



Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland

Rapportage Fase 1: ontwikkeling van uniforme werkwijze voor analyse van droogte en tussentijdse bevindingen



Projectteam consortium

Gé van den Eertwegh, Ruud Bartholomeus, Perry de Louw, Flip Witte, Jos van Dam, Dion van Deijl, Peter Hoefsloot, Sharon Clevers, Dimmie Hendriks, Marjolein van Huijgevoort, Joachim Hunink, Niels Mulder, Janneke Pouwels en Janine de Wit

DEFINITIEF - versie 19 september 2019

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
<i>De droogte van 2018</i>	4
<i>Herstel van de droogte</i>	5
<i>Handelingsperspectief</i>	5
<i>Vervolg</i>	6
1. Inleiding	7
1.1. <i>Aanleiding</i>	7
1.2. <i>Probleemstelling, vragen en doelstelling</i>	8
1.3. <i>Fasering project</i>	10
1.4. <i>Afbakening activiteiten</i>	10
1.5. <i>Leeswijzer</i>	10
2. Projectgebied en methodiek	12
3. Droogte 2018 – informatie en eerste analyse	15
3.1. <i>Opzet van hoofdstuk</i>	15
3.2. <i>Meteorologie - neerslag en verdamping</i>	15
3.3. <i>Bodemvocht</i>	17
3.4. <i>Grondwaterstanden</i>	19
3.5. <i>Afvoer oppervlaktewater</i>	21
3.6. <i>Berekende onttrekkingen</i>	23
3.7. <i>Droogte-effecten landbouw en natuur zichtbaar via remote sensing</i>	25
3.8. <i>Integratie van gegevens in focus-stroomgebied</i>	31
3.9. <i>Natuurlijke vegetatie – LMF waarnemingen</i>	37
4. Herstel van droogte	42
4.1. <i>Neerslag en verdamping</i>	42
4.2. <i>Grondwaterstanden</i>	43
4.3. <i>Afvoeren oppervlaktewater</i>	44
4.4. <i>Modelberekeningen – actueel en prognoses 2019</i>	45
5. Omgang met droogte 2018	49
5.1. <i>Evaluatierapporten droogte en handeling 2018</i>	49
5.2. <i>Verkennde berekeningen 2018: gevoeligheidsanalyse</i>	50
6. Tussentijdse conclusies en aanbevelingen	60
6.1. <i>Analyse droogte 2018</i>	60
6.2. <i>Handeling vóór, tijdens en na droogte</i>	62
6.3. <i>Monitoring en modellering</i>	64
6.4. <i>Integraal droogteportaal</i>	65

6.5.	<i>Fase 2 en 3</i>	65
7.	Referenties	67
8.	Bijlagen	69
8.1.	<i>Organisatie</i>	69
8.2.	<i>Methodiek</i>	70
8.2.1.	Aangeleverde data	70
8.2.2.	Droogte-indices	72
8.2.3.	LHM	74
8.2.4.	SWAP	74
8.2.5.	Analyse Landelijk Meetnet Flora (LMF)	75
8.2.6.	Programma LMF_TREND	78
8.2.7.	Gebruik van Sentinel-2 remote sensing data	80
8.3.	<i>LHM-modelscenario's</i>	83
8.4.	<i>Overige aanvullende figuren</i>	93
8.5.	<i>Visualisatie-tool</i>	94

Samenvatting

De zomer van 2018 was bijzonder droog. Op de hogere zandgronden van Nederland ontstonden er daardoor problemen met de watervoorziening voor landbouw en natuur. Dit rapport beschrijft de resultaten van Fase 1 (van 3) van een project naar de gevolgen van droogte voor de hogere zandgronden van Nederland. In deze fase is een uniforme werkwijze voor de analyse van droogte ontwikkeld. Er is onderzocht hoe de droogte zich in 2018 op de zandgronden heeft gemanifesteerd. Tevens is een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden om droogte te monitoren, en zijn kort handelingsperspectieven beschreven, waarmee droogteschade aan landbouw en natuur kan worden beperkt.

Droogte manifesteert zich in verschillende compartimenten van de waterkringloop. Het begint met de meteorologische droogte, die ontstaat door weinig regenval in combinatie met een hoge atmosferische vraag naar water (potentiele verdamping). Daarna volgt de hydrologische droogte: door het neerslagtekort droogt de bodem uit, de bovenste laag van het aardoppervlak waarin planten wortelen. Vervolgens daalt de stand van het grondwater, en daarmee ten slotte de voeding van beken, sloten en andere waterlopen. In deze reeks van drie geschakelde compartimenten (bodemwater, grondwater, oppervlaktewater) duurt het steeds langer voordat de meteorologische droogte zich heeft voortgeplant in een hydrologische droogte. En in deze volgorde duurt het ook steeds langer voordat een compartiment is hersteld van een droge periode. De studie maakt in Fase 1 een start met het aantonen van de effecten van droogte op landbouw en natuur. Daarbij worden veldmetingen, waterbalansen van stroomgebieden, observaties vanuit de lucht via remote sensing, en hydrologische modelsimulaties integraal gebruikt: alle mogelijke bronnen van informatie worden in de studie benut om de droogte en de effecten ervan in beeld te brengen.

De droogte van 2018

Meteorologisch kan een droge periode worden gekarakteriseerd aan de hand van het neerslagtekort. Dat is het cumulatieve verschil, gemeten vanaf het begin van het groeiseizoen (1 april), tussen neerslag en de hypothetische verdamping van een korte en gesloten grasmat die van voldoende water wordt voorzien (referentiegewas-verdamping). Het tekort liep op tot bijna 300 mm (waar 100 mm de mediane waarde is voor Nederland) en vooral Twente, de Achterhoek, Limburg en grote delen van Noord-Brabant werden zwaar getroffen. Dit leidde tot uitputting van de voorraad bodemvocht, vooral in de Achterhoek en Twente, maar ook in grote delen van de rest van het zandgebied. Uiteindelijk was er onvoldoende bodemvocht om optimaal te verdampen: er ontstonden vochttekorten voor de vegetatie.

De hydrologische droogte werd verergerd doordat er in ieder waterschap meer dan ooit grondwater werd opgepompt voor beregening. Naar schatting bedroeg de totale onttrekking op de zandgronden ongeveer tweemaal zo veel als normaal. Voor een groot deel van het studiegebied (met name midden en noord) ontbreken echter gegevens over onttrekkingen uit het grondwater. Uit de beschikbare gegevens van het Waterschap Limburg en Brabantse waterschappen blijkt dat de berekende beregening uit het grondwater (met LHM) voor 2018 wordt overschat, met uitzondering van het beheergebied van Waterschap Aa en Maas. Gezien het feit dat beregening uit grondwater een belangrijk effect heeft op het watersysteem (grondwaterstanden, afvoer, kwel), is het van belang dat voor het gehele studiegebied registraties worden bijgehouden. Niettemin kunnen we op basis van de beschikbare gegevens stellen dat in de vier zomermaanden juni t/m september 2018 voor beregening door de landbouw ongeveer dezelfde hoeveelheid grondwater werd onttrokken als voor de drinkwatervoorziening. In de Provincie Noord-Brabant, waar relatief betrouwbare cijfers beschikbaar zijn over onttrekkingen uit het grondwater, werd in deze zomermaanden zelfs anderhalf keer meer grondwater voor beregening onttrokken dan voor de productie van drinkwater.

Over onttrekkingshoeveelheden uit het oppervlaktewater zijn geen gegevens bekend. De modelberekeningen laten zien dat er voor beregening uit oppervlaktewater bijna driemaal zoveel water werd onttrokken dan normaal. Maar hierbij zijn niet de beregeningsverboden uit open water die door de waterschappen werd uitgevaardigd meegenomen. Drie van de acht waterschappen kondigden ook een verbod op onttrekking van grondwater af. Ook werd er door de drinkwaterbedrijven meer grondwater uit diepe watervoerende pakketten gepompt om te voorzien in de gestegen vraag naar leidingwater. De voorlopige schatting is dat het gaat om een toename van ongeveer 30% voor de zomermaanden juni, juli, augustus en september.

Met modelsimulaties en waarnemingen toont het onderzoek aan dat de grondwaterstand in het begin van het groeiseizoen van 2018 vrijwel overal op normaal niveau lag, maar dat die gedurende de zomer extreem ver wegzakte (beneden het 5% percentiel; 2-5 dm lager, in stuwallen nog meer). Ook de gemeten afvoeren van

oppervlaktewater uit stroomgebieden waren uitzonderlijk laag, in veel watergangen was er sprake van droogval.

Directe schade door droogte ontstaat er in de landbouw wanneer de verdamping via de huidmondjes (transpiratie) door gebrek aan water wordt onderdrukt. Uit de in deze studie uitgevoerde berekeningen blijkt dat 2018 veruit de grootste reductie in transpiratie kende van de afgelopen 30 jaar: de reductie was drie tot vier keer meer dan gemiddeld. Op remote sensing gebaseerde verdampingsschattingen voor vijf stroomgebieden wijzen op een reductie van de transpiratie van circa 15% (gebied met berekening) tot 30% (zonder berekening).

De gevolgen van de droogte voor de vegetatie waren goed zichtbaar vanuit de lucht. Het onderzoek laat zien welke potentie remote sensing via satelliet en vliegtuig heeft om verdroging van landbouw en natuur in beeld te brengen. Voor een aantal gebieden illustreert het onderzoek hoe de groenheid van landbouwgewassen in 2018 steeds verder achterbleef bij een normaal jaar, welke percelen werden beregend, en hoe vennen in de loop van het jaar droogvielen.

De droogte zal hebben geleid tot verlies aan de biodiversiteit van natuurlijke vegetaties. Omdat plantensoorten na-ijlen op een droge periode, kon die schade nog niet worden gekwantificeerd. Er is binnen het project echter een methode opgezet om 'permanente kwadraten' (pq's) te analyseren, dus tijdreeksen van steekproeven in de vegetatie. Met de methode is de trend van 1999 tot 2017 geanalyseerd in de vegetatie van ruim 7.000 pq's. De komende jaren zullen nieuwe vegetatieopnamen moeten onthullen wat het droge jaar 2018 (en 2019) voor gevolgen heeft gehad.

Herstel van de droogte

Het herstel van de droogte van 2018 is in het onderzoek geanalyseerd aan de hand van metingen tot 1 juli 2019 (de droge periode daarna is dus niet meegenomen in Fase 1) en berekeningen.

De hydrologische droogte werd in de winter niet hersteld zodat het groeiseizoen van 2019 inging met voor die tijd lage grondwaterstanden en afvoeren. In de eerste helft van 2019 viel er weer weinig neerslag, zodat de droogte toenam. Met name in gebieden in Oost-Brabant, Noord-Limburg, Achterhoek en Twente waren de neerslagtekorten hoog. Websites/portals met peilbuisgegevens van diverse organisaties laten zien dat de grondwaterstand op veel plaatsen in de eerste helft van 2019 nog niet was hersteld, daarentegen extreem laag was. Ook gemeten afvoeren, voor zover binnen dit onderzoek beschikbaar, waren extreem laag.

Modelsimulaties in het project geven aan dat de grondwaterstand in Twente, de Achterhoek, het oosten en zuiden van Brabant, de Veluwe en Limburg de zandgebieden op 1 mei 2019 voor die datum uitzonderlijk laag was, terwijl de grondwaterstand in het westen en noorden van Nederland al grotendeels was hersteld. Ten opzichte van 30 augustus 2018 was de grondwaterstandsdroogte op 1 mei 2019 zelfs exceptioneler.

Een groot voordeel van modellen is dat ze kunnen worden gebruikt om te voorspellen wat er kan gaan gebeuren, zodat op basis van de resultaten tijdig maatregelen zijn te nemen. Stel dat Nederland op 1 mei 2019 de weersgesteldheid van het natte jaar 1981 had gehad, dan zou de grondwaterstand in veel van voornoemde gebieden op 1 oktober 2019 nog steeds uitzonderlijk laag zijn geweest, laten de modelsimulaties zien. We kregen echter een droge zomer en nog grotere droogteschade in delen van het zandgebied, zoals de Achterhoek. Dit was in het onderzoek ook geprognostiseerd door het model vanaf 1 mei 2019 te voeden met een droog scenario (weer van 1996).

Handelingsperspectief

Het handelingsperspectief betreft de beschikbare mogelijkheden en te ondernemen acties om in een bepaalde situatie te handelen, bijvoorbeeld tijdens een droogte. In dit onderzoek is geïnventariseerd welke maatregelen waterbeheerders in 2018 hebben genomen om de schadelijke gevolgen van de meteorologische droogte te minimaliseren. De meest voorkomende maatregelen zijn het verbod om oppervlaktewater te onttrekken, het opzetten van stuwpeilen en het communiceren over de droogte. Een eenduidige strategie voor het operationele beheer van het grondwater, lijkt bij de waterbeheerders en provincies te ontbreken. Waterschap De Dommel gebruikte een breed palet aan maatregelen, waaronder een verbod op onttrekking voor berekening uit grondwater. Dat verbod werd ook afgekondigd door Waterschap Vechtstromen, i.c. binnen beschermingszones van grondwaterafhankelijke natuur, en door Waterschap Vallei en Veluwe.

In het onderzoek zijn mogelijke maatregelen ook modelmatig verkend. Het gaat om een soort gevoeligheidsanalyse die laat zien hoe de hydrologische droogte zich in 2018 zou hebben ontwikkeld als op of na 1 januari van dat jaar maatregelen waren genomen. De maatregelen kunnen op de lange termijn sterker doorwerken, maar dat is niet onderzocht. De maatregelen zijn in den extreme doorgevoerd (alle beregening uit, alle stuwpeilen omhoog, etc.) om de respons op en gevoeligheid ervoor van het bodem-water-systeem in beeld te brengen en zijn dus niet-realistisch. Enkele resultaten zijn:

- Reductie van de winning van diep grondwater voor de drinkwatervoorziening zet weinig zoden aan de dijk, wanneer dat alleen in de zomermaanden gebeurt.
- Een totaal verbod op de beregening uit grondwater leidt tot hogere grondwaterstanden en kwelfluxen en een toename van de afvoer uit stroomgebieden met 25-50%. Vooral in het zuiden en oosten van Brabant en in Noord-Limburg zijn de effecten aanzienlijk omdat hier het meeste grondwater wordt onttrokken voor beregening. De droogteschade aan de beregenbare percelen neemt uiteraard toe, maar de percelen zonder beregeningsinstallatie profiteren juist van het verbod: daar gaat de gewasopbrengst omhoog. De keuze voor beregening lijkt hiermee voor de agrariër een *prisoners dilemma*: beregenen kost geld en tijd en verlaagt de grondwaterstand, maar niet beregenen betekent dat je schade lijdt van de burens die wel beregenen.
- Een verbod op beregening uit oppervlaktewater heeft nauwelijks invloed op de grondwaterstand, maar uiteraard wel op de transpiratie (neemt toe, daar was het ook om te doen) en de afvoer van oppervlaktewater (neemt evenredig af).
- Verhogen van de stuwpeilen leidt tot hogere grondwaterstanden en een aanzienlijke toename van de transpiratie (en dus hogere gewasopbrengsten), maar er moet dan water zijn om te stuw, en dat is er niet altijd. Het is van belang al te beginnen met water vasthouden als er nog meer dan voldoende water is, ook om de drainage te reduceren. Het verhogen van de drainagebasis in de haarvaten van de watersystemen met 30 cm lijkt in combinatie met verhogen van stuwpeilen een aanvullende effectieve maatregel.

Vervolg

In het onderzoek zijn uniforme methoden voor het monitoren en analyseren van droogte verkend en ontwikkeld. Gepleit wordt voor een vergaande integratie van metingen, modellen en het operationele beheer: metingen gebruiken om modellen bij te stellen, metingen en modellen samen gebruiken om het waterbeheer te optimaliseren. Om de waterbeheerders van alle informatie te voorzien is een interactieve kaart ontwikkeld waarop verschillende resultaten kunnen worden bekeken. Het is de bedoeling dit medium verder uit te bouwen en continue te verversen met nieuwe meetgegevens en rekenresultaten.

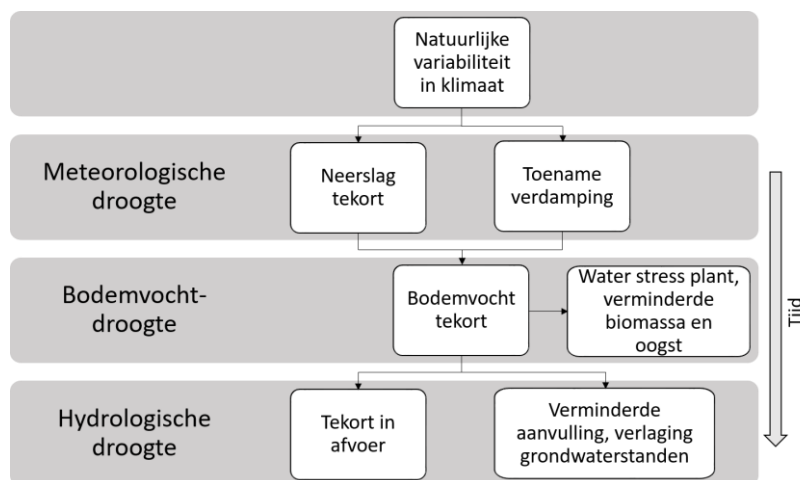
De studie kent nog veel open einden en veel vragen zijn nog niet beantwoord. Het hier gerapporteerde werk betreft dan ook Fase 1 van een langer lopend onderzoek, dat bestaat uit drie fasen. Het is de bedoeling aan het onderzoek een verdiepend en uitbreidend vervolg te geven vanaf de nazomer van 2019 in Fase 2. Hierin gaan we de integrale analyse uit Fase 1 toepassen op meerdere stroomgebieden en meetlocaties, die karakteristiek zijn voor het zandgebied van Nederland. We verwachten hiermee voldoende informatie en argumenten te genereren om eventuele interventies van provincies en waterschappen bij een volgende droogte te ondersteunen.

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

De zomer van 2018 was droog. Het watertekort in Nederland manifesteerde zich op allerlei manieren: van drooggevallen poelen en vennen, tot dode vissen en noodlijdende vlinders bij gebrek aan nectar. Landbouwopstanden waren lager dan gemiddeld en natuurgebieden leden schade. Agrariërs kregen te maken met een beperking of verbod op beregening. Overall werd er meer beregend dan in een 'normaal' jaar, met name met grondwater als bron van zoetwater. Drinkwaterbedrijven moesten meer water winnen dan normaal, omdat de vraag naar drinkwater hoger was dan normaal. De Rijnafvoer liep sterk terug en het zoutgehalte ervan omhoog. Doordat de Maasafvoer door voeding uit Frankrijk en België redelijk op peil bleef, kwam de drinkwatervoorziening van Zuidwest-Nederland niet in gevaar. De waterverdeling via het oppervlaktewater was een vraagstuk, de Landelijke Commissie Waterverdeling (LCW) kwam vaak bij elkaar om de verdringingsreeks toe te passen en beperkingen te stellen aan de winning van grondwater. De waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat hebben ieder vanuit hun taak en rol de voortschrijdende droogte aangepakt en geprobeerd de negatieve gevolgen ervan te beperken.

Droogte is een uitzonderlijk droge periode die zolang duurt, dat er een ernstige hydrologische evenwichtsstoornis ontstaat, met bijvoorbeeld een slechte oogst of verlies van natuurwaarden tot gevolg. Droogte is te onderscheiden in een drietal categorieën, waarin ook een volgorde zit en die in samenhang beschouwd moet worden (Figuur 1).



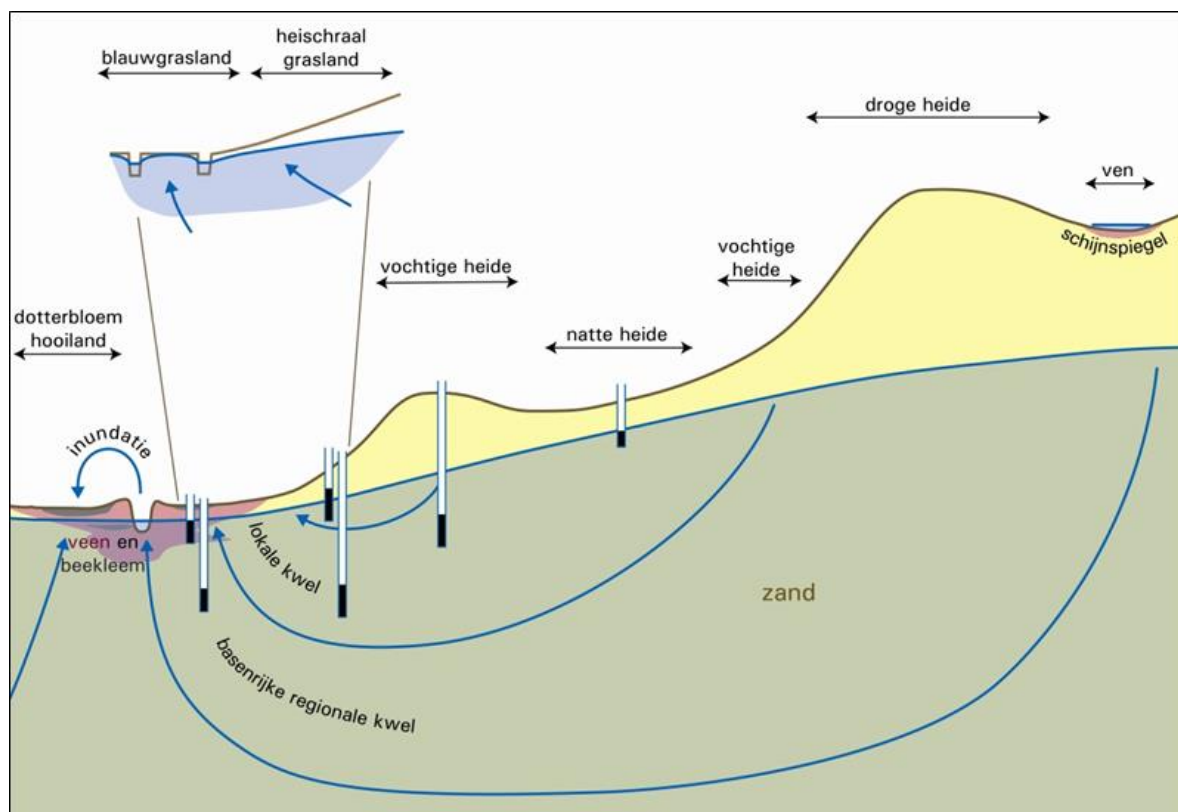
Figuur 1: Schematisch overzicht van de voortplanting van droogte door de verschillende droogtecompartimenten. Figuur ontleend aan Stahl (2001) en Van Loon et al. (2012).

Meteorologische droogte werkt door op het bodemvochttekort in de wortelzone van landbouwgewassen en natuurlijke vegetaties. Op haar beurt werkt dat weer door op hydrologische droogte via grondwater, kwelstromen en afvoer naar het oppervlaktewater. Deze droogtecategorieën staan ook model voor compartimenten in een bodem-water-systeem, waarbij het ene compartiment sneller en heftiger (wortelzone) reageert op meteorologische droogte en het ander langzamer en meer gedempt (grondwater).

De diverse landschapscompartimenten staan qua water in verbinding met elkaar. Figuur 2 illustreert een dwarsdoorsnede van een natuurgebied in een beekdal. Binnen een gebied kan de droogte zich in ruimte en tijd voortplanten over de verschillende compartimenten.

Om de gevolgen van de droogte van 2018 voor de zandgebieden Zuid-, Midden- en Oost-Nederland in beeld te brengen, evenals mogelijke monitoringsstrategieën en handelingsperspectieven, is een onderzoeksproject gestart. Dit rapport geeft de resultaten van de eerste fase van dit project, waarin de volgende provincies participeren: Limburg, Noord-Brabant, Utrecht, Gelderland, Overijssel en Drenthe. Zij betrekken ieder op hun beurt de inliggende waterschappen bij het project voor deelname, draagvlak, gegevens en informatie. Aangehaakt zijn de waterschappen Limburg, Aa en Maas, De Dommel, Brabantse Delta, Vallei en Veluwe, Rijn en IJssel, Vechtstromen en Drents Overijsselse Delta. Op nationaal niveau doen mee Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten. Vanuit het Rijk zijn het de ministeries van I&W en LNV die deelnemen aan dit project

(Bijlage 8.1). Ook zijn de drinkwaterbedrijven, waaronder Vitens en Brabant Water, en de land- en tuinbouworganisaties ZLTO, LTO-Noord en LLTB betrokken.



Figuur 2: Voorbeeld van een dwarsdoorsnede van een beekdalgebied met natuurterreinen (Witte et al., 2007a). De doorwerking van meteorologische droogte naar grondwater- en afvoerdroogte hangt af van diverse factoren. Te noemen zijn onder andere de ligging binnen het bodem-grondwater-systeem, de dikte van de onverzadigde zone, de interactie tussen infiltratie- en kwelgebieden en activiteiten zoals grondwateronttrekkingen.

1.2. Probleemstelling, vragen en doelstelling

Zuid-, Midden- en Oost-Nederland hebben in 2018 veel last gehad van het neerslagtekort. Dat tekort zorgde voor een gebrek aan bodemvocht, dalende grondwaterstanden en lage afvoeren tot zelfs het droogvallen van waterlopen. De manier waarop er door Rijk, provincies en waterschappen omgegaan is met de weersomstandigheden vóór, tijdens en na de droogte, is mede bepalend geweest voor de overlast die de droogte veroorzaakte. Het is echter niet helemaal duidelijk welke maatregelen zijn genomen, laat staan wat de effecten daarvan zijn geweest. Handelingen hadden misschien eerder of anders gemoeten om een betere bestrijding van de droogte te bewerkstelligen. Daarnaast speelt het bestaande ontwerp van het watersysteem een rol (ontwateringsbasis, slootdiepte, ruimtelijke configuratie, e.d.). Het 'standaard' operationeel beheer van het oppervlaktewater, vooral gericht op het afvoeren van water, heeft de gevolgen van de meteorologische droogte versterkt. Dat het grondwater niet operationeel beheerd wordt, is een omissie. Het gebrek aan actuele informatie over de toestand van het bodem-water-systeem bemoeilijkt het gericht bestrijden van droogte. Deze zaken waren en zijn aanleiding voor Rijk, provincies, waterschappen en terreinbeheerders in de hogere zandgronden van Nederland om het project te starten.

De provincies vragen zich samen met de andere betrokkenen het volgende af:

Vaststellen droogte:

- Wat was/is de precieze toestand qua droogte (meteorologisch, bodem, grondwater, oppervlaktewater, rivieren) in de zandgebieden in het groeiseizoen van 2018?
- Welke informatie hebben we nodig om deze toestand vast te stellen? Is deze informatie in voldoende mate aanwezig?

Monitoren droogte:

- Welke rol kan remote sensing (RS) spelen in het vaststellen van de droogte?
- Welke waarnemingen aan de grond en het oppervlaktewater zijn nodig om het herstel van hydrologische droogte vast te stellen?
- Welke waarnemingen in de bodem zijn nodig om de uitdroging van de wortelzone van landbouwgewassen en natuur vast te stellen?

Maatregelen, handeling, beheer:

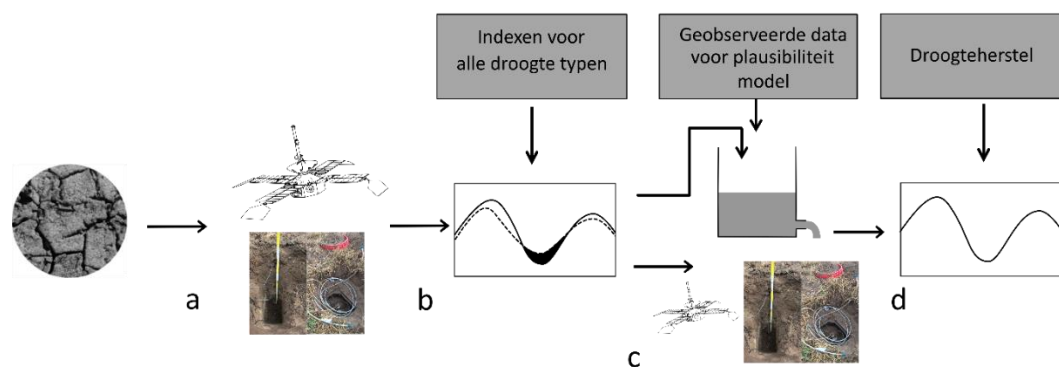
- Wat is het handelingsperspectief van waterbeherend Nederland bij het voorkomen van hydrologische droogte? Het handelingsperspectief betreft de beschikbare mogelijkheden en te ondernemen acties om in een bepaalde situatie te handelen, bijvoorbeeld tijdens een droogte.
- Kunnen waterschappen droogte voorkomen door tijdig water vast te houden in het openwatersysteem?
- Kunnen waterschappen, industrie en drinkwaterbedrijven de hydrologische droogte bestrijden door te sturen op de onttrekking van grondwater?
- Is er voldoende zicht op de toestand en het beheer van het grondwatersysteem?

Onderzoek:

- Welke onderzoeksvragen zijn er ten aanzien van droogte en schade aan gewassen en natuurlijke vegetaties, mede in het licht van klimaatveranderingen en de steeds schaarser wordende beschikbaarheid van zoetwater?

De doelstelling van het gehele project is dan ook om:

- Vast te stellen (op basis van waarnemingen, metingen en berekeningen) wat de toestand van de landbouwgronden en natuurterreinen was tijdens de droge zomer van 2018;
- Vast te stellen hoe de schade was in landbouw- en natuurgebieden;
- Te beoordelen welk deel van de schade herstelbaar is en welk deel niet;
- Grootschalige maatregelen uit 2018 (Regionaal Droogte Overleg RDO) te beoordelen op effecten;
- Vast te stellen in welke mate de watertekorten in bodem, grondwater en oppervlaktewater zich na de zomer van 2018 herstellen, met het oog op maatregelen in het voorjaar en de zomer van 2019 en 2020.



Figuur 3: Schematisch overzicht van de onderdelen a) Verzamelen meetgegevens droogte 2018 (waarnemingen en metingen o.a. remote sensing), b) Droogte-analyse, c) Modelleren droogte 2018 en herstel (LHM/NHI en SWAP) en monitoren, d) Vooruitblik op herstel droogte in 2019/2020.

We willen inzicht krijgen in zowel de huidige situatie en het verloop van de droogte van 2018, als het verwachte herstel van deze droogte in 2019, dan wel propagatie van de droogte in 2019. Om hieraan te voldoen wordt het project gesplitst in drie onderdelen: 1) beschrijving huidige situatie en het verloop van de droogte in 201; 2) voorspelling van het herstel van de droogte van 2018 en 3) monitoring van het herstel via

berekeningen en metingen (Figuur 3). Op basis van deze bevindingen stellen we maatregelen voor ter preventie, adaptatie en mitigatie van effecten, dus voor het handelingsperspectief van de waterbeheerders.

1.3. Fasering project

We voeren het project voor de hogere zandgronden van Nederland in drie fases uit, mede op verzoek van de opdrachtgevers. Dat doen we om flexibel te zijn qua invulling en de gewenste resultaten tussentijds aan te kunnen passen. De oorspronkelijke fasering bij de start van het project was:

1. Handelingsperspectief 2019 voorbereiden (februari - april 2019)
2. Actuele situatie en monitoring (april – september 2019)
3. Analyse en evaluatie handelingsperspectief (september 2019 – april 2020)

De fasering, invulling en de planning van het project zijn in de loop van Fase 1 aangepast tijdens overleggen met het projectteam. De eerste fase veranderde door de verlate start van het project van handelingsperspectief (2019) naar het opzetten en deels uitvoeren van een uniforme analysemethodiek omdat in maart 2019 al beslissingen werden voorbereid t.a.v. de handelingen rond 1 april 2019 (bijv. verbod op beregening uit openwater). De planning veranderde hiermee ook en Fase 1 liep daarmee door tot en met augustus 2019. Tussentijdse resultaten van Fase 1 leidden tot eerste bevindingen (in dit rapport), die in Fase 2 en 3 eventueel aangepast en verder aangescherpt zullen gaan worden via nader onderzoek, monitoring en onderbouwing van handelingen. Activiteiten gericht op het handelingsperspectief (2020) zijn daarmee verschoven naar Fase 2 en 3.

Fase 1 houdt aldus het volgende in:

- a) Uniforme, integrale analysemethodiek opzetten voor het oostelijk, centraal en zuidelijk zandgebied van Nederland;
- b) De methodiek testen op een aantal stroomgebieden en meetlocaties;
- c) De droogte van 2018 beschrijven in meteorologisch opzicht en in de compartimenten van het bodem-water-systeem (wortelzone, grondwater, oppervlaktewater);
- d) Uitvoeren van grootschalige berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), waarbij ingrepen in de waterhuishouding worden doorgerekend, zoals het uitzetten van onttrekkingen en verhogen van stuwpeilen;
- e) Verzamelen van gegevens voor Fase 1 en 2, teneinde verdere analyses te kunnen uitvoeren.

We zullen met dit project bouwstenen en argumenten aandragen voor een effectieve omgang met droge weersomstandigheden. Dat betekent dat we onderzoeken wat inrichtings- en beheersmaatregelen voor gevolgen kunnen hebben voor het bodem-water-systeem, de landbouw en de natuur. Maatregelen vóór, tijdens en na een eventuele droogte. Effecten proberen we zoveel mogelijk kwantitatief te onderbouwen. Hierbij houden we rekening met verschillende gebieden en hun karakteristieken binnen het zandgebied van Nederland. We gaan echter geen concrete maatregelen ontwerpen voor specifieke gebieden.

1.4. Afbakening activiteiten

We beschouwen de droogte in de hogere zandgronden, waarbij we ingaan op de beschikbaarheid van water en de gevolgen van de droogte voor landbouw en terrestrische vegetaties. De aquatische natuur en de chemische en biologische kwaliteit van grond- en oppervlaktewater laten we buiten beschouwing, evenals de gevolgen voor de fauna (die gevolgen worden onderzocht door o.a. RAVON, de Vlinderstichting, en de WUR-Aquatische Ecologie). We gaan in Fase 2 en 3 resultaten van deze andere projecten meenemen.

1.5. Leeswijzer

De afbakening van het projectgebied, de gebruikte gegevens en toegepaste methodes worden beschreven in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 ligt de nadruk op het duiden van de droogte van 2018 via een eerste analyse, op basis van verschillende gegevensbronnen. Het herstel van de droogte in 2019 wordt in zoverre beschreven in Hoofdstuk 4, dat we een eerste beeld schetsen via meteorologie, gemeten grondwaterstanden en beekafvoeren. In Fase 2 gaan we nader op het herstel in. Hoofdstuk 5 gaat in op mogelijkheden tot handeling

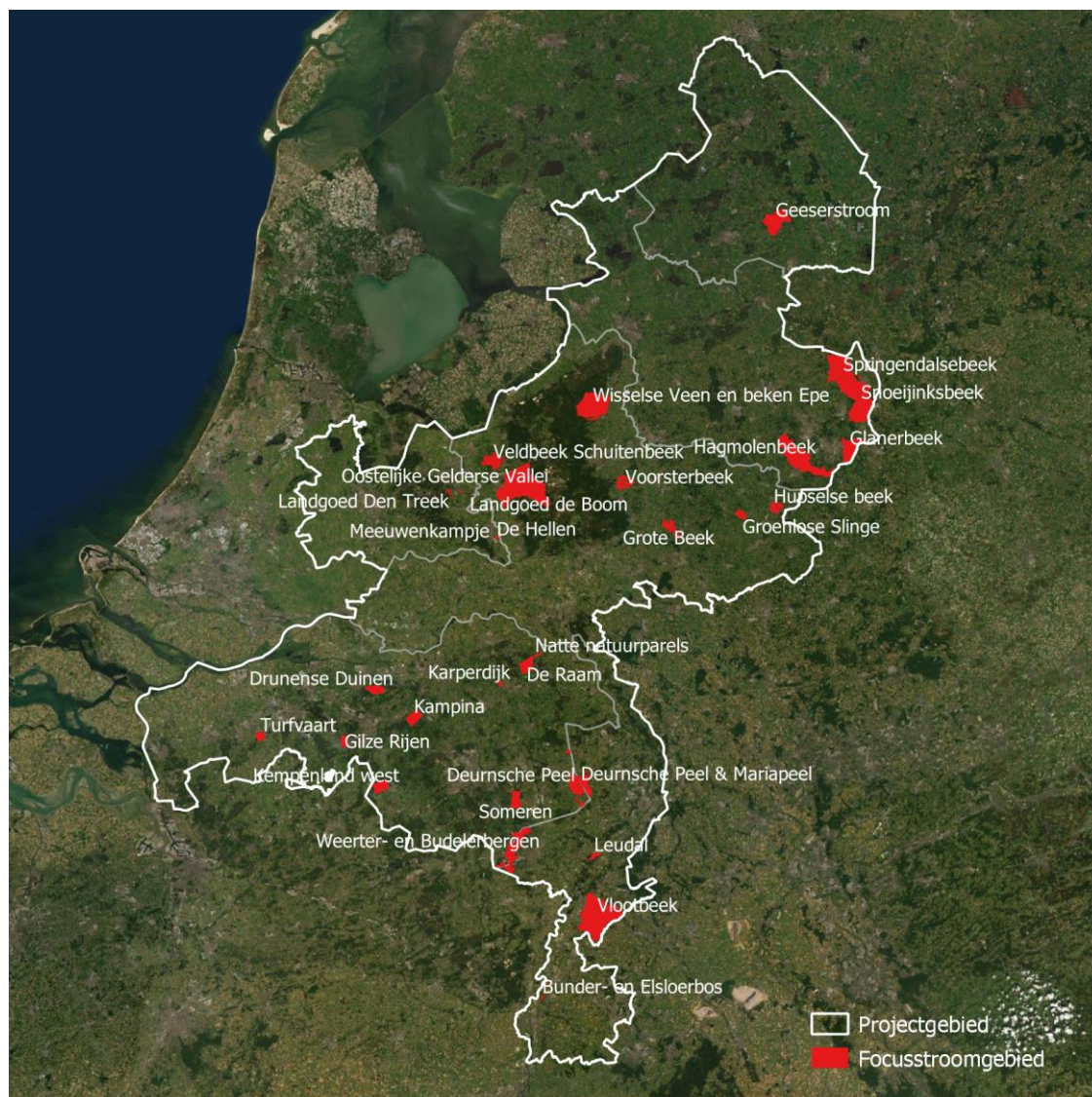
bij droogte en de monitoring die daarbij hoort. Hoofdstuk 6 sluit af met tussentijdse conclusies en aanbevelingen.

Droogteschade aan natuurlijke vegetaties kunnen we bij gebrek aan gegevens van 2018 en 2019 pas in Fase 2 oppakken, evenals het beoordelen van de effecten van getroffen maatregelen die onder andere in het kader van het regionaal Droogteoverleg (RDO) zijn genomen. In deze eerste fase van het project is het werk gestart, zijn gegevens verzameld (doorzetten in Fase 2), is de methode opgezet en zijn eerste analyses gedaan. Daarmee is de analyse niet af en niet compleet. Deze tussenrapportage bevat daarom diverse open einden. We hebben echter in deze tussenrapportage zoveel mogelijk al wel de richting voor nadere analyse geschetst. Fase 2 zal de diepgang in analyse en duiding van droogte en de effecten ervan op het bodem-water-systeem en de landbouw en natuur gaan opleveren.

In Fase 2 gaan we door met de analyses, die meer verdiepend van aard zullen zijn. Ook zetten we een aanvullende droogtemonitoring op voor bodemvocht en beekafvoeren. We pakken in Fase 1 alvast een aantal focusstroomgebieden op en bepalen in Fase 2 in overleg met betrokkenen welke stroomgebieden we definitief aanpakken (NB: gegevensbeschikbaarheid belangrijk). Van Fase 2 gaan we dan naar Fase 3, waarbij we de cirkel rond maken: van omgang en handeling in droogte in 2018, via analyse en monitoring in 2019/2020 naar handeling vanaf 2020.

2. Projectgebied en methodiek

We richten ons in dit project op het zuidelijk, midden en oostelijk zandgebied van Nederland en dan specifiek op de hogere, drogere zandgronden met landbouw en natuur (Figuur 4). Binnen het projectgebied bekijken we specifiek een aantal stroomgebieden, waarbinnen we diverse bronnen van informatie combineren en integreren. We analyseren ook specifieke meetlocaties met geschikte data, buiten deze zogenaamde focus-stroomgebieden.



Figuur 4: Projectgebied hogere zandgronden, provinciegrenzen en focus-stroomgebieden. NB: keuze van gebieden voor analyse nader te bepalen bij start Fase 2.

We gebruiken en integreren diverse gegevens- en informatiebronnen (Tabel 1):

- Meteorologische data van het KNMI (neerslag en referentiegrasverdamming volgens Makkink);
- Berekende werkelijke verdamping van STOWA/SATWATER (SATDATA) (NHV-Werkgroep Verdamping, 2015);
- Meetgegevens van provincies, waterschappen, terrein beheerdersorganisaties (TBO's) en drinkwaterbedrijven: grondwaterstanden, afvoer oppervlaktewater, vegetatieopnames (natuur), divers kaartmateriaal (o.a. van beheertypen). Ook meetgegevens uit archieven en online portals (sensoren op telemetrie). Een overzicht van de gegevens is opgenomen in Bijlage 8.2.1;
- Idem van het Landelijk Meetnet Flora (LMF); NB: effecten van de droogte van 2018 (en 2019) op de terrestrische natuur kan pas na die droogte worden vastgesteld;

- Informatie over onttrekkingen uit grondwater;
- Uitkomsten van hydrologische modelberekeningen (LHM, SWAP, regionale grondwatermodellen);
- Gewasindices (NDVI, NDWI) uit remote sensing beelden;
- Gebiedskennis van projectdeelnemers, de onderzoekers van het project en derden.

Tabel 1: Samenhang tussen gebruikte en gegenereerde gegevens en modelanalyses.

Gegevens	Soort	Bron	Instrumenten	Analyse Tijdreeksen	SWAP	LHM	LMF_trend Analyse opnames	Opmerking
Invoer								
Gemeten	Neerslag (station, radar)	KNMI			x	x		
Berekend	Verdamping ET ref MAK	KNMI			x	x		
Gemeten	Bodemvocht	Programma Lumbricus, ITC Enschede		(x)				Kalibratie model
Gemeten	Grondwaterstand	Diverse instanties		x			x	Kalibratie model
Gemeten	Stijghoogte	Diverse instanties		x	x	x		
Gemeten	Waterafvoer gebied	Waterschappen		x				
Gemeten	Vegetatieopname	LMF, provincie, TBO					x	
Kontrolle van berekeningen								
Berekend	ET werkelijk berekend SATDATA	SATWATER STOWA			x	x		Transpiratie-reductie (diverse)
Gemeten	Bodemvocht	Programma Lumbricus, ITC Enschede			x	x		
Gemeten	Grondwaterstand	Diverse instanties			x	x		
Gemeten	Stijghoogte	Diverse instanties						
Berekend	NDVI gewasindex	Sentinel-2, airborne RS, consortium			(x)	x		Transpiratie-reductie droogte
Berekend	NDWI gewasindex	Sentinel-2, airborne RS, consortium			x	x		Transpiratie-reductie droogte
Berekend	TDVI gewasindex	airborne RS, consortium			(x)			Transpiratie-reductie hitte
Berekend	Open water detectie	Sentinel-2					x	Toestand vennen en poelen
Gemeten	Wateraanvoer gebied	Waterschappen				x		
Gemeten	Waterafvoer gebied	Waterschappen				x		
Gemeten	Droogval beken	Waterschappen				x		Droogval en weer op gang komen afvoer
Gemeten	Onttrekkingen OW	Waterschappen				x		
Gemeten	Onttrekkingen GW	Waterschappen/Provincies				x		
Resultaten								
Berekend	Neerslagoverschot				x	x		Neerslag minus verdamping
Berekend	ET werkelijk berekend hyd model				x	x		SATDATA
Berekend	Transpiratie-reductie				x	x		NDVI, NDWI, TDVI
Berekend	Oppervlakte-afvoer				x	x		
Berekend	Bodemvocht				x	x		Vochtgehalte, -voorraad
Berekend	Grondwaterstand				x	x		
Berekend	Stijghoogte					x		LHM levert onderrand SWAP
Berekend	Wateraanvoer					x		
Berekend	Drainage				x	x		Modelvergelijking
Berekend	Waterafvoer					x		
Berekend	Onttrekkingen OW					x		
Berekend	Onttrekkingen GW					x		
Berekend	Waterbalans kolom locatie				x			Integratie met metingen
Berekend	Waterbalans grid/vlak/LSW					x		Integratie met metingen
Berekend	Trend - indicatoren vegetatie						x	
Berekend	Eigenschappen tijdreeksen			x				
Berekend	Droogte-indices				x			
Meetlocaties								
Focus-stroomgebieden								
Projectgebied								
				x	x	(x)	x	
					(x)	x		
						x		

De analysemethodiek bestaat uit een aantal onderdelen, die we steeds integreren, combineren en uniform toepassen:

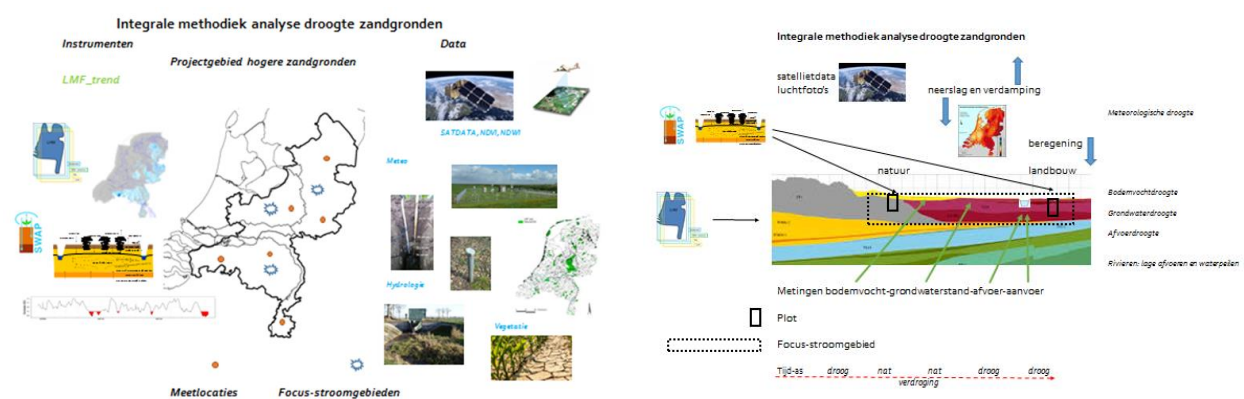
- Gestandaardiseerde droogte-indices voor diverse compartimenten in het bodem-water-systeem; deze indices kunnen worden uitgerekend voor tijdreeksen van veldmetingen én voor SWAP-modelberekeningen; zie Bijlage 8.2.2;
- Regimecurves van tijdreeksen van velddata en hydrologische modelberekeningen;
- Plotmodellen met SWAP - berekeningen hydrologie voor locaties (landbouw en natuur); zie Bijlage 8.2.4;
- Verwerking van velddata, o.a. voor de toetsing van modellen en voor waterbalansen;
- Trendbepaling in de toestand van natuurlijke vegetaties; zie Bijlagen 8.2.5 en 8.2.6;
- Vlakdekkende berekeningen met het LHM voor het hele projectgebied, de beheergebieden van de waterschappen en de focus-stroomgebieden); zie Bijlage 8.2.3;
- Verwerking van vlakdekkende remote sensing data (neerslag, werkelijke verdamping; vegetatie-indices); zie Bijlage 8.2.7 en Paragraaf 3.2;
- Gebiedskennis van deelnemers project en derden en literatuur (o.a. gebiedsstudies).

De samenhang tussen de onderdelen is de basis voor een complete analyse (Figuur 5), die we inzetten voor de duiding van de hydrologische toestand van diverse gebieden binnen het projectgebied. We kiezen daartoe

binnen het projectgebied diverse focus-stroomgebieden uit die verschillende karakteristieken hebben die vóórkomen in het projectgebied en waarvoor goede gegevens voorhanden zijn (lange meetreeksen van voldoende kwaliteit). We passen de uniforme, integrale methodiek toe in deze stroomgebieden en op afzonderlijke meetlocaties, om de droogte te analyseren en te duiden qua hydrologie en de effecten op landbouw en terrestrische natuur.

Zoals gezegd plant droogte zich voort van meteorologische naar hydrologische droogte. Hierbij treedt een vertraging en demping op. Meerdere meteorologische droogtegebeurtenissen kunnen zo leiden tot één langer en gedempter signaal in de hydrologische droogte, dat ook vaak later zichtbaar wordt. Om deze verschillende kenmerken van elk type droogte goed in kaart te brengen, is het belangrijk om alle hydrologische variabelen (neerslag, verdamping, bodemvocht, afvoer en grondwater) mee te nemen in de evaluatie van de droogte. We maken gebruik van gestandaardiseerde indices voor elke variabele, waardoor een onderlinge vergelijking tussen de droogtecompartimenten mogelijk wordt. Alle indices zijn op dezelfde manier bepaald voor de verschillende variabelen, waardoor een goede vergelijking mogelijk is tussen de focus-stroomgebieden.

In Bijlage 8.2 staan de onderdelen van onze analyse-methodiek nader toegelicht.



Figuur 5: Integrale methodiek ter analyse van de droogte en effecten ervan (links - op kaart; rechts – in dwarsdoorsnede). Combinatie van data- en modelanalyses, gecombineerd op meetlocaties en in focus-stroomgebieden (schematisch op kaart).

3. Droogte 2018 – informatie en eerste analyse

3.1. Opzet van hoofdstuk

In dit hoofdstuk laten we zien welke gevolgen de droogte van 2018 heeft gehad voor de verschillende compartimenten van het bodem-water-systeem. Tevens laten we zien wat de effecten zijn geweest op de begroeiing van het aardoppervlak (landbouw en terrestrische vegetatie natuur). Sommige verschijnselen kunnen we voor het hele zandgebied weergeven, andere, zoals het wegzakken van de gemeten grondwaterstand of de gemeten beekafvoer, kunnen we alleen illustreren voor bepaalde locaties. Die illustraties dienen de lezer inzicht te verschaffen in de potenties van onze analyses. Uiteindelijk is het onze bedoeling alle gegevens en analysemethoden op uniforme wijze voor iedereen toegankelijk te maken. Dat past in de volgende twee fasen van het project (Fase 2 en 3).

We gaan in dit hoofdstuk in op meteorologische droogte via metingen en berekeningen voor 2018 (KNMI, SATDATA/STOWA), alsmede op met het LHM berekende reductie van de plantverdamping (transpiratie). We laten illustratief metingen zien van bodemvochtgehaltes voor 2018-2019 in het gebied Stegeren (Ov.). We tonen gemeten grondwaterstanden, alsmede SWAP-berekeningen van de grondwaterstand op specifieke locaties in het stroomgebied van de Hupselse Beek en de Voorsterbeek. Daarnaast geven we verschillen aan via LHM-berekeningen van vlakdekkende grondwaterstanden tussen 1988-2017 en 2018. We gaan in op afvoermetingen in Hupsel voor 2005-2018 en met LHM berekende drainagefluxen voor de beheergebieden van Aa en Maas en Rijn en IJssel voor 1988-2017 en 2018. We tonen berekende en geregistreerde (voor zover beschikbaar) onttrekkingen van grondwater voor berekening voor 1988-2017 en 2018. We laten vegetatie-indices NDVI en NDWI op basis van remote sensing zien voor de gebieden Hupsel en Hooge Raam. We integreren voorgaande aspecten voor met name Hupsel en Hooge Raam, onder andere via waterbalansen voor 2018. Tenslotte gaan we in op trends in de tijd in LMF-data over de natuurlijke vegetatie, waarvoor voor deze rapportage beperkt data beschikbaar waren voor 2018.

3.2. Meteorologie - neerslag en verdamping

Vlakdekkende informatie projectgebied

Neerslag wordt in Nederland gemeten door het KNMI op automatische weerstations (AWS), via een netwerk van stations met hand-regenmeters (dagsom) en via een regen-radarsysteem als toepassing van remote sensing. Het KNMI stelt kaarten samen voor de dagsom van neerslag voor heel Nederland, op basis van zowel de waarnemingen aan de grond via de meetstations, als ook op basis van radarbeelden. De radarbeelden worden in twee stappen gecorrigeerd aan de hand van metingen op de meetstations, in eerste instantie via de AWS, daarna via de stations met handregenmeters (KNMI Datacentrum, 2019).

Verdamping is een cruciale grootheid voor het waterbeheer, de weersverwachting, landbouw, klimaatadaptatie en andere sectoren en toepassingen. Verdamping is na neerslag meestal de grootste post op de waterbalans. De grootheid is zowel voor operationele vraagstukken op de korte termijn relevant, zoals ter schatting van de wateraanvoer-behoefte, als ook voor strategische beslissingen op de (middel)lange termijn. Daarnaast is verdampingsinformatie relevant voor schattingen van de aanvulling van de grondwatervoorraad. In Bartholomeus et al. (2013); NHV-Werkgroep Verdamping (2015); Van den Eertwegh & De Bruin (2017) en Voortman et al. (2016) staat meer te lezen over berekening en meting van verdamping.

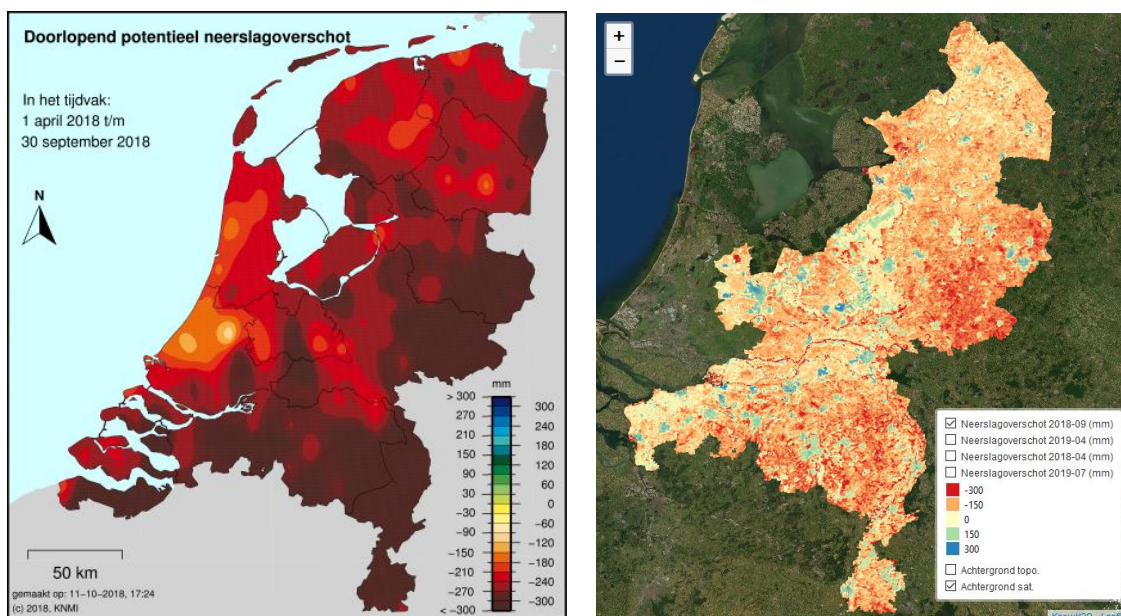
Het KNMI publiceert de berekende verdamping volgens Makkink (1957), de zogenaamde referentiegewas-verdamping. Dit is de verdamping van een theoretisch gewas, vergelijkbaar met kort gras dat goed van water wordt voorzien. Via zogenaamde gewasfactoren kan de potentiële verdamping van specifieke gewassen of een vegetatie in een specifiek groeistadium worden berekend. Dit is de verdamping onder optimale watervoorziening. Stressfactoren voor de vegetatie als vochttekort en hitte maken dat de werkelijke verdamping kleiner kan zijn dan de potentiële verdamping.

De meteorologische droogte wordt vaak uitgedrukt in het neerslagtekort. Hierbij wordt de cumulatieve referentiegewasverdamping van de cumulatieve neerslag afgetrokken hetgeen resulteert in het neerslagtekort.

Het neerslagtekort (cumulatief) wordt elk jaar opnieuw en doorlopend berekend door het KNMI vanaf het begin van het hydrologisch jaar op 1 april tot en met 30 september. Voor de neerslag gebruikt het KNMI hiervoor de metingen op de grondmeetstations. Hiernaast wordt gebruik gemaakt van de

referentiegewasverdamping volgens Makkink. De werkelijke verdamping kan zoals gezegd verschillen van deze referentiegewasverdamping, doordat de werkelijke begroeiing anders is dan het theoretische referentiegewas dat door het KNMI wordt gebruikt en door niet-optimale bodemvochtcondities in de wortelzone. In andere woorden: het gaat bij de KNMI-informatie over een potentieel neerslagoverschot.

Om inzicht te krijgen in de uitputting van de voorraad bodemvocht, is in deze studie de neerslag van gecorrigeerde radarbeelden (KNMI Datacentrum, 2019) afgetrokken van de berekende werkelijke verdamping op basis van remote sensing beelden (SATDATA; eLeaf (2017a); eLeaf (2017b)). De SATDATA zijn bereidwillig ter beschikking gesteld via SATWATER-STOWA (beheerder Crook, HDSR).



Figuur 6: Links het doorlopend (cumulatief) potentieel neerslagoverschot zoals berekend door het KNMI vanaf 1-4-2018 op 30-9-2018; rechts het cumulatieve verschil tussen neerslag (radar data KNMI) en berekende werkelijke verdamping (SATDATA/STOWA) in dezelfde periode. Kaart rechts is ook te zien als de uitputting van de voorraad bodemvocht.

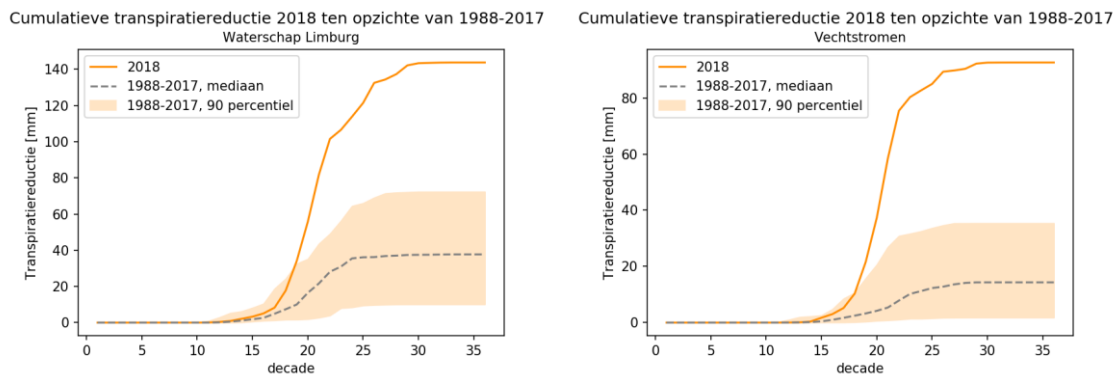
Opmerking ad Figuur 6:

Kaart rechts betreft geen werkelijk neerslagoverschot. Stel dat de bodem volkomen is uitgedroogd op 1 april 2018, dan zouden we volgens de berekende SATDATA het hele seizoen een verdamping van nul hebben. Zo krijgen we vervolgens een neerslagoverschot over dat gehele seizoen. In de SATDATA is namelijk het tekort aan bodemvocht en de eventuele verwelking van planten (landbouw en natuur) reeds verwerkt, i.c. het effect van een reeds beschadigde vegetatie zit hier al in. Op jaarbasis is de cumulatieve neerslag minus werkelijke verdamping gelijk aan de freatische grondwateraanvulling (NB: los van oppervlakkige afvoer en verdamping van interceptiewater). Dat is altijd een positief getal, ook in een woestijn.

In Figuur 6 is te zien dat het gebruik van de referentiegewasverdamping resulteert in een overschatting van de uitputting van de hoeveelheid water in de bodem. Daarnaast is er meer ruimtelijke variatie te zien in die uitputting te zien, doordat de werkelijke verdamping per gridcel van 250 m is berekend en niet door middel van ruimtelijke interpolatie van KNMI-weerstations. Beide kaarten tonen ruimtelijke verschillen binnen Nederland, waarbij de regio's Oost-Brabant en Achterhoek/Twente in 2018 de grootste meteorologische droogte te zien gaven. Deze regionale verschillen zijn relevant in de analyse en handeling t.a.v. droogte.

Berekende reductie van transpiratie

De droogte van 2018 leidde tot een significante reductie van de transpiratie (verschil tussen de potentiële en werkelijke gewasverdamping), wat aangeeft dat gewassen en natuurlijke vegetaties te leiden hadden onder de droogte. Uit de LHM-resultaten blijkt dat 2018 veruit de grootste reductie in transpiratie kende van de afgelopen 30 jaar. In Figuur 7 staat de gesimuleerde ontwikkeling van de transpiratiereductie gedurende het jaar voor 2018 en het 90-percentiel van de voorgaande 30 jaar voor twee waterschappen weergegeven. Duidelijk is zichtbaar dat 2018 zeer extreem was in vergelijking met de 30 jaar ervoor: de transpiratiereductie was drie tot vier keer zo groot als gemiddeld.



Figuur 7: LHM-resultaten: cumulatieve reductie van de transpiratie voor het jaar 2018 en het 90-percentiel van de voorgaande 30 jaar, gemiddeld voor beheergebied waterschap. De diagrammen van de overige waterschappen zijn te vinden in de bijlage.

3.3. Bodemvocht

Bodemvochtgehalten zijn te beschouwen als puntmetingen. Tijdreeksen van metingen aan bodemvocht (deels beschikbaar via ITC Enschede) zijn in deze fase nog niet geanalyseerd. Er is dus nog geen lering getrokken uit deze data over de droogte van 2018, dat gebeurt in Fase 2. Door voor locaties met grondwaterstandsmetingen SWAP-modellen te parametriseren en kalibreren zijn wel reeksen voor bodemvocht gesimuleerd. Analyse hiervan komt terug in paragraaf 3.8.

Bodemvochtmetingen zijn beschikbaar vanuit verschillende programma's. Zo worden zoals gezegd vanuit ITC Enschede in delen van de stroomgebieden van Waterschap Aa en Maas (sinds 2018) en Waterschap Vechtstromen (sinds 2016) bodemvochtmetingen uitgevoerd. Gezien de relatief korte looptijd van de metingen zijn die voor Fase 1 van dit project nog niet gebruikt om de droogte van 2018 te duiden. In het vervolg kunnen ze wel bijdragen aan een beter begrip van de relatie tussen grondwater, meteorologie en bodemvocht. Daarnaast zijn metingen beschikbaar vanuit het Programma Lumbricus, waar voor enkele landbouwpercelen continu bodemvocht, grondwaterstand en neerslaghoeveelheid wordt gemeten.

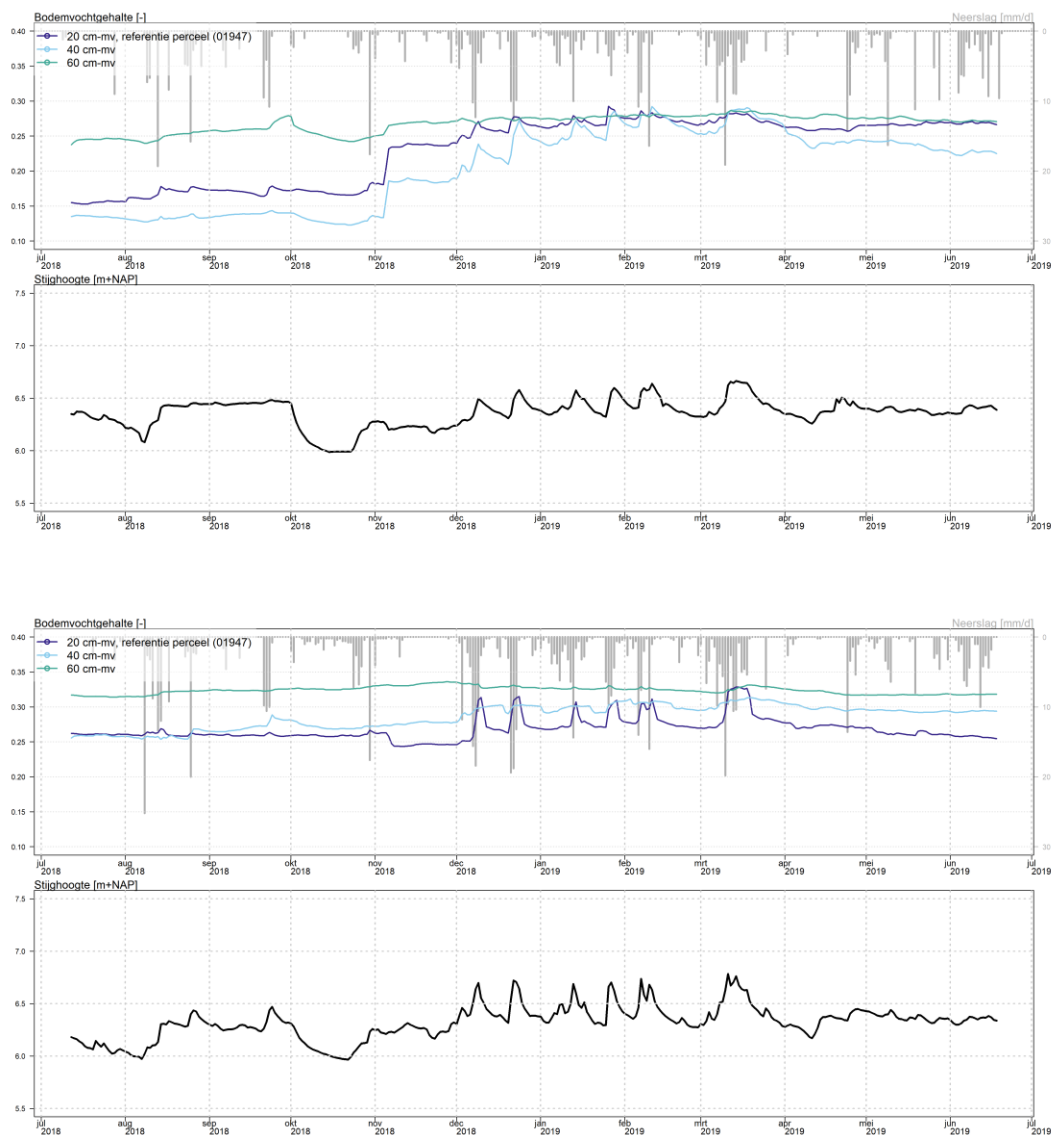


Figuur 8: Bodemvochtmetingen. Voorbeeld van opstelling met sensoren op vier diepten (snijmais op zandgrond) te Haaksbergen, testsite KlimaatAdaptieve Drainage (KAD) en subirrigatie (Waterschap Vechtstromen, KWR, KnowH₂O). Figuur ontleend aan Bartholomeus et al. (2017).

Voor inzicht in actuele bodemvochtgehalten in de doorwerking van droogte van meteorologie naar hydrologie, is voorzien dat in Fase 2 van dit project een aantal nieuwe, aanvullende meetlocaties wordt ingericht waarin bodemvochtmetingen worden gecombineerd met grondwaterstandsmetingen. Ter illustratie zijn gemeten bodemvochtgehalten getoond voor een beregend en een niet-beregend graslandperceel (Figuur 9). De metingen worden gedaan in Proeftuin Oost - Stegeren (Overijssel; Programma Lumbricus), waarin actief water wordt aangevoerd vanuit de Vecht via het open water systeem naar drainagebuizen in percelen.

Daar wordt wateraanvoer via deze zogenaamde sub-irrigatie vergeleken met oppervlakkige beregening. De figuren laten zien de bodemvochtgehalten in het groeiseizoen van 2018 in het niet beregende perceel (vanzelfsprekend) lager waren dan in het beregende perceel, ondanks dat de grondwaterstanden niet veel verschilden. Het op een hoog peil houden van de grondwaterstand is dus onvoldoende om het bodemvochtgehalte op peil te houden.

Tevens laten de metingen een verschillende respons op neerslag en oppervlaktewaterpeilbeheer zien. De neerslag eind september 2018 zorgt voor een piek in de grondwaterstand op het beregende perceel, terwijl deze in het niet-beregende perceel nauwelijks tot uiting komt. Dit hangt vermoedelijk samen met verschillen in verzadigingsgraad van de onverzadigde zone. Bij een hoger bodemvochtgehalte voorafgaand aan een bui, reageert de grondwaterstand snel. Bij de drogere uitgangssituatie stijgt de grondwaterstand niet. Wel is na de bui sprake van een stijging van het bodemvochtgehalte, al wordt deze stijging snel weer teniet gedaan door de daling van het oppervlaktewaterpeil en grondwaterstand op 1 oktober 2018. Dit soort inzichten zijn van belang voor het begrijpen van de response van het hydrologisch systeem op neerslag: de verzadigingsgraad van de onverzadigde zone is van belang van de doorwerking van neerslag op grondwaterstanden.



Figuur 9: Gemeten bodemvochtgehalte en grondwaterstand te Stegeren in kader van Programma Lumbricus. Boven metingen in een niet-beregend perceel, beneden in een beregend perceel.

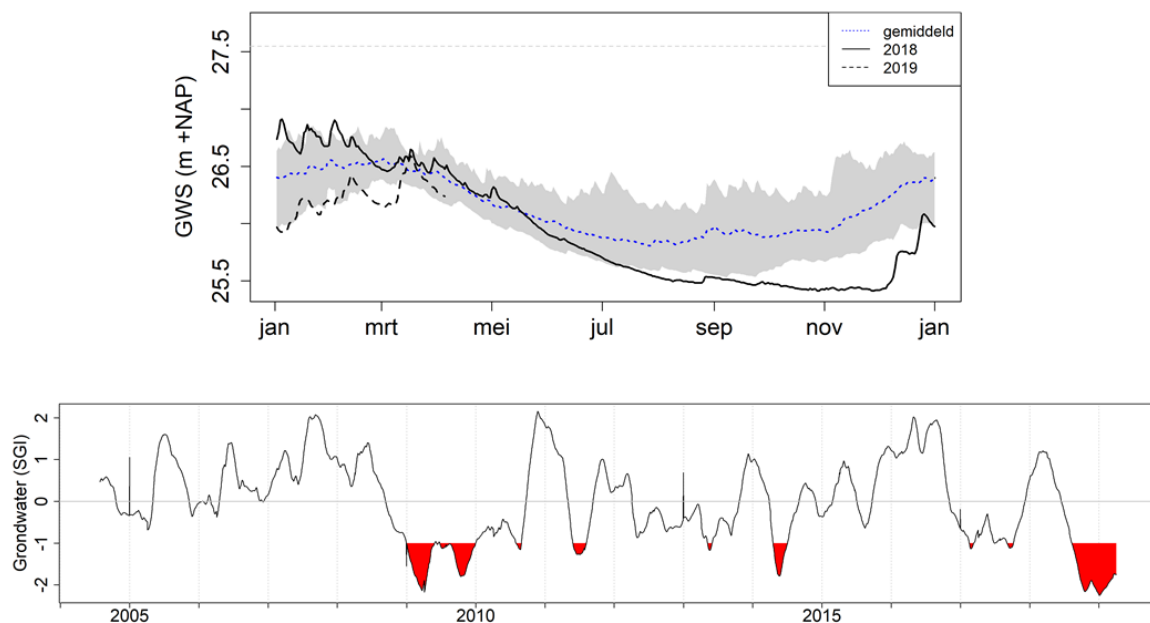
3.4. Grondwaterstanden

In tegenstelling tot gehalten aan bodemvocht worden grondwaterstanden op zeer veel locaties in Nederland gemeten. We beschrijven hier de reactie van de grondwaterstand op de droogte aan de hand van enkele peilbuiswaarnemingen. Bovendien tonen we de resultaten van simulaties met het LHM.

Peilbuizen waarin handwaarnemingen gedaan worden of drukopnemers zijn geplaatst leveren al dan niet online met dataloggers en telemetrie informatie op over grondwaterstanden (freatisch) en/of stijghoogten (watervoerend pakket) in de tijd. Validatie van de metingen en kwaliteitsborging zijn belangrijke onderwerpen, ook bij de presentatie en visualisatie van gegevens in portals van diverse partijen. De actuele situatie in het veld (online via internet ontsloten drukopnemers) en het DINO-archief zijn beide bronnen van informatie voor het project.

We werken met metingen en afgeleide variabelen, zoals GxG (x=L voor laagste, x=H voor hoogste, x=V voor voorjaar) en LG₃ (drie laagste gemeten grondwaterstanden in een hydrologisch jaar 1 april t/m 31 maart). We analyseren en duiden metingen op basis van analyse van tijdreeksen en via modelberekeningen met SWAP en LHM. Daar leiden we de gestandaardiseerde grondwater index (SGI) uit af als maat voor grondwaterdroogte (Bijlage 8.2.2).

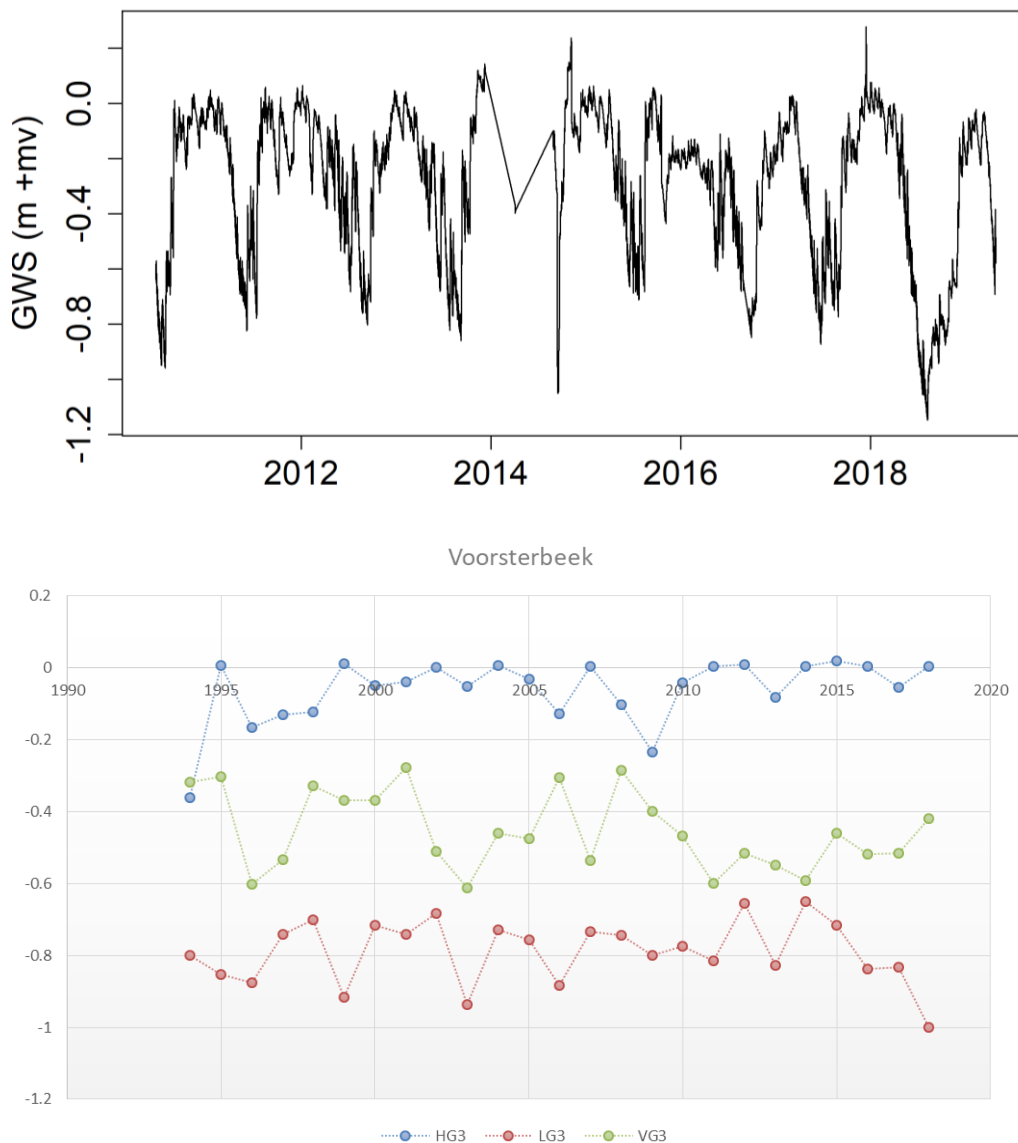
We nemen hier een voorbeeld bij de hand voor een peilbuis in het stroomgebied van de Hupselse Beek. Regimecurves en SGI (droogte grondwater index), gebaseerd op gemeten grondwaterstanden, geven informatie over de grondwaterstand in historisch perspectief en of hoe deze als droogte gekarakteriseerd kan worden. Voor de geanalyseerde peilbuis in Hupsel (Figuur 10) geldt voor 2018 dat vanaf half juli de grondwaterstand tot de 5% droogste in de meetreeks valt (bovenste figuur). De SGI (onderste figuur) geeft aan dat het begin van 2018 nog enigszins tot matig nat was, maar dat later in het jaar de grondwaterstandsdroogte als extreem droog gekarakteriseerd wordt. Ook is te zien dat de droogteperiode vanuit 2018 doorloopt in 2019. Ook in 2009 was de SGI zeer laag (droog), maar vielen de periodes met grondwaterdroogte buiten het groeiseizoen. In paragraaf 3.8 wordt nader ingegaan op de doorwerking van droogtecomponenten, door de SGI samen te tonen met indices voor meteorologische droogte en afvoerdroogte.



Figuur 10: Voorbeeld van de interpretatie van grondwaterstandsreeksen voor Hupsel (landbouw), met een regimecurve (boven) en gestandaardiseerde index voor grondwaterdroogte SGI (onder). De regimecurve geeft de absolute waarden van de grondwaterstand en het vlak dat wordt begrensd door het 5 en 95 percentiel. De rode vlakken in de SGI betreffen de periodes met matige (-1) tot extreem droogte (≤ -2). Voor de definitie en interpretatie van de SGI verwijzen we naar Bijlage 8.2.2.

Een voorbeeld van een tijdreeks voor natuur is gegeven voor de Voorsterbeek (Figuur 11). Op basis van deze tijdreeks is voor deze locatie een SWAP-model gefit, waarmee de LG₃, HG₃ en VG₃ voor deze locatie is

afgeleid. Volgens de Waternood classificatie geldt dat voor het optimale grondwaterstandsregime voor het heersende vegetatietype 'Vochtig Hooiland' de GVG tussen +13 tot +25 en -45 tot -60 cm mag liggen. Voor 2018 geldt dat de VG3 binnen deze grenswaarden viel. Echter, de LG3 was wel de laagste in de geanalyseerde periode. Dit geeft aan dat het voorjaar van 2018 weliswaar niet droog was, maar dat gedurende het groeiseizoen de grondwaterstand ook in dit natuurgebied dieper wegzakte dan in de historie.



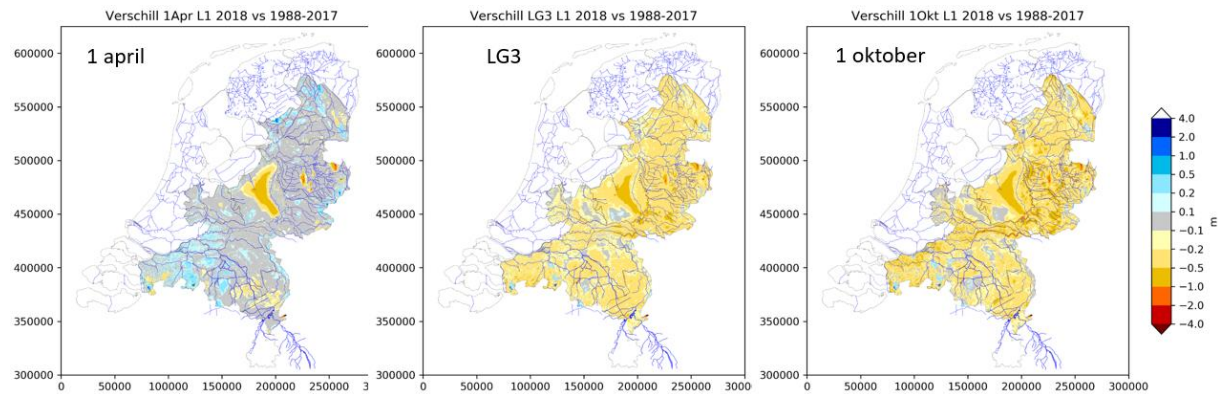
Figuur 11: Gemeten grondwaterstand voor de Voorsterbeek (boven) en met SWAP gesimuleerde HG3, LG3 en VG3 voor deze locatie.

Vlakdekkende berekende grondwaterstanden projectgebied - LHM

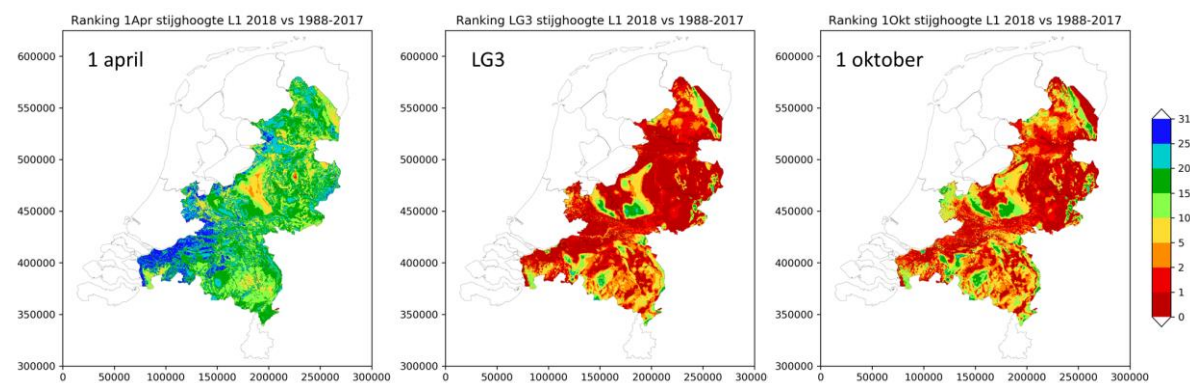
Figuur 12 laat zien hoeveel de grondwaterstand in 2018 hoger of lager stond t.o.v. het gemiddelde van de afgelopen 30 jaar o.b.v. modelberekeningen. Op 1 april 2018 was er sprake van een gemiddelde grondwaterstand voor bijna het gehele studiegebied gemiddeld, met uitzondering van de hoge infiltratiegebieden zoals de Veluwe. Deze gebieden ijlen na en de grondwaterstanden waren op 1 april 2018 laag als gevolg van het relatieve droge jaar 2017. De LG3 en de grondwaterstand op 1 oktober waren beduidend lager in 2018 dan gemiddeld, voor het grootste deel van het studiegebied meer dan 20 cm, met gebieden tot 100 cm lager.

Het grootste deel van het studiegebied had in de zomer en najaar van 2018 te maken met de laagste grondwaterstanden in afgelopen 30 jaar (zie Figuur 13, ranking 1 betekent de laagste grondwaterstand in 30 jaar). De trage, hoger gelegen infiltratiegebieden vertonen ondanks een lagere grondwaterstand in 2018 t.o.v.

gemiddelde niet de laagste grondwaterstand in de afgelopen 30 jaar. Dit betekent dat er volgens het LHM-model de afgelopen 30 jaar lagere grondwaterstanden optraden. Met name voor N-Brabant en Limburg zijn er slechts weinig gebieden waar een laagste grondwaterstand voor 2018 werd berekend en is niet conform de verwachting. Of dit in werkelijkheid ook het geval was, dient in fase 2 gevalideerd te worden. Over het algemeen hebben grondwatermodellen moeite om de vertraging van de grondwateraanvulling in gebieden met een dikke onverzadigde zone (> 3 meter) goed te simuleren.



Figuur 12: LHM-resultaten: het verschil in grondwaterstand tussen 2018 en het langjarig gemiddelde (30 jaar) voor drie momenten in het jaar: 1 april, LG3 en 1 oktober.



Figuur 13: LHM-resultaten: de ranking van de grondwaterstand in 2018 t.o.v. de afgelopen 31 jaar. Ranking 1 (rood) betekent de laagste grondwaterstand t.o.v. de afgelopen 30 jaar, ranking 31 (blauw) de natste.

3.5. Afvoer oppervlaktewater

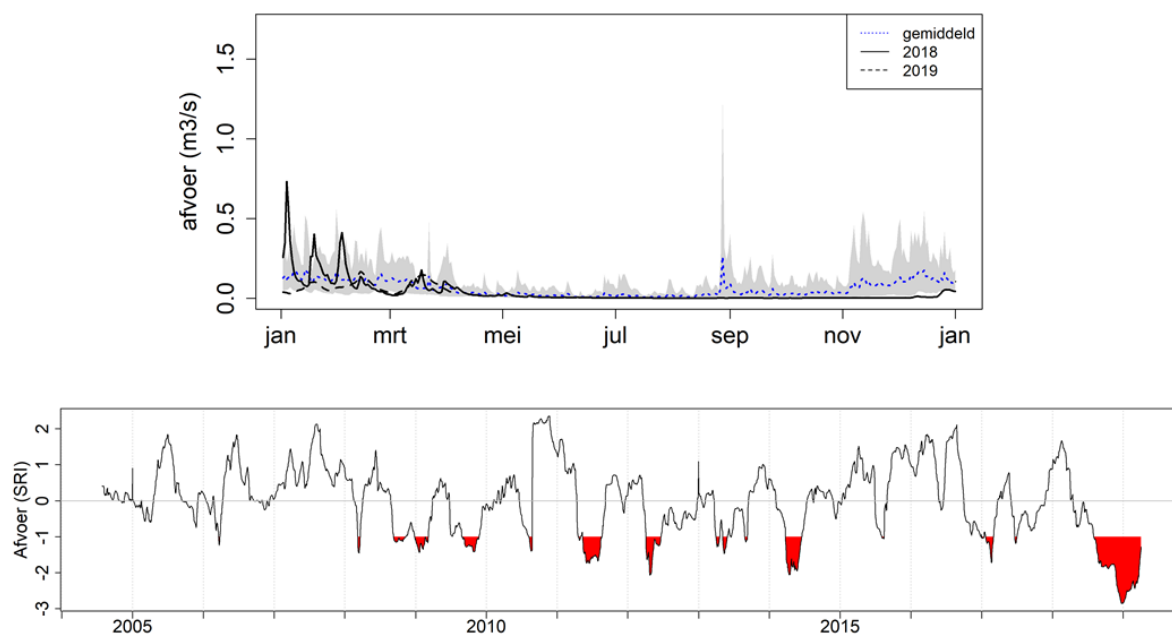
Gemeten afvoer

Een stroomgebied of een polder heeft een locatie waar het wateroverschot van het afwaterend gebied wordt afgevoerd. Stuwen en pompen zijn gangbare kunstwerken om de debieten mee te bepalen via geijkte rekenkundige relaties. Ook worden er steeds vaker akoestische en/of elektromagnetische debietmeters hiervoor ingezet. Meetreeksen van voldoende kwaliteit en lengte zijn geschikt om te analyseren en te gebruiken in dit project.



Figuur 14: Hupselse Beek, afvoermmeetpunt Stuw 10A (WRIJ) met geijkte H-flume.

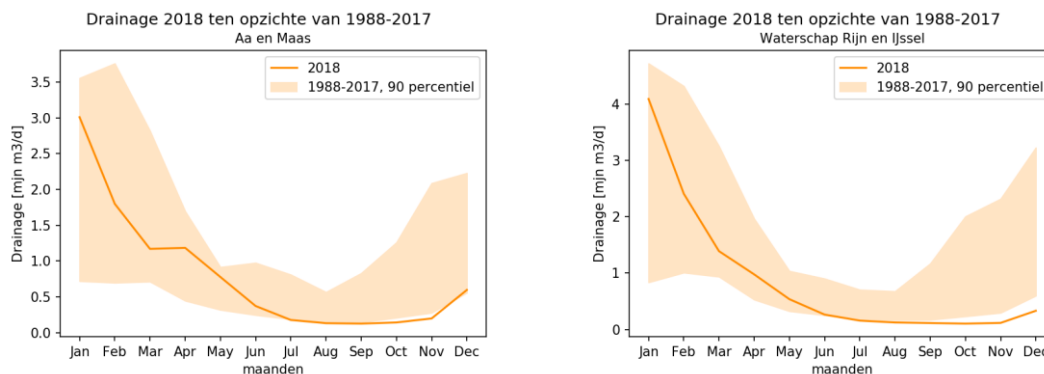
We nemen hier een voorbeeld uit het stroomgebied van de Hupselse Beek (Figuur 14) als focus-stroomgebied. Regimecurves en SRI (afvoerdroogte index; Bijlage 8.2.2), gebaseerd op gemeten afvoeren, geven informatie over de afvoer in historisch perspectief en of hoe deze als droogte gekarakteriseerd kan worden. Voor de geanalyseerde afvoerreeks in Hupsel (Figuur 15) geldt dat afvoerdroogte als extreem droog gekarakteriseerd wordt. Ook is te zien dat de droogteperiode niet herstelt in het najaar en winter van 2018 en doorloopt in 2019. Overigens zijn de afvoer in Hupsel in de periode mei – juli vrijwel elk jaar zeer laag is, maar 2018 was dus uitzonderlijk laag.



Figuur 15: Voorbeeld van de interpretatie van afvoerreeks voor Hupsel, met een regimecurve (boven) en gestandaardiseerde index voor afvoerdroogte SRI (onder). De regimecurve geeft de absolute waarden van de afvoer en het vlak (grijze band) waarbinnen 90% van de waarnemingen over de periode 2004-2017 vallen (vlak wordt begrensd door het 5 en 95 percentiel). De rode vlakken in de SRI betreffen de periodes met matige (-1) tot extreem droogte (≤ -2). Voor de definitie en interpretatie van de SRI verwijzen we naar Bijlage 8.2.2.

Berekende afvoer

Voor de gebieden zonder wateraanvoer, bestaat de afvoer van beken uit grondwater dat via drainage en kwel in sloten en beken terecht komt en uit RWZI-effluent. Met het LHM is de bijdrage van het grondwater aan de afvoer voor 2018 t.o.v. de voorgaande 30 jaar per waterschap in beeld gebracht. Dit kan worden gezien als het gebiedseigen water en is dus grondwater dat langzaam via de afvoer het gebied verlaat. Een steeds lagere grondwaterstand en een vermindering van de kwelflux betekent automatisch dat de gebiedseigen afvoer afneemt. In Figuur 16 staat deze gebiedseigen afvoer weergegeven voor het waterschap Rijn en IJssel en Aa en Maas voor 2018 en het 95-percentiel van de voorgaande 30 jaar. Te zien valt dat voor zowel Aa en Maas als Rijn en IJssel de gebiedseigen afvoer in augustus onder het 90-percentiel vlak duikt (dus onder de 5-percentiel waarde) en ook blijft tot het einde van 2018. Deze modelresultaten laten zien dat we te maken hadden met extreem lage afvoeren in de zomer en najaar van 2018.



Figuur 16: LHM-resultaten: berekende afvoer van het grondwater via drainage (ookwel gebiedseigen afvoer) voor 2018 en het 95% interval van de voorgaande 30 jaar van periode 1988-2017 (LHM). Het 90-percentiel vlak geeft 90% van de waarden weer, begrensd aan de onderkant en bovenkant door het 5- en 95-percentieel. Links voor het gehele beheergebied van WAM, en rechts voor WRIJ. Diagrammen van de overige waterschappen zijn te vinden in de digitale bijlage.

3.6. Berekende onttrekkingen

Bron grondwater

Volgens de LHM-berekeningen is er in 2018 veruit het meeste grondwater onttrokken voor berekening t.o.v. de voorgaande 30 jaar (zie Tabel 2). Er werd volgens het model in 2018 gemiddeld 2.5 keer meer berekend uit grondwater dan de voorafgaande 30 jaar.

Bij de verschillende waterschappen zijn tevens de geregistreerde hoeveelheden opgevraagd voor 2018, en indien beschikbaar, voor de voorgaande jaren (zie Tabel 2). Opvallend is dat voor het waterschap Vechtstromen en Drents Overijsselse Delta niet bekend is hoeveel grondwater er voor berekening wordt onttrokken. Hier geldt geen registratieplicht. Voor Rijn en IJssel zijn de gegevens voor 2018 nog niet verwerkt en daardoor niet beschikbaar. Voor de waterschappen waarvoor wel gegevens beschikbaar zijn, geldt dat deze gebaseerd zijn op een bepaald percentage respondenten. Voor Brabantse Delta was deze bijvoorbeeld 88% van totaal 2463 vergunningen. Waterschap Aa en Maas gebruikt dit percentage om de registratie (lineair) te corrigeren tot een meer realistische schatting van de onttrokken hoeveelheden. Zij komen dan op een gecorrigeerde schatting van 59 miljoen i.p.v. de 42 miljoen m³ geregistreerd. Meerdere waterschappen hebben het idee dat de registraties een onderschatting zijn van de werkelijk onttrokken hoeveelheden. De registraties laten zien dat er in 2018 ongeveer twee keer meer grondwater werd onttrokken dan in de twee tot vier jaren ervoor.

Een vergelijking tussen de berekende (LHM) en geregistreerde hoeveelheden leert dat, met uitzondering van Waterschap Aa en Maas, het LHM de hoeveelheden voor 2018 ruim overschat t.o.v. de bekende registraties. De gemiddelden komen voor de Brabantse waterschappen wel goed overeen. De oorzaak waarom de gemiddelden goed gaan en 2018 wordt overschat door het LHM is nog niet bekend. Voor waterschap Limburg is zowel voor 2018 als het gemiddelde bijna twee keer zoveel berekend als geregistreerd. Bij de interpretatie van de effectberekeningen (zie 5.2) dient deze discrepantie dus in het achterhoofd te worden meegenomen. Berekende effecten van beregenen uit grondwater zullen dus waarschijnlijk voor Limburg zijn overschat en voor Aa en Maas onderschat.

Tabel 2: Hoeveelheid berekening uit grondwater (in miljoen m³/jaar), berekend met het LHM en geregistreerde hoeveelheden indien bekend.

	berekening uit grondwater (miljoen m ³)				periode	%
	LHM	LHM	Geregistreerd	Geregistreerd		
waterschap	2018	30 jaar	2018	gemiddeld	gemiddelde	Geregistreerd
Vallei & Veluwe	15.0	5.6	1.5	?		?
Drents Overijsselse Delta	17.0	5.0	?	?		?
Vechtstromen	18.9	6.2	?	?		?
Rijn en IJssel	29.7	7.8	?	2.0	2016-17	64
Brabantse Delta	36.3	12.8	26.6	12.5	2015-17	88
Aa en Maas	40.4	14.7	42.0	21.7	2014-17	71
De Dommel	40.6	15.1	27.4	15.1	2015-17	75
Limburg	88.9	42.1	48.5	22.5	2016-17	84
Totaal	286.8	115.7	146.0			

Er zijn regio's geweest in 2018, o.a. binnen WVS, waar onttrekkingen uit grondwater verboden waren. Ook zijn er steeds meer recente registraties beschikbaar van gerealiseerde onttrekkingen. Zowel de afgekondigde verboden als de gegevens voor 2018 nemen we mee in Fase 2.

Op basis van de onttrekkingsgegevens van Brabant Water blijkt dat gedurende de zomermaanden juni t/m september 2018 zo'n 27% meer grondwater voor drinkwater is onttrokken dan het gemiddelde van de afgelopen 10 jaar, namelijk 59 miljoen m³. Voor de berekening van landbouwgewassen werd in de Provincie Noord-Brabant dus anderhalf keer meer grondwater onttrokken dan voor de drinkwatervoorziening. Daarbij dient te worden opgemerkt dat de ruimtelijke variatie zeer groot is. Wanneer meer gegevens van andere drinkwaterbedrijven bekend zijn, kan er een completer beeld van het gehele studiegebied worden gegeven. De drank-industrie heeft zeer waarschijnlijk ook meer onttrokken in 2018 dan gemiddeld maar deze gegevens waren bij opstellen van deze rapportage niet bekend. Voor de Centrale Slenk in Noord-Brabant dient te worden opgemerkt dat voor drinkwater en industrie uit diepere lagen wordt onttrokken dan voor berekening. Dit heeft consequenties hoe de effecten van de onttrekkingen doorwerken tot in het ondiepe grond- en oppervlaktewatersysteem (zie modelberekeningen H5).

Bron oppervlaktewater

LHM-modelberekeningen laten zien dat er in 2018 het meest onttrokken werd uit het oppervlaktewater voor berekening in vergelijking met de voorgaande 30 jaar. Tabel 3 laat zien dat er gemiddeld 2.9 keer meer oppervlaktewater werd onttrokken in 2018 t.o.v. het gemiddelde. Echter, in het hele land zijn onttrekkingsverboden uit het oppervlaktewater afgekondigd en deze zijn niet in het model meegenomen. Vermoedelijk geeft het model een overschatting van deze hoeveelheid.

Tabel 3: Hoeveelheid berekening uit oppervlaktewater (in miljoen m³/jaar), berekend met het LHM, voor 2018 en gemiddeld voor de afgelopen 30 jaar.

	beregennen uit oppervlaktewater (miljoen m ³)				ranking	factor
	2018	30 jaar	2018 - 30 jaar			
Vallei & Veluwe	4.3	1.4	2.9	31		
Waterschap Drents Overijsselse Delta	10.3	2.7	7.7	31		3.1
Vechtstromen	3.4	1.1	2.3	31		3.9
Waterschap Rijn en IJssel	1.6	0.5	1.1	31		3.2
Brabantse Delta	22.7	7.4	15.4	31		3.1
Aa en Maas	8.4	3.5	4.9	31		2.4
Waterschap De Dommel	2.0	0.9	1.2	30		2.4
Waterschap Limburg	4.9	2.4	2.6	31		2.1
TOTAAL	57.7	19.7	38.0			2.9

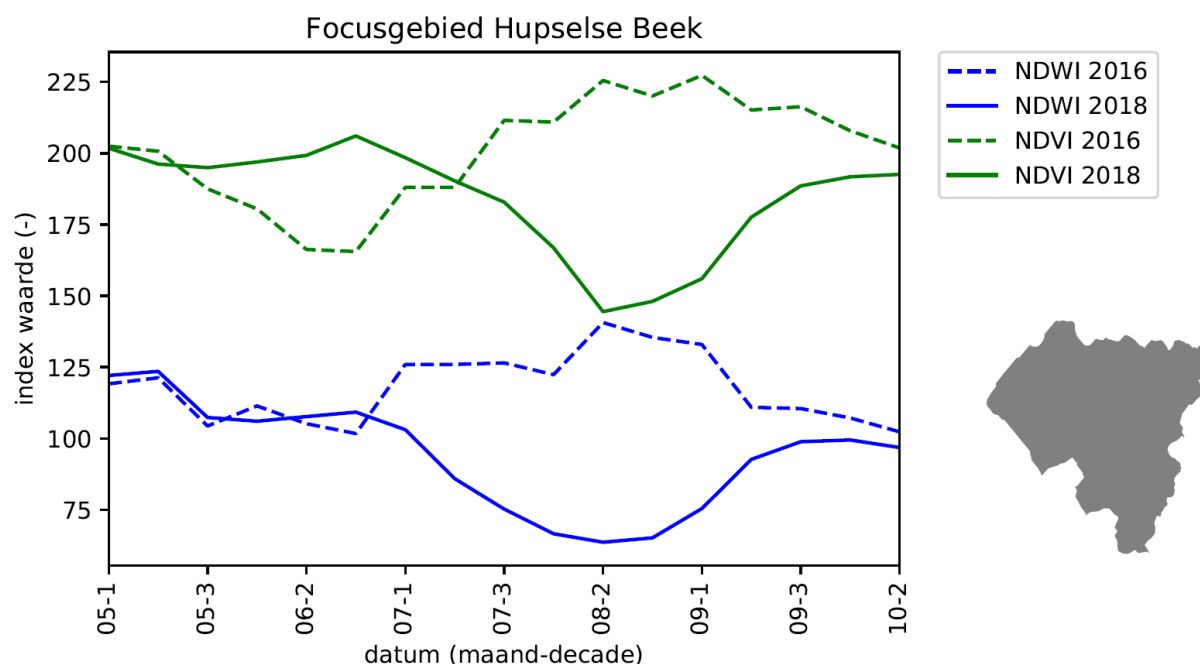
De meeste waterschappen in het zandgebied van Nederland hebben in 2018 een verbod uitgevaardigd ten aanzien van onttrekkingen uit open water. Vaak geldt zo'n verbod niet voor het gehele gebied. Bijvoorbeeld voor waterschap Vallei en Veluwe betekent een onttrekkingsverbod dat er geen oppervlaktewater onttrokken mag worden op plekken waar geen water kan worden ingelaten. Wateraanvoer via oppervlaktewater dient dan als doorvoer en doorspoeling, dient de ecologische doelen en/of dient de lokale infiltratie van water uit de watergang.

3.7. Droogte-effecten landbouw en natuur zichtbaar via remote sensing

Remote sensing (RS) data via platforms als Sentinel-2, LandSat en vliegtuigen zijn gebruikt om vegetatie-indices NDVI en NDWI (Bijlage 8.2.7) te berekenen. Deze indices zijn een maat voor de toestand van de vegetatie i.c. de groenheid (gezondheid, productie) en de waterhoeveelheid aanwezig in de vegetatie. De NDVI heeft een sterke relatie met de fotosynthese van een plant en laat daarom zien hoe gezond het gewas is ('groenheid'). De NDWI is gerelateerd aan de vochthuishouding van een plant en geeft een maat voor de hoeveelheid water in de vegetatie. Droogte is zichtbaar via RS als de NDWI laag is en in een iets later stadium, als effect van de droogte, ook de NDVI laag is. Indien RS-beelden beschikbaar zijn (NB bewolking) dan zijn de indices berekend, waarbij gestreefd is naar het maken van een complete vlakdekkende kaart met een 20 m resolutie per periode van 10 dagen (decade). De kaarten die zo ontstaan zijn zogenaamde samenstelde, composietkaarten (Bijlage 8.2.7). Daarnaast is gekeken naar de effecten van beregening van een aantal bekende landbouwpercelen binnen de Provincie Gelderland op de gewasindices. Ook is gekeken naar de bepaling van het oppervlak aan open water binnen natuurgebieden, om zo te zien hoe vennen opdrogen en weer vernatten.

Met de NDWI en NDVI krijg je een momentopname, die beslist onvoldoende zegt over de aantasting van de biodiversiteit in de natuur. Bovendien zijn tijdseries van beide indices nodig om iets te kunnen zeggen over het herstelvermogen van de natuur.

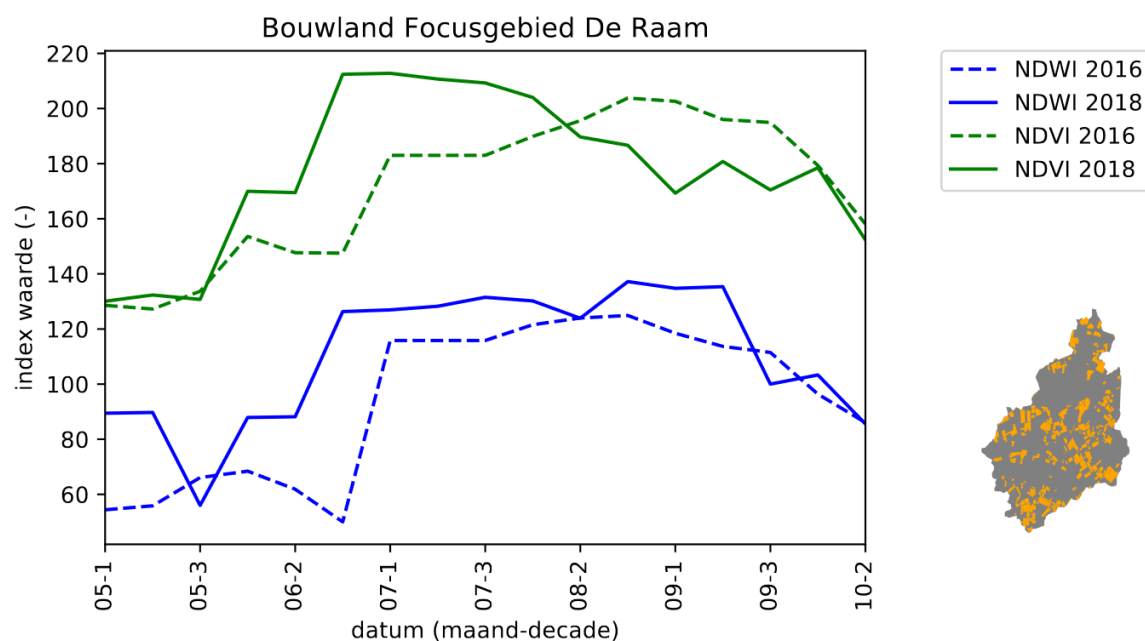
We hebben voor 2016 (grotendeels een 'normaal' jaar, m.u.v. periode eind mei-medio juni 2016; extreme neerslag in Noord-Brabant en Limburg) en 2018 (extreem droog jaar) de beide indices berekend voor het gehele projectgebied, op basis van Sentinel-2 gegevens. Deze hebben we per decade (periode van 10 dagen) verwerkt tot zogenaamde composiet-beelden (Bijlage 8.2.7), hetgeen leidde tot tenminste één vlakdekkende kaart per decade i.c. drie kaarten per maand. Zo kunnen we tijdreeksen maken en analyseren. We hebben het jaar 2017 niet meegenomen vanwege het grote aantal beelden met bewolking ('geen data'). We hebben ter illustratie voor deze Fase 1 van het project het focus-stroomgebied Hupselse Beek en de Hooge Raam eruit gelicht en indices geanalyseerd. Hieronder zijn de belangrijkste bevindingen beschreven.



Figuur 17: NDVI- en NDWI-indices in 2016 en 2018 voor focus-stroomgebied Hupselse Beek als geheel per decade voor periode 1 mei tot en met medio oktober.

Voor het stroomgebied van de Hupselse Beek zijn de NDVI en NDWI voor 2016 en 2018 uitgezet voor beide jaren van 1 mei t/m medio oktober. Te zien is dat de berekende NDVI en NDWI beduidend lager waren in 2018 vergeleken met het 2016 (Figuur 17) in de maanden juni t/m september. In de zomer van 2018 is de gemiddelde vegetatie-groenheid in Hupsel minder hoog dan in de zomermaanden van 2016. Daarnaast is te zien dat de NDVI een vertraging in de tijd kent in vergelijking met de NDWI. Tijdens droogte neemt eerst de NDWI af (minder water in vegetatie), vervolgens daalt ook de waarde van NDVI (minder gezonde vegetatie). In het stroomgebied kan niet berekend worden uit grond- of oppervlaktewater, wegens de geringe watervoorraad in het gebied. Er vindt ook geen wateraanvoer plaats. Remote sensing beelden leveren aldus informatie op over de droogte-toestand van de begroeiing.

Naast het focus-stroomgebied Hupselse Beek zijn ook indices voor de Hooge Raam bekeken, en wel de NDVI en NDWI voor specifiek het bouwland binnen de Hooge Raam (Figuur 18). In dat gebied vindt geen wateraanvoer plaats, maar kan wel berekend worden uit grondwater. Lagere waarden van de indices in september zijn waarschijnlijk het gevolg van afrijpende en geoogste gewassen. De NDWI in 2018 is in tegenstelling tot indexwaarden in Hupsel hoger dan die in 2016. De NDWI vertoont mogelijk effecten van beregening (meer water in de gewassen). Analoog aan het beeld voor Hupsel laat ook hier 2018 lagere NDVI-waarden zien in vergelijking met 2016 vanaf medio juli. Dat betekent dat de bouwlandgewassen er minder goed bij stonden in 2018. Of dit betekent dat eventuele beregening in 2018 onvoldoende effect heeft gehad op de toestand van de gewassen kan nog niet geconcludeerd worden. Dit vereist nadere analyse in Fase 2.

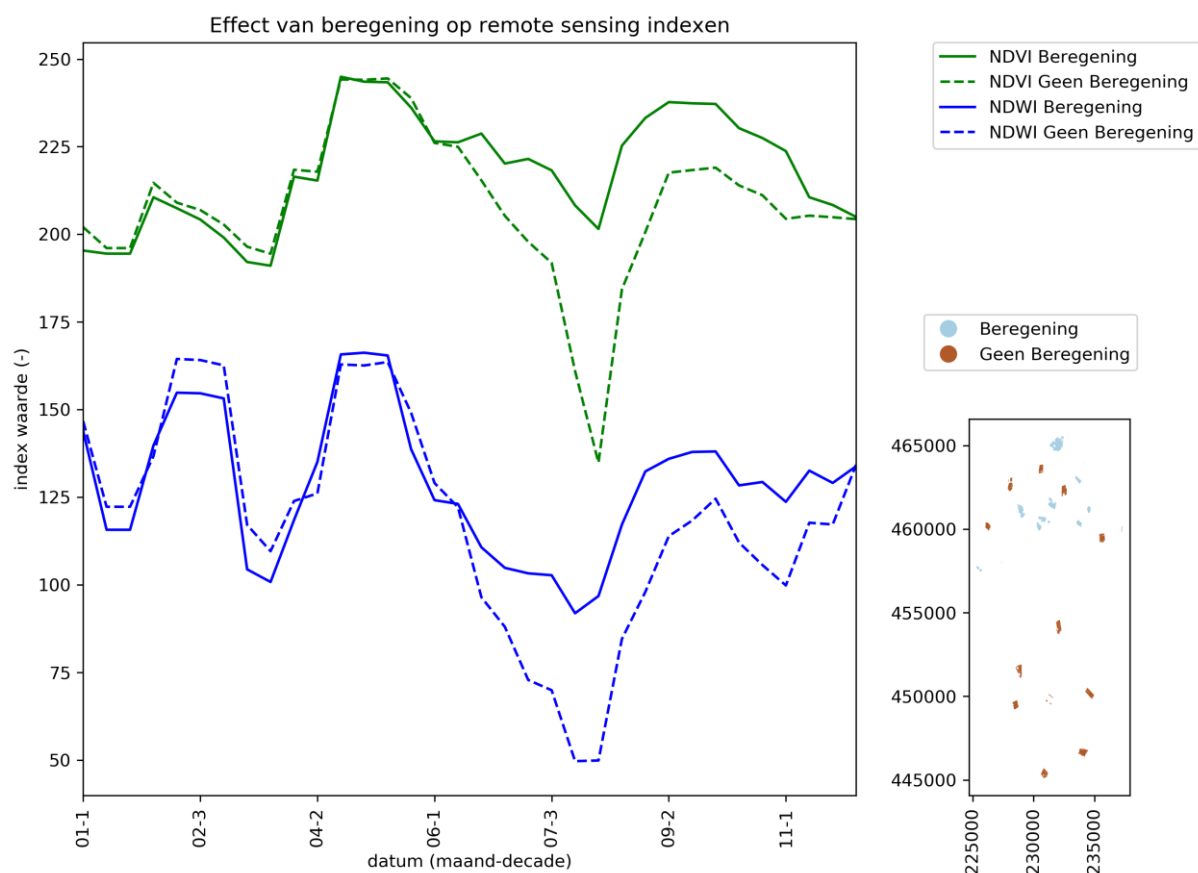


Figuur 18: NDVI- en NDWI-indices in 2016 en 2018 voor focus-stroomgebied Hooge Raam voor percelen bouwland per decade voor periode 1 mei tot en met medio oktober.

Voor een aantal specifieke percelen binnen de Provincie Gelderland is bekend of deze zijn beregend (mondelinge mededeling en informatie Teun Spek, 2019). De percelen zijn onderverdeeld in twee groepen: 1) geen irrigatie, graspercelen die niet zijn beregend in de zomer van 2018 en 2) irrigatie, graspercelen die wel zijn beregend in de zomer van 2018. Beregening onder droge condities leidt in principe tot een hogere NDWI- en NDVI-waarden door een lager vocht tekort in de bodem. Het effect van beregening is duidelijk zichtbaar in de indices NDVI en NDWI in Figuur 19 (rechtsonder). Voor beregende percelen zijn beide indices hoger vanaf juni 2018. Daarbij loopt de NDWI in de tijd gezien iets voor op de NDVI.

De beide indices kunnen aldus worden gebruikt om een kaart te maken waarop zichtbaar is dat er (waarschijnlijk) beregening heeft plaatsgevonden. Op deze kaart staan percelen met bepaalde gewassen (Basis Registratie Percelen BRP) die waarschijnlijk zijn beregend tijdens de droogte. Hiermee kan de basis gelegd worden voor een inschatting van het beregende areaal en de totale beregening in een gebied.

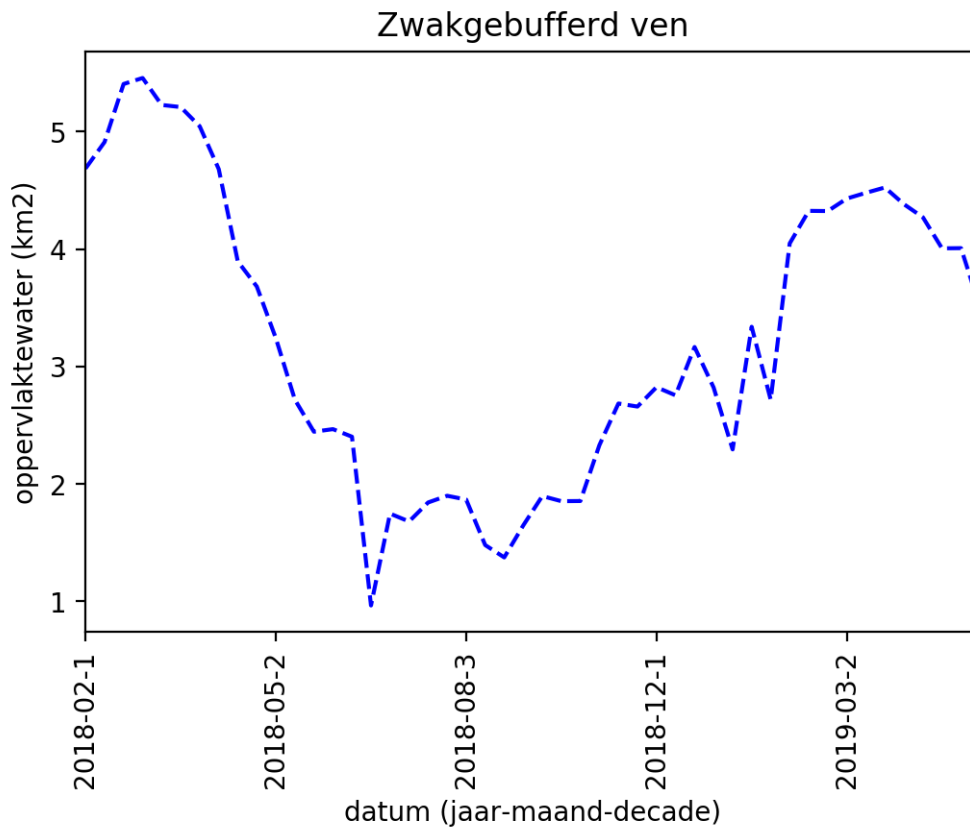
Uit de NDVI en NDWI kan ook een ruwe schatting worden gemaakt van de gewasopbrengst. Daar is veel onderzoek aan gedaan, o.a. door Quarmby et al. (1993) en Bolton & Friedl (2013), waarbij de schatting is gebaseerd op kennis over het type gewas. Het paste niet binnen deze fase van het project deze optie uit te werken. Zoals vermeld vraagt de interpretatie van remote sensing beelden ter vaststelling van droogteschade aan de natuur een zeer gedegen kennis van het terrein.



Figuur 19: Effect van berekening op berekende RS-gewasindices NDVI en NDWI in de periode januari t/m medio november 2018 voor een aantal percelen binnen de Provincie Gelderland (percelen bron: Teun Spek, 2019).

Effecten van de droogte op natuurlijke vegetaties zijn lastiger vast te stellen. Verdroging van natte natuurgebieden kan bijvoorbeeld leiden tot een verhoogde afbraak van organische stof waarbij voedingsstoffen in de bodem vrijkomen, zodat de productiviteit van de vegetatie juist toeneemt. Veenvossen kunnen wit kleuren, andere planten die verdrogen worden weer bruin. Dat maakt de interpretatie zonder goede kennis van het terrein erg lastig.

Tijdens de droogte van 2018 zijn beken en vennen drooggefallen door dalende grondwaterstanden in stroomgebieden. Droogval van een beek of ven kan grote effecten hebben op de flora en fauna van het watersysteem. Om deze droogval via remote sensing beelden te detecteren is een verkenning gedaan voor vennen met het waterdetectieproduct van Sentinel 2 (Bijlage 8.2.7), in combinatie met de nationale natuurbeheertype-kaart (bron: Bij12). Met de natuurbeheertypekaart zijn alle gekarteerde vennen geselecteerd van het type No6.05 (natuurbeheertype zwak gebufferde vennen). Vervolgens is voor elk satellietbeeld van 2018 het aantal openwater gedetecteerde pixels gesommeerd (Figuur 20). Te zien is dat in het voorjaar en zomer van 2018 het totale areaal openwater van vennen in/van het natuurbeheertype No6.05 daalt, richting februari/maart 2019 stijgt en daarna weer daalt. Remote sensing informatie kan dus worden gebruikt om vlakdekkend uniform vast te stellen of en hoe snel vennen droogvallen. NB: de open-water-detectie werkt alleen voor waterlichamen met enige omvang door de pixelgrootte van 20 m. Dat maakt het lastig/onmogelijk om (smalle) beken te analyseren met de waterdetectie van Sentinel-2.



Figuur 20: Open-water-detectie op basis van Sentinel-2 beelden. Oppervlaktewater (areaal via aantal pixels) binnen natuurbeheertype No6.05 (zwak gebufferd ven) in 2018 voor gehele projectgebied.

Een specifiek voorbeeld van een ven is te zien in Figuur 21. Het Fochtelooverveen kent meerdere plekken met open water. De blauwe rand in de figuur is berekend op basis van remote sensing informatie en geeft de grens/oever weer op een bepaalde datum.



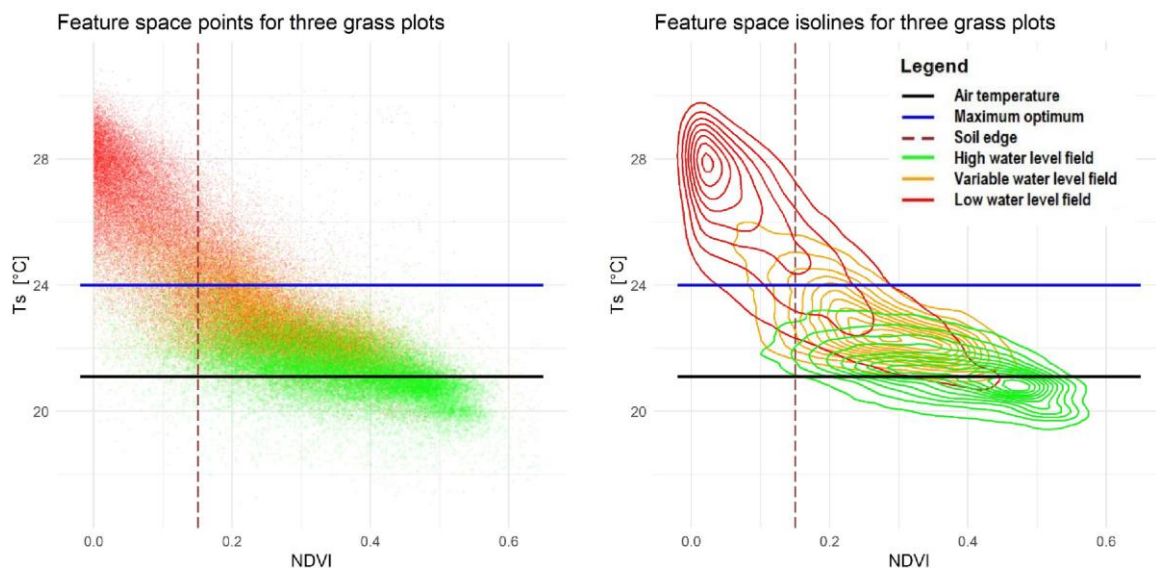
Figuur 21: Open water detectie via remote sensing. Open water - ven in gebied Fochtelooverveen.

Tijdens de droogte van 2018 zijn er voor Noord-Brabant in augustus 2018 diverse airborne RS-beelden ingewonnen van zowel natuur als agrarische gebieden (in opdracht van provincie). Het consortium brengt in Fase 2 zelf extra ingevlogen gebieden in (Hupsel, Stegeren, Hoge Veluwe). Deze airborne RS-beelden hebben een hoge ruimtelijke resolutie ($\pm 0,5$ m), waardoor effecten van droogte op een kleine schaal kunnen worden bekeken. Tijdens de inwinning is er gebruik gemaakt van drie sensoren: RGB (zichtbaar licht), NIR (infrarood)

en TIR (oppervlaktetemperatuur). Deze beelden zijn vervolgens gebruikt in een WUR-ACT-project in mei-juli 2019 (Academic Consultancy Training) van de Wageningen Universiteit (begeleiding door KnowH2O). Een studententeam van zes leden heeft aan de hand van de onderstaande vraagstelling de toepasbaarheid (tijdens droogte) van de beelden verkend:

Hoe kan stress bij vegetatie door hitte en/of droogte worden gedetecteerd en vervolgens worden gevolgd in de ruimte en tijd door middel van remote sensing opnames?

Het ACT-studententeam heeft met de ingewonnen beelden onder andere een thermische droogte index berekend (TVDI; Sandholt et al. (2002)). Deze index is gebaseerd op een vegetatie-index (NDVI) en oppervlaktetemperatuur (TIR). De variatie van deze twee parameters zijn in een 'feature space plot' weergegeven (Figuur 22), waarin drie velden in de regio Someren zijn gebruikt met een wisselende vochthuishouding (droog, droog tot nat, nat). De 'feature space plot' toont welk effect de droogte (vochthuishouding) heeft op de verschilden parameters (NDVI en TIR). Vervolgens kunnen er gebieden in de 'feature space plot' worden gedefinieerd waarin de vegetatie stress ervaart. Deze gebieden worden gedefinieerd met de kennis over vochthuishouding van de velden, de maximale optimale temperatuur van het gewas en luchttemperatuur. In de analyse is onderscheid gemaakt in vegetatietypes. In Figuur 22 is het vegetatietype 'gras' te zien. Dit zijn graspercelen. Er is ook gekeken naar heide echter wat het signaal daar minder sterk.



Figuur 22: Gewasindex NDVI vs. oppervlaktetemperatuur. 'Feature space plot' weergegeven voor drie graslanden in regio Someren met wisselende vochthuishouding (droog, droog tot nat, nat). Verticale lijn: NDVI-waarde voor kale grond. Horizontale lijnen: luchttemperatuur en maximale optimale temperatuur voor gewas.

Enkele andere bevindingen van het ACT-team waren:

- Met de airborne RS-beelden kan droogtestress worden gedetecteerd. Het is echter lastig deze droogtestress te valideren door de afwezigheid van gronddata. De validatie is nu visueel gedaan aan de hand van de RGB-beelden;
- Plan vluchten op hete dagen rond het middaguur om hittestress te detecteren. Voor het optreden van hittestress moet de luchttemperatuur namelijk hoger zijn dan de maximale optimale temperatuur van de vegetatie;

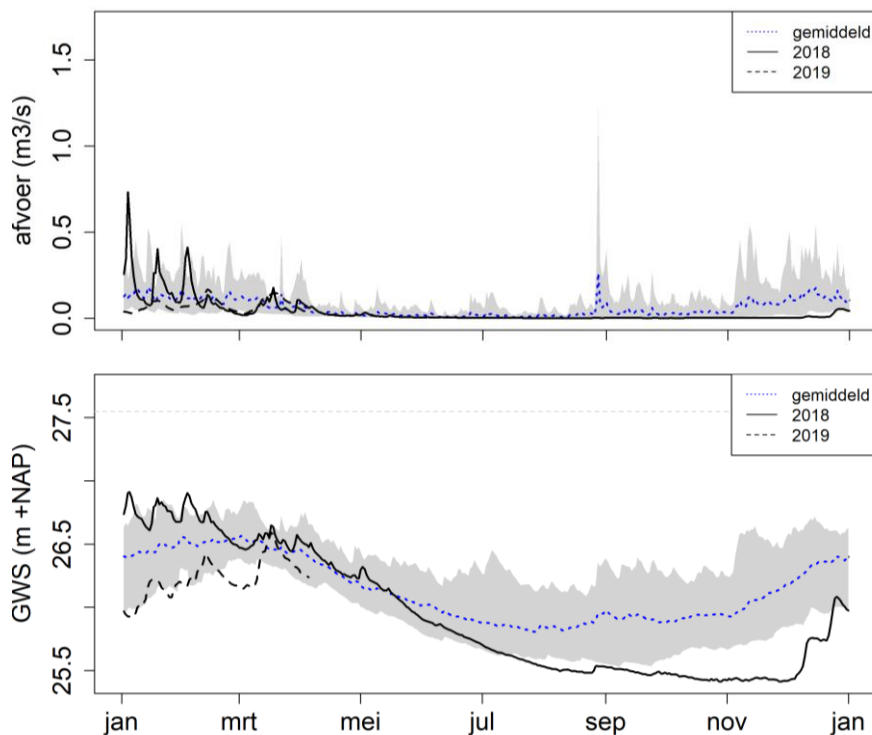
Tijdens de inwinning van 2018 is er geen SWIR-sensor (short wave infra-red) gebruikt. Er wordt aanbevolen deze bij toekomstige inwinning wel te gebruiken, omdat deze sensor de vochthuishouding van het waargenomen aardoppervlak (vegetatie en bovenste bodemlaag) kan meten.

3.8. Integratie van gegevens in focus-stroomgebied

We analyseren het gehele projectgebied op basis van meetlocaties, focus-stroomgebieden en RDO-regio's. Focus-stroomgebieden zijn geschikte hydrologische eenheden, waarvoor waterbalansen op basis van een combinatie van metingen (o.a. goede afvoer-tijdreeksen) en berekeningen kunnen worden opgesteld. De relevante hydrologische variabelen worden apart én in samenhang beschouwd. We analyseren in het gehele project een aantal focus-stroomgebieden op basis van hierboven genoemde criteria, die samen qua karakteristieken het projectgebied afdekken. We maken in deze fase van het project een start hiermee: we illustreren de analyse van twee gebieden: het stroomgebied van de Hupselse Beek, met een uitstap naar het stroomgebied van de Hooge Raam. Tevens vergelijken we de waterbalansen van enkele focus-stroomgebieden.

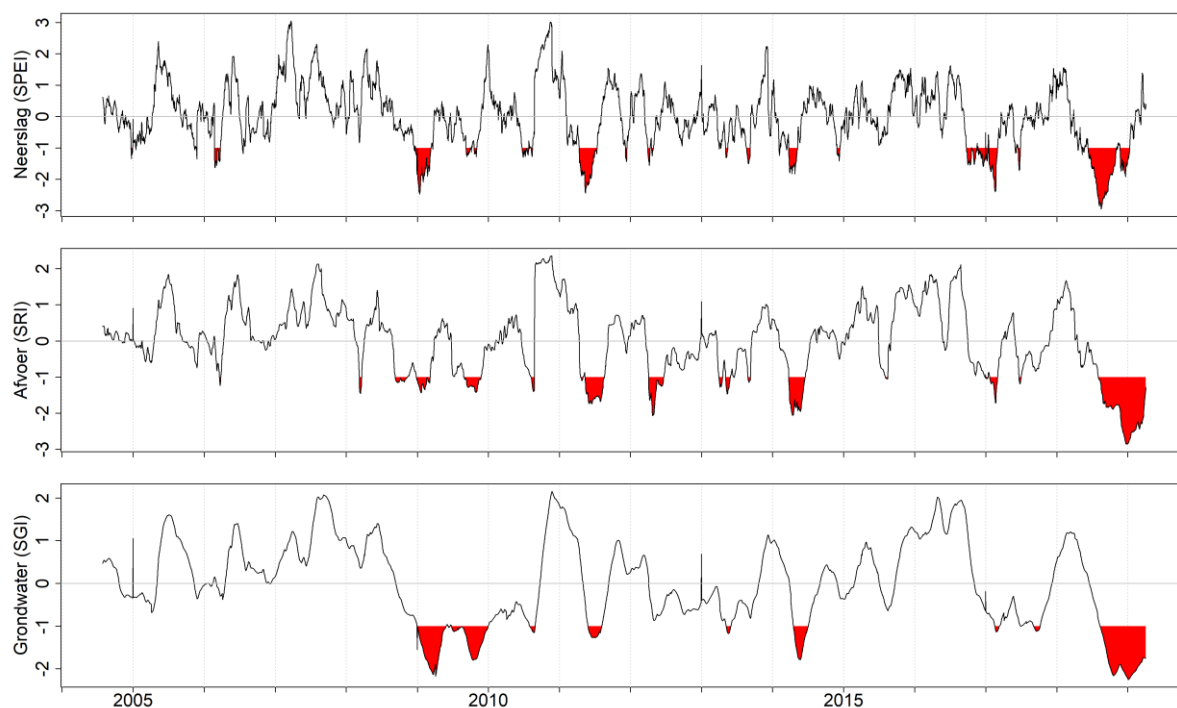
Hupselse beek

Voor het stroomgebied van de Hupsel Beek zijn meetreeksen beschikbaar van grondwaterstanden, debiet van de Hupselse Beek, neerslag en verdamping voor de periode 2004-2019. Voor het debiet en meteorologische gegevens van station Twente zijn meetreeksen beschikbaar van 1976-2019. De ernst van de droogte van 2018 is goed zichtbaar in het debiet en grondwaterstanden bij vergelijking met het jaarlijks regime over de periode 2004-2017 (Figuur 23).

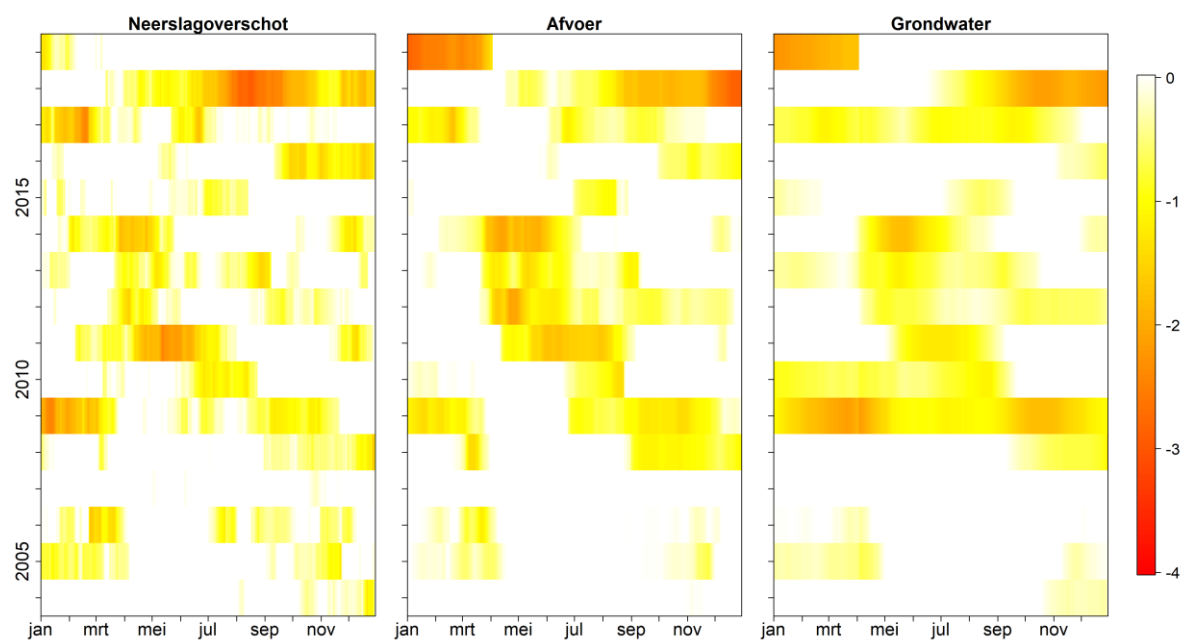


Figuur 23: Overzicht van het jaarlijks regime van afvoer (boven) en grondwaterstand (onder) in de Hupsel met het gemiddelde verloop (blauw) en het vlak (grijze band) waarbinnen 90% van de waarnemingen over de periode 2004-2017 valt (begrensd door het 5 en 95 percentiel). De metingen van 2018 en 2019 laten de ernst van de droogte in historisch perspectief zien.

Naast de rechtstreekse vergelijking met de historische waarden van debieten en grondwaterstanden zijn ook de droogte-indices bepaald voor het neerslagoverschot, afvoer en grondwater (Figuur 24 en Figuur 25). In deze reeksen is goed te zien hoe droog de zomer van 2018 was ten opzichte van de historische periode 2004-2019. Daarnaast zijn de verschillen zichtbaar tussen de droogtetypes. De start en het herstel van de meteorologische droogte zijn veel eerder zichtbaar dan die van de hydrologische droogte. In maart 2019 was er nog steeds sprake van hydrologische droogte, terwijl de meteorologische droogte al eind 2018 over was. Dit geeft een goed beeld van de reactiesnelheid van het hydrologische systeem.



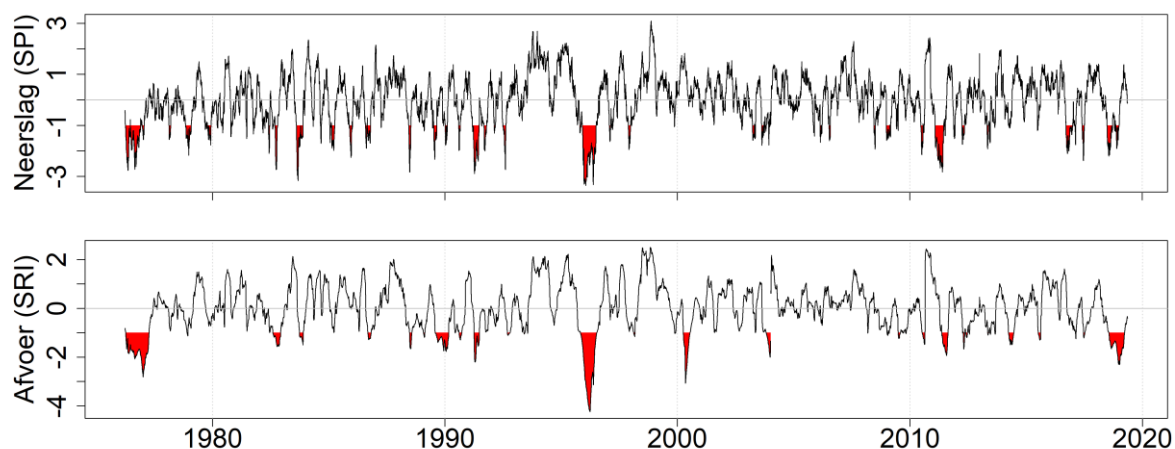
Figuur 24: Tijdreeksen van de berekende droogte indices voor de Hupsel voor neerslagoverschot, afvoer en grondwaterstand voor 2004-2019. De rode vlakken betreffen de periodes met matige (-1) tot extreme droogte (≤ -2). Voor de definitie en interpretatie van de gestandaardiseerde indices verwijzen we naar Bijlage 8.2.2



Figuur 25: Weergave van de waarden van de berekende droogte indices over tijd voor 2004-2019 voor de Hupsel voor neerslagoverschot, afvoer en grondwaterstand. Het kleurverloop van wit-geel-oranje-rood geeft de waarde van de droogteindices, van enigszins droog (< 0) tot extreem droog (≤ -2). Voor de definitie en interpretatie van de gestandaardiseerde indices verwijzen we naar Bijlage 8.2.2

Om het belang van lange meetreeksen en een juiste referentieperiode (zie ook Bijlage 8.2) te onderzoeken zijn ook de droogte-indices berekend voor de periode 1976-2019 voor het neerslagoverschot en de afvoer (Figuur 26). In deze lange periode komen duidelijk drie droogtegebeurtenissen naar voren: 1976, 1995-96 en 2018.

Hoewel de droogte van 2018 nog steeds een duidelijk signaal geeft, is het niet meer de meest extreme droogte uit de periode. Droogte is per definitie een relatief begrip (afwijkend van de normale situatie), daarom zijn lange tijdreeksen belangrijk voor de analyse.

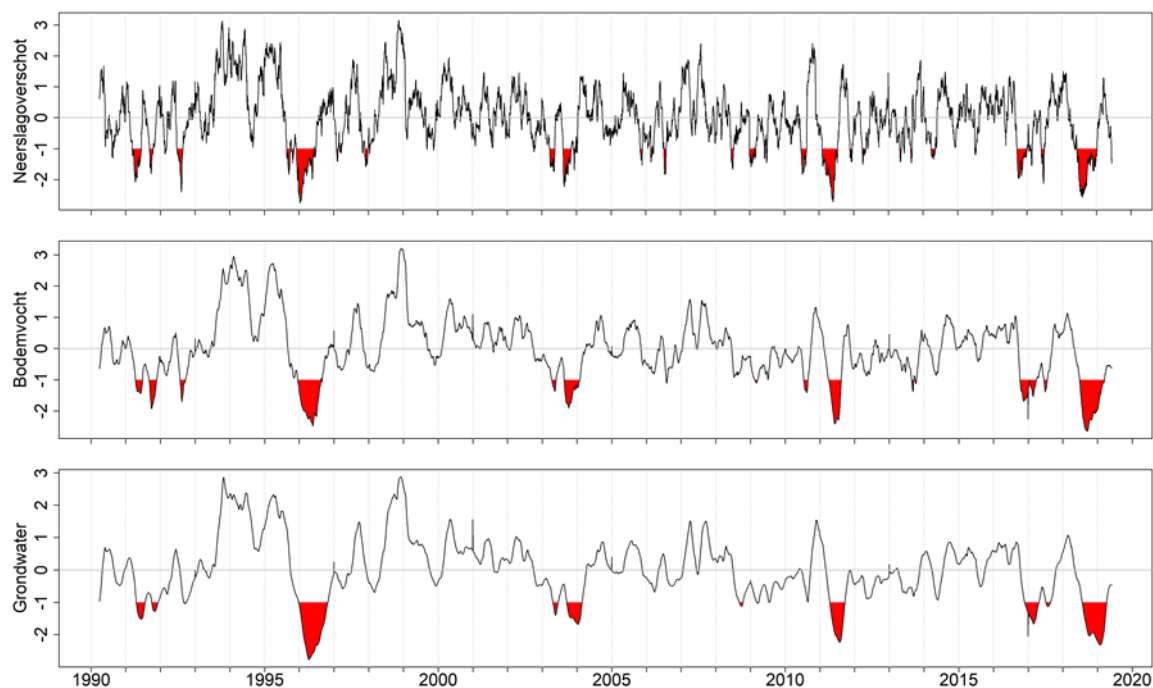


Figuur 26: Droogte indices voor neerslagoverschot en afvoer voor de periode 1976-2019 voor de Hupselse Beek.

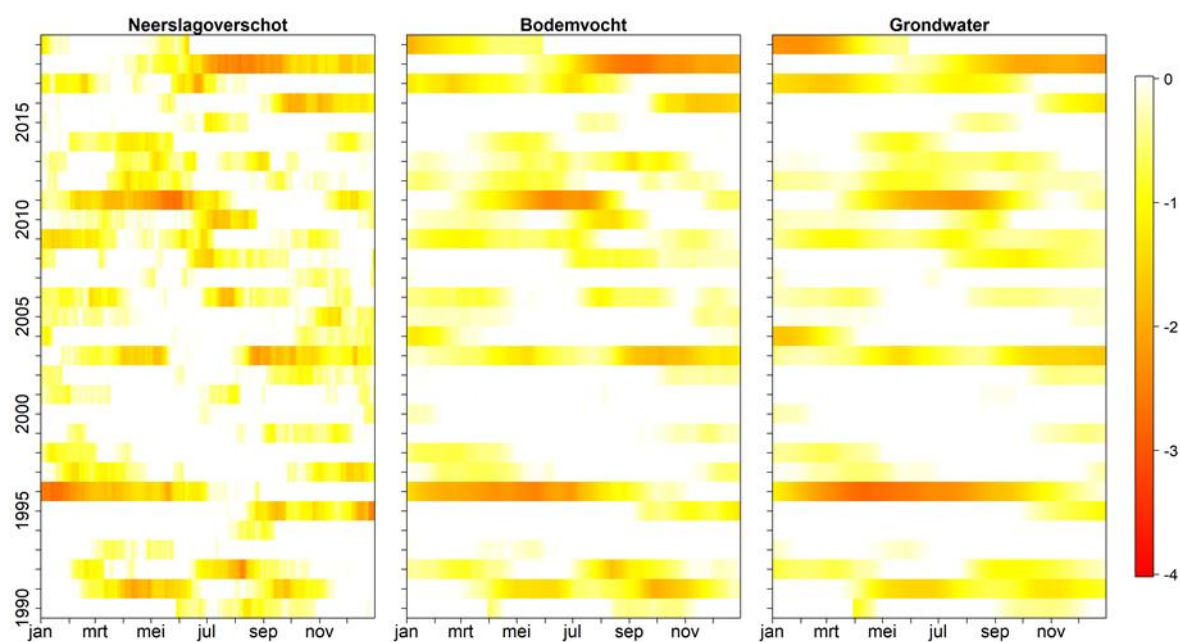
De droogte-indices in voorgaande figuren zijn gebaseerd op metingen. Door voor de meetlocaties voor grondwaterstanden SWAP-modellen op te stellen en te kalibreren op de gemeten grondwaterstanden, kan aanvullende informatie worden verkregen over de toestand van het bodemvocht en de transpiratiereductie van het gewas als gevolg van te droge of te natte bodemvochtcondities. Bovendien zijn op basis van de SWAP-modellen de tijdreeksen verlengd tot en met 31 mei 2019.

SWAP-berekeningen tot en met 31 mei 2019 (Figuur 27, Figuur 28 en Figuur 29) geven inzicht in de ontwikkeling van bodemvochtdroogte. Deze is in 2018 als extremer gekarakteriseerd dan de grondwaterdroogte. Ook start de bodemvochtdroogte eerder dan de grondwaterdroogte (Figuur 28); de start is nagenoeg gelijk aan die van de meteorologische droogte. De grondwaterdroogte begint later; er is sprake van enige vertraging in de doorwerking van de droogte. Eind september neemt de meteorologische droogte af. Zowel de bodemvochtdroogte als de grondwaterdroogte lopen door tot eind 2018. De bodemvochtdroogte neemt in 2019, volgens verwachting, sneller af dan de grondwaterdroogte.

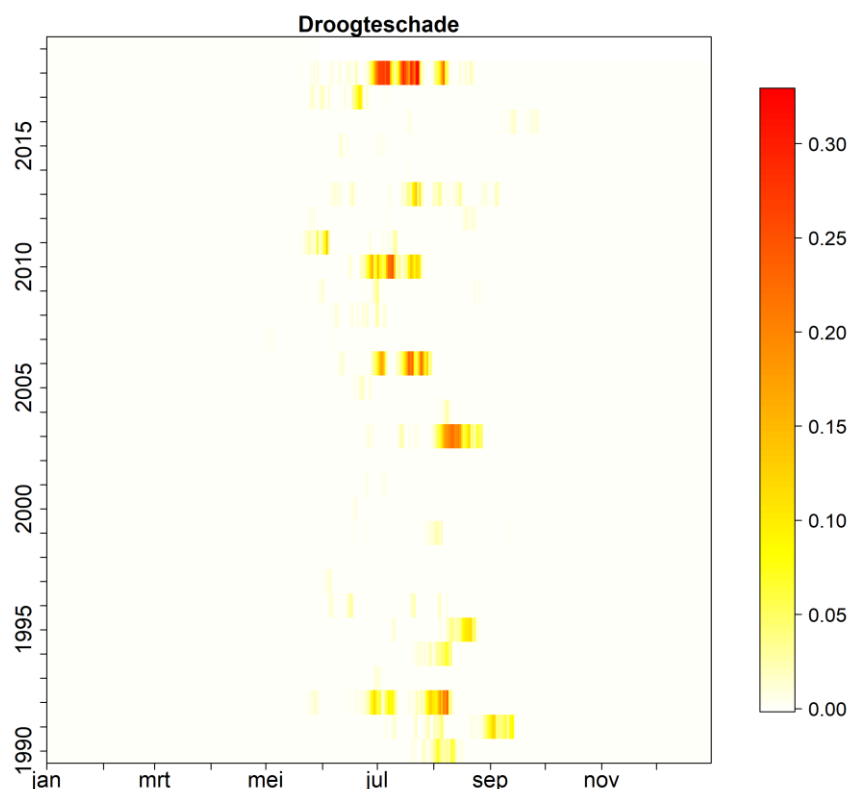
Met SWAP wordt ook de transpiratiereductie van het gewas gesimuleerd; de transpiratiereductie als gevolg van te droge condities (droogteschade) geeft een goede indicatie van de directe effecten van vochtcondities op de gewasgroei. Figuur 29 geeft de droogteschade voor een maisperceel in Hupsel, voor 2018 ten opzichte van het verleden. De periode met transpiratiereductie was voor 2018 historisch heftig en langdurig. Overigens is het goed om te realiseren dat, indien bodemvochtmetingen beschikbaar zijn, deze gebruikt kunnen worden om de SWAP-modellen te verbeteren.



Figuur 27: SWAP Hupsel – droogte-indices. Metingen met simulaties verlengd tot 1 juni 2019 en tevens zijn aanvullende toestandsvariabelen gesimuleerd, waarmee een droogteindex voor bodemvocht kan worden opgesteld.



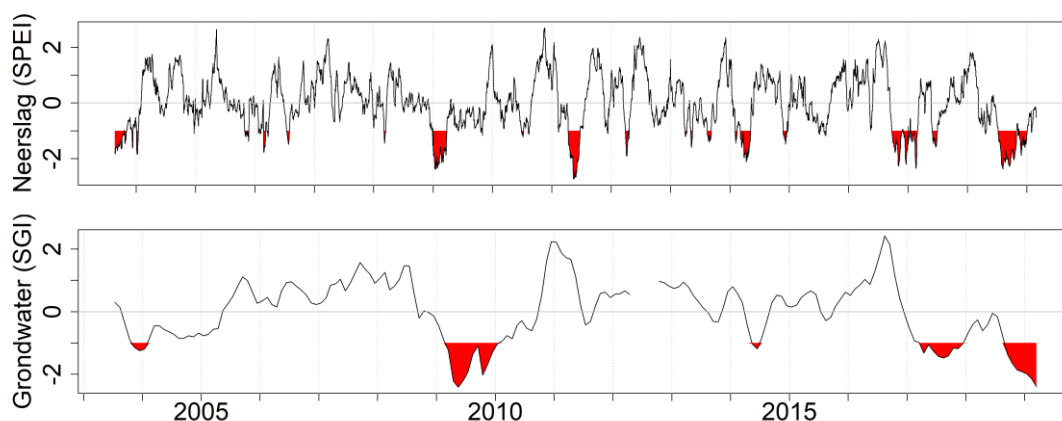
Figuur 28: SWAP-Hupsel – droogte-indices. Het kleurverloop van wit-geel-oranje-rood geeft de waarde van de droogteindices, van enigszins droog (<0) tot extreem droog (≤ -2). Voor de definitie en interpretatie van de gestandaardiseerde indices verwijzen we naar Bijlage 8.2.2



Figuur 29: SWAP-Hupsel – droogteschade.

Hooge Raam

Een ander voorbeeld gegeven we hier voor de Hooge Raam (Figuur 30). In dit gebied zijn dezelfde droogtegebeurtenissen zichtbaar als in de Hupsel: 2009 en 2018. Ook zien we hier weer de vertraging in het systeem door de latere start van de hydrologische droogte ten opzichte van de meteorologische droogte. De grondwaterstanden herstellen ook duidelijk later (vergelijk SGI Hupsel, Figuur 24 en SGI Hoge Raam, Figuur 30). Hierin is ook het verschil binnen Nederland zichtbaar; herstel van de hydrologische droogte is minder in de Hooge Raam in maart 2019 dan in Hupsel. Grondwaterstanden in de Hooge Raam zijn dus relatief nog lager.



Figuur 30: Droogte indices voor neerslagoverschot en grondwater voor de Hooge Raam voor 2003-2019.

Door de droogte-indices in één overzicht weer te geven ontstaat uniform inzicht in de doorwerking van meteorologische droogte via bodemvocht en grondwater naar hydrologische droogte. Zo laat Figuur 30 zien dat niet elke meteorologische droogte doorwerkt in het ontstaan van een droogte in de grondwaterstand. Anderzijds laat Figuur 28 duidelijk zien dat de meteorologische droogte weliswaar voorbij kan zijn, maar dat

de effecten na-ijlen in andere compartimenten van het bodem-water-systeem. Door het gebruik van gestandaardiseerde indices kan de mate van droogte voor de verschillende compartimenten én het herstel in de tijd na de droogte, tussen gebieden vergeleken worden en gerelateerd worden aan gebiedskenmerken. Tevens worden de droogte-componenten in historisch perspectief geplaatst, waarbij ook het inzicht in de maanden vóórdat en de maanden waarin droogte optreedt van belang is voor de handelingsruimte. ***Bij de omgang met droogte is het van belang te denken en te werken in perioden, indices en compartimenten van het bodem-water-atmosfeer systeem voor, tijdens en na een droogte.***

Waterbalansen

Een aanvullende manier om gegevens en modelanalyses te integreren in een focus-stroomgebied is het opstellen van waterbalansen voor de gebieden als geheel. Daarbij combineren we diverse bronnen van informatie:

- Meteodata via KNMI;
- Verdamping via remote sensing (RS): SATDATA;
- Bodemvocht indien beschikbaar (berging water in gebied);
- Grondwaterstanden (berging water in gebied);
- Veldmetingen afvoer via waterschap;
- Modelberekeningen LHM via LSW's;
- Gewasindices NDVI en NDWI via RS.

Tabel 4 toont berekende eerste versies van waterbalansen voor 2018 voor een aantal focus-stroomgebieden, alle zonder aanvoer van oppervlaktewater naar de gebieden. De bergingsverandering in de waterbalansen is berekend aan de hand van verschil in grondwaterstanden tussen het einde en het begin van de balansperiode, met een bergingscoëfficiënt van 0,1. Een negatief bergingsgetal betekent een netto daling van de watervoorraad in het gebied, zijnde een extra verliesterm van water voor het gebied. Dat water kan alleen het gebied verlaten via verdamping of afvoer, daarmee wordt het een positief getal op de waterbalans als bron van water. Deze interne bron is dan blijkbaar aangewend om óf afvoer óf de verdamping ter vergroten/in stand te houden.

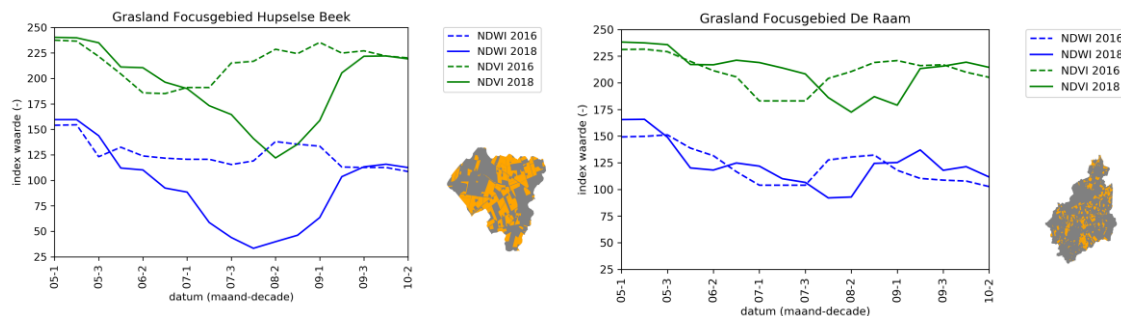
Tabel 4: Berekende waterbalans Hupselse Beek, Hooge Raam, Someren, Vlootbeek en Turfvaart voor het kalenderjaar 2018. LSW's van LHM zijn gecombineerd tot stroomgebieden.

Waterbalans LSW's uit LHM	Hupselse Beek	Hooge Raam	Someren	Vlootbeek	Turfvaart
2018 [mm/jaar]					
neerslag	587	693	606	551	671
werkelijke verdamping	454	579	492	497	539
afvoer	161	171	120	52	204
aanvoer	0	0	0	0	0
verandering berging (neg=uitputting)	-68	-58	-40	-33	-92
balansberekening	40	1	34	35	20
Andere bronnen van data					
<i>gemeten afvoer in veld bij stuw</i>	174	226		59	
<i>transpiratie reductie</i>	177	81	160	153	97
<i>SATDATA werkelijke verdamping</i>	444				

De werkelijke verdamping voor Hupsel is berekend met het LHM, maar ook uitgerekend met SATDATA. Te zien is dat er een redelijk tot goede overeenkomst is tussen de berekende verdamping met LHM met de berekende SATDATA. De berekende transpiratiereductie leidt tot minder gewasproductie in de gebieden en varieert tussen de gebieden. Dit kan zijn oorsprong hebben in de berekening van gewassen uit het grondwater. De berging van water in de gebieden is uitgeput in 2018. Te zien is dat voor een drietal gebieden de berekende afvoer spoort (Hupsel, Vlootbeek) dan wel afwijkingen vertoont (Hooge Raam) ten opzichte van

de gemeten afvoer. Verdere analyse van waterbalansen is nodig in Fase 2, want de afvoermetingen dienen ook als controlemiddel voor modelberekeningen.

Tenslotte volgt nog een integratie van de resultaten van de waterbalans, en dan met name van de verdamping, met berekende gewasindices uit RS-informatie. We nemen ter illustratie voor de focus-stroomgebieden Hupsel en Hooge Raam de berekende NDVI en NDWI voor grasland voor de periode mei t/m 2^e decade oktober voor zomerseizoenen (2016 en) 2018 in oenschouw (zie ook Figuur 17 en Figuur 18).



Figuur 31: Berekende vegetatie-indices NDVI en NDWI voor grasland (oranje aangegeven in plaatjes gebied) per decade voor mei t/m 2^e decade oktober voor de jaren 2016 en 2018. Links focus-stroomgebied Hupselse Beek, rechts Hooge Raam.

Naarmate de verdamping van grasland in een gebied hoger is, verwachten we een hogere index-waarde (die op een identieke manier voor het gehele projectgebied is berekend). Te zien is in Figuur 31 dat voor grasland in het gebied van de Hupselse Beek in 2018 de NDVI-waarde duidelijk verder zakt en lager is dan voor grasland in de Hooge Raam. Hetzelfde geldt voor de NDWI-waarde. Deze resultaten sporen met het beeld dat de waterbalans voor beide gebieden ons geeft.

We gaan in Fase 2 voor een selectie van de focus-stroomgebieden deze analyse en integratieslag uitvoeren, waarbij de selectie op basis van gebiedseigenschappen (gedekte variatie binnen projectgebied) en beschikbare goede velddata wordt gebaseerd.

3.9. Natuurlijke vegetatie – LMF waarnemingen

Een droge periode kan op verschillende manieren de samenstelling van de vegetatie beïnvloeden. Droogte kan zorgen voor een gebrek aan bodemvocht, het kan leiden tot een versnelde of juist vertraagde afbraak van organische stof, onder andere via invloed op de samenstelling van het bodemleven, en het kan invloed hebben op de zuurgraad van de bodem. Deze veranderingen kunnen uiteindelijk leiden tot een structurele verandering in de soortensamenstelling. Zulke veranderingen gaan vaak langzaam en zijn meestal pas zichtbaar in de jaren na een ernstige droogteperiode. Sommige soorten kunnen verdwenen lijken, maar daarna toch tevoorschijn komen nadat ze als zaad in de bodem hebben overleefd. Andere soorten lijken zich in eerste instantie te kunnen handhaven, waarna ze alsnog verdwijnen, bijvoorbeeld doordat ze worden weggeconcentreerd door snel groeiende soorten die profiteren van de voedingsstoffen die vrijkomen bij de afbraak van organische stof. Een en ander betekent dat de gevolgen voor de vegetatie van de 2018-droogte, grotendeels pas in de jaren daarna zichtbaar zullen worden. We hebben het volgende systeem opgezet om die gevolgen de komende jaren te monitoren.

Om de veranderingen te kunnen signaleren zijn permanente kwadraten nodig (pq's): vaste proefvlakjes (plots) in het vegetatiedek waar gedurende een reeks van jaren de soortensamenstelling wordt genoteerd, dus een 'vegetatieopname' wordt gemaakt. Sinds 1999 werken de provincies samen met het Centraal Bureau voor de Statistiek aan een meetnet van pq's: het Landelijk Meetnet Flora (LMF) in het kort. Het 'Landelijk Meetnet Flora - Milieu- en Natuurkwaliteit' (LMF-M&N) is ontwikkeld door provincies, rijksoverheid en terreinbeheerders en is onderdeel van het Netwerk Ecologische Monitoring (NEM). Het NEM is een samenwerkingsverband van overheden ten behoeve van de inwinning van natuurgegevens voor beleid. Partners in het NEM zijn de ministeries van LNV en IenW, PBL, CBS en provincies. Het NEM probeert zo veel mogelijk te voorzien in de behoefte aan cijfers over de ontwikkelingen in de natuur door bestaande meetnetten af te stemmen op de informatiebehoefte van de rijksoverheid, en indien nodig, nieuwe meetnetten te ontwikkelen. De informatiebehoefte bestrijkt niet alleen het natuurbeleid in engere zin, maar

ook het landschapsbeleid, het bosbeleid, het milieubeleid en het waterbeleid, voor zover het de ecologische aspecten betreft.

Het doel van het LMF luidt: “*Het leveren van landelijke en regionale trends van de ontwikkelingen in de vegetatiesamenstelling in relatie tot verzuring, vermesting en verdroging*” (Anonymous, 2018). Van het CBS (T. van der Meij) ontvingen wij alle LMF-opnamen van de zandprovincies. Het gaat om 34967 opnamen verdeeld over 7155 plots (pq's), wat betekent dat in de 20 jaar dat het LMF bestaat een plot gemiddeld bijna vijf keer is opgenomen. De handleiding van het LMF (Anonymous, 2018) beveelt tegenwoordig een opnamefrequentie van drie jaar aan.

Van iedere vegetatieopname hebben we de gemiddelde indicatiewaarden voor saliniteit, vochttoestand, voedselrijkdom en zuurgraad berekend. Voor de herkenbaarheid zijn alle waarden uitgedrukt op een schaal 1-10. Indicatiewaarden geven de standplaatsvoorkeur van een plantensoort aan op een ordinale schaal: een schaal waarin alleen de rangorde van belang is, en niet de absolute waarde. Indicatiewaarden zijn gebaseerd op deskundigenoordeel, veldmetingen en literatuuronderzoek. Ze blijken vaak uitstekend te correleren aan metingen in het veld. Tevens is van iedere opname de gemiddelde natuurwaarde berekend. Er zijn verschillende systemen om op basis van hun soortensamenstelling vegetatieopnamen te waarderen, waarvan 'de methode Gelderland' (Hertog & Rijken, 1992) het beste overeenkomst met het oordeel van deskundigen (Witte et al., 2011b), zodat we die hier aanhouden.

Tabel 5: Beschrijving indicatiewaarden.

Saliniteit S	1 = zoet t/m 10 = zout Voorbeeld: Holpijp t/m Zeekraal
Vochttoestand F	1 = zeer droog t/m 10 = zeer nat Voorbeeld: Zandzegge t/m Dotterbloem
Voedselrijkdom N	1 = zeer arm t/m 10 = zeer rijk Voorbeeld: Ronde zonnedauw t/m Grote bandnetel
Zuurgraad R	1 = zuur t/m 10 = basisch Voorbeeld: Schapenzuring t/m Parnassia

Met voor deze studie ontwikkelde software (LMF_TREND) hebben we vervolgens per plot berekend: de gemiddelde indicatiewaarde en natuurwaarde, de trend in deze indicatiegetallen, en de statistische significantie van deze trends. Figuur 32 geeft een kaartbeeld van de gemiddelde vochtindicatie van de geselecteerde plots. Dergelijke kaarten zijn er ook van de indicatiewaarden voor saliniteit, voedselrijkdom, zuurgraad en natuurwaarde. In Figuur 33 is de trend in de vochtindicatie over de meetperiode vanaf 1999 weergegeven. Ook niet-significante trends zijn gekleurd (blauw: natter, rood: droger) omdat een ruimtelijke clustering van niet-significante trends (bij $p < 0.05$) wel significant kan zijn (hierop hebben we echter niet getest). De uitkomsten zijn opgenomen in een interactieve GIS-kaart (visualisatie-tool; zie Bijlage). Door te klikken op een plot komt een grafiek met de ontwikkeling van de indicatiewaarde in de tijd tevoorschijn (Figuur 34). Deze kaarten zijn bruikbaar bij integrale analyses van gebieden waarin aanvullende informatie, vooral over de grondwaterstand nodig is om bepaalde trends te verklaren. Zo laat bij nadere beschouwing de trendkaart (inzet Figuur 34) enkele ruimtelijke patronen zien die zouden kunnen wijzen op een wijziging in het hydrologisch regime. Vlak langs de grote rivieren, bijvoorbeeld, indiceert de vegetatie dat de standplaats droger wordt, en in natuurgebied Bargerveen lijkt de westkant te vernatten en de oostzijde juist te verdrogen. Of er inderdaad sprake is van vernatting of verdroging, of dat deze trends toch moeten worden toegeschreven aan toeval, kan pas worden beoordeeld aan de hand van gedegen gebiedskennis en voldoende hydrologische informatie. Overigens zijn de indicatiewaarden ook bruikbaar voor een analyse van de plausibiliteit van hydrologische modellen: komen hun uitkomsten overeenkomen met waarnemingen aan de vegetatie in het veld (Van Ek et al., 2014; Witte, 2019; Witte et al., 2011a).

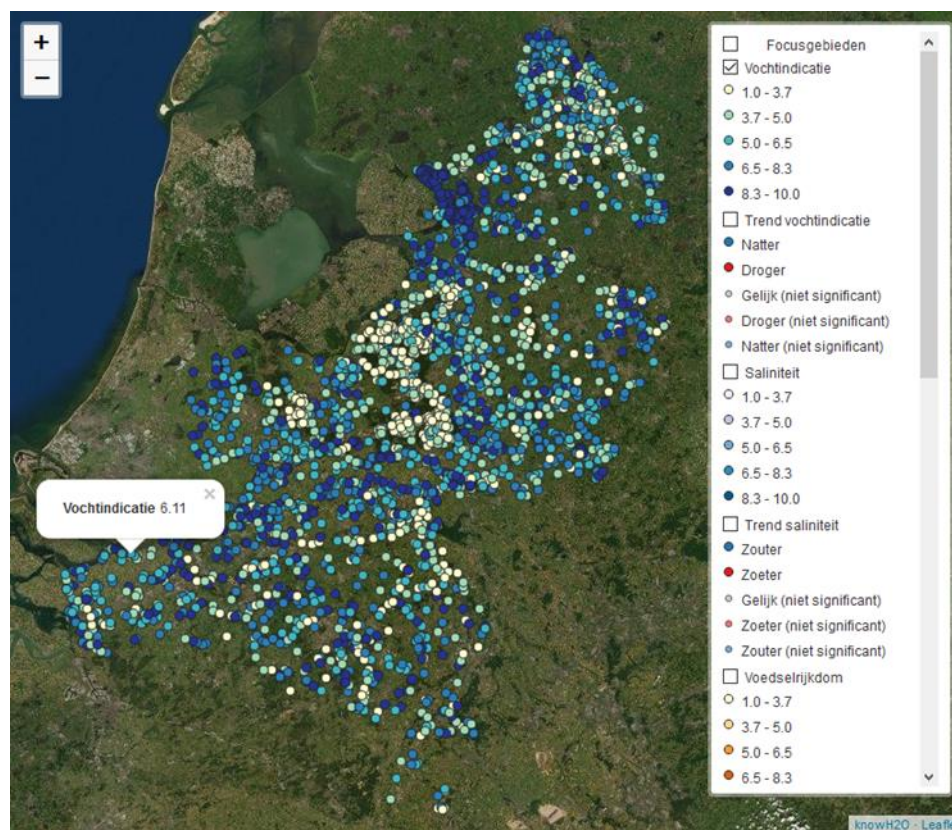
LMF_TREND genereert bovendien uitkomsten voor classificatie-eenheden, waarbij wij vooralsnog de 'interprovinciale inventarisatie-eenheid' (IPI) hebben aangehouden. In de resultaten per IPI is vaak een periodiciteit te herkennen, die te maken heeft met systematische verschillen in de selectie van plots die om de

zoveel jaar worden opgenomen (Figuur 35). In een vervolg zou bij de regressie rekening kunnen worden gehouden met deze periodiciteit (Box-Jenkins model).

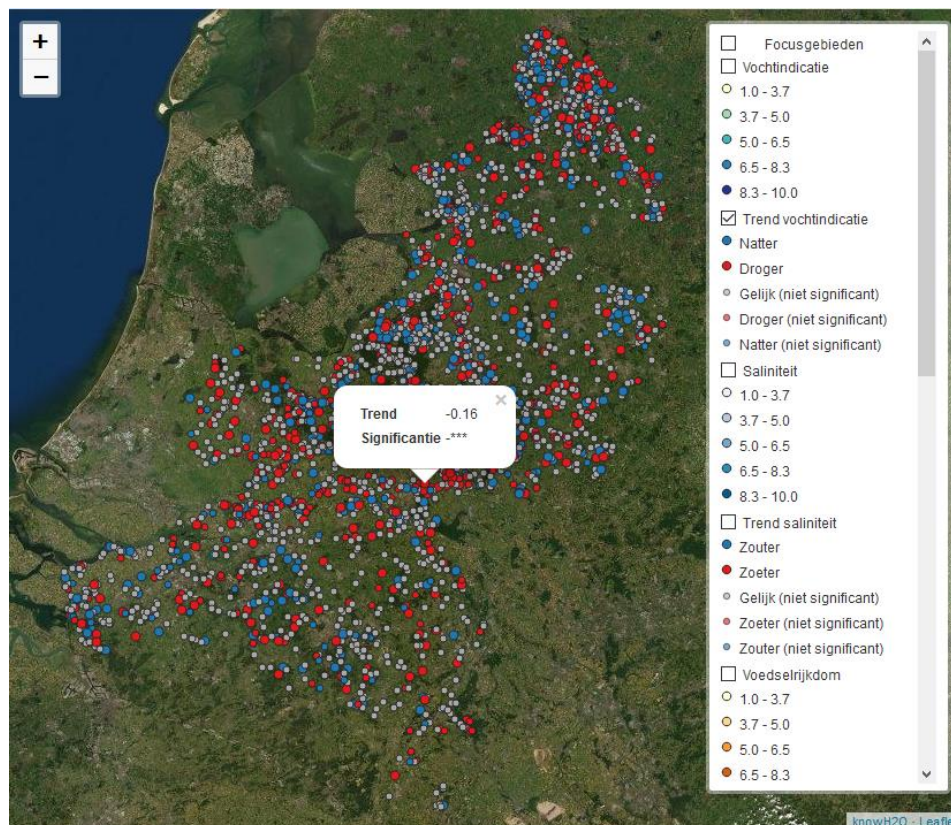
Veel plots zijn niet zinvol om te betrekken in de droogteanalyse. Buiten beschouwing gelaten zijn bijvoorbeeld plots gelegen in dennenakkers, omdat die zijn aangeplant en af en toe worden gekapt, en plots van vuilstortplaatsen en wegbermen. We hebben de analyse gedaan met alle soorten, maar ook met een lijst met soorten waarin bomen en struiken (fanerofyten) en planten met ondergrondse reserves (geofyten) zijn weggelaten (selectie gebaseerd op BioBase2003). Het buiten beschouwing laten van deze persisterende soorten, die naar we verwachten minder gevoelig zijn voor droogte, had echter nauwelijks invloed op de resultaten.

Wanneer de vegetatieopnamen van 2019 en later binnenkomen, willen we de software aanpassen zodat hij aangeeft hoeveel de indicatiewaarde afwijkt van de verwachting die volgt uit de trend uit de voorgaande jaren, en hoe significant die afwijking is. Daarmee kunnen de gevolgen van de droogte worden gekwantificeerd, echter mits aangevuld met ondersteunende informatie. Of een gesignaleerde significante trend ook ecologische betekenis heeft en wijst op bijvoorbeeld verdroging, kan alleen op basis van indicatiegetallen niet worden vastgesteld. De indicatiewaarden dienen te worden gebruikt in combinatie met andere waarnemingen en berekeningen, met name van de grondwaterstand, om met een redelijke grenzende waarschijnlijkheid uitspraken te kunnen doen over de oorzaken van de trend. Na afloop van de studie kan LMF-trend nog steeds worden ingezet om de langetermijngevolgen van de droge jaren 2018 en 2019 te monitoren.

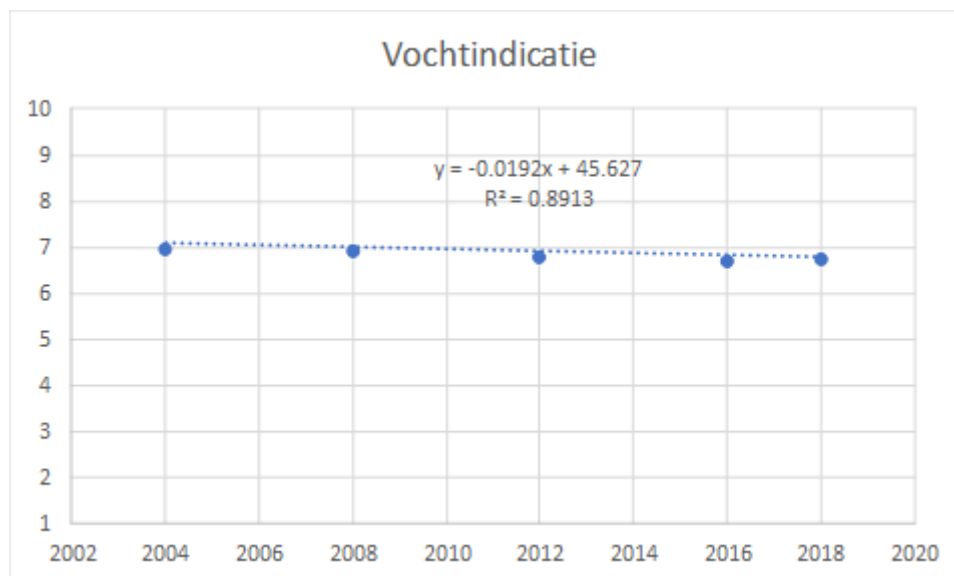
Een gedetailleerde beschrijving van de software en de analyse is opgenomen in Bijlage 8.2.6.



Figuur 32: Gemiddelde vochtindicatie van de geselecteerde LMF-plots.

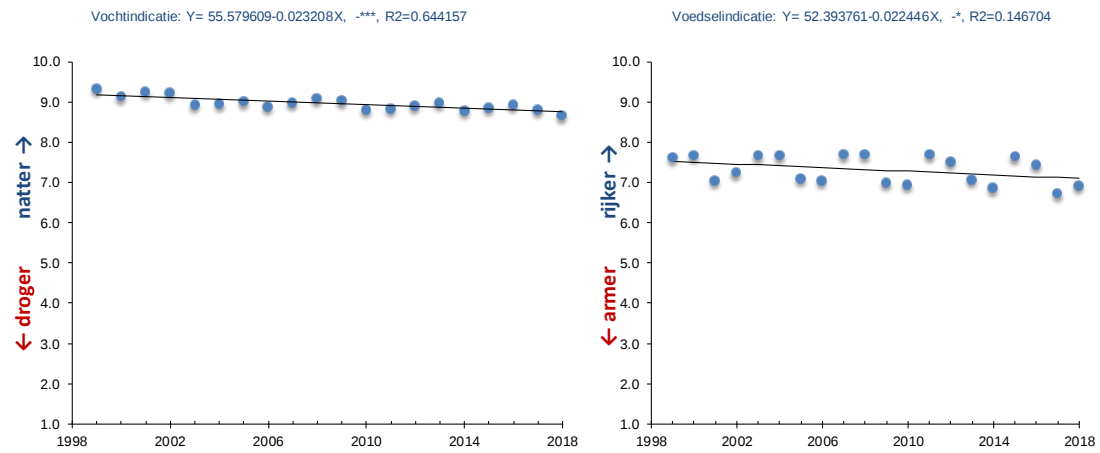


Figuur 33: Trend B in vochtindicatie mF, waarbij B volgt uit lineaire regressie op $mF(\text{jaar}) = A + B \cdot \text{JAAR}$. Betekenis symbolen: $B > 0$ en significant ($p < 0.05$) = grote blauwe stip; $B > 0.05$ en niet significant = kleine blauwe stip; $B < 0$ en significant = grote rode stip; $B < 0.05$ en niet significant = kleine rode stip; anders = kleine grijze stip.



Figuur 34: Uitklapmenu van een LMF-Trend plot.

363 Overige kleine moerasjes



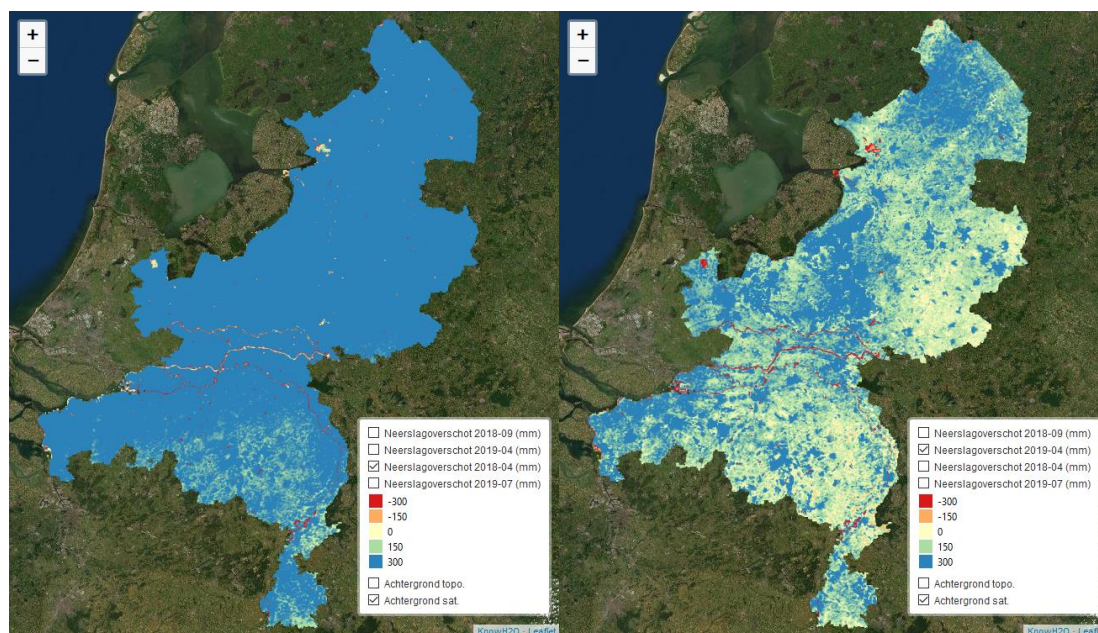
Figuur 35: Trend voor indicaties vochttoestand (links) en voedselrijkdom (rechts) van IPI 363 ('Overige kleine moerasjes').

4. Herstel van droogte

4.1. Neerslag en verdamping

Herstel van droogte in het bodem-grondwater-systeem vereist water. Dat water kan van twee kanten komen: uit de lucht via de neerslag en van de rivieren in de vorm van aanvoerwater. Zo heeft Waterschap Aa en Maas de gehele winter van 2018/2019 water aangevoerd. We richten ons hier eerst het neerslagoverschot.

Het berekende cumulatieve neerslagoverschot bepaalt de netto aanvulling van het bodemvocht. We gebruiken daarom de berekeningen van de werkelijke verdamping (SATDATA) en KNMI gevalideerde radarinformatie om in te schatten in welk (hoeveelheid) waar neerslagoverschot (in de ruimte) is opgetreden sinds 2018. Daartoe gaan we eerst terug naar 1 april 2018, de start van het hydrologisch jaar 2018-2019. De toestand toen werd bepaald door de situatie in 2017/2018. Het berekende werkelijk neerslagoverschot in het hydrologisch jaar 2017/2018 is te zien in Figuur 36.

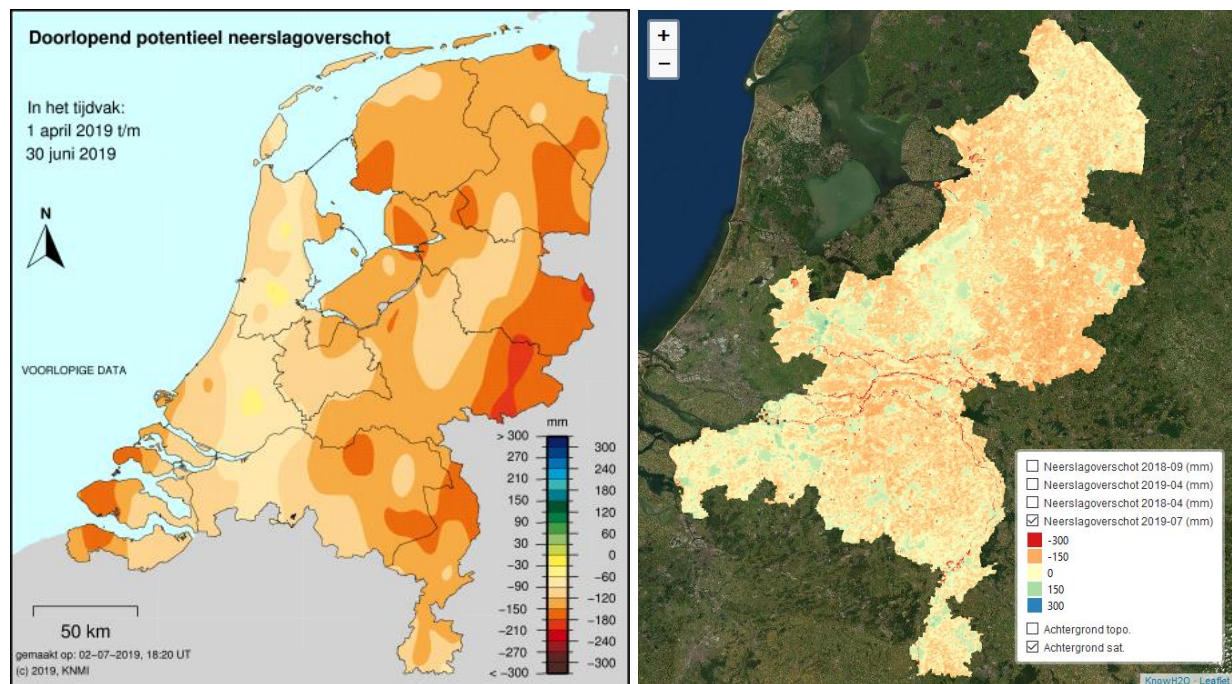


Figuur 36: Cumulatief verschil tussen neerslag (regenradar KNMI; dubbel gevalideerd) en werkelijke verdamping volgens SATDATA (STOWA): links na hydrologisch jaar 2017/2018 op 31-3-2018 (= start van hydrologisch jaar op 1-4-2018). Rechts na hydrologisch jaar 2018/2019 op 31-3-2019 (=start van hydrologisch jaar op 1-4-2019).

Te zien is dat op 1-4-2018 het werkelijk berekende neerslagoverschot als maat voor meteorologische droogte voldoende water opleverde om het bodem-water-systeem hydrologisch te herstellen. De aanvulling van het systeem is waarschijnlijk gerealiseerd in de winter van 2017/2018. Een vergelijkbare aanvulling op basis van het neerslagoverschot in 2018/2019 kon niet gerealiseerd worden op 1-4-2019. Daarmee is het watersysteem op basis van neerslag en verdamping bij de start van het hydrologisch jaar 2019/2020 niet hersteld. Het neerslagoverschot van de zomer van 2018 en/of het neerslagoverschot van de winter van 2018/2019 is te klein om het watersysteem aan te vullen. Hierdoor is het begin van het hydrologisch jaar 2019/2020 droger dan normaal.

De regio's in Nederland kennen een verschillend beeld qua meteorologische droogte. Met name in gebieden in Oost-Brabant, Noord-Limburg, Achterhoek en Twente zijn de neerslagtekorten aan de hoge kant. Dit maakt dat de omgang met droogte regionaal meer of minder nauw steekt en meer of minder maatwerk behoeft.

Figuur 37 laat het cumulatieve neerslagoverschot/tekort op 30 juni 2019 zien, met startdatum 1 april 2019. Zichtbaar is dat sinds 1 april 2019 de tekorten verder zijn toegenomen. Ook hier vertonen de regio's in Nederland (o.a. RDO) een verschillend beeld qua meteorologische droogte.



Figuur 37: Cumulatief neerslagoverschot/tekort op 30-6-2019, berekend vanaf 1-4-2019. Links: KNMI-kaart. Rechts: berekening met radar-informatie neerslag en verdamping SATDATA.

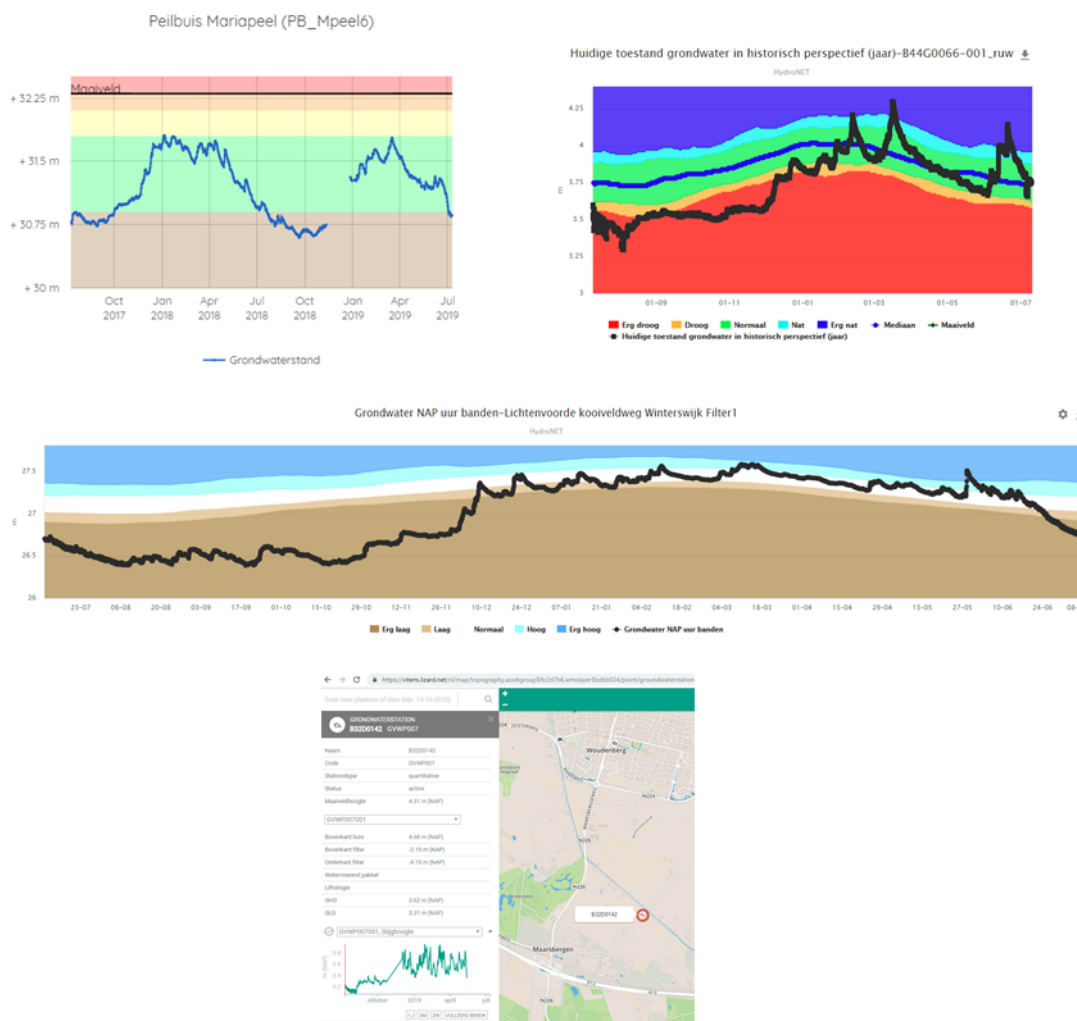
4.2. Grondwaterstanden

De duiding van de droogte op basis van peilbuisgegevens en afgeleide regimecurves en droogte-indices (bijv. Figuur 10) is in deze fase toegepast op een beperkte selectie aan meetpunten. In hoofdstuk 3 zijn daarbij tevens figuren opgenomen die inzicht geven in het herstel van droogte.

Tevens zijn er via online portals data beschikbaar van gemeten grondwaterstanden waaraan een eventueel herstel van de droogte van 2018 valt af te leiden. In het voorgaande hoofdstuk (met name paragraaf 3.2 en 3.5) zijn al een aantal waarnemingen getoond en verwerkt. Een aantal portals zijn:

- Limburg: <https://www.waterschaplimburg.nl/uwbuurt/kaarten-meetgegevens/actuele-waterstanden/>
- Noord-Brabant: <https://embed.hydronet.com/embed.aspx?id=6045&h=4610815681>
- Gelderland-WRIJ:
<http://wrij.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=82cacb64a02e4e60aadb66d30e7127c4>
- Utrecht:
[https://vitens.lizard.net/nl/map/topography,assetgroup\\$9c2d7b6,wmslayer\\$bd6bo24/point/@52.2442,6.0892,10/-2Days0Hours+0Days3Hours](https://vitens.lizard.net/nl/map/topography,assetgroup$9c2d7b6,wmslayer$bd6bo24/point/@52.2442,6.0892,10/-2Days0Hours+0Days3Hours)
- Overijssel: https://services.geodataoverijssel.nl/viewer?service=B34_beheer_grondwater

De gegevens binnen de portals (Figuur 38) zijn niet altijd up-to-date. Daarnaast hangt het af van de locatie binnen het projectgebied in welke mate herstel is opgetreden en/of inmiddels door de weersituatie in 2019 reeds weer teniet is gedaan. Het herstel kan ook positief beïnvloed zijn door wateraanvoer (maatregel o.a. binnen Aa en Maas uitgevoerd). Analyse van oorzaken van eventueel herstel is daarmee gebieds- en locatie-specifiek. Nader onderzoek vindt plaats in Fase 2. Voor een goede duiding van de droogte in historisch perspectief is het daarbij bijvoorbeeld van belang droogte te beschouwen in een gelijke referentieperiode, zodat vergelijking tussen gebieden ook mogelijk is. De werkwijzer voor het afleiden van droogte-indices zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 3 kan hieraan bijdragen, ook in combinatie met modelsimulaties voor meetlocaties voor prognoses van herstel (zie paragraaf 4.4).



Figuur 38: Informatie via dataportal opgehaald op 10-7-2019 (11u). Boven links: Limburg, Mariapeel. Boven rechts: Noord-Brabant, ten zuiden van Dongen; Midden: Gelderland, tussen Winterswijk en Lichtenvoorde; Beneden: Utrecht, Maarsbergen (reeks niet up to date).

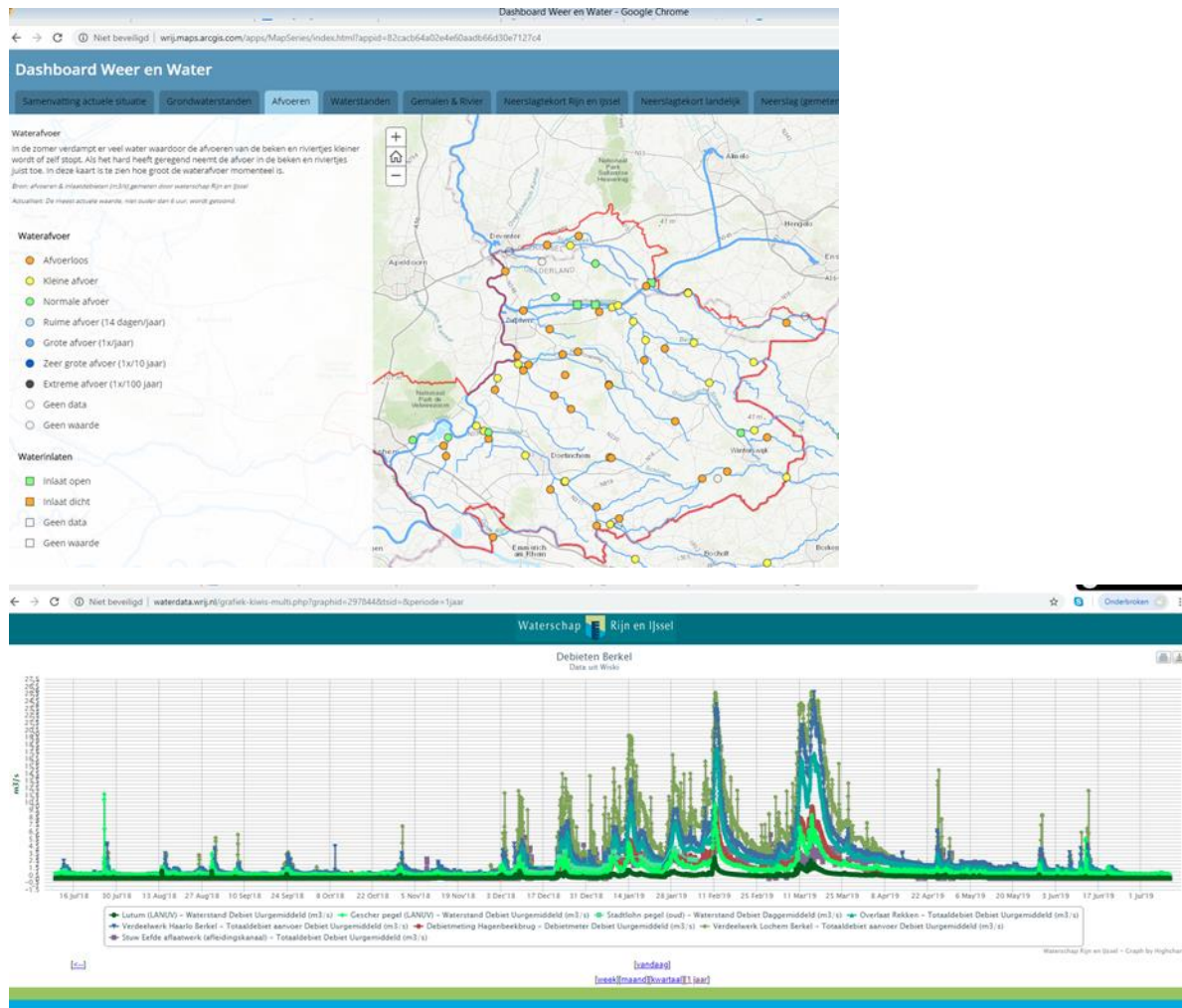
4.3. Afvoeren oppervlaktewater

Ook voor actuele afvoermetingen zijn online portals beschikbaar. Met Provincie Gelderland als voorbeeld kunnen we meetlocaties bekijken binnen het beheergebied van WRIJ waarvoor actuele afvoeren via het portal beschikbaar zijn, ter illustratie:

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

http://waterdata.wrij.nl/index.php?wat=kaart_esri

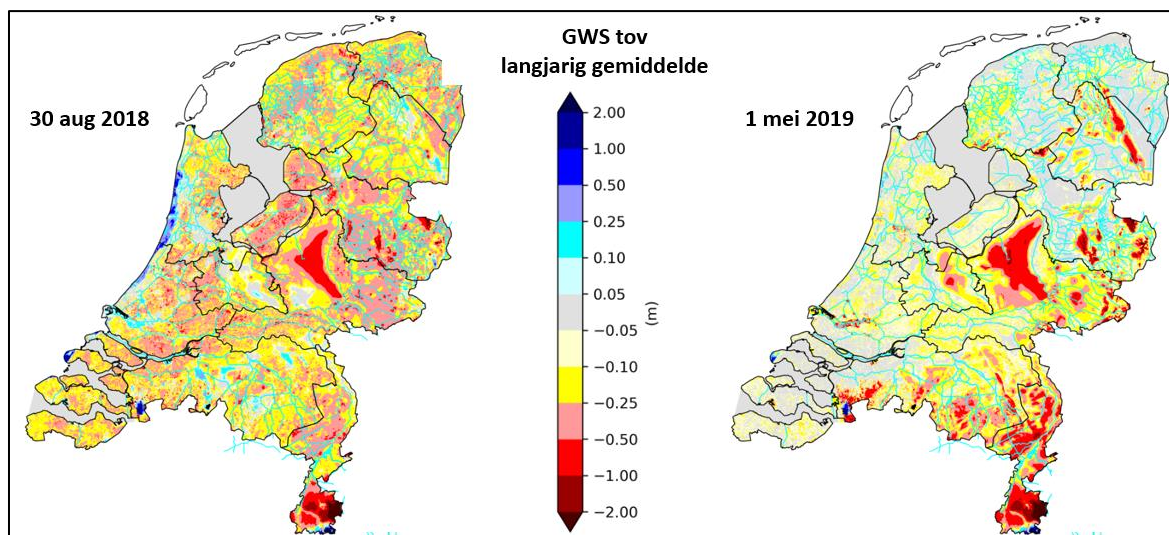
Figuur 39 laat zien dat een heel aantal waterlopen in het beheergebied van WRIJ op 10 juli 2019 afvoerloos zijn en drooggefallen zijn, dan wel een kleine afvoer hebben. Mocht er al herstel zijn opgetreden na de droogte van 2018, dan is mogelijk het hydrologisch herstel reeds teniet gedaan. Een lage afvoer is ook zichtbaar in de tijdreeks van de debieten van de Berkel. Echter, om vast te stellen of dit een gevolg is van droogte, of dat zulke lage afvoeren kenmerkend zijn voor het gebied, ofwel dat er sprake is van een systeemeigenschap, dient een langere tijdreeks beschouwd te worden. De gestandaardiseerde afvoerindex, zoals bijvoorbeeld gegeven voor Hupsel in Figuur 24, geeft vervolgens informatie over of de lage afvoeren ook daadwerkelijk als droogte geduid kunnen worden. Deze analyse is voor deze fase voor dit meetpunt niet uitgevoerd.



Figuur 39: Afvoersituatie WRIJ 10-7-2019 rond 11u. Boven: Watervoerendheid watergangen, Dashboard Weer. Beneden: afvoerdata Berkel juli 2018-juli 2019. Bron: Water en Waterdata - WRIJ.

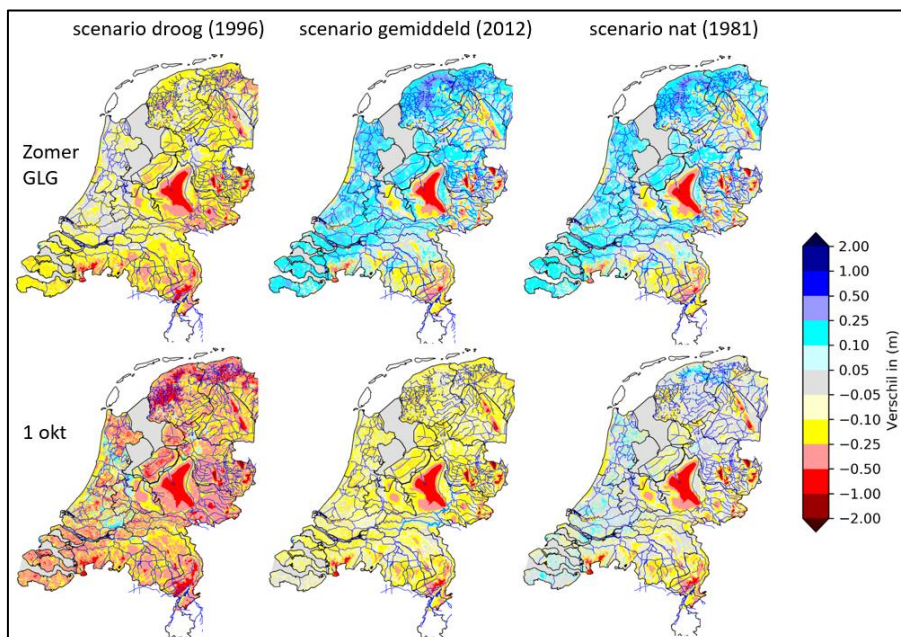
4.4. Modelberekeningen – actueel en prognoses 2019

LHM-berekeningen van grondwaterstanden laten het volgende zien. In Figuur 40 staat het verschil in grondwaterstand op 30 augustus 2018 en 1 mei 2019 t.o.v. het langjarig gemiddelde (voorgaande 30 jaar), berekend met het LHM. Hiervoor zijn de werkelijke meteo-gegevens gebruikt tot de desbetreffende datum voor de berekening van de grondwaterstand (dit zijn dus geen prognoses). Te zien valt dat de droogte van 2018 nog steeds duidelijk zijn effect heeft op de grondwaterstand op 1 mei 2019. Grondwaterstanden zijn nog steeds 10 tot 25 cm lager dan gemiddeld en voor de trage hoger gelegen gebieden die sterk na-ijlen zelfs meer dan 0,5 meter lager dan gemiddeld.



Figuur 40: Het verschil in grondwaterstand op 30 augustus 2018 en op 1 mei 2019 met het langjarig gemiddelde (voorgaande 30 jaar), berekend met het LHM. Een negatieve waarde betekent lager dan het langjarig gemiddelde.

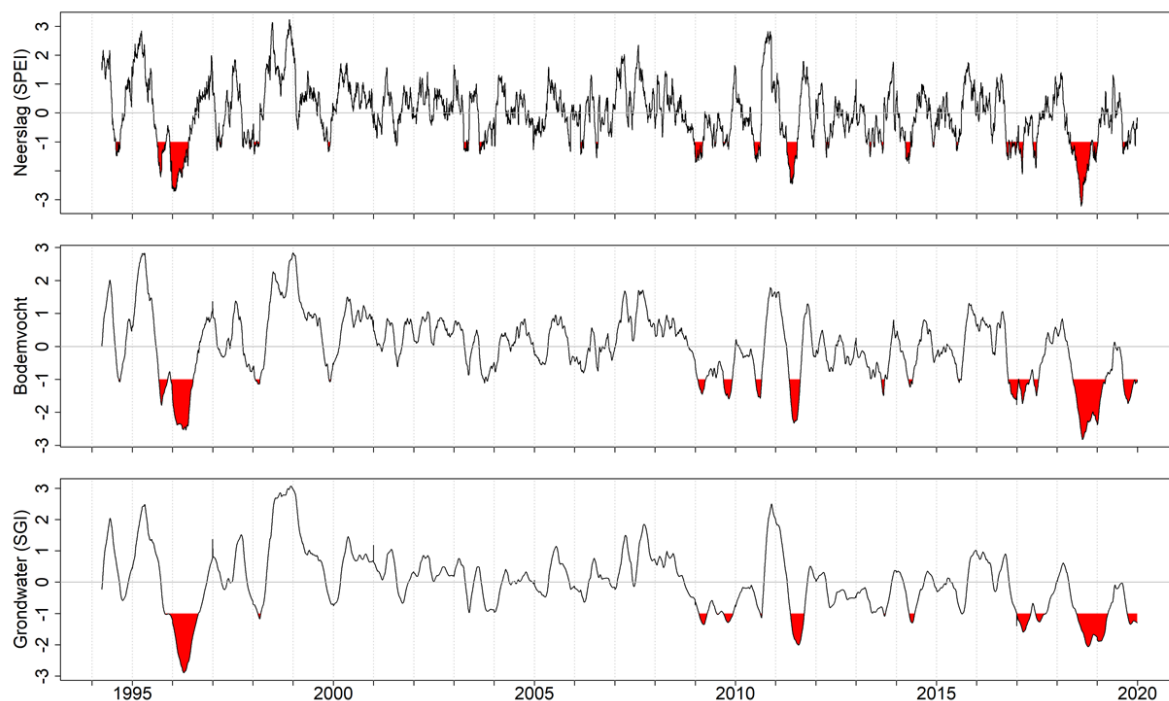
Met het LHM zijn prognoses voor de ontwikkeling van de grondwaterstand voor het jaar 2019 berekend, uitgaande van de situatie op 1 mei 2019 (Figuur 41). Er zijn drie type jaren doorgerekend, een droog (1996), een gemiddeld (2012) en een nat jaar (1981). Te zien valt dat er extreem lage grondwaterstanden worden berekend voor zowel de zomer als het najaar wanneer we vanaf 1 mei 2019 te maken krijgen met een droog jaar zoals 1996. Met een gemiddeld jaar lijkt de helft van het studiegebied redelijk gemiddelde grondwaterstanden te vertonen terwijl de wat tragere gebieden duidelijk achter blijven. Wanneer dit gemiddelde jaar wordt doorgerekend tot 1 oktober vertoont het gehele studiegebied veel lagere grondwaterstanden dan gemiddeld. Blijkbaar kent het doorgerekende gemiddelde jaar een wat nattere zomer en een wat droger najaar. Zelfs met een nat jaar als 1981 herstellen de grondwaterstanden zich niet volledig en krijgen we in het najaar te maken met lagere grondwaterstanden dan gemiddeld.



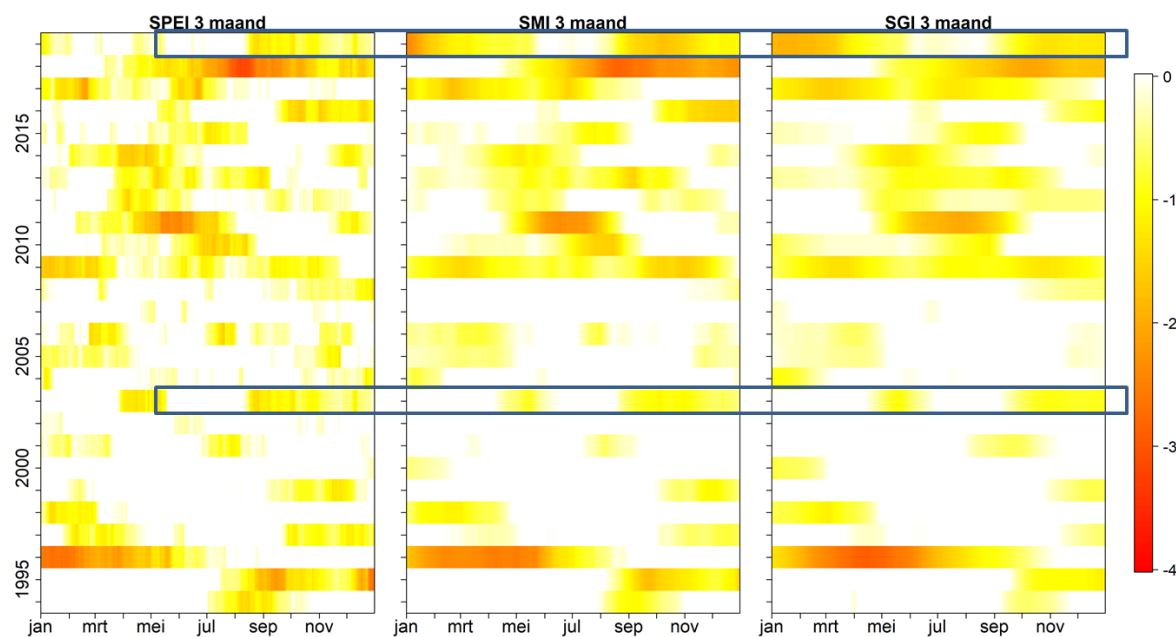
Figuur 41: De prognoses voor de grondwaterstand in 2019 voor situatie GLG en 1 oktober 2019, uitgaande van de situatie per 1 mei 2019, voor drie type jaren: droog, gemiddeld en nat. De prognoses zijn berekend met het LHM.

Ook voor de meetpunten kan met de gekalibreerde SWAP modellen voorspellingen gedaan worden voor de ontwikkeling en/of het herstel van verschillende compartimenten. Figuur 42 en Figuur 43 geven de meteorologische droogte, bodemvochtdroogte en grondwaterdroogte voor Hupsel, waarbij het weer van 2013 is gebruikt voor de modelvoorspellingen vanaf 1 mei 2019. Daarbij is het van belang te realiseren dat 2003 voor Hupsel meteorologisch gezien niet erg droog was; in de zomerperiode was zelfs sprake van relatief natte condities. In 2003 leidde dit daarom ook niet tot periodes die als matig droog of droger aangeduid worden. Echter, met de historie van 2018 en de bodemvocht- en grondwatertoestand waarmee 2019 wordt ingegaan, leidt hetzelfde weer in 2019 in de loop van het jaar tot grotere bodemvocht- en grondwaterdroogte dan in 2018. Dit illustreert het belang van het meenemen van de historie en de uitgangssituatie in het beoordelen van een droogte én de handeling die nodig is om effecten van meteorologische droogte te beperken.

In dit voorbeeld zijn voorspellingen gedaan voor heel 2019. We hebben de systematiek echter zo opgezet dat voor elk meetpunt een SWAP-model gekalibreerd kan worden en dagelijks (geautomatiseerd) voor de komende 5 à 10 dagen op basis van de weersverwachting de droogte-indices voor de verschillende componenten berekend worden. Deze methode kan voor verschillende peilbuizen in een gebied worden toegepast. In deze fase van het project is de systematiek opgezet. Indien gewenst kan de methode verder worden geoptimaliseerd, zodat deze ook door betrokken waterbeheerders zelf gebruikt kan worden.



Figuur 42: Met SWAP gesimuleerde bodemvocht- en grondwaterdroogte voor Hupsel, waarbij de meteorologie van 2003 is gebruikt voor voorspellingen van de droogtecomponenten voor 2019. Voor de definitie en interpretatie van de droogte-indices verwijzen we naar Bijlage 8.2.2.



Figuur 43: Heat maps voor meteorologische droogte (SPEI) en de met SWAP gesimuleerde bodemvocht- (SMI) en grondwaterdroogte (SGI) voor Hupsel, waarbij de meteorologie van 2003 is gebruikt voor voorspellingen van de droogtecomponenten voor 2019. Voor de definitie en interpretatie van de droogte-indices verwijzen we naar Bijlage 8.2.2.

5. Omgang met droogte 2018

5.1. Evaluatierapporten droogte en handeling 2018

Van diverse waterbeheerders zijn evaluatierapportages beschikbaar, o.a. WL, WDD, WRIJ, WVS, WBD, WDO, waarin gerapporteerd is over de droogte, de effecten ervan en de maatregelen die zijn uitgevoerd. Tabel 6 toont een bondige samenvatting daarvan, die in Fase 2 verder wordt aangevuld.

Tabel 6: Uit gerapporteerde evaluaties inzake de omgang met de droogte in 2018. Acties die door beheerders zijn uitgevoerd en bevindingen. Voorlopige inventarisatie, wordt vervolgd in Fase 2.

Activiteit	WL	WAM	WDD	WBD	WVV	WRIJ	WVS	WDO	PL	PNB	PGLD	PU	POv	PDr
Onttrekkingsverbod OW	X	X	X	X	X		X	X						
Onttrekkingsverbod GW	-	X					X							
Onttrekkingsverbod vijvers					X		X							
Stuwpeilen omhoog of ook wel omlaag	X	X	X	X	X		X	X						
Intensief maaien (risico-gestuurd)		X		X	Stroom-baan	X	X	Stroom-baan						
Extensief maaien (stuwen)	X				X									
Water aanvoeren	X	X			X		X	X				X KWA		
Inzet effluent		?		?										
Inzet extra pompen (polders, beken, ...)	X	X			X									
Beschermen kwetsbare natuur via wateraanvoer (bufferzones)		X					X							
Monitoring toestand watersysteem		X		-	vis		X					X		
Monitoring maatregelen	-	-		-	X									
Monitoring effecten (o.a. waterkwaliteit)	-	-		-								X		
Verdringingsreeks regionaal/lokaal		X			X							X		
Participatie van streek		X	X											
Communicatie	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X beperkt	X	X
Handhaving							X							
Onderzoek doen en kennis opbouwen	X						X		X	X		X		
Systeemherstel en klimaat-robust (...)												X		

Maatregelen tegen (de effecten van) droogte zijn gericht op sparen (beheer), vasthouden (beheer), aanvoeren (beheer) en accepteren/adapteren (inrichting en beheer). Belangrijk is om onderscheid te gaan maken naar maatregelen voor, tijdens en na droogte. Onttrekkingen terugdringen en registreren (OW en GW), stuwpeilen opvoeren, de drainagebasis verhogen en water aanvoeren zijn belangrijke pijlers.

Scenario's, online monitoring en de inzet van rekenmodellen voor analyse en prognose zijn middelen om tot goed onderbouwde beslissingen te komen. Onderdeel hiervan is ook het verbeteren van het inzicht in de effecten van maatregelen die veelal in het oppervlaktewatersysteem worden genomen, op de toestand van het grondwatersysteem.

Qua proces is het belangrijk dat Rijk, provincies en waterschappen samenwerken. Bestuurlijke dekking voor maatregelen is noodzakelijk, net als het omzetten van woorden naar daden en een éénduidige lijn van

kantoor- naar veld/gebiedsmedewerker m/v. Ook dienen begrippen duidelijk en eenduidig te worden gedefinieerd.

5.2. Verkennende berekeningen 2018: gevoeligheidsanalyse

LHM-model

Voor deze eerste fase zijn enkele verkennende berekeningen uitgevoerd met het Landelijke Hydrologische Model (LHM) voor het in beeld brengen van de respons van verschillende aspecten van het watersysteem op de droogte van 2018 en ingrepen in het watersysteem. Ofwel, hoe werken bepaalde ingrepen door op grondwaterstanden, kwel, bodemvocht, gewasverdamming en oppervlaktewaterafvoer voor een droog jaar als 2018. De gesimuleerde ingrepen in het watersysteem zijn gericht op het **korte termijn handelingsperspectief** (mogelijkheden om op korte termijn het watersysteem te beïnvloeden) en zijn in den extreme doorgevoerd om de **gevoeligheid van het watersysteem** te kunnen verkennen. Met nadruk zijn het dus **geen realistische scenario's**. Maar de resultaten geven wel inzicht hoe en in welke mate de ingrepen doorwerken op het watersysteem en biedt daarmee handvaten voor de waterbeheerders voor verdere verkenning van mogelijke ingrepen in het watersysteem. De ingrepen worden in het LHM modelmatig doorgevoerd per 1 januari 2018 en effecten voor het verdere verloop van 2018 worden onderzocht. Het zijn dus **korte termijn effecten (< 1 jaar)** die voor deze exercitie worden gepresenteerd terwijl de effecten voor bepaalde ingrepen op lange termijn (veel) groter kunnen zijn. Er dient te worden opgemerkt dat, hoewel de gesimuleerde ingrepen bedoeld zijn om effecten op korte termijn in beeld te brengen (binnen enkele maanden tot 1 jaar), ze ook kunnen bijdragen aan lange termijn structurele effecten op watersysteem (bijv. anti-verdrogingsmaatregelen). Effecten van structurele maatregelen op langere termijn, worden in fase 2 in beeld gebracht.

Een zevental modelscenario's zijn gedefinieerd die globaal inzicht geven in de response van het watersysteem als gevolg van ingrepen op korte termijn (handelingsperspectief). Het zijn ingrepen die modelmatig binnen het LHM relatief eenvoudig zijn door te voeren en worden voor het gehele studiegebied doorgevoerd. Verdere detaillering/ afbakening in tijd en ruimte (bijv. bufferzones), complexere scenario's en combinaties van ingrepen, evenals structurele maatregelen (bijv. antiverdroging, hydrologisch herstel, vernatting, PAS, etc.) kunnen in een volgende fase aan bod komen.

De modelscenario's zijn extreem doorgevoerd, zoals bijvoorbeeld verhoging drainagebasis voor alle kavelsloten, om de respons van het watersysteem goed en maximaal in beeld te brengen. Ze geven dus geen realistisch beeld van op korte termijn uit te voeren handelingsperspectief. De keuzes van de modelscenario's zijn o.a. gebaseerd op de input van projectgroep. De modelscenario's ter verkenning van het handelingsperspectief voor situatie 2018 (extreem droog jaar) zijn:

Referentie: situatie 2018

- 1) drinkwateronttrekking verminderen (twee keer de toename 2018, -18%)
- 2) GEEN beregening uit grondwater
- 3) GEEN beregening uit oppervlaktewater
- 4) verhoging stuwpeil waterschappen (leggerwaterlopen) per 1 januari 2018 met +30 cm
- 5) Als scenario 4, nu met verhoging drainagebasis alle kavelsloten per 1 januari 2018 met +30 cm
- 6) GEEN wateraanvoer
- 7) alle onttrekkingen voor drinkwater uit grondwater stoppen

Als referentie-model is het beschikbare huidige LHM-model versie 3.4 gebruikt dat de periode 1981-2018 beslaat, met enkele aanpassingen. In Bijlage 8.3 staat uitgelegd hoe het referentie-model is opgebouwd en worden de modelscenario's nader toegelicht.

Voor de interpretatie van de modelresultaten dient goed te worden beseft dat het een nationaal grondwatermodel betreft (incl. bodemvocht en oppervlaktewater) dat grotendeels is opgebouwd met gegevens uit 2010. Daarnaast zijn effecten van ingrepen zoals beregenen uit grondwater en oppervlaktewater en wateraanvoer afhankelijk van de mate van beregening en wateraanvoer. Deze worden door het model zelf berekend (zijn dus geen modelinvoer) en kunnen afwijken van de werkelijkheid. Zoals de registraties laten zien, overschat LHM de beregening uit grondwater voor de meeste waterschappen. Hierbij dient bij de interpretatie van de resultaten rekening te worden gehouden. Het is daarom van groot belang om in de volgende fase van het Droogte Onderzoek een **quick-scan validatie** van de modelresultaten uit te voeren,

zoals bijvoorbeeld vergelijking modelberekening met werkelijke berekening maar ook grondwaterstanden, afvoeren en transpiratie-reductie.

Hieronder worden de resultaten voor scenario 2 (geen berekening uit grondwater) voor verschillende elementen van het watersysteem toegelicht, geïllustreerd met kaartjes die de effecten weergeven. Daarna geven we per model-scenario een korte samenvatting van de berekende effecten. In Bijlage 8.3 worden de belangrijkste modelresultaten in kaartjes voor alle modelscenario's naast elkaar gepresenteerd. Alle andere kaartjes en diagrammen zijn te vinden in de digitale bijlage.

Scenario 2: GEEN berekening uit grondwater

De ruimtelijk variatie van de effecten van dit scenario zijn vooral gerelateerd aan de mate van berekening. In Tabel 7 staan daarom de hoeveelheden voor 2018 en gemiddeld voor de afgelopen 30 jaar per waterschap weergegeven.

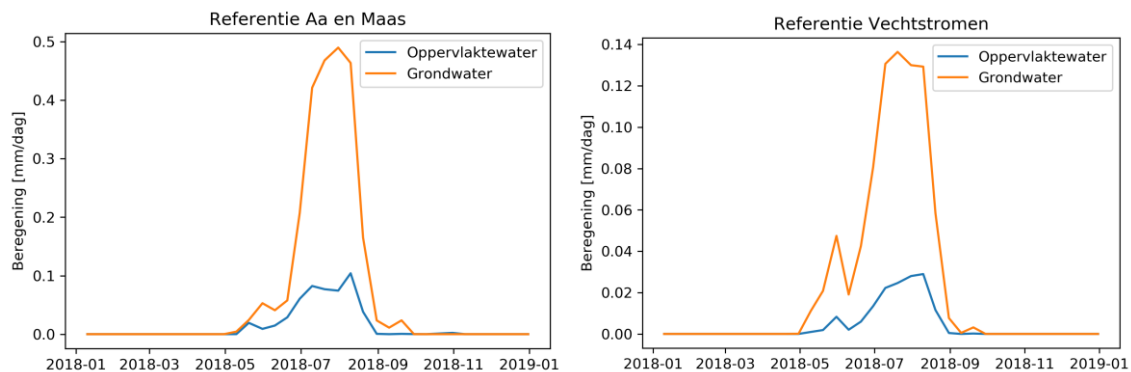
Tabel 7: Hoeveelheid berekening uit grondwater (in miljoen m³/jaar), berekend met het LHM, voor 2018 en gemiddeld voor de afgelopen 30 jaar, als ook de geregistreerde hoeveelheden indien bekend.

	berekening uit grondwater (miljoen m ³)				periode	%
	LHM	LHM	Geregistreerd	Geregistreerd		
waterschap	2018	30 jaar	2018	gemiddeld	gemiddelde	Geregistreerd
Vallei & Veluwe	15.0	5.6	1.5	?		?
Drents Overijsselse Delta	17.0	5.0	?	?		?
Vechtstromen	18.9	6.2	?	?		?
Rijn en IJssel	29.7	7.8	?	2.0	2016-17	64
Brabantse Delta	36.3	12.8	26.6	12.5	2015-17	88
Aa en Maas	40.4	14.7	42.0	21.7	2014-17	71
De Dommel	40.6	15.1	27.4	15.1	2015-17	75
Limburg	88.9	42.1	48.5	22.5	2016-17	84
Totaal	286.8	115.7	146.0			

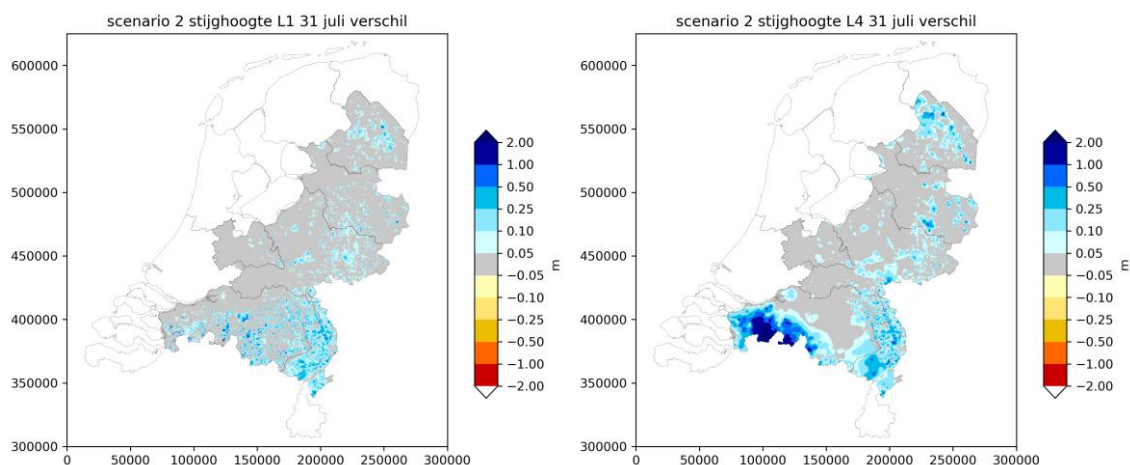
Zoals al besproken in paragraaf 3.5 overschat LHM de berekening uit grondwater voor de meeste waterschappen. De effecten die hieronder worden besproken, gelden voor de hoeveelheid berekening die het model heeft berekend en deze zullen dan ook worden overschat. Echter, zoals eerder aangegeven, is het niet de bedoeling realistische scenario's door te rekenen maar de gevoeligheid en response van het watersysteem voor bepaalde type ingrepen. Figuur 44 is te zien dat er halverwege mei 2018 volgens het model wordt begonnen met berekenen en dat er na eind augustus nauwelijks meer berekening uit grondwater plaatsvindt. In deze korte periode worden dus de hoeveelheden zoals weergegeven in Tabel 7 onttrokken aan het watersysteem. De berekeningspiek is op 31 juli 2018. De grootste effecten op het watersysteem manifesteren zich dan ook rondom deze datum. De grootste effecten worden gevonden voor de watervoerende pakketten waaruit onttrokken wordt. Deze effecten in de watervoerende pakketten werken door naar het ondiepe freatische systeem. Door het feit dat er in een groot gebied berekening plaatsvindt (vele kleine lokale onttrekkingen relatief dicht bij elkaar), hebben de effecten ook een regionaal karakter.

Door de ingreep (stopzetten berekening) stijgt de grondwaterstand, neemt de afvoer toe (of infiltratie vanuit oppervlaktewater af) en neemt de kwelflux en het gebied waar kwel optreedt iets toe. De netto toename van de afvoer (of afname infiltratie) gedurende de periode 21 juli - 11 augustus 2018, zijn geen grote hoeveelheden omdat in deze periode de afvoer door de droogte al heel laag is. Sommige beeksystemen zijn zelfs drooggevallen. Door de veelal lage afvoer in deze periode, kan berekening uit grondwater de al lage afvoer met zo'n 25-50% verder reduceren of leiden tot droogval. Ook de kwelflux (flux van modellaag 2 naar 1) neemt toe als wordt gestopt met berekenen. Het leidt voor sommige gebieden zelfs tot een toename van het areaal kwelgebieden (de rode gebieden in Figuur 48). Ofwel het berekenen uit grondwater heeft effect op kwel in kwelgebieden en is mogelijk een probleem voor kwelafhankelijke vegetatie. Het wegvallen van kwel (of lagere fluxen) heeft voor deze natuurgebieden verschillende gevolgen: het verder wegzakken van de grondwaterstand, minder kwel in de wortelzone en een lagere bijdrage van kwel aan de afvoer. Het model voorspelt echter geen kwel in de wortelzone zodat hier niets kwantitatief over kan worden gezegd. Tevens is onbekend wat de effecten voor de kwelafhankelijke vegetatie zijn, als tijdelijk (enkele dagen tot enkele weken) de kwel wegvalt of veel minder wordt.

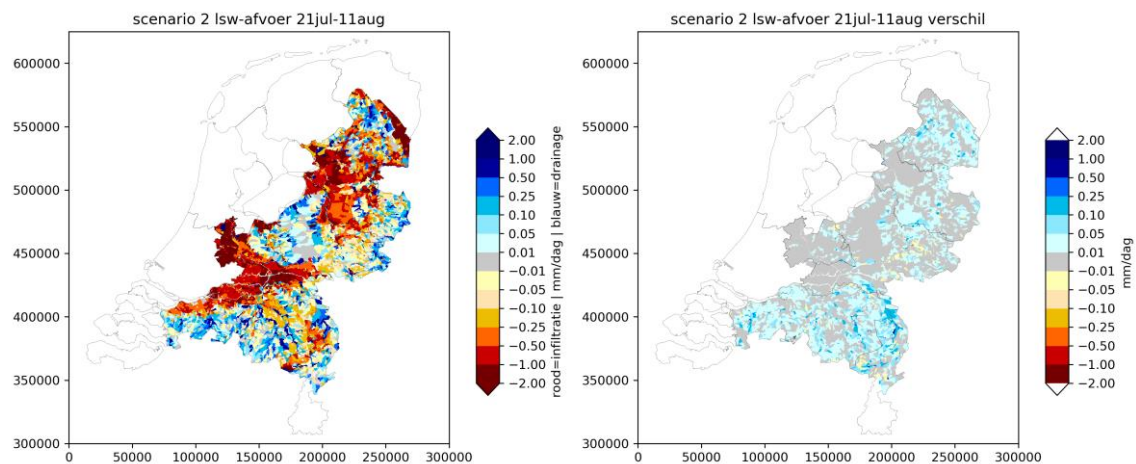
De transpiratie-reductie (droogtestress) neemt toe voor de beregende percelen, deze percelen worden namelijk niet meer beregend door de ingreep. Voor deze percelen is gedurende de periode 21 juli - 11 augustus 2018 de transpiratiereductie 1 tot 3 mm/d dat op den duur tot serieuze gewasschade kan leiden. Echter, rondom de beregende percelen stijgt de grondwaterstand omdat er geen grondwater voor beregening meer wordt onttrokken. Voor deze percelen neemt daardoor de droogtestress juist weer af, echter niet in zulke grote hoeveelheden (0.1 tot 1 mm/d) als de toename voor de beregende percelen. Dit effect is het duidelijkst voor de periode rondom de beregeningspiek op 31 juli 2018 en voor gebieden waar de weerstand tussen het pakket waaruit onttrokken wordt en de grondwaterstand klein is. Beregenen uit grondwater heeft voor deze gebieden dus een positief effect voor de beregende percelen maar een negatief effect voor de omliggende niet-beregende percelen.



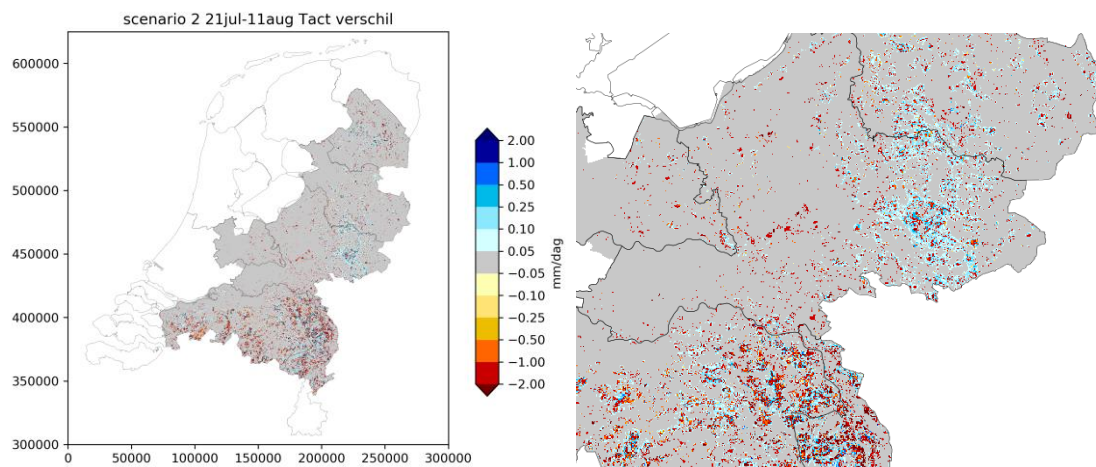
Figuur 44: De variatie in de tijd van de hoeveelheid beregening uit grondwater en oppervlaktewater (in mm/d voor gehele waterschapsgebied) voor waterschap Aa en Maas en Vechtstromen, berekend met het LHM. De diagrammen voor de overige waterschappen zijn beschikbaar in de digitale bijlage.



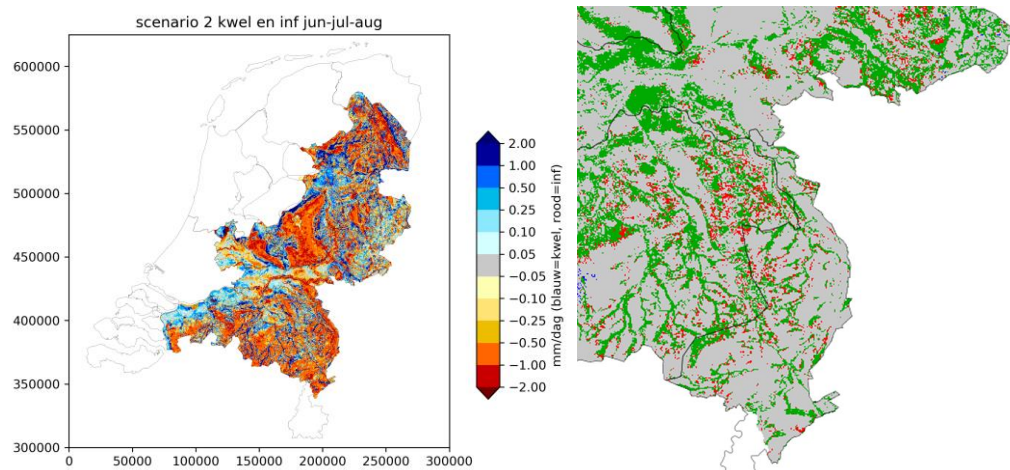
Figuur 45: Het berekende effect op de grondwaterstand (modellaag 1) en stijghoogte (modellaag 4) op 31 juli 2018 als gevolg van model-scenario 2: het stoppen met beregenen uit grondwater.



Figuur 46: Modelresultaten voor model-scenario 2 voor de periode 21 juli-31 augustus 2018: (links) De hoeveelheid grondwaterdrainage of wel gebiedseigen afvoer in blauw en infiltratie van oppervlaktewater naar het grondwater in rood, (rechts) het effect van model-scenario 2 op de gebiedseigen afvoer en infiltratie, blauw betekent een toename van de gebiedseigen afvoer en afname van infiltratie als gevolg van het stoppen met beregenen uit grondwater.



Figuur 47: De toename (blauw) of afname (geel-rood) van de transpiratie als gevolg van het stoppen met beregenen uit grondwater, links voor het gehele studiegebied en rechts ingezoomd voor een deel van het studiegebied. Model-scenario 2 voor de periode 21 juli-31 augustus 2018.



Figuur 48: LHM-resultaten. De kwel (blauw) en infiltratieflux (rood) voor het gehele studiegebied (links). Kwel is gedefinieerd als de opwaartse stroming van modellaag 2 naar modellaag 1, en infiltratie vice versa. De rechter figuur laat in groen de kwelgebieden zien en in rood staan de gebieden die weer kwelgebied worden wanneer wordt gestopt met beregenen uit het grondwater. Model-scenario 2 voor de periode juni t/m augustus 2018.

Hieronder worden de resultaten van overige scenario's kort samengevat. Zie Bijlage 8.3 voor bijhorende resultaten gepresenteerd in kaartjes.

Scen 1: drinkwateronttrekking verminderen (twee keer de toename 2018, -54% voor de zomermaanden juni t/m september)

- Er zijn nog geen effecten op 1 april 2018 zichtbaar omdat de ingreep pas start op 1 juni.
- Het betreffen dus allemaal korte termijn effecten.
- De grootste effecten worden gevonden voor de watervoerende pakketten waaruit onttrokken wordt (met name modellagen 3 t/m 7).
- Effecten hebben een grote uitstraling in de watervoerende pakketten als er zich significante weerstandsbiedende lagen boven de watervoerende pakketten bevinden waaruit onttrokken wordt, zoals duidelijk is te zien voor N-Brabant.
- De effecten in de watervoerende pakketten werken door naar het ondiepe freatische systeem.
- In dit ondiepe freatische systeem stijgt het freatische grondwater, neemt de grondwaterafvoer toe en neemt de kwel toe door de ingreep. Deze effecten zijn alleen rondom de winningen te zien.
- Effecten op de transpiratie-reductie zijn nauwelijks zichtbaar.

Scen 2: GEEN beregening uit grondwater

Zie boven.

Scen 3: GEEN beregening uit oppervlaktewater

- In onderstaande tabel (Tabel 8) staan de modelmatig bepaalde hoeveelheden beregening uit het oppervlaktewater voor 2018 en gemiddeld voor de afgelopen 30 jaar. De hoeveelheid beregening uit oppervlaktewater is ongeveer 1/3 van die uit het grondwater. Ook de locaties zijn anders (vooral rivierengebied).
- De effecten op het grondwater systeem zijn minimaal omdat er alleen uit het oppervlaktewatersysteem wordt onttrokken. Licht daalt de grondwaterstand voor enkele gebieden wanneer gestopt wordt met beregenen omdat via beregening de grondwaterstand wordt aangevuld.
- Voor de LSWs waar uit het oppervlaktewater wordt onttrokken, neemt de infiltratie weer toe als beregening uit oppervlaktewater stopt. Er is dan meer oppervlaktewater beschikbaar en peilen zijn hoger.

- De afvoer van een gebied neemt ongeveer evenveel toe als de hoeveelheid die minder uit het oppervlaktewater wordt beregend.
- De droogtestress (transpiratie-reductie) neemt toe voor de beregende percelen wanneer gestopt wordt met beregenen uit oppervlaktewater.

Tabel 8: Hoeveelheid berekening uit oppervlaktewater (in miljoen m³/jaar), berekend met het LHM, voor 2018 en gemiddeld voor de afgelopen 30 jaar.

	2018	30 jaar
Waterschap Rivierenland	47.9	17.3
Vallei & Veluwe	4.3	1.4
Waterschap Drents Overijsselse Delta	10.3	2.7
Vechtstromen	3.4	1.1
Waterschap Hunze en Aa's	8.1	2.9
Waterschap Rijn en IJssel	1.6	0.5
Brabantse Delta	22.7	7.4
Aa en Maas	8.4	3.5
Waterschap De Dommel	2.0	0.9
Waterschap Limburg	4.9	2.4
TOTAAL	113.7	40.0

Scen 4: verhoging stuwpeil waterschappen (leggerwaterlopen) per 1 januari met 30 cm

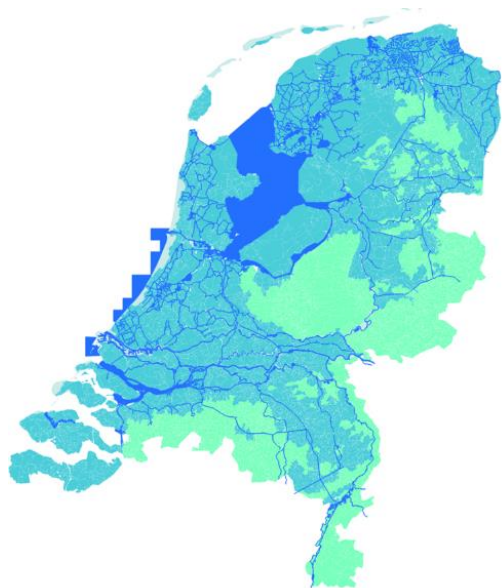
- De ingreep wordt uitgevoerd in het freatisch systeem en daarom zijn de effecten op de grondwaterstand ook groter dan op de stijghoogte.
- De effecten zijn het grootst op 1 april en nemen licht af gedurende het groeiseizoen. Op 1 oktober zijn nog steeds effecten zichtbaar.
- In Oost-Nederland zijn de effecten over een groter gebied verspreid als gevolg van de geohydrologische opbouw (dikker freatisch pakket en daardoor grotere uitstraling).
- Door de stuwpeilverhoging neemt de grondwaterdrainage significant af, tot soms wel 50-100% van de referentieafvoer (zonder stuwpeilverhoging). Peilverhoging belemmert de afvoer van grondwater en daarmee wordt grondwater dus vastgehouden, en dat is precies het doel van deze maatregel.
- De transpiratie-reductie neemt significant af voor een groot gebied als gevolg van de verhoging van de freatische grondwaterstand.

Scen 5: scen 4 + verhoging drainagebasis alle kavelsloten met 30 cm per 1 januari 2018

- De effecten zijn zeer vergelijkbaar met scen 5, alleen iets intenser omdat er ook een grotere ingreep wordt gepleegd.
- Echter, het extra effect van de verhoging van de drainagebasis van alle kavelsloten is niet zo groot. Vermoedelijk omdat veel sloten al vrij snel droog vallen (rond 1 april) en dan heeft drainagebasis verhoging geen effect meer. Op langere termijn zullen effecten van deze maatregel groter zijn omdat meer water kan worden vastgehouden. Dit zal in fase 2 worden onderzocht.

Scen 6: GEEN Wateraanvoer

Het onderstaande kaartje geeft aan waar binnen het LHM wateraanvoer plaatsvindt (Figuur 49).



Figuur 49: LHM - Met lichtblauw is het gebied aangegeven waar binnen LHM wateraanvoer kan plaatsvinden vanuit het regionale systeem aangegeven met donkerblauw. Wateraanvoer vindt alleen plaats als er een watervraag is die kan bestaan uit beregeningsvraag, peilhandhaving en doorspoelen (laag-Nederland).

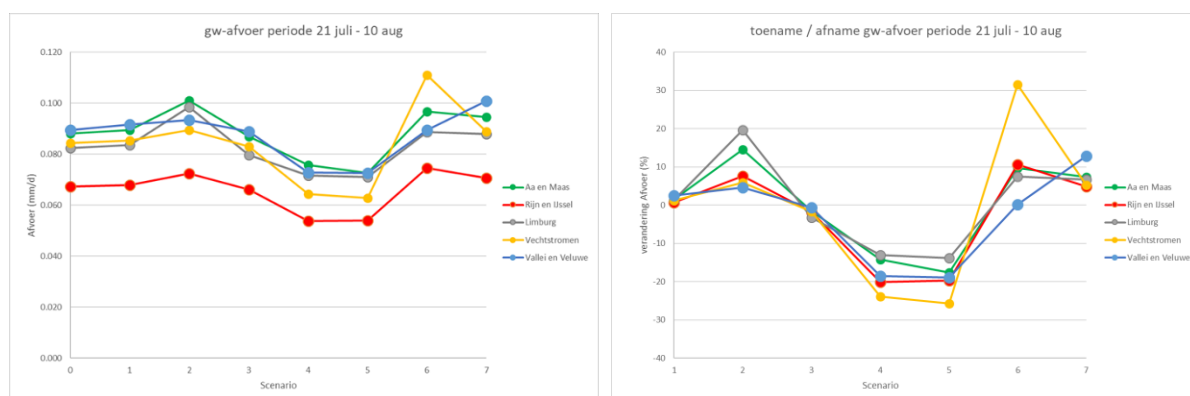
- Het stoppen van de waterafvoer vanuit de grote rivieren heeft voor een deel van de wateraanvoergebieden een dalende grondwaterstand tot gevolg.
- Dit werkt enigszins door op de stijghoogte in onderliggende pakketten.
- De transpiratie-reductie neemt iets toe voor de gebieden waar de grondwaterstand daalt.
- De afvoer in de waterlopen neemt af maar de grondwaterafvoer (ofwel gebiedseigen afvoer) neemt juist toe. Immers, door de lagere peilen (geen wateraanvoer) gaan de sloten en beken meer draineren.
- Minder wateraanvoer betekent ook dat er minder water beschikbaar is voor beregening uit het oppervlaktewater.

Scen 7: alle drinkwateronttrekkingen stoppen

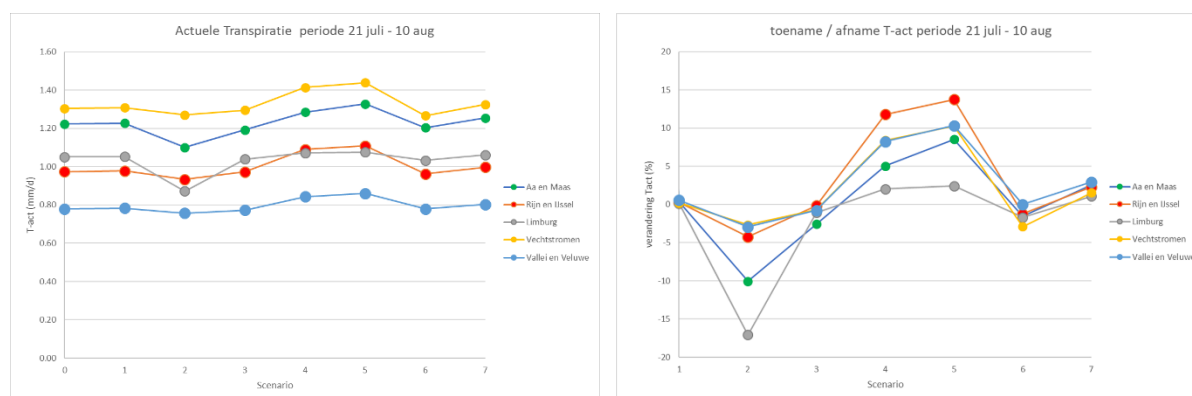
- De effecten zijn vergelijkbaar met scenario 1 alleen veel groter omdat de gehele drinkwaterwinning per 1 januari wordt stop gezet.
- De grootste effecten worden gevonden voor de watervoerende pakketten waaruit onttrokken wordt (met name modellagen 3 t/m 7).
- Effecten hebben een grote uitstraling als er zich significante weerstand-biedende lagen boven de watervoerende pakketten bevinden waaruit onttrokken wordt, zoals duidelijk is te zien voor N-Brabant.
- De effecten in de watervoerende pakketten werken door naar het ondiepe freatische systeem.
- In dit ondiepe freatische systeem stijgt het freatische grondwater, neemt de grondwaterafvoer toe en neemt de kwel toe door de ingreep. De rode gebieden op de kwelkaart zijn gebieden die door de ingreep weer van infiltratiegebied naar kwelgebied veranderen. De genoemde effecten zijn alleen rondom de winningen te zien.
- In tegenstelling tot scenario 1 zijn effecten op de transpiratie-reductie wel duidelijk zichtbaar. Voor de gebieden in de directe omgeving rondom de winningen (waar de freatische grondwaterstand stijgt), neemt de transpiratie-reductie af met 0.25 tot 2 mm/d voor de periode rondom 31 juli 2018.
- Na 1 jaar zijn de meeste effecten nog niet maximaal zijn, voor de trage gebieden (diepe grondwaterstand, grote slootafstanden) werken de effecten van dit soort grootschalige ingrepen nog vele jaren tot soms decennia door. In fase 2 is er aandacht voor deze lange termijn effecten.

In de onderstaande figuren (Figuur 50 en Figuur 51) staan de effecten van de verschillende model-scenario's op de grondwaterafvoer en actuele transpiratie samengevat voor enkele waterschappen. De figuren laten zien dat de gebiedseigen afvoer (grondwaterdrainage) voor de periode 21 juli -10 augustus 2018 significant toeneemt voor scenario 2 (voor Aa en Maas 20%) en licht toeneemt voor scenario 6 en 7. Het onttrekken van grondwater (scenario 2 en 7) heeft dus een merkbaar effect op de gebiedseigen afvoer. De toename voor Vechtstromen voor scenario 6 (stoppen van wateraanvoer) is groot. Vermoedelijk door de belangrijke invloed van wateraanvoer voor het handhaven van oppervlaktewaterpeilen. Het stoppen van wateraanvoer leidt tot lagere peilen en daarmee tot een sterkere drainage van de waterlopen en beken. De gebiedseigen afvoer neemt duidelijk af voor de scenario's (scenario 4 en 5) waar de ontwateringsbasis wordt verhoogd waardoor juist meer grondwater wordt vastgehouden.

Het stoppen van beregenen leidt tot een afname van de transpiratie omdat de beregende percelen niet meer beregend worden. Transpiratie neemt toe voor de scenario's waar grondwater wordt vastgehouden (scenario 4 en 5) en minder grondwater wordt onttrokken (scenario 7).



Figuur 50: LHM - De gemiddelde gebiedseigen afvoer (grondwater-drainage) per waterschap voor verschillende scenario (links) en de procentuele toe- of afname hiervan t.o.v. het referentie-scenario (rechts). Periode 21 juli – 10 augustus.



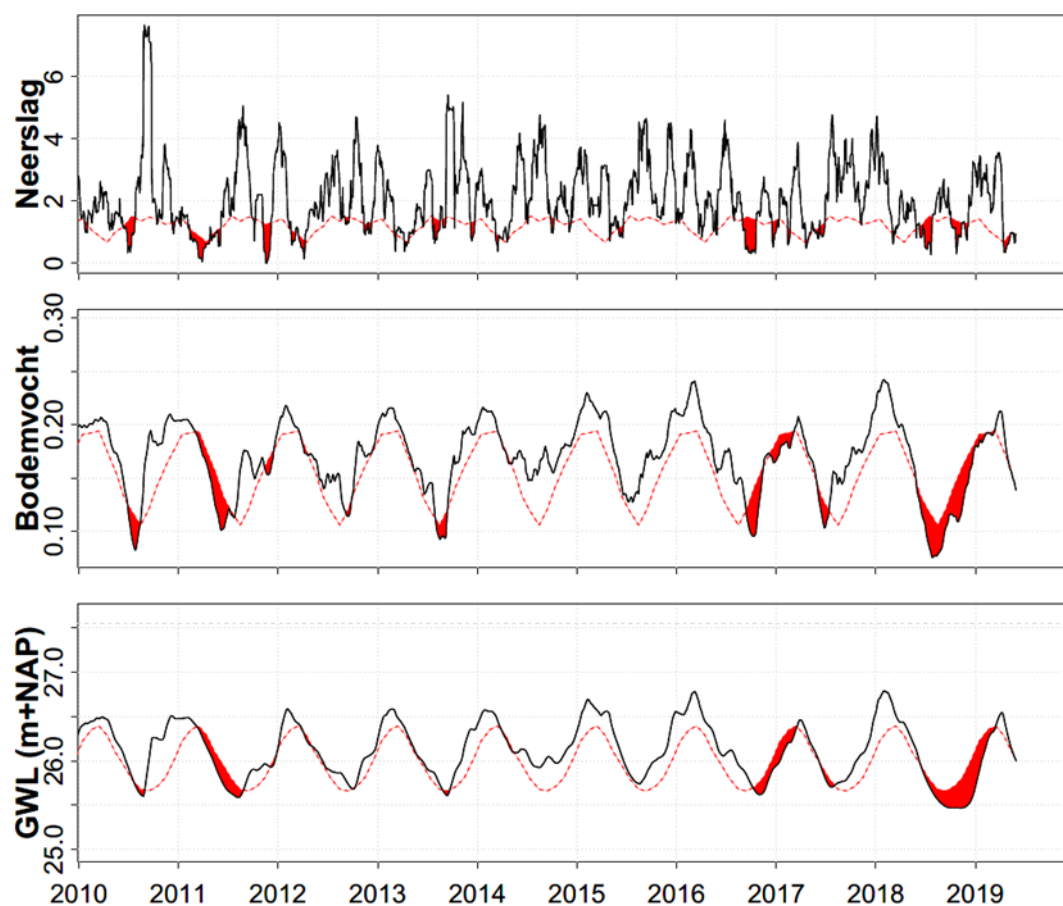
Figuur 51: LHM - De gemiddelde actuele transpiratie per waterschap voor verschillende scenario (links) en de procentuele toe- of afname hiervan t.o.v. het referentie-scenario (rechts). Periode 21 juli – 10 augustus.

SWAP-modellen

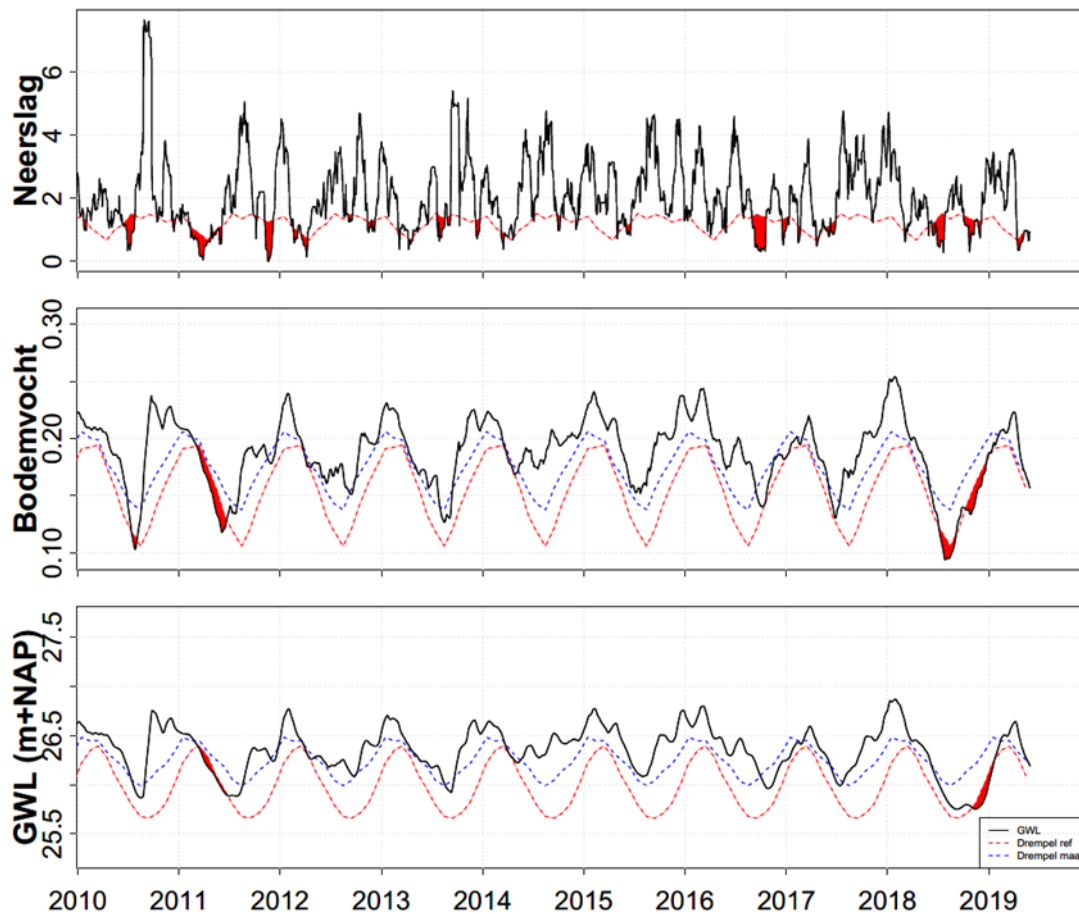
Op basis van SWAP-modellen voor de specifieke meetpunten kan inzicht verkregen worden in de effecten van maatregelen op het verminderen van bodemvochtdroogte, grondwaterdroogte en transpiratiereductie van het gewas. Op basis van de zogenaamde variabele drempelwaarde methode, die droogte afleidt op basis van anomalieën in de tijdreeks, kan het effect van een maatregel inzichtelijk worden gemaakt. Voor elke droogte kunnen verschillende karakteristieken berekend worden, zoals het aantal droogtegebeurtenissen, de lengte, het totale tekort en de intensiteit (zie Bijlage 8.2.2). Door het toepassen van de drempelwaarde gebaseerd op

de referentiesituatie (gesimuleerde resultaten zonder maatregelen) op de resultaten van de scenario's met maatregelen bepaald worden wat het effect is op de droogte. Droogteperiodes zonder maatregelen voor bodemvochtgehalte en grondwaterstand voor Hupsel zijn gegeven in Figuur 52; de met deze methode aangeduide droogteperiodes zijn vergelijkbaar aan die in Figuur 27. Als scenario is de situatie doorgerekend waarbij er in de omgeving minder grondwater onttrokken wordt, waardoor de wegzijging uit het perceel minder is. Deze maatregel zorgt voor een vermindering van de bodemvochtdroogte. In de referentiesituatie geldt in 2018 nog een lange aaneengesloten periode met bodemvochtdroogte, die doorloopt in de periode met neerslag; in het doorgerekende scenario wordt deze droogte tijdelijk opgeheven. De grondwaterdroogte treedt als gevolg van de maatregel pas aan het eind van 2018 op (Figuur 53). In 2016-2017 verdwijnt de droogte als gevolg van de maatregel.

Het effect van maatregelen kan worden doorgerekend voor elk van de meetpunten waarvoor SWAP-modellen zijn gemaakt. Deze analyses geven snel inzicht in de effecten van maatregelen op verschillende droogtecomponenten, en de periodes waarin en ernst waarmee droogtes optreden. Tevens ontstaat inzicht in de verschillen in effecten tussen de jaren. In deze fase is de methodiek opgezet en voor enkele voorbeelden toegepast. Indien gewenst kan de methode verder worden uitgebreid (onder meer naar presentatie van het effect op gewasopbrengsten) en ontsloten, zodat deze ook door betrokken waterbeheerders zelf gebruikt kan worden.



Figuur 52: Droogteperiodes voor Hupsel gebaseerd op de zogenaamde variabele drempelwaarde, waarbij er vanuit wordt gegaan dat alle waarden onder het 20^{ste} percentiel aangeven dat droogte voorkomt. Referentiesituatie.



Figuur 53: Droogteperiodes voor Hupsel gebaseerd op de zogenaamde variabele drempelwaarde, waarbij er vanuit wordt gegaan dat alle waarden onder het 20^{ste} percentiel aangeven dat droogte voorkomt. Situatie waarbij er sprake is van verminderde onttrekking uit grondwater in de omgeving. De rode lijn geeft de drempelwaarde voor de referentiesituatie (Figuur 52). De verschuiving in de drempelwaarde als gevolg van de maatregel geeft inzicht in het effect van de maatregel op de verandering van grondwaterstand en bodemvocht.

6. Tussentijdse conclusies en aanbevelingen

6.1. Analyse droogte 2018

De meteorologische droogte van 2018 had tot gevolg dat het bodem-water-systeem in grote delen van het projectgebied het droogst was van de laatste 30 jaar (1988-2018). Voor een gedegen analyse van de droogte zijn gegevens over het bodem-water-systeem en gebiedskennis onontbeerlijk. De benodigde gegevens waren vaak niet voldoende voorhanden. Vooral voldoende lange tijdreeksen aan bodemvocht werden gemist, evenals betrouwbare cijfers over beregening, de werkelijke verdamping en de afvoer van oppervlaktewater. Een dergelijk gemis klemmt temeer wanneer we maatregelen vóór, tijdens en ná een droogte willen kunnen beoordelen om vervolgens gericht droogteschade te voorkomen. De door ons ontwikkelde analysemethodiek kan ook bijdragen aan een gerichtere wijze van gegevens verzamelen.

Over de huidige versie van de methodiek kan het volgende worden geconcludeerd:

- De methodiek behelst een uniforme werkwijze waarin verschillende informatiebronnen worden gebruikt: metingen door sensoren, handwaarnemingen, remote sensing informatie, vegetatieopnamen, modelberekeningen (lokaal en regionaal), analyse van tijdreeksen;
- De methodiek is gedeeltelijk getest voor een aantal locaties en focus-stroomgebieden;
- Uit de toepassing van de hydrologische modellen voor gebieden en locaties bleek dat die goed in samenhang gebruikt kunnen worden voor toekomstprojecties, mede als basis voor operationeel én strategisch (slim) waterbeheer.
- De analyse van tijdreeksen was nuttig om de droogte van 2018 in historisch perspectief te plaatsen;
- De in het project toegepaste droogte-indices zijn belangrijke 'thermometers' die inzichtelijk maken hoe de droogte zich voortplant in de compartimenten van de waterkringloop: atmosfeer, bodemvocht, grondwater, oppervlaktewater;
- Regionale verschillen in 'drivers' (meteorologische droogte, wateraanvoer mogelijk of niet), in gebiedskenmerken (geohydrologie, landgebruik) en in beheer (peilregime, onttrekkingen voor beregening) dienen expliciet in de analyse te worden betrokken.

Over de toestand van landbouw en natuur kan worden geconcludeerd (bron: berekeningen LHM en SWAP, RS-informatie, LMF-data):

- Landbouwgewassen hadden last van droogtestress, deels van hittestress: nog nooit in de afgelopen 30 jaar was het zo droog voor de vegetatie;
- Gewasproductie liep daardoor terug via een reductie van de transpiratie;
- In de natuur vielen er oppervlaktewateren (venen, beken, sloten) (deels) droog; een deel van de ondiep-wortelende vegetatie stierf af;
- De respons van de terrestrische vegetatie ijlt na op droogte van 2018. Over de uiteindelijke gevolgen kan pas een uitspraak worden gedaan nadat nieuwe veldgegevens binnenkomen: monitoring in 2019 en daarna is daarom essentieel voor de evaluatie.

Resultaten

De gevolgen van de droogte verschillen binnen het onderzochte zandgebied. Dat komt door verschillen in weersgesteldheid, in de mogelijkheid water aan te voeren, in gebiedskarakteristieken en in het gebruik van het bodem-water-systeem.

Als tijdens de droogte de onttrekking van grondwater uit diepe pakketten door drinkwaterbedrijven wordt gereduceerd, dan heeft dat nauwelijks positieve gevolgen voor de freatische grondwaterstand en dus de capillaire nalevering van water aan de begroeiing. Winst is alleen te behalen als de diepe grondwaterwinning permanent wordt gereduceerd.

Beregening vindt plaats uit oppervlaktewater (naar schatting 1/3 van totaal) en uit grondwater (naar schatting 2/3 van totaal). De beregening uit grondwater was in 2018 een factor twee groter dan normaal, wat zorgde voor een hogere transpiratie op de beregende percelen, en dus hogere gewasopbrengsten aldaar. In de vier zomermaanden juni t/m september 2018 werd voor beregening ongeveer dezelfde hoeveelheid grondwater onttrokken als voor de drinkwatervoorziening, in Noord-Brabant zelfs anderhalf keer meer. De vele lokale onttrekkingen veroorzaken echter effecten op regionale schaal: afname van afvoeren in sloten en beken,

daling van grondwaterstanden en afname van kwelstromen. Als de onttrekkingen uit het grondwater worden gereduceerd, dan neemt de transpiratie van gewassen op beregende percelen af, maar die op niet-beregende percelen en van natuurgebieden neemt toe, door verhoogde grondwaterstanden. Als de onttrekkingen uit oppervlaktewater verminderen, dan daalt de transpiratie van gewassen op beregende percelen, met daarnaast een beperkt effect op het grondwatersysteem.

Waterschappen kunnen met stuwbeheer voor, tijdens en na droogte een bijdrage leveren aan de beperking van de effecten van een droge periode. Belangrijk is dat dit op regionale schaal wordt ingezet en dat daarbij alle ontwateringsmiddelen inclusief haarvaten worden aangepakt om voldoende effectief te zijn. Daarnaast is goede communicatie en draagvlak bij bestuur, beleid en uitvoerend beheer, alsmede in de streek een must. Er moet natuurlijk voldoende water aanwezig zijn in de watergangen om te stuwen. Positieve directe effecten bestaan uit het minder afvoeren van oppervlaktewater en het verhogen van grondwaterstanden, met name in Zuid- en Oost-Nederland. Daarnaast is er een indirect effect via het beperken van de drainage van aanliggende percelen. Daarmee wordt grondwater vastgehouden in de deelgebieden. De transpiratiereductie neemt af door hoger ingestelde stuwen. Als daarnaast de drainagebasis in de haarvaten van de bodem-water-systemen wordt verhoogd, dan is er meer winst te halen dan met alleen opgezette stuwen. Ook hier geldt natuurlijk dat er voldoende water aanwezig moet zijn in de haarvaten om effect te sorteren.

Het stopzetten van de wateraanvoer naar watergangen in gebieden maakt dat de grondwaterstand in de aanpalende gebieden iets daalt en de transpiratie afneemt. Dit effect is niet bijzonder groot. Het beregenen uit het oppervlaktewater heeft grotere gevolgen: watergangen vallen daardoor eerder droog, wat zeer schadelijk is voor het aquatische leven.

De werkelijke verdamping is een belangrijke variabele tijdens droogte. In combinatie met cijfers over de potentiële verdamping geeft deze post aan in welke mate een vegetatie last heeft van vochttekorten. De neerslag minus de werkelijke verdamping bepaalt bovendien in hoeverre de watervoorraad in de ondergrond wordt aangevuld, dan wel wordt uitgeput. De werkelijke verdamping via remote sensing beelden in de vorm van SATDATA hebben we gebruikt om die aanvulling/uitputting te berekenen. We hebben nog geen kwaliteitstoets op de SATDATA kunnen doen. Hiervoor zijn verdampingsmetingen aan de grond nodig. We hebben wel gekeken of de SATDATA passen in de waterbalans van focus-stroomgebied Hupselse Beek; die resultaten waren redelijk tot goed. Nader onderzoek is nodig in Fase 2. We gaan de SATDATA koppelen aan berekende werkelijke verdamping via de hydrologische modellen LHM en SWAP.

De analyse van bodemvochtcijfers vereist meer meetpunten verspreid over het projectgebied. We zijn begonnen met metingen uit het Programma Lumbricus en het meetnet van ITC Enschede in regio's Twente (Vechtstromen) en Raam (Aa en Maas) wordt hier in Fase 2 bij betrokken. De metingen laten zien dat de bodemvochtsensoren een 'early warning' zijn voor droogte en dat de (water-)vullingsgraad van de bodem hiermee beter geschat kan worden dan op basis van grondwaterstanden alleen. Bodemvochtdata leiden tot een beter begrip van de gevolgen van neerslagtekort/overschot en de effecten van perceelmanagement door de agrariër, bijvoorbeeld via beregening, regelbare drainage en sub-irrigatie. Nader onderzoek en uitbreiding van het meetnet is in Fase 2 aan de orde.

Afvoercijfers van watersystemen zijn belangrijk voor het begrijpen van het watersysteem op gebiedsniveau. Afvoer en droogval zijn integrale indicatoren van de hydrologische toestand van een gebied. Meer kwaliteit en langere meetreeksen zijn nodig om de droogte van 2018 te duiden. De droogval van beken in bijvoorbeeld het beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel medio juli 2019 is tekenend voor de droogte in de streek. Als het elke dag een beetje regent, dan blijft de verdamping van de vegetatie op peil, maar verandert de hydrologische droogte in de compartimenten grondwater en oppervlaktewater niet, want er vindt geen grondwateraanvulling plaats.

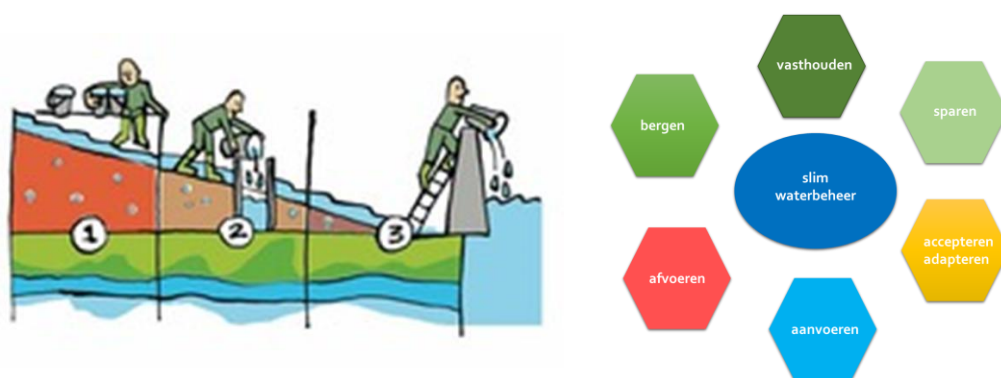
Een eerste aanzet van analyse van de focus-stroomgebieden Hupsel, Hooge Raam, Vlootbeek, regio Someren en Turfvaart laat zien dat de droogteschade ten gevolge van een reductie van de transpiratie op gebiedsniveau 15 à 30% is. Er zijn met berekeningen en metingen waterbalansen opgesteld, waarbij data onderling kunnen worden vergeleken en beoordeeld. Het gebruik van remote sensing gewasindices als NDWI en NDVI sluit hierbij aan, waarmee we droogteschade voor gebieden als geheel of voor landgebruikstypen afzonderlijk kunnen laten zien. Effecten van beregening zijn ook zichtbaar in de remote sensing beelden, alsmede het droogvallen van vennen in natuurgebieden. Op deze wijze integreren we kennis en informatie in focus-stroomgebieden, waarmee we verdiepend verder gaan in Fase 2.

De natuur heeft in 2018 te leiden gehad onder de droogte. De effecten hiervan zijn nog niet altijd zichtbaar uit data van het Landelijke Meetnet Flora (LMF; data vanaf 1999). Deels is dat omdat we opnamegegevens over 2018 misten. Een ander deel van de verklaring is dat natuurlijke vegetaties niet direct reageren op droogte, maar daarop na-ijlen. Het is daarom van groot belang de LMF-data uit 2018 en 2019 tijdig beschikbaar te hebben voor analyse in Fase 2. De data 1999-2018 zijn wel alvast geanalyseerd op trends in de tijd voor de indicatoren zout, vocht, voedselrijkdom en zuurgraad. De resultaten geven een ruimtelijk wisselend beeld te zien. Nader onderzoek in Fase 2 zal leiden tot meer duiding en verklaring van optredende trends (1999-2019) en respons op de droogte van 2018.

Het herstel na de droogte van 2018 heeft deels plaatsgevonden, met verschillen in ruimte en tijd, en wordt deels alweer teniet gedaan door het neerslagtekort in 2019 (stand eind juni 2019). Via de droogte-indices van hydrologische compartimenten kunnen we zien dat de wortelzone-droogte een tijdlang opgeheven was tijdens de overgang van 2018 naar 2019, maar dat geldt voor de grondwater- en afvoerdroogte in mindere mate (zie droogval beken in beheergebieden van bijvoorbeeld Rijn en IJssel en Vechtstromen medio juli 2019).

6.2. Handeling vóór, tijdens en na droogte

Aspecten van houding en gedrag van waterbeheerders ten aanzien van de omgang met droogte, zo blijkt uit diverse evaluaties, komen neer op (vrij vertaald) 'besef en bewustzijn creëren, lef tonen bij het nemen van maatregelen, kiezen en doen, fouten durven maken, woorden én daden laten zien'. Daar voegen we vanuit dit project aan toe dat het van wezenlijk is belang bij de omgang met droogte te denken en te werken in droogte-indices en compartimenten van het bodem-water-systeem. Diverse maatregelen richten zich op een effectieve werking in specifieke perioden: vóór, tijdens en na droogte.



Figuur 54: Waterbeheer onder natte en droge situaties en de samenhang/overlap daartussen.

In Tabel 9 geven we een kort overzicht van de generieke handelingen die vóór, tijdens en na droogte genomen kunnen worden voor de vier compartimenten atmosfeer, bodem, grondwater en oppervlaktewater. De maatregelen voordat de droogte begint zijn effectiever, omdat dan water in voldoende mate beschikbaar is. Tijdens de droogte biedt alleen wateraanvoer verlichting. Toestaan van onttrekking van grond- of oppervlaktewater raakt tijdens de droogte de natuur en de landbouwpercelen die niet beregend worden.

Tabel 9: Generieke handelingen vóór, tijdens en na droogte. Ter aanvulling in Fase 2.

Compartiment & Droogte-index	Vóór droogte	Tijdens droogte	Na droogte	Opmerking
Atmosfeer Neerslagtekort SPEI	Geen	Geen	Geen	
Bodem Vullingsgraad SMI	Voorraad vergroten Sparen Vasthouden	Beregenen Infiltreren	Geen	Risico wateroverlast Schaderegeling? Bodemverbetering? Ontwatering aanpassen
Grondwater Stijghoogte SGI	Vasthouden Niet afvoeren Sparen	Onttrekking verbieden	Geen	Haarvaten Hoofdwatersysteem Ontwatering aanpassen
Oppervlaktewater Afvoer SDI	Vasthouden Niet afvoeren (stuwen) (Bergen)	Water aanvoeren Onttrekking verbieden	Vasthouden Niet afvoeren (stuwen) (Bergen)	Haarvaten Hoofdwatersysteem Afwatering aanpassen

Om effectieve handelingen te onderbouwen en te ondersteunen, dienen monitoring, dataverzameling en evaluaties in operationele actieplannen verwerkt te worden. *Actuele informatie* uit het veld is nodig over de toestand van het bodem-water-systeem buiten. *Modellen draaien mee* om de metingen aan te vullen en scenario's van het weer en ingrepen te analyseren. *Anticiperen op en het voorspellen van het weer* is natuurlijk belangrijk. Operationeel *grondwaterbeheer vóór, tijdens en na droogte* is van belang. Structurele maatregelen ten aanzien van de inrichting en het beheer van gebieden vullen ad hoc droogtemaatregelen aan. Dit is belangrijk omdat ad hoc maatregelen tijdens droogte een beperkte reikwijdte hebben. Het herstel na een droogte vereist een actieve houding en mogelijk een herinrichting van het ontwatering- en afwateringsysteem.

Actuele informatie uit het veld: toestand bodem-water-systeem buiten

Het is van belang met directe metingen de toestand van het watersysteem continu in beeld te brengen. Betrouwbare meetgegevens, op de juiste plek in het systeem om het systeemgedrag te kunnen duiden, en continue ontsloten via telemetrie, dienen als thermometers van het systeem. Op deze wijze wordt zonder tussenkomst van modellen, die altijd een schematische weergave geven van de werkelijkheid, 'ground truth' informatie verkregen. Van belang is hier de verschillende variabelen voor het duiden van de verschillende droogtecomponenten in mee te nemen: neerslag, werkelijke verdamping, bodemvochtgehalte, grondwaterstand en afvoer.

Modellen draaien mee

Voor een te selecteren aantal meetlocaties dienen modelanalyses te worden uitgevoerd. Deze zijn enerzijds nodig om de doorwerking van droogte beter te begrijpen, procesmatig te kunnen onderbouwen en effecten van maatregelen te bepalen. Anderzijds bieden modellen de mogelijkheid om aanvullende, moeilijker te meten, variabelen te analyseren, zoals de transpiratiereductie van het gewas. Bovendien kunnen relatief korte meetreeksen met een gekalibreerd model worden verlengd naar een langjarige periode. Hierdoor kan de actuele toestand van het hydrologisch systeem en de vegetatie in historisch perspectief geplaatst worden. Dit is nodig om vast te stellen of er daadwerkelijk sprake is van een droogte, of dat diepe grondwaterstanden (als voorbeeld) karakteristiek zijn voor het systeem. Vlakdekkende modellen kunnen worden gebruikt om de inzichten die opgedaan worden voor puntmetingen, in ruimtelijk perspectief te plaatsen.

Voorspellen van het weer en erop anticiperen

Door met continue metingen steeds inzicht te hebben in de toestand van het systeem, gecombineerd met voorspellingen van de toestand van het systeem voor de komende 5 á 10 dagen op basis van de

weersverwachting, wordt de vinger aan de pols gehouden en kunnen zo snel mogelijk maatregelen worden genomen.

Grondwaterbeheer

Grondwaterbeheer zal waarschijnlijk meer actief moeten plaatsvinden. De analyse van 2018 en het gevolgde herstel in 2019 laat zien dat grondwaterstanden en afvoeren niet zijn hersteld in de winter. Daardoor is de toestand van het systeem waarmee we 2019 zijn ingegaan droger dan in 2018. Actief grondwaterbeheer kan bijdragen aan tijdig herstel voor een nieuw groeiseizoen. Mogelijke maatregelen zijn structurele vergroting van de grondwateraanvulling, vermindering van de grondwateronttrekkingen en water vasthouden.

6.3. Monitoring en modellering

Zoals in de paragraaf hiervoor al aangegeven brengen directe metingen de toestand van het watersysteem continu in beeld. Ze fungeren als zogenaamde 'thermometers' van het systeem en geven 'ground truth' informatie. De volgende variabelen voor het duiden van de verschillende droogtecomponenten moeten hierin meegenomen worden:

- Neerslag en verdamping;
- Bodemvocht;
- Grondwaterstand;
- Afvoer;
- Aanvoer.

Metingen voor grondwaterstanden en stijghoogtes vinden reeds verspreid plaats over Nederland. Steeds vaker zijn deze metingen ook uitgerust met telemetrie, zodat zij continu ontsloten worden en gedetailleerd inzicht verkregen wordt in de toestand van het systeem. Echter, niet elk meetpunt is geschikt om de droogtetoestand van het systeem te duiden. Er moet een goede spreiding zijn over infiltratie- en kwelgebieden, en over landbouw en natuur. Daarnaast geven peilbuizen die direct naast een watergang staan niet het goede beeld van de response van het watersysteem; de exacte plaatsing van de peilbuizen in het veld is dus van belang.

De combinatie van peilbuisgegevens met bodemvochtmetingen is nodig om de doorwerking van neerslag en verdamping op bodemvocht en grondwateraanvulling beter te begrijpen en te kunnen voorspellen. Bodemvocht vormt de schakel tussen droogte in de atmosfeer en in het grond- en oppervlaktewater. Lage vochtgehalten in de zomerperiode bufferen een groot deel van de zomerneerslag, waardoor de grondwateraanvulling in deze periode gering is. Pas nadat de neerslag in het najaar de bodem op veldcapaciteit heeft gebracht, komt de grondwateraanvulling weer op gang. Dit betekent dat de huidige lage grondwaterstanden en geringe beekafvoeren nog tot minstens na de zomerperiode van 2019 zullen aanhouden. In deze studie willen we dit systeemgedrag laten zien en kwantificeren, zowel modelmatig als met metingen. Hoewel er veel locaties met grondwaterstandsmetingen zijn, is de combinatie met vochtgehaltemetingen heel beperkt. Er zijn vochtgehaltemetingen in stroomgebieden van Waterschap Aa en Maas (sinds 2018) en Waterschap Vechtstromen (sinds 2016). Ook worden bodemvochtmetingen uitgevoerd in Programma Lumbricus, waar voor enkele landbouwpercelen continu bodemvocht, grondwaterstand en neerslaghoeveelheid wordt gemeten. In Fase 2 en 3 willen we op meer locaties de ontwikkeling van het bodemvocht in de tijd te meten, in combinatie met de grondwaterstand. Het is belangrijk te begrijpen wanneer de huidige lage grondwaterstanden zich herstellen, en hoe snel. Wat zijn de achterliggende processen? Daarom worden de sensoren voor bodemvocht en grondwaterstand zo spoedig mogelijk geplaatst (Fase 2) zodat zowel de opvulling van bodemvocht als de stijging van grondwater online gevolgd kunnen worden. We stellen voor 10 extra locaties in te richten, verspreid over de deelnemende waterschappen en verspreid over natuur en landbouw. We richten ons vooral op de droge locaties, maar richten ook twee locaties met kwel in. De locaties worden in nauw overleg met de waterschappen geselecteerd. Onze voorkeur heeft om reeds bestaande peilbuislocaties uit te breiden met bodemvochtmetingen. Vooral langere reeksen van stijghoogte metingen zijn waardevol. Zulke metingen stellen ons in staat bodemvochtmetingen van 1-2 jaren uit te breiden naar langjarige reeksen.

Door plotmodellen (SWAP) te maken en te kalibreren op de meetgegevens, zoals al gedaan voor dit onderzoek op basis van gemeten grondwaterstanden, kunnen meetreeksen worden verlengd naar een standaard periode, bijv. 30 jaar, waardoor goede vergelijking van droogteperiodes voor de verschillende droogtecomponenten kan plaatsvinden. De lengte van de tijdreeks beïnvloedt namelijk de duiding van de

droogte. Door meetreeksen te verlengen naar een juiste referentieperiode, die voor alle meetpunten gelijk is, ontstaat een uniforme werkwijze en gelijke interpretatie van een droogte. Droogte is per definitie een relatief begrip (afwijkend van de normale situatie), daarom zijn lange tijdreeksen belangrijk voor de analyse. Bovendien kan met de modellen een doorvertaling worden gemaakt van gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehaltes naar transpiratiereductie van het gewas, drainage naar het oppervlaktewater en grondwateraanvulling.

We gaan LHM-berekeningen voor LSW's analyseren op droogvallende watergangen in 2018 en het wederom (of niet) op gang komen van de afvoer in 2018-2019-2020. Als waterbeheerders informatie hebben over droogval en op gang komen van (beek)afvoer (waar en wanneer), dan biedt die informatie een goede bron voor toetsing van modeluitkomsten.

Kijken we naar de gevolgen van de droogte voor de maatschappij, dan horen ook waarnemingen aan landbouwgewassen en de natuur daarbij. Voor de landbouw lijkt het ons zinvol, als dat mogelijk is, om opbrengstgegevens op te vragen. De door hydrologische modellen berekende opbrengstderving dient immers te corresponderen met de gewasreductie in het veld. De LMF-gegevens zijn al genoemd, maar heel waardevol kan het zijn nieuwe vegetatieopnamen te maken in het voormalige referentienetwerk van Staatsbosbeheer, dat bestond uit pq's in verschillende vegetatietypen waarbij ook de grondwaterstand en bodemeigenschappen waren gemeten.

Daarnaast is het raadzaam de maatregelen van beheerders en de beoogde effecten ervan te registreren, alsmede de effecten daadwerkelijk te meten, voor zover deze niet in de standaardmeetnetten besloten zitten.

Satellietbeelden worden extern verzameld, terwijl voor airborne RS geldt dat deze 'on demand' en per event kan worden ingezet en veelal hoge resolutie-data oplevert.

Waarnemingen aan de natuurlijke vegetatie worden bij voorkeur uitgevoerd met een meting van de grondwaterstand ter plekke. Data van LMF uit 2018 en 2019 komen hopelijk tijdig beschikbaar voor een volgend groeiseizoen, ter tijdige evaluatie in Fase 2.

6.4. Integraal droogteportaal

In het hele projectgebied volgen we een uniforme aanpak voor het opzetten en informatie integreren, analyseren en delen van informatie delen, bemeten van de actuele situatie en het doen van voorspellende berekeningen. Een online portaal voor het projectgebied moet toegang geven tot de actuele toestand van het systeem met daarbij de uniforme interpretatie van de droogtecomponenten voor de meetlocaties en ruimtelijke opschaling met LHM en RS-satellietinfo.

Zowel de meetgegevens (punt), gekalibreerde plotmodellen, de afgeleide droogte-indices, remote sensing gegevens en ruimtelijke duiding met hydrologische modellen kunnen worden ontsloten via een zogenaamd droogteportaal. De werkwijze die we in dit project opzetten biedt hiervoor de benodigde ingrediënten. De slag die nog gemaakt moet worden in Fase 2 is om de gebruiker meer bij de hand te nemen en op een logische manier door de beschikbare informatie te leiden. De informatie moet geïntegreerd worden en moet leiden tot beter begrip en duiding van de toestand van het watersysteem. Dit kan gedaan worden om de actuele situatie in beeld te brengen, maar ook kunnen projecties gedaan en getoond worden voor de komende 5 à 10 dagen op basis van de weersverwachting, of voor droge en natte weerjaren.

6.5. Fase 2 en 3

Fase 2 van het project houdt een verdiepende analyse in, voortbouwend op Fase 1. Er zal o.a. aandacht zijn voor het al dan niet zichtbaar zijn in berekeningen en RS-informatie van effecten van maatregelen voor gebieden. Hiervoor hebben we informatie nodig over wat, waar en wanneer gedaan is. Ook breiden we de monitoring van bodemvocht uit, zodat het verband tussen meteorologische en hydrologische droogte beter gelegd kan worden. Fase 3 richt zich met de resultaten van Fase 1 en 2 op onderbouwing en informatievoorziening van een volgende versie van het handelingsperspectief (2020).

Een plan van aanpak voor Fase 2 is reeds gemaakt. Om de onderzoeksvragen en doelstellingen voor die fase te bereiken, werken we aan de volgende activiteiten:

1. Workshops, overleg en informatievoorziening – afstemming en aanscherpen doelen en verwachtingen;

2. Quick-scan validatie van de ontwikkelde analyse-methodiek in Fase 1;
3. Verdieping analyses totale studiegebied en specifiek voor focus-stroomgebieden;
4. Kwantificeren effectiviteit van maatregelen;
5. Aanvullende monitoring en data-inwinning en volgen actuele toestand;
6. Operationele werkzaamheden (optioneel).

Een onderdeel daarvan is dus uitbreiding van monitoring van bodemvocht en ook van beekafvoeren. We willen op meer locaties de ontwikkeling van het bodemvocht in de tijd te meten, in combinatie met de grondwaterstand. Het is belangrijk te begrijpen wanneer de huidige lage grondwaterstanden zich herstellen, en hoe snel. Wat zijn de achterliggende processen? Daarom worden de sensoren voor bodemvocht en grondwaterstand zo spoedig geplaatst, zodat zowel de opvulling van bodemvocht als de stijging van grondwater online gevolgd kunnen worden. We stellen voor binnen dit project 10 extra locaties in te richten, verspreid over de deelnemende waterschappen en verspreid over natuur en landbouw. Dit aantal is gering en dient mede ter motivatie om er meer werk van te gaan maken in de reguliere monitoring van beheerders. We richten ons nu vooral op de droge locaties, maar richten ook twee locaties met kwel in. De locaties worden in nauw overleg met de waterschappen geselecteerd (augustus/september 2019). Qua beekafvoeren willen we ons richten op het verbeteren van belangrijke meetlocaties, in overleg met waterschappen, en het inzetten en trainen van vrijwilligers (o.a. Veluwe-omgeving), die we kunnen voorzien van meetapparatuur.

7. Referenties

- Anonymous, 2018. Handleiding voor het Landelijk Meetnet Flora - Milieu- en Natuurkwaliteit. Herziene uitgave 2018, Centraal Bureau voor de Statistiek & Interprovinciale Werkgroep voor Inventarisatie en Monitoring van Natuur en Landschap (IAWM) Subwerkgroep Flora en Vegetatie, Den Haag/Heerlen.
- Bartholomeus, R.P., Stofberg, S.F., Van den Eertwegh, G.A.P.H., Cirkel, D.G., 2017. Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-efluent Haaksbergen - 2016. BTO 2017.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., Voortman, B.R., Witte, J.P.M., 2013. Metingen en proceskennis vereist voor nauwkeurige verdampingsberekening in grondwatermodellen. *Stromingen*, 19(2): 37-52.
- Bloomfield, J., Marchant, B., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 4769-4787.
- Bolton, D.K., Friedl, M.A., 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173: 74-84.
- Dirkse, G.M., Kruijsen, B.W.J.M., 1993. Indeling in ecologische groepen van Nederlandse blad- en levermossen. *Gorteria*, 19: 1-29.
- Doherty, J., 2010. PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer. Comput., Brisbane, Queensland, Australia.
- eLeaf, 2017a. Methodiek SAT-DATA 2.0.
- eLeaf, 2017b. Plausibiliteitstoets SAT-DATA 2.0.
- Hennekens, S.M., Schaminée, J., 2001. TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*: 589-591.
- Hertog, A.J., Rijken, M., 1992. Geautomatiseerde bepaling van natuurbehoudswaarde in vegetatie-opnamen., Provincie Gelderland, Arnhem.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Clausen, B., Peters, E., Gustard, A., 2004. Hydrological Drought Characteristics. In: Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J. (Eds.), *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier Science B. V., pp. 139-198.
- KNMI Datacentrum, 2019. Neerslagradar-producten (website).
- Kroes, J., 2018. Soil hydrological modelling and sustainable agricultural crop production at multiple scales, Wageningen University.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., Van Walsum, P.E.V., 2017. SWAP version 4, Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *International journal of climatology*, 22(13): 1571-1592.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11: 277-288.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society Boston, MA, pp. 179-183.
- NHV-Werkgroep Verdamping, 2015. Verdamping in de hydrologie. NHV-Special 8, 2015.
- Quarmby, N., Milnes, M., Hindle, T., Silleos, N., 1993. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing*, 14(2): 199-210.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Runhaar, J., van Landuyt, W., Groen, C.L.G., Weeda, E.J., Verloove, F., 2004. Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen [Revision of the classification in ecological species groups for the Netherlands and Flanders]. *Gorteria*, 30: 12-26.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens Environ*, 79(2-3): 213-224.
- Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical research letters*, 35(2).
- Stahl, K., 2001. Hydrological drought: A study across Europe, Institut für Hydrologie der Universität.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., De Bruin, H.A.R., 2017. Werkelijke verdamping: naar een integrale benadering vanuit hydrologisch en meteorologisch oogpunt. *Stromingen*, 28(3).
- Van der Gaast, J.W.J., Massop, H.T.L., Vroon, H.R.J., Staritsky, I.G., 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken, Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. AlterraRapport 1339. 111 blz. 54 figuur; 27 tab.; 64 ref.
- Van Ek, R., Witte, J.P.M., Mol-Dijkstra, J.P., De Vries, W., Wamelink, G.W.W., Hunink, J., Van der Linden, W., Runhaar, J., Bonten, L., Bartholomeus, R., Mulder, H.M., Fujita, Y., 2014. Ontwikkeling van een gemeenschappelijke effect module voor terrestrische natuur. Rapport 2014-22, STOWA, Amersfoort.
- Van Loon, A., Van Huijgevoort, M., Van Lanen, H., 2012. Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11): 4057-4078.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.

- Voortman, B., Witte, J.-P., van Rheenen, H., Bosveld, F., Elbers, J., van der Bolt, F., Heijkers, J., Hoogendoorn, J., Bolman, A., Spek, T., 2016. Een nieuwe en handzame lysimeter: eerste stap naar een nationaal netwerk voor de werkelijke verdamping? *Stromingen: vakblad voor hydrologen*, 22(2): 49-63.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018. Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. STOWA rapport 2018-48.
- Witte, J.P.M., 2019. Validatie neerschaling Landelijk hydrologisch model door toepassing van de Waterwijzer Natuur, FWE, Oosterbeek.
- Witte, J.P.M., Aggenbach, C.J.S., Runhaar, J., 2007a. Deel II. Grondwater voor Natuur, Beoordeling van de grondwatertoestand op basis van de Kaderrichtlijn Water. RIVM, Bilthoven, pp. 47-102.
- Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Cirkel, D.G., Doornik, E., Fujita, Y., Runhaar, J., 2014. Manual and description of ESTAR, version 01; A software tool to analyse vegetation plots, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Witte, J.P.M., Pastoors, R., Van der Hoek, D.J., Bartholomeus, R.P., Van Loon, A., Van Bodegom, P.M., 2011a. Is het Nationaal Hydrologische Instrumentarium gereed voor het voorspellen van natuureffecten? *Stromingen*, 17(2): 15-26.
- Witte, J.P.M., Strasser, T., Slings, R., 2011b. Kwantitatieve vegetatiewaardering beperkt bruikbaar Landschap, 28(2): 56-66.
- Witte, J.P.M., Wójcik, R.B., Torfs, P.J.J.F., de Haan, M.W.H., Hennekens, S., 2007b. Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values. *J Veg Sci*, 18: 605-612. DOI:10.1111/j.1654-1103.2007.tb02574.x
- Wösten, H., De Vries, F., Hoogland, T., Massop, H., Veldhuizen, A., Vroon, H., Wesseling, J., Heijkers, J., Bolman, A., 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387, Alterra, Wageningen.
- Yevjevich, V.M., 1967. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *An. Hydrology papers* (Colorado State University); no. 23.

8. Bijlagen

8.1. Organisatie

Provincie Noord-Brabant trekt het project en is aanspreekpunt/opdrachtgever voor het uitvoerend consortium. Het Ministerie van LNV is direct opdrachtgever voor WUR als lid van het consortium. Diverse partijen dragen financieel en inhoudelijk deel aan het project. De deelnemers zijn:

Koen Rutten	BIJ12
Jeroen Castelijns	Brabant Water
Marleen van der Velden	Brabant Water
Dimmie Hendriks	Deltares
Joachim Hunink	Deltares
Perry de Louw	Deltares
Janneke Pouwels	Deltares
Flip Witte	FWE
Peter Hoefsloot	H55
Dion van Deijl	KnowH2O
Gé van den Eertwegh	KnowH2O
Marjolein van Huijgevoort	KWR
Ruud Bartholomeus	KWR
Janine de Wit	KWR
Annegien Helms	MinLNV
Gerard Grimberg	MinLNV
Maike Moolhuijsen	MinLNV
J.H.A. Hillebrand	MinLNV
Corine Geujen	NM
Esther Moens	NM
Dirk-Jan van der Hoek	PBL
Bert Hendriks	PDr
J. Snijder	PDr
Leo de Vree	PDr
Wim van Oosterom	PDr
Fred van den Brink	PGLD
Henk ten Brinke	PGLD
Teun Spek	PGLD
Marja Korevaar	PL
Jack Geraedts	PL
Leo Spoormakers	PL
Desirée Rijnders	PNB
Jos van de Staaij	PNB
Matthijs ten Harkel	PNB
Peter Ramakers	PNB
Esther Dierissen	POv
Anna Noltes	POv
Rini Bulterman	POv
WA.Berkhout	POv
Berry van Arkel	PU
Erik Meijs	PU
Jacco de Hoog	PU
Janco van Gelderen	PU
Bert Geerdes	PU
Jackie Straathof	RWS
Daniël Coenen	SBB
Rob van Dongen	SBB
Rudie van Venetië	SBB
Saskia de Jonge	SBB
Peter Salverda	Vitens
Bart Brugmans	WAM
Chris van Rens	WAM
Godert Verbeek	WAM
Frank van der Bolt	WAM
Kees Peerdeman	Regio Maas DHZ/WBD
Inge Wesel	WBD
Kees Vink	WBD
Martin Stamhuis	WBD
Aart van Wessel	WDD
Lonneke Schilte	WDD
Bert Hendriks	WDOD
Jurriaan Cok	WL
Myriam de Graaf	WL
Peter Hulst	WL
Ron Theunisz	WL
John Lenssen	WRIJ
Ronald van Ark	WRIJ
Gert van den Houten	WRIJ
Twan Rosmalen	WRIJ
Heike Shuval	WSRL
Jos van Dam	WUR-SLM
Bas Worm	WVS
Almer Bolman	WVV
Elbert Schrama	WVV
Christian Huisling	WVV
Harmen van de Werfhorst	WVV
Peter van Beers	WVV
Johan Elshof	ZLTO
Twan Gielen	LLTB
H. Brink	WMD
Hille Kraak	LTO Noord

8.2. Methodiek

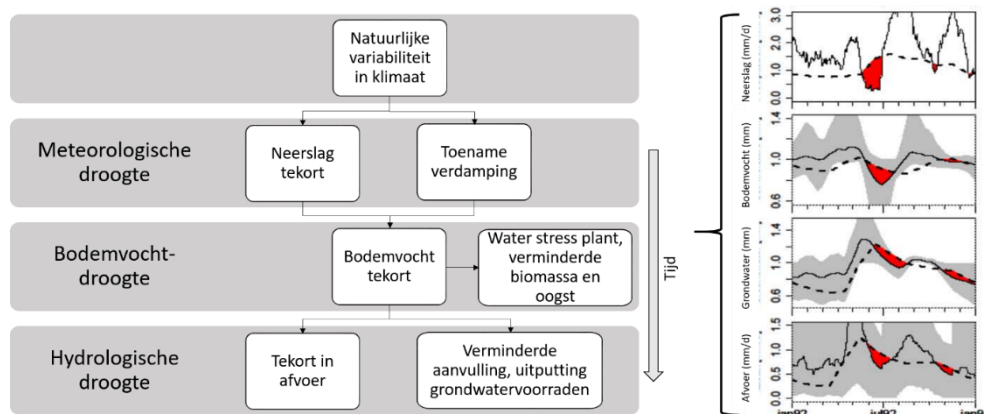
8.2.1. Aangeleverde data

Aangeleverd door	Wat	Format	Datum aanlevering
HDSR	ETact		4-3-2019
	ETdeficit		4-3-2019
	DWO = days without observation	7z-bestanden	4-3-2019
	QUALITY = een kwaliteitsmaat voor de ruimtelijke variabiliteit	7z-bestanden	4-3-2019
8. Waterschap Aa en Maas	afvoeren	xml+shp	4-3-2019
	bodemvocht	xml, excel, pdf	4-3-2019
	grondwaterstanden	xml	4-3-2019
	onttrekkingen landbouw	shp, excel	4-3-2019
	tijdreeksanalyse	pdf	4-3-2019
	verdamping		
	stroomgebieden/focusgebieden	shp	26-3-2019
	EHS en NNP	shp	5-4-2019
	grondwaterstanden voor 2000	csv	18-4-2019
	metadata peilbuizen	excel	18-4-2019
	Onttrekkingsgegevens 2018	excel	7-3-2019
Provincie Drenthe	niet in staat data in korte tijd aan te leveren, meeste staan in Dino		
10. Waterschap Brabantse Delta	Grondwaterstanden	csv	4-3-2019
	Info SWAP modelleringen	emf bestanden	4-3-2019
	grondwaterstanden provincie	csv van hydronet portal ontvangen	17-4-2019
	oppervlaktewater kwantiteits metingen	diverse csv's	15-3-2019
	meetreeksen beregeningsbeleid	csv	15-3-2019
	focus stroomgebieden, stuwen, duikers enz.	meerdere shapefiles	15-3-2019
	onttrekkingen (=beregeningssputten)	shp	26-3-2019
	onttrekkingsgegevens van beregening	excel	9-4-2019
	gegevens hydronet potaal	online	26-3-2019
	neerslag, verdamping	rapporten, emf grafiek	15-3-2019
Provincie Utrecht	telemetrielocaties	https://water-public.munisense.net/portal/provincie-utrecht-water	7-3-2019
	hele grondwatermeetnet	http://www.geosolutions.nl/sites/grondwaters-tandenutrecht/	7-3-2019
	gws primair meetnet	van website	
	technische gegevens + basisgegevens meetnet	van website	
	verdrogingsmeetnet NAP	van website	
	telemetrie gws reeksen	van website	
	technische gegevens en grondwaterstanden oostzijde provincie	csv	7-3-2019 & 3-5-2019
	grondwaterafhankelijke natuur	kaart, pdf	15-3-2019
	grondwaterstanden 2018+2019	excel	10-5-2019
	landschapsbeheertypen	shp	15-3-2019
	vegetatieopnamen gekoppeld aan peilbuizen	excel tabellen	17-5-2019
	natuurbeheertypen	shp	15-3-2019
Provincie Limburg	basisgegevens OGOR meetnet	excel	7-3-2019
	grondwaterstanden OGOR meetnet	excel	7-3-2019
	basisgegevens primair meetnet	excel	7-3-2019
	grondwaterstanden primair meetnet	excel	7-3-2019
	Grondwateronttrekkingen	excel	7-3-2019
	focusgebieden	word	21-3-2019
	stroomgebied + natura 2000	shp	5-4-2019
	droogtekaart	pdf en shapefiles	26-3-2019

Aangeleverd door	Wat	Format	Datum aanlevering
Provincie Noord Brabant	meetlocaties	https://brabant.lizard.net/api/v3/groundwaterstations/	8-3-2019
	tijdseries	https://brabant.lizard.net/api/v3/timeseries/	8-3-2019
	metingen uit beleidsmeetnet verdroging	nvt	niet aangeleverd
	metingen Brabant Water	nvt	niet aangeleverd
	Onttrekkingsgegevens Brabant Water uit GWO database	csv+XY	
	Onttrekkingsgegevens Evides	excel	13-3-2019
Waterschap Limburg	Onttrekkingsgegevens Industrie	excel+XY	
	Onttrekkingsgegevens Landbouw	via waterschappen	
	Begrenzing gebieden	gisdata	
	Natte natuurgebieden en N2000 gebieden	via Jos van Staaïj	
	grondwaterstanden	xml	26-3-2019
Waterschap Limburg	Grondwaterputten	https://www.waterschaplimburg.nl/productencatalogus/product/landbouwkundige/	9-3-2019
Provincie Overijssel	Overschrijdingen jaarlimiet	pdf	9-3-2019
	achtergronddocumenten	pdf's	26-3-2019
	grondwaterstanden	.men	26-3-2019
	opnamen provincies	xml	26-3-2019
	inventarisatie TBO's natuurschade zomer 2018	emails, word documenten	26-3-2019
	GWO_onttrekkingsgegevens	shapefiles, excel	26-3-2019
	verdrogingsatlas	pdf's	26-3-2019
	kaarten GW afh natuur + onttrekkingen en 200m zone waterschappen	mxid	5-4-2019
	onttrokken hoeveelheden per maand	excel	9-3-2019
Waterschap Vechtstromen	focus-stroomgebieden	shp	12-3-2019
	metadata oppervlakte meetpunten	word+excel	15-5-2019
	afvoeren	excel	20-5-2019
	oppervlaktewater meetpunten	excel+xy+kaart in word	11-4-2019
Provincie Gelderland	Grondwaterstanden/peilbuizen	meerdere shapefiles	13-3-2019
	focus-stroomgebieden	meerdere shapefiles	13-3-2019
	fotomateriaal focusgebieden	meerdere shapefiles	13-3-2019
Waterschap Rijn en IJssel	Afwateringseenheden	shp	18-3-2019
	droogvalkaart 2018	shp	18-3-2019
	waarnemingen droogval 2018	shp	18-3-2019
	oppervlaktewater onttrekkingen	excel+xy	13-3-2019
	LGR inrichtingen landbouw	excel+xy	13-3-2019
	Grondwaterstanden	excel+XY	26-3-2019
	Afvoeren	excel+XY	1-4-2019
	meetlocaties	shp	18-3-2019
Natuurmonumenten	meetnet	shp	18-3-2019
Brabant Water	Grondwaterstanden	tekst	15-3-2019
Know H2O	remote sensing data - Waterschap Rivierenland	diverse, zie server, te groot voor download	18-3-2019
KWR	meetnet	PSR?	15-3-2019
Nationaal	beheertypen	shp	13-3-2019
Staatsbosbeheer	de ruwe metingen van de buizen	csv	20-3-2019
	technische gegevens van de buizen	csv	20-3-2019
	locaties van de punten	csv	20-3-2019
	menyanthes database waarin zowel de data van de onvolledige als de volledige meetpunten	.men	20-3-2019
	memo focusgebieden	word	26-3-2019
	rapport landschapsecologische kaart	pdf	26-3-2019
	grondwaterstanden	shp, excel, .men	26-3-2019
Waterschap de Dommel	afwateringsgebied	shp	26-3-2019
	beregeningsputten	shp	26-3-2019
	jaarlijks beregende hoeveelheid	excel	26-3-2019
hoefslaat spatial solutions	shape van nederland en waterschapsgrenzen	shp	26-3-2019
	veel remote sensing beelden	zie server	
Waterschap Rivierenland	landgebruik	asc	2-4-2019
	afwateringsgebieden	shp	3-4-2019
	Peilgebieden	shp	3-4-2019
Waterschap Valleij en Veluwe	stroomgebieden	shp	3-4-2019
	focusgebieden	shapefile	3-4-2019

8.2.2. Droogte-indices

Om de verschillende kenmerken van elk type droogte goed in kaart te brengen, is het belangrijk om alle hydrologische variabelen (neerslag, verdamping, bodemvocht, afvoer en grondwater) mee te nemen in de evaluatie van de droogte (Figuur 55). We maken gebruik van gestandaardiseerde indices voor elke variabele, waardoor een onderlinge vergelijking tussen de droogtetypes mogelijk wordt.



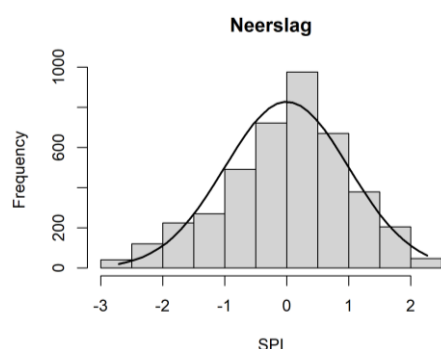
Figuur 55: Links: Schematisch overzicht van de voortplanting van droogte door de verschillende droogtecomponenten. Rechts: Duiding van deze droogtecomponenten op basis van tijdreeksen: meteorologische droogte (neerslag), bodemvochtdroogte en hydrologische droogte (grondwater en afvoer). Figuren zijn ontleend aan Stahl (2001) en Van Loon et al. (2012).

De berekende gestandaardiseerde indices zijn bepaald voor neerslag (SPI, McKee et al., 1993), neerslagtekort (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010), bodemvocht (SMI), afvoer (SRI, Shukla & Wood, 2008) en grondwater (SGI, Bloomfield & Marchant, 2013). Alle indices zijn op dezelfde manier bepaald voor de verschillende variabelen. Het voordeel van deze gestandaardiseerde indices is dat een goede vergelijking mogelijk is tussen de focusgebieden. Tabel 10 geeft de waarde van de gestandaardiseerde indices, met bijbehorende 'droogtecategorie'.

De eerste stap voor het berekenen van een gestandaardiseerde index is het schatten van een kansverdeling op de data (maandelijks of dagelijks). Deze kansverdeling kan anders zijn voor de verschillende variabelen. Er zijn drie verschillende verdelingen getest per variabele, de gammaverdeling, normale verdeling en lognormale verdeling. De geschatte kansverdeling wordt vervolgens gebruikt om de kansdichtheid te schatten voor een bepaalde hydrologische gebeurtenis. De kansdichtheidsfunctie kan vervolgens worden omgezet naar een standaardnormale verdeling (Figuur 56). Op basis van de normaal verdeelde anomalieën kan dan de kans op voorkomen, of herhalingstijd van droogte worden bepaald (Tabel 10).

De indices kunnen worden bepaald voor verschillende geaccumuleerde perioden, bijvoorbeeld in het geval van neerslag om de invloed van droge dagen te middelen over een langere tijdsperiode. In deze studie hebben we gekozen voor een periode van 90 dagen of 3 maanden. De waarde van de index op een bepaalde dag is dus gebaseerd op bijvoorbeeld de neerslag in de voorgaande 90 dagen.

Het voordeel van deze gestandaardiseerde indices is dat een goede vergelijking mogelijk is tussen de focusgebieden. Er zijn echter ook een aantal beperkingen. Voor het schatten van de kansverdeling wordt aangeraden om ten minste een periode van 30 jaar te gebruiken (McKee et al., 1993). In de meeste gevallen zijn alleen veel kortere meetreeksen beschikbaar, waardoor de schatting van de verdeling minder betrouwbaar is. Daarnaast wordt niet altijd een standaardnormale verdeling gevonden met de geteste kansverdeling, vooral voor afvoeren en grondwater. Het effect hiervan op de gevonden droogte gebeurtenissen is echter beperkt; de absolute waarde van de index is hierdoor minder betrouwbaar, maar de periode waarin droogte voorkomt blijft hetzelfde.



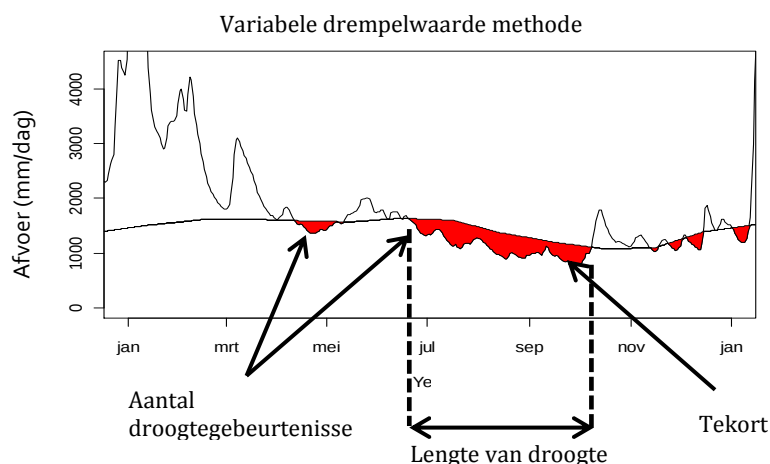
Figuur 56: Voorbeeld van de verdeling van SPI-waarden gebaseerd op neerslagdata gefit met een Gammaverdeling en omgezet naar de standaardnormaal verdeling.

Tabel 10: Classificatie van droogte gebaseerd op de waarde van de gestandaardiseerde index en bijbehorende waarschijnlijkheden (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002).

Waarde van index	Categorie	Waarschijnlijkheid %	Herhalingsijd
2 of meer	Extreem nat	2.3	1/44
1.5 tot 1.99	Zeernat	4.4	1/22
1.0 tot 1.49	Matignat	9.2	1/11
0 tot 0.99	Enigszins nat	34.1	1/3
0 tot -0.99	Enigszins droog	34.1	1/3
-1.0 tot -1.49	Matig droog	9.2	1/11
-1.5 tot -1.99	Zeerdroog	4.4	1/22
-2 of minder	Extreem droog	2.3	1/44

Naast de gestandaardiseerde indices kan droogte ook afgeleid worden op basis van anomalieën in de tijdreeksen. Hiervoor is de variabele drempelwaarde methode (Figuur 57) gebruikt (Hisdal et al., 2004; Yevjevich, 1967). Hierbij wordt er vanuit gegaan dat alle waarden onder een bepaald percentiel aangeven dat droogte voorkomt. In deze studie is het 20^{ste} percentiel gebruikt als drempelwaarde; er wordt dus aangenomen dat droogte 20% van de tijd optreedt. De drempelwaarde is berekend op basis van de maandelijkse klimatologie, zodat rekening gehouden wordt met de seizoengevoeligheid. Door rekening te houden met de jaarlijkse variabiliteit in de seizoenen kan droogte in elk seizoen voorkomen. Voor elke droogte kunnen verschillende karakteristieken berekend worden, zoals het aantal droogtegebeurtenissen, de lengte, het totale tekort en de intensiteit. Om de verschillende type droogte mee te nemen is de variabele drempelwaarde methode toegepast op neerslag, bodemvocht, afvoer en grondwaterdata, afhankelijk van de beschikbaarheid ervan. Ook voor deze methode geldt dat de resultaten afhankelijk zijn van de lengte van de beschikbare meetreeksen. Voor het beste resultaat is een zo lang mogelijke reeks belangrijk, bij voorkeur 30 jaar of meer.

De variabele drempelwaarde is ook toegepast voor het analyseren van de effecten van adaptieve maatregelen. Hierbij geeft de verschuiving in de drempelwaarde (het maandelijkse 20^{ste} percentiel) zelf al een goede indicatie van de verschuivingen van de lagere waarden door de maatregelen. Daarnaast kan door het toepassen van de drempelwaarde gebaseerd op de referentiesituatie (gesimuleerde resultaten zonder maatregelen) op de resultaten van de scenario's bepaald worden wat het effect is op de droogte. Zo kan, bijvoorbeeld, specifiek gekeken worden naar de effecten van de scenario's op de droogte van 2018 (duur, intensiteit en tekort).



Figuur 57: Variabele drempelwaarde methode en droogtekaracteristieken.

8.2.3. LHM

Voor het studiegebied zijn zowel regionale modellen zoals Mipwa als het Landelijke Hydrologisch Model (LHM) beschikbaar, met beide hun voor- en nadelen voor gebruik hiervoor. De regionale modellen rekenen met modelcellen van 25x25m, en het LHM gebruikt modelcellen van 250x250m. Voor deze eerste fase gebruiken we het LHM op basis van de volgende voordelen (1) eenduidige, uniforme doorrekening van het totale studiegebied, (2) waterverdeling hoofdwatersysteem en aanvoer naar regionaal watersysteem, (3) eenvoudige routing regionaal oppervlaktewater (Mozart), (4) infiltratie vanuit waterlopen naar het gw-systeem o.b.v. van waterbeschikbaarheid (kloppende waterbalans). In de volgende fasen van dit droogteproject behoort inzet van de regionale modellen tot de mogelijkheden (bijv. voor verdere detaillering in focusgebieden). Bij het interpreteren van de modelresultaten dienen (altijd) de beperkingen van het gebruikte model in ogenschouw te worden genomen (schaalniveau, nauwkeurigheid en actualiteit invoergegevens). Meer informatie over het LHM: modelopzet, modelinvoer, basisbestanden en modeluitvoer is te vinden op: <http://www.nhi.nu/nl/>.

8.2.4. SWAP

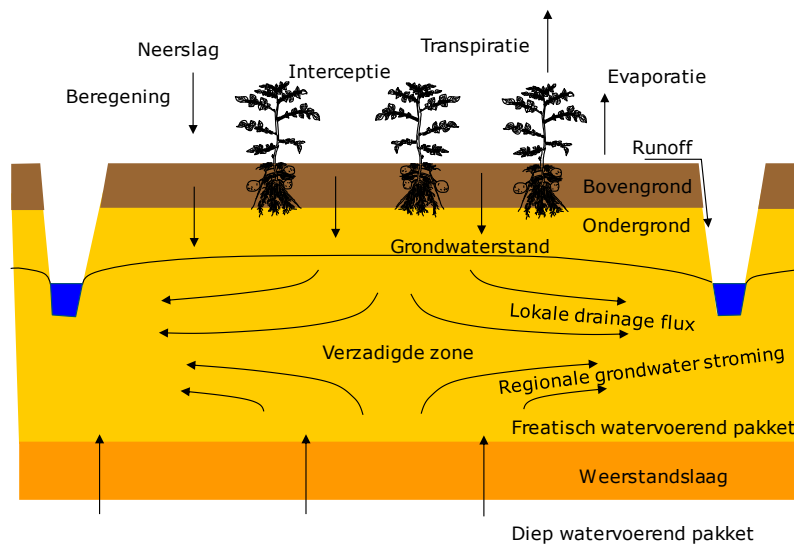
Met SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) zijn plotmodellen gemaakt. SWAP simuleert transport- en groeiprocessen in veldbodems. Het is een fysisch georiënteerd model en gebruikt als invoer praktische gegevens van weer, gewas, bodem en grondwater op veldschaal (Kroes et al., 2017). Speerpunten van SWAP zijn het nauwkeurig simuleren van infiltratie, retentie, en percolatie van water in gelaagde veldbodems, van evapotranspiratie, en van interactie tussen bodemvocht, grondwaterdynamiek en gewassen. Voor gewasgroei onder invloed van vochtcondities bevat SWAP zowel een eenvoudige als gedetailleerde module.

Het SWAP model-domein met belangrijke hydrologische processen loopt van een vlak boven het gewas tot een vlak in het bovenste grondwater (Figuur 59). In dit domein vindt het transport hoofdzakelijk verticaal plaats. Met uitzondering van de drainage, is SWAP daarom een 1-dimensionaal model. Daardoor rekent SWAP snel, en leent zich goed voor opschaling naar gebieden in een GIS omgeving. De snelheid van SWAP en haar interface maakt automatische kalibratie mogelijk met robuuste zoekalgoritmen. Zo kunnen eigenschappen van bodem en grondwater afgeleid worden met metingen van vochtgehalten en grondwaterstanden.

SWAP is ontwikkeld en wordt onderhouden door Wageningen UR. Het model functioneert als ontwikkelomgeving voor promotie-onderzoekers, als demonstratie- en oefentool in hydrologisch onderwijs, en als referentiemethode in toegepast onderzoek. Het model, inclusief broncode, referenties en case studies, is vrijelijk beschikbaar op www.swap.wur.nl. Relevante studies voor het droogteonderzoek van de hogere zandgronden zijn het gebruik van SWAP in Waterwijzer Landbouw voor het berekenen van droogte-, zout en natheidschade (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018) en het recente proefschrift van Kroes (2018) naar effect van bodemvochtcondities op gewasgroei op lokale en regionale schaal.

Met SWAP worden naast grondwaterstanden, ook bodemvochtgehalten en afname in de gewasverdamping (transpiratiereductie) als gevolg van te droge of te natte omstandigheden gesimuleerd.

Door SWAP te kalibreren op metingen, kunnen langere tijdreeksen van de variabelen verkregen worden én kunnen niet gemeten variabelen worden geschat.



Figuur 58: SWAP model-domein met hydrologische processen.

Voor de SWAP-modellen is in deze fase gebruik gemaakt van bestanden voor bodemfysica (Wösten et al., 2013), drainageweerstand (Van der Gaast et al., 2006) en meteorologische condities van nabijgelegen KNMI-metstations. SWAP (Kroes et al., 2017) is gekoppeld aan PEST (Doherty, 2010) voor kalibratie aan grondwaterstandsmetingen, waarbij parameters voor de drainageweerstand en hydrologische onderrandvoorwaarde zijn geoptimaliseerd. Uitvoer van SWAP zijn gesimuleerde grondwaterstanden, bodemvochtgehaltes, vullingsgraad van de bodem, totale verdamping en gewasverdamping (transpiratie) en reductie van de gewasverdamping door zowel te droge (in dit onderzoek geduid als droogteschade) als te natte condities (natschade). De procedure is geautomatiseerd binnen de software-omgeving R (R Core Team, 2013), zodat voor elk meetpunt een SWAP-model gekalibreerd kan worden en simulaties direct worden omgezet naar droogte-indices en bijbehorende grafieken. De procedure kan dagelijks (geautomatiseerd) een update geven van de toestand van het grondwater, bodemvocht en transpiratiereductie van het gewas. Alle gebruikte software is open-source.

8.2.5. Analyse Landelijk Meetnet Flora (LMF)

Het CBS leverde de LMF-gegevens via vier bestanden aan:

1. LMF_Soorten.csv: bestand met 2042 genera uit het LMF die bruikbaar zijn voor analyses. Van dit aantal zijn 242 soorten of ondersoorten lastig te determineren of classificeren en daarom bevat de tabel tevens een vertaling van deze genera naar een bekende soort. Bijvoorbeeld: de ondersoort van Rood guichelheil (*Anagallis arvensis subsp. Arvensis*) wordt vertaald naar de soort Rood guichelheil (*Anagallis arvensis*). Met dit bestand hebben we niets gedaan omdat deze vertaling al grotendeels is verwerkt in de door ons gebruikte software (ESTAR en ASTER).
2. LMF_Plot.csv: bestand met informatie over de plot. Per regel onder meer: plotnaam, coördinaten van de locatie, gebiedsnaam, begroeiingstype, IPI-code (Tabel 11).
3. LMF_Kop.csv: Gegevens over de opnamen, met per regel: plotnaam, jaar, datum, verstoringscode (Tabel 12).
4. LMF_Tellingen.csv: Bestand met de opnamen. Per record: plotnaam, jaar, nummer soort, datum opname, bedekkingscode.

De plotnaam bestaat meestal uit zes tekens: twee letters die de provincie aanduiden, gevolgd door vier cijfers. Voorbeeld: droo36, glo547, ov4546. Enkele plots bleken vermoedelijk onder twee namen aanwezig te zijn (voorbeeld: glo203 en gl203). Dergelijke spaarzame fouten, als ze dat al zijn, hebben we niet gecorrigeerd.

Om opnamen te kunnen verwerken hebben we het vierde bestand omgezet in een bestand zoals TURBOVEG (Hennekens & Schaminée, 2001) dat genereert, met per regel: opnamenaam, nummer soort, bedekking. Voor

de opnamenaam hebben we de plotnaam en het jaartal gecombineerd. Voorbeeld: plotnaam droo36 gecombineerd met het jaar 1999 geeft opnamenaam droo361999.

Na deze voorbereidingen konden we met het programma ESTAR (Witte et al., 2014) de indicatiewaarden voor saliniteit, vochttoestand, voedselrijkdom en zuurgraad berekenen. Daarbij hebben we gebruik gemaakt van de op Nederland toegesneden indicatiewaarden die door Witte et al. (2007b) zijn berekend uit de indeling in ecologische groepen van vaatplanten en mossen door respectievelijk Runhaar et al. (2004) en Dirkse & Kruijsen (1993). Tevens hebben we van iedere opname met het programma ASTER (Witte et al., 2011b) de natuurwaarde volgens de 'methode Gelderland' (Hertog & Rijken, 1992) berekend.

Tabel 11: Beschrijving van de Interprovinciale inventarisatiecodes (overgenomen uit LMF-handleiding; Anonymous (2018)). De met een sterretje () gemarkeerde IPI's zijn gebruikt voor de analyse.*

Nr	Beschrijving	Nr	Beschrijving
*111	Duinvalleibos	343	Karrevelden
*112	Elzenbroekbos	344	Plasjes in klaverbladen
*113	Wilgen(vloed)bos	345	Overige kleine gegraven plasjes
*114	Berkenbroekbos	351	Vennen
121	Pinusbos	352	Duinplassen, duinmeertjes
122	Larixbos	353	Wielen, kolken, welen
123	Naaldbos, niet behorend tot Pinus- en Larixbos	354	Overige poelen en plasjes
*124	Gemengd loof-/naaldbos	*361	Rabatten
*131	Droog, relatief voedselarm loofbos	*362	Inlagen
*132	Droog, relatief voedselrijk loofbos	*363	Overige kleine moerasjes
*133	Droog loofbos, weinig kenmerkend ontwikkeld of gestoord	*364	Ijsbanen
*141	Vochtig parkbos (vochtig bos met exotische of stinseflora)	*411	Grasland en hooiland
*142	Bronbos	*412	Grasland met boomgaard of populierenaanplant
*143	Loofbos op vochtige voedselrijke gronden	*413	Cultuurgrasland met een natuurlijke inslag
*144	Vochtig berkenbos	414	Vervallen
*145	Populieren-/wilgen-aanplant	415	Kunstweiden
*146	Eendenkooien	421	Grootschalig akkerland
*147	Loofbos op matig vochtige, relatief voedselarme grond	422	Kleinschalig akkerland
*151	Duinstruweel	423	Intensief fruitteeltgebied
*152	Jeneverbesstruweel	424	(Boom)kwekerijen
*153	Gagelstruweel	511	Braakliggend terrein
*154	Vlierstruweel / Braamstruweel	512	Vuilstortplaatsen
*155	Wilgenstruweel	513	Opgespoten terrein
*156	Doornstruweel	514	Recente droge afgravingen
*161	Grienden	521	Erven, volkstuinten, moestuinten
*162	Essenhakhout	522	Sportterreinen, recreatiegebieden, campings
*163	Elzenhakhout	523	Parken, kerkhoven, villawijken
*164	Eikenhakhout	524	Glastuinbouwgebieden
*165	Hakhoutpercelen met gemengde samenstelling (geriefbosjes)	525	Industriegebied
*171	Houtwallen, wildwallen, wallen langs beken	526	Binnensteden en woonwijken
*172	Met hout begroeide tuinwallen en schurvelingen	527	Muren en wallenkanten
*173	Beplante polderkaden	611	Verharde wegen met berm
*174	(Mei)doornhagen	612	Parkeerplaatsen
*175	Elzen-Essensingels	613	Onverharde wegen en paden met berm
*176	Eiken-Berkensingels	621	Spoorbanen
*177	Graften en stuifwallen	622	Emplacementen en overslagterreinen
*178	Bomenrijen	631	Waterkerende dijken
*179	Ruilverkavelings- en landschappelijke aanplanten	*632	Zomerkaden
*181	Opslagbos in hoogveen gebied	*633	Binnendijken
*182	Opslagbos in heide gebied	634	Deltadammen, asfaltdijken
*183	Opslagbos in laagveen gebied	635	Steenglooingen

Nr	Beschrijving	Nr	Beschrijving
191	Kapvlakten etc. in naaldbos	*636	Polderkaden
192	Kapvlakten etc. in droog loofbos	637	Onbeplante tuinwallen en schurvelingen
193	Kapvlakten etc. in vochtig loofbos	711	Grote rivieren
*211	Zeereep	712	Kleine (laagland) rivieren en veenstromen
*212	Infiltratiegebied	713	Oude rivierarmen
*213	Natte duinvalleien	721	Natuurlijke laaglandbeken
*214	Open duingebied	722	Genormaliseerde laaglandbeken
*221	Slikken en zandplaten	723	Bergbeken
*222	Schorren en kwelders	724	Korte beken
*223	Riet- en biezengorzen	725	Oude beekarmen
*231	Droge heiden	741	Kanalen
*232	Vochtige heiden	742	Weteringen, vaarten en brede waterschapsleidingen
*233	Zandverstuivingen	743	Veenwijken
*241	Kalkhellinggrasland	751	Sloten
*242	Blauwgrasland	752	Vervallen
*243	Halfnatuurlijke vochtige tot natte graslanden op matig voedselrijke gronden	753	Vervallen
*244	Heischraal grasland	754	Slootkanten
*245	Halfnatuurlijke droge graslanden op matig voedselrijke gronden	755	Greppels
*246	Zilt grasland	756	Waterschapsleidingen (smal)
*251	Levend hoogveen	757	Bermsloten en -greppels
*252	Ontwaterd hoogveen	759	Spoorsloten
*253	Afgetakeld hoogveen	811	Akrokrenen (puntbronnen)
254	Veenputten	812	Rheokrenen
*261	Laagveenmoeras en petgaten	813	Limnokrenen
262	Laagveenplassen	814	Helokrenen
*263	Riet- en biesenland	815	Gekluisterde bronnen
*264	Legakkers	816	Bronvijvers
311	Afgesloten zeearmen	*817	Artesische bronnen
312	IJsselmeer	*925	Oeverzone van hoogveenplassen of -putten
313	Meren en meertjes	*926	Oeverzone van laagveenplassen, petgaten e.d.
321	Zandgaten, grindgaten, kleigaten	*931	Oeverzone van niet gegraven grote plassen
322	Infiltratiebekkens	*932	Oeverzone van grote aangelegde (gegraven) plassen
*323	Vloeiervelden	*933	Oeverzone van vijvers en grachten
324	Drinkwaterspaarbekens	*934	Oeverzone van kleine aangelegde plassen
331	Vijvers (bijvoorbeeld op landgoederen)	*935	Oeverzone van kleine niet gegraven (natuurlijke) plassen
332	Slot- en fortgrachten	*971	Oeverzone van rivieren, kleine rivieren en veenstromen
333	Stadsgrachten	*972	Oeverzone van beken
334	Kleine recreatieplassen, zwemvijvers	*973	Oeverzone van afgesloten kreken
335	Visvijvers	*974	Oeverzone van kanalen, weteringen e.d.
336	Stads- en dorpsvijvers	*975	Oeverzone van sloten en greppels
341	Drinkputten, dobben, poelen	*981	Oeverzone van bronvijvers
*342	Tichelgaten, kleiputten		

Tabel 12: Verstoringscodes (overgenomen uit LMF-handleiding; Anonymous (2018)).

w1	= Grote permanente daling grondwater
w2	= Grote permanente stijging grondwater
w3	= Begreppeld
w4	= Greppels gedempt
w5	= Onder water gestaan (afwijkende van de normale situatie)
w6	= Drooggevallen (afwijkend van normale situatie)
g1	= Afgegraven (>10 cm van toplaag verwijderd)
g2	= Afgeplagd (< 10 cm van toplaag verwijderd)
g3	= Groot onderhoud sloot (herprofilering)
g4	= Grond geroerd

g5 = Grond opgebracht
g6 = Ondergestoven
g7 = (Vrij) diepe insporing door berijding
g8 = (Vrij) sterke betreding
v1 = Sloomateriaal gedeponeerd
v2 = Vuilstort etc.
v3 = Maaien zonder afvoer of klepelen of (vrij) veel maaisel blijven liggen
v4 = (Vrij) veel hout of snoeihout blijven liggen
v5 = (Vrij) veel mest of bladval gedeponeerd
k1 = Strooisellaag verwijderd
k2 = Stormschade
k3 = Dunning
k4 = Kap
k5 = Brand
k6 = Opslag verwijderd of struiken afgezet
p1 = Bomen, struiken gepland
p2 = Geheel ingezaaid of inzaai van soorten
b1 = Begrazing beëindigd
b2 = Begrazing gestart
b3 = Maaibeheer beëindigd
b4 = Maaibeheer gestart
b5 = Bemesting gestart
b6 = Bemesting beëindigd
b7 = Bestrijdingsmiddelen gebruikt
o1 = Overige verstoring (omschrijving in opmerkingenveld invullen)
x1 = Net gemaaid
x2 = Net geschoond
x3 = Net begraasd

8.2.6. Programma LMF_TREND

Voor dit project is software geschreven, het programma LMF_TREND, dat de LMF-gegevens en de uitkomsten van ESTAR en ASTER inleest en vervolgens voor iedere plot en iedere IPI (of andere ruimtelijke integratie van plots) de trend berekent. Het programma wordt aangestuurd via een bestand () waarin de gebruiker de namen van invoerbestanden kan opgeven, alsmede enkele instellingen kan wijzigen.

Tabel 13: Stuurbestand van LMF_TREND. De door de gebruiker opgegeven antwoorden (A) op vragen (Q) sturen de software aan.

Q: 1) log file
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\LMF-trend.log
Q: 2) Input Kop-gegevens
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\LMF_Kop.csv
Q: 3) Input Plot-gegevens
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\LMF_Plot.csv
Q: 4) Input ESTAR file
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\ESTAR_OUT.csv
Q: 5) Output LMF-trend results
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\LMF-trend_out.csv
Q: 6) Uitvoerbestand IPI-statistieken
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\IPI-trend_out.csv
Q: 7) Input IPI-selectie
A: C:\2019_Droogte2018\LMF>Selectie_IPI.csv
Q: 8) Input natuurwaarde per plot
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\NW_FLS.csv
Q: 9) Uitvoerbestand trends per PQ
A: C:\2019_Droogte2018\LMF\PQ_trend_out.csv
Q: 10) Minimum aantal soorten met indicatiewaarde
A: 1
Q: 11) Alle verstoringen meenemen (1), bepaalde [w., g1, g2, x.] negeren (2) of geen enkele negeren (3)
A: 1
Q: 12) Auteur & Instituut
A: J.P.M. Witte, FWE

Een van de instellingen is het al dan niet meenemen van plots waarin in een van de jaren een verstoring is opgetreden. Een andere stuurmogelijkheid is het beperken van de berekening tot plots met een bepaalde IPI-code. Die selectie dient via een bestand met IPI-nummers te worden opgegeven.

De schaal van de indicatiewaarden uit ESTAR blijkt in de praktijk voor mensen lastig te begrijpen. Sommigen denken dat deze waarden onnauwkeurig zijn, omdat de schalen van Witte et al. (2007b) zo kort zijn: van 1 tot 3 voor de factoren saliniteit (S), voedselrijkdom (N) en zuurgraad (R), en van 1 tot 4 voor de factor vochttoestand (F). Omdat de schalen ordinaal zijn, maakt het echter niet uit hoe lang of kort hij is. Voor de herkenbaarheid hebben we hem evenwel lineair getransformeerd naar een bereik van 1 tot 10: $S = 1 + 4.5(S-1)$; $F = 1 + 9(1 - 0.5(\max(F, 2) - 2))$; $N = 1 + 4.5(N-1)$; $R = 1 + 4.5(R-1)$. De enige afwijkende in dit rijtje is de vochtindicatie F: de schaal is omgedraaid en zeer natte tot aquatische indicaties (oorspronkelijke $F < 2$) zijn afgerond naar 'nat' ($F = 2$, na transformatie $F = 10$). Deze laatste bewerking in dit project is gedaan omdat we alleen terrestrische vegetaties onderzoeken.

Op de 'meetwaarden' is vervolgens lineaire regressie toegepast. Voor iedere plot zijn berekend: aantal waarnemingen, Pearson's R^2 , intercept en hellingshoek van het lineaire verband, en significantie van de hellingshoek: * = p0.90, ** = p0.95, *** = p0.99. Hetzelfde is ook gedaan op de gemiddelde jaarlijkse indicatiewaarden per ruimtelijke eenheid (IPI).

Toepassing in de droogtestudie

In de droogtestudie is LMF_TREND toegepast met de in opgegeven instellingen. Bij vraag 7 van het stuurbestand is verwezen naar een bestand waarin IPI's staan die in Tabel 11 met een sterretjes zijn gemarkeerd. Buiten beschouwing gelaten zijn alle oppervlaktewateren en zeer onnatuurlijke en/of dynamische systemen, zoals naaldbossen, kapvlakten en vuilstortenplaatsen. De verstoringen hebben we genegeerd omdat we menen dat de belangrijkste verstoring wel het kappen van bos is en de selectie van IPI's er al grotendeels toe heeft geleid dat de betreffende plots zijn weg-gefilterd.

De analyse met ESTAR en LMF-trend is overgedaan met weglating van soorten die goed bestand zijn tegen een incidentele droogte: bomen, struiken en soorten met ondergrondse opslag van voedingsstoffen (bollen, knollen, wortelstokken). De selectie van deze soorten (fanerofyten en geofyten) hebben we ontleend aan BioBase2003 (<https://www.cbs.nl/nl-nl/onze-diensten/methoden/classificaties/overig/biobase-2003/biobase-2003>).

We bevelen aan in de volgende fase van het droogteonderzoek en berekende trendfunctie te gebruiken om de verwachte indicatiewaarden in 2019 en latere jaren te berekenen. Deze verwachtingswaarden kunnen dan worden vergeleken met de 'waargenomen' waarden, nadat de LMF-database is aangevuld met nieuwe vegetatieopnamen. Verschillen moeten worden getoetst op statistische significantie.

Voor afwijkingen van verwachte trends per ruimtelijke eenheid, zoals IPI's of beheertypen, is het van belang dat in de trendanalyse rekening wordt gehouden met de periodiciteit in de tijdreeksen (voorbeeld: Figuur 33: Trend B in vochtindicatie mF, waarbij B volgt uit lineaire regressie op mF (jaar) = A + B*JAAR. Betekenis symbolen: B > 0 en significant (p < 0.05) = grote blauwe stip; B > 0.05 en niet significant = kleine blauwe stip; B < 0 en significant = grote rode stip; B < 0.05 en niet significant = kleine rode stip; anders = kleine grijze stip.

Dit is een artificieel gevolg van systematische verschillen in de selectie van plots die per meetronde worden opgenomen.

8.2.7. Gebruik van Sentinel-2 remote sensing data

SENTINEL 2 en gewasindices

Sentinel-2 is een aardobservatiemissie van het EU Copernicus-programma dat systematisch optische beelden met een hoge ruimtelijke resolutie (10 m tot 60 m) over land en kustwateren produceert. De missie is een constellatie met twee dubbele satellieten (Sentinel-2A en Sentinel-2B).

De Sentinel-2-missie heeft de volgende kenmerken:

- Multispectrale gegevens met 13 banden in het zichtbare, nabij-infrarode en kortegolf-infrarode deel van het spectrum
- Elke 5 dagen opnamen onder dezelfde kijkhoeken. Op relatief hoge breedtegraden zoals Nederland worden sommige regio's elke 5 dagen twee keer of vaker waargenomen, maar met verschillende kijkhoeken.
- Ruimtelijke resolutie van 10 m, 20 m en 60 m
- Distributie tegen lage kosten (vrijwel gratis)

Binnen het droogte project worden meerdere indices gebruikt naast de zichtbaar licht beelden: NDVI en NDWI

NDWI is een reflectie van het watergehalte van vegetatie en reageert daarom sneller op uitdroging dan NDVI, die gerelateerd is aan fotosynthetische activiteit. In het algemeen zal NDWI de droogte dus sneller weergeven dan NDVI. De waarde van NDVI ligt in het minder gevoelig zijn voor atmosferische verstoring. Hieronder een uitwerking van de ondernomen stappen.

NDVI

De Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is een bekende indicator die wordt gebruikt om te beoordelen of het waargenomen oppervlak levende groene vegetatie bevat of niet en in welke staat van activiteit. Levende groene planten absorberen zonnestraling in het fotosynthetische actieve spectrale gebied. Planten gebruiken dat als een bron van energie in de fotosynthese. De formule voor NDVI voor het SENTINEL2 platform is

$$NDVI := \text{Index}(B8, B4) = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}.$$

Hoe hoger de waarde van de NDVI hoe groter de fotosynthetische activiteit.

Voordelen

- Als een eenvoudige transformatie van spectrale banden, kan NDVI berekend worden.
- Lange tijdreeksen (meer dan 20 jaar) zijn beschikbaar omdat NDVI vanuit alle aardobservatiesatellieten kan worden berekend (naast SENTINEL 2 ook bijvoorbeeld met SPOT en Landsat)

Nadelen:

- Het gebruik van de NDVI voor kwantitatieve beoordelingen is niet vaak succesvol gebleken. De index krijgt zijn waarde in vergelijkingen met andere indices en verschillen binnen tijdreeksen.

- De feitelijke samenstelling van de atmosfeer (met name waterdamp en aerosolen) kan de metingen in de ruimte aanzienlijk beïnvloeden. Daarom kan de NDVI niet direct wordt berekend op basis van onbewerkte metingen.

NDWI

De NDWI is het resultaat van de volgende vergelijking: $(NIR - MIR) / (NIR + MIR)$. Bij Sentinel 2 wordt dat berekend op basis van Band 8 (NIR) en Band 12 (MIR). De NDWI is een vegetatie-index die gevoelig is voor het watergehalte van vegetatie en is een aanvulling op de NDVI. Hoge NDWI-waarden tonen een hoog watergehalte van de vegetatie.

Voordelen:

- Eenvoudige berekening vanuit meerdere platformen (satelliet, airborne en drone)
- Geeft directe waardering van het watergehalte in een vegetatie. Staat in die zin dicht bij de droogteproblematiek die het project onderzoekt.

Nadelen

- Vanwege het gebruik van band 12 gevoeliger voor atmosferische verstoringen dan NDVI.
- De NDWI-index is het meest geschikt voor de detectie van waterlichamen. Watergehalte van de vegetatie is een afleiding daarvan

Processtappen

Voor het verkrijgen van een zo zuiver mogelijk NDVI en NDWI signaal zijn de volgende processtappen uitgevoerd:

Stap 1. Atmosferische correctie met sen2cor

Sen2Cor is een script voor het maken van Sentinel-2 Level 2A-producten. Het script voert de correctie van L1C beelden uit en maakt daarvan L2A. Zo ontstaat er "Bottom-of-Atmosphere (BOA)" reflectie terwijl L1C "Top-of-Atmosphere (BOA)" reflectie weergeeft.

De beschikbaarheid van L2A beelden op de Sentinel Hub gaat terug tot het einde van 2017. Vóór november 2017 moeten de L2A beelden zelf worden gemaakt. Dit veroorzaakte een procesprobleem omdat het corrigeren van één enkel beeld ongeveer 15 minuten tijd vergt en er enkele duizenden beelden te doen zijn. Daarom zijn bij sommige analyses direct L1C beelden gebruikt. De composieten methode (zie beneden) zorgt voor een voldoende mate van atmosferische correctie in het eindsignaal.

Stap 2. Maken van composieten

Van de NDVI en NDWI zijn 30-dagen maximale waarde NDVI composieten gemaakt in het kader van dit project. Bij het maken van composieten gaat het om

- Elke NDVI-waarde pixel voor pixel te onderzoeken voor elke observatiedatum binnen de periode van 30 dagen
- Het bepalen van de maximale waarde NDVI voor elke pixel gedurende 30 dagen
- het creëren van een enkele image die alleen de maximale NDVI-waarde bevat

Deze composieten moeten problemen voorkomen bij Sentinel 2 gegevens voor één enkele datum, zoals die wolken vervuiling, atmosferische problemen, reflectie van het oppervlak, en geometrie van de belichting (Holben, 1986).

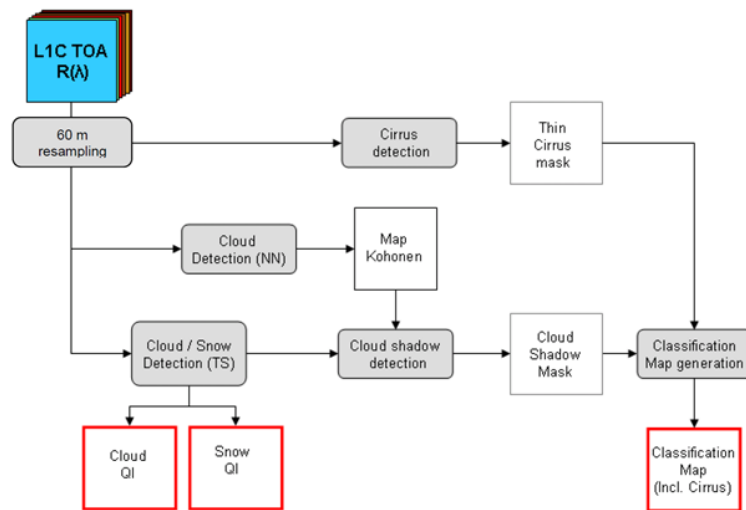
Open water detectie met Sentinel 2

De open water detectie is een product van de Sentinel 2 "scene classification" (SC).

Het SC-algoritme berekent het volgende (zie ook schema):

- Een classificatiekaart met vier verschillende klassen voor wolken (inclusief cirrus) en zes verschillende klassen voor schaduwen, bewolking, vegetatie, bodem / woestijnen, water en sneeuw (Figuur 59);

- bepaling van bijbehorende kwaliteitsindicatoren.



Figuur 59: Sentinel-2 classificatiekaart met vier verschillende klassen voor wolken (inclusief cirrus) en zes verschillende klassen voor schaduwen, bewolking, vegetatie, bodem / woestijnen, water en sneeuw.

In het kader van het droogteproject wordt water als volgt gedetecteerd: de band 2 / band 11 verhoudingen zijn hoger voor water dan voor andere klassen inclusief wolken. Dit wordt alleen toegepast op pixels met band 12-waarden lager dan een drempelwaarde.

Pixels met een verhouding van band 2 / band 11 hoger dan de drempelwaarde worden beschouwd als wolkenvrije pixels en geclassificeerd als waterpixels in de classificatiekaart.

Het toegepast algoritme is defensief/aan de 'veilige' kant, wat zorgt voor een laag aantal foute toewijzingen. Als er water wordt gedetecteerd, dan is de kans groot dat het ook werkelijk water is. Dit resulteert in een (kleine) onderschatting van het aantal waterpixels. Vandaar dat we in het kader van het droogteproject open water detecteren als er per maand minimaal twee waarnemingen voor een zekere pixel zijn.

8.3. LHM-modelscenario's

Voor deze eerste fase zijn enkele verkennende berekeningen uitgevoerd met het Landelijke Hydrologische Model (LHM) voor het in beeld brengen van de respons van verschillende aspecten van het watersysteem op de droogte van 2018 en ingrepen in het watersysteem. Ofwel, hoe werken bepaalde ingrepen door op grondwaterstanden, kwel, bodemvocht, gewasverdamming en oppervlaktewaterafvoer voor een droog jaar als 2018. De gesimuleerde ingrepen in het watersysteem zijn gericht op het korte termijn handelingsperspectief (mogelijkheden om op korte termijn het watersysteem te beïnvloeden) en zijn in den extreme doorgevoerd om de gevoeligheid van het watersysteem te kunnen verkennen. Met nadruk zijn het dus geen realistische scenario's. Maar de resultaten geven wel inzicht hoe en in welke mate de ingrepen doorwerken op het watersysteem en biedt daarmee handvaten voor de waterbeheerders voor verdere verkenning van mogelijke ingrepen in het watersysteem.

De ingrepen worden in het LHM modelmatig doorgevoerd per 1 januari 2018 en effecten voor het verdere verloop van 2018 worden onderzocht. Het zijn dus korte termijn effecten (< 1 jaar) die voor deze exercitie worden gepresenteerd terwijl de effecten voor bepaalde ingrepen op lange termijn (veel) groter kunnen zijn. Effecten van structurele maatregelen op langere termijn, worden in fase 2 in beeld gebracht. Er dient te worden opgemerkt dat, hoewel de gesimuleerde ingrepen bedoeld zijn om effecten op korte termijn in beeld te brengen (binnen enkele maanden tot 1 jaar), ze ook kunnen bijdragen aan lange termijn structurele effecten op watersysteem (bijv. anti-verdrogingsmaatregelen). Dit zal in fase 2 meer aandacht krijgen.

Een zevental modelscenario's zijn gedefinieerd die globaal inzicht geven in de response van het watersysteem als gevolg van ingrepen op korte termijn (handelingsperspectief). Het zijn ingrepen die modelmatig binnen het LHM relatief eenvoudig zijn door te voeren en worden voor het gehele studiegebied doorgevoerd. Verdere detaillering/ afbakening in tijd en ruimte (bijv. bufferzones), complexere scenario's en combinaties van ingrepen, evenals structurele maatregelen (bijv. antiverdroging, hydrologisch herstel, vernatting, PAS, etc.) kunnen in een volgende fase aan bod komen. De modelscenario's zijn extreem doorgevoerd (zoals bijvoorbeeld verhoging drainagebasis voor alle kavelsloten) om de respons van het watersysteem goed en maximaal in beeld te brengen. Ze geven dus geen realistisch beeld van op korte termijn uit te voeren handelingsperspectief. De keuzes van de modelscenario's zijn o.a. gebaseerd op de input van projectgroep. De modelscenario's ter verkenning van het handelingsperspectief voor situatie 2018 (extreem droog jaar) zijn:

Ref-model: LHM situatie 2018

1. Drinkwateronttrekking verminderen (twee keer de toename 2018, -18%)
2. GEEN berekening uit grondwater
3. GEEN berekening uit oppervlaktewater
4. Verhoging stuwpeil waterschappen (leggerwaterlopen) per 1 januari 2018 met 30 cm
5. Als scenario 4, nu met verhoging drainagebasis alle kavelsloten per 1 januari 2018 met 30 cm
6. GEEN wateraanvoer
7. alle drinkwateronttrekkingen stoppen

Ad **Ref-model**: Als referentie-model is het beschikbare huidige LHM-model versie 3.4 gebruikt dat de periode 1981-2018 beslaat. Er wordt op dagbasis gerekend. Welke modelinvoer voor dit model geldt, kan worden gevonden op: <http://www.nhi.nu/nl/>. Enkele kenmerken die van belang zijn voor de interpretatie van de modelberekeningen zijn:

- Voor de gehele simulatieperiode zijn de dag-cijfers van gemeten neerslag en verdamping (ruimtelijk beeld geïnterpoleerd o.b.v. ongeveer 300 KNMI-meteostations) en rivierafvoeren van Maas en Rijn (bij Monsin en Lobith) gebruikt als modelinvoer.
- Alle andere modelinvoer zijn binnen LHM voor de gehele periode constant gehouden en representeren voor de meeste invoergegevens de situatie rond 2010. Zo zijn er bijvoorbeeld geen landgebruiksveranderingen en ontwikkelingen in de ontwatering meegenomen (bijv. toename van drainage, herstelmaatregelen), en zijn ook de onttrekkingsdebieten voor de drinkwaterwinningen (situatie 2010) en industrie (situatie 2008) constant voor de gehele periode 1981-2017.
- Wat betreft de drinkwaterwinningen heeft er wel een aanpassing voor het jaar 2018 plaatsgevonden, omdat deze specifiek aan de droogte van 2018 is gekoppeld. Namelijk, in het droge jaar 2018 is er tijdens de zomermaanden significant meer door de waterleidingbedrijven onttrokken. Alleen voor Brabant Water waren hierover bij start van de modelberekeningen cijfers beschikbaar. De cijfers laten

zien dat er in 2018 ongeveer 9% meer is onttrokken dan gemiddeld over de laatste 10 jaar met grote ruimtelijke verschillen, en dit komt neer op 27% meer gedurende de vier zomermaanden juni, juli, augustus en september. Omdat er tijdens de start van de modelscenario's geen andere gegevens beschikbaar waren, worden deze getallen doorgevoerd voor het gehele studiegebied.

- De hoeveelheid beregening uit grond- en oppervlaktewater wordt door het model zelf berekend. De potentiële beregeningslocaties (percelen die in het model berekend mogen worden) voor zowel oppervlaktewater als grondwater zijn gebaseerd op de LEI tellingen van 2010 (Massop et al. 2012). De beregeningslocaties in het LHM en de verdeling tussen beregenen grond- en oppervlaktewater stammen uit 2010. Indien een gewasspecifieke pF-grenswaarde wordt overschreden (gerelateerd aan vochttekort), dan wordt beregening toegepast met een gewasspecifieke gift, duur en rotatieperiode (gemiddeld 20-25 mm over 7-10 dagen). Beregening uit het oppervlaktewater wordt gekort als er niet voldoende water beschikbaar is in het oppervlaktewater. Beregening uit het grondwater wordt op de potentiële locaties nooit gekort.

Ad **Scen 1:** Reductie grondwateronttrekkingen voor drinkwater gedurende de droge zomermaanden (juni, juli, augustus en september) gelijk aan 2 keer de toename in 2018 t.o.v. gemiddelde. Zoals bij de referentiemodelrun besproken, was de toename 27% voor de zomermaanden en wordt in dit scenario een afname van 54% t.o.v. 2018 doorgerekend. De achterliggende gedachte van dit scenario is het zuiniger omgaan met ons leidingwater gedurende een extreme droge periode (minder tuin besproeien, auto wassen, douchen, etc.).

Ad **Scen 2:** Met dit scenario wordt bekeken hoeveel en welke effecten het beregenen uit grondwater op het watersysteem heeft. Ruimtelijke verschillen worden zichtbaar door verschillen in beregening per gebied en geohydrologische opbouw van het gebied. Beregeningsverboden zijn een middel voor korte termijn handelingsperspectief. Dit model-scenario wordt extreem doorgevoerd door alle beregening uit het grondwater stop te zetten voor 2018. Dit is geen realistische situatie maar brengt de ruimtelijke verschillen en effecten op het watersysteem wel duidelijk in beeld.

Ad **Scen 3:** Met dit scenario wordt bekeken hoeveel en welke effecten het beregenen uit oppervlaktewater op het watersysteem heeft. Doorvoering en onderbouwing zijn hetzelfde als bij scenario 2. Hoewel er voor 2018 vele verboden zijn afgekondigd voor beregening uit het oppervlaktewater, zijn deze niet doorgevoerd in de modelberekeningen.

Ad **Scen 4:** Afgelopen winter (2018-2019) hebben veel waterschappen het winterpeil, wat doorgaans lager is dan het zomerpeil, hoger opgezet (zomerpeil of zelfs nog iets meer). Met dit scenario worden de effecten van dit handelingsperspectief in beeld gebracht door het winter-stuwpeil per 1 januari 2018 met 0.30 m te verhogen. Ook dit model-scenario wordt extreem doorgevoerd door een stuwpeilverhoging voor alle stuwtejes in secundaire en primaire waterlopen door te voeren.

Ad **Scen 5:** In dit scenario wordt naast de primaire en secundaire ontwatering, het haarvatensysteem aangepakt door zoveel mogelijk grondwater, zo hoog mogelijk in het systeem vast te houden. In verschillende waterschappen zijn afgelopen winter stuwtejes of plankjes geplaatst in de kavelsloten op verzoek van landbouwers, als ook ballonnen in duikers, met als doel het winterwater zo lang en zo hoog mogelijk in het systeem vasthouden. In dit scenario wordt scenario 4 doorgevoerd (stuwpeilverhoging 0.30 m) en additioneel een verhoging van de drainagebasis van 0.30 m voor alle overige kavelsloten en buisdrainage. Ook dit scenario representeert niet de werkelijkheid omdat momenteel in de praktijk slechts een klein % van de kavelsloten wordt aangepakt, maar het brengt wel de gevoeligheid van zo'n maatregel in beeld.

Ad **Scen 6:** Met dit scenario wordt duidelijk wat wateraanvoer bijdraagt aan droogte-mitigatie. De mogelijkheid van wateraanvoer uit de grote rivieren wordt stopgezet en de effecten ervan in beeld gebracht. Dit water kan dus niet gebruikt worden voor beregenen uit het oppervlaktewater, inlaten in natuurgebieden en infiltratie naar het grondwatersysteem vanuit het oppervlaktewater. De effecten hangen sterk af van de hoeveelheid wateraanvoer die binnen het LHM berekend wordt en gebaseerd is op de watervraag voor peilhandhaving en beregening. Mogelijk is er in de praktijk meer water ingelaten (meer gestuurd op capaciteit dan op vraag) dan door het model berekend en dan kunnen de gesimuleerde effecten enigszins worden onderschat. Een eerste validatie laat zien dat het model 50% minder wateraanvoer berekend dan in werkelijkheid waarschijnlijk is aangevoerd (exacte gegevens nog niet beschikbaar) en zullen effecten ook ongeveer 2 keer zo groot zijn dan berekend. Een gedetailleerdere validatie van de wateraanvoer wordt verder opgepakt in fase 2.

Ad **Scen 7**: In dit scenario worden alle drinkwaterwinningen stopgezet per 1 januari 2018. Dit scenario wordt doorgerekend om de effecten van beregenen uit grondwater af te kunnen zetten tegen die van de drinkwaterwinningen. Daarbij dient te worden opgemerkt dat beregening altijd een korte periode betreft en drinkwaterwinningen een permanente rol vervullen. Door het na-ijl effect, zeker voor de trage gebieden met diepe grondwaterstanden en grote slootafstanden, zullen berekende effecten van dit scenario voor het jaar 2018 nog zeker niet maximaal zijn. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat voor de Centrale Slenk in N-Brabant, de meeste drinkwaterwinningen uit het diepe watervoerende pakket onttrekken en beregening uit het ondiepe pakket onttrekken.

Resultaten - Aspecten van het watersysteem

Het belangrijkste doel van deze modelberekeningen is de response van het totale watersysteem op de verschillende (korte termijn) ingrepen voor het droogtejaar 2018 te verkennen. Daarbij wordt gekeken naar de verschillende aspecten van het watersysteem en de volgende model-output is gegenereerd en vertaald naar vlakdekkende kaartjes. De kaartjes betreffen verschilkaartjes tussen het modelscenario en het referentie-scenario.

- Freatische grondwaterstand (modellaag 1)
- Stijghoogte (verschillende modellagen: 2,3,4,7)
- Kwel (flux tussen modellaag 1 en 2)
- Grondwaterafvoer (van grondwater naar oppervlaktewater) en infiltratie van oppervlaktewater (van oppervlaktewater naar grondwater)
- Transpiratie-reductie

De **freatische grondwaterstand** (modellaag 1) is één van de belangrijkste parameters om de droogte en effecten van ingrepen te analyseren. Namelijk, de diepte van de grondwaterstand is van belang voor gewassen, natuur, wegen en bebouwing. En de grondwaterstand bepaalt hoeveel grondwater wordt afgevoerd (er is afvoer wanneer het grondwater boven de lokale ontwateringsbasis staat).

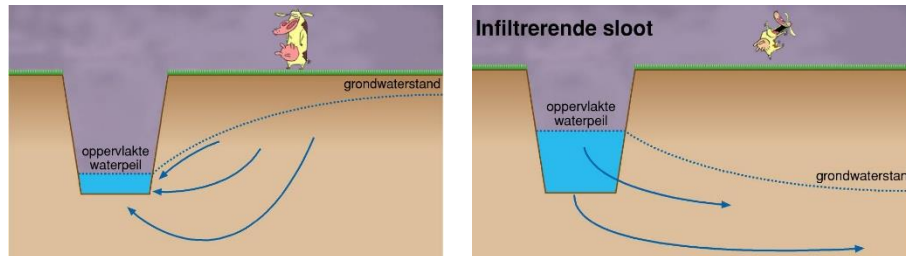
De **stijghoogte** is de grondwaterdruk op een bepaalde diepte in de ondergrond en is van belang voor de relatie met het regionale grondwatersysteem. De stijghoogte kan afwijken van de freatische grondwaterstand als er weerstandsbiedende lagen (klei, leem, veen) in de ondergrond voorkomen. Als de stijghoogte hoger is dan de grondwaterstand, dan treedt er opwaartse stroming op, en in het geval van modellaag 2 naar modellaag 1 noemen we dat kwel. Het LHM kent 7 modellagen en deze zijn toegekend aan verschillende geologische formaties die verschillen per geohydrologisch deelgebied. In <http://www.nhi.nu/nl/> is deze informatie te vinden. Voor de verschilkaartjes van de verschillende scenario's zijn de modellagen 2, 3, 4 en 7 geselecteerd omdat deze modellagen de belangrijkste variatie binnen het studiegebied omvatten. Modellaag 2 is extra belangrijk omdat veranderingen in de stijghoogte in deze modellaag direct effect hebben op de kwel. Voor effecten van onttrekkingen zullen de effecten het grootst zijn voor de laag waaruit onttrokken wordt. Door de effecten voor de verschillende lagen te bekijken, wordt dit duidelijk.

Kwel is van belang voor natuur, voor zowel de kwaliteit (oa basenaanrijking) als een extra voedingsterm die tot natte(re) condities kan leiden. Het model geeft voor elke modelcel een kwelflux en deze wordt berekend door het stijghoogteverschil tussen modellaag 1 en 2 te delen door de hydraulische weerstand. De ervaring leert dat veranderingen in kwelflux voor een nationale schaal lastig zijn te zien omdat kwelgebiedjes vaak heel smal zijn (bijv. beekdalen van 1 modelcel breed). Daarom is gekozen om de kwelflux te middelen per LSW*.

** Een LSW is een zogenaamde Local Surface Water en is een rekeneenheid voor MOZART, de oppervlaktewatermodule van het LHM. Het LHM kent meer dan 8000 LSWs en ze komen redelijk overeen met de stroomgebiedgrenzen van de kleinere stroomgebiedjes. Een shape-file van de LSWs is bij de resultaten bijgevoegd.*

Tevens wordt aangegeven of de gesimuleerde ingreep invloed heeft op het gebied waar kwel optreedt, dit is zowel op modelcelniveau als op LSW-niveau in beeld gebracht.

Grondwaterafvoer is de hoeveelheid grondwater dat door beken, sloten en drainagebuizen worden gedraineerd en kan worden gezien als de gebiedseigen afvoer (drainage). **Oppervlaktewaterinfiltratie** is de tegenovergestelde term en geeft de hoeveelheid oppervlaktewater dat naar het grondwater infiltreert (Figuur 6o). Alleen de grotere waterlopen kunnen infiltreren en ook alleen als er water beschikbaar is (dit houdt het model bij). Per LSW wordt de netto flux van grondwaterafvoer en oppervlaktewaterinfiltratie bepaald en gepresenteerd (positief is netto grondwaterafvoer, negatief is netto infiltratie).



Figuur 6o: Links een drainerende sloot die grondwaterafvoer representeert en rechts een infiltrerende sloot.

Het verschil tussen de potentiële en actuele transpiratie is een goede maat om de droogtestress (vochttekort) van gewassen uit te drukken, en wordt verder **transpiratie-reductie** genoemd. Deze wordt voor een bepaalde periode op modelcel-niveau bepaald.

Tijd-momenten in het jaar

Voor alle parameters zijn resultaten op dagbasis beschikbaar, echter voor het vervaardigen van de kaartjes zijn keuzes gemaakt om dit voor bepaalde periodes te presenteren. Deze periodes zijn:

- Freatische grondwaterstand en stijghoogte: 1 april, LG3, 31 juli, 1 oktober
- Kwel, Grondwaterafvoer en oppervlaktewaterinfiltratie, Transpiratie reductie: gemiddeld voor zomermaanden juni-juli-augustus, gemiddeld voor periode 21 juli-11 augustus

1 april geeft het begin van het groeiseizoen aan en toen was de droogte nog niet gestart. 1 oktober wordt vaak gezien als het einde van het groeiseizoen.

De LG3 is vergelijkbaar met de GLG alleen dan voor een specifiek jaar. Het zijn de drie laagste grondwaterstanden van 2018 bepaald op de 14^e en 28^e van iedere maand.

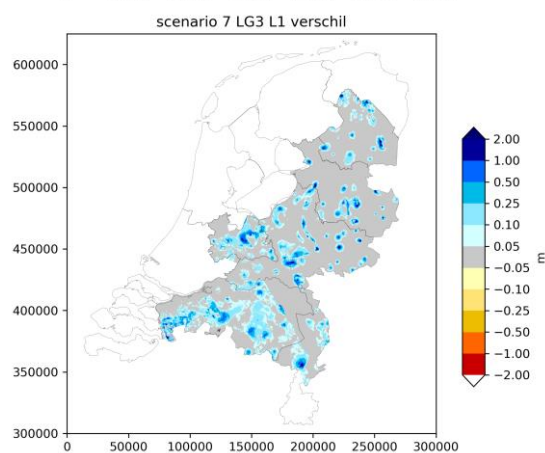
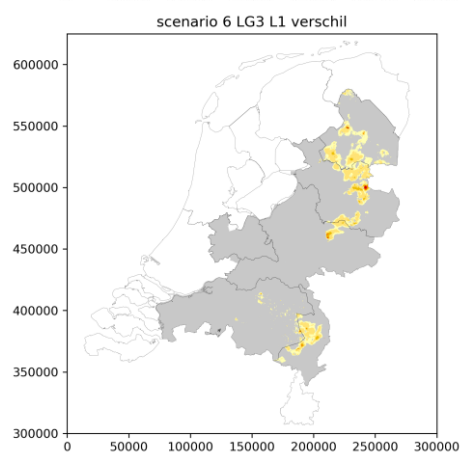
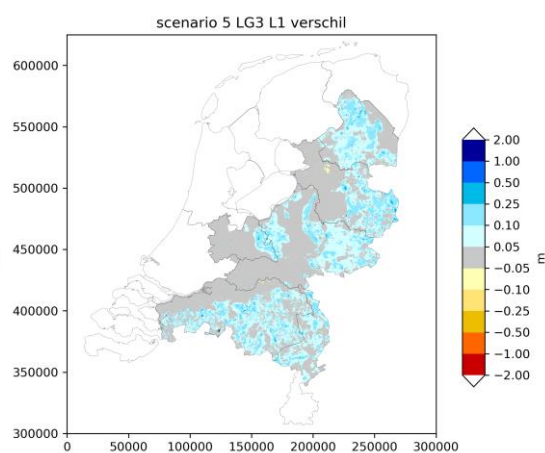
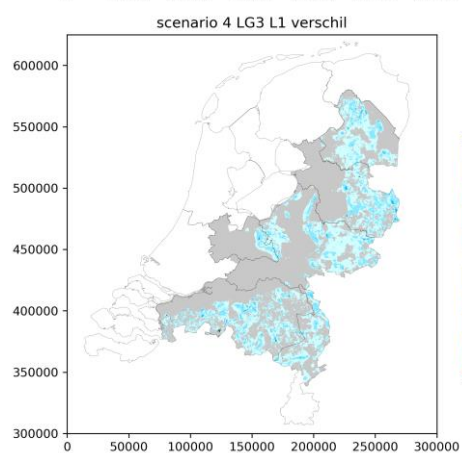
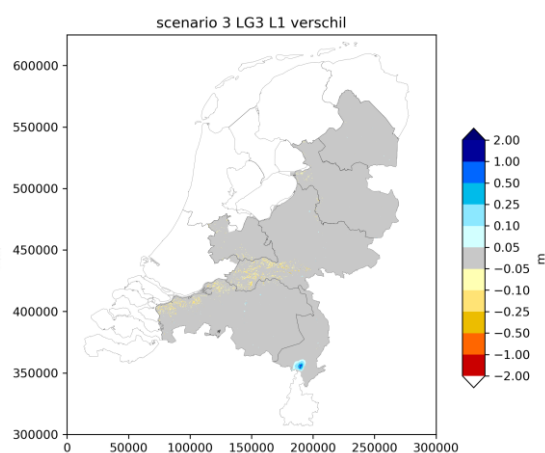
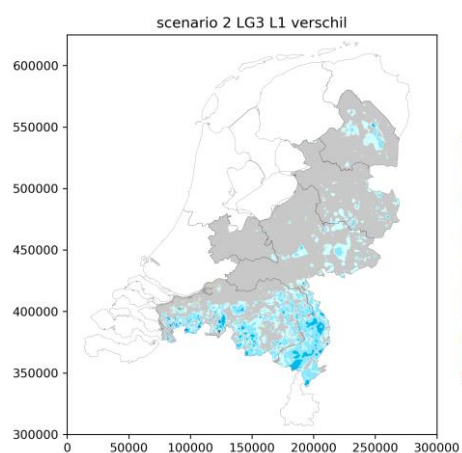
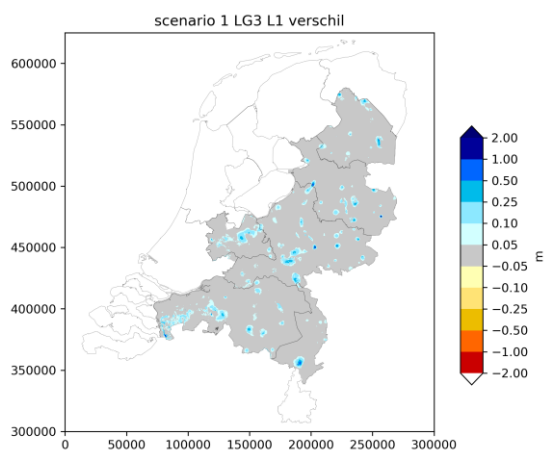
Op 31 juli is volgens de modelberekeningen de piek van beregning (beregenvingsvraag het grootst) en daarom worden voor deze datum de effecten op grondwaterstand en stijghoogte gepresenteerd.

Voor de fluxen (Kwel, Grondwaterafvoer en oppervlaktewaterinfiltratie, Transpiratie reductie) wordt een gemiddelde over een bepaalde periode bepaald. Hiervoor zijn twee relevante periodes geselecteerd voor het droogtejaar 2018, namelijk de zomermaanden juni-juli-augustus en de periode van 3 weken rondom de hoogste beregeningspiek (21 juli -11 augustus).

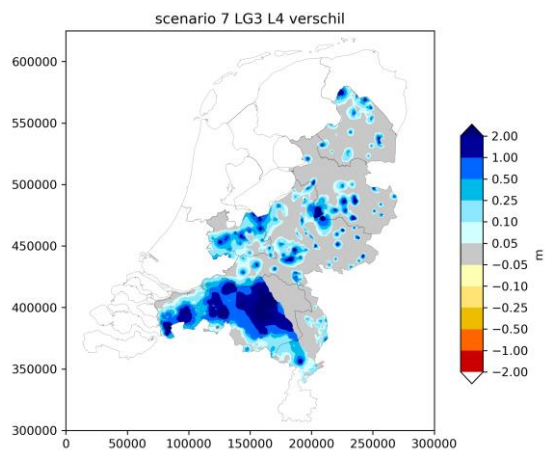
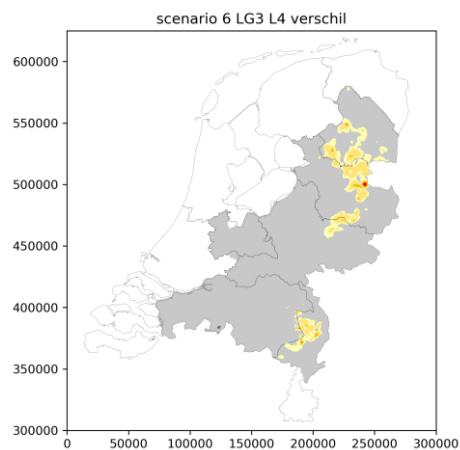
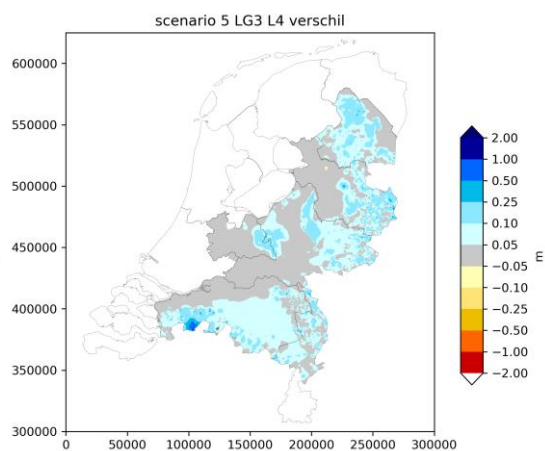
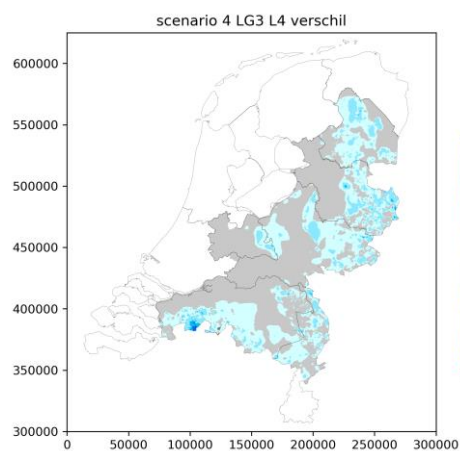
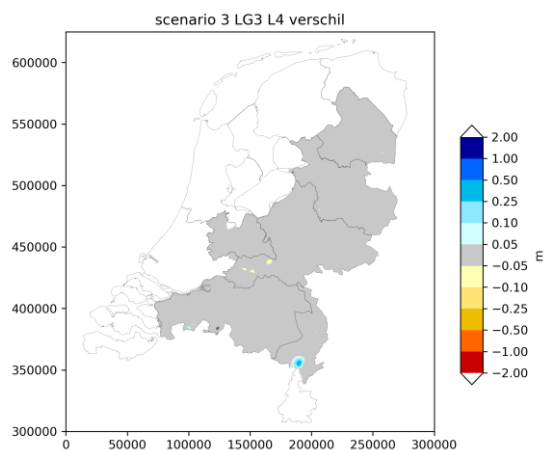
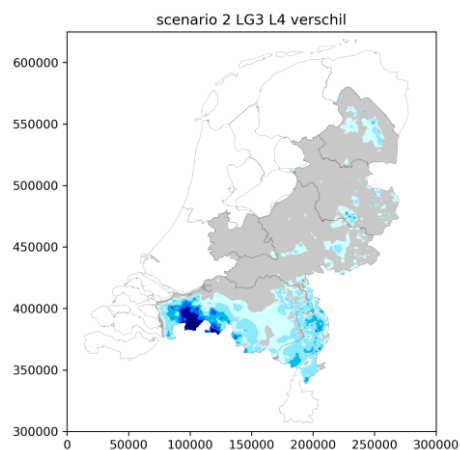
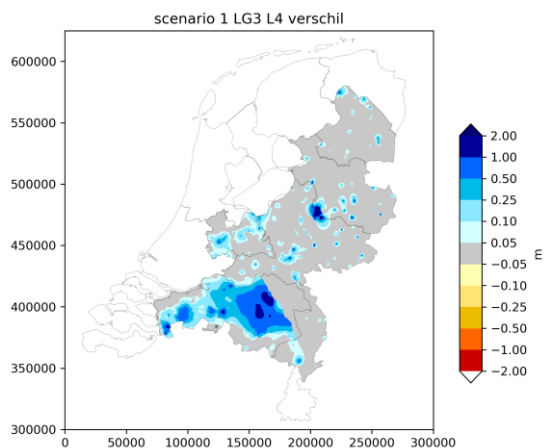
Figuren

Voor elk model-scenario zijn verschilkaartjes (verschil met referentie-model) gegenereerd voor bovenstaande aspecten van het watersysteem en periodes. De titels van de figuren spreken voor zich. Voor sommige parameters zoals kwel en afvoer zijn niet alleen de verschillen maar ook de werkelijke waarden getoond. Naast figuren zijn ook de ascii-grids ter beschikking gesteld zodat de resultaten in GIS kunnen worden geladen en worden ingezoomd voor het betreffende gebied. Hieronder worden de belangrijkste kaartjes met modelresultaten gepresenteerd voor alle modelscenario's. Alle andere kaartjes en diagrammen met resultaten van de scenario's zijn te vinden in de digitale bijlage.

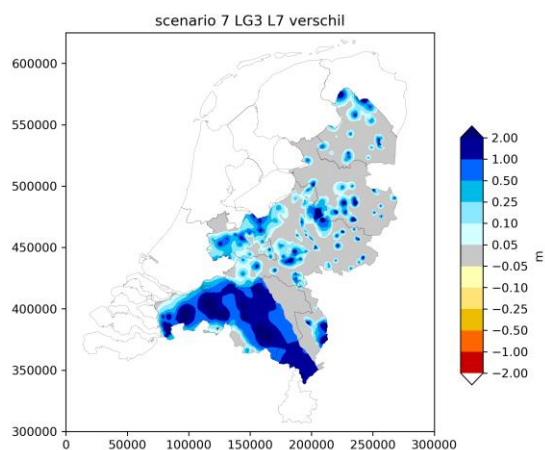
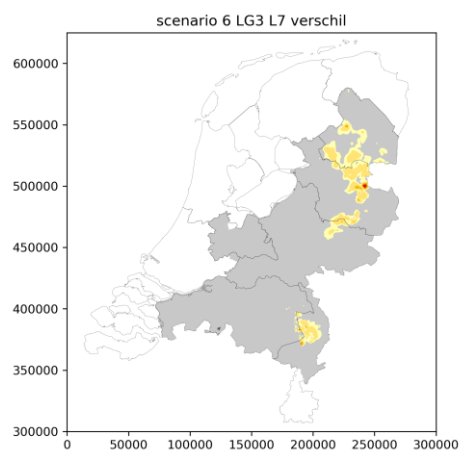
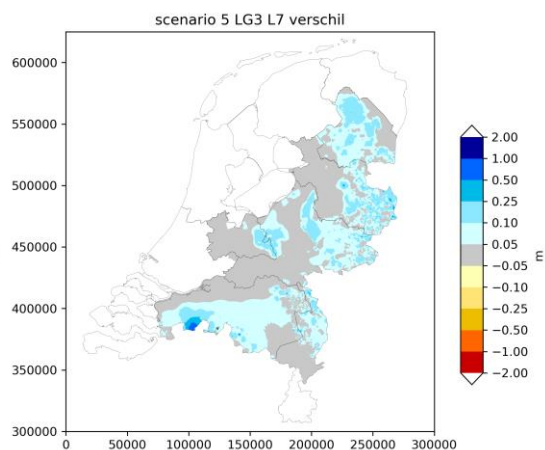
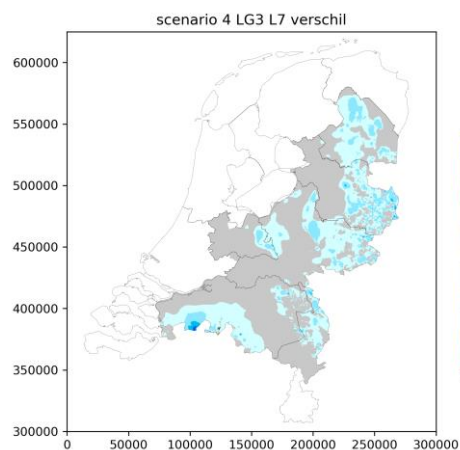
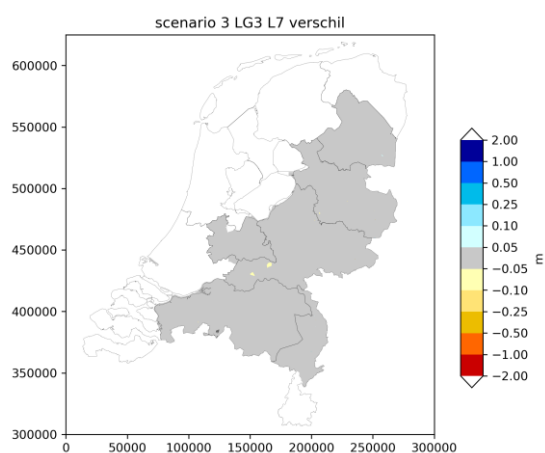
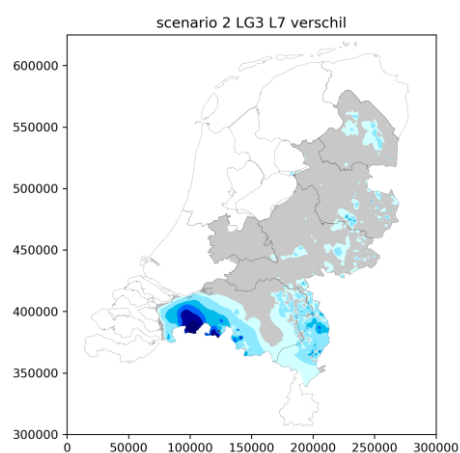
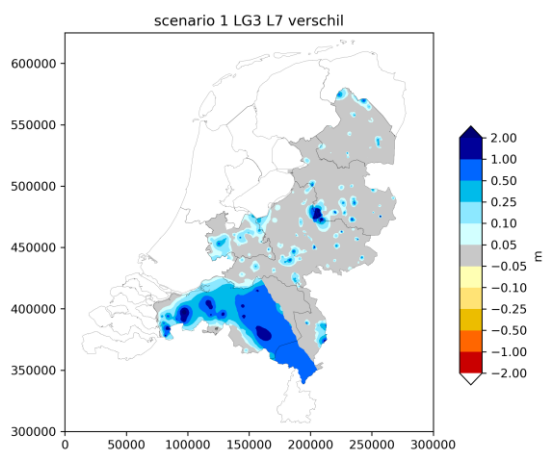
**Effecten van scen 1-7 op de freatische
grondwaterstand (modellaag 1), situatie
LG3**



**Effecten van scen 1-7 op de stijghoogte
van modellaag 4, situatie LG3**

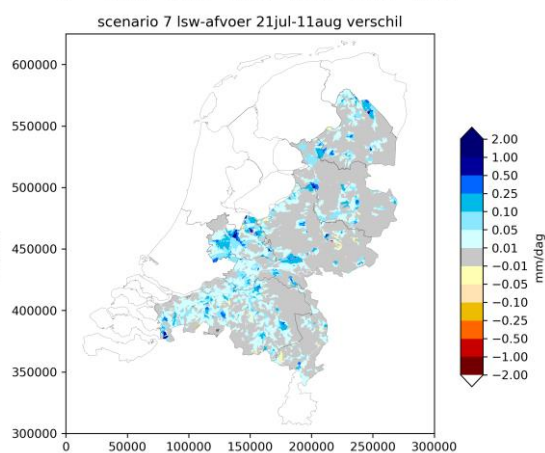
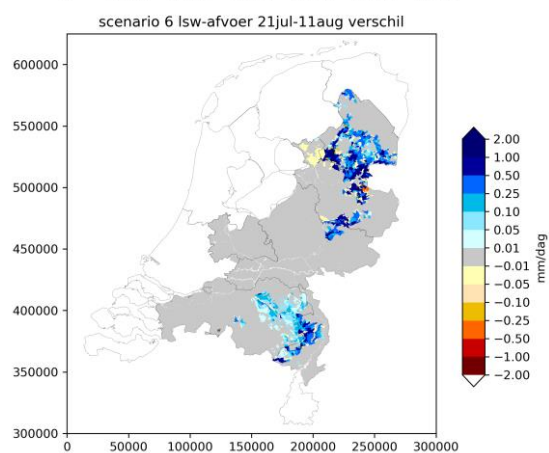
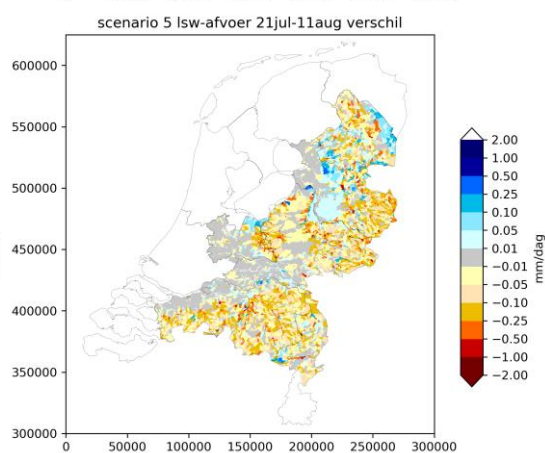
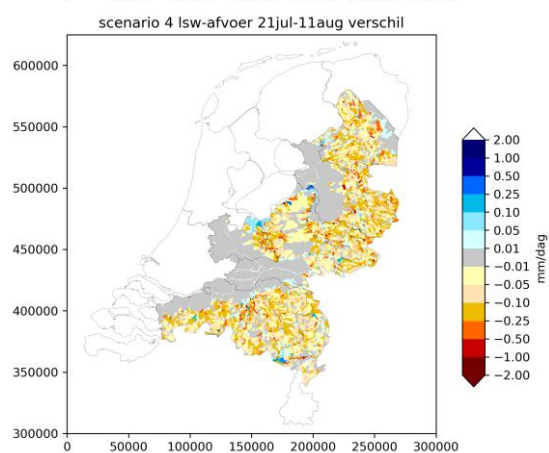
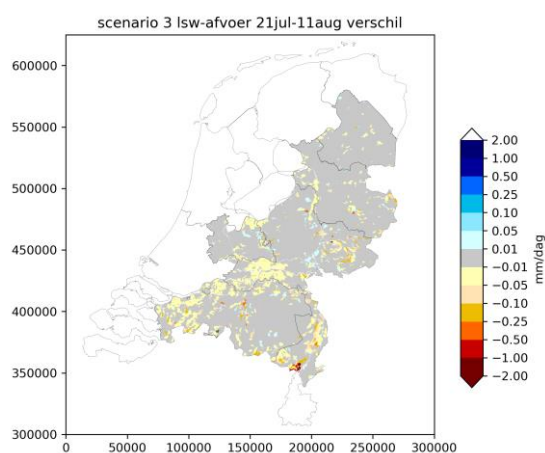
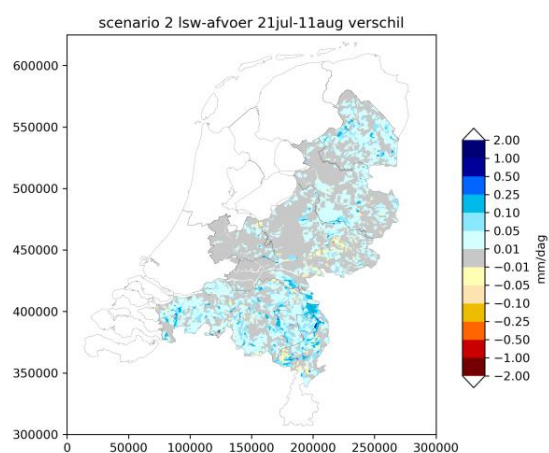
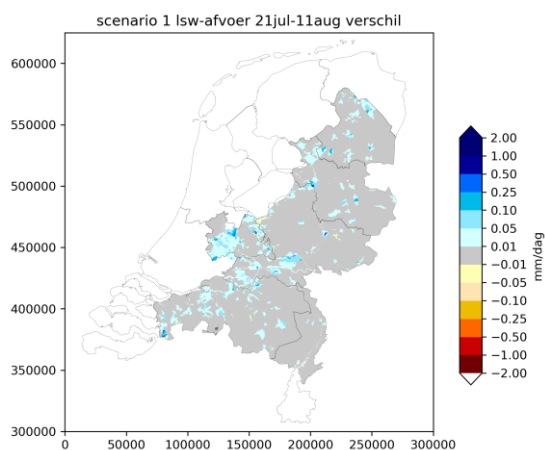


**Effecten van scen 1-7 op de stijghoogte
van modellaag 7, situatie LG3**



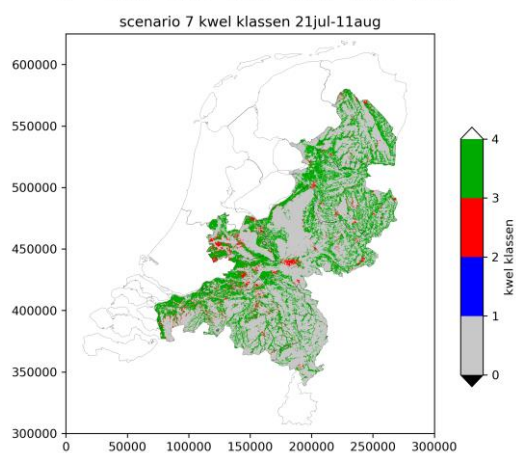
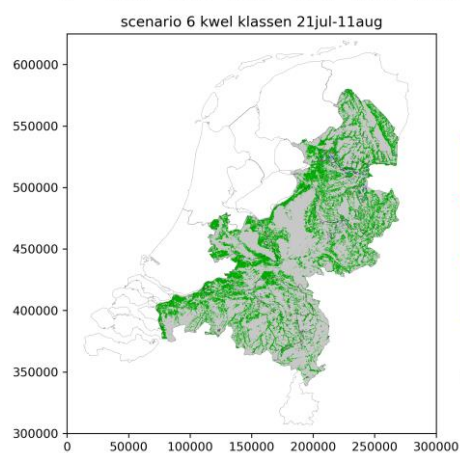
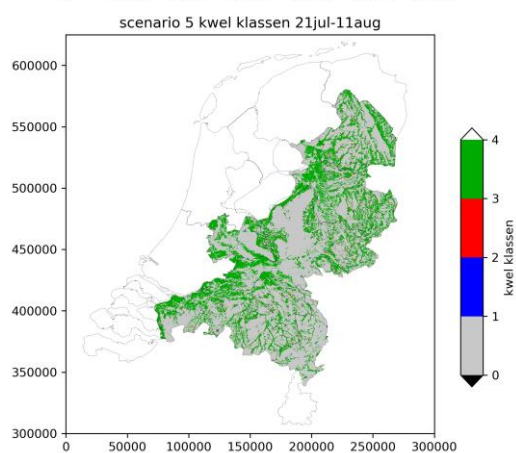
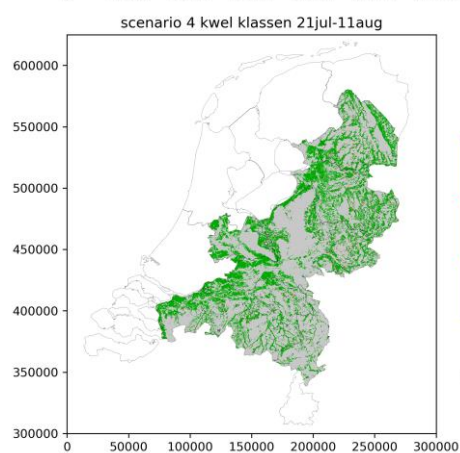
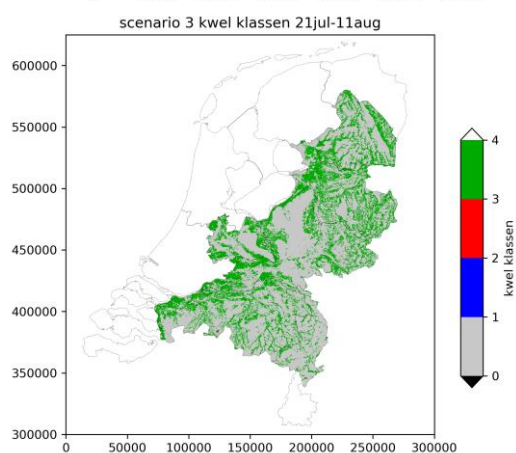
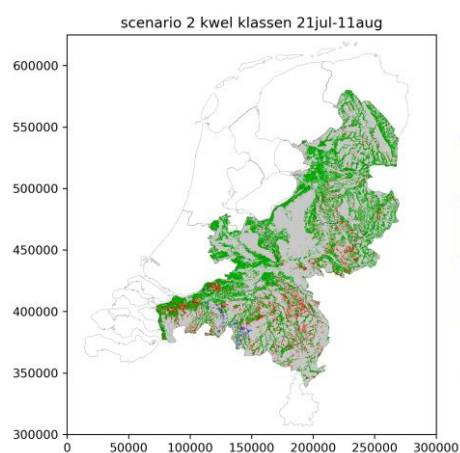
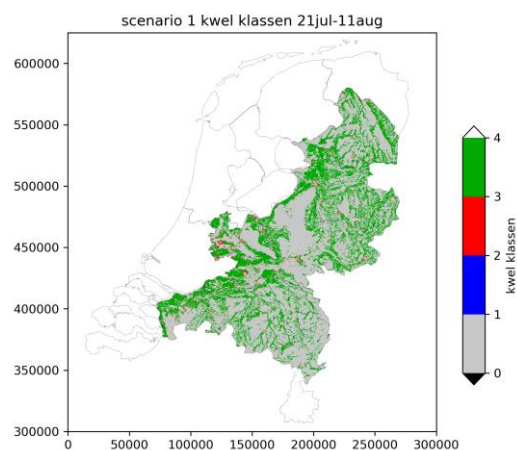
Effecten van scen 1-7 op de grondwater drainage (gebiedseigen afvoer) en infiltratie naar het grondwater voor de periode 21jul-11aug 2018.

Blauw betekent toename grondwaterdrainage of afname infiltratie. Rood vice versa.

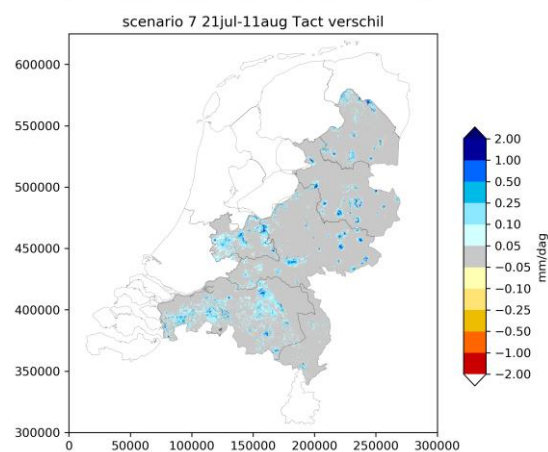
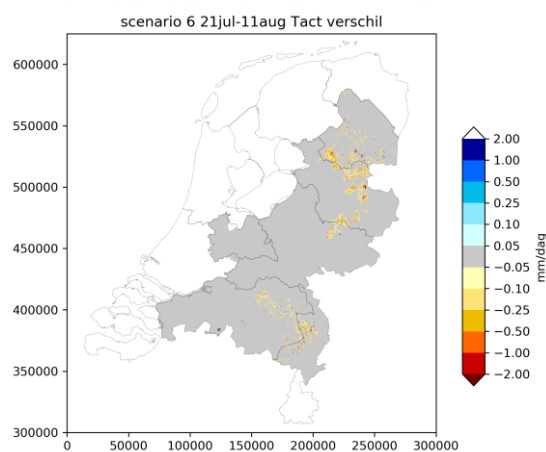
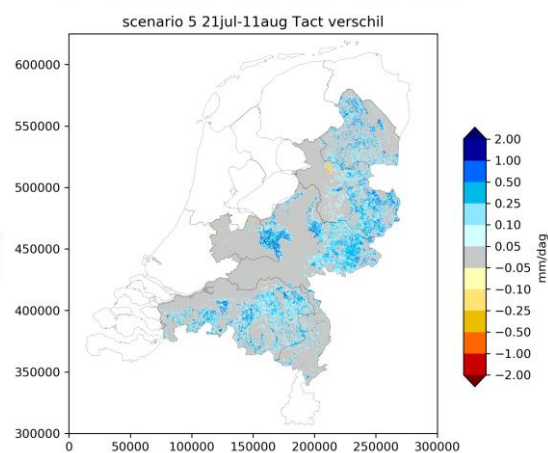
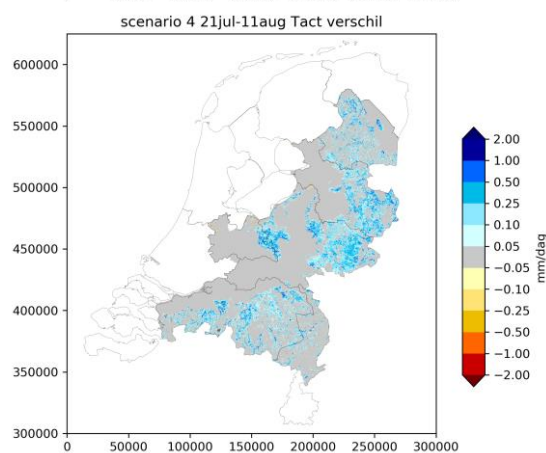
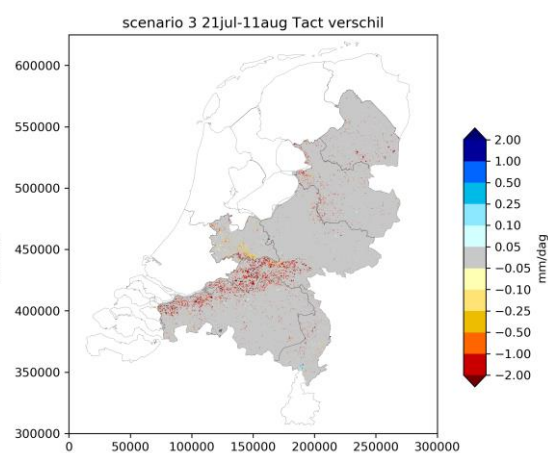
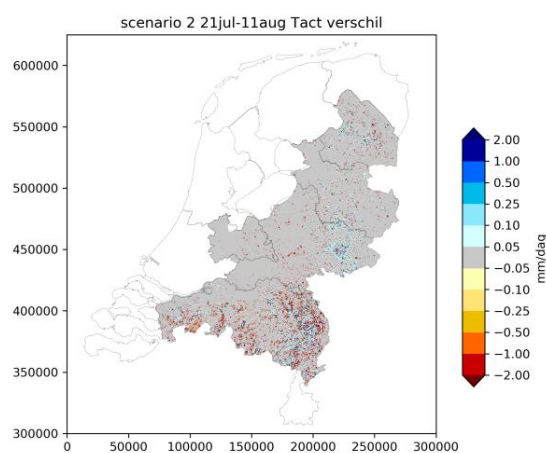
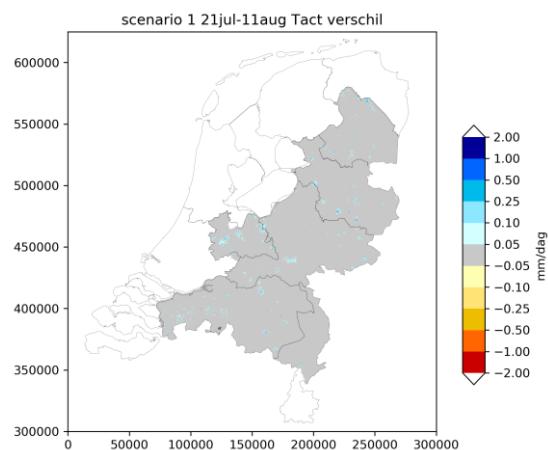


Effecten van scen 1-7 op de kwelgebieden voor periode 21jul-11aug 2018.

Groen betekent kwel blijft kwel, rood betekent infiltratie naar kwel, blauw betekent kwel naar infiltratie, en grijs infiltratie blijft infiltratie.



Effecten van scen 1-7 op de actuele transpiratie voor periode 21jul-11aug 2018.



8.4. Overige aanvullende figuren

Als aanvulling apart bijgevoegd in PDF-format.

8.5. Visualisatie-tool

Is apart gepubliceerd op www.droogteportaal.nl, met gebruikersnaam: DroogteZandgronden en wachtwoord: w@terrijk1.



© KnowH2O – KWR – Deltares – FWE – WUR SLM – HSS (2019)