

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

Het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen

Eindrapport

Projectteam Droogte Zandgronden Nederland

Definitief – 4 oktober 2021

Colofon

Titel

Eindrapport project 'Droogte Zandgronden Nederland' (Fase 3):

Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland: het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen

Opdrachtgevers-financiers

Provincie Noord-Brabant (trekker), Gelderland, Limburg, Utrecht, Overijssel, Drenthe; Waterschap WL, WAM, WDD, WBD, WVV, WRIJ, WVS, WDOD; Natuurmonumenten, Staatsbosbeheer; MinLNV; met bijdragen uit het Deltaplan Hoge Zandgronden en het Deltafonds

Projectteam Droogte Zandgronden Nederland

Gé van den Eertwegh (trekker), Perry de Louw, Jan-Philip Witte, Marjolein van Huijgevoort, Ruud Bartholomeus, Dion van Deijl, Jos van Dam, Joachim Hunink, Ilja America, Janneke Pouwels, Peter Hoefsloot en Janine de Wit

Kader

Dit rapport maakt deel uit van het project 'Droogte Zandgronden Nederland' (Fase 3) en is mede uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	5
Samenvatting.....	9
1. Inleiding.....	15
1.1 Aanleiding, doel en kader	15
1.2 Droog weer, droogte en verdroging.....	15
1.3 Werkwijze en indeling rapport	16
2. De droogte van 2018 en 2019	19
2.1 Hydrologische ontwikkeling en voortplanting van de droogte	19
2.1.1 Compartimenten in het watersysteem	19
2.1.2 Meteorologische droogte	22
2.1.3 Bodemvochtdroogte en de gevolgen voor verdamping en gewas	23
2.1.4 Doorwerking meteorologische droogte via bodemvocht naar het grondwater	27
2.1.5 Gevolgen van de droogte voor de afvoer van oppervlaktewater	32
2.1.6 Gevolgen van de droogte voor de onttrekking van grond- en oppervlaktewater	35
2.2 De gevolgen van de droogte voor de landbouw	37
2.3 De gevolgen van de droogte voor de natuur	39
2.3.1 Kwantificeren van effecten	39
2.3.2 Met het LHM gesimuleerde hydrologische droogte in natuurgebieden	39
2.3.3 Enquête over gevolgen van droogte voor de natuur.....	44
2.3.4 Resultaten analyse van het Landelijk Meetnet Flora	45
2.3.5 Resultaten analyse van vegetatieplots bij peilbuizen	47
2.3.6 Naijl-effecten	47
2.4 Handelingen van overheden tijdens de droogte	47
3. Opties om droogteschade te beperken	49
3.1 Wat kunnen we wanneer doen?	49
3.2 Ad-hoc-ingrepen tijdens droogte	49
3.3 Richtinggevende maatregelen – structureel.....	50
3.3.1 Hoofdgroepen richtinggevende maatregelen	50
3.3.2 Optie 1: Ontwatering - water vasthouden	52
3.3.3 Optie 2: Afwatering - bergen en aanvoeren	65
3.3.4 Optie 3: Grondwateronttrekkingen - minder eruit.....	67
3.3.5 Optie 4: Bevorderen grondwateraanvulling - meer erin	85
3.4 Hydrologische effecten van de structurele maatregelen voor natuurgebieden.....	90
3.4.1 De effecten van zes structurele maatregelen geïllustreerd met vijf natuurgebieden	90

3.4.2	Bufferzones rondom grondwaterafhankelijke natuur	95
3.5	Overzicht en vergelijking van de maatregelen	99
3.5.1	Overzicht.....	99
3.5.2	Vergelijking van gevoeligheid verschillende maatregelen	103
3.5.3	Ruimtelijke variatie van effecten	105
4.	Data en informatie voor toestand, analyse en beleid	109
4.1	Meetnet bodemvocht	109
4.2	Monitoring berekening via satellietwaarnemingen	112
4.3	Data en informatie voor waterbeheer	115
4.3.1	Inrichting en beheer.....	115
4.3.2	Actuele toestand van het watersysteem	115
4.3.3	Watergebruik	117
4.4	Droogteschade aan de landbouw.....	117
4.5	Droogteschade aan de natuur.....	117
4.6	Droogteportaal.....	118
4.7	Aanbevelingen.....	118
5.	Conclusies	119
5.1	Duiding van droogte 2018 en 2019	119
5.2	Analyse van hypothetische maatregelen	120
5.3	Informatievoorziening – monitoring van droog weer en propagatie van droogte	122
6.	Aanvullende bevindingen en overwegingen voor beleid	123
6.1	Informatievoorziening en het monitoren van droogte.....	123
6.1.1	Beschikbaarheid data voor dit project.....	123
6.1.2	Naar een actueel www.droogteportaal.nl	123
6.1.3	Registratie van onttrekkingen	123
6.2	Beoordeling van het waterbeheer tijdens de droogte.....	124
6.3	Overwegingen bij onderzochte maatregelen	125
6.4	Ruimtelijke inrichting, adaptatie en acceptatie van schade	129
6.5	'Watertransitie'	130
Literatuur		133
Bijlagen		137
I	Berekening van droogte-indices.....	137
II	Duiding droogte.....	139
III	Kaart grondwaterafhankelijke natuur	141
IV	Hydrologische droogte per combinatie van natuurtype en hydrotype	142
V	Responstijd	146

VI	LHM-rekenmodel	149
VII	Effecten van maatregelen in het Krijtlandschap van Zuid-Limburg.....	157
VIII	Vegetatie-indices op basis van remote sensing informatie	166
IX	Detectie van beregende percelen op basis van remote sensing informatie	169
X	Berekende verdamping en vegetatie-indices uit remote sensing informatie.....	171
XI	Hydrologische begrippenlijst	175

Samenvatting

In de jaren 2018, 2019 en 2020 is er sprake geweest van droogte op de hoge zandgronden van Nederland. Tussen begin 2019 en het najaar van 2021 werkten bij droogte in het zandgebied betrokken provincies, waterschappen en maatschappelijke organisaties samen met kennisinstituten en adviesbureaus aan een droogteonderzoek, waar dit eindrapport deel van uitmaakt. Het onderzoek betreft een analyse van de mate van de droogte, effecten van (grond)wateronttrekkingen, ontwatering en afwatering, effecten van ingrepen vanuit het waterbeheer tijdens de droogte, de gevolgen voor natuur en landbouw, met een doorkijk naar de effectiviteit van mogelijk uit te voeren structurele maatregelen, om beter bestand te zijn tegen droogte en de negatieve effecten ervan.

Droogte is meer dan droog weer en komt voort uit een droge periode, die duidelijk afwijkt van een normale situatie en die zolang duurt en/of zo intens is, dat het normale hydrologische evenwicht verstoord raakt. Een slechte landbouwoogst en verlies van natuurwaarden kunnen onder andere het gevolg zijn. Droogte is te onderscheiden in droogte in het weer (meteorologisch), in de bodem (bodemvocht en grondwater) en in beeksystemen (afvoer). Droogte gaat gepaard met minder bodemvocht in de wortelzone van vegetatie en met lagere grondwaterstanden, waardoor een hogere watervraag kan ontstaan zodat meer grond- en oppervlaktewater wordt onttrokken dan normaal, zodat de effecten van de droogte worden versterkt. Droogte is iets anders dan verdroging. De term 'verdroging' is bedoeld om de door menselijk handelen veroorzaakte structurele daling van de grondwaterstand en de structurele vermindering van kwelhoeveelheden in grondwaterafhankelijke natuur aan te duiden. Door verdroging treedt er structureel schade op aan de natuur, vooral tijdens droogte.

Uit dit onderzoek blijkt dat de huidige inrichting en het beheer van ons zoetwatersysteem in combinatie met onttrekkingen van grond- en oppervlaktewater niet in staat zijn om effecten van meteorologische droogte, veroorzaakt door weinig neerslag en een hoge verdampingsvraag, op het grondwatersysteem en de watervoerendheid van beken te beperken. Ontwatering via drainagebuizen en watergangen en onttrekkingen van met name grondwater, voor drinkwater en beregening in de landbouw, spelen hierin een grote rol. Geconstateerd is dat ad-hoc-ingrepen in het waterbeheer vlak vóór of tijdens droog weer nauwelijks het beoogde effect hebben. Uit het onderzoek blijkt dat om effecten van droogte op landbouw, natuur en het watersysteem te reduceren, structurele maatregelen nodig zijn tot in de haarvaten van het watersysteem. Deze haarvaten worden door landeigenaren beheerd op basis van juridische kaders die in de legger (watersysteem) van waterschappen staan. Tevens dient de invloed van grondwateronttrekkingen voor drinkwater en beregening in de landbouw te worden teruggedrongen, en kunnen bufferzones rondom natte natuurgebieden bijdragen aan het herstel van verdroogde habitats.

Een uniforme duiding van droogte in verschillende compartimenten van het watersysteem is nodig, gebaseerd op goede en actuele meetgegevens. Door actuele metingen én een uniforme duiding ervan door middel van droogteindices, kunnen verschillen binnen en tussen regio's continu inzichtelijk worden gemaakt. Betrokken actoren krijgen zo hetzelfde inzicht in de toestand van het bodem-watersysteem en kunnen maatregelen treffen om schade door droogte te beperken. In dit onderzoek zijn indices voor droogte gebruikt die op een openbaar internetportaal zijn geplaatst.

Betrokken actoren moeten samenwerken aan een robuust zoetwatersysteem en samen zullen zij ervoor moeten zorgen dat het water dat we gebruiken ook weer tijdig wordt aangevuld: watervraag en -aanbod komen zo beter in balans. Grondwaterstanden moeten structureel verhoogd worden. Uit het project en het doorlopen proces volgen overwegingen die meegenomen kunnen worden in beleid. Zo zijn op nationale schaal verdroging, verzilting en bodemdaling uitingsvormen van dezelfde activiteiten: ontwateren en afwateren van het neerslagoverschot en (grond)wateronttrekkingen. De ruimtelijke inrichting van het landelijk gebied speelt een belangrijke rol voor het zoetwatersysteem en kan niet los worden gezien van de ontwikkeling naar een meer robuuste zoetwatervoorziening. In hoger gelegen gebieden is vergroting van grondwatervoorraad mogelijk.

Verantwoordelijkheden zijn niet altijd duidelijk verdeeld over de betrokken actoren. Als dit duidelijker gebeurt én er een regisseur komt met gezag die het overzicht heeft en behoudt, dan kunnen we binnen Nederland de komende tijd succesvol werken aan een transformatie van ons Nederlandse zoetwatersysteem. Een watersysteem

dat zo goed als mogelijk functioneert onder natte én onder droge omstandigheden: het is dan beter in balans, het grondgebruik is er beter op afgestemd en de schade voor gebruiksfuncties blijft onder extreme condities beperkt. Dat hierbij concessies in tijd en ruimte zullen worden gedaan aan functiebediening, lijkt onoverkomelijk. Belangrijke kansen voor het combineren van opgaven liggen op het vlak van landbouw- en energietransitie (o.a. stikstof en CO₂) en biodiversiteit.

Watervraag en wateraanbod beter in balans voor voldoende hoge grondwaterstanden

De waterbeheersing van het Nederlandse zandgebied is vooral gericht op land ontwateren en water snel afvoeren, om zo wateroverlast te voorkomen. Na de grote wateroverlast in de zomer van 2016 in het zuidoosten van het land ten gevolge van extreme neerslag, volgden de zomers van 2018 en 2019 en het voorjaar van 2020 met aanzienlijke watertekorten voor onder andere natuur en landbouw (en wellicht hittestress; niet nader onderzocht).

Het drinkwatergebruik neemt toe tijdens droog weer; de winning van (met name) grondwater dient een maatschappelijke functie ten behoeve van drinkwater. Landbouw (gewasproductie) en natuur (biodiversiteit) hebben beide ook behoefte aan water tijdens droog weer in het groeiseizoen, tegelijkertijd dus. Daarbij gaat het om waterhoeveelheden (m³), maar bij natuur vooral ook om de freatische grondwaterstand en de aanvoer van schoon en baserijk kwelwater. Als de grondwaterstand voldoende hoog is, dan is de capillaire nalevering vanuit het grondwater voldoende om droogteschade in de landbouw te voorkomen. In natuurgebieden zijn de grondwaterstand en de intensiteit van het kwelwater bovendien via bodemchemische processen van invloed op de vegetatie. De belangen bij waterbeschikbaarheid voor landbouw en natuur en de verschillen in het weer van de afgelopen jaren confronteren ons helder met de opgave waar we voor staan. Het gaat dus niet alleen om ontwatering en afwatering, maar ook om het beheer van grondwatervoorraden en met name het beheer van de *freatische grondwaterstand*. We mogen dan wel een grote voorraad zoet grondwater in de ondergrond van Nederland hebben, maar als de grondwaterstand te diep wegzakt treedt er droogteschade op aan landbouwgewassen en natuurlijke vegetaties, en dan vallen vennen en beken droog.

Aanpak project – combineren informatie en uniforme duiding

De analyse in dit rapport richt zich vooral op landbouw en natuur in het landelijk gebied van de zandgronden in Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Het bodem- en grondwatersysteem is onderzocht, met daarin grondwaterafhankelijke natuurlijke vegetaties, de productie in de landbouw, en de productie van drink- en industriewater. Stedelijk gebied, fauna en aquatische ecologie maken slechts beperkt deel uit van de analyse. *Daarnaast richt het project zich op droog weer en droogte. Vooral tijdens droogte zijn de gevolgen van verdroging van natuurgebieden zichtbaar, die per definitie structureel van aard is. Een groot voordeel is dat structurele maatregelen tegen droogte ook effectief zijn tegen verdroging.*

Het project is gefaseerd uitgevoerd: in Fase 1 is de methodiek voor analyse van de effecten van droogte opgezet. Fase 2 betref een verdiepende analyse, waarin de doorwerking van de meteorologische droogte in verschillende compartimenten van het watersysteem is geduid voor de droogte van 2018 en 2019, evenals de effecten op landbouwopbrengsten, natuur en watergebruik. Tevens is een aanvullende monitoring opgezet. *Van belang is de uniforme, eenduidige en integrale analyse voor het hele zandgebied en het gebruik van meerdere onafhankelijke bronnen van informatie hierin: veldmetingen, remote sensing beelden en modelberekeningen.* De effecten van een aantal tijdelijke ingrepen en van structurele maatregelen om de gevolgen van droogte te beperken zijn geanalyseerd, er wordt een doorkijk gegeven naar handelingsperspectieven, en er zijn overwegingen voor beleid meegegeven. In dit rapport scherpen we de resultaten en conclusies uit Fase 2 aan en vertalen die naar handelingsperspectief voor waterbeheerders, grondgebruikers en beleidsmakers.

De resultaten zijn op een website geplaatst (www.droogteportaal.nl/achtergrondinformatie.html), waar iedereen de hydrologische gevolgen van de droge jaren 2018 en 2019 en van maatregelen ter bestrijding van de droogte kan bekijken, desgewenst door in te zoomen op een bepaald gebied.

Resultaten en bevindingen – duiding van droogte 2018 en 2019

De droogte van 2018 en ook die van 2019 was zichtbaar in alle componenten van het watersysteem. Het tekort aan neerslag leidde samen met een hoge verdamping tot droogte in bodemvocht, grondwater en beekafvoer, met droogval tot gevolg. Hier en daar bood wateraanvoer soelaas. Tegelijkertijd waren de wateronttrekkingen aan het systeem voor drinkwater en de landbouw hoger dan normaal, omdat de waterbehoefte steeg. Zowel aan de bovenkant (bodem- en oppervlaktewater) als de onderkant (grondwater) van het bodem-watersysteem werd het droger en droger. Er werden in diverse regio's op diverse momenten verboden ingesteld om oppervlaktewater te onttrekken. Verboden om grondwater te onttrekken werden veelal niet, dan wel beperkter opgelegd.

De voortplanting van de droogte (ordegrootte, omvang, tijd van ontstaan en herstel) in de verschillende componenten van het systeem (meteorologie, bodemvocht, grondwater, afvoer) was en is afhankelijk van de gebiedskarakteristieken. Deze bepalen de reactiesnelheid van het hydrologische systeem en de mate en snelheid van herstel in de verschillende compartimenten. Onder een diepe onverzadigde zone, bijvoorbeeld met een GLG dieper dan 2 m-m.v., reageert de grondwaterstand later en meer gedempt op droog weer dan bij een nat bodemprofiel.

De land- en tuinbouw in het zandgebied had last van droogte, met name qua drogestofopbrengst van gewassen. Dat bleek ook uit onze berekeningen ten aanzien van de transpiratiereductie en de gewasindices afgeleid uit remote sensing beelden. Met name de zandgronden in het oosten en noordoosten van Nederland hadden last. Ook is er veel berekend en zijn er extra (variabele) kosten hiervoor gemaakt van grofweg € 3.000,-/jaar gemiddeld per bedrijf voor akkerbouw- en melkveehouderijbedrijven in het zandgebied van Nederland. Met uitzondering van akkerbouwbedrijven in het noordoosten van Nederland zijn de jaarinkomens in 2018 en 2019 voor akkerbouw- en melkveebedrijven in het zandgebied van Nederland gelijk gebleven of er zelfs op vooruitgegaan in vergelijking met andere, minder droge jaren. Dat komt door de hogere marktprijzen voor producten.

In een enquête gaven natuurbeheerders aan dat de droogte in 2018 en 2019 matig tot grote schade had aangericht aan de natuur. Vooral beken, venen en bronnen leden schade, evenals natuurtypen die kenmerkend zijn voor natte en vochtige, voedselarme standplaatsen. Op droge zandgronden legden veel bomen het loodje, met name de Fijnspar, en stierf op sommige plekken struikheide massaal af. Een deel van de beheerders verwacht dat het herstel ten minste vijf jaar kan duren, mits we weer jaren krijgen met normaal weer. De resultaten van de enquête werden grotendeels bevestigd in een statistische analyse van het Landelijk Meetnet Flora (LMF), een monitoringsnetwerk van vegetatieplots waarvan om de 3-4 jaar de soortensamenstelling wordt opgenomen. De analyse van deze Permanente Kwadraten (PQ's) leverde op dat in de droge jaren meer soorten in aantal en bedekking achteruitgingen (namelijk 50%), dan vooruit (35%). De achteruitgang betrof zowel algemene als zeldzame soorten. De achteruitgang was nauwelijks zichtbaar in de plotgemiddelde indicatiewaarden voor vocht, voedselrijkdom en zuurgraad. De natuurwaarde van de PQ's ging door de droogte echter aanzienlijk achteruit, afhankelijk van de waarderingsmethode met 6 tot 18%. Voor een beperkte set van 89 vegetatieopnamen waren ook betrouwbare tijdreeksen van de grondwaterstand in een nabijgelegen peilbuis beschikbaar. De vegetatie in deze beperkte set opnamen toonde eenzelfde respons op de droogte als signaleerd in de LMF-studie. Er werd echter geen verband gevonden tussen het gemeten en berekende hydrologische effect van de droogte, en de grootte van de vegetatie-respons.

Resultaten en bevindingen – opties om droogteschade te verminderen

Het onderzoek laat zien dat de huidige inrichting, het beheer en het gebruik van ons zoetwatersysteem onvoldoende geschikt zijn om negatieve effecten van een meteorologische droogte, veroorzaakt door weinig neerslag samen met een hoge verdampingsvraag en met verhoogde onttrekkingen van (grond)water door waterbedrijven en agrariërs, op het grondwatersysteem en de watervoerendheid van beken afdoende te beperken. Landbouw, natuur én het watersysteem zelf (o.a. door droogval) ondervinden hier schade van.

Ad-hoc-ingrepen in het waterbeheer vlak vóór of tijdens droog weer kunnen dit nauwelijks voorkomen. Ad-hoc-ingrepen op het vlak van (grond)wateronttrekkingen hebben sneller effect, in gebieden die door deze onttrekkingen

worden beïnvloed. Structurele maatregelen in inrichting en beheer van alleen de leggerwatergangen werken onvoldoende door richting het grondwatersysteem; een combinatie met structurele maatregelen tot in de haarvaten van het watersysteem werkt wél voldoende door. Structurele aanpassingen zijn nodig van het watersysteem, het waterbeheer en het watergebruik.

Maatregelen die bijdragen aan het verminderen van droogteschade zijn:

- Freatische grondwaterstanden moeten structureel omhoog: water tijdig, meer en langer vasthouden in de bodem (sparen/bufferen); maatregelen die hiertoe leiden doorvoeren tot in de haarvaten van het watersysteem;
- Grondwateraanvulling in infiltratiegebieden aanmerkelijk vergroten door verdamping te verminderen en daar waar het verantwoord kan (kunstmatig) water te infiltreren in hoge gebieden (NB: in dit project is geen onderzoek gedaan naar aspecten van waterkwaliteit, ook niet naar 'vergroening' van grondwater);
- Druk op het grondwater verminderen door grondwateronttrekkingen voor drinkwater, proceswater en beregening blijvend of tijdig te reduceren in en om gebieden die door onttrekkingen worden beïnvloed en die gevoelig zijn voor droogteschade;
- Bufferzones rondom natuurgebieden vergen maatwerk qua omvang, inrichting en beheer; de omvang kan beter worden afgestemd op geohydrologische eigenschappen van de gebieden; het waterbeheer kan via reductie van de ontwatering positief bijdragen aan natuurdoelen, zo ook de vermindering van (grond)wateronttrekkingen. Specifiek en nader locatie-onderzoek is nodig.

Voor structurele aanpassingen van het watersysteem is een intensieve samenwerking nodig tussen waterbeheerders zoals provincies en waterschappen én landeigenaren. De laatste groep bezit het meeste land, de meeste kilometers aan watergangen (70 tot 80%) en de meeste beregeningsputten, zodat deze groep ook een belangrijke bijdrage kan leveren aan oplossingen. Het waterschap heeft (met name) vóór en (ook) gedurende een droogteperiode invloed via beheer van de eigen watergangen (o.a. via peilbeheer, inlaatbeheer en maaibeheer). Grondeigenaren bepalen vaak zelf de ontwatering van hun eigen land via drainagemiddelen en kavelsloten. Het waterschap kan beleidsregels maken en toepassen die de ontwatering op kavelniveau beperken, via drainagebuizen of stuwen in kavelsloten (NB: aangepast beheer - registreren). Van deze beleidsruimte lijkt echter weinig gebruik gemaakt, terwijl juist de Legger Watersysteem mogelijkheden biedt om randvoorwaarden op te leggen aan breedte en (vooral) diepte van watergangen in particulier beheer. Het waterschap is namelijk als beheerder verantwoordelijk voor alle watergangen en kan gebruik maken van haar bevoegdheid in het kader van droogte en verdroging.

Resultaten en bevindingen – informatievoorziening

De huidige beschikbaarheid van actuele en accurate gegevens over de toestand van ons watersysteem (vochtvoorraad wortelzone, grondwaterstanden, debieten) en van informatie over de vraag naar en het aanbod van water is onvoldoende om het nog beschikbare (schaarse, beperkte) grond- en oppervlaktewater op een optimale manier te verdelen over verschillende gebruikers. *Zo worden onttrekkingsgegevens vanuit de landbouw onvolledig geregistreerd en zijn beekafvoeren en bodemvochtgehalten onvoldoende beschikbaar om tijdig te anticiperen op dreigende tekorten voor verschillende gebruikers van het systeem. Tijdreeksen van de toestand van natuurlijke vegetaties in combinatie met metingen van grondwaterstand, bodemvocht, zuurgraad en nutriënten zijn er nauwelijks. Het is voor het overeind houden van de functionaliteit van ons watersysteem tijdens droog weer nuttig voor beheerders om te weten waar (X,Y,Z) hoeveel water (m³) er wanneer onttrokken wordt in de actuele situatie, niet alleen achteraf. Effecten van mogelijke maatregelen kunnen dan beter in beeld worden gebracht.*

De combinatie van directe metingen in het veld, interpretatie van remote sensing beelden en hydrologische modellen, zoals in dit project toegepast, geeft een zo volledig mogelijk beeld om i) de toestand van het watersysteem continu in beeld te brengen, ii) deze uniform te interpreteren, iii) voorspellingen te doen op korte termijn en voor het hele groeiseizoen, iv) eerder en beter te anticiperen op het weer en v) effecten van ad-hoc of structurele maatregelen door te rekenen. Door actuele metingen en droogte-indices voor een uniforme duiding van droogte te ontsluiten, worden verschillen binnen en tussen regio's continu inzichtelijk gemaakt. Betrokken

actoren krijgen *hetzelfde inzicht* in de toestand van het bodem-watersysteem en kunnen *gezamenlijk maatregelen treffen* om schade als gevolg van droogte te beperken. Zo kunnen we vanuit het zandgebied van Nederland op nationaal niveau in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater ook beslissingen van de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) ondersteunen. Hierbij speelt met name vroegtijdige informatievoorziening een rol, ruim voordat droog weer tot droogteschade leidt.

Ondertussen zijn er, mede gestimuleerd door de afgelopen droge jaren, diverse initiatieven om de informatievoorziening te verbeteren, onder andere via de wet Basis Registratie Ondergrond (BRO) en landelijke acties vanuit Bij12, dat toeziet op een verbeterde informatievoorziening (vegetatie en abiotiek) met betrekking tot (natte) natuur.

Overwegingen voor beleid – naar een anders ingericht watersysteem en beheer – herinrichting en landgebruik

Droog weer, intensieve buien, klimaatverandering en een grotere druk op het watersysteem vragen om aanpassingen van de inrichting en het gebruik van het watersysteem. *Bij een transitie naar aangepaste inrichting en adaptief waterbeheer moet steeds de balans worden gezocht tussen het voorkómen en accepteren van wateroverlast en het beperken en accepteren van droogteschade.* Ook acceptatie van landbouwschade, zowel aan de droge als aan de natte kant, kan nodig zijn. De uitdaging ligt onder meer in de verschillende tijdschalen waarop droogte en wateroverlast zich manifesteren: wateroverlast komt en gaat snel, terwijl droogte langzaam intreedt en lang najlt: wateroverlast is een vlugdief, droogte een sluipmoordenaar. Een watersysteem dat én geschikt is om water voldoende snel af te voeren én ook beheerders en landeigenaren in staat stelt om water vast te houden om grondwatervoorraden aan te vullen, levert een wezenlijke bijdrage aan een robuust watervoorraadbeheer, waarbij freatische grondwaterstanden voldoende verhoogd gaan worden. Klimaatverandering leidt tot meer grillige en meer extreme weercondities, die met meer buffering van water beter opgevangen en verwerkt worden. Naast de genoemde maatregelen geven we de volgende overwegingen mee:

- We bevelen aan de informatie over het gebruik en de toestand van het watersysteem te uniformeren en op orde te brengen. Bijzondere aandacht is daarbij nodig voor a) het door waterschap en provincie op een degelijke wijze registreren van actuele, operationele onttrekkingen uit oppervlaktewater en grondwater en voor b) het operationeel in beeld hebben van de actuele toestand van het watersysteem: bodemvocht, freatische grondwaterstand, stijghoogte en beekafvoer;
- Als freatische grondwaterstanden omhoog worden gebracht door bijv. aanpassing van de ontwatering, zal niet elk landgebruik en niet elk gewas nog op elke plek mogelijk zijn. Deze consequentie kan niet genegeerd worden en vraagt aanpassingen aan de inrichting van het platteland en het landgebruik.
- Het ligt voor de hand de noodzakelijke watertransitie te combineren met transitie inzake ruimtelijke inrichting (incl. infiltratie regenwater), meststoffen, energie, emissie van broeikasgassen en landbouw.
- Belangrijk(st)e maanden om water vast te houden zijn februari en maart, omdat deze meestal een neerslagoverschot kennen én omdat dit de maanden zijn waarin landbewerking voor de landbouw start, waarvoor bij de huidige bedrijfsvoering ontwatering vaak gewenst is (o.a. gebruik van machines, opwarming bodem). De provincies hebben een belangrijk rol in het *grondwaterbeheer*. Het Rijk heeft een belangrijke rol in de *landbouwpraktijk* gedurende deze maanden via bijvoorbeeld de mestwetgeving, waarbinnen het toegestaan is om vanaf 15 februari meststoffen toe te dienen. Nieuwe regels zoals voor uitrijden van mest en/of investeringsprogramma's voor bijvoorbeeld extra opslag van dierlijke mest kunnen voorwaarden bieden om op korte termijn in de haarvaten van het watersysteem aan de slag te kunnen met maatregelen die ons beter bestand maken tegen droogte. Rijk en provincies kunnen daarin nauw samenwerken.
- Een andere belangrijke uitdaging ligt op het vlak van bestuur en beheer van het watersysteem. Rijk, provincies, waterschappen én landeigenaren dienen de handen in één te slaan, met voor elke partij een duidelijke verantwoordelijkheid, én met een regisseur (NSOB, 2020). Het beheer van oppervlaktewater en van ondiep én diep grondwater dient meer in samenhang te geschieden (waterschappen en provincies zijn aan zet). Het bodem- en het watersysteem hangen namelijk nauw samen. Op nationale schaal zijn verdroging, verzilting en bodemdaling uitingsvormen van dezelfde activiteiten: ontwateren en afwateren.

We zien graag dat voor de zoetwatervoorziening, natuur, landbouw en mogelijke herinrichting van het land op rijksniveau de Ministeries van IenW en van LNV nauw samenwerken, dat provincies in het zandgebied gezamenlijk het voortouw nemen inzake strategisch en operationeel grondwaterbeheer en provincies, waterschappen en drinkwaterbedrijven nauw samen werken op het vlak van watergebruik, beheer en inrichting van het watersysteem.

- Verdroging van natuur, emissie van broeikasgassen, het stikstofdossier (PBL, 2021) en klimaatveranderingen met onder andere meer en vaker droogte tot gevolg, kunnen samenkomen in een op te zetten 'Deltaplan Robuust Nederland' (zie ook Nationaal Deltaprogramma en Nationale Omgevingsvisie, 2021). Na de ruilverkavelingen en landinrichtingen in het verleden, na het Nationaal Bestuursakkoord Water en het programma 'Ruimte voor de Rivier' (NB: alle gericht op teveel water, wateroverlast en waterveiligheid) is het tijd voor additioneel omdenken (te droog hoort er ook bij) en investeringen in het regionale en lokale watersysteem, bijvoorbeeld met een programma 'Ruimte voor de Beek', en een betere integratie van landbouw- en natuurdoelen. Wellicht staan we aan de vooravond van een periode van 'Ruilverkaveling 2.0'. Met gevolgen voor het landgebruik, en anticiperend op de klimaatverandering, die momenteel al meetbaar is. Keuzes in de ruimtelijke (her)inrichting zijn belangrijk, omdat de locatie van een functie en het landgebruik mede het risico van nat- en droogteschade bepalen. Publieke en private samenwerking zijn nodig om een transitie qua inrichting en beheer vorm te geven en te laten slagen.

Het Adviescollege Stikstofproblematiek kwam in 2019 met aanbevelingen onder de titel 'Niet alles kan overal'. Dat geldt ook voor watergebruik. Zoetwater is schaars en waardevol, zeker in droge tijden. De inhoudelijke kennis en ervaring uit dit rapport kan worden gebruikt om oplossingen te vinden voor 'Water in Balans'.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding, doel en kader

In dit rapport staan de belangrijkste bevindingen van het onderzoek naar de droogte op de zandgronden in het zuiden, midden en oosten van Nederland. Over Fase 2 van het onderzoek is eerder gerapporteerd door Van den Eertwegh et al. (2020). Dit eindrapport van Fase 3 van het project vervangt het rapport van Fase 2, met verwijzing naar het rapport van Fase 1 (Van den Eertwegh et al., 2019) voor de gebruikte (technische) methoden. Bovendien worden in dit rapport gebruikte methoden verantwoord in een aantal bijlagen.

Het onderzoek 'Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland' – hierna: 'de droogtestudie' – is gestart in februari 2019 naar aanleiding van het droge jaar 2018 en later uitgebreid naar 2019, toen bleek dat ook dat jaar bijzonder droog was. Aanvankelijk viel het onderzoek onder de 'Beleidstafel Droogte', daarna is het ingebed in het Deltaprogramma Zoetwater.

Het onderzoek heeft drie doelen:

1. De gevolgen van de droogte van 2018 en 2019 voor de zandgronden van Nederland in beeld brengen;
2. Aangeven welke mogelijkheden er zijn om in de toekomst droogteschade aan landbouw, natuur en het watersysteem te beperken;
3. Methoden en aanbevelingen aandragen waarmee kan worden gemonitord en geduid hoe de droogte zich ontwikkelt en voortplant in het watersysteem.

Het droogteonderzoek hebben we uitgevoerd voor een projectgebied dat ongeveer de helft van Nederland beslaat en met name de hoge zandgronden omvat. Delen van het onderzoek zijn ondersteund met berekeningen op nationale schaal. De kennis en instrumenten die in dit onderzoek zijn ontwikkeld kunnen in beleidsafwegingen in regio's worden gebruikt. Het wegen van maatregelen voor regio's is echter geen onderdeel geweest van het onderzoek. Concrete maatregelen op lokale schaal zullen in andere projecten en studies opgepakt moeten worden.

Het is logisch dat waterbeheerders behoefte hebben aan bruikbare informatie over de hydrologische toestand van hun specifieke beheergebied en aan concrete adviezen over maatregelen om negatieve droogte-effecten te beperken. Aan die behoefte kan onze studie echter maar ten dele voldoen. Bij concrete maatregelen immers, heeft lokale kennis, al dan niet gevat in een hydrologisch model dat op het betreffende gebied is toegesneden, meerwaarde boven onze droogtestudie. Daar staat tegenover dat onze droogtestudie regionale verschillen beter in beeld brengt, onder meer door een uniforme duiding van droogte in verschillende compartimenten van het watersysteem en het gebruik van een uniform hydrologisch model dat het hele studiegebied omvat. Bovendien worden in onze droogtestudie methoden gebruikt, die in detailstudies niet of nauwelijks bekend zijn.

1.2 Droog weer, droogte en verdroging

Droog weer treedt op bij afwezigheid van neerslag.

Droogte komt voort uit een uitzonderlijk droge periode die afwijkt van een normale situatie en die zolang duurt, dat het normale hydrologische evenwicht verstoord raakt. Een slechte landbouw oogst en verlies van natuurwaarden kunnen het gevolg zijn. 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 verdampingsvraag. Als er onvoldoende water voor verdamping beschikbaar is, wordt de werkelijke verdamping lager. Daarna volgen de bodemvochtdroogte en hydrologische droogte: door het verschil tussen neerslag en verdamping, het zogenaamde neerslagtekort, droogt de bodem uit. Dit is de bovenste laag van het aardoppervlak waarin planten wortelen. Vervolgens daalt de stand van het grondwater, en daarmee ten slotte de voeding van sloten, beken en grotere waterlopen. In deze reeks van drie geschakelde compartimenten

(bodemwater, grondwater, oppervlaktewater) duurt het steeds langer voordat de meteorologische droogte zich heeft voortgeplant. En in deze volgorde duurt het ook steeds langer voordat een compartiment is hersteld van een droogte, zeker als het freatisch grondwater diep beneden maaiveld zit. Het herstel van een diep(er) gelegen grondwatersysteem duurt ook langer.

Droogte kan leiden tot schade aan landbouw en natuur. Deze schade hangt af van de toestand waarin het watersysteem zich bevindt: zijn bijvoorbeeld landbouwpercelen aan het begin van het groeiseizoen diep ontwaterd, dan zal een droge zomer tot meer gewasschade leiden dan wanneer de ontwateringsdiepte gering is. De gevolgen van droogte kunnen dus niet los worden gezien van de toestand van het bodem-watersysteem.

Verdroging is een term die is gereserveerd voor de structurele verlaging van de grondwaterstand, het oppervlaktewaterpeil en de toestroom van kwelwater naar *natuur*gebieden. Naar verdroging van de natuur, gemeten vanaf de jaren vijftig, is uitgebreid onderzoek gedaan, waarna er beleid is geformuleerd om dit negatieve verschijnsel te bestrijden (Witte et al., 2020). In het beleid is verdroging als volgt gedefinieerd (V&W, 1994): *“Een natuurgebied wordt als verdroogd aangemerkt als de hoeveelheid beschikbaar grondwater van de juiste kwaliteit onvoldoende is om de natuurwaarden te garanderen. Een gebied wordt ook als verdroogd aangemerkt als ter compensatie van een te lage grondwaterstand of een te geringe kweldruk water van een andere, gebiedsvreemde kwaliteit moet worden aangevoerd.”* Verdroging is dus per definitie gekoppeld aan de functie natuur; het is een structureel probleem dat structurele schade heeft veroorzaakt en veroorzaakt. De schade door droogte in een bepaald jaar komt hier bovenop.

1.3 Werkwijze en indeling rapport

We hebben voor het onderzoek diverse onafhankelijke bronnen van informatie gebruikt, die we op een uniforme manier voor het gehele zandgebied hebben verwerkt en geanalyseerd. De resultaten van ons onderzoek zijn gegroepeerd naar de hiervoor genoemde drie doelen van ons onderzoek: Hoofdstuk 2 gaat in op de gevolgen van de droogte, Hoofdstuk 3 op maatregelen, en Hoofdstuk 4 op het monitoren van droogte. In Hoofdstuk 5 vatten we de belangrijkste conclusies van ons onderzoek samen en in Hoofdstuk 6 geven we enkele overwegingen en aanbevelingen voor het beleid en beheer van de waterhuishouding op de zandgronden van Nederland. In de Bijlagen is een aantal methodische onderdelen opgenomen; voor een compleet beeld hiervan verwijzen wij naar het rapport van Fase 1 (Van den Eertwegh et al., 2019). In Bijlage XI worden de belangrijkste hydrologische begrippen uit dit rapport verklaard.

Vooruitlopend op deze hoofdstukken melden we hier al dat de gevolgen van de droge jaren en de maatregelen om daar wat aan te doen op verschillende manieren zijn onderzocht:

1. Er is een statistische analyse uitgevoerd op peilbuismetingen, zodat in beeld kon worden gebracht hoeveel grondwaterstanden en stijghoogten in 2018 en 2019 afweken van een normaal jaar.
2. Met 1D-modellen (SWAP-modellen) is voor 40 locaties gesimuleerd hoe de grondwaterstand en de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht zich in deze jaren ontwikkelden, en hoe die zich zouden hebben ontwikkeld wanneer maatregelen in waterbeheer waren uitgevoerd.
3. Met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) zijn de jaren 2018 en 2019 vlakdekkend doorgerekend (uitvoer: grondwaterstand, stijghoogte, kwelflux, verdamping, afvoer). Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van de effectiviteit van diverse 'hypothetische' maatregelen op de verschillende aspecten van het watersysteem (grondwaterstanden en stijghoogtes, beekafvoeren, kwel, gewasverdamping), wanneer deze grootschalig zouden worden uitgevoerd. Daarnaast zijn aanpassingen aan het (beheer van het) watersysteem over het gehele zandgebied in het model doorgevoerd.
4. Er is een meetnet van elf locaties met bodemvochtsensoren opgezet, waarmee de actuele hoeveelheid vocht in de wortelzone online kan worden gevolgd.

5. Er is een methode opgezet om de droogtegraad van de begroeiing (gewassen en natuurlijke vegetatie) indirect, via analyse van remote sensing beelden, in kaart te brengen. Dit in samenhang met de berekende werkelijke verdamping (ET) via SATDATA-ET (STOWA) en LHM-resultaten.
6. Er is een algoritme ontwikkeld waarmee via informatie in remote sensing beelden percelen kunnen worden gedetecteerd die daadwerkelijk beregend zijn of die niet beregend zijn.
7. Er is een enquête uitgevoerd onder natuurbeheerders, die door 63 personen werd ingevuld, over waarnemingen aan effecten van droogte op de natuur.
8. Aan de hand van duizenden vegetatieplots uit het Landelijk Meetnet Flora is onderzocht wat de gevolgen voor de vegetatie in natuurgebieden zijn geweest van het droge jaar 2018.
9. Voor 89 locaties is onderzocht wat de samenhang is tussen de 'gemeten' hydrologische droogte en de gevolgen voor de natuurlijke vegetatie.

Naast deze onderwerpen zijn de volgende producten en diensten opgeleverd:

- Actieve ondersteuning van een debietmeetnet van beken op de Veluwe (waterschap Vallei en Veluwe en Bekenstichting; werk in uitvoering).
- Economische analyse van landbouwdroogteschade (Van Asseldonk et al., 2021); onderzoek krijgt een vervolg in 2021 op het vlak van beregening (juni-oktober 2021). Gegevens over beregening in de landbouw die in het Bedrijven InformatieNet (BIN) beschikbaar zijn voor de periode 2010 t/m 2019 (hoeveelheid water, bron van beregeningswater, effect op droge stof opbrengst, ...), worden hierbij geanalyseerd voor diverse (groepen van) landbouwgewassen.
- www.droogteportaal.nl: online data- en informatieportaal met projectresultaten en met actuele gegevens over de hydrologische toestand buiten (incl. meteo KNMI) via metingen met online sensoren, waaronder bodemvocht.
- Deelrapport over de opzet en werking van het meetnet van bodemvochtmetingen.
- Diverse artikelen in vakbladen en Nederlandse pers.

Digitale kaarten en ander materiaal uit dit project zijn beschikbaar via:

www.droogteportaal.nl/achtergrondinformatie.html

2. De droogte van 2018 en 2019

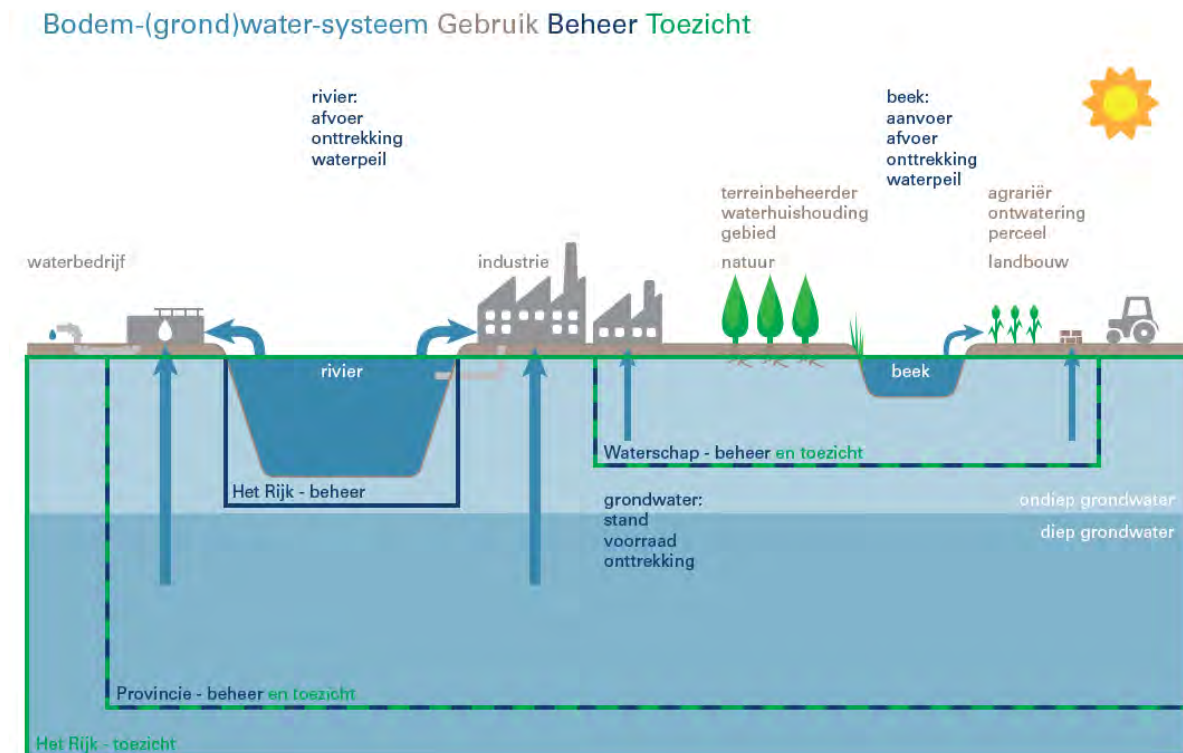
2.1 Hydrologische ontwikkeling en voortplanting van de droogte

2.1.1 Compartimenten in het watersysteem

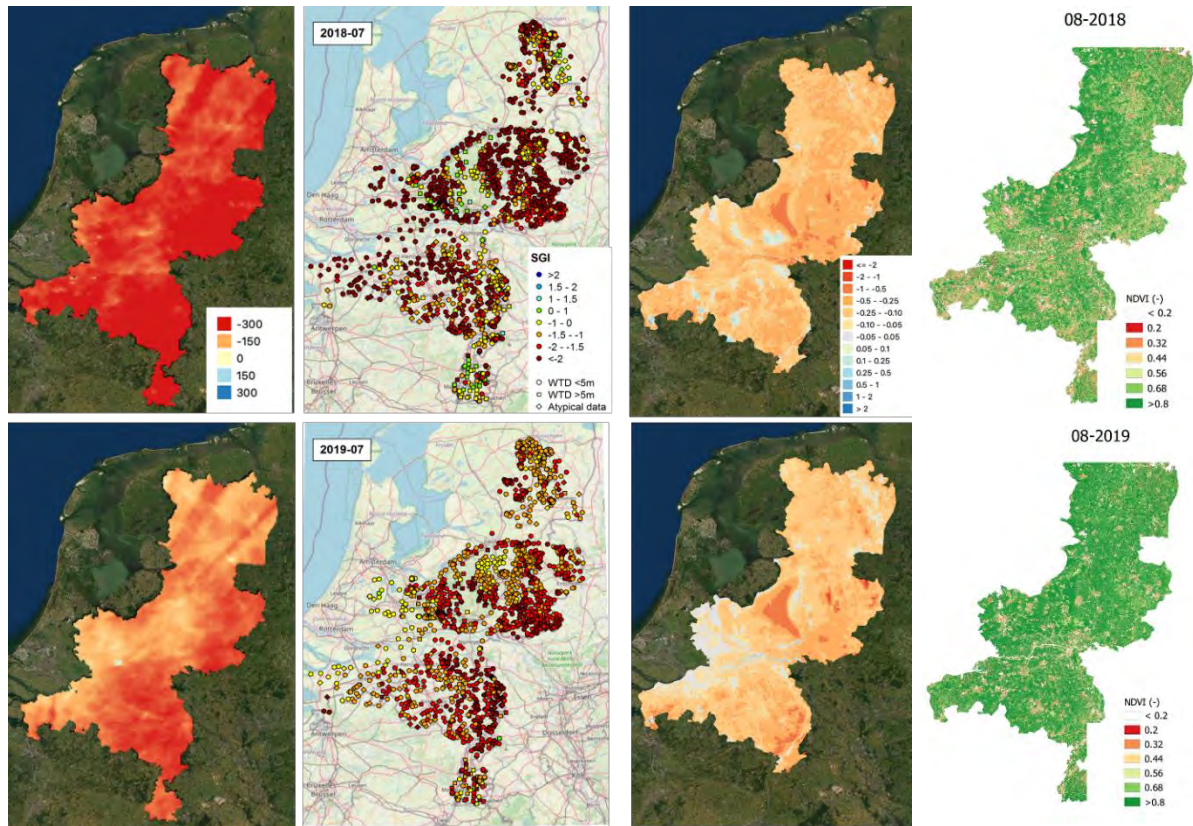
De droogte van 2018 was zichtbaar in alle componenten van het watersysteem (Figuur 1). Het begon met een tekort aan neerslag; dit leidde vervolgens (in combinatie met een hoge verdamping) tot een droogte in bodemvocht, grondwater en beekafvoeren. Zo werkte meteorologische droogte geleidelijk door in verschillende compartimenten van het watersysteem.

Het jaar 2019 liet ruimtelijk een gevarieerder beeld zien. Dit patroon kwam onder andere terug in de grondwaterdroogte; in het westelijke deel van het zandgebied was, zowel volgens puntmetingen als ruimtelijke hydrologische modellen, van grondwaterdroogte nauwelijks sprake. In het oosten van het zandgebied echter, was de grondwaterdroogte in 2019 wederom extreem (Figuur 2).

In dit hoofdstuk gaan we in op de duiding van zulke verschillen, waarbij we de doorwerking van de meteorologische droogte, zoals gegeven in Figuur 2, via bodemvochtdroogte, naar grondwaterdroogte en afvoerdroogte beschrijven. We maken in de analyse onderscheid naar hydrotypen (Figuur 3). Voor achtergrondinformatie over de toegepaste methodes, verwijzen we naar de rapportage van Fase 1. De effecten op natuur en landbouw zijn in aparte paragrafen opgenomen.

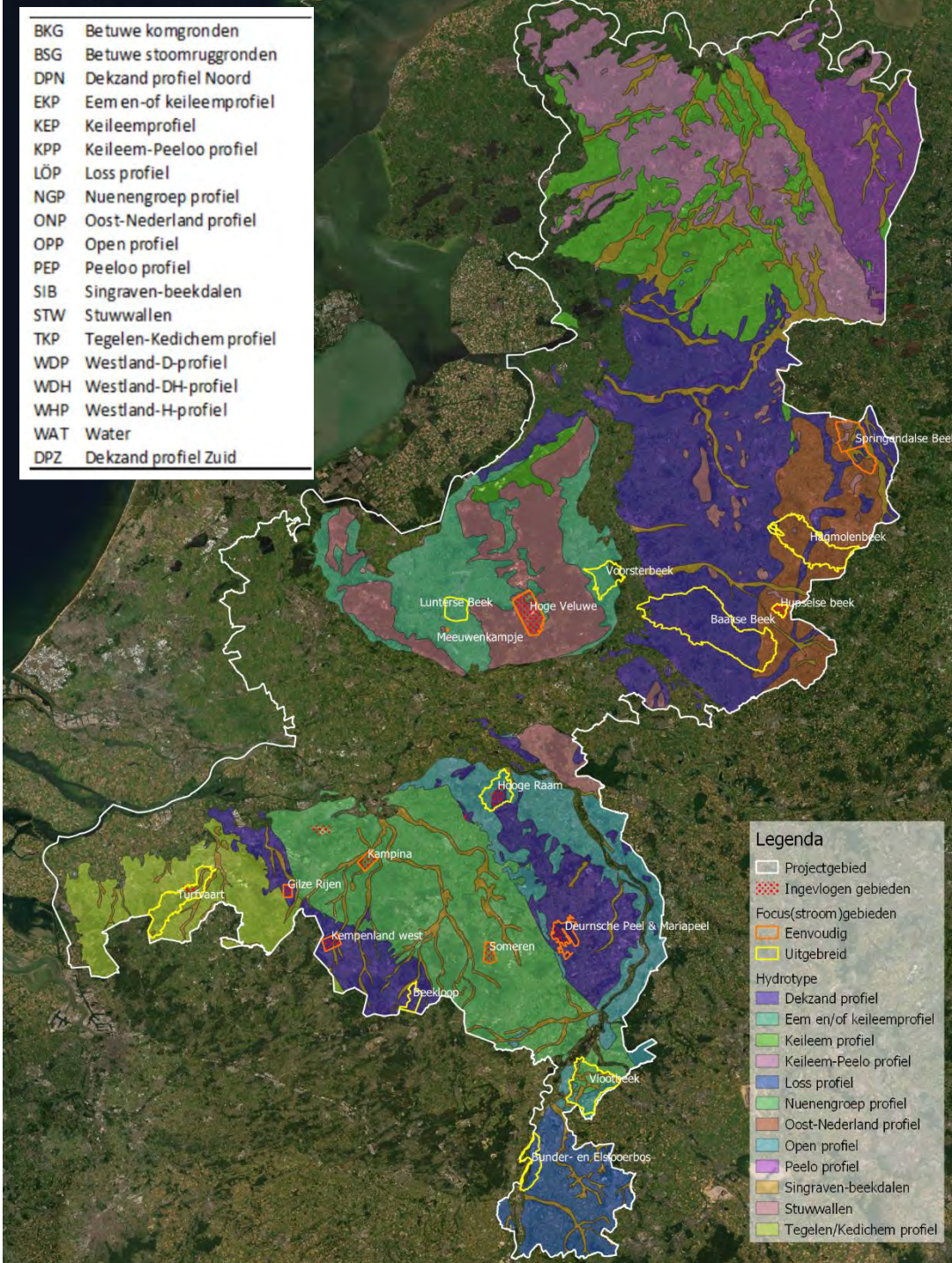


Figuur 1. Samenhang tussen gebruik en beheer van het watersysteem door verschillende actoren.



Figuur 2. Ruimtelijke gegevens voor meteorologische droogte (links, KNMI - neerslag minus referentiegewas-verdamping; schaal van -300 mm tot +300 mm), grondwaterdroogte (midden links, Standardized Groundwater Index (SGI, zie Bijlage I voor toelichting van de berekening), modelberekeningen (midden rechts, LG3-GLG, gemodelleerd; schaal van -2 m tot +2 m) en index voor de 'groenheid' van de vegetatie (rechts, NDVI in maand augustus; composietbeeld, afgeleid uit satellietmetingen). Boven: 2018, onder: 2019.

Projectgebied en focusgebieden fase 2



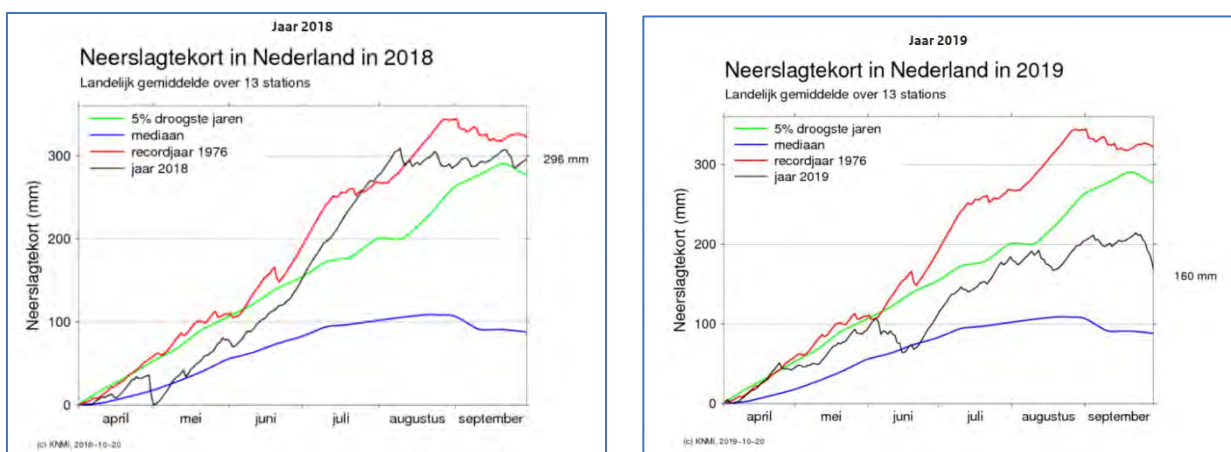
Figuur 3. Indeling van het projectgebied in hydrotypen.

