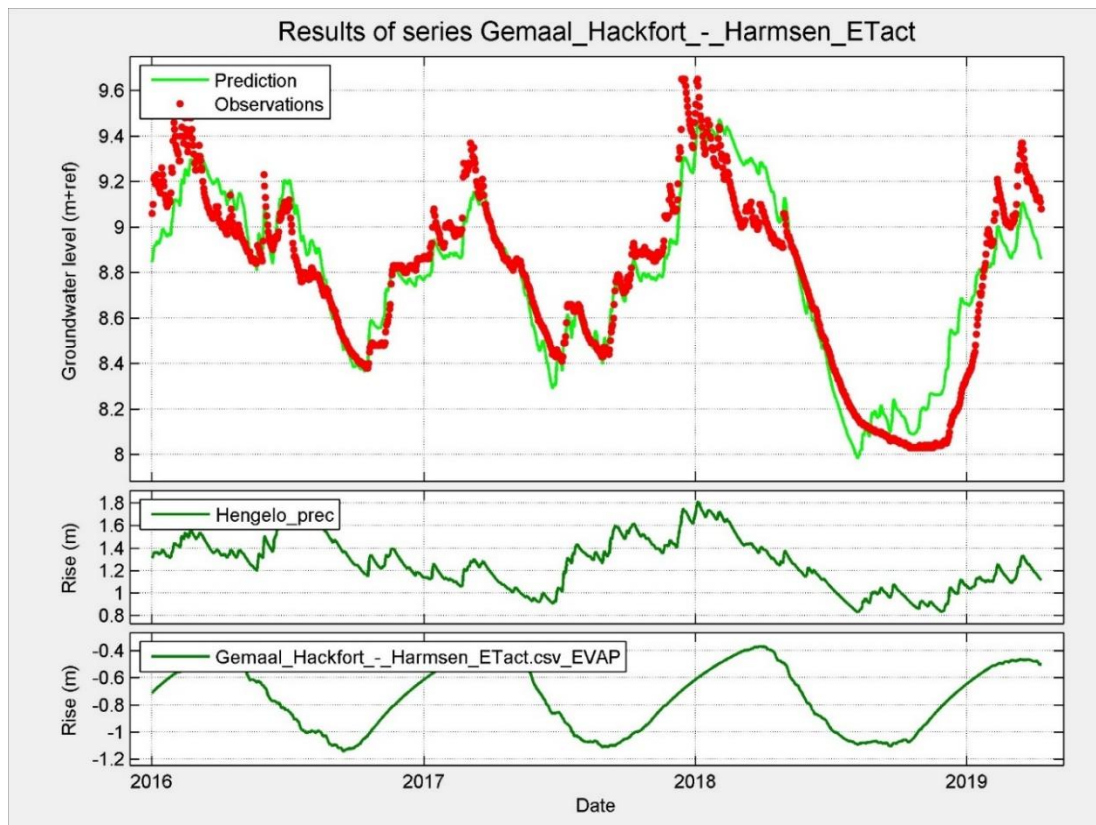
4. Maak in MATLAB een input-bestand voor Menyanthes uit deze tijdreeksen.
5. Gebruik het gemaakte ETact-bestand als input in het grondwatermodel in Menyanthes.
6. Bepaal of het grondwatermodel accuratere grondwaterstanden geeft in de droogteperiode t.o.v. het onveranderde grondwatermodel.

Resultaten:

Zoals te zien is in Figuur 29 en Figuur 30, geeft het gebruik van ET_{act} geen betere fit dan ET_{pot} . De EVP voor ET_{pot} is 87,7% en de EVP voor ET_{act} is 85,9%. Voor verdere grondwatermodellen in Menyanthes zal ET_{pot} dus niet worden vervangen door ET_{act} .



Figuur 29 - Grondwatermodel "Gemaal Hackfort – Harmsen" met gebruik van ET_{pot}



Figuur 30 - Grondwatermodel "Gemaal Hackfort – Harmsen" met gebruik van ET_{act}

Bijlage III: Casus percolatie

Peilbuis: Bekendelle Hellekampsweg berm

Periode: start metingen peilbuis – 11 april 2019

Verklarende reeksen: Winterswijk (sibinkweg) prec en Hupsel evap

Grondsoort: 9

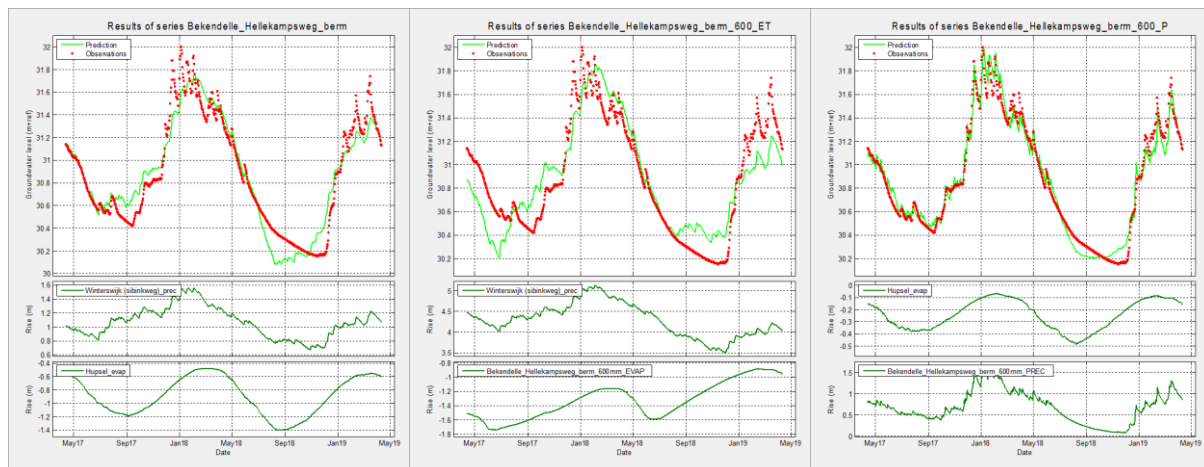
Het aanpassen van de dagelijkse neerslag- en verdampingswaarden gebeurt in MATLAB. Het implementeren en aanpassen van het grondwatermodel in Menyanthes. Dit alles zal worden gecombineerd door een kalibratie-validatie samenstelling, welke wordt uitgelegd in het stappenplan.

Doel:

Er zijn twee processen die terug moeten worden gezien in de grondwatercurves na het aanpassen van de neerslag- en verdampingswaarden in Menyanthes.

1. Het afvlakken van de grondwatercurve in tijden van droogte
2. Het beter fitten van de grondwatercurve in tijden van droogte (geen kruisbeweging meer)

In Figuur 31 zijn voorbeelden te zien waarbij één van de twee doelstellingen zijn gehaald, maar niet beide.



Figuur 31 - Voorbeelden slechte percolatie. V.l.n.r.: origineel, aanpassing ET, aanpassing P.

Zoals te zien is in de linker curve van Figuur 31 is er een bepaalde kruisbeweging aanwezig in droge tijden. Het grondwatermodel gaat te ver door naar beneden en neemt daarna te snel toe, wat zorgt voor een overschatting van de grondwaterstand aan het begin van een droogteperiode, en een onderschatting aan het eind.

Als alleen de verdamping wordt aangepast (middelste curve), zijn de kleine pieken nog steeds aanwezig in het grondwatermodel. Wat juist gebeurt is de curve die qua helling beter fit met de geobserveerde waarden, en de kruisbeweging is minder.

Bij het aanpassen van alleen de neerslag worden de pieken uit het grondwatermodel in droge tijden gefilterd. Echter is de helling nog niet helemaal juist gefit omdat er nog steeds een 'kruisbeweging' aanwezig is.

Aannames:

- De worteldiepte is gelijk aan de bakjeshoogte. Met andere woorden: wortels zijn aanwezig tot de grondwaterspiegel of de grondlaag die zich bevindt tussen de worteldiepte en grondwaterstand heeft een directe infiltratie zonder weerstand.
- De dagelijkse pF-waarde is lineair afhankelijk van in hoeverre het 'bakje' gevuld is. 100% gevuld betekent $pF = 4,2$, 0% gevuld betekent $pF = 1$.
- 0% gevuld 'bakje' $\rightarrow pF \geq 4,2$.

- 100% gevuld 'bakje' → $pF \leq 1,7$.
- Neerslag- en verdampingswaarden aanpassen voor dagen waarbij geldt $3,0 < pF < 4,2$.
- De grondsoort wordt gehaald uit Bodemkaart NL2017, beschikbaar in ArcGIS van WRIJ.

Input MATLAB:

- Dagelijkse neerslagwaarden (KNMI (2), 2019) (KNMI (3), 2019)
- Dagelijkse verdampingswaarden (ET_{pot}) (KNMI (2), 2019)
- Grondsoort stroomgebied peilbuis (uit de tabel Standaardvochtkarakteristieken (Locher & de Bakker, 1990))
- Worteldiepte stroomgebied peilbuis

Input Menyanthes:

- Dagelijkse (aangepaste) neerslagwaarden (MATLAB)
- Dagelijkse (aangepaste) verdampingswaarden (MATLAB)
- Geobserveerde grondwaterstanden (WRIJ)

Stappenplan:

Er is sprake van één onverklaarbare parameter in deze casus, en dat is de worteldiepte. Ter kalibratie zal de worteldiepte alleen worden bepaald aan de hand van zomer 2018, door verschillende worteldieptes te implementeren in Menyanthes voor deze periode, waarna de beste worteldiepte zal worden uitgekozen. Met deze worteldiepte zal daarna de validatie plaatsvinden, die over de gehele periode van observaties van de peilbuis zal worden gebruikt.

1. Bereken/bepaal voor elke dag:
 - pF
 - Waterstand in het 'bakje' aan het begin van de dag;
 - De bijbehorende factor: voor hoever is het 'bakje' gevuld?;
 - De neerslag gedurende die dag;
 - De verdamping gedurende die dag;
 - In het geval van $pF > 3,0$
 - o De aangepaste neerslag gedurende die dag;
 - o De verdamping gedurende die dag;
 - De toevoeging / aftrekking van de waterstand in het 'bakje';
 - Eindstand van de waterstand in het 'bakje';
2. Voeg je (aangepaste) neerslag- en verdampingsreeksen toe in Menyanthes bij de peilbuis met periode 01-01-2018 tot en met 31-12-2018;
3. Bepaal welke worteldiepte voor deze periode de beste oplossing genereert;
4. Voeg de aangepaste neerslag- en verdampingsreeksen voor deze worteldiepte toe in Menyanthes voor de volledige periode van de peilbuis;
5. Vergelijk het onaangepaste en aangepaste grondwatermodel voor de volledige periode met elkaar, en valideer de percolatie-aanpassing.

Benodigde grafieken:

Tabel 6 - Standaardvocht karakteristieken van 20 bodemhorizonten en de hoeveelheid beschikbaar hangwater bij 3 waarden van de veldcapaciteit. De bodemhorizonten staan omschreven in Tabel 7. (Locher & de Bakker, 1990)

Nr.	f_{hd}	$f_{L+S,d}$	M_Z	f_{Ld}	ρ_d	φ_p	volumefractie water θ (%) bij pF =										θ_{hw} (%)		
	(%)	(%)	(μm)	(%)	(kg/m ³)	(%)	1,0	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,4	4,2	1,7 min 4,2	2,0 min 4,2	2,3 min 4,2	
1	0,5	6	155	—	1630	38	34	31	24	14	9	6	4	2	2	22	12	7	
2	1,0	6	155	—	1550	41	36	32	24	14	9	7	6	5	3	21	11	6	
3	2,1	6	155	—	1440	45	39	35	27	18	16	11	7	4	3	24	15	13	
4	4,0	6	155	—	1330	48	41	38	32	22	19	14	11	7	4	28	18	15	
5	6,0	6	155	—	1270	50	44	40	36	27	23	18	13	9	6	30	21	17	
6	9,5	6	155	—	1160	53	48	45	40	35	29	25	19	14	10	30	25	19	
7	27,5	6	155	—	750	65	63	61	59	53	43	37	31	26	18	41	35	25	
8	85,0	—	—	—	175	89	87	82	80	75	68	62	47	39	21	59	54	47	
9	0,4	13½	150	—	1700	36	35	33	29	19	13	9	7	5	3	26	16	10	
10	0,4	23½	145	—	1700	36	34	32	29	23	16	11	9	6	4	25	19	12	
11	0,5	40	135	—	1650	38	35	33	31	29	22	17	13	11	6	25	23	16	
12	0,5	60	135	—	1650	38	36	34	33	32	28	23	18	15	9	24	23	19	
13	0,3	6	95	—	1600	39	38	38	35	30	19	8	7	6	4	31	26	15	
14	0,3	6	275	—	1650	38	31	23	15	10	7	6	5	4	2	13	8	5	
15	1,0	—	—	10	1500	44	41	39	37	35	29	24	21	18	11	26	24	18	
16	1,0	—	—	10	1400	48	44	42	41	39	33	27	23	19	11	30	28	22	
17	1,0	—	—	10	1300	51	47	45	44	41	36	31	26	21	11	33	30	25	
18	1,0	—	—	22	1400	48	45	43	42	40	36	32	30	26	19	23	21	17	
19	1,0	—	—	30	1400	48	45	43	42	41	39	36	34	32	25	17	16	14	
20	1,0	—	—	40	1400	49	46	44	44	43	42	40	38	37	31	13	12	11	

f_h = org. stofgehalte; f_{L+S} = leemgehalte; M_z = zandmediaan; f_L = lutumgehalte; ρ = dichtheid; φ_p = porositeit. De index d betekent: van stoofdrome grond.
 — = niet bepaald. θ_{hw} = beschikbaar hangwater; 1,7 min 4,2 betekent: het vochtgehalte bij pF = 1,7 minus dat bij pF = 4,2; enz.

Tabel 7 - Omschrijving van de bodemhorizonten (Locher & de Bakker, 1990)

Nr.	Organische-stofklasse en textuurnaam	Horizont	Gronden
1	uiterst humusarm, matig fijn, leemarm zand	C	Hn, cHn (*)
2	zeer humusarm, matig fijn, leemarm zand	BC	Hn, cHn
3	matig humusarm, matig fijn, leemarm zand	Ah2/Aa2	Hn, cHn, zEZ
4	matig humeus, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aap	Hn, cHn, zEZ
5	zeer humeus, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aap	Hn, cHn, zEZ
6	humusrijk, matig fijn, leemarm zand	Ap/Aap	Hn, cHn, zEZ
7	zandig veen	A	veenkoloniale gronden
8	veen	1C/2C/Cr	moerasbosveen
9	uiterst humusarm, matig tot zeer fijn, zwak lemig zand	C	Hn, cHn, pZn, pZg
10	uiterst humusarm, zeer fijn, sterk lemig zand	C	Hn, cHn, pZn, pZg
11	uiterst humusarm, zeer fijn, zeer sterk lemig zand	C	Hn, pZn, pZg
12	uiterst humusarme, zandige leem	C	Hn, pZn, pZg
13	uiterst humusarm, uiterst fijn, leemarm zand	1C/2C/Cr	diverse
14	uiterst humusarm, matig grof, leemarm zand	1C/2C/Cr	diverse
15	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergrond zeeklei ZH (*)
16	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergrond zeeklei ZH
17	zeer humusarme, lichte zavel	C	ondergrond zeeklei ZH
18	zeer humusarme, zware zavel	C	ondergrond zeeklei ZH
19	zeer humusarme, lichte klei	C	ondergrond zeeklei ZH
20	zeer humusarme, zware klei	C	ondergrond zeeklei ZH

(*) Hn = veldpodzolgronden; cHn = laarpodzolgronden; zEZ = zwarte enkeerdgronden; pZn = gooreerdgronden; pZg = bekeerdgronden; ZH = Zuid-Holland

Resultaten voor 2018

In onderstaande tabel staan voor de verschillende testen de resultaten weergegeven voor 01-01-2018 tot en met 31-12-2018. Er is gekeken naar het afvlakken de grondwatercurve in tijden van droogte en naar de fit van de grondwatercurve met de geobserveerde waarden.

Tabel 8 - Resultaten percolatie 2018

Bekendelle Hellekampsweg berm - 2018						
Grondsoort 9						
Worteldiepte [mm]	ET aangepast	P aangepast		ET en P aangepast		Resultaat
Origineel						EVP = 97,78 % RSME = 0,084 m
100	Geen verbetering.	Pieken afgevlakt, kruisbeweging nog aanwezig.		EVP = 98,14 %	RMSE = 0,077 m	Bij het aanpassen van ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes
300	Geen verbetering.	EVP = 97,61 %	RMSE = 0,087 m	EVP = 98,21 %	RMSE = 0,075 m	Zowel bij het aanpassen van alleen P als ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes.
600	Geen verbetering.	Verbetering, maar kruisbeweging nog aanwezig.		EVP = 97,87 %	RMSE = 0,082 m	Bij het aanpassen van ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes.
1000	Geen verbetering.	Geen verbetering.		Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.	Geen verbetering.		Geen verbetering.		

Zoals te zien is, is volgens deze kalibratie de meest accurate worteldiepte 300 mm of 600 mm, waarbij 600 mm net iets accurater wordt geschat op basis van visuele vergelijking.

Door de aangepaste neerslag- en verdampingswaarden aan de hand van deze twee worteldiepten te implementeren voor de gehele periode aan observaties van de peilbuis, kan er worden gecontroleerd of de percolatie-aanpassing valide is voor een andere periode, en niet alleen voor 2018.

In onderstaande tabel staan voor de verschillende testen de resultaten weergegeven voor de gehele periode aan observaties van de peilbuis. Er is gekeken naar het afvlakken de grondwatercurve in tijden van droogte en naar de fit van de grondwatercurve met de geobserveerde waarden.

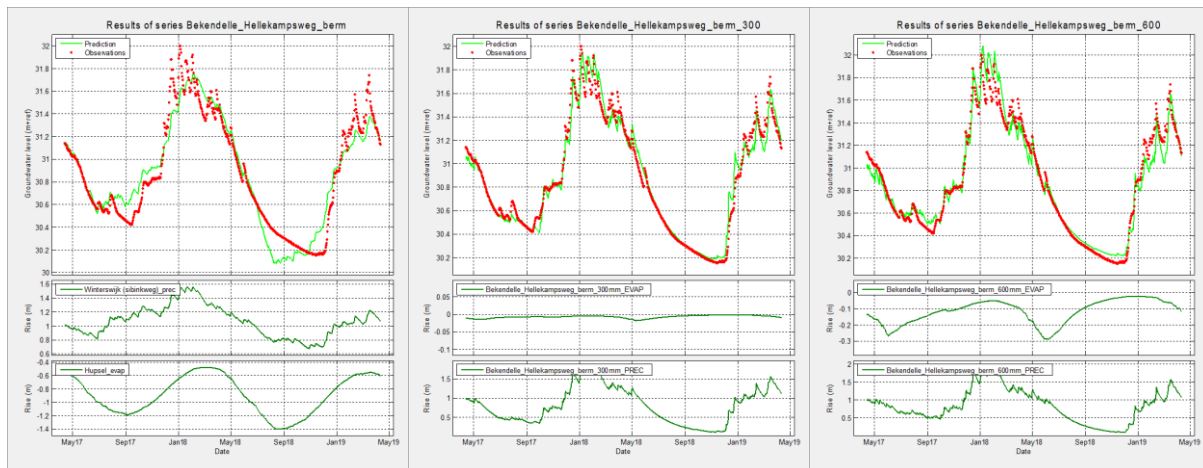
Tabel 9 - Resultaten percolatie gehele periode

Bekendelle Hellekampsweg berm – gehele periode					
Grondsoort 9					
Worteldiepte [mm]				ET en P aangepast	Resultaat
Origineel					EVP = 91,08 % RSME = 0,143 m
100				EVP = 94,66 % RMSE = 0,111m	Bij het aanpassen van ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes
300				EVP = 96,56 % RMSE = 0,089 m	Zowel bij het aanpassen van alleen P als ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes.
600				EVP = 95,73 % RMSE = 0,099 m	Bij het aanpassen van ET en P samen is er een verbetering te zien t.o.v. het origineel in droge periodes.
1000				Geen verbetering.	
2000				Geen verbetering.	

Ook hier werd het beste resultaat werd verkregen bij het veranderen van de waarden op dagen waarbij de diepte van de wortelzone = 300 mm of 600 mm.

De grondwatercurves van het originele grondwatermodel en het aangepaste grondwatermodel zijn te zien in Figuur 32. Zowel de kruisbeweging is niet meer aanwezig, en de pieken in tijden van droogte zijn ook niet meer terug te zien. Daarnaast geeft Menyanthes aan dat de grafiek inclusief percolatie een betere fit heeft in vergelijking met het origineel.

De percolatie toevoegen aan Menyanthes is gelukt voor peilbuis “Bekendelle Hellekampsweg Berm”, en tevens valide verklaard.



Figuur 32 - Resultaat percolatie peilbuis Bekendelle Hellekampsweg berm (aanpassing voor worteldiepte = 300 en 600 mm)

Discussie:

Voor deze peilbuis is duidelijk te zien dat het aanpassen van zowel neerslag als verdamping positieve gevolgen heeft gehad voor het beter fitten van een grondwatermodel in Menyanthes. Het is alleen wel de vraag of dit alleen voor deze peilbuis geldt, of dat er meer peilbuizen gebruik kunnen maken van deze manier van percolatie. En als het geldt voor meerdere peilbuizen, bij welke worteldiepte dat kan. Wat bekend is, is dat zowel neerslag als verdamping zal moeten worden aangepast om een betere fit te krijgen.

Om te testen of deze aanpak ook werkt op een andere peilbuis, zullen extra scenario's worden onderzocht:

1. WRIJ-gebied noord + lange tijdreeks (vanaf eind 2001) + kwelgebied
Peilbuis: "Gemaal Hackfort - Harmsen"
Hypothese: Lastiger om pieken te simuleren. De worteldiepte zal rond de 600 mm liggen.
2. WRIJ-gebied noordoost + korte tijdreeks (vanaf eind 2017)
Peilbuis: "Zoddebeek Bosmatenweg pb"
Hypothese: Worteldiepte nagenoeg gelijk aan "Bekendelle Hellekampsweg berm" omdat deze peilbuis zich ook in het oosten van Nederland bevindt.
3. WRIJ-gebied west + korte tijdreeks (vanaf 2016)
Peilbuis: "Ellecom – Buitensingel 17 (HVK-03.01b) 2"
Hypothese: Tijdreeks bevat pieken in de zomer, die door de aanpassing zullen worden afgevlakt.
4. Dichtbij peilbuis casus + korte tijdreeks (vanaf 2016)
Peilbuis: "Meekertweg pb 2.02"
Peilbuis: "Burloseweg raai Aalbrinkbos 1 (dichtbij beek)"
Hypothese: De worteldiepte is gelijk aan "Bekendelle Hellekampsweg berm"

De resultaten van de testen staan weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10 - Resultaten discussie casus percolatie

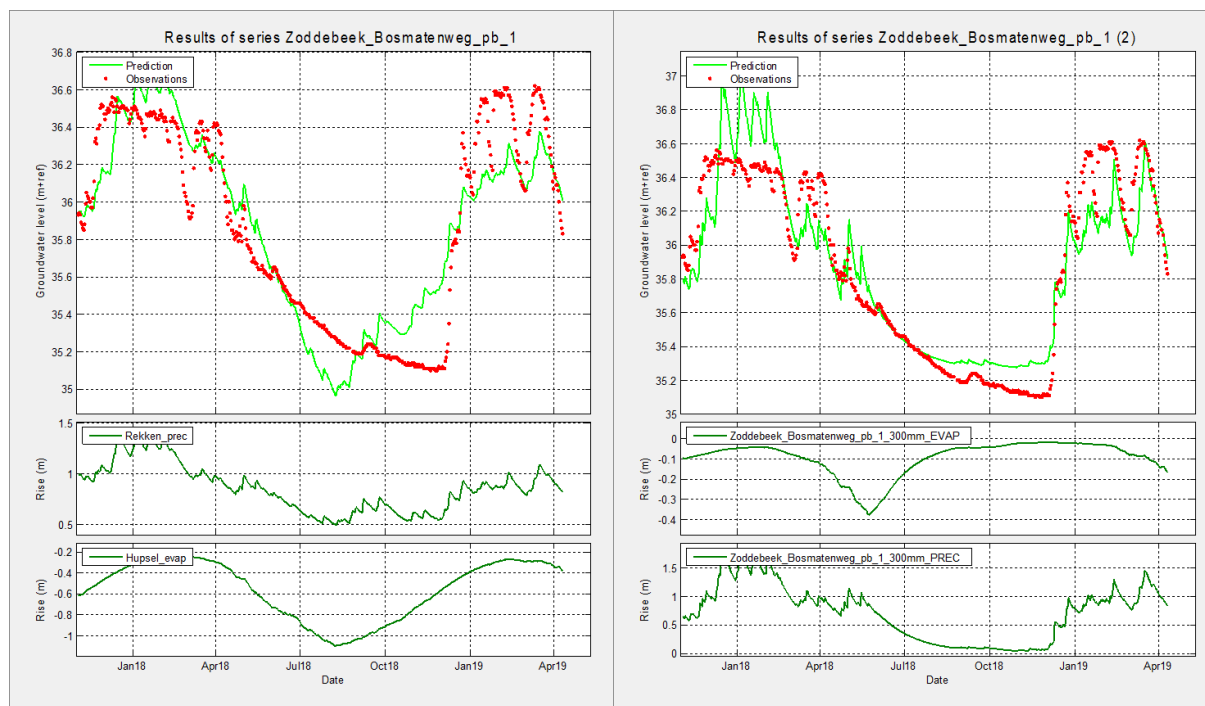
Gemaal Hackfort – Harmsen			
Grondsoort 9			
Origineel	EVP = 85,81 %	RMSE = 0.123 m	
100	Geen verbetering.		
300	Geen verbetering.		
600	Geen verbetering.		De 'verbetering' is vergelijkbaar als wat te zien is bij een worteldiepte van 1000 mm.
1000	EVP = 82,48 %	RMSE = 0,137 m	Het grondwatermodel voor 2018 simuleert een te hoge grondwaterstand.
1250	Geen verbetering.		
1500	Geen verbetering.		
1750	Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.		
Zoddebeek Bosmatenweg pb			
Grondsoort 15			
Origineel	EVP = 82,31 %	RMSE = 0.222 m	
100	Geen verbetering.		
300	EVP = 84,45 %	RMSE = 0,208 m	Verbetering in droogteperioden is niet te zien aan de EVP en RMSE, maar wel aan de grondwatercurve.
600	Geen verbetering.		
1000	Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.		
Ellecom – Buitensingel 17 (HVK-03.01b) 2			
Grondsoort 9			
Origineel	EVP = 86,67 %	RMSE = 0.073 m	
100	EVP = 86,46 %	RMSE = 0,073 m	Verbetering in droogteperioden is niet te zien aan de EVP en RMSE, maar wel aan de grondwatercurve.
300	Geen verbetering.		
600	Geen verbetering.		
1000	Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.		
Meekertweg pb2.02			
Grondsoort 9			
Origineel	EVP = 94,99 %	RMSE = 0.091 m	
100	EVP = 93,35 %	RMSE = 0,105 m	Verbetering in droogteperioden is niet te zien aan de EVP en RMSE, maar wel aan de grondwatercurve.
300	Geen verbetering.		
600	Geen verbetering.		
1000	Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.		
Burloseweg raai Aalbrinkbos 1 (dichtbij beek)			
Grondsoort 9			
Origineel	EVP = 85,90 %	RMSE = 0.101 m	
100	EVP = 90,90 %	RMSE = 0,081 m	Pieken nog deels aanwezig.
300	EVP = 91,83 %	RMSE = 0,077 m	Best fit.
600	EVP = 92,46 %	RMSE = 0,074 m	Kruisbeweging nog aanwezig.
1000	Geen verbetering.		
2000	Geen verbetering.		

De resultaten laten zien dat de percolatie-aanpassing, naast peilbuis “Bekendelle Hellekampsweg berm”, ook van toepassing is op andere peilbuizen. Desalniettemin, de worteldiepte is van grote invloed op het succes van deze percolatie-aanpassing. Ook speelt de grondsoort een rol.

Voor peilbuizen “Meekertweg pb2.02” en “Ellecom – Buitensingel 17 (HVK-03.01b)” valt de variantie in zomer 2018 wellicht te verklaren door een specifiekere worteldiepte te nemen, rond de 100 mm. Wat opmerkelijk is

om hierbij te vertellen is dat ondanks dat de ene peilbuis gelegen is in WRIJ-gebied West en de ander in WRIJ-gebied Oost, de resultaten nagenoeg hetzelfde tonen. Locatie heeft dus geen invloed op de percolatie.

De onverwachte EVP- en RMSE-waarden van peilbuis “Zoddebeek Bosmatenweg pb” vallen te verklaren doordat deze peilbuis in een drainagegebied ligt. Dit betekent dat pieken in de winter niet voorkomen omdat grondwater dan wordt gedraineerd. Na het invoegen van de percolatie-aanpassing, werden deze (voor Menyanthes) ‘onverklaarbare’ pieken intensiever. Hoogstwaarschijnlijk zullen deze pieken de reden zijn voor de onverwacht laag-uitvallende EVP- en RMSE-waarden. De resultaten staan ter verduidelijking weergegeven in Figuur 33.



Figuur 33 - Resultaat percolatie peilbuis "Zoddebeek Bosmatenweg pb" voor worteldiepte = 300 mm

Tabel 11 - Resultaten percolatie casus

Peilbuis	Grondsoort	Ligging	Type	Worteldiepte [mm]
Bekendelle Hellekampsweg berm	9	Oost	Korte meetreeks	300
Gemaal Hackfort – Harmsen	9	Noord	Kwelgebied Lange meetreeks	1000
Zoddebeek Bosmatenweg pb	15	Noordoost	Korte meetreeks	300
Ellecom – Buitensingel 17 (HVK-03.01b) 2	9	West	Korte meetreeks	100
Meekertweg pb2.02	9	Oost	Dichtbij peilbuis casus Korte meetreeks	100
Burloseweg raai Aalbrinkbos 1 (dichtbij beek)	9	Oost	Dichtbij peilbuis casus Korte meetreeks	300

Bijlage IV: Procentuele verandering bij KNMI-klimaatscenario's

De procentuele veranderingen van de geobserveerde neerslag tot 2018 zijn verkregen uit het rapport uit 2015 van KNMI waarin de KNMI-klimaatscenario's staan beschreven (KNMI (1), 2015) en uit de website van het KNMI (KNMI (4), 2014).

Tabel 12- Procentuele verandering neerslag

Neerslag								
	2036 - 2065				2066 - 2100			
	Winter	Lente	Zomer	Herfst	Winter	Lente	Zomer	Herfst
GL	+3%	+4,5%	+1,2%	+7%	+4,5%	+8%	+1,0%	+7,5%
GH	+8%	+2,3%	-8%	+8%	+12%	+7,5%	-8%	+9%
WL	+8%	+11%	+1,4%	+3%	+13%	+15%	-5%	+6,5%
WH	+17%	+9%	-13%	+7,5%	+30%	+12%	-23%	+12%

Tabel 13 - Procentuele verandering verdamping

Verdamping		
	2036 - 2065	2066 - 2100
GL	+3%	+2,5%
GH	+5%	+5,5%
WL	+4%	+6%
WH	+7%	+10%

Bijlage V: Meetstations

* een kaart van de meetstations staat weergegeven in Bijlage XIV: Onderzoeksvraag 7

Tabel 14 - Watergangmeetstations en peilbuizen

Watergangmeetstation	Watergang	Stroomgebied	Bodem- hoogte [m+NAP]	Peilbuis	Bron	Grond- soort	Wortel- diepte [mm]	Neerslagsta- tion	Verdam- pingstation
1. Stuw_Kruisbergseweg	Grote Beek	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	9,38	Grondwatermeting_Zeilhem_Eeltinkweg	WRUJ			Doetinchem	Hupsel
2. Stuw_Bouwhuisbrug	Bielheimerbeek	Oude IJssel	13,9	B41A0553	Vitens Lizard			Doetinchem	Deelen
3. Gemaal_Methen	Rosorum (dichtbij Zevenaar)	Liemers, Veluwe	8,4	ZV26	Liemers Grondwater			Duiven	Deelen
4. Gemaal_Wip-inn	Naamloos (dichtbij Zevenaar)	Liemers, Veluwe	7,63	ZV31	Liemers Grondwater			Duiven	Deelen
5. Gemaal_Hackfort - _niveau_Baaksebeek	Baakse Beek Onderloop	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	8,44	Gemaal_Hackfort - _Harmsen	WRUJ	9	1000	Hengelo	Hupsel
6. Gemaal_Zumpe	Zumpe sloot	Oude IJssel	11,14	B40F0488	Vitens Lizard			Doetinchem	Deelen
7. Stuw_Kunnerij_Bokkers	Baakse Beek Bovenloop	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	15,65	Batsdijk-Kunnerij_PB_11	WRUJ			Lichtenvoorde	Hupsel
8. Gemaal_t' Klooster	Veengoot	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	14,2	B34C1145	Vitens Lizard			Hengelo	Deelen
9. Stuw_Wientjesvoort	Baakse Beek Onderloop	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	10,3	B34C0181	Vitens Lizard			Lichtenvoorde	Hupsel
10. Verdeelwerk_Hackfort_Baaksebeek	Baakse Beek Onderloop	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	6,83	B33H1522	Vitens Lizard			Hengelo	Deelen
11. Stuw_Horsterkamp	Baakse Beek Onderloop	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	9,62	B34C1033	Vitens Lizard			Hengelo	Deelen
12. Gemaal_Hackfort - _vopo_pomp_Heegenhoek	Naamloos (dichtbij Vorden)	Berkel	8,9	Gemaal_Hackfort - _Makkink	WRUJ	10	1000	Hengelo	Hupsel
13. Overlaat_De_Kip	Beurzerbeek	Berkel	27,64	B41E0336	Vitens Lizard			Winterswijk (sibinkweg)	Hupsel
14. Stuw_Bruinderinkweg	Oosterwijkse Vloed	Baakse Beek, Veen- goot, Grote Beek	10,22	Grondwatermeting_Everhardinkweg	WRUJ	10	300	Hengelo	Hupsel
15. Zeggelinkhagbrug	Groenlose Slinge	Berkel	14,7	B34D0335	Vitens Lizard			Lievelede	Hupsel

Voor Menyanthes zijn dagelijkse neerslag- en verdampingswaarden nodig. Voor WeaGETS (oftewel onderzoeksvraag 5) zijn dagelijkse neerslag- en temperatuurwaarden nodig ($T_{\min}$ en $T_{\max}$). Er zijn verschillende bronnen waarvan deze data kan worden gehaald, maar aangezien de onaangepaste modellen in Menyanthes gebruik maken van KNMI-data, en omdat niet veel particuliere meetstations openbaar zijn of zowel neerslag als temperatuur tegelijk meten, zullen KNMI-meetstations worden gebruikt voor alle benodigde weerdata. In Tabel 15 staat een overzicht van deze gebruikte meetstations. Er staat beschreven waar het meetstation is gelegen, wat het meet en voor welk deel van het onderzoek het gebruikt is. P staat voor neerslag, ET voor verdamping en T voor temperatuur.

Tabel 15 - Weermeetstations (allen van KNMI)

Meetstation	Metingen	Gebruikt voor
Deelen	P, ET _{pot} , T _{min} en T _{max}	Menyanthes en WeaGETS
Hupsel	P, ET _{pot} , T _{min} en T _{max}	Menyanthes en WeaGETS
Doetinchem	P	Menyanthes
Duiven	P	Menyanthes
Hengelo	P	Menyanthes
Lichtenvoorde	P	Menyanthes
Lievelde	P	Menyanthes
Winterswijk (sibinkweg)	P	Menyanthes

Bijlage VI: Onderzoeksvraag 1

In deze Bijlage staat een overzicht van het interview afgenomen bij WRIJ-ecoloog Matthijs de Vos.

Allereerst werd er een uitleg gegeven over de intenties van de twee droogteindicatoren extreme en kritische droogte. De bedoeling hierbij is om het hoofdonderwerp van het interview in te leiden: wat is kritische droogte? Na deze introductie werden de volgende vragen gesteld:

- 1) Als een watergang geen afvoer meer heeft, kan er dan worden gesproken over kritische droogte?

“Ja, maar het ligt wel aan het type watergang. WRIJ heeft de watergangen verdeeld in het r-type (watergangen met te allen tijde stroming) het m-type (stagnatie komt jaarlijks voor) en o-type wateren (overige watergangen). M-type watergangen vallen ieder jaar stil, en stagnatie is dus een jaarlijks fenomeen. Meestal treedt dit op begin mei, maar eind april is ook al mogelijk. In deze watergangen is langdurige stagnatie niet kritiek. Waterbeesten die leven in m-type wateren zijn hierop ingespeeld. In stromende wateren (r-type) zorgt stagnatie wel voor een kritiek scenario. Zeker in belangrijke stromende wateren die normaal gesproken altijd water en afvoer hebben kan stagnatie desastreus zijn. Waterbeesten die leven in r-type wateren kunnen alleen overleven in stromend water.”

- 1a) Gebeurt dit al bij één afvoerloze dag of is er pas sprake van een kritiek scenario als er meerdere dagen opeenvolgend geen afvoer aanwezig is? En zo ja, hoeveel dagen zijn dit dan?

“Voor r-type wateren kan een uur al desastreus zijn. Echter moet er wel rekening worden gehouden met verschillen in r-type wateren, omdat het bij wat minder belangrijke r-type wateren, bijvoorbeeld de Berkel, het minder desastreus kan zijn. Daarnaast kan er ook verschil zijn in boven- en benedenstrooms. Matthijs de Vos gaat gevoelsmatig af op een week voor r-type wateren, maar daarnaast geeft hij ook aan dat het misschien handig kan zijn om de literatuur hierop na te slaan, of om andere ecologen te vragen. Planten ervaren overigens niet direct een probleem bij stagnatie. Macrofauna en vissen zijn wel echt afhankelijk van de hoeveelheid zuurstof die voorbijkomt. Als deze hoeveelheid lager is dan 6 mg/liter kan er worden gesproken van een kritiek scenario.”

- 1b) Is er een bepaalde waterstand waarbij de situatie als kritiek kan worden beschouwd?

“Waterstand speelt minder een rol. Als het water maar stromend blijft. Een klein laagje water 10 cm is voldoende voor de beesten om te overleven. Daarnaast hebben de meeste wateren een variërende stroombedhoogte, waardoor er op sommige plekken meer / voldoende water aanwezig blijft.”

- 2) Als het grondwaterpeil naast de watergang lager is dan in de watergang, kan er dan worden gesproken over kritieke droogte?

Matthijs heeft dit vorig jaar (2018) ook waargenomen:

“Bij de Sprengel is dit een veelvoorkomende situatie. Dit is per definitie geen kritische droogte, als men redeneert vanuit aquatische theologie. Zeker in de gebieden waar keileem voorkomt zal dit geen kritiek scenario opleveren.”

- 3) Heeft de temperatuur van het water in de watergang een invloed op de aanwezigheid van kritische droogte? (bijv. sneller optreden / versterken van kritische droogte)

“Ja. Temperatuur en zuurstof hangen samen met elkaar: hoe warmer het is, hoe minder zuurstof beschikbaar in de wateren. Als de temperatuur omhooggaat in de belangrijke r-type wateren leidt dat tot sterfte. Voornamelijk voorbij de 20 °C en zeker boven de 25 °C.”

- 4) Zijn er nog andere belangrijke factoren die voor kritieke droogte zorgen? (bijv. watergangprofiel, locatie, stroomgebiedgrootte, gemiddelde afvoer)

“Het watergangprofiel is zeker een belangrijke factor. Vorig jaar heeft Matthijs met Gerry Roelofs (Specialist planvorming) rondgelopen, en hij noemde dit scenario droogval. Matthijs zal dit niet zo snel droogval noemen, omdat er nog water in de beek aanwezig was. Als er ergens nog in de bedding water kabbelt, omschrijft hij dat niet als droogval. Dit geldt ook voor de aanwezigheid van diepe kommen. Als je om de zoveel meter water hebt staan kunnen waterbeesten daar overleden. Hydrologisch gezien is kritieke droogte gedefinieerd als droogval of afvoerloosheid, maar omdat er nog water achter blijft is dit uit ecologisch perspectief anders. Dit is ook bij WRIJ een discussie: wat is nou stagnatie en wat droogval? Volgens Matthijs kan er over stagnatie gesproken worden als droogval optreedt maar met aanwezigheid van refugia. Dat zijn plekken waarin waterbeesten hun toevluchtsoord zoeken in tijden van droogte, en daar ook kunnen overleven. Droogval treedt volgens hem op als er helemaal geen water meer aanwezig is in de hele watergang, dus ook geen refugia.”

Bijlage VII: Onderzoeksvraag 3

Rapport 1: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis (AR5 – ter info)

De Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) heeft in 2013 het vijfde evaluatierapport uitgebracht, en heeft als doel de aanwezige natuurwetenschappelijke basis te testen op zijn accuraatheid en kwantiteit (IPCC, 2013). Dit rapport is een inventarisatieonderzoek en beschrijft geen uitgevoerd onderzoek. Het zal rapport worden gebruikt ter informatie en maakt onderscheid in de volgende termen, waar later naar zal worden gerefereerd:

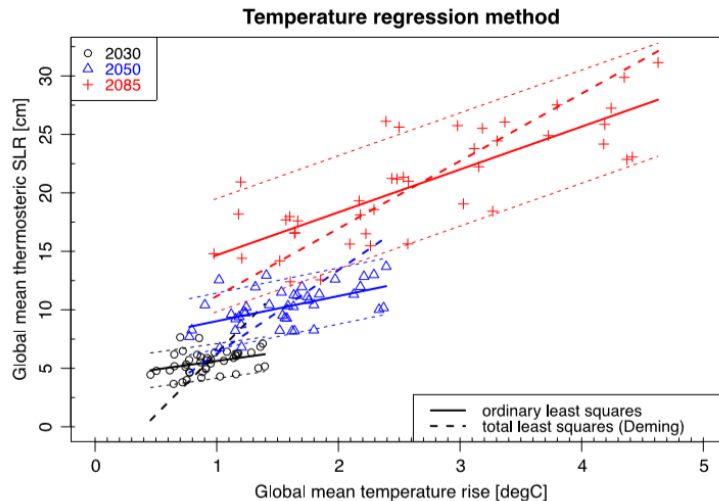
AR4	Het vierde evaluatierapport van het IPCC
GCM	Global Climate Model / General Circulation Model is een type klimaatmodel.
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model. Deze modellen waren de standaard klimaatmodellen, voorgesteld in het AR4. Ze zijn veelvuldig gebruikt.
ESM	Earth System Models. Deze modellen zijn uitgebreider dan de AOGCM's, omdat ze biochemische circulaties bevatten zoals de koolstofkringloop.
RCP	Representative Concentration Pathway. Dit zijn enkele scenario's die de ontwikkeling van broeikasgassen beschrijven, op basis van klimaatbeleid (Wikipedia, 2019). RCP 2.6 is het meest ambitieuze klimaatbeleid, RCP 8.5 het minst.
CMIP5	The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 bevat een set van gecoördineerde klimaatmodel experimenten.

Rapport 2: Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways

De auteurs (de Vries, et al., 2014) hebben een model gemaakt die de zeespiegelstijging bij de Nederlandse kust tot 2100 weergeeft. Dit hebben ze gedaan op basis van twee KNMI-klimaatscenario's, namelijk 'Gematigd (G)' en 'Warm (W)'. De modelopzet van dit rapport is hetzelfde als de aanpak beschreven in het vijfde evaluatierapport van het IPCC, alleen gebruikt dit rapport KNMI-klimaatscenario's in plaats van RCP's. Het G-scenario komt overeen met RCP 4.5 en het W-scenario met RCP 8.5. Als input-data gebruiken de auteurs data van 42 gekoppelde wereldwijde klimaatmodellen die samen uit CMIP5 komen (21 voor G en 21 voor W) (de Vries, et al., 2014).

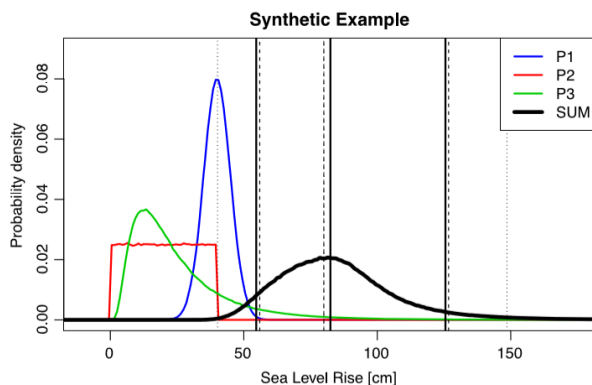
Er zijn vier contributies die invloed hebben op zeespiegelstijging geselecteerd: gletsjers en ijskappen; ijskapoppervlakte (massabalans); snelle dynamische veranderingen ijskap; landwater veranderingen. Een groot verschil is, doordat in deze paper de focus ligt bij de zeespiegel, de verandering in water op het land wel wordt meegenomen, maar er wordt aangenomen dat deze verandering niet afhankelijk is van temperatuur. Voor de contributies die afhankelijk zijn van temperatuur, is een temperatuur-regressie aanpak gebruikt.

Eerst is de gemiddelde waarde van de contributie voor 30 jaar bepaald (2000-2036 (huidig klimaat), 2036-2065 (klimaat rond 2050), 2071-2100 (klimaat rond 2085)), voor de 42 modellen. Eén symbool (o, Δ of +) in Figuur 34 is dus de gemiddelde invloed van deze contributie-parameter op de zeespiegel (in cm) over 30 jaar van één van de 42 modellen (21 voor G en 21 voor W). In totaal zijn er dus 42 symbolen per klimaatscenario (per 30 jaar). Hierbij is verondersteld dat de contributie-parameter lineair mee verandert met de temperatuurstijging. In Figuur 34 is een voorbeeld van deze lineaire afhankelijkheid te zien voor een contributie-parameter. Ook het 90% betrouwbaarheidsinterval is meegeplot.

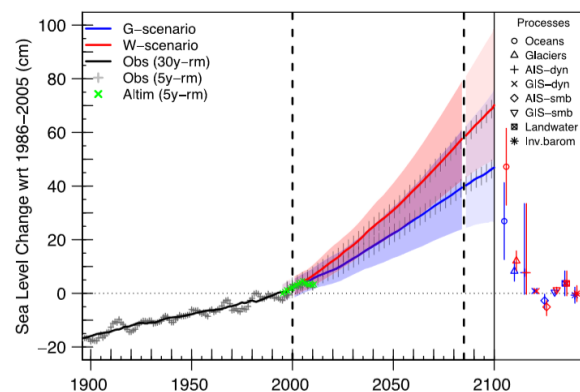


Figuur 34 - Voorbeeld aanpak temperatuur-afhankelijke contributies (de Vries, et al., 2014) 42o, 42Δ, 42+

De zeespiegelstijging per jaar is verkregen door per contributie uit de 42 tijdreeksgebaseerde modellen, 100.000 keer jaarlijkse waarden te trekken. Hieruit werd per contributie per jaar een distributie gemaakt, hetzelfde als wat er in AR5 uitgelegd staat. Uiteindelijk werd dit proces 100 keer herhaald, dus het uiteindelijke resultaat is één distributie per contributie per jaar op basis van 100 distributies van dat jaar. Daarna zijn voor alle vier de contributies de distributies per jaar samengenomen tot één distributie per jaar (zwart in Figuur 35). Door dit proces te herhalen voor de periode 2000 – 2100, kan een grafiek worden verkregen, te zien in Figuur 36.



Figuur 35 - Voorbeeld van drie verschillende contributies (met ieder zijn eigen distributie) en de invloed op zeespiegelstijging voor een bepaald jaar (de Vries, et al., 2014)



Figuur 36 - Resultaat (de Vries, et al., 2014)

Overeenkomsten en verschillen met eindopdracht:

- De auteurs maken ook gebruik van KNMI-klimaatscenario's. Wel GL en GH samengenomen tot G en WL en WH samengenomen tot W, terwijl in deze eindopdracht er onderscheid wordt gemaakt in WH, WL, GH, GL.
- Neerslag en verdamping worden niet bepaald. De contributies zijn alleen geplot tegen de temperatuurstijging en zullen worden aangepast aan de hand van deze temperatuurstijging. In deze eindopdracht zullen alleen de neerslag- en verdampingswaarden worden aangepast aan de hand van de gegeven procentuele veranderingen van het KNMI, en zullen grondwaterstanden (vergelijkbaar met contributies in het rapport) niet direct aan de hand van KNMI worden aangepast.
- In het rapport wordt aangenomen dat parameters lineair afhankelijk zijn van de temperatuurstijging per jaar ($y = ax + b$). In deze eindopdracht worden neerslag en verdamping afgevlakt als één procentuele verandering per klimaatscenario per periode. In dit rapport is er dus een trapsgewijze aanpassingscurve, in tegenstelling tot deze auteurs die gebruik maken van een lineaire curve.
- De auteurs maken gebruik van modellen die genoemd zijn in het CMIP5-rapport. Deze modellen geven jaarlijkse output, in tegenstelling met de dagelijkse output die in deze eindopdracht wordt gebruikt.

Rapport 3: Drought prediction till 2100 under RCP 8.5 climate change scenarios for Korea

Er zijn verschillende manieren om droogte te identificeren. In dit onderzoek kwamen de auteurs tot de conclusie dat de keuze voor de droogteindicator erg bepalend is voor het voorspellen van droogte, en hebben de keuze gemaakt om EDI te gebruiken op basis van de eerder uitgevoerde onderzoeken van Kim et al. (2009) en Dogan et al. (2012). Hieruit was namelijk gebleken dat de EDI de meest ideale index is om droogtevoorspellingen mee te maken voor zowel korte- als lange termijn droogte.

In dit onderzoek wordt de dagelijkse EDI-waarde bepaald aan de hand van het optreden van toekomstige droogte in Korea voor de periode 2014-2100. De EDI-waarde voor de periode tot 2100 wordt bepaald door gegenereerde neerslag uit het regionale HadGEM3-RA-model voor het RCP 8.5 scenario (vergelijkbaar met 'W' van de KNMI-klimaatscenario's) als neerslag te gebruiken in het bepalen van de dagelijkse EDI-waarden. RCP 8.5 is genomen omdat bij gebruik van dit scenario ervan uit wordt gegaan dat de CO₂-concentratie op de wereld zal blijven toenemen.

EDI (Byun & Wilhite, 1999)

Verschillende waarden zullen moeten worden berekend om de dagelijkse EDI te bepalen.

EP is de gesommeerde waarde van dagelijkse neerslag met een tijdreeksafhankelijke reductie factor. Daarnaast spelen *MEP* (dagelijks gemiddelde *EP*), *DEP* (afwijking van *EP*) en de *SEP* (gestandaardiseerde waarde van *DEP*) een rol. Door deze indexen te gebruiken, kunnen de opeenvolgende dagen waarin *SEP* negatief is worden bepaald, en dat geeft de begindatum, einddatum en de duur van een watertekortperiode weer.

De dagelijkse EDI-waarde wordt bepaald uit de *PRN*-index, en wordt ook wel de gestandaardiseerde *PRN*-index genoemd. De *PRN*-index wordt bepaald met de volgende formules:

$$EP_i = \sum_{m=1}^i \left[\frac{a(i-m+1)P_m}{(\sum_{n=1}^i n)} \right]$$

$$DEP = EP - MEP$$

$$SEP = \frac{DEP}{ST(EP)}$$

$$PRN_j = DEP_j \sum_{n=1}^j \frac{(n)}{(ja)}$$

Waarin,

i = lengte van de sommatie (bijvoorbeeld 365 dagen)

P_m = neerslag van *m* dagen geleden

a = constante (= 100 als *i* = 365)

EP = Effective Precipitation (effectieve neerslag [mm])

MEP = gemiddelde van 30 jaar aan tijdreeksen van *EP* voor elk kalenderjaar

DEP = afwijking van *EP*

ST = standaarddeviatie

SEP = gestandaardiseerde waarde van *DEP*

PRN = dagelijkse benodigde neerslag voor een terugdraaiing naar de normale condities [mm]

j = *i* + (aantal dagen opeenvolgend negatieve *SEP*) – 1

De dagelijkse EDI kan dan worden uitgerekend door:

$$EDI_j = \frac{PRN_j}{ST(PRN_j)}$$

De lengte van de droogte is dan gelijk aan het aantal opeenvolgende dagen waarin *EDI* < -1.0.

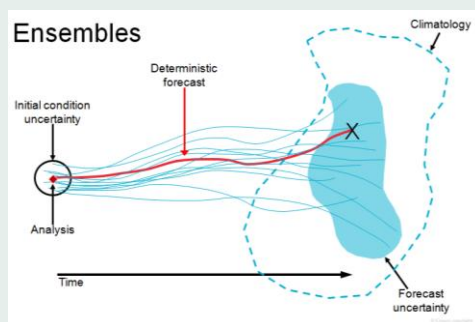
HadGEM3 (Met Office, n.d.)

HadGEM3 is de afkorting voor Hadly Centre Global Environmental Model version 3, en kan gebruikt worden voor verschillende gebieden, met een erg gedetailleerde schaal. *HadGEM3-RA* is een regionaal atmosferisch model dat gebaseerd is op de Oost-Aziatische regio, met een resolutie variërend van 50 tot 12,5 km. Het model

voorspelt toekomstig weer op basis van historische data. In plaats van één enkele keer runnen voor de periode, runt het computermodel een paar keer met elke keer iets andere startcondities dan de vorige run. Dit zorgt voor een acceptabelere uitkomst, ook vooral omdat weer erg lastig is om te voorspellen voor een lange periode. De complete set van runs wordt een 'ensemble' genoemd, één run wordt een 'ensemble member' genoemd.

Ensemble voorspellingssystemen zijn bedacht om te controleren of de verschillen tussen de ensemble members niet te groot zijn.

Het model is van oorsprong een klimaatvoorspellingsmodel, maar wordt ook veel gebruikt om weer mee te genereren voor andere klimaatvoorspellingsmodellen.



Figuur 37 - Werking HadGEM3 (Met Office, n.d.)

De auteurs geven aan dat de keuze voor het HadGEM3-model is gemaakt, omdat de GCM's weergegeven in AR5 niet goed werken op regionaal gebied, en omdat de schaal van de meeste AOGCM's is nog steeds te groot is (zo'n honderden kilometers) wat het lastig maakt om lokale effecten op te nemen die de klimaatverandering op een kleinere schaal beïnvloeden.

Na het bepalen van de dagelijkse EDI-waarden, werd de gesimuleerde periode opgesplitst in stukken van 30 jaar (2014-2040, 2041-2070 en 2071-2100) om zo de verschillende klimaatscenario's te onderzoeken. De conclusie was een significante uitkomst van een goede voorspelbaarheid van droogte in Korea door de combinatie EDI, HadGEM3-RA en RCP 8,5. Het resultaat verbeterde eerder uitgevoerde onderzoeken.

Overeenkomsten en verschillen met eindopdracht:

- Uiteindelijk is er onderscheid gemaakt tussen de perioden waarin wordt gesproken over klimaatverandering. Hetzelfde wordt gedaan in deze eindopdracht, met nagenoeg dezelfde perioden.
- De auteurs maken gebruik van een neerslaggenerator op basis van tijdreeksen voor de periode tot 2100. In deze eindopdracht is neerslag gegenereerd tot 2100 door observaties te herhalen. Een neerslaggenerator wordt gebruikt voor het beantwoorden van onderzoeksvraag 5.
- De auteurs gebruiken als droogteindicator de EDI. Als de EDI < -1,0 werd er gesproken van een droge dag, volledig gebaseerd op de gegenereerde neerslag. Dit verschilt met wat er in deze eindopdracht wordt gebruikt, aangezien de droogteindicator gebaseerd is op het water aanwezig in de watergang en dus niet op de neerslag. Met andere woorden: de auteurs hebben meteorologische droogte onderzocht, en in deze eindopdracht zal de hydrologische droogte worden onderzocht.

Rapport 4: Will drought events become more frequent and severe in Europe?

De droogteindicator in dit onderzoek is een combinatie van drie indexen: SPI (alleen afhankelijk van neerslag), SPEI (afhankelijk van neerslag – verdamping en van temperatuur) en RDI (afhankelijk van de ratio tussen neerslag en verdamping, en is geschikt om meteorologische extremen te herkennen).

Om deze gecombineerde droogteindicator te bepalen, wordt 11 keer de EURO-CORDEX-simulatie gerund. De EURO-CORDEX-simulatie is, net als HadGEM3, een ensemble simulatie van 11 members. Er is gekozen voor het EURO-CORDEX-model omdat deze de hoogste resolutie geeft voor Europese gebieden (0,11 °), en omdat temperatuur en neerslag van een subset van de members wordt verbeterd op fouten door het modelprogramma (bias-adjusted). Elke 11 bias-adjusted simulaties bevatten dagelijkse neerslag, minimum en maximumtemperatuur van 1981 tot 2100, waarbij vanaf 2006 of het RCP 4,5 scenario worden toegepast, of het RCP 8,5 scenario.

Uiteindelijk dus twee ensembles van ieder 11 members. Daarna worden de dagelijkse waarden omgeschreven naar maandelijkse waarden. Uit deze maandelijkse waarden wordt ET_{pot} gehaald, door de Hargreaves-Samani formule.

Hierna worden de droogteindicatoren bepaald per 3 en per 12 maanden. Dit is gedaan omdat een 3-maandschaal de verschillen zal tonen van de seizoenen, en de 12-maandschaal de verschillen tussen de jaren. Allereerst worden SPI, SPEI en RDI bepaald voor de 3-maandschaal, en daarna apart voor de 12-maandschaal. De input data is gefit naar Gamma, log-logistieke, en log-normale distributies voor elk van de drie droogteindicatoren.

Deze studie focust niet op het aantal en de hevigheid van de droogte tot 2100, maar of de droogte minder of meer hevig en/of frequent gaat zijn in de toekomst. Daarom is ervoor gekozen om de hele periode tot 2100 te gebruiken. Ook geven Spinoni et al. (2018) aan dat de keuze om de gehele periode te gebruiken wordt gedeeld met Wu et al. (2005) bij het gebruik van SPI.

Uiteindelijk wordt de gecombineerde droogteindicator bepaald door de drie droogteindicatoren met elkaar te vergelijken voor dezelfde periode. Als twee van de drie indicatoren > 0 , en ook twee van de drie indicatoren < 1.0 , is de gecombineerde droogteindicator voor die periode -1, wat droogte betekent (Tabel 16).

Tabel 16 - Gecombineerde indicator-waarden volgens de drie losse droogteindicatoren (Spinoni, et al., 2018)

Single indicators (SPI, SPEI, RDI)	Combined	Conditions
2+ indicators $\in (0, +\infty)$	1	Normal/wet
All cases	-1	Drought
2+ indicators $\in (-\infty, -1]$	-2	Extreme drought
2+ indicators $\in (-\infty, 0]$ 2+ indicators $\in (-\infty, -1]$ and also 2+ indicators $\in (-\infty, -2]$	-0.5	Dry
All other cases		

2+ stands for at least two out of three input indicators.

De frequentie van droogte en extreme droogte is bepaald voor drie periodes (1981-210, 2041-2070 en 2071-2100), uitgedrukt in frequentie per 10 jaar. Ook wordt de gemiddelde hevigheid van de droogte bepaald per periode.

Overeenkomsten en verschillen met eindopdracht:

- De auteurs onderzoeken twee klimaatscenario's. In deze eindopdracht zijn vier klimaatscenario's onderzocht.
- De perioden die de auteurs gebruiken voor hun onderzoek komen nagenoeg overeen met de perioden die in deze eindopdracht worden gebruikt.
- In het rapport van Spinoni et al. (2018) wordt de droogteindicator per maand bepaald. De droogteindicator voor deze eindopdracht wordt per jaar bepaald.
- In het onderzoek van Spinoni et al. (2018) is de droogteindicator gebaseerd op neerslag, verdamping en temperatuur. De auteurs onderzoeken dus de meteorologische droogte. In dit eindrapport zal er worden gekeken naar hydrologische droogte.
- Net als in het rapport over Korea gebruiken de auteurs een weergenerator om dagelijkse neerslag, verdamping en temperatuur tot 2100 te verkrijgen.
- De auteurs maken gebruik van potentiële verdamping. Potentiële verdamping wordt ook gebruikt in deze eindopdracht.

Rapport 5: Drought modelling – A review

Dit rapport van Mishra & Singh (2011) brengt verschillende manieren van droogte modelleren in kaart, door in te gaan op de benodigde input, methodes en de valkuilen omtrent het voorspellen van droogte.

Belangrijke input-parameters die nodig zijn om droogte te voorspellen zijn:

- Neerslag (meteorologische droogte)
- Afvoer, berging en waterstand (hydrologische droogte)
- Grondwaterstand (hydrologische droogte in het grondwater)
- Bodemvocht en gewasopbrengst (landbouwdroogte)

Om aan te geven of een dag kan worden gezien als een droge dag zijn droogteindicatoren van belang. De volgende droogteindicatoren worden veel gebruikt in het modelleren van hydrologische droogte (ook twee andere rapporten zijn nageslagen (Mishra & Singh, 2010) (Heim, 2002)):

- EDI (Effective Drought Index)
- SPI (Standardized Precipitation Moisture Index)
- SRI
- EP (Effective Precipitation)
- Afvoer
- ENSO (El Nino-Southern Oscillation)
- SST (Sea Surface Temperature)
- PHDI (Palmer Hydrological Drought Index → dit is exclusief grondwater)
- SWSI (Surface Water Supply Index → dit is inclusief grondwater)

Naast de input en de droogteindicatoren, is de methodologiekeuze ook belangrijk:

Regressieanalyse

Een regressieanalyse gaat uit van de afhankelijkheid tussen variabelen. Als een variabele bekend is, kunnen daarvoor de andere variabelen worden afgeleid. Vaak wordt de droogteindicator bepaald uit bekende neerslag- en verdampingwaarden.

Voordeel: Niet alle parameters hoeven bekend te zijn. Dit kan voor voorspellende modellen een uitkomst bieden.

Nadeel: Uitgaan van lineariteit tussen twee variabelen wat het voor lange-termijn droogtevoorspellingen niet geschikt maakt. Daarnaast moet het duidelijk zijn wat het conceptueel model is van de processen, om zo de relaties tussen de variabelen duidelijk te krijgen.

Tijdreeksanalyse

Bij het gebruik van tijdreeksanalyse wordt droogte bepaald op basis van de eerdere observaties. Vaak wordt een tijdreeksanalyse gebruikt in combinatie met een ander model dat toekomstige weervariabelen kan genereren.

Voordeel: Het systematisch zoeken naar identificatie, schatting en diagnostische controle voor modelontwikkeling.

Nadeel: Omdat tijdreeksanalyses flexibel kunnen zijn, is de toepasbaarheid sterk afhankelijk van de capaciteiten van de onderzoeker om het beste model te kiezen uit de kandidaat-modellen.

Waarschijnlijkheidsanalyse

Een veelgebruikt voorbeeld van een waarschijnlijkheidsanalyse zijn Markov Chain models. Het verschil met tijdreeksanalyse is dat de waarschijnlijkheidsanalyse de waarde op t alleen baseert op de waarde van $t-1$, en dus niet op $t-1$, $t-2$, ..., t_0 . Dit wordt de first-order genoemd. Naast first-order wordt er ook gebruik gemaakt van second- and third-order Markov Chains, die, zoals de naam verklaart, t baseren op $t-1$, $t-2$ of zelfs $t-3$.

Voordeel: Het weer en met name neerslag modelleren is erg complex, doordat het kan verschillen per dag. Waarschijnlijkheidsanalyses kunnen hiervoor een goede uitkomst bieden omdat ze een korte periode benaderen.

Nadeel: Het is een complexe en stochastische analyse wat het soms lastig maakt om toe te passen.

Artificial neural network model

Neurale netwerken zijn nonlineaire modellen die patronen in de data kunnen ontdekken. Normaal gesproken bestaat het model uit drie lagen: input, verborgen laag, output. Het drielaagse model wordt ook gebruikt voor voorspellende doeleinden.

Voordeel: Veel statistische kennis is niet nodig en het model kan complexe nonlineaire relaties detecteren tussen afhankelijke en onafhankelijke variabelen, met hoge accuraatheid.

Nadeel: Black box, empirische structuur van modelontwikkeling, computerbelasting en een neiging tot over-fitten.

Hybride model

Zoals de naam al doet vermoeden maken hybride modellen gebruik van de voordelen uit twee losse modellen. Stochastische modellen kunnen bijvoorbeeld worden gecombineerd met artificial neural network modellen.

Voordeel: Over het algemeen hebben hybride modellen een betere fit dan individuele modellen.

Nadeel: Het vraagt veel tijd om twee complexe modellen op elkaar te laten aansluiten om ervoor te zorgen dat er één output over blijft.

Lange-termijn droogtevoorspellingen

Lange-termijn droogtevoorspellingen is pas mogelijk als voor een lange tijd vooruit is voorspelt. Dit kan worden gedaan aan de hand van de sterke relatie tussen ENSO, SST en neerslag. Echter hangt dit wel af van de locatie. ENSO is een goede droogteindicator voor Australië, maar minder voor Azië.

Voordeel: Door lange-termijn droogtevoorspellingen te doen kan er inzicht worden vergaard over hoe droogte zich ontwikkelt door een lange periode.

Nadeel: In het artikel wordt onder lange-termijn droogtevoorspellingen vaak maar 1 jaar bedoeld, en droogtevoorspellingen op lange-termijn wordt vaak gedaan voor grote gebieden en is niet zo gedetailleerd.

Droogte is een probabilistisch proces, en om een droogte te karakteriseren zijn er basis parameters nodig:

- Hevigheid
- Lengte van de droogte
- Intensiteit
- Herhalings tijd / frequentie
- Oppervlakte

Het analyseren van droogte werkt het beste door het gebruik van stochastische modellen. Dit is omdat er tot nu toe nog niet veel extreme droogte is gemeten, en daardoor extreem lange droogteperiodes niet eens worden gegenereerd door de historische data. Het is hierbij wel van belang dat de type distributie zorgvuldig wordt uitgekozen en er dus veel getest zal moeten worden tussen verschillende soorten distributies. De bovenstaande parameters kunnen worden gesimuleerd door voor elke parameter de beste probabilistische aanpak te kiezen (univariate, bivariate, multivariate of spatiotemporele analyse).

Om klimaatverandering op lokale schaal mee te nemen in het droogtemodel, kan GCM-output naar beneden worden geschaald tot lokale schaal. Toekomstige droogte kan worden onderzocht gebaseerd op bijvoorbeeld neerslagwaarden uit een GCM. Er wordt dan ook aangeraden om in toekomstige studies GCM's te gebruiken.

Ook geven Mishra & Singh (2011) aan dat er helaas nog steeds fouten bevinden in het simuleren van neerslag met GCM's. Volgens de auteurs is de beste manier om deze fouten op te lossen, om gebruik te maken van model ensembles, zoals ook al kort beschreven staat in het rapport van Park et al. (2015).

Uiteindelijk geven de auteurs nog een korte samenvatting van hun bevindingen. De beste manier om de tijdelijke dynamiek die bij tijdreeksen hoort te verbeteren, is om deze in een probabilistisch framework te zetten (distributies). Dit zal ervoor zorgen dat abrupte veranderingen in droogtepatronen worden herkend. Ook wordt er nogmaals benadrukt dat het gebruik van GCM's voor lange termijn droogtevoorspellingen wordt aangeraden. Daarnaast wordt er gezegd dat lokale onderzoeken vaak geen accurate antwoorden geven omdat bijvoorbeeld de afstanden tot een meetstation te groot zijn. Dit kan volgens Mishra & Singh (2011) worden verholpen door het gebruik van remote sensing (radar, satellieten etc.), maar dat vereist wel meer onderzoek naar dit onderwerp.

Overeenkomsten en verschillen met eindopdracht:

- De auteurs (Mishra & Singh, 2011) geven aan dat om hydrologische droogte te voorspellen de volgende input-parameters nodig zijn: neerslag, afvoer, berging, waterstand, grondwaterstand. Deze input-parameters worden ook gebruikt in deze eindopdracht.
- Er worden verschillende methoden genoemd die gebruikt zijn in onderzoeken over droogte. In deze eindopdracht zal tijdreeksanalyse worden gebruikt, op de lange-termijn. Dit kan bij elkaar ook worden gezien als een lange-termijn tijdreeksanalyse.
- Ook de basis input-parameters worden meegenomen in deze eindopdracht, alleen worden deze niet bepaald aan de hand van GCM's, maar aan de hand van tijdreeksanalyse.

Bijlage VIII: Onderzoeksvraag 4

Tabel 17 - Validatiewaarden grondwatermodellen Menyanthes

Peilbuis	Worteldiepte [mm]	Neerslagstation	Verdampingsstation	EVP-waarde [%]	RMSE-waarde [m]
Batsdijk-Kunnerij PB 11		Lichtenvoorde	Hupsel	86,57	0,016
Gemaal Hackfort - Makkink	1000	Hengelo	Hupsel	77,51	0,162
Grondwatermeting Everhardinkweg	300	Hengelo	Hupsel	78,17	0,159
Grondwatermeting Zelhem Eeltinkweg		Doetinchem	Hupsel	90,20	0,097
Gemaal Hackfort - Harmsen	1000	Hengelo	Hupsel	81,28	0,141
B33H1522		Hengelo	Deelen	83,90	0,132
B34C0181		Hengelo	Deelen	86,97	0,125
B34C1033		Hengelo	Deelen	85,54	0,095
B34C1145		Hengelo	Deelen	86,10	0,214
B34D0335		Lievelde	Hupsel	85,91	0,128
B40F0488		Doetinchem	Deelen	74,37	0,126
B41A0553		Doetinchem	Deelen	88,34	0,171
B41E0336		Winterswijk (sibinkweg)	Hupsel	85,04	0,078
ZV26		Duiven	Deelen	81,83	0,161
ZV31		Duiven	Deelen	84,80	0,124
Gemiddeld				83,77	0,129

Bijlage IX: Onderzoeksvraag 5

Om antwoord te krijgen op onderzoeksvraag 5 zal het opensource MATLAB-script WeaGETS worden gebruikt (Chen & Brissette, 2012). Input parameters voor deze generator zijn dagelijkse tijdreeksen van neerslag (mm), minimumtemperatuur (Celsius) en maximumtemperatuur (Celsius). Alle parameters komen van KNMI-meetstations. De output parameters zijn hetzelfde als de input parameters.

Naast de input parameters moeten een paar andere parameters worden opgegeven. Tussen haakjes is weergegeven welke parameterkeuzes er zijn gemaakt voor dit onderzoek. De keuzes zijn gebaseerd op Chen et al. (2012).

- Dagelijkse neerslag drempelwaarde (0.1 mm per dag)
- Aantal jaren om te genereren (1000 jaren)
- Smooth of smooth niet de parameters af die zorgen voor neerslag optreden en hoeveelheid (smooth)
 - o Eén tot vier Fourier harmonics die hiervoor wordt gebruikt (1)
- Markov Chain orders om neerslag optreden te genereren (derde order)
- Distributie type om natte dagelijkse neerslag te genereren (gamma)
- Selecteer een (on)geconditioneerde schema om Tmax en Tmin te genereren (geconditioneerd)
- Correct of niet-correct de laagfrequentie veranderlijkheid van neerslag, Tmax en Tmin (niet-correct)

Bijlage X: Onderzoeksvraag 6

Grondsoort

De gebruikte grondsoorten zijn gehaald uit “Bodem” en “Bodemkaart NL 2017”, welke aanwezig zijn in de WRIJ-ArcGIS kaartlagen.

Tabel 18 - Grondsoorten

	Grondsoort
1a	Zand fijn Lemig
1b	Zand fijn Leemarm / zwak lemig
1c	Zand fijn Lichte zwavel
2	Zand grof
3	Kleiig lemig
4	Klei evt op zand
5	Veen

Tabel 19 - Grondsoort bij resultaten

Grondsoort bij resultaten									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
Stuw Kruisberg-seweg	5	Stuw Kruisberg-seweg	5	Stuw Kruisberg-seweg	5	Stuw Bouwhuis-brug	1a	Stuw Kruisberg-seweg	5
Gemaal Methen	1c	Stuw Bouwhuis-brug	1a	Stuw Bouwhuis-brug	1a	Stuw Kruisbergseweg	5	Stuw Bouwhuis-brug	1a
Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	1a	Gemaal Methen	1c	Gemaal Methen	1c	Gemaal Methen	1c	Gemaal Methen	1c
Stuw Bouwhuis-brug	1a	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	1a	Gemaal Wip-Inn	1c	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	1a	Gemaal Wip-Inn	1c
Gemaal Wip-Inn	1c	Gemaal Wip-Inn	1c	Stuw Kunnerij Bokkers	1b	Gemaal Zumpe	1b	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	1a
Stuw Kunnerij Bokkers	1b	Stuw Kunnerij Bokkers	1b	Gemaal Zumpe	1b	Gemaal Wip-Inn	1c	Gemaal Zumpe	1b
Gemaal Zumpe	1b	Gemaal Zumpe	1b	Gemaal t' Klooster	1b	Stuw Kunnerij Bokkers	1b	Stuw Kunnerij Bokkers	1b
Gemaal t' Klooster	1b	Gemaal t' Klooster	1b	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	1a	Gemaal t' Klooster	1b	Gemaal t' Klooster	1b
Stuw Wientjes-voort	4	Stuw Wientjes-voort	4	Stuw Wientjes-voort	4	Stuw Wientjes-voort	4	Stuw Wientjes-voort	4
Stuw Horsterkamp	4	Stuw Horsterkamp	4	Stuw Horsterkamp	4	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	1b	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	1b
Overlaat De Kip	1b	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	1b	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	1b	Stuw Horsterkamp	4	Stuw Horsterkamp	4
Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	1b	Gemaal Hackfort - vopo pomp	4	Overlaat De Kip	1b	Gemaal Hackfort - vopo pomp	4	Gemaal Hackfort - vopo pomp	4
Stuw Bruinderinkweg	1b	Overlaat De Kip	1b	Gemaal Hackfort - vopo pomp	4	Overlaat De Kip	1b	Overlaat De Kip	1b
Gemaal Hackfort - vopo pomp	4	Stuw Bruinderinkweg	1b	Stuw Bruinderinkweg	1b	Stuw Bruinderinkweg	1b	Stuw Bruinderinkweg	1b

Hoogte

De hoogtekaart die gebruikt is komt uit de WRIJ-ArcGIS en is een AHN-hoogtekaart, 100m grid.

Tabel 20 - Hoogte bij resultaten

Substroomgebiedgrootte bij resultaten									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
Stuw Kruisberg-seweg	11,21	Stuw Kruisberg-seweg	11,21	Stuw Kruisberg-seweg	11,21	Stuw Bouwhuisbrug	15,98	Stuw Kruisbergseweg	11,21
Gemaal Methen	11,86	Stuw Bouwhuisbrug	15,98	Stuw Bouwhuisbrug	15,98	Stuw Kruisbergseweg	11,21	Stuw Bouwhuisbrug	15,98
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	10,09	Gemaal Methen	11,86	Gemaal Methen	11,86	Gemaal Methen	11,86	Gemaal Methen	11,86
Stuw Bouwhuisbrug	15,98	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	10,09	Gemaal Wip-Inn	11,87	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	10,09	Gemaal Wip-Inn	11,87
Gemaal Wip-Inn	11,87	Gemaal Wip-Inn	11,87	Stuw Kunnerij Bokkers	17,82	Gemaal Zumpe	12,85	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	10,09
Stuw Kunnerij Bokkers	17,82	Stuw Kunnerij Bokkers	17,82	Gemaal Zumpe	12,85	Gemaal Wip-Inn	11,87	Gemaal Zumpe	12,85
Gemaal Zumpe	12,85	Gemaal Zumpe	12,85	Gemaal t' Klooster	16,98	Stuw Kunnerij Bokkers	17,82	Stuw Kunnerij Bokkers	17,82
Gemaal t' Klooster	16,98	Gemaal t' Klooster	16,98	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	10,09	Gemaal t' Klooster	16,98	Gemaal t' Klooster	16,98
Stuw Wientjesvoort	13,51	Stuw Wientjesvoort	13,51	Stuw Wientjesvoort	13,51	Stuw Wientjesvoort	13,51	Stuw Wientjesvoort	13,51
Stuw Horsterkamp	12,40	Stuw Horsterkamp	12,40	Stuw Horsterkamp	12,40	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	8,87	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	8,87
Overlaat De Kip	29,91	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	8,87	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	8,87	Stuw Horsterkamp	12,40	Stuw Horsterkamp	12,40
Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	8,87	Gemaal Hackfort - vopo pomp	10,13	Overlaat De Kip	29,91	Gemaal Hackfort - vopo pomp	10,13	Gemaal Hackfort - vopo pomp	10,13
Stuw Bruinderinkweg	11,69	Overlaat De Kip	29,91	Gemaal Hackfort - vopo pomp	10,13	Overlaat De Kip	29,91	Overlaat De Kip	29,91
Gemaal Hackfort - vopo pomp	10,13	Stuw Bruinderinkweg	11,69	Stuw Bruinderinkweg	11,69	Stuw Bruinderinkweg	11,69	Stuw Bruinderinkweg	11,69

Substroomgebiedgrootte

Tabel 21 - Substroomgebiedgrootte gerangschikt van klein naar groot

	Stroomgebied	Grootte [m²]
1	402	4.247.964
2	445	5.058.198
3	745	17.127.380
4	662	21.550.965
5	744	26.707.920
6	809	30.278.079
7	549	30.624.218
8	746	50.558.453
9	547	55.056.320
10	803	57.064.325
11	805	60.202.458
12	742	65.082.361

Tabel 22 - Substroomgebiedgrootte bij resultaten

Substroomgebiedgrootte bij resultaten									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
Stuw Kruisberg-seweg	4	Stuw Kruisberg-seweg	4	Stuw Kruisberg-seweg	4	Stuw Bouwhuis-brug	9	Stuw Kruisberg-seweg	4
Gemaal Methen	1	Stuw Bouwhuis-brug	9	Stuw Bouwhuis-brug	9	Stuw Kruisbergseweg	4	Stuw Bouwhuis-brug	9
Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	5	Gemaal Methen	1	Gemaal Methen	1	Gemaal Methen	1	Gemaal Methen	1
Stuw Bouwhuis-brug	9	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	5	Gemaal Wip-Inn	2	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	5	Gemaal Wip-Inn	2
Gemaal Wip-Inn	2	Gemaal Wip-Inn	2	Stuw Kunnerij Bokkers	12	Gemaal Zumpe	7	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	5
Stuw Kunnerij Bokkers	12	Stuw Kunnerij Bokkers	12	Gemaal Zumpe	7	Gemaal Wip-Inn	2	Gemaal Zumpe	7
Gemaal Zumpe	7	Gemaal Zumpe	7	Gemaal t' Klooster	8	Stuw Kunnerij Bokkers	12	Stuw Kunnerij Bokkers	12
Gemaal t' Klooster	8	Gemaal t' Klooster	8	Gemaal Hackfort - niveau Baakse-beek	5	Gemaal t' Klooster	8	Gemaal t' Klooster	8
Stuw Wientjesvoort	5	Stuw Wientjesvoort	5	Stuw Wientjesvoort	5	Stuw Wientjesvoort	5	Stuw Wientjesvoort	5
Stuw Horsterkamp	5	Stuw Horsterkamp	5	Stuw Horsterkamp	5	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	3	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	3
Overlaat De Kip	10	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	3	Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	3	Stuw Horsterkamp	5	Stuw Horsterkamp	5
Verdeelwerk Hackfort Baakse-beek	3	Gemaal Hackfort - vopo pomp	6	Overlaat De Kip	10	Gemaal Hackfort - vopo pomp	6	Gemaal Hackfort - vopo pomp	6
Stuw Bruinderinkweg	8	Overlaat De Kip	10	Gemaal Hackfort - vopo pomp	6	Overlaat De Kip	10	Overlaat De Kip	10
Gemaal Hackfort - vopo pomp	6	Stuw Bruinderinkweg	8	Stuw Bruinderinkweg	8	Stuw Bruinderinkweg	8	Stuw Bruinderinkweg	8

Stroomgebiedgrootte

Tabel 23 - Stroomgebiedgrootte gerangschikt van klein naar groot

	Stroomgebied	Grootte [m²]
1	Schipbeek	247.461.770
2	Oude IJssel	363.112.874
3	Baakse Beek	375.668.428
4	Liemers / Veluwe	446.973.526
5	Berkel	516.061.662

Tabel 24 - Substroomgebiedgrootte bij resultaten

Substroomgebiedgrootte bij resultaten									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
Stuw Kruisbergseweg	3	Stuw Kruisbergseweg	3	Stuw Kruisbergseweg	3	Stuw Bouwhuisbrug	2	Stuw Kruisbergseweg	3
Gemaal Methen	4	Stuw Bouwhuisbrug	2	Stuw Bouwhuisbrug	2	Stuw Kruisbergseweg	3	Stuw Bouwhuisbrug	2
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	3	Gemaal Methen	4	Gemaal Methen	4	Gemaal Methen	4	Gemaal Methen	4
Stuw Bouwhuisbrug	2	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	3	Gemaal Wip-Inn	4	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	3	Gemaal Wip-Inn	4
Gemaal Wip-Inn	4	Gemaal Wip-Inn	4	Stuw Kunnerij Bokkers	3	Gemaal Zumpe	2	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	3
Stuw Kunnerij Bokkers	3	Stuw Kunnerij Bokkers	3	Gemaal Zumpe	2	Gemaal Wip-Inn	4	Gemaal Zumpe	2
Gemaal Zumpe	2	Gemaal Zumpe	2	Gemaal t' Klooster	Baakse Beek	Stuw Kunnerij Bokkers	3	Stuw Kunnerij Bokkers	3
Gemaal t' Klooster	3	Gemaal t' Klooster	3	Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek	3	Gemaal t' Klooster	3	Gemaal t' Klooster	3
Stuw Wientjesvoort	3	Stuw Wientjesvoort	3	Stuw Wientjesvoort	3	Stuw Wientjesvoort	3	Stuw Wientjesvoort	3
Stuw Horsterkamp	3	Stuw Horsterkamp	3	Stuw Horsterkamp	3	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	3	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	3
Overlaat De Kip	5	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	3	Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	3	Stuw Horsterkamp	3	Stuw Horsterkamp	3
Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek	3	Gemaal Hackfort - vopo pomp	5	Overlaat De Kip	5	Gemaal Hackfort - vopo pomp	5	Gemaal Hackfort - vopo pomp	5
Stuw Bruinderinkweg	3	Overlaat De Kip	5	Gemaal Hackfort - vopo pomp	5	Overlaat De Kip	5	Overlaat De Kip	5
Gemaal Hackfort - vopo pomp	5	Stuw Bruinderinkweg	3	Stuw Bruinderinkweg	3	Stuw Bruinderinkweg	3	Stuw Bruinderinkweg	3

Droogval

Uit het droogtemodel is bij 4 van de 15 watergangmeetstations daadwerkelijk droogval opgetreden in de periode tot 2100.

Tabel 25 - Aantal dagen droogval t.o.v. aantal dagen zonder klimaatscenario

Aantal dagen droogval t.o.v. aantal dagen zonder klimaatscenario [%]									
GL		GH		WL		WH		Gemiddelde	
133	Gemaal Hackfort - vopo pomp	147	Gemaal Hackfort - vopo pomp	136	Gemaal t' Klooster	228	Gemaal Hackfort - vopo pomp	156	Gemaal Hackfort - vopo pomp
125	Gemaal t' Klooster	130	Gemaal t' Klooster	118	Stuw Horsterkamp	162	Stuw Wientjesvoort	136	Stuw Wientjesvoort
112	Stuw Horsterkamp	122	Stuw Wientjesvoort	115	Gemaal Hackfort - vopo pomp	152	Gemaal t' Klooster	127	Gemaal t' Klooster
112	Stuw Wientjesvoort	118	Stuw Horsterkamp	111	Stuw Wientjesvoort	133	Stuw Horsterkamp	120	Stuw Horsterkamp

Bijlage XI: Resultaten droogtemodel – dagen

In Tabel 26 staan de resultaten van het droogtemodel weergegeven met als eenheid dagen. Hierbij zijn voor “Gemaal Hackfort – niveau Baaksebeek”, “Gemaal Hackfort – vopo pomp Heegenhoek” en “Stuw Bruinderinkweg” de dagen afkomstig van de modellen met percolatie toegevoegd. De resultaten van deze peilbuizen zonder percolatie staan in Tabel 27 weergegeven, maar zijn dus niet in het onderzoek gebruikt en worden hier alleen weergegeven ter vergelijking.

Tabel 26 - Resultaten droogtemodel - dagen (incl. percolatie)

Klimaatsscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek									
Onaangepast	39	53	46	0	0	0	0	0	0
GL	61	72	67	4	0	2	0	0	0
GH	66	74	70	5	5	5	0	0	0
WL	48	58	53	0	0	0	0	0	0
WH	82	118	100	5	9	7	0	0	0
			72			4			0
Gemaal Hackfort - vopo pomp Heegenhoek									
Onaangepast	3110	3614	3362	4592	5384	4988	42	70	56
GL	3065	3509	3287	4435	5126	4781	58	89	74
GH	3226	3718	3472	4691	5379	5035	65	97	81
WL	3046	3625	3336	4397	5193	4795	47	82	65
WH	3312	4102	3707	4808	5589	5199	84	179	132
			3450			4952			88
Stuw Bruinderinkweg									
Onaangepast	378	413	396	421	451	436	0	0	0
GL	366	384	375	405	414	410	0	0	0
GH	359	365	362	393	392	393	0	0	0
WL	338	343	341	365	371	368	0	0	0
WH	321	299	310	349	341	345	0	0	0
			347			379			0
Gemaal t' Klooster									
Onaangepast	1107	605	856	980	522	751	76	80	78
GL	1263	682	973	1053	579	816	83	112	98
GH	1324	726	1025	1134	639	887	88	115	102
WL	1316	723	1020	1069	638	854	94	118	106
WH	1513	897	1205	1294	744	1019	116	121	119
			1056			894			106
Stuw Horsterkamp									
Onaangepast	1380	417	899	1276	381	829	250	86	168
GL	1395	434	915	1289	405	847	284	95	190
GH	1482	488	985	1373	447	910	306	97	202
WL	1413	478	946	1305	440	873	279	95	187
WH	1589	562	1076	1514	515	1015	362	105	234
			980			911			203

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Stuw Kruisbergseweg									
Onaangepast	9	0	5	10	0	5	0	0	0
GL	39	0	20	43	0	22	0	0	0
GH	39	0	20	44	0	22	0	0	0
WL	43	0	22	47	0	24	0	0	0
WH	53	0	27	60	0	30	0	0	0
			22			24			0
Stuw Wientjesvoort									
Onaangepast	958	513	736	826	422	624	251	149	200
GL	1027	557	792	901	499	700	294	159	227
GH	1086	626	856	969	555	762	343	159	251
WL	1046	610	828	907	547	727	316	163	240
WH	1189	717	953	1070	642	856	434	225	330
			857			761			262
Gemaal Methen									
Onaangepast	138	64	101				0	0	0
GL	182	106	144				0	0	0
GH	188	125	157				0	0	0
WL	190	128	159				0	0	0
WH	236	188	212				0	0	0
			168						0
Gemaal Wip-inn									
Onaangepast	207	111	159				0	0	0
GL	282	149	216				0	0	0
GH	298	173	236				0	0	0
WL	307	181	244				0	0	0
WH	345	258	302				0	0	0
			249						0
Gemaal Zumpe									
Onaangepast	152	73	113				0	0	0
GL	197	90	144				0	0	0
GH	202	99	151				0	0	0
WL	208	98	153				0	0	0
WH	241	190	216				0	0	0
			166						0
Overlaat De Kip									
Onaangepast	5273	5810	5542				0	0	0
GL	5285	5812	5549				0	0	0
GH	5315	5905	5610				0	0	0
WL	5319	5887	5603				0	0	0
WH	5389	5983	5686				0	0	0
			5612						0

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Stuw Bouwhuisbrug									
Onaangepast	182	32	107				0	0	0
GL	247	45	146				0	0	0
GH	251	67	159				0	0	0
WL	254	70	162				0	0	0
WH	273	150	212				0	0	0
			170						0
Stuw Kunnerij Bokkers									
Onaangepast	20	29	25				0	0	0
GL	28	37	33				0	0	0
GH	26	42	34				0	0	0
WL	28	41	35				0	0	0
WH	32	66	49				0	0	0
			38						0
Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek									
Onaangepast	2311	1438	1875				0	0	0
GL	2334	1425	1880				0	0	0
GH	2524	1607	2066				0	0	0
WL	2324	1521	1923				0	0	0
WH	2624	1991	2308				0	0	0
			2044						0
Zeggelinkhagbrug									
Onaangepast	0	24	12				0	0	0
GL	4	47	26				0	0	0
GH	3	62	33				0	0	0
WL	8	76	42				0	0	0
WH	10	93	52				0	0	0
			38						0

Tabel 27 - Resultaten droogtemodel - dagen (peilbuizen zonder percolatie)

Klimaatsscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek									
Onaangepast	264	146	205	95	111	103	0	0	0
GL	305	156	231	123	112	118	0	0	0
GH	353	168	261	137	116	127	0	0	0
WL	305	164	235	117	116	117	0	0	0
WH	445	198	322	179	123	151	0	0	0
			262			128			0
Gemaal Hackfort - vopo pomp Heegenhoek									
Onaangepast	3960	3279	3620	5431	4936	5184	132	128	130
GL	4062	3453	3758	5460	5014	5237	228	154	191
GH	4085	3678	3882	5429	5158	5294	244	171	208
WL	4121	3647	3884	5449	5168	5309	267	178	223
WH	4222	3970	4096	5418	5295	5357	379	230	305
			3905			5299			231
Stuw Bruinderinkweg									
Onaangepast	526	178	352	580	182	381	0	0	0
GL	522	175	349	591	179	385	0	0	0
GH	620	173	397	707	175	441	0	0	0
WL	337	343	340	365	370	368	0	0	0
WH	669	165	417	730	168	449	0	0	0
			376			411			0

Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages

In Tabel 28 staan de resultaten van het droogtemodel weergegeven met als eenheid verandering ten opzichte van geen klimaatverandering (percentage). Hierbij is voor “Gemaal Hackfort – niveau Baaksebeek”, “Gemaal Hackfort – vopo pomp Heegenhoek” en “Stuw Bruinderinkweg” de percolatie toegevoegd. De resultaten van deze peilbuisen zonder percolatie staan in Tabel 29 weergegeven, maar zijn dus niet in het onderzoek gebruikt en worden hier alleen weergegeven ter vergelijking.

Bij de geelgekleurde cellen is geen percentage weergegeven maar het aantal dagen. Dit omdat het onaangepaste scenario uit 0 droge dagen bestaat, en hiervan geen procentuele afwijking kan worden berekend.

Voor de witte cellen is de procentuele afwijking berekend door:

$$\text{procentuele afwijking} = \frac{\text{aantal dagen klimaatscenario} * 100\%}{\text{aantal dagen onaangepast scenario}}$$

Hierbij zijn het aantal dagen in het onaangepaste scenario dus beschouwd als 100%.

Tabel 28 - Resultaten droogtemodel - percentages (incl. percolatie)

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10% t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar droogval t.o.v. Onaangepast [%]		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek									
Onaangepast	100	100	100	0	0	0	0	0	0
GL	156	136	146	4	0	2	0	0	0
GH	169	140	154	5	5	5	0	0	0
WL	123	109	116	0	0	0	0	0	0
WH	210	223	216	5	9	7	0	0	0
			158			4			0
Gemaal Hackfort - vopo pomp Heegenhoek									
GL	99	97	98	97	95	96	138	127	133
GH	104	103	103	102	100	101	155	139	147
WL	98	100	99	96	96	96	112	117	115
WH	106	114	110	105	104	104	200	256	228
			103			99			155
Stuw Bruinderinkweg									
GL	97	93	95	96	92	94	0	0	0
GH	95	88	92	93	87	90	0	0	0
WL	89	83	86	87	82	84	0	0	0
WH	85	72	79	83	76	79	0	0	0
			88			87			0
Gemaal t' Klooster									
GL	114	113	113	107	111	109	109	140	125
GH	120	120	120	116	122	119	116	144	130
WL	119	120	119	109	122	116	124	148	136
WH	137	148	142	132	143	137	153	151	152
			124			120			135

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10% t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar droogval t.o.v. Onaangepast [%]		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Stuw Horsterkamp									
GL	101	104	103	101	106	104	114	110	112
GH	107	117	112	108	117	112	122	113	118
WL	102	115	109	102	115	109	112	110	111
WH	115	135	125	119	135	127	145	122	133
			112			113			119
Stuw Kruisbergseweg									
GL	433	0	217	430	0	215	0	0	0
GH	433	0	217	440	0	220	0	0	0
WL	478	0	239	470	0	235	0	0	0
WH	589	0	294	600	0	300	0	0	0
			242			243			0
Stuw Wientjesvoort									
GL	107	109	108	109	118	114	117	107	112
GH	113	122	118	117	132	124	137	107	122
WL	109	119	114	110	130	120	126	109	118
WH	124	140	132	130	152	141	173	151	162
			118			125			128
Gemaal Methen									
GL	132	166	149				0	0	0
GH	136	195	166				0	0	0
WL	138	200	169				0	0	0
WH	171	294	232				0	0	0
			179						0
Gemaal Wip-inn									
GL	136	134	135				0	0	0
GH	144	156	150				0	0	0
WL	148	163	156				0	0	0
WH	167	232	200				0	0	0
			160						0
Gemaal Zumpe									
GL	130	123	126				0	0	0
GH	133	136	134				0	0	0
WL	137	134	136				0	0	0
WH	159	260	209				0	0	0
			151						0
Overlaat De Kip									
GL	100	100	100				0	0	0
GH	101	102	101				0	0	0
WL	101	101	101				0	0	0
WH	102	103	103				0	0	0
			101						0

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10% t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum t.o.v. Onaangepast [%]			Aantal dagen per jaar droogval t.o.v. Onaangepast [%]		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Stuw Bouwhuisbrug									
GL	136	141	138				0	0	0
GH	138	209	174				0	0	0
WL	140	219	179				0	0	0
WH	150	469	309				0	0	0
			200						0
Stuw Kunnerij Bokkers									
GL	140	128	134				0	0	0
GH	130	145	137				0	0	0
WL	140	141	141				0	0	0
WH	160	228	194				0	0	0
			151						0
Verdeelwerk Hackfort Baaksebeek									
GL	101	99	100				0	0	0
GH	109	112	110				0	0	0
WL	101	106	103				0	0	0
WH	114	138	126				0	0	0
			110						0
Zeggelinkhagbrug									
Onaangepast	0	24	12						
GL	4	47	26				0	0	0
GH	3	62	33				0	0	0
WL	8	76	42				0	0	0
WH	10	93	52				0	0	0
			38						0

Tabel 29 - Resultaten droogtemodel - percentage (peilbuizen zonder percolatie)

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Gemaal Hackfort - niveau Baaksebeek									
GL	116	107	111	129	101	115	0	0	0
GH	134	115	124	144	105	124	0	0	0
WL	116	112	114	123	105	114	0	0	0
WH	169	136	152	188	111	150	0	0	0
			125			126			0
Gemaal Hackfort - vopo pomp Heegenhoek									
GL	103	105	104	101	102	101	173	120	147
GH	103	112	108	100	104	102	185	134	159
WL	104	111	108	100	105	103	202	139	171
WH	107	121	114	100	107	104	287	180	233
			108			102			177

Klimaatscenario	Aantal dagen per jaar in laagste 10%			Aantal dagen per jaar gelijk aan of onder meetminimum			Aantal dagen per jaar droogval		
	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde	2036-2065	2066-2100	Gemiddelde
Stuw Bruinderinkweg									
GL	99	98	99	102	98	100	0	0	0
GH	118	97	108	122	96	109	0	0	0
WL	64	193	128	63	203	133	0	0	0
WH	127	93	110	126	92	109	0	0	0
			111			113			0

Bijlage XIII: Resultaten droogtemodel – percentage histogrammen

Voor de tabellen uit Bijlage XII: Resultaten droogtemodel – percentages is voor droogteindicator 'laagste 10%' per meetstation een histogram gemaakt welke hieronder staan weergegeven. De blauwe lijn is voor de periode 2036 – 2065 en de groene lijn voor de periode 2066 – 2100. Zoals te zien is er gemiddeld meer droogte in de tweede periode. De staven van het onaangepaste scenario zitten voor beide periodes op 100 %.