2.1.2 Meteorologische droogte

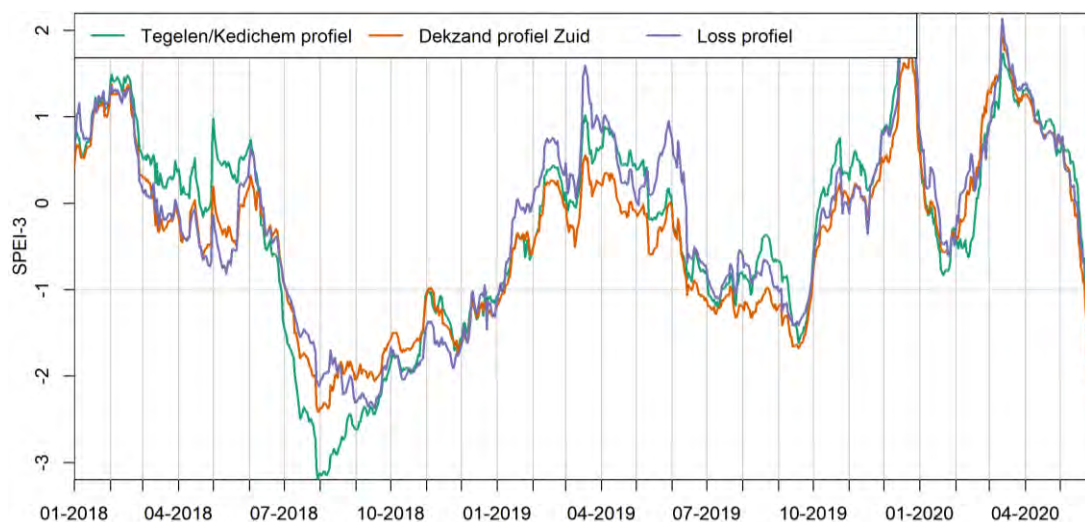
De groeiseizoenen van 2018 en 2019 waren droog tot extreem droog (Figuur 4), waarbij de meteorologische droogte aan het eind van 2018 uniform extreem was voor het hele zandgebied (Figuur 2).

Het verloop van de meteorologische droogte in de tijd is voor een drietal hydrotypen gegeven in Figuur 5, berekend met de Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI), zie Bijlage I voor een toelichting. Hieruit volgt dat 2018 niet droog begon: in april 2018 was er nog sprake van een neerslagoverschot. Voor alle hydrotypen waren de meteorologische condities tot juni 2018 nog normaal tot natter dan normaal. Na juni 2018 nam de meteorologische droogte snel toe, met extreme droogte tot gevolg. Dit is ook zichtbaar in het neerslagtekort (Figuur 4); het neerslagtekort begint gemiddeld en loopt snel op naar extreme waarden in de zomer.

Het jaar 2019 liet ruimtelijk een gevarieerder beeld zien (Figuur 2). De meteorologische droogte was minder extreem dan in 2018, maar het tekort was in het oosten van het zandgebied aanzienlijk groter dan in het westelijke deel.



Figuur 4. Verloop van het neerslagtekort vanaf 1 april in de zomerhalffjaren van 2018 en 2019 (bron: KNMI).



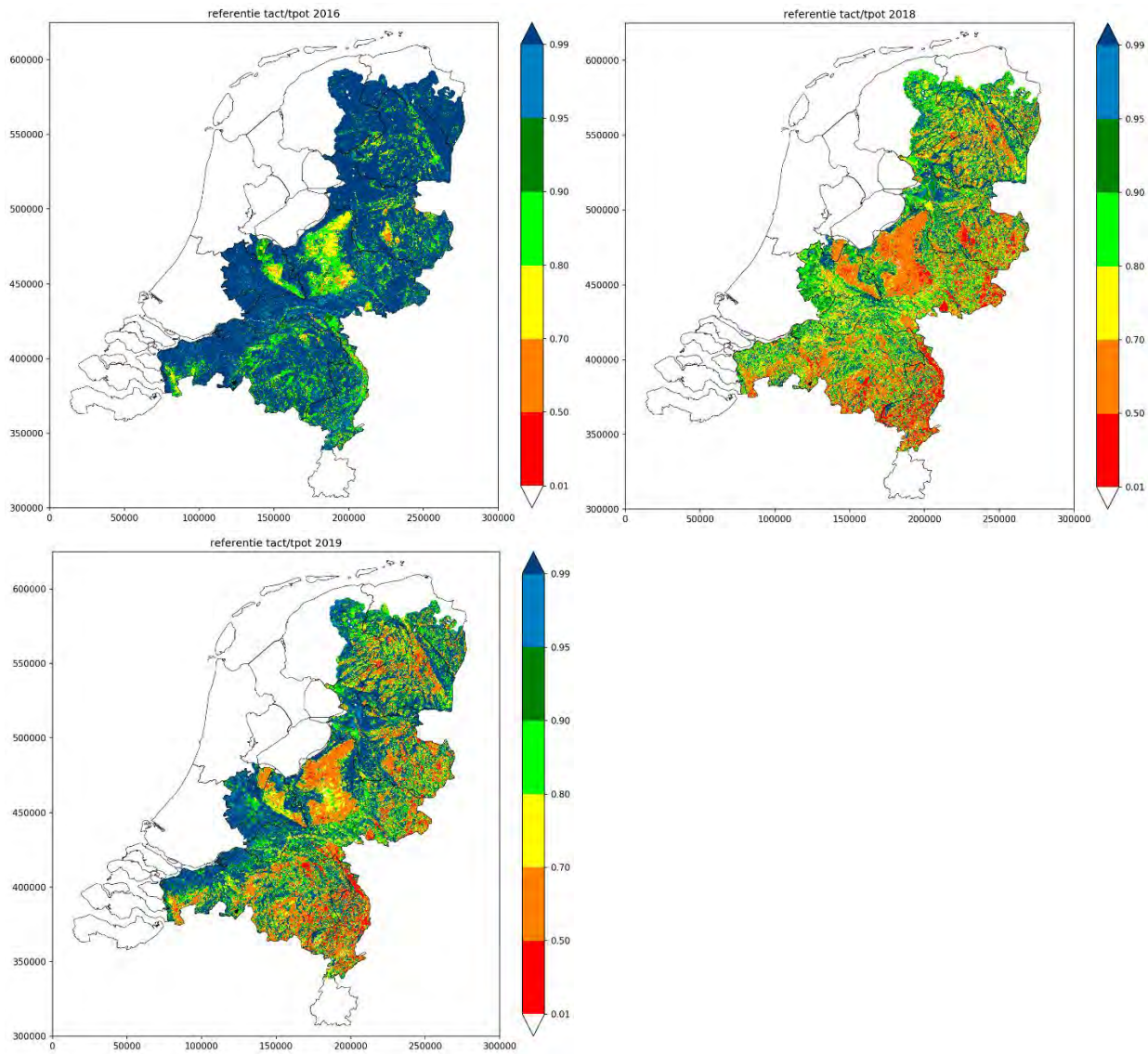
Figuur 5. Verloop van de meteorologische droogte in de tijd, voor een selectie van hydrotypen. Meteorologische droogte is aangeduid als de SPEI-3, waarbij -1 duidt op matige droogte en ≤ -2 op extreme droogte. Positieve waarden duiden op nattere condities dan normaal. SPEI-3 is uitgerekend op basis van KNMI-gegevens van neerslag en referentieverdamping volgens Makkink.

2.1.3 Bodemvochtdroogte en de gevolgen voor verdamping en gewas

De bovenste bodemlaag vormt met zijn wortelzone de schakel tussen meteorologische droogte en hydrologische droogte. De vochtigheid van deze zone wordt beïnvloed door het weer, de bodemgesteldheid, capillaire opstijging, de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld en door de begroeiing zelf, die immers via wortelopname water aan deze zone onttrekt. In het gebied van de hoge zandgronden variëren deze factoren sterk, waardoor er grote ruimtelijke verschillen zijn in de bodemvochtdroogte.

De doorwerking van meteorologische droogte naar bodemvochtdroogte heeft consequenties voor de werkelijke verdamping (ET_a). Meteorologische droogte kent twee componenten: neerslag en verdamping. Meestal wordt met deze verdamping de referentieverdamping (ET_{ref} ; in NL volgens Makkink-methode berekend) en soms de potentiële verdamping (ET_p) bedoeld (zie o.a. NHV, 2015). De verdamping door de huidmondjes van de plant, de transpiratie T , is veruit de grootste component van de verdamping, zeker in de zomer. ET_p en T_p zijn een functie van ET_{ref} (de vraag vanuit de atmosfeer) en het type vegetatie of gewas. Is er te weinig water in de wortelzone, dan is de werkelijke ('actuele') transpiratie van de vegetatie kleiner dan de potentiële transpiratie: $T_a < T_p$. Er is dan sprake van een 'vochttekort' of van 'vochtstress' bij de vegetatie.

Vlakdekkende modelsimulaties met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM; Figuur 6) geven aan dat het vochttekort, uitgedrukt als de relatieve transpiratie (T_a/T_p) zowel in 2018 als 2019 aanzienlijk hoger was dan gemiddeld. In 2019 was het tekort met name hoog in het oostelijk en zuidoostelijk deel van het zandgebied. Opvallend is echter het hoge vochttekort in het noordelijk deel van het zandgebied. Ondanks een minder extreme meteorologische droogte dan in het oostelijke en zuidoostelijke deel, is hier toch nog sprake van een groot vochttekort.



Figuur 6 Vlakdekkende simulaties van de relatieve transpiratie ($Tact/Tpot$) voor een gemiddeld jaar (2016) en de droge jaren 2018 en 2019.

Potentiële en werkelijke verdamping van enkele gebieden

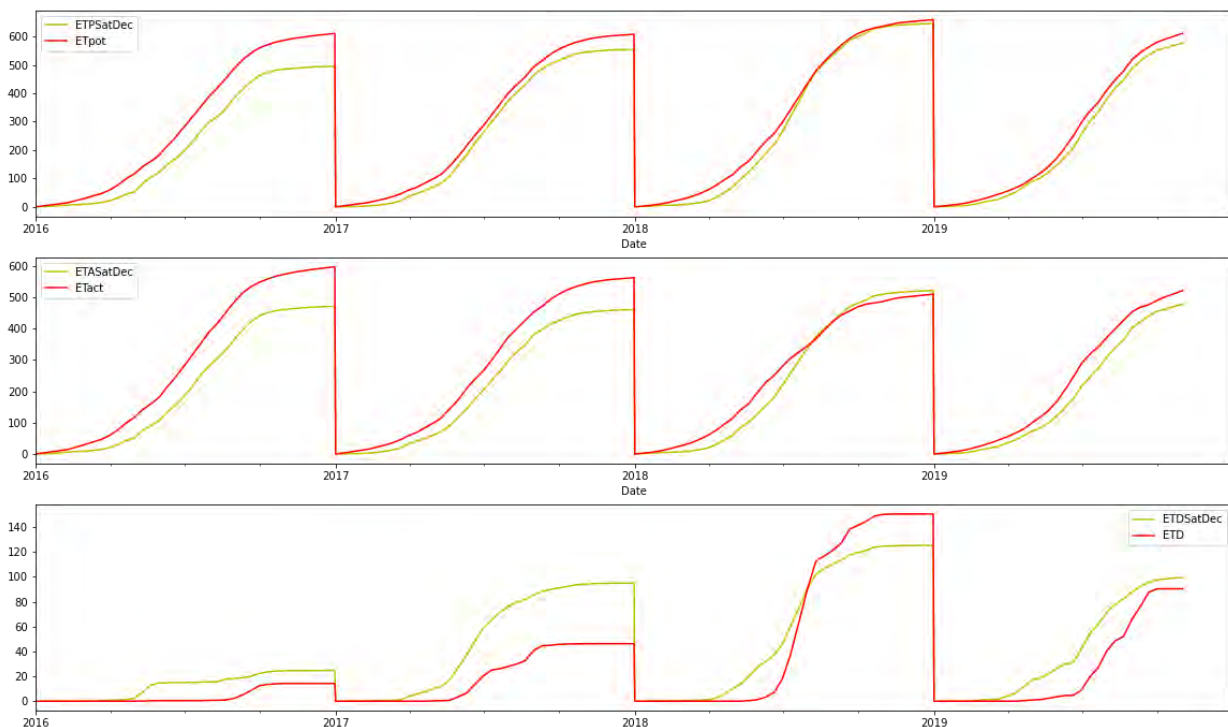
Het gevolg van de vochttekorten is dat de vegetatie mogelijk zichtbare schade ondervindt. Sensoren op satellieten kunnen spectrale banden meten van licht dat door de vegetatie wordt gereflecteerd. Op basis van deze banden hebben we indices als NDVI, LAI en NDMI uitgerekend (Bijlage VIII; zie rapportage Fase 1, Van den Eertwegh et al., 2019; zie voor kaarten www.droogteportaal.nl/achtergrondinformatie.html), die een maat zijn voor de 'gezondheid' en 'vochttoestand' van het vegetatiedek. We bespreken voor een drietal focus-stroomgebieden (Hupselse Beek, Vlootbeek en Beekloop; zie ook Bijlage X) de berekende werkelijke verdamping (SATDATA en LHM) en remote sensing gewasindices voor de jaren 2016 t/m 2019. NB: het LHM rekent niet met een dynamische gewasgroei en -ontwikkeling, zoals bijv. WOFOST. Mocht de gewasontwikkeling 'schade' ondervinden door droogtestress, dan zal de berekende werkelijke gewasverdamping waarschijnlijk lager uitvallen dan hier met het LHM is berekend.

In Figuur 7 is voor de Beekloop te zien dat ET_p op jaarbasis op basis van de LHM-resultaten groter is dan volgens SATDATA (bovenste deel van figuur). Dit verschil varieert van minder dan 10 mm/jaar tot meer dan 100 mm/jaar.

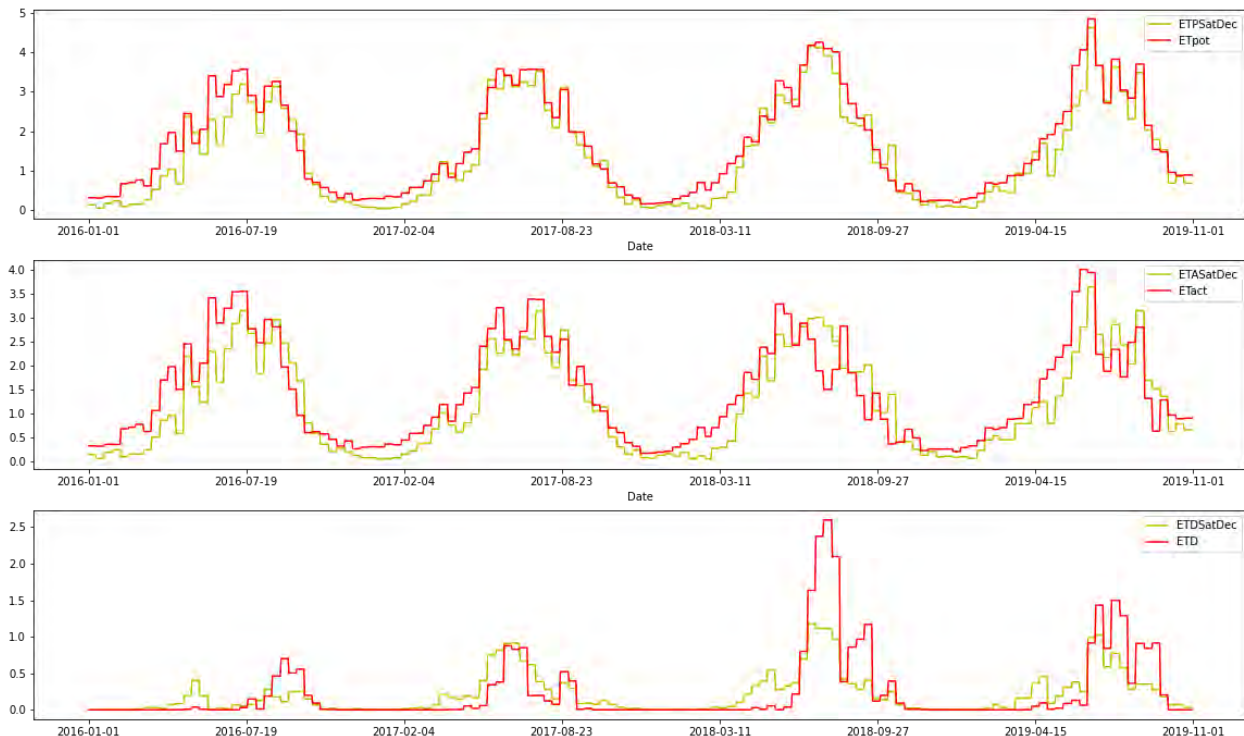
Dergelijke verschillen in ETp zijn ook berekend voor de Hupselse Beek (25 tot 100 mm/jaar) en Vlootbeek (75 tot 150 mm/jaar). De reductie van ETp naar ETa varieert in 2016 tussen 10 en 25 mm/jaar, tot in 2018 tussen 120 en 140 mm/jaar (onderste deel van Figuur 7). In de jaren 2018 en 2019 is ETp hoger dan in 2016 en 2017. Ook de reductie (ETp minus ETa) is groter in de droge jaren 2018 en 2019. Dit heeft een dempend effect op de berekende werkelijke verdamping.

Voor de Beekloop te zien dat ETa op jaarbasis op basis van de LHM-resultaten groter is dan volgens SATDATA (middelste deel van figuur). Dit verschil varieert van jaar tot jaar van <10 mm/jaar tot 100 à 150 mm/jaar. Dit verschil in ETa is qua ordegrrootte ook berekend voor de Vlootbeek (75 tot 100 à 150 mm/jaar). Voor de Hupselse Beek zijn de verschillen in de jaarsommen van ETa voor 2018 en 2019 tussen SATDATA en LHM nagenoeg afwezig. Voor 2016 en 2017 zijn deze verschillen 100 tot 150 mm/jaar.

Als we het verloop in de werkelijke verdamping binnen het jaar gaan bekijken, dan zien we grosso modo twee perioden met verschillen optreden in ETa tussen SATDATA en LHM-berekeningen. We illustreren dit aan de hand van Figuur 8 voor de Vlootbeek. Daar zien we de grootste verschillen in het voorjaar rond de maanden april-mei, waarin ETa van SATDATA lager is en later op gang komt dan bij het LHM. Daarnaast zien we verschillen in de maanden juli-september, waarin de SATDATA hogere waarden voor ETa geeft dan het LHM, en SATDATA zelfs hogere ETa waarden genereert naarmate het droger wordt. Er is wel reductie van ET, maar op een laag niveau en constant. Ook is ETa van SATDATA nagenoeg even hoog in 2018 als in voorgaande jaren, terwijl dat niet voor de hand ligt en ook niet blijkt uit de waargenomen reactie van de vegetatie op de droogte van 2018 (Figuur 9). Het resultaat van SATDATA ETa is onverwacht en niet plausibel, want naarmate het droger wordt verwachten we juist een afname van ETa door een toenemende reductie. Deze verschillen in de maanden april-mei en juni-september treden ook op voor de Beekloop, Hupselse Beek en andere focus-stroomgebieden en lijken daarmee structureel van aard in de periode 2016 t/m 2019. Deze bevindingen verdienen nader onderzoek.



Figuur 7. Berekende cumulatieve potentiële (ETp) en werkelijke verdamping (ETa) per jaar van focus-stroomgebied Beekloop (WDD) in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA in groen (beheerder namens STOWA: R. Crook) en LHM-resultaten in rood. Van boven naar beneden: ETp, ETa en reductie (ETp minus ETa) in [mm/jaar].

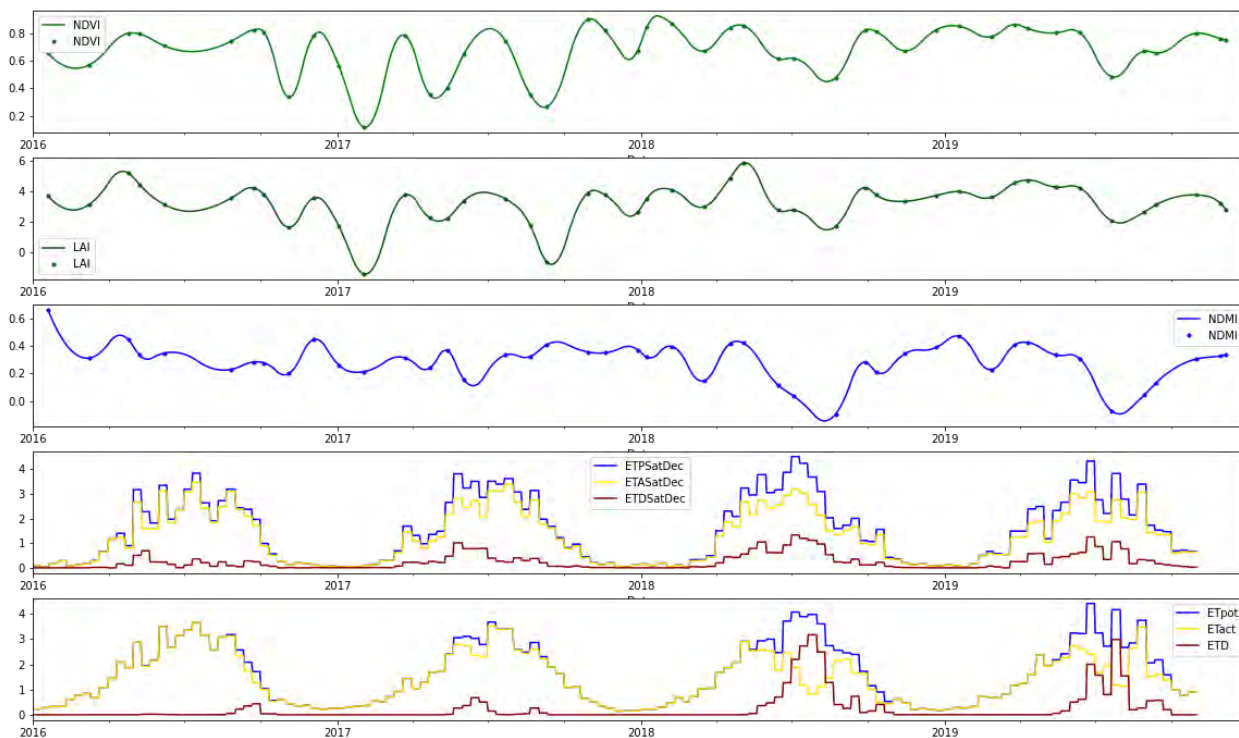


Figuur 8. Berekende potentiële (ETp) en werkelijke verdamping (ETa) per decade van focus-stroomgebied Vlootbeek (WL) in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA in groen (beheerder namens STOWA: R. Crook) en LHM-resultaten in rood. Van boven naar beneden: ETp, ETa en reductie (ETp minus ETa) in [mm/decade].

Gewasindices op basis van remote sensing-informatie

Zoals gezegd komt het verloop en de omvang van de verdampingsreductie en de werkelijke verdamping binnen het jaar naar verwachting terug in berekende gewasindices op basis van spectrale banden van satellietbeelden. Des te meer stress de vegetatie heeft door het watertekort in de wortelzone, des te lagere index-waarden we verwachten. We hebben voor alle focusstroomgebieden voor 2016 t/m 2019 de NDVI-, LAI- en NDMI-indices berekend (NB voor rapport Fase 1 is NDWI gebruikt i.p.v. NDMI; zie Bijlage VIII). Daarbij hebben we ons qua gewas gericht op permanent grasland, zodat we geen last hebben van veranderend landgebruik (wisselteelt/rotatie) en oogst van akkerbouwgewassen.

We illustreren het verloop van de RS-vegetatie-indices aan de hand van Figuur 9 voor de Hupselse Beek. De jaren 2018 en 2019 waren extreem droog tot droog, waarbij het in 2018 over vrijwel heel het land, en in ieder geval het zandgebied ongeveer identiek/gelijk droog was. In deze twee jaren zien we de NDMI-index het meeste variëren en het meest duidelijk dalen in de loop van het groeiseizoen. De NDVI en LAI laten ook een daling zien. Voor de berekende indices voor de Vlootbeek geldt hetzelfde. De NDVI- en LAI-indices voor de Beekloop dalen duidelijk minder dan de NDMI voor de Hupselse Beek en dan de NDVI en LAI voor de Hupselse Beek en de Vlootbeek. Op dit moment is niet duidelijk waarom voor het gebied van de Beekloop afwijkende verlopen in de tijd worden berekend. Voor alle gebieden is wel helder dat de NDMI-index naar verwachting verloopt en een duidelijke variatie in de tijd laat zien. Daarmee is de NDMI een duidelijke indicator voor effecten van droog weer op de vegetatie in een gebied als geheel. We verwachten daarnaast dat de NDMI een snellere respons laat zien op droge condities in de wortelzone dan andere indices, maar kunnen dit niet hard maken omdat we daarvoor te weinig beelden in de tijd beschikbaar hebben.



Figuur 9. Berekende gewasindex NDVI (boven), LAI (tweede van boven), NDMI (derde van boven) en potentiële (ETpot) werkelijke verdamping (ETact) en reductie per decade [mm/decade] van focus-stroomgebied Hupselse Beek (WRIJ) in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA (een na onderste), LHM-resultaten (onderste), berekende composiet-beelden (bovenste drie; dit project).

2.1.4 Doorwerking meteorologische droogte via bodemvocht naar het grondwater

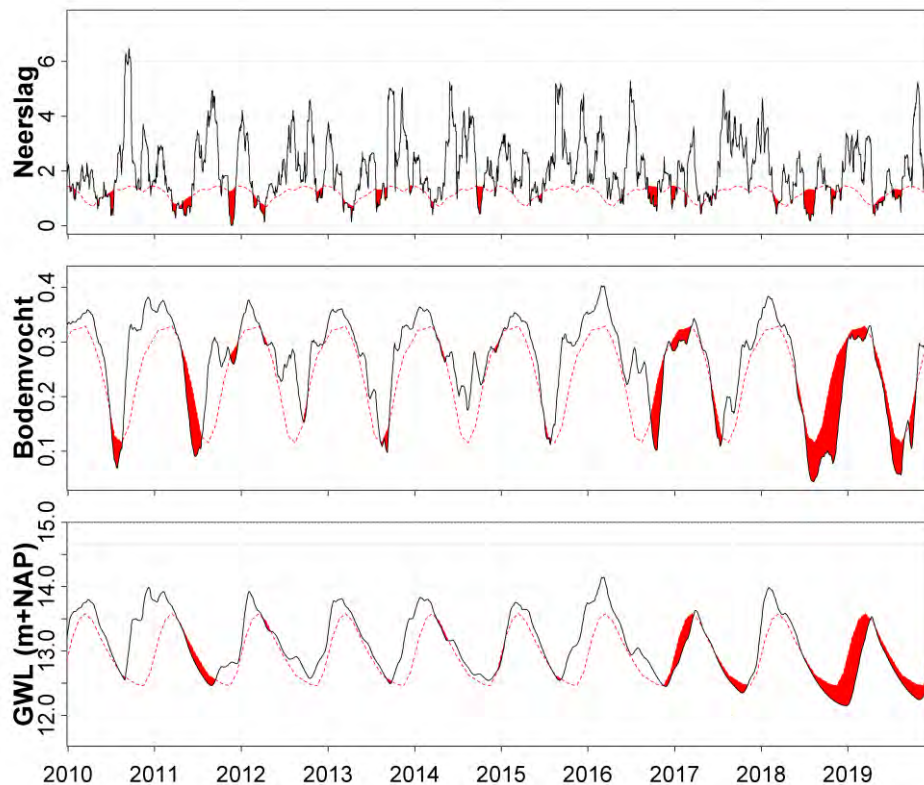
Grondwater reageert veelal niet direct op neerslag. De snelheid van de reactie hangt af van de percolatiesnelheid van het geïnfilterde regenwater door de onverzadigde zone (dikte en bodemfysische eigenschappen zijn van belang), het lokale bodem- en watersysteem en de fysische eigenschappen van de aquifer. Droogte in het grondwater start dus, via droogte in bodemvocht, later dan meteorologische droogte. De vertraagde doorwerking van meteorologische droogte naar grondwaterdroogte is onder andere zichtbaar in tijdreeksen van gemeten grondwaterstanden en met SWAP gesimuleerde bodemvochtgehalten.

Zo is in het focusgebied Baakse Beek voor een representatieve peilbuis zichtbaar dat droogte in bodemvocht en grondwater later start dan het tekort aan neerslag (Figuur 10, Figuur 11). De droogte in neerslag was relatief kort in de zomer 2018 en herstelde in de winter. De bodemvochtdroogte laat het grootste tekort zien in het najaar van 2018, dan een kort herstel in het voorjaar 2019 en nieuwe droogte in de zomer 2019. Het relatief kleine tekort in neerslag in 2019 leidde tot een groot tekort in bodemvocht. Hieruit blijkt dat de uitgangssituatie van de toestand van het watersysteem waarmee een periode van meteorologische droogte wordt ingegaan, van belang is voor de impact die een meteorologische droogte heeft op het hydrologische systeem.

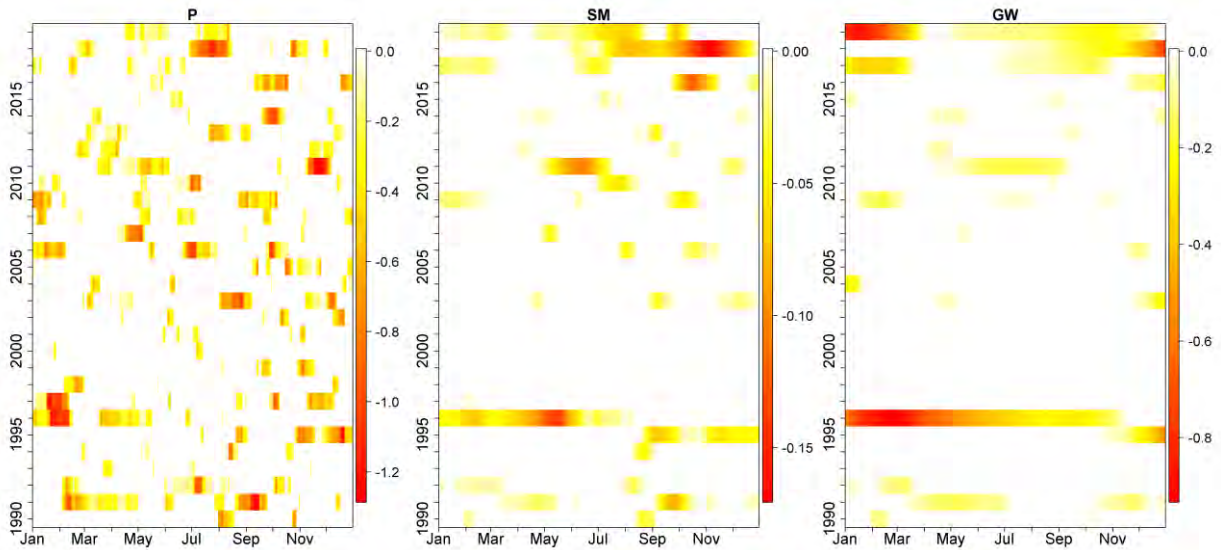
In het focusgebied de Lunterse Beek is bij een representatieve peilbuis een ander verloop van de droogte zichtbaar (Figuur 12). De droogte in de neerslag is vergelijkbaar, maar in dit gebied start de droogte in bodemvocht (en grondwater) eerder in 2018. Ook is zowel in het bodemvocht als het grondwater een herstel zichtbaar in de winter 2018-2019, waarna een nieuwe droogte start in de zomer van 2019. In dit gebied met ondiepere grondwaterstanden is een snelle reactie zichtbaar van het systeem op de meteorologische droogte door de minder dikke onverzadigde zone. Bij ondiepere grondwaterstanden is, afhankelijk van het bodemtype, nog capillaire opstijging van het water mogelijk voor opname door wortels. Hierdoor zal de grondwaterstand sneller dalen dan wanneer geen capillaire opstijging mogelijk is.

In beide gebieden is de droogte van 2018 duidelijk zichtbaar, maar daarnaast zijn ook andere hydrologische droogtegebeurtenissen terug te vinden (Figuur 11, Figuur 12). In beide gebieden was het droog in 1995-96. Daarnaast komt in de Lunterse Beek de droogte van 2003 duidelijk naar voren.

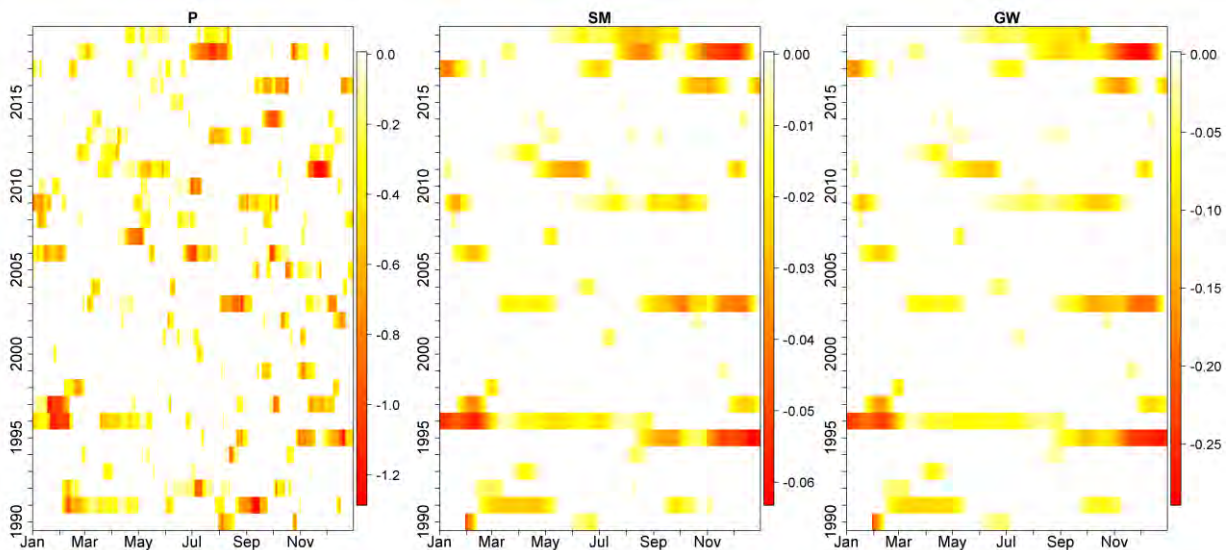
De tijdreeksen voor de Baakse Beek (Figuur 10, Figuur 11) laten zien dat de droogte in het grondwater in dit gebied pas begon in najaar 2018 en dat de grondwaterstand nog niet was hersteld aan het eind van 2019. De relatief diepe grondwaterstand in dit gebied reageert later en herstelt langzamer. De reactie van de grondwaterstand wordt bepaald door de dikte van de onverzadigde zone en andere karakteristieken van het bodem- en watersysteem.



Figuur 10. Droogte in neerslag (mm), bodemvocht (-) en grondwaterstand (m) in het focusgebied Baakse Beek. De zwarte lijn is de actuele waarde gemiddeld over de afgelopen 30 dagen, de rode stippellijn is het 20^e percentiel. Rode vlak betekent droger dan 20^e percentiel aangeeft. Simulaties met een SWAP-model voor 2010 t/m 2019 dat werd geijkt op gemeten grondwaterstanden in peilbuis met code 34CP0053001.



Figuur 11. Droogte in neerslag (P), bodemvocht (SM) en grondwater (GW) in focusgebied Baakse Beek. Schaal loopt van wit (geen tekort) via geel naar rood (maximale tekort in tijdreeks). Simulaties met een SWAP-model voor 1990 t/m 2019 dat werd geijkt op gemeten grondwaterstanden in peilbuis met code 34CP0053001.

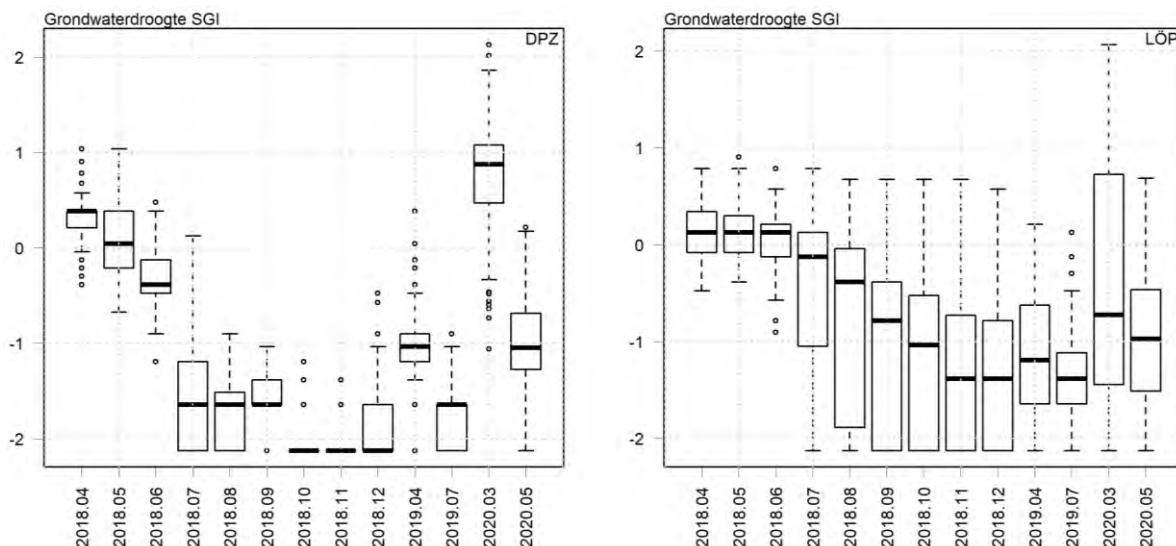


Figuur 12. Droogte in neerslag (P), bodemvocht (SM) en grondwater (GW) in het gebied van de Lunterse Beek. Simulaties met een SWAP-model voor 1990 t/m 2019 dat werd geijkt op gemeten grondwaterstanden in peilbuis met code 32GL0092.

Voor alle hydrotypen, met uitzondering van het Löss profiel (LÖP) en de Stuwwallen (STW), geldt dat vanaf juli 2018 sprake is van een extreme grondwaterdroogte (Bijlage II). Het Löss profiel en de Stuwwallen hebben een veel tragere reactie van de grondwaterstand op de meteorologische droogte; het zijn namelijk systemen met een dikkere onverzadigde zone en een hoge drainageweerstand (met name door grote slootafstand).

Boxplots van de Standardized Groundwater Index (SGI, Bijlage I voor toelichting van de berekening) op basis van gemeten grondwaterstanden laten zien dat de spreiding in waarden voor grondwaterdroogte groot is binnen hydrotypen (Figuur 13 en Bijlage II). Deze spreiding wordt veroorzaakt door verschillen in grondwaterdiepte en karakteristieken van het bodem- en watersysteem binnen een hydrotype. De mediaan waarden van de SGI van alle hydrotypen zijn weergegeven in Tabel 1. Daaruit volgt dat in delen van de hydrotypen er in juli 2018 nog geen sprake is van grondwaterdroogte, terwijl deze op andere plekken al extreem is. Voor hydrotype Dekzand Profiel

Zuid (DPZ) is er vanaf juli 2018 sprake van ernstige tot extreme grondwaterdroogte in nagenoeg alle meetpunten, terwijl die grondwaterdroogte in maart 2020 nagenoeg overall is opgeheven. Voor hydrotype LÖP geldt dat de grondwaterdroogte in een klein deel van de meetpunten in augustus 2018 al extreem was, maar dat de spreiding ook zeer groot is. Er zijn zelfs meetpunten waar nog geen sprake is van grondwaterdroogte. De spreiding in grondwaterdroogte in maart 2020 is groot en varieert van extreem droog tot extreem nat (Figuur 13), al is de mediaan algemeen >0 (Tabel 1). Voor LÖP geldt dat voor landbouw in juli 2018 nauwelijks grondwaterdroogte optreedt, terwijl de grondwaterafhankelijke natuur al te kampen heeft met extreme grondwaterdroogte, welke aanhoudt tot in 2019. Dit heeft te maken met verschillen in de dikte van de onverzadigde zone en de karakteristieken van het bodem- en watersysteem binnen dit hydrotype. Bij grondwaterafhankelijke natuur is sprake van relatief ondiepe grondwaterstanden, waardoor de grondwaterstand sneller reageert op de meteorologische droogte. De hydrotypen EKP en KEP met keileem vertonen een enigszins afwijkend beeld in het herstel van grondwaterdroogte in september 2018. Met name de Westland-hydrotypen vertonen al een herstel van de grondwaterdroogte in september 2018, terwijl voor de andere hydrotypen de extreme grondwaterdroogte nog voortduurt. Dit herstel is vooral waarneembaar in de peilbuizen bij grondwaterafhankelijke natuur. Voor deze hydrotypen volgt uit het LHM dat ook de zomerkwel in 2018 nog hoger was dan het langjarig gemiddelde (zie § 2.3).



Figuur 13. Voorbeelden van de ontwikkeling van grondwaterdroogte in de tijd voor de hydrotypen DPZ en LÖP. SGI is grondwaterdroogte (y-as), waarvoor voor de peilbuizen in elk hydrotype een boxplot is opgesteld. De donkere verticale lijn geeft de mediaan, de boven- en onderkant van de box geven respectievelijk het 25^{ste} en 75^{ste} percentiel. De stippellijnen geven het 10^{de} en 90^{ste} percentiel. De punten zijn uitschieters. De grootte van de boxen geeft inzicht in de spreiding van de SGI binnen een hydrotype.

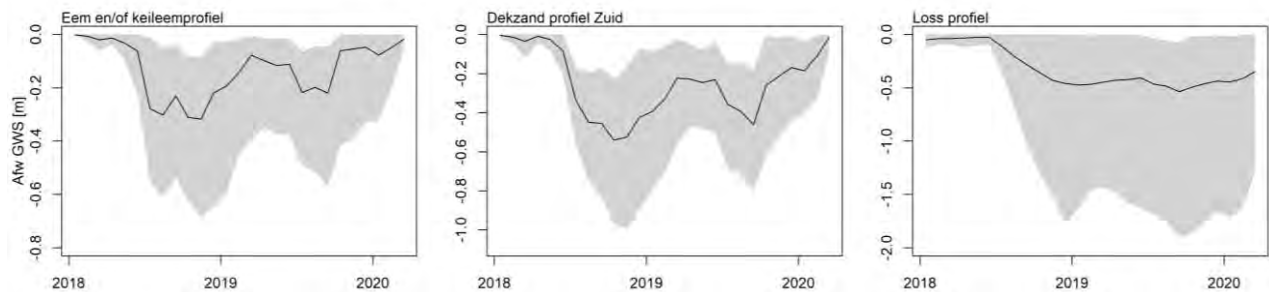
Naast de SGI-waarde als maat voor de grondwaterdroogte is ook de absolute afwijking van de grondwaterstand ten opzichte van de mediaan (periode 1990-2019) per maand bepaald. Dit geeft een beeld over wat een extreme droogte in grondwaterstand betekent qua absolute daling in de grondwaterstand, ofwel: hoeveel cm is de grondwaterstand gedaald ten opzichte van normaal. Deze absolute afwijking is gemiddeld voor alle meetpunten binnen een bepaald hydrotype (Figuur 14 en bijlage II). Hieruit volgt dat voor enkele hydrotypen deze absolute afwijking in maart 2019 nagenoeg nul is of de grondwaterstand hoger is dan de mediaan: Betuwe stroomruggronden, de Westlandprofielen, Betuwe komgronden, Keileem profiel, Peelo profiel, Keileem Peeloprofiel. Binnen deze hydrotypen is dus in maart 2019 geen sprake meer van grondwaterdroogte. Voor andere hydrotypen is de absolute afwijking weliswaar kleiner in maart 2019 dan eind 2018, maar bedraagt de afwijking nog tientallen centimeters: Open profiel, Dekzand profiel zuid. Er is dus sprake van enig herstel van de grondwaterdroogte, maar niet volledig.

Tabel 1. Mediaan van de SGI voor verschillende maanden (kolommen) en voor elk hydrotype, gebaseerd op de geanalyseerde peilbuizen waarop tijdreeksanalyse is uitgevoerd. Tevens is onderscheid gemaakt in alle locaties (totaal) en locaties in het LHM aangeduid als landbouw en grondwaterafhankelijke natuur. Hoe roder de cel, hoe lager (droger) de SGI.

hydrotype	totaal										landbouw										gw_natuur																			
	2018.4	2018.5	2018.6	2018.7	2018.8	2018.9	2018.10	2018.11	2018.12	2019.4	2019.7	2020.3	2020.5	2018.4	2018.5	2018.6	2018.7	2018.8	2018.9	2018.10	2018.11	2018.12	2019.4	2019.7	2020.3	2020.5	2018.4	2018.5	2018.6	2018.7	2018.8	2018.9	2018.10	2018.11	2018.12	2019.4	2019.7	2020.3	2020.5	
1 BKG	0.10	-0.21	-0.57	-2.11	-1.64	-1.18	-2.12	-2.11	-1.19	-0.67	-1.18	0.96	-1.49	0.13	-0.30	-0.90	-2.11	-2.11	-1.36	-2.11	-2.11	-1.19	-0.57	-1.64	0.95	-1.52	0.21	-0.21	-1.34	-2.11	-2.11	-1.19	-2.11	-2.11	-1.04	-1.04	-1.64	0.67	-1.75	
2 BSG	0.21	-0.13	-0.21	2.11	-1.64	-1.18	2.11	-2.11	-1.64	-1.04	1.64	0.92	-1.43	0.21	-0.13	0.21	2.11	-1.54	-1.36	2.11	2.11	-1.36	-0.90	-1.36	0.92	-1.43	0.17	-0.43	-0.67	-2.11	-2.11	-1.36	2.11	2.11	-1.04	-1.04	-1.64	0.53	-2.04	
3 DPN	0.21	-0.13	-0.67	4.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-0.76	-1.64	2.11	-1.31	0.21	-0.36	-0.67	2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.76	-1.64	0.71	-1.34	0.21	-0.13	-0.43	-1.19	-0.13	-2.11	-2.11	-1.64	-0.67	-1.36	0.92	-1.34		
5 EKP	0.21	-0.94	-0.17	-2.11	-1.64	-1.19	-2.11	-2.11	-1.16	-0.57	-1.64	1.07	-1.49	0.21	-0.21	-0.67	-2.11	-2.11	-1.36	-2.11	-2.11	-1.19	-0.57	-1.36	1.07	-1.56	0.21	-0.59	-0.64	-2.11	-1.64	-1.04	-2.11	-2.11	-1.19	-0.67	-1.64	0.91	-2.01	
6 KEP	0.29	0.11	0.04	-1.18	-1.64	-1.64	-2.11	-2.11	-2.11	-0.40	-1.18	2.11	-0.88	0.29	0.41	0.04	-1.64	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.30	-1.16	0.92	-1.12	0.21	0.04	-0.13	-1.64	-2.11	-1.64	-2.11	-2.11	-0.67	-1.64	0.94	-0.95			
7 KPP	0.29	0.48	0.13	-1.36	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-0.29	-1.18	0.96	-0.94	0.39	0.21	0.13	-1.64	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-0.21	-1.36	0.83	-1.13	0.43	0.63	-0.17	-1.51	-1.64	-1.19	-2.11	-2.11	-1.64	-0.67	-1.36	1.01	-1.22	
8 LÖP	0.18	0.18	0.18	0.18	-0.38	-0.76	-1.04	-1.36	-1.36	-1.19	-1.18	0.72	0.97	0.08	0.08	0.08	-0.04	-0.37	-0.73	-1.04	-1.19	-1.20	-1.36	-1.42	0.85	0.78	0.09	0.21	-0.78	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.19	-0.67	-1.36	1.01	-1.17		
9 NGP	0.21	-0.04	-0.48	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.19	-1.64	0.98	-1.17	0.31	0.09	-0.51	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.90	-1.64	1.07	-1.17	0.21	-0.48	-1.04	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.19	-1.64	0.92	-1.42		
10 ONP	0.11	-0.57	-1.04	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.04	-1.64	0.45	-1.59	0.13	-0.48	-1.04	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.90	-1.64	0.12	-1.24	0.18	-0.48	-1.04	-1.64	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.19	-1.64	0.51	-1.42			
11 OPP	0.29	0.13	-0.10	-1.18	-1.64	-1.18	-2.11	-2.11	-2.11	-1.19	-1.18	0.47	-1.10	0.30	0.17	-0.13	-1.51	-1.54	-1.64	-2.11	-1.64	-1.04	-2.11	0.75	-1.02	0.23	-0.08	-0.48	-1.64	-1.64	-1.36	-2.11	-2.11	-1.36	-2.11	0.31	-1.11			
12 PEP	0.00	0.39	0.00	3.11	0.41	1.64	2.11	2.11	-1.04	0.41	1.19	0.09	1.71	0.04	0.21	0.13	2.11	2.11	1.64	2.11	2.11	1.04	0.04	-1.16	1.01	0.76														
13 SIB	0.21	-0.04	-0.21	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.48	-1.18	0.89	-1.41	0.21	0.04	-0.21	-1.64	2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-0.77	-1.36	0.92	-1.39	0.21	-0.21	-0.50	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.36	-0.48	-1.36	0.75	-1.40		
14 STW	0.33	0.13	0.04	-0.57	-1.04	-1.04	-1.64	-1.64	-1.64	-1.19	-1.64	0.06	-1.16	0.30	-0.08	0.25	-1.51	-1.16	-1.51	-2.11	-1.64	-0.84	-1.36	0.78	-1.37	0.27	0.07	0.49	-1.00	-1.21	-0.97	-1.76	-1.51	-1.51	-1.21	-1.20	0.91	0.83		
15 TKP	0.29	0.39	-0.29	-1.11	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.88	-0.84	-1.11	1.36	-1.53	0.40	0.08	-0.41	-0.71	-2.11	-2.11	-2.11	-2.11	-1.64	-1.04	-1.01	1.41	-1.54	1.11	0.58	-0.90	-2.11	-1.64	-1.06	-2.11	-2.11	-1.36	-0.33	-1.29	1.03	-0.80	
17 WDP	0.21	-0.11	-0.30	1.11	2.11	-1.36	2.11	2.11	-1.19	-0.38	0.14	1.36	-1.42	0.30	-0.17	-1.11	-2.11	-1.54	-1.64	-2.11	-2.11	-1.11	-0.25	-0.94	1.41	-1.46	0.09	-1.03	-0.75	-2.11	-1.51	-1.46	-2.11	-2.11	-0.90	-0.56	-1.51	1.12	-1.68	
19 WDH	0.18	-0.13	-0.76	-2.11	-1.64	-1.64	-2.11	-2.11	-1.04	-0.69	-0.80	1.62	-1.76	0.48	-0.04	-0.60	-2.11	-1.54	-1.05	-2.11	-2.11	-0.97	-0.43	-0.90	1.77	-1.57	0.09	-1.03	-0.75	-2.11	-1.51	-1.46	-2.11	-2.11	-1.64	-1.64	-1.64	2.11	0.75	-1.33
21 WHP	0.29	0.48	1.36	3.11	1.42	2.11	2.11	1.26	-0.21	0.44	0.79	1.60	2.07																											
24 DPZ	0.33	0.04	-0.36	1.64	-1.64	1.64	2.11	2.11	-1.04	-1.64	0.86	-1.05	0.39	0.04	-0.39	-1.64	2.11	-1.64	-2.11	-2.11	-1.64	-0.90	-1.64	1.02	-1.09															

Voor de Stuwwallen en het Löss profiel geldt dat de droogte van 2018 begin 2019 nog doorwerkt; van enig herstel van grondwaterdroogte is geen sprake. Figuur 14 maakt dit verder inzichtelijk. Deze curves laten zien dat in het Löss profiel grondwaterdroogte langzaam intreedt, maar ook lang najlt. In mei 2020 is het systeem nog niet hersteld. Echter, de verschillen binnen het hydrotype zijn groot: de afwijking in de grondwaterstand ten opzichte van het langjarig gemiddelde loopt op tot zo'n 2 meter. Dit komt overeen met de spreiding in grondwaterdroogte die eerder genoemd is. Verschillen in grondwaterdiepte en karakteristieken van het systeem binnen een hydrotype zorgen voor deze spreiding. Voor het dekzandprofiel zijn de maximale afwijkingen kleiner. Gemiddeld loopt de afwijking van de grondwaterstand voor dit profiel op tot zo'n 60 cm in 2018, is er enig herstel in de winter van 2019, maar neemt de afwijking weer toe in 2019. Begin 2020 zijn de grondwaterstanden binnen dit hele hydrotype hersteld. Figuur 14 toont eveneens dat de grootste afwijkingen van de grondwaterstanden ten opzichte van het langjarig gemiddelde in 2018 aan het eind van het jaar worden bereikt. In 2019 liggen de grootste afwijkingen al eerder in het jaar. De patronen die hier volgen uit peilbuisgegevens komen overeen met analyses met het LHM: de afwijking van de LG3 (zie Begrippenlijst) met GLG (zie Begrippenlijst) is in 2018 groter dan in 2019, met uitzondering van het Löss profiel en de Stuwwallen (zie figuur in de viewer op www.droogteportaal.nl: LHM, LG3-GLG).

In maart 2020 is de grondwaterdroogte voor de meeste hydrotypen verdwenen. Echter, binnen de stuwwallen, het Löss profiel en Westland D profiel, is de spreiding groot: er zijn zowel meetpunten waarvoor de grondwaterdroogte nog extreem is, terwijl op andere punten de situatie juist natter is dan normaal. De variatie van de dikte van de onverzadigde zone en de drainageweerstad is dan ook groot in deze hydrotypen. Echter, ook voor de hydrotypen Betuwe Stroomruggronden en Westland D profiel is de spreiding nog groot, ondanks dat hier geen sprake is van een dikke onverzadigde zone.



Figuur 14. Afwijking van de grondwaterstand per maand in de periode 2018 – 2020 ten opzichte van de mediaan van de grondwaterstand voor die maand in de periode 1990-2019, gebaseerd op simulaties met tijdreeksmodellen, voor een drietal hydrotypen. De zwarte lijn geeft het gemiddelde verschil van de afwijkingen voor alle peilbuizen in een hydrotype en de bandbreedte geeft de 10^{de} en 90^{ste} percentielen.

In 2019 is de duur van de grondwaterdroogte door de regionale verschillen in meteorologische droogte veel langer voor het oostelijk deel van het zandgebied dan voor het westelijke deel. Ook is de (duur van de) grondwaterdroogte langer dan dat louter op basis van de meteorologische droogte verwacht mag worden. Niet alleen de doorwerking van droogte in het systeem, maar ook in de tijd is belangrijk. Het droge jaar 2018 ijlt na in 2019 en de historie heeft een grote invloed op de toestand van het bodem-watersysteem in 2019: de grondwaterdroogte in deze periode was minder extreem in Twente en de Achterhoek dan in 2018, maar in heel Limburg extremer in 2019 dan in 2018. Dit komt overeen met de modelresultaten van het LHM: de laagste grondwaterstanden zijn voor Midden-Limburg lager in 2019 dan in 2018, ondanks dat de meteorologische droogte in 2019 kleiner was. Voor de situatie in maart 2020, na een periode met veel neerslag, geldt dat de freatische grondwaterstand in gebieden met relatief diepe grondwaterstanden, lager zijn dan het langjarig gemiddelde voor deze datum. Dit geldt ook voor de diepe stijghoogten in met name Noord-Brabant, ten westen van de Peelrandbreuk. Ook de SGI voor maart 2020 laat voor de meetlocaties met relatief diepe grondwaterstanden nog een grondwaterdroogte zien.

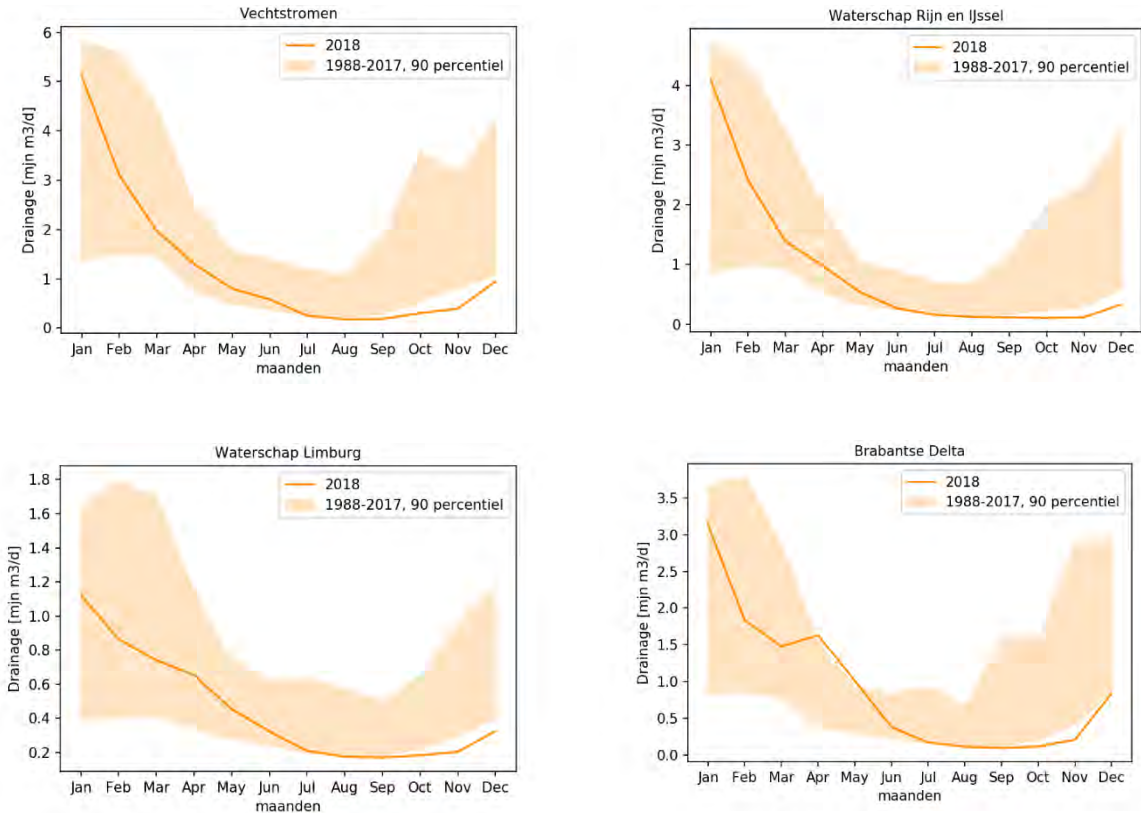
De maximale waarde van de grondwaterdroogte was voor 2019 voor nagenoeg het hele zandgebied lager dan in 2018, ook in het oostelijke deel van het gebied, waar het neerslagtekort in 2019 groot was. Echter, de duur van de grondwaterdroogte is, met name in Limburg, in 2019 langer dan in 2018.

2.1.5 Gevolgen van de droogte voor de afvoer van oppervlaktewater

Meteorologische droogte werkt door via bodemvochtdroogte in grondwaterdroogte en vervolgens op droogte in beekafvoeren. Uit onze analyse van de SGI-3 (Figuur 2) van grondwatersmetingen op de peilbuislocaties (puntwaarnemingen) blijkt dat de grondwaterdroogte in 2018 extremer was dan in 2019, met uitzondering van enkele traag reagerende systemen. Er treden verschillen op tussen 2018 en in 2019, door aan de ene kant verschillen in meteorologische condities en droogte in het zandgebied in beide jaren (Figuur 2-links). Aan de andere kant ijlen de effecten van de droogte in 2018 na in het jaar 2019, met name in de stijghoogte in dieper gelegen watervoerende pakketten. Een directe vertaling van de SGI-3 analyse naar een vergelijking met de berekende gebiedseigen afvoer met het LHM (vlakdekkend) is daardoor niet meteen mogelijk. LHM-berekeningen laten zien dat voor de waterschappen Brabantse Delta en Vallei en Veluwe de gebiedseigen zomerafvoer in 2019 hoger is dan in 2018 (kleinere meteorologische droogte in 2019); voor andere beheergebieden is de berekende afvoer lager in 2019. Dat kan betekenen dat voor die laatste gebieden het na-ijleffect van 2018 in combinatie met een vergelijkbare meteorologische droogte in 2019 voor lagere afvoeren zorgt in 2019 (zie ook § 2.3.2).

De zogenaamde Local Surface Water-eenheden (LSW; op basis van oppervlaktewater-structuur) van het LHM zijn gebieden waarbinnen oppervlaktewater samenkomt op één locatie, waar het water vervolgens wordt afgevoerd (modelmatig 'doorgegeven') naar een benedenstroomse LSW. Dit afgevoerde water bestaat uit gebiedseigen drainagewater en eventueel aangevoerd water van een bovenstroomse LSW, dat niet volledig is gebruikt of

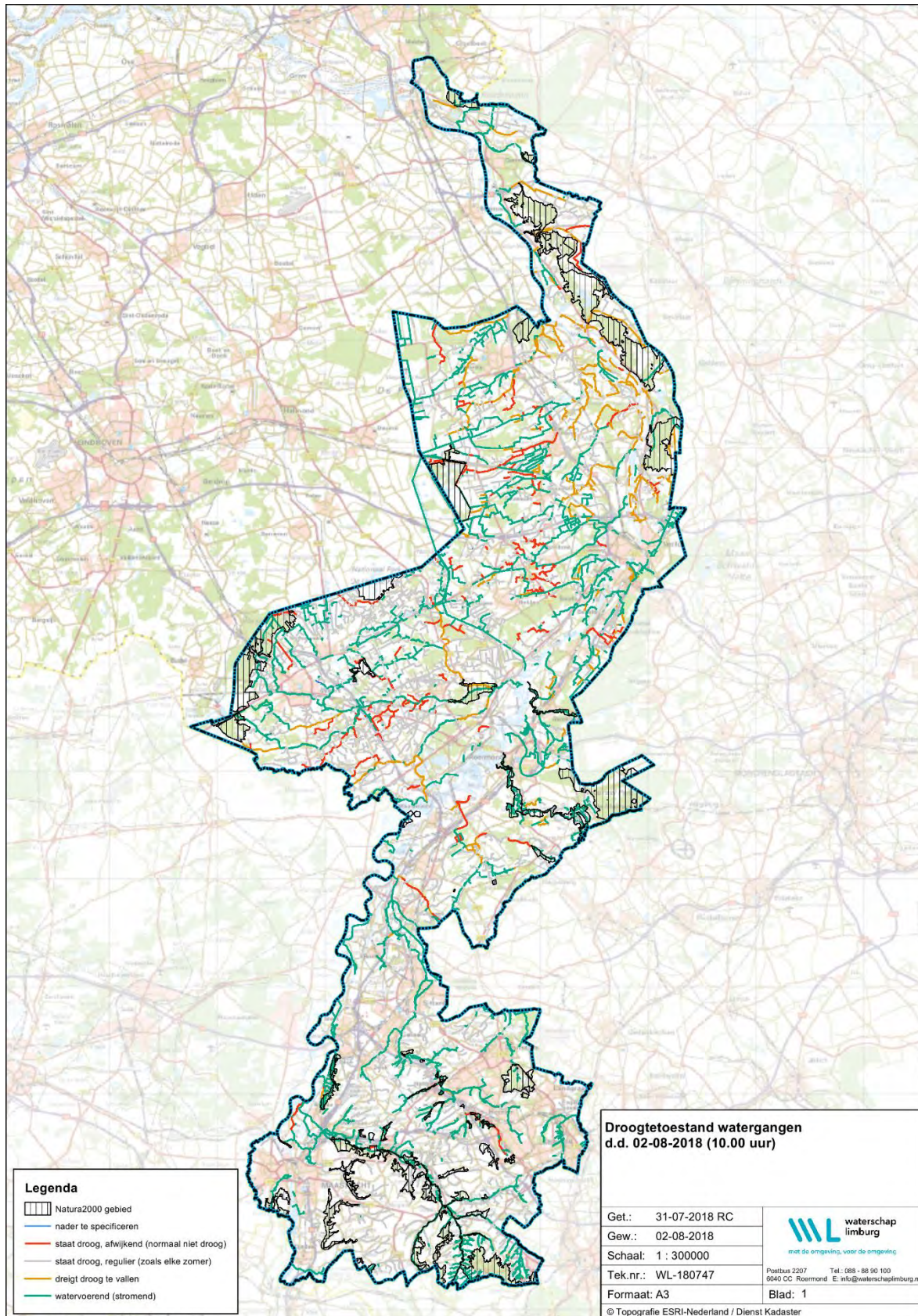
geïnfiltreerd in het onderhavige LSW. De LSW's zijn per waterschap samengevoegd om zo per waterschap te kunnen laten zien wat het totaal aan gebiedseigen afvoer is van het gehele beheergebied, dus exclusief het eventuele aanvoerwater van bovenstrooms. In Figuur 15 is de gebiedseigen afvoer van drainagewater voor vier waterschappen weergegeven voor 2018 (lijn), in relatie tot het 90% percentiel hiervan voor de periode 1988 t/m 2017 (bandbreedte-vlak).



Figuur 15. Met LHM berekende gebiedseigen afvoer voor vier waterschappen weergegeven voor 2018 (lijn), in relatie tot het 90% percentiel hiervan voor de periode 1988 t/m 2017 (bandbreedte). Vechtstromen linksboven, Rijn en IJssel rechtsboven, Limburg links beneden en Brabantse Delta rechts beneden. X-as tijd in maand, Y-as drainage-afvoer in Mm³/decade.

Figuur 15 laat zien is dat er volgens de berekeningen in 2018 voor de beheergebieden als geheel (gemiddeld) geen droogval opgetreden is. Lokaal is dat wel het geval geweest. Waar de afvoer van drainagewater vanuit het beheergebied van WBD Waterschap Brabantse Delta in april 2018 nog een verhoging te zien geeft, waarschijnlijk door regenval in West-Brabant, laten de overige drie beheergebieden vanaf het begin van 2018 een dalende lijn zien in de afvoer van drainagewater. De laagste waarden worden bereikt in september-oktober 2018. De berekende afvoer in 2018 onderschrijft de 90% percentiel bandbreedte vanaf de maand juli 2018, in ieder geval tot eind 2018.

Figuur 16 laat zien hoe het gesteld was met de watervoerendheid van (legger)watergangen binnen het beheergebied van waterschap Limburg op 2 augustus 2018. Met name de watergangen met de rode en oranje kleuren geven aan welke watergangen niet-regulier, maar door de meer extreme droogte in 2018, droogvielen dan wel dreigden droog te vallen.

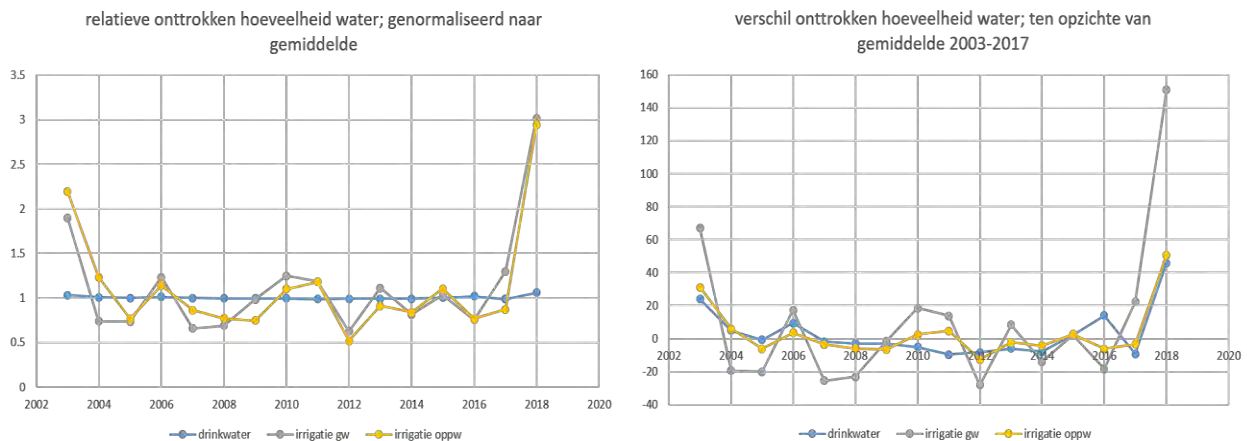


Figuur 16. Watervoerendheid watergangen waterschap Limburg en ligging van Natura-2000 gebieden op 2-8-2018, 10 uur.

2.1.6 Gevolgen van de droogte voor de onttrekking van grond- en oppervlaktewater

Cijfers voor heel Nederland

Voor heel Nederland heeft het CBS becijferd dat de irrigatie voor de landbouw, zowel vanuit oppervlaktewater als vanuit grondwater, in 2018 bijna een factor drie (ruim 260 procent) hoger was dan het gemiddelde van de jaren 2003 t/m 2017 (Figuur 17). Van der Meer (2020) komt uit op een factor ruim vier hoger: volgens deze analyse onttrok de gehele land- en tuinbouwsector in Nederland in 2018 264 Mm³, waarvan 198 Mm³ uit grondwater en 66 Mm³ uit oppervlaktewater. Berekeningen met het LHM laten een 2,6 keer hogere beregeningsgift voor 2018 zien dan gemiddeld en voor 2019 was dit 2 keer zo hoog, vergeleken met het gemiddelde (periode 1988-2017). Tabel 2 geeft een overzicht van verschillende landelijke schattingen.



Figuur 17. Relatieve onttrokken hoeveelheid water in Nederland voor drinkwater en irrigatie uit grondwater en oppervlaktewater ten opzichte van het gemiddelde van de periode 2003-2017 (links) en het absolute verschil in de onttrokken hoeveelheid water (in miljoen m³) (rechts). Bron: CBS (2020).

Tabel 2. Hoeveelheid onttrokken water in Nederland voor berekening van land- en tuinbouw (in miljoen m³/jaar) volgens verschillende schattingen: CBS (Statline), Van der Meer (2020), Van Asseldonk et al. (2021) en Van den Eertwegh et al. (2019) voor LHM berekeningen.

Jaar	2017	2017	2018	2018	2019	2019	gemiddeld		Opmerking
Bron van water	OW	GW	OW	GW	OW	GW	OW	GW	
Informatie									
CBS	23	97	77	225	55	199			
WEcR (2020)	12	68	66	198					gehele sector
WEcR (2021)				181					alleen gras, snijmais, akkerbouw
Registraties waterschappen				146					niet compleet
LHM-berekeningen			120	358	81	289	44	135	projectgebied

De toename van de jaarlijkse onttrekking voor drinkwater was in 2018 in Nederland ruim 5 procent hoger (NB: dus op jaarbasis) dan gemiddeld voor de jaren 2003 t/m 2017, maar deze toename is concreet gerealiseerd voor de droge maanden in 2018. Uitgaande van een periode van twee maanden dat er meer werd onttrokken, was de toename dus tijdelijk ongeveer 30%. De totale onttrekking voor drinkwater was in 2018 hoger dan voor irrigatie in de landbouw, maar de onttrekking voor de landbouw was geconcentreerd in de zomermaanden. Echter, de absolute toename in 2018 ten opzichte van het langjarig gemiddelde is voor drinkwater zo'n 45 miljoen m³, maar voor de landbouw 200 miljoen m³. Er was met name sprake van een toename in gebruik van de hoeveelheid grondwater, mede dankzij uitgevaardigde verboden op onttrekkingen uit oppervlaktewater in 2018. Door het gebruik van (meer) grondwater daalden de grondwaterstanden en werd het evenwicht tussen watervraag en

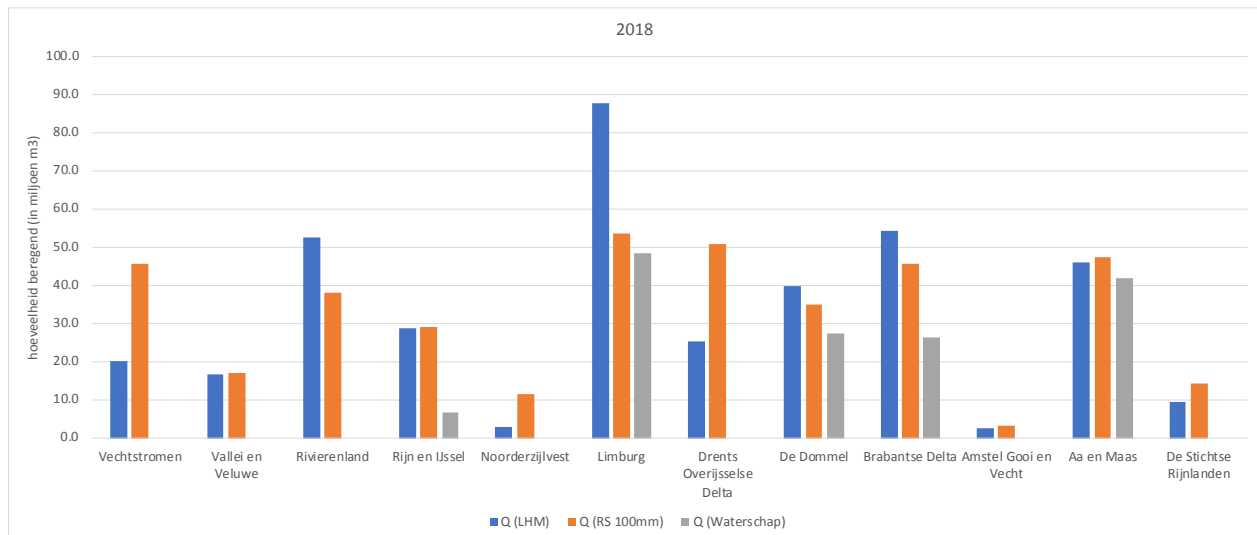
wateraanbod (watervoorraad) verstoord, waarbij het aandeel van de berekening in de landbouw in de totale grondwateronttrekkingen in juni t/m augustus 2018 groter was dan die voor de drinkwaterwinning.

Berekening op de hogere zandgronden

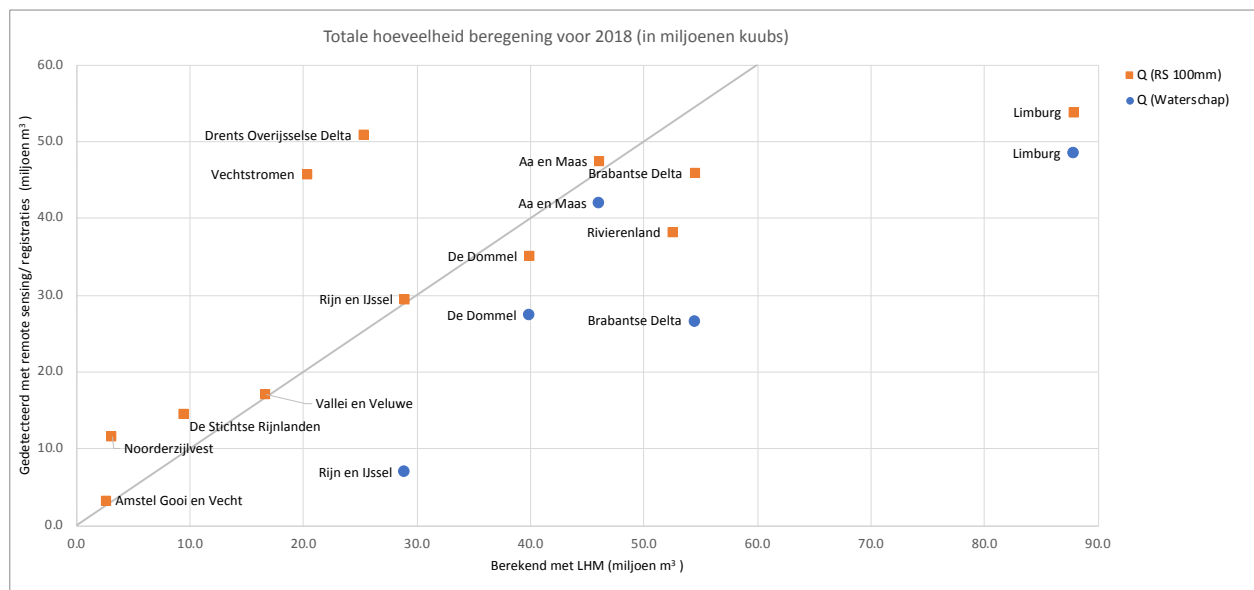
In de rapportage van Fase 1 van dit project (Van den Eertwegh et al., 2019) is een eerste overzicht gegeven van de onttrokken hoeveelheden oppervlaktewater en grondwater voor berekening op de zandgronden. Voor een groot deel van het studiegebied (met name midden en noord) ontbreken echter gegevens over onttrekkingen uit het grondwater. De registraties zijn onvolledig en niet up to date. Daarom hebben we een nieuwe, onafhankelijke bron van informatie toegepast, te weten remote sensing-informatie over spectrale banden van het (on)zichtbare licht. Uit satellietwaarnemingen is afgeleid welke percelen in 2018 werden berekend, en daaruit is weer een beregeningshoeveelheid geschat. De door ons ontwikkelde methode behandelen we in § 4.2.

In Figuur 18 staan per waterschap de hoeveelheden berekening volgens drie methoden (1) LHM-berekeningen, (2) Remote-Sensing (RS) en (3) Registraties van waterschappen zover bekend. LHM maakt onderscheid in berekening uit oppervlaktewater en uit grondwater en RS doet dat logischerwijs niet en de registraties van het waterschap betreffen alleen de onttrekkingen uit het grondwater, opgegeven door de landbouwers zelf. Deze hoeveelheden bepaald met het LHM en RS / registraties zijn tevens in een scatter-diagram tegen elkaar uitgezet (Figuur 19).

Over het algemeen is er een redelijke goede en positieve correlatie tussen de hoeveelheden bepaald met het LHM en RS, de afwijkingen met de 1:1-lijn zijn niet groot. Voor Limburg berekent het LHM echter een veel hogere hoeveelheid berekening dan op basis van RS en de registraties (dit geldt ook voor het regionale IBRAHYM model, 68 miljoen m³); voor Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen berekent LHM juist minder berekening. Deze afwijkingen zijn deels toe te schrijven aan de informatie over potentieel beregende percelen waarmee het LHM rekent; die informatie is gebaseerd op landbouwmetingen uit 2010, en dus gedateerd (Massop et al., 2013).



Figuur 18. De hoeveelheid berekening (uit grondwater en oppervlaktewater samen) in Mm³ volgens (1) LHM-berekeningen, (2) remote sensing (RS) en (3) Registraties van waterschappen, zover bekend.



Figuur 19. Scatter-diagram voor de hoeveelheid beregning voor 2018 (in miljoen m³) bepaald met het LHM vs. bepaald via RS en registraties van het betreffende waterschap.

2.2 De gevolgen van de droogte voor de landbouw

De droogte in 2018 en 2019 had voor de landbouw een aantal gevolgen. Vochttekorten leidden tot een verminderde transpiratie van de gewassen en daarmee tot een verminderde gewasproductie. Beregning uit grond- en/of oppervlaktewater kon deze droogteschade ten dele verminderen (Van den Eertwegh et al., 2020). Een ander effect betrof de prijzen op de markt (NL, EU, wereld) van het geogoste product of van de melk.

Rekening houdend met de kosten voor beregning hebben Van Asseldonk et al. (2021) een analyse gedaan naar de effecten van droogte op gewasopbrengst (uitgedrukt als droge-stofopbrengst per ha: kg d.s./ha) en het jaarinkomen (€/jaar) van boeren. Daarvoor hebben de onderzoekers een steekproef gedaan van 200 akkerbouwbedrijven en 300 melkveehouderijbedrijven. Ze onderscheiden landbouwregio's en gewassen. Voor niet alle regio's en gewassen waren voldoende data in het Bedrijveninformatienet (BIN) Land- en Tuinbouw beschikbaar voor analyse.

Hun bevindingen over de periode 2001 t/m 2019, met als droogtejaren 2003, 2006, 2018 en 2019, worden als volgt samengevat. De effecten van het droge weer op de gewasopbrengst is berekend door de opbrengst in de droogtejaren te vergelijken met vier jaren voorafgaand of vier omliggende jaren. Gemiddeld voor de droogtejaren zijn de procentuele afwijkingen in gewasopbrengst voor de akkerbouw en melkveehouderij in de zandgebieden weergegeven in Tabel 3. Voor vrijwel alle gewassen in het zandgebied van Nederland is er sprake van minder gewasopbrengst ten gevolge van droog weer. Effecten van eventuele beregning zitten in deze cijfers besloten.

Een verminderde gewasopbrengst kan gevolgen hebben voor het jaarinkomen op bedrijfsniveau. Als echter de marktprijzen van het geogoste of geproduceerde product hoger zijn in een droog jaar, dan kan het jaarinkomen toch hoger uitvallen. Een dempende inkomensfactor die bij eventuele toepassing van beregning op kan treden is die van extra variabele kosten van beregning. De extra variabele kosten van beregning zijn in 2018 en 2019 voor een akkerbouwbedrijf € 2.705,=/jaar en voor een melkveehouderijbedrijf € 3.191,=/jaar. Van Asseldonk et al. (2021) nemen waar dat met name in melkveehouderij in het zuidelijk zandgebied de activiteit van beregning toegenomen is in de periode 2001 t/m 2019, zowel qua aantal bedrijven als qua areaal per bedrijf. Zoals gezegd zitten effecten van beregning in de gegevens besloten en leiden de kosten en baten van beregning, samen met marktprijzen en andere zaken, tot een jaarinkomen.

Tabel 3. Effecten van droog weer op de gewasopbrengst (als droge stof – d.s.) voor droogtejaren 2003, 2006, 2018 en 2019, in vergelijking tot opbrengst in vier voorafgaande of vier omliggende jaren. Bron: Tabel 2 en Tabel 5 in Van Asseldonk et al. (2021).

Sector	Regio	Gewas	Meer- (+) of minder- (-) d.s. opbrengst (%)
Akkerbouw	Veenkoloniën en Noordelijk zand	Pootaardappel	-6
		Zetmeelaardappel	-13
		Suikerbiet	-9
		Gerst	+4
		Tarwe	+1
Melkveehouderij	Noordelijk zand	Snijmais	-8
		Gras	-8
	Oostelijk zand	Snijmais	-18
		Gras	-14
	Centraal zand	Snijmais	-17
		Gras	-13
	Zuidelijk zand	Snijmais	-6
		Gras	-8

De effecten van het droge weer op het jaarinkomen is berekend door de jaarinkomens in de droogtejaren te vergelijken met die van vier jaren voorafgaand of vier omliggende jaren. Gemiddeld voor de droogtejaren zijn de procentuele afwijkingen in het jaarinkomen voor de akkerbouw en melkveehouderij in de zandgebieden weergegeven in Tabel 4. In de meeste regio's binnen het zandgebied van Nederland is het jaarinkomen in droge jaren hoger dan gemiddeld en was de droogte van 2018 dus gunstig voor het inkomen. Maar dat geldt vooral niet voor de akkerbouwbedrijven in de veenkoloniën en het noordelijk zandgebied, waar het jaarinkomen in droge jaren lager ligt.

Specifiek in 2018 hadden melkveehouderijbedrijven in met name het oostelijk zandgebied een 8% lager jaarinkomen. Voor de akkerbouwgewassen geldt gemiddeld dat de productprijs in droogtejaren voor suikerbieten 10% lager is, voor andere gewassen gelden in droogtejaren hogere prijzen, bijv. zaaiuien + 106%, consumptieaardappelen +45% en pootaardappelen +22%.

Tabel 4. Effect van droog weer op de jaarinkomens voor droogtejaren 2003, 2006, 2018 en 2019: procentueel verschil (+ betekent hoger, - betekent lager) met jaarinkomen in vier voorafgaande of vier omliggende jaren. Bron: Tabel 1 en Tabel 4 in Van Asseldonk et al. (2021).

Sector	Regio	Hoger (+) of lager (-) jaarinkomen (%)
Akkerbouw	Veenkoloniën en Noordelijk zand	-34
	Oostelijk, Centraal en Zuidelijk zand	+13
Melkveehouderij	Noordelijk zand	+6
	Oostelijk zand	-5
	Centraal zand	+3
	Zuidelijk zand	+13

2.3 De gevolgen van de droogte voor de natuur

2.3.1 Kwantificeren van effecten

Natuurorganisaties hebben tijdens de droge zomers de noodklok geluid over de achteruitgang van de natuur. Die droogteschade zou niet alleen het gevolg zijn van enkele toevallige droge jaren, maar ook van de systematische verdroging van Nederland door vooral ontwatering en het oppompen van grondwater voor de drinkwatervoorziening, de industrie en de landbouw. In de schrijvende en filmende pers verschenen met grote regelmatig verontrustende berichten. Maar hoe groot was de schade nu werkelijk? Antwoord op die vraag is wenselijk om inzicht te krijgen in de ernst van het probleem, om vervolgens het natuurbelang evenwichtig te kunnen laten meewegen in beleid.

Kwantificeren van natuureffecten is echter om twee redenen niet eenvoudig. Ten eerste omdat de toestand van de natuur in Nederland slecht wordt gemonitord. Dit betekent bijvoorbeeld dat het ontbreekt aan voldoende steekproeven in de vegetatie waar de samenstelling aan plantensoorten regelmatig over een lange reeks van jaren wordt genoteerd, dus aan 'Permanente Kwadraten' (PQ's), waarbij tevens de belangrijkste verklarende standplaatsfactoren worden gemonitord, zoals de grondwaterstand en de bodemzuurgraad. Ten tweede kan de natuur na-ijlen op gebeurtenissen, met als gevolg dat eventuele effecten pas na jaren zichtbaar worden en dan bovendien verward kunnen worden met in de tussentijd optredende andere milieuveranderingen, zoals vermesting en verzuring.

Gegeven deze beperkingen heeft het projectteam toch geprobeerd de schade die nu al zichtbaar was, zo goed mogelijk in beeld te brengen. De nadruk lag daarbij op de terrestrische vegetatie en het jaar 2018. Daartoe zijn vier deelstudies verricht. Op grond van deze studies zijn aanbevelingen gedaan voor het adequaat monitoren van droogteschade aan de natuur (Hoofdstuk 4). Hier beschrijven we de resultaten van de deelstudies.

2.3.2 Met het LHM gesimuleerde hydrologische droogte in natuurgebieden

Om te onderzoeken hoe de waterhuishouding in verschillende delen van het projectgebied en in verschillende soorten natuur in de twee droge jaren heeft afgeweken van de normale situatie, zijn tabellen gemaakt waarin de met het LHM gesimuleerde hydrologische grootheden zijn weergegeven per combinatie van natuurtype en hydrotype. De resultaten van deze analyse zijn opgenomen in Bijlage II. Zoals aangegeven in § 2.1 was de meteorologische droogte in 2019 minder intensief dan in 2018, behalve in het oosten van het land, waar de droogte weer heel hard toesloeg. Maar gemiddeld zakte de grondwaterstand in 2019 minder ver weg en liep het vochttekort minder sterk op (zie Bijlage II). Desondanks was 2019 was nog steeds een heel droog jaar.

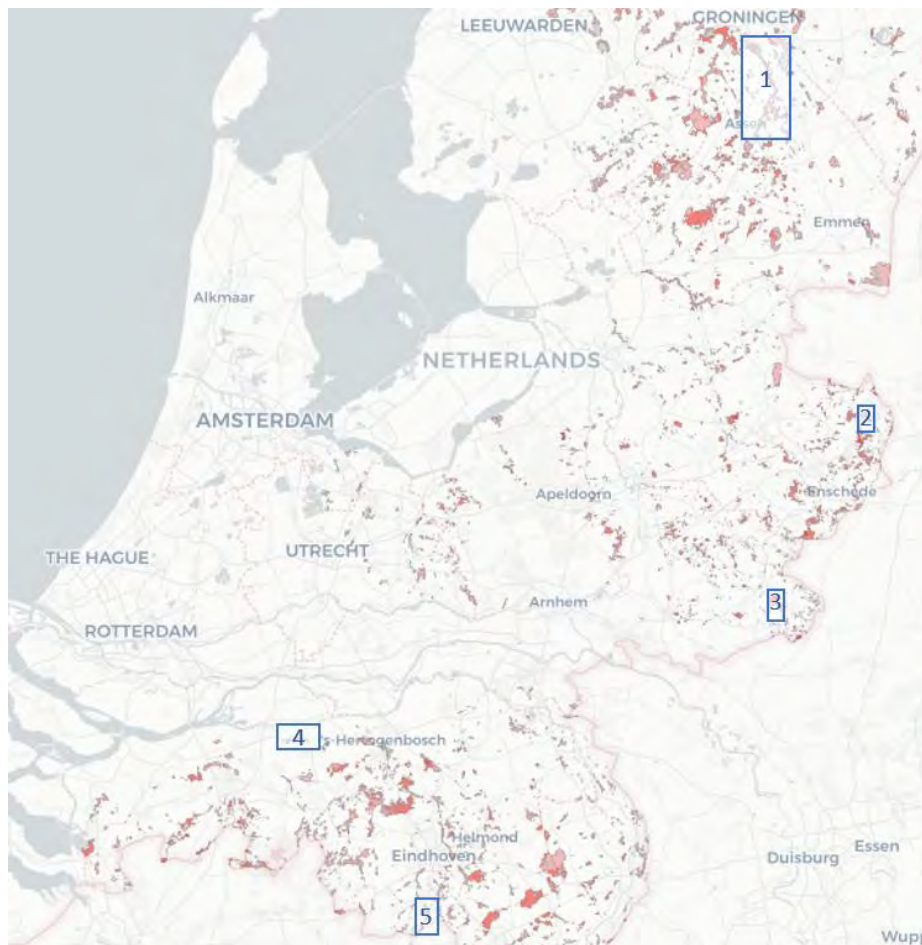
Voor natuurtypen die afhankelijk zijn van de aanvoer van basenrijk kwelwater, is de anomalie van beide jaren in de zomerkwel berekend. In 2018 was de kwelintensiteit doorgaans hoger dan gemiddeld, maar in 2019 juist lager (Tabel 5). Blijkbaar was de stijghoogte onder het freatische pakket pas in 2019 zover uitgezakt, dat dit tot uitdrukking kwam in een lagere kwelintensiteit naar de geselecteerde natuurtypen: diepere stijghoogten ijlen langer na dan freatische grondwaterstanden.

Het uitzakken van de grondwaterstand in de zomer van 2018 en 2019 hebben we berekend als LG₃-GLG in [m] en vervolgens weergegeven voor grondwaterafhankelijke natuurgebieden (de definitie van grondwaterafhankelijke natuurgebieden is gegeven in Bijlage III). Om precies te zijn: van iedere polygoon met een natuurbeheertype volgens de nationale beheertypkaart, is de *gemiddelde* uitzakking LG₃-GLG berekend en deze is grafisch weergegeven in een legenda die past bij de gevoeligheid van natte natuurgebieden voor een daling van de grondwaterstand. De kaarten hiervan zijn te vinden op het droogteportaal. In Figuur 21 t/m

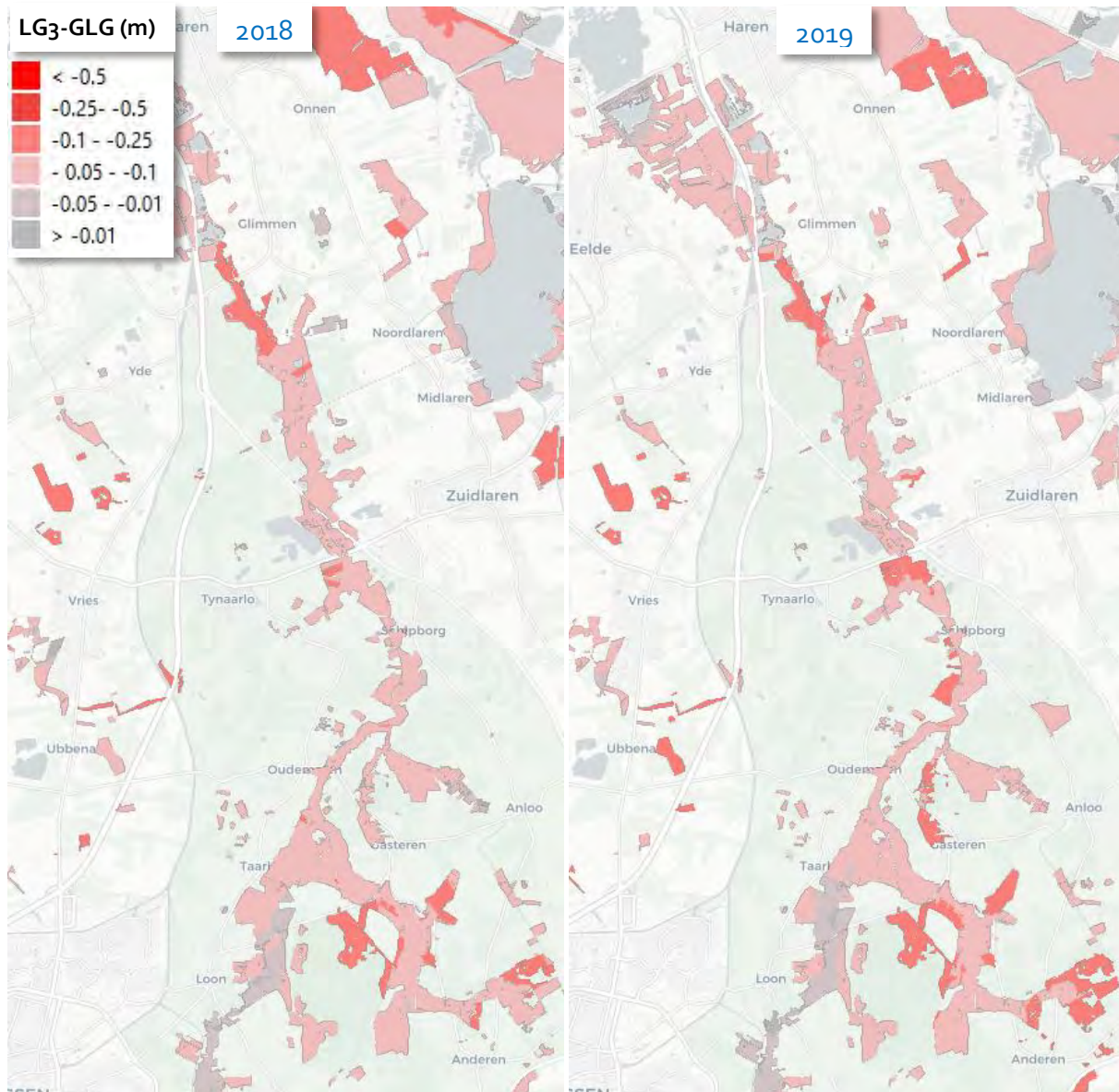
Figuur 27 zijn enkele natuurgebieden uitgelicht (Figuur 20 geeft hun locatie). In de meeste gevallen was de uitzakking in 2018 groter dan in 2019, al zijn er enkele uitzonderingen (enkele locaties van de Drentse Aa, Figuur 21).

Tabel 5. Verschil zomerkweldroogte tussen 2018 en 2019 (mm/d). De gevolgen van de droogte werkten in 2019 pas echt door op de kwel uit het diepere watervoerende pakket: het diepere systeem ijlt na.

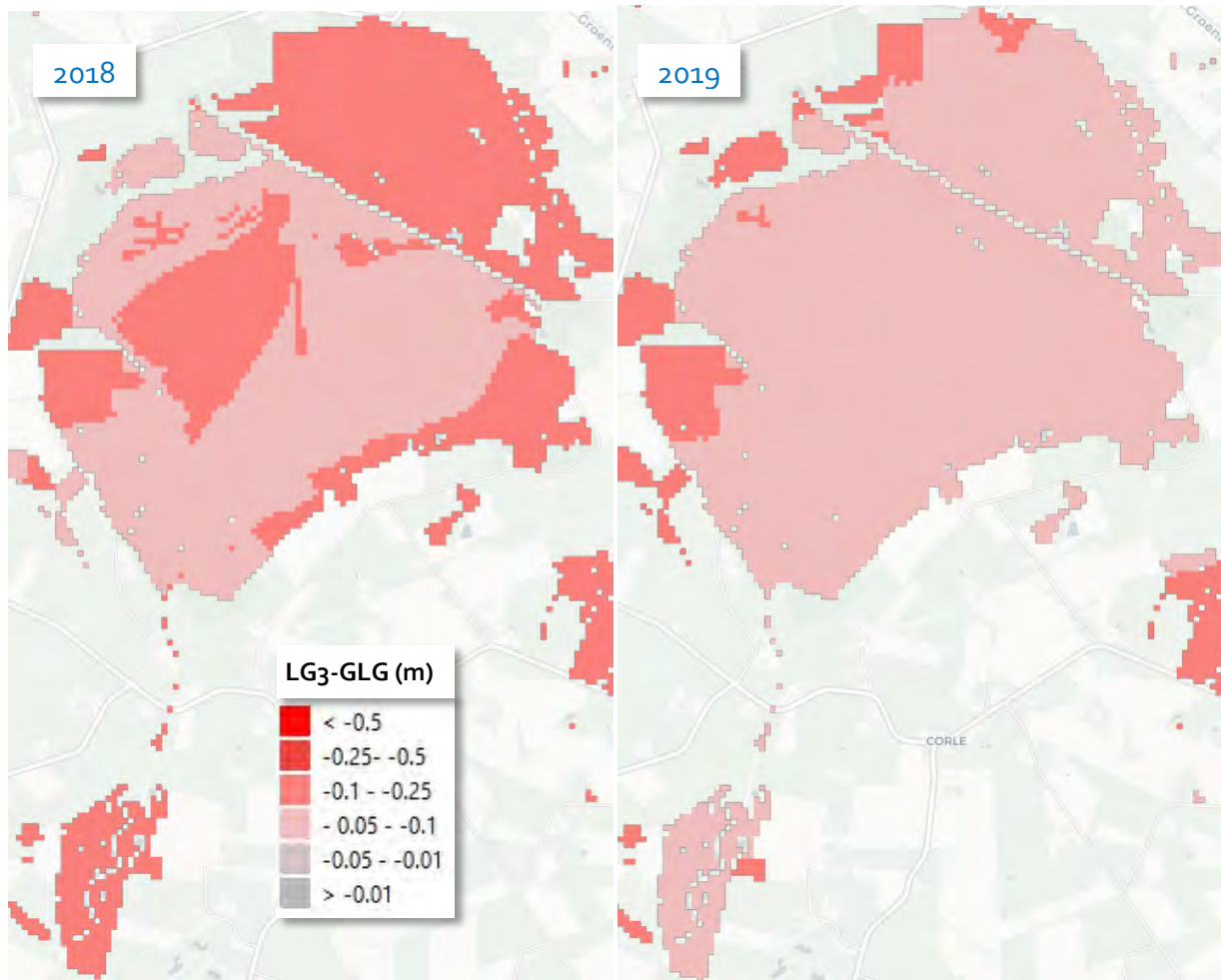
	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	-0.08	-0.04	-0.07	-0.06	-0.01	-0.04	-0.08		-0.12	-0.11	-0.14	-0.27	-0.15	-0.04	-0.14	0.04	0.02	-0.08		-0.13
N06.02 Trilveen	0.01						0.00										-0.03	0.02		-0.01
N06.05 Zwakgebufferd ven	-0.17					-0.13	0.00		-0.20	-0.09	-0.35	-0.07	-0.04		-0.17					-0.09
N10.01 Nat schraalland	-0.20	-0.25		-0.21	-0.21	-0.23	-0.43		-0.25	-0.04	-0.31		-0.32	-0.09	-0.02			-0.02	-0.02	-0.29
N10.02 Vochtig hooiland	-0.15	-0.17	-0.12	-0.11	-0.24	-0.26	-0.17		-0.25	-0.05	-0.34	-0.15	-0.19	-0.14	-0.20	0.00	-0.06	-0.02	0.00	-0.26
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	-0.13	-0.03	0.00	-0.07	-0.06		-0.33	-0.06	-0.22	-0.07	-0.35		-0.24	-0.18	-0.21	0.01	-0.07		0.00	-0.26



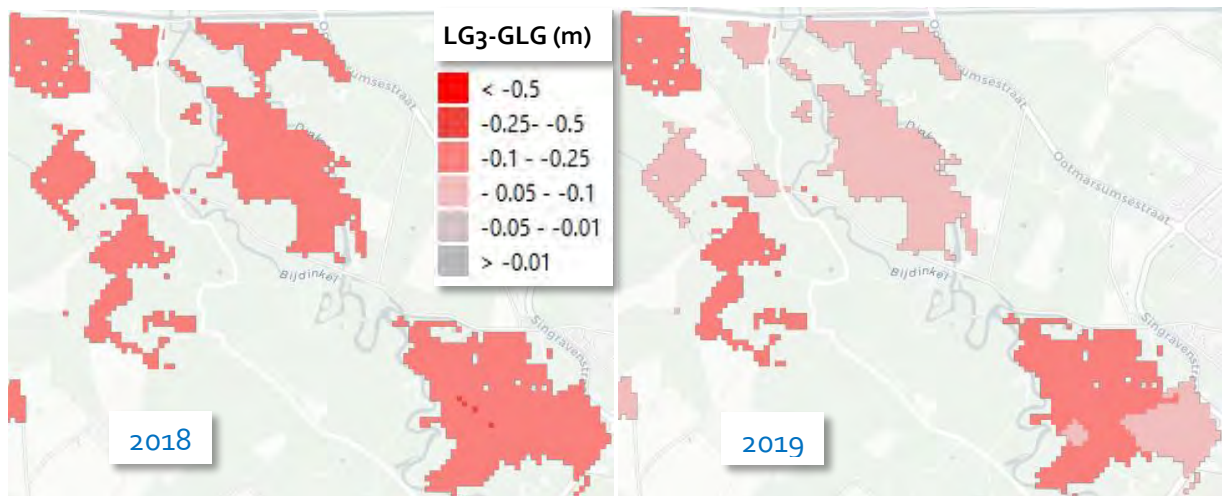
Figuur 20. Nader bekeken gebieden: 1 = Drentse Aa, 2 = Singraven, 3 = Korenburger veen, 4 = Westelijke langstraat, 5 = Dommel.



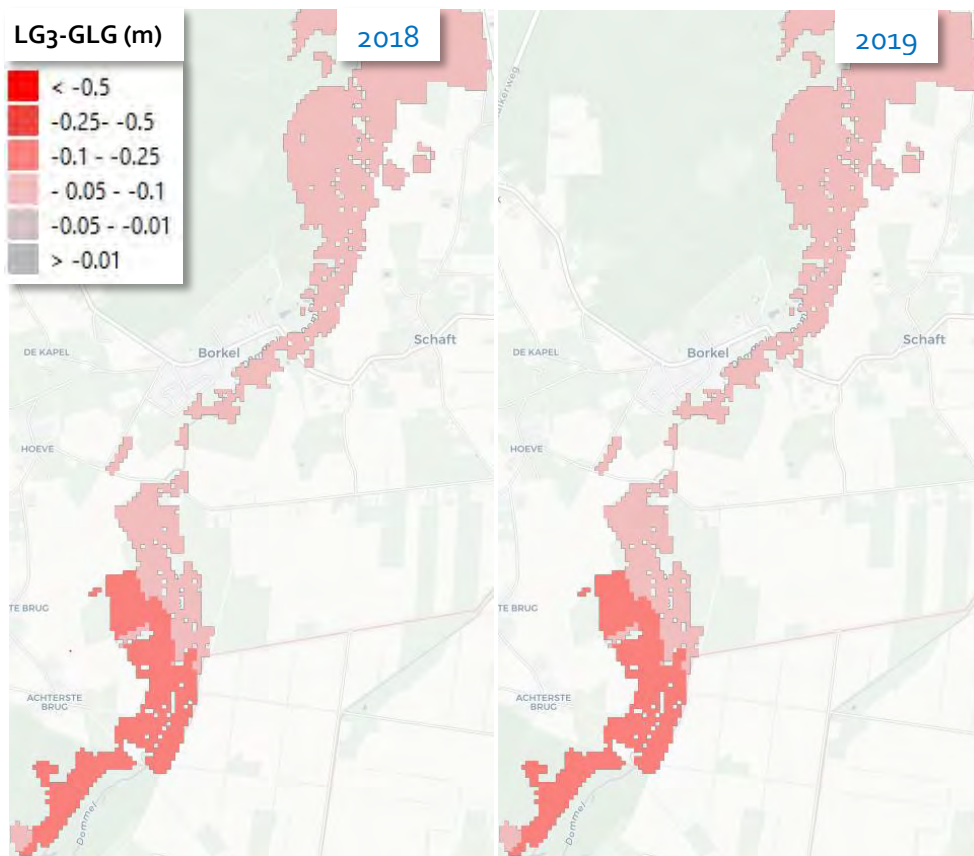
Figuur 21. Uitzakken van de laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 (LG3-GLG) onder de grondwaterafhankelijke natuur van de Drentse Aa en omgeving.



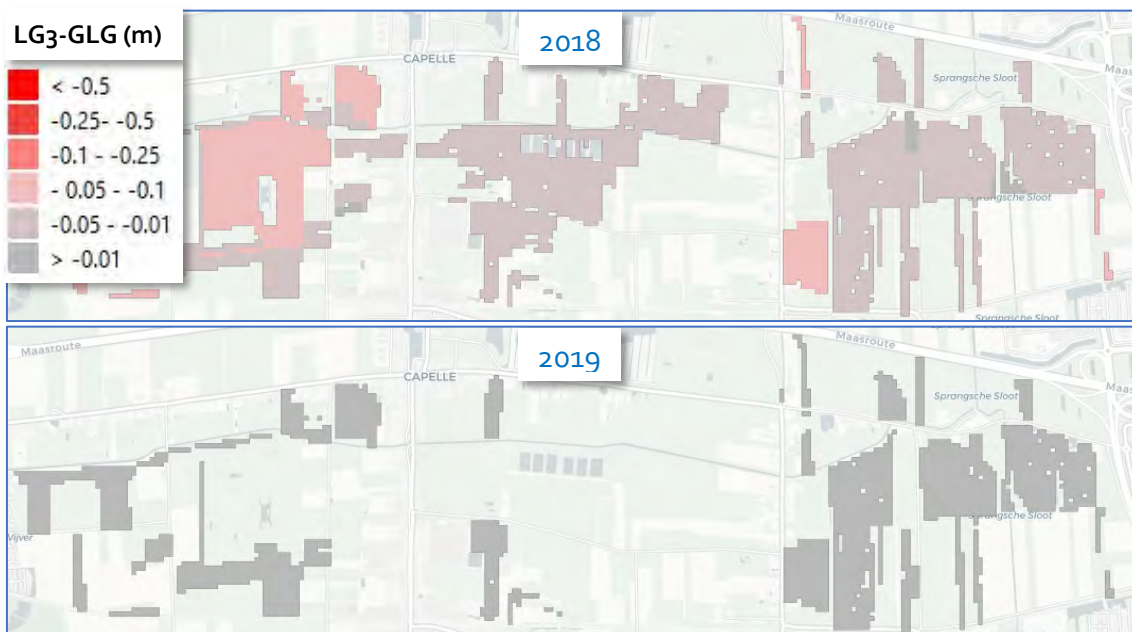
Figuur 22. Uitzakken laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 (LG₃-GLG) onder de grondwaterafhankelijke natuur van het Korenburgerveen.



Figuur 23. Uitzakken laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 (LG₃-GLG) onder de grondwaterafhankelijke natuur van landgoed Singraven.



Figuur 24. Uitzakken van de laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 (LG3-GLG) onder de grondwaterafhankelijke natuur van de Dommel.



Figuur 25. Uitzakken laagste grondwaterstand in 2018 en 2019 (LG3-GLG) onder grondwaterafhankelijke natuur Westelijke Langstraat.

2.3.3 Enquête over gevolgen van droogte voor de natuur

Ten tweede is een enquête onder deskundigen van terrein-beherende organisaties en provincies uitgevoerd (Witte et al., 2020). Tabel 6 toont de samenvattende tabel met de resultaten per natuurtype. Daarbij is onderscheid gemaakt naar de schade door de twee droge jaren en de kans op herstel in de komende vijf jaar, uitgaande van een normale weersgesteldheid.

Schade zagen de respondenten vooral optreden aan de vegetatie en fauna van natuurtypen die kenmerkend zijn voor natte en vochtige voedselarme standplaatsen. Dit zijn natuurtypen die voor hun watervoorziening vrijwel of geheel afhankelijk zijn van neerslagwater of van kwelwater: No3.01 Beek en bron, No6.01 Veenmosrietland en moerasheide, No6.02 Trilveen, No6.03 Hoogveen, No6.04 Vochtige heide, No6.05 Zwakgebufferd ven, No6.06 Zuur ven of hoogveenven en N14.02 Hoog- en laagveenbos.

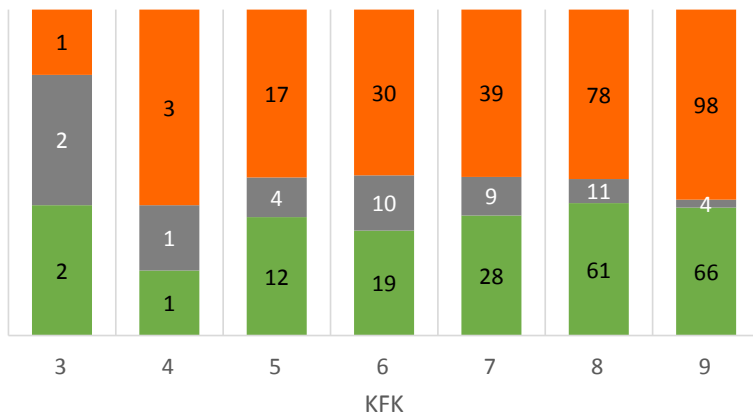
Respondenten gaven twee structurele oorzaken aan waardoor de nadelige gevolgen van 2018 en 2019 zijn versterkt. Ten eerste dat de droge jaren bovenop de sluipende verdroging van het omringende landschap komen. Enkele respondenten uiten daarom kritiek het huidige waterbeheer, waarin het belang van de natuur onvoldoende zou worden meegewogen. En ten tweede dat door de droogte de ecologische gevolgen van de atmosferische depositie worden versterkt: droogte en verzuring zouden een giftige mix zijn.

Tabel 6. Samenvatting van de resultaten uit de enquête. De schade is aangegeven in drie klassen ('klein', 'matig' en 'groot', waarbij 'klein' in enkele gevallen ook op een kleine winst duidt); tevens is door de respondenten de mate van herstel binnen vijf jaar aangegeven.

Natuurtype	Schade		Herstel	
	klein	matig	klein	matig
N03.01 Beek en bron	↓	↓	↓	↓
N05.01 Moeras	→	→	→	→
N06.01 Veenmosrietland en moerasheide	↓	→	→	→
N06.02 Trilveen	↓	→	→	→
N06.03 Hoogveen	↓	↓	↓	↓
N06.04 Vochtige heide	↓	↓	↓	↓
N06.05 Zwakgebufferd ven	↓	↓	↓	↓
N06.06 Zuur ven of hoogveenven	↓	↓	↓	↓
N07.01 Droge heide	→	→	→	→
N07.02 Zandverstuiving	↑	→	↑	→
N10.01 Nat schraalland	→	→	→	→
N10.02 Vochtig hooiland	→	→	→	→
N11.01 Droog schraalland	↑	↑	↑	↑
N12.02 Kruiden- en faunrijk grasland	↑	↑	↑	↑
N12.03 Glanshaverhooiland	↑	↑	↑	↑
N12.05 Kruiden- en faunrijke akker	↑	↑	↑	↑
N13.01 Vochtig weidevogelgrasland	↑	→	↑	→
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	→	→	→	→
N14.02 Hoog- en laagveenbos	↓	→	→	→
N14.03 Haagbeuken- en essenbos	→	→	→	→
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	↓	→	→	→
N16.03 Droog bos met productie	→	→	→	→
N16.04 Vochtig bos met productie	→	→	→	→
N17.01 Vochtig hakhout en middenbos	→	→	→	→
N17.03 Park- en stinzenbos	↑	↑	↑	↑

2.3.4 Resultaten analyse van het Landelijk Meetnet Flora

Op derde plaats heeft het projectteam vegetatieopnamen uit het Landelijke Meetnet Flora geanalyseerd (Witte, 2021). Het LMF is een bestand met duizenden vegetatieplots die sinds 1999 met regelmatig (om de 3 à 4 jaar) worden opgenomen (echter zonder metingen aan de standplaats); het gaat dus om PQ's. Uit de analyse van het LMF bleek onder meer dat de van de vegetatieopnamen afgeleide gemiddelde indicatiewaarden voor vocht, voedselrijkdom en zuurgraad, nauwelijks hebben gereageerd op de droogte, terwijl de botanische natuurwaarde van de opnamen wel aanzienlijk daalde (afhankelijk van de waarderingsmethode met 6 tot 18%). Gemiddelde indicatiewaarden kunnen blijkbaar nauwelijks veranderen, terwijl de soortensamenstelling van de vegetatieplot wel aanzienlijk verandert. Meer soorten gingen in aantal en bedekking achteruit dan vooruit (50% ging achteruit, 35% vooruit). Bij zowel algemene als zeldzame soorten domineerde de achteruitgang (Figuur 26).



Figuur 26. Aantal soorten dat van 2015 naar 2019 toeneemt, gelijk blijft en afneemt, uitgesplitst naar zeldzaamheidsklasse KFK (hoe hoger de KFK, des te algemener). Verandering gebaseerd op de bedekking van soorten. Voorbeeld: van de 168 soorten die in KFK9 vallen, zijn er 98 in bedekking achteruit gegaan, 4 gelijk gebleven en 66 vooruit gegaan. Bron: Witte (2021).

Van twee systemen is de verandering in soortensamenstelling nader geanalyseerd: door regenwater gevoede natte systemen (hoogvenen, natte heiden, zure vennen) en door basenrijke kwel gevoede systemen (blauwgraslanden en trilvenen). In beide systemen was er sprake van een aanzienlijk verlies aan karakteristieke soorten (Tabel 7, Tabel 8). Deze resultaten van de LMF-analyse bevestigden in grote lijnen het in de enquête gegeven oordeel.

Tabel 7. Verandering in de presentie en bedekking van soorten, kenmerkend voor natte en vochtige, voedselarme en zure bodems (hoogvenen, natte heiden, zure vennen). Voor de codes van de ecologische groepen (EG1 en EG2), zie: Runhaar et al. (2004). Voorbeeld: Ronde zonnedauw kwam in 2015 in 10 vegetatieplots voor met een gesommeerde bedekking van 20%; in 2019 waren dat 5 plots met een totale bedekking van 15%. Bron: Witte (2021).

	Presentie			Bedekking			EG1	EG2
	2015	2019	%	2015	2019	%		
418 Ronde zonnedauw	10	5	-50	20	15	-25	P21	G21
924 Heidekartelblad	2	1	-50	4	3	-25	G41	G42
558 Stekelbrem	4	2	-50	7	9	29	G41	G61
1068 Witte snavelbies	11	6	-45	26	15	-42	P21	
476 Veenpluis	22	13	-41	124	50	-60	V11	G21
1616 Gevlekte orchis_Bosorchis	6	4	-33	20	13	-35	G42	G41
568 Klokjesgentiaan	6	5	-17	9	5	-44	G41	G42
417 Kleine zonnedauw	14	12	-14	38	25	-34	P21	
251 Pilzegge	23	20	-13	53	38	-28	G61	G41
777 Moeraswolfsklauw	8	7	-13	30	53	77	P21	
1069 Bruine snavelbies	10	9	-10	37	41	11	P21	
473 Gewone dophei	46	44	-4	882	1011	15	G41	G21
913 Kleine veenbes	1	1	0	8	4	-50	G21	
1153 Veenbies	1	1	0	3	2	-33	G41	G21
687 Trekrus	10	10	0	17	19	12	G41	
479 Eenarig wollegras	5	5	0	6	7	17	G21	H21
962 Liggende vleugeltjesbloem	2	2	0	4	4	0	G42	G41
186 Struikhei	62	62	0	1314	1171	-11	G61	G41
560 Kruipbrem	1	1	0	1	1	0	G61	G41
858 Beenbreek	3	4	33	5	6	20	G21	
2357 Veenbies s.l.	1	2	100	18	16	-11	G41	G21

Tabel 8. Verandering in de presentie en bedekking van soorten, kenmerkend voor natte, voedselarme en zwak-zure bodems (blauwgraslanden en trilvenen). Bron: Witte (2021).

	Presentie			Bedekking			EG1	EG2
	2015	2019	%	2015	2019	%		
1159 Borstelbies	1	0	-100	1	0	-100	P27	P22
681 Draadrus	6	2	-67	44	2	-95	G22	G27
849 Wilde gagel	6	4	-33	112	77	-31	H21	H22
332 Spaanse ruiter	6	4	-33	31	38	23	G22	
1332 Kleine valeriana	3	2	-33	6	3	-50	G22	G27
1362 Schilderpreijs	6	4	-33	7	4	-43	P22	W12
236 Blonde zegge	4	3	-25	58	12	-79	G22	
1137 Grote pimperl	8	7	-13	15	11	-27	G22	G27
248 Blauwe zegge	34	30	-12	454	406	-11	G22	G42
679 Biezenknoppen	44	40	-9	97	70	-28	G22	G27
1008 Tormentil	36	34	-6	150	183	22	G42	G22
1933 Veelbloemige veldbies	23	22	-4	27	32	19	G42	G22
217 Knotszegge	1	1	0	1	1	0	G22	
220 Geelgroene zegge	7	7	0	33	33	0	G22	G27
267 Blaaszegge	7	7	0	26	23	-12	G27	G22
420 Kamvaren	2	2	0	3	2	-33	H22	G22
641 Gewone waternavel	28	28	0	95	131	38	G23	G22
644 Moerashertshooi	1	1	0	19	10	-47	P22	W12
1005 Kruipganzerik	3	3	0	28	19	-32	G22	G42
763 Moerasrolklaver	57	58	2	342	309	-10	G27	G22
670 Veldrus	43	45	5	635	382	-40	G22	G27
1258 Blauwe knoop	19	20	5	119	114	-4	G42	G22
244 Zwarte zegge	35	37	6	98	151	54	G22	G27
1544 Moerasstruisgras	49	53	8	618	629	2	G22	G27
1385 Moerasviooltje	11	12	9	31	30	-3	G22	H22
228 Sterzegge	8	11	38	29	13	-55	G22	
221 Ronde zegge	0	2	999	0	4	999	V12	G22
939 Pilvaren	0	1	999	0	1	999	P22	W12

2.3.5 Resultaten analyse van vegetatieplots bij peilbuizen

Ten vierde onderzocht het projectteam aan de hand van 89 vegetatieplots met bijbehorende tijdreeksen van de grondwaterstand of in 2018 opgetreden veranderingen in de vegetatie samenhangen met de hydrologische droogte in dat jaar (Van Ek et al., 2021). Centraal in die analyse stond de hypothese dat de verandering in samenstelling van de vegetatie groter is, naarmate de hydrologische droogte in 2018 groter was dan gemiddeld. De hydrologische droogte werd gedefinieerd als het uitzakken van de grondwaterstand (LG3-GLG) gedurende zomer en, voor een beperkte set van 28 plots, als de transpiratiereductie in dat jaar. De vegetatie in de plots was overwegend kenmerkend voor natte tot vochtige bodems (mediane GLG van 70 cm – m.v.).

De droogte van 2018 en 2019 kwam goed tot uiting in de hydrologie. De laagste grondwaterstand zakte in 2018 gemiddeld 20 cm meer uit dan gemiddeld en in 2019 gemiddeld 11 cm meer. De met een hydrologisch model (SWAP) gesimuleerde transpiratiereductie in de droogste aaneengesloten periode van 10 dagen van het jaar bedroeg gemiddeld 1,45 en 0,82 mm/d, wat respectievelijk 1,14 en 0,50 mm/d meer is dan normaal; geen schokkende cijfers, maar die waren voor overwegend natte en vochtige bodems ook niet te verwachten.

Net als in de LMF-studie zagen we nauwelijks een respons van de gemiddelde indicatiewaarden voor vocht, voedselrijkdom en zuurgraad op de droogte, maar wel een beduidende afname van de botanische natuurwaarde. In tegenstelling tot de hypothese kon het projectteam geen verband vaststellen tussen vegetatieverandering en de mate van hydrologische droogte in 2018. Daar zijn twee verklaringen voor. De eerste is dat de gegevens behept zijn met aanzienlijke meetfouten (voor details: zie Van Ek et al., 2021). De tweede verklaring is dat de hypothese vermoedelijk niet klopte. Vegetatieplots waar in 2018 de droogte ernstig toesloeg (diep wegzakken van de grondwaterstand en veel droogtestress), zullen immers in voorgaande jaren ook al gevoeliger zijn geweest voor droge omstandigheden, waardoor plantensoorten die daar niet tegen bestand zijn in 2018 al grotendeels ontbraken. Met andere woorden: de jaren vóór 2018 hebben al gefungeerd als een selectiefilter over de opnamen.

2.3.6 Najl-effecten

Uit de hiervoor gepresenteerde analyses blijkt dat de vegetatie van natuurgebieden over het algemeen te lijden heeft gehad van de droge jaren. De gesignaleerde effecten zijn echter van de korte termijn. Wat uiteindelijk de gevolgen van 2018 en 2019 (en 2020) zijn geweest, kan pas op over enkele jaren via een gedegen analyse worden vastgesteld. Uit de LMF-studie (Witte, 2021): "We zien in de gegevens dus waarschijnlijk vooral de directe gevolgen van de droogte terug: het gebrek aan water om te kunnen verdampen zodat soorten wegwijnen of lokaal uitsterven. Op de lange termijn, is onze verwachting, zullen de secundaire gevolgen van de droogte echter zichtbaar worden: juist een toename van de voedselrijkdom van natte en vochtige bodems door een versterkte afbraak van organisch materiaal en een verzuring van de bodem ten gevolge van die afbraak en het wegvallen van basenrijke kwel. Deze secundaire gevolgen leiden vooral via competitie tussen soorten uiteindelijk tot de achteruitgang van de minder algemene soorten. Of deze verwachting bewaarheid wordt zal, ijs en vooral weder dienende, pas over enkele jaren kunnen blijken".

2.4 Handelingen van overheden tijdens de droogte

Meerdere functies in het landelijk gebied kregen last van droogte, wat resulteerde in een aantal maatregelen van overheidswege. De maatregelen werden aangestuurd door verschillende bestuurslagen (Figuur 1). Als er sprake leek te gaan zijn van droogte, zijn bij Rijk, provincies, waterschappen en terreinbeherende organisaties (TBO) calamiteitenteams aan de slag gegaan om de droogte en de negatieve effecten ervan te bestrijden. Eerst werden in vele gebieden onttrekkingen uit oppervlaktewater verboden, daarna werden in een beperkt aantal deelgebieden onttrekkingen uit grondwater rondom bepaalde natuurgebieden verboden door waterschappen Vechtstromen en Rijn en IJssel.

Een mogelijk beperking die soms overwogen werd, is een verbod voor beregenen overdag, het zogenaamde 'urenverbod'. De ratio daarachter is dat wordt aangenomen dat er overdag meer beregeningswater verdampt dan 's nachts, voordat het water de plantenwortels in de bodem bereikt. Daardoor neemt de beregeningsefficiëntie af,

uitgedrukt als het percentage van het beregeningswater dat ten goede komt aan de gewasverdamping. Om toch in dezelfde mate aan de waterbehoefte van de plant te voldoen, moet er dus meer beregend worden. Dat is in strijd met het streven van waterschappen en provincies de wateronttrekkingen aan oppervlakte- en grondwater en de beregeningshoeveelheden zo laag mogelijk te houden, omdat er onvoldoende water beschikbaar is om alle vragende functies voldoende te bedienen. Van den Eertwegh et al. (2020) tonen echter aan dat een verbod op beregening overdag weinig effectief is om de verdampingsverliezen beduidend te beperken. Het is effectiever om voor een eventueel verbod op beregening te sturen op windsnelheid.

Op diverse plekken in het zandgebied werd droogval van beken geconstateerd en deels voorkomen via wateraanvoer om enig debiet en stroming te realiseren, met een zeer beperkt tot geen effect op het grondwatersysteem. Ook stuwpeilen werden verhoogd en (skippy)ballen voor het afsluiten van watergangen werden uitgedeeld om de afvoer van water te beperken en water op te slaan (voor zover er water aanwezig was). Deze maatregelen vonden echter pas plaats op het moment dat het zandgebied van Nederland al in een hydrologische droogtetoestand verkeerde. Een verdere toename van de droogte is hiermee misschien vertraagd, maar men was te laat om nog water vast te houden in de bodem. Het optrekken van stuwen in de watergangen van het waterschap droeg daarom toen beperkt bij aan het bestrijden van de droogte (effect is groter naarmate stuwpeilen de ontwatering meer beperken of stoppen). Een stuw heeft daarnaast namelijk veelal een beperkte doorwerking naar bovenstreams, waardoor het positieve effect op het grondwatersysteem onvoldoende is geweest. Bovendien moet er water beschikbaar zijn om te bergen in oppervlaktewater, water dat er in droge tijden onvoldoende of niet is. Maatregelen die op een groter deel van (i.c. beter alle) leggerwaterlopen betrekking hebben en ook op het niveau van kavelsloten worden uitgevoerd, zouden, mits tijdig genomen, effectiever zijn geweest. Het opstuwen van leggerwatergangen heeft zin als dat tijdig gebeurt, dus ruim vóór er sprake is van meteorologische droogte, als dat ook in de winter na een droge periode gebeurt, en als dat gepaard gaat met parallelle maatregelen in de aangesloten watergangen (zie Hoofdstuk 3).

Het waterschap heeft gedurende een actuele droogteperiode deels invloed via beheer van de eigen watergangen, o.a. via peilbeheer, inlaatbeheer en maaibeheer, deels minder invloed, omdat grondeigenaren immers de ontwatering bepalen van hun eigen land via drainagemiddelen en kavelsloten. De Legger Watersysteem biedt juridische en technische mogelijkheden voor het waterschap om deze invloed te vergroten. Het waterschap kan beleidsregels maken en toepassen die de ontwatering op kavelniveau beperken, zoals het verplicht stellen van regelbare drainage (NB: gepast beheer, registreren) als er reeds gangbare buisdrainage aanwezig is, of het aanbrengen van stuwen in kavelsloten (NB: gepast beheer, registreren). Uit de ervaring in dit project blijkt dat van deze beleidsruimte echter weinig gebruik is gemaakt. Het areaal land waar de afgelopen jaren geen effectieve maatregelen zijn uitgevoerd, gericht op reductie van de ontwatering en op stimulering van het vasthouden van water in de bodem, bedraagt naar onze schatting 75-85% van het zandgebied.

3. Opties om droogteschade te beperken

3.1 Wat kunnen we wanneer doen?

Droog weer zie je niet lang van te voren aankomen, want betrouwbare meteovoorspellingen gaan vaak niet verder dan 10 dagen vooruit. Daarmee is op korte termijn voorafgaand aan of tijdens droog weer effectief reageren op een actuele of verwachte droogte niet goed mogelijk. Calamiteitenorganisaties worden vaak opgetuigd als droogte reeds in zicht is, op een moment dat er al een tijdlang droog weer heerst. Daarbij komt dat de actuele situatie van bodemvocht, grondwater en oppervlaktewater (samengevat als het bodem-watersysteem) het gevolg is van de historische omstandigheden (afgelopen dagen tot maanden, soms zelfs jaren). Het direct positief beïnvloeden van dit bodem-watersysteem als het al een tijdlang droog is, is daarom beperkt mogelijk. Als een droogte zich eenmaal manifesteert, is het vaak te laat om effectieve maatregelen te nemen.

Om droogteschade te voorkomen, zijn daarom tijdige ingrepen en structurele maatregelen in inrichting en beheer van het bodem-watersysteem nodig. Preventieve in plaats van curatieve ingrepen maken dat we beter bestand worden tegen droogte en de negatieve gevolgen ervan kunnen beperken, dan wel vroegtijdig kunnen accepteren.

3.2 Ad-hoc-ingrepen tijdens droogte

Hoewel structurele ingrepen de voorkeur verdienen, zijn er enkele ad-hoc-ingrepen om negatieve effecten van droogte te beperken die snel effect hebben op het bodem-watersysteem. Met ad-hoc-ingrepen bedoelen we hier ad-hoc in de tijd gezien en tijdelijk, namelijk vlak voor of tijdens een droge periode. Deze zijn:

- Beregenen van landbouwgewassen waardoor direct het bodemvocht in de wortelzone wordt aangevuld en transpiratiereductie (vochttekort) kan worden opgeheven. Afhankelijk van de gift en frequentie wordt de gewasopbrengst verhoogd. Beregening is geconcentreerd in het groeiseizoen en fluctueert van jaar tot jaar.
- Onttrekken van oppervlaktewater voor deze beregening heeft direct een gevolg voor de afvoer van de beek of waterloop en alles wat stroomafwaarts ligt. Wateraanvoer vanuit rivieren en kanalen kan voor aanvulling zorgen. Waterschappen sturen op kritische afvoeren voor met name waterlopen en beken met een natuurfunctie door onttrekkingsverboden af te kondigen. Vroegtijdige droogval van watergangen wordt zo voorkomen.
- Onttrekken van grondwater voor deze beregening heeft direct een effect op de stijghoogte in het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt. Deze stijghoogteverlagingen werken vrijwel direct door op het freatisch systeem oftewel op grondwaterstanden; kwelfluxen en beekafvoeren beginnen direct te dalen als met beregenen wordt begonnen. Kwetsbare natuurgebieden kunnen dus tijdens de droogte worden ontlast door in hun omgeving een beregeningsverbod in te stellen.
- Bereiding van drinkwater: onttrekken van grondwater voor drinkwater heeft eenzelfde direct effect als beschreven bij grondwateronttrekkingen voor beregening. Veranderingen van de onttrekkingen voor drinkwater door bijvoorbeeld een hogere vraag tijdens een droge periode, juist besparing of verandering verdeling van debieten over winningen, hebben een direct effect op het watersysteem. Ook het verminderen van de drinkwaterwinning is dus een maatregel waarmee kwetsbare natuurgebieden zijn te ontlasten. Of er gestuurd kan worden hangt af van de speelruimte in de aanwezige infrastructuur (o.a. voorzieningsgebieden, mogelijkheid tot schakelen tussen pompstations). Een knelpunt is dat de drinkwatervraag tijdens droge perioden hoger is dan normaal. Dat kan alleen worden omgedraaid door beïnvloeding van het consumentengedrag en door restricties aan het drinkwatergebruik op te leggen (bijvoorbeeld een tijdelijk verbod op het sproeien van de tuin).
- Wateraanvoer van buiten (gebiedsvreemd water) brengt direct water in de watergangen, gaat droogval tegen en heeft daarmee direct effect op de watervoerendheid (waterpeil, debiet, stroomsnelheid) in

watergangen. Het kan belangrijk zijn om deze op peil en stromend te houden of om extra water beschikbaar te maken voor beregening uit het oppervlaktewater. Mogelijk aandachtspunt bij wateraanvoer is de chemische samenstelling van dat water. Wateraanvoer in droge tijden heeft beperkt effect op het grondwatersysteem en vrijwel niet op het bodemvocht, tenzij dit water actief aan het systeem via beregening, bodeminfiltratie (in infiltratie-bassins) of subirrigatie via drains wordt toegevoegd. De beschikbaarheid van water is een belangrijke voorwaarde. De debieten (m³/s) van wateraanvoer in Hoog-Nederland zijn vaak onvoldoende om de gewassen en vegetatie van voldoende water te voorzien.

- Onttrekken van grondwater voor behoud van stroming in waterlopen en beken voor het redden van zeldzame vissen en macrofauna is een ingreep die direct helpt, maar alleen bij noodgevallen wordt toegepast. Het heeft echter ook een direct negatief effect op het bodem- en grondwatersysteem zoals hierboven beschreven.
- Bergen en vasthouden wat ten tijde van droogte nog te bergen en vast te houden valt. Tijdens een droogte kunnen lokale buien voorkomen met een kleine tot grote intensiteit. Het vasthouden van dat water op en in percelen en het bergen van eventuele afvoer in het open water is goed om lokale watervoorraden aan te vullen. We hebben geen kwantitatieve analyse hierover uitgevoerd. Bergen en vasthouden van water buiten droge perioden zien we als structurele maatregel.

Tijdelijke maatregelen als hierboven stralen uit naar hun omgeving. Door bijvoorbeeld onttrekkingen van grondwater daalt vrijwel direct de freatische grondwaterstand, neemt de kwel af en daalt de afvoer van beken. Als gevolg van dalende grondwaterstanden, kan de biodiversiteit in natte natuurgebieden worden aangetast, maar ook kan de capillaire opstijging vanuit het grondwater naar de wortelzone afnemen en daarmee de transpiratiereductie, en dus de gewasschade, toenemen op percelen waar niet wordt beregend. Waterschappen kunnen sturen met beregeningsverboden, maar dit wordt voor grondwateronttrekkingen nauwelijks gedaan. Door de leveringsplicht van drinkwaterbedrijven lijken de mogelijkheden om te sturen op onttrekkingen momenteel (nog) beperkt. Dit betekent dat er nader onderzocht moet worden of er tussen bronlocaties geschakeld kan worden tijdens droog weer of dat bepaalde winningen kunnen worden verplaatst naar locaties waar ze minder schade aanrichten (polders). Waterbesparing door burgers en industrie is sowieso nuttig en kan via voorlichting en prijszetting (gestaffeld tarief) worden bevorderd (Witte et al., 2020).

3.3 Richtinggevende maatregelen – structureel

3.3.1 Hoofdgroepen richtinggevende maatregelen

Zoals blijkt uit § 3.2 en uit de analyse die in Fase 1 is uitgevoerd, zijn de mogelijkheden beperkt om tijdens een droogte effectief in te grijpen. Structurele maatregelen zijn daarom nodig. Met het huidige watersysteem werkt een meteorologische droogte zoals 2018 sterker door, met grotere gevolgen voor de landbouw en natuur dan met een watersysteem waar meer water wordt vastgehouden en waar minder water wordt verbruikt. Dan is het watersysteem meer in balans met het landgebruik. Dit zou een klimaatrobuust watersysteem kunnen worden genoemd, waarbij de primaire inzet is om effecten van droogte te minimaliseren. Bestrijding van de structurele verdroging van natuurgebieden in het zandgebied gaat hand in hand met het mitigeren van effecten van extreme droogte zoals die van 2018. Daarbij dient voldoende aandacht te zijn voor het optreden van extra wateroverlast als gevolg van de ingrepen. Het zou het mooiste zijn als zowel droogte en verdroging als wateroverlast tegelijk kunnen worden aangepakt. Deze optimale situatie zal niet altijd en overal kunnen worden gerealiseerd en daarom zullen er soms keuzes tussen gebruiksfuncties moeten worden gemaakt, met name tussen landbouw, natuur en drinkwaterwinning. Ook binnen de landbouw kunnen keuzes gemaakt worden, bijvoorbeeld ten aanzien van te telen gewassen (minder transpiratie) en de locaties van bepaalde teelten in het landschap. In deze paragraaf wordt bij de verschillende maatregelen alleen het effect op de droogte besproken.

Op basis van in welk deel van het watersysteem structureel wordt ingegrepen, worden de richtinggevende

maatregelen in vier hoofdgroepen verdeeld:

1. ontwatering: vasthouden;
2. afwatering: bergen en aanvoeren;
3. grondwateronttrekkingen: minder eruit;
4. bevorderen grondwateraanvulling: meer erin.

Per hoofdgroep worden de verschillende typen maatregelen besproken met hun effecten op het bodemwatersysteem, de landbouw en natuur.

Met nadruk vermelden we hier dat de gepresenteerde richtinggevende maatregelen in het hele onderzoeksgebied op een uniforme wijze worden doorgevoerd, ongeacht de vraag of dat technisch en maatschappelijk haalbaar is. Zo is het overal sluiten van de grondwaterwinningen een maatregel die we bestuderen maar die in de praktijk nooit op die schaal kan worden uitgevoerd omdat drinkwaterbedrijven een leveringsplicht hebben. De maatregelen hebben dus een hypothetisch karakter en zijn vooral bedoeld om de hydrologische effectiviteit van verschillende maatregelen af te tasten. Naar aanleiding van de resultaten kan worden overwogen bepaalde maatregelen op een gebied af te stemmen en de effectiviteit verder te verkennen; een vervolgstudie waarin in meer detail de effectiviteit van diverse maatregelen wordt bestudeerd, zal dan meestal gewenst zijn.

Daarnaast dient te worden opgemerkt dat bepaalde maatregelen elkaar kunnen versterken of juist verzwakken. Echter, alleen de combinatie van alle richtinggevende maatregelen is doorgerekend (M₉, zie onder) en niet afzonderlijke combinaties.

Bij de beschrijving van de effecten wordt vooral gebruikt gemaakt van berekeningen met het LHM (het Landelijk Hydrologisch Instrumentarium; zie voor methode Van den Eertwegh et al, 2019 en Bijlage VI). In Tabel 9 staan de richtinggevende maatregelen opgesomd die met het LHM zijn doorgerekend (zie Bijlage VI voor uitgebreidere beschrijving). Bij het beoordelen van de met het LHM berekende effecten is het van belang de belangrijkste modelconcepten en modelinvoer in het achterhoofd te houden. Zo zijn de potentieel beregende percelen gebaseerd op registraties uit 2010, evenals de onttrekkingsdebieten voor drinkwater en industrie. In Bijlage VI worden de belangrijkste concepten en de modelinvoer van het LHM besproken. De maatregelen worden op 1 januari 2013 doorgevoerd en effecten zijn voor elk jaar berekend en worden veelal gepresenteerd en beschreven voor de zomerperiode van het extreem droge jaar 2018 en 2019, dus 5,5 tot 6,5 jaar na uitvoering van de maatregel. De maatregelen kunnen dus min of meer als structureel worden gezien. Effecten zijn bepaald voor:

1. de freatische grondwaterstand: voor verschillende momenten in een jaar (LG₃, HG₃, op 1 april van het jaar) (zie begrippenlijst Bijlage XI);
2. de stijghoogte in verschillende watervoerende pakketten: voor verschillende momenten in een jaar (LG₃, HG₃, op 1 april van het jaar);
3. de kwelflux in de zomer (voor verschillende jaren);
4. het areaal kwelgebied;
5. de netto gebiedseigen afvoer grondwater dat in het gebied tot afvoer komt, in zomer en winter;
6. de werkelijke transpiratie t.o.v. potentiële transpiratie - Ta/Tp.

Ad 2. Het effect op de stijghoogte voor alle modellagen is berekend en via de droogteportaal te raadplegen. In de beschrijving van de resultaten in dit rapport worden vaak de effecten op de stijghoogte in modellagen 4 en 7 getoond omdat deze modellagen de effecten voor bijna het hele zandgebied representeren: modellaag 4 voor het gehele zandgebied als belangrijkste watervoerende pakket (of deel van watervoerend pakket samen met aangrenzende modellagen) onder het freatisch systeem en additioneel modellaag 7 voor de Centrale Slenk omdat dit het diepste watervoerende pakket representeert onder de zeer slechtdoorlatende kleilagen van de Formatie van Waalre.

De effecten zijn weergegeven in kaarten, waterbalansen, tijdreeksen en in tabellen per waterschap, focusgebied,

hydrotype en natuurbeheertype. Naast een beschrijving en presentatie van de modelresultaten in dit rapport, zijn ze digitaal beschikbaar en een selectie ervan is in te zien in het droogteportaal.

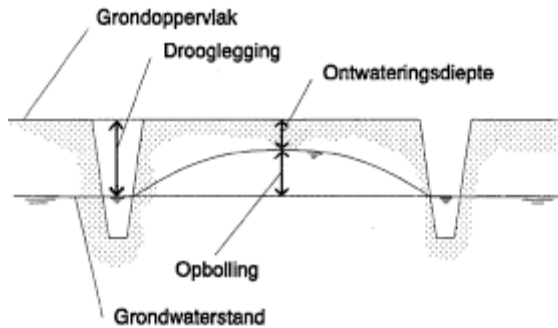
De geohydrologie van het Krijtlandschap in Zuid-Limburg is complex en deze complexiteit is niet voldoende goed meegenomen in de versie van het LHM (versie 3.4) die voor deze droogtestudie is gebruikt. Voor dit gebied hebben we daarom een aanvullende analyse verricht die is beschreven in Bijlage VII. Ook de geohydrologie van de gebieden Brabantse Wal en De Peel is meer complex dan in de LHM-versie 3.4 wordt meegenomen.

Tabel 9. Beschrijving van de verschillende richtinggevende maatregelen die met het LHM zijn doorgerekend.

Symbool	Beschrijving		Opmerking
M1	Reductie van drinkwaterwinningen – 50%	Minder eruit	
M1x	Reductie van drinkwaterwinningen – 100%	Minder eruit	
M2	Reductie van beregenen uit grondwater - 50%	Minder eruit	
M2x	Reductie van beregenen uit grondwater - 100%	Minder eruit	
M3	Peilverhoging + 30 cm primair en secundair ontwatering (veelal leggerwaterlopen)	Vasthouden	De scenario's M3 en M4 worden verder niet besproken, omdat door het schaalniveau van het model de bijdrage van de afzonderlijke ontwateringstypen niet goed te maken is (zie voor verdere toelichting Bijlage VI).
M4	Verhoging + 30 cm ontwateringsbasis tertiair systeem (veelal het haarvatensysteem)	Vasthouden	
M5	Combinatie van M3 + M4	Vasthouden	Dit scenario is optimistischer dan M5min wat betreft de beschikbaarheid van water in de zomer voor handhaving peil.
M5min	Combinatie van M3 + M4, minimale variant	Vasthouden	In vergelijking met M5 is minder water beschikbaar voor handhaving peil in de zomer en de effectiviteit daarmee iets minder groot.
M6	Ondergrondse zoetwaterberging, infiltratie van 100 mm gedurende het winter halfjaar voor gebieden met een GHG dieper dan 2,5 m-mv.	Meer erin	
M7	Omvorming van naaldbos naar heide.	Meer erin	
M8	Afkoppeling regenwater bebouwd gebied, bevorderen infiltratie, 100 mm/jaar.	Meer erin	
M9	Samengesteld scenario, combinatie van M1, M2, M5, M6, M7, M8.	Combinatie	

3.3.2 Optie 1: Ontwatering - water vasthouden

Het zandgebied van Nederland is sterk ontwaterd en dit heeft structurele verdroging van zowel landbouw- als natuurgebieden tot gevolg gehad. Het zandgebied kent meer dan 150.000 km aan sloten, waterlopen en beken die overwegend zo gedimensioneerd zijn dat ze de maatgevende afvoer (hoge afvoer die gemiddeld één keer per jaar wordt overschreden) kunnen verwerken zonder noemenswaardige overlast voor de landbouw (en bebouwing) (Figuur 27).



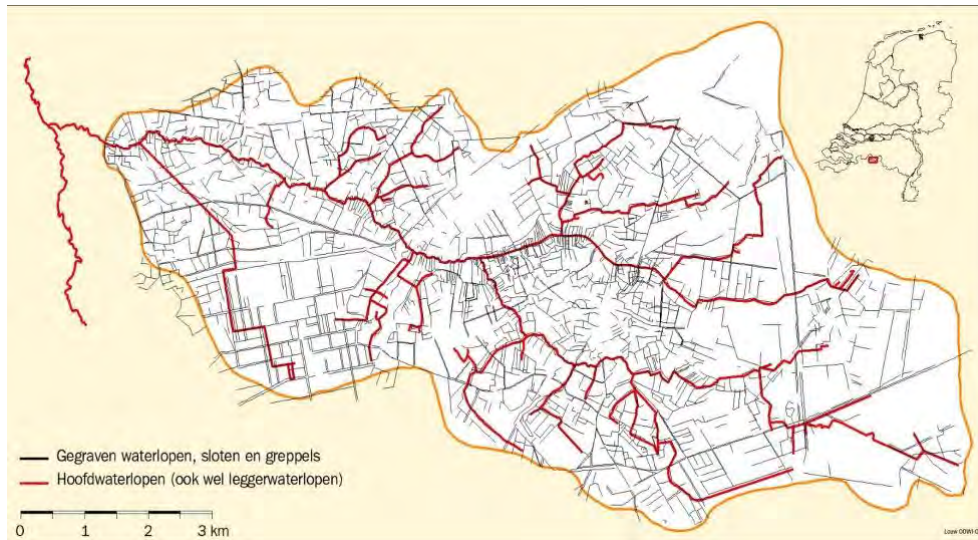
Figuur 27. Verband tussen drooglegging en ontwateringsdiepte. Watergangen zijn overwegend zo gedimensioneerd, dat de grondwaterstand slechts één keer per jaar binnen de ontwateringsdiepte van het gewas komt. Daarvoor is een bepaalde drooglegging nodig waarbij de maatgevende afvoer kan worden verwerkt.

Maatregelen in het oppervlaktewatersysteem zijn daarom vooral gericht op de extensivering van het ontwateringssysteem met als doel de ontwatering af te remmen, waardoor langer grondwater wordt vastgehouden, en zo gemiddeld hogere grondwaterstanden te creëren waardoor droogteschade voor landbouw en natuur wordt beperkt. Extensivering van het ontwateringssysteem kan door het dempen en verondiepen van ontwateringsmiddelen en peilverhoging o.a. met stuwen, regelbare drainage (i.p.v. conventionele drainage), niet maaieren of obstakels aanbrengen zoals bomen. Er zijn verschillende typen maatregelen in het oppervlaktewater denkbaar die verschillen in effectiviteit, betrokken actoren bij uitvoering, ruimtelijk schaal en timing. Hieronder worden de belangrijkste behandeld en de effecten op verschillende aspecten van het watersysteem besproken.

1) Vasthouden in de haarvaten

Volgens schatting is ongeveer 15-20% van de ontwatering in handen van het waterschap. Dit zijn de waterlopen en beken die op de legger staan en ook wel 'leggerwaterlopen' of het 'primair en secundair ontwateringsstelsel' worden genoemd. Dit zijn over het algemeen de breedste en diepste watergangen in de lagere delen van het landschap die de benedenstroomse uiteinden van het ontwateringsstelsel vormen. Het overige deel van de ontwatering zijn de kavelsloten die landbouwpercelen en wegen ontwateren. Dit stelsel aan sloten, greppels en ook drainagebuizen worden de (bovenstroomse) 'haarvaten' van het ontwateringssysteem genoemd en worden vaak aangeduid als het 'tertiair systeem'. Figuur 28 toont het primair, secundair en tertiair stelsel voor stroomgebied 't Merkske.

Met vasthouden van water in de haarvaten wordt bedoeld dat de ontwatering van percelen door maatregelen in het haarvatenstelsel wordt belemmerd, waardoor grondwater wordt vastgehouden. Dit kan gerealiseerd worden door verschillende maatregelen. Het bedienen van kleine stuwen in haarvaten via o.a. LOP-stuwen (Landbouw OntwikkelingsPlan) en SAWAX slimme stuwen (Smart Adaptive WATERlevel eXtender), zodat waterpeilen hoger worden, leidt tot vasthouden van water en meer berging in de (kleine) watergangen. Met regelbare drainage kan, in tegenstelling tot conventionele drainage, water vastgehouden worden door de drainage te remmen en te beperken. Om dit te bereiken moet er met het systeem bewust geregeld en gestuurd worden op water vasthouden. Regelbare drainage is alleen effectief als percelen al zijn gedraineerd want elke aanleg van nieuwe drainage zal leiden tot de afvoer van meer grondwater. Slootbodempverhoging of het dempen van sloten is het meest effectief, want dit beperkt direct de ontwatering van aangesloten land. Dit zal waarschijnlijk gevolgen hebben voor de gewaskeuze ter plekke.



Figuur 28. De leggerwaterlopen ook wel primaire en secundair systeem aangegeven in rood en het tertiair systeem ook wel het haarvaten systeem in zwart, voor het stroomgebied van 't Merkske (West-Brabant).

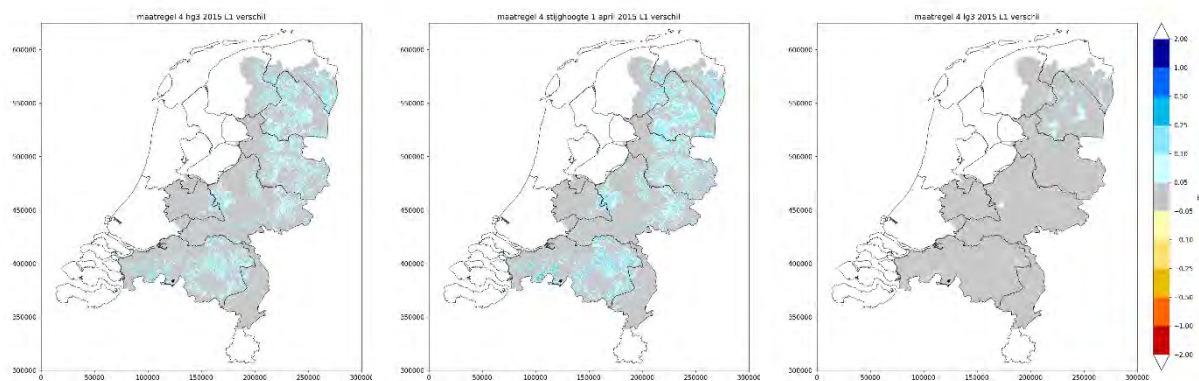
Effect op de freatische grondwaterstand

Maatregelen in het tertiair systeem (dempen, verhogen ontwateringsbasis) grijpen effectief aan op de grondwaterstand, die stijgt door de verhoging van de ontwateringsbasis en vergroting van de slootafstand (door dempen van sloten). Doordat de ontwateringsbasis hoger komt te liggen wordt er minder en minder lang grondwater afgevoerd en vindt er waterconservering plaats. Het effect is het grootst aan het einde van de periode met een positief neerslagoverschot (meestal in maart van elk jaar). Daarna neemt het effect af omdat het vastgehouden grondwater vertraagd door het secundaire en primaire ontwateringsstelsel verder benedenstrooms wordt afgevoerd. De berekening met het LHM waarin een verhoging van de ontwateringsbasis van het tertiair systeem met 30 cm is doorgevoerd (slootboderverhoging), laat dit effect ook duidelijk zien (Figuur 29). In de zomerperiode is het effect daardoor op de grondwaterstand (LG₃) grotendeels verdwenen en is al het geconserveerde grondwater afgevoerd.

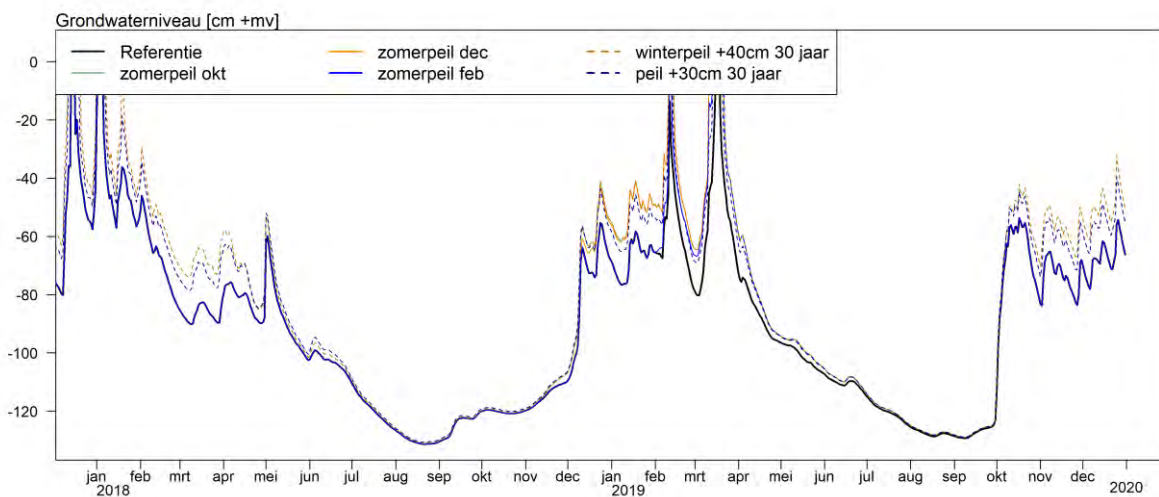
Hierbij dient te worden opgemerkt dat het effect op de grondwaterstand van maatregelen in het tertiair systeem berekend met het LHM wordt onderschat. Dit komt door het grove schaalniveau van het model met de modelcelgrootte van 250 x 250 m waardoor meerdere typen ontwatering (primaire, secundaire en tertiaire) met verschillende ontwateringsdiepte in één modelcel voorkomen. Hoe dit precies doorwerkt, is uitgelegd in Bijlage VI. Echter, het berekende proces dat het effect van waterconservering door maatregelen die alleen in het haarvatensysteem worden genomen grotendeels in de zomerperiode is uitgewerkt, is in meerdere studies aangetoond (De Louw et al., 2000, 2001, 2006). Ook SWAP-berekeningen voor de Lunterse Beek laten zien dat effecten op de grondwaterstand die in de winter en voorjaar worden opgebouwd door een stuwpeilverhoging, in de zomer volledig verdwenen kunnen zijn (Figuur 30). Dit komt door het wegstromen van water naar verder weggelegen ontwateringsmiddelen. Om dit weglekken (enigszins) te belemmeren is het dan ook nodig om in het gehele watersysteem de ontwateringsbasis te verhogen en niet enkel op één of enkele percelen.

Het effect op de zomergrondwaterstand is iets kleiner voor droge jaren als 2018 en 2019 dan voor gemiddelde of natte jaren (Figuur 31). Als er in de zomer neerslag valt, bijv. in de vorm van onweersbuien, en als het lukt om dit regenwater lokaal vast te houden, dan kan er aanvulling van grondwater optreden, als dat water aan maaiveld voldoende infiltreert in de bodem.

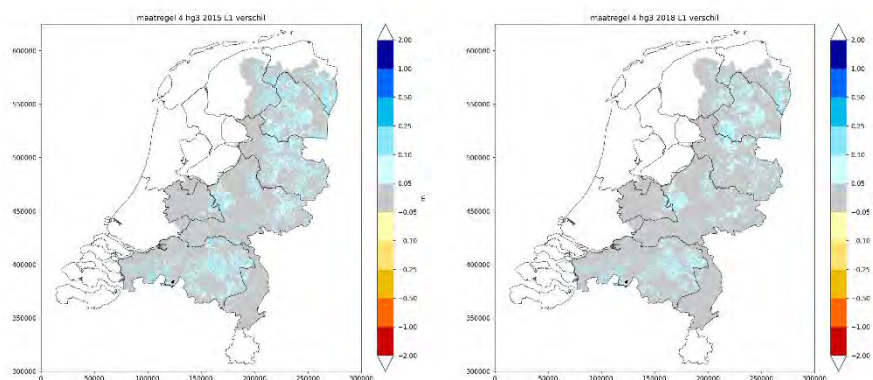
Een maatregel die effectiever kan zijn dan het verhogen van de ontwateringsbasis is het dempen van sloten waarmee de slootafstand en drainageweerstand wordt vergroot. Echter, dit type maatregel is in deze studie niet doorgerekend en er wordt aanbevolen om de effectiviteit in nadere detailstudies te verkennen.



Figuur 29. Het berekende effect van een slootbodempluiging van het tertiair ontwateringsstelsel van 30 cm op de HG₃, grondwaterstand op 1 april en de LG₃ (jaar 2015).



Figuur 30. Het effect op de grondwaterstand van een perceel in het focusgebied Lunterse Beek als gevolg van verschillende peilmaatregelen.



Figuur 31. Het berekende effect van een slootbodempluiging van het tertiair ontwateringsstelsel van 30 cm op de HG₃ voor 2015 en 2018.

Effecten op Ta/Tp

Voor de landbouw heeft de maatregel vooral effect in het begin van groeiseizoen. Door de stijging van de grondwaterstand treedt er minder transpiratiereductie op, i.c. is de werkelijke plantverdamping groter. Dit effect op de verdamping is groter voor droge jaren als 2018 en 2019 dan voor gemiddelde of natte jaren. Een verhoging van de grondwaterstand kan in het vroege voorjaar leiden tot natschade voor de landbouw.

Effecten op zomerkwel en zomerafvoer

De maatregel heeft nauwelijks effect op de zomerkwel. De gebiedseigen afvoer neemt in de wintermaanden iets af, ook piekbuien zullen enigszins vertraagd tot afvoer komen tenzij grondwaterstanden tot aan maaiveld stijgen. In de zomer is er nauwelijks effect op de gebiedseigen afvoer meer omdat bijna de totale in de winter en voorjaar vastgehouden waterhoeveelheid in de zomer is afgevoerd.

2) Peilbeheer en verondieping leggerwaterlopen

De grotere waterlopen en beken horen bij het secundair en primair systeem en zijn over het algemeen in beheer van het waterschap en worden dan aangeduid als leggerwaterlopen. Deze waterlopen en beken zijn breder en dieper dan het haarvatensysteem en hebben een zeer belangrijke functie bij de ontwatering (drainage) en afwatering (transportleiding) van een gebied. Ongeveer 15-20% van alle watergangen in een gebied is in beheer van het waterschap, de overige 80-85% is in particulier beheer, veelal landbouwers.

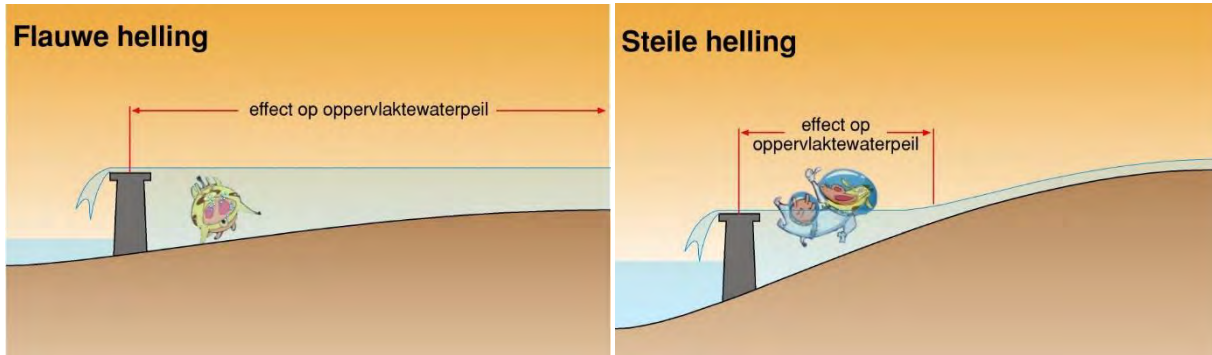
Veel leggerwaterlopen zijn gedimensioneerd op het verwerken van maatgevende afvoeren en er is voor het kwijt kunnen van het volume water vooral in de diepte naar ruimte hiervoor gezocht. Een diepere waterloop ontwatert meer. Met aanpassing van het doorstroomprofiel, waarbij gekozen wordt voor een veel ondiepere maar bredere waterloop (bijv. met een accoladeprofiel), blijft de afwateringsfunctie gehandhaafd maar wordt de ontwateringsfunctie verminderd. Daarnaast is er voor gestuwde waterlopen de mogelijkheid om te sturen met het stuwpeil. Voor grofweg 15 à 20% van de leggerwaterlopen (dit verschilt sterk per waterschap) kan het peil gestuurd worden door middel van een stuw. In een stuwvak kan op deze manier enige kubieke meter oppervlaktewater geborgen worden, veelal een gering watervolume. Het drainageniveau van het stuwvak is belangrijker waarmee de drainage van grondwater wordt belemmerd en er grondwater wordt vastgehouden. Vaak worden een zomerpeil en winterpeil gehandhaafd, waarbij het winterpeil vaak lager ligt. Het winterpeil kan meestal wel gehandhaafd worden, maar gedurende de zomerperiode en zeker tijdens extreem droge perioden is er in de gebieden zonder aanvoer vaak niet voldoende toestroom van grondwater (de zogenaamde basisafvoer) om het zomerpeil te handhaven en stroming te genereren om stagnant water of zelfs droogval te voorkomen. In voorkomende gevallen worden sinds enige tijd door waterschappen jaarrond-peilen gehanteerd, in plaats van winter- en zomerpeilen.

Effect op de freatische grondwaterstand

Het verondiepen van de slootbodem en peilverhoging leiden tot een significante verhoging van de grondwaterstand, zowel in de winter als in de zomer. Hoe groot het effect in de zomer is, hangt sterk af van of het verhoogde peil in de zomer gehandhaafd kan blijven. Dit is gemakkelijker in wateraanvoergebieden. Bij verondieping van de waterloop of beek ligt de ontwateringsbasis in droge tijden vast (in tegenstelling tot stuwpeilverhoging) en is dan hoger dan nu (positief effect). Bij gestuwde waterlopen moet daarnaast ook rekening worden gehouden met de stuwkromme, die mede een functie is van de bodemhoogte van de waterloop richting bovenstrooms. Dit houdt in dat bij de stuw de peilverhoging maximaal is en deze (grofweg) lineair afneemt met het verhang van de waterloop. Hoe steiler, des te kleiner het gebied is dat beïnvloed wordt en des te kleiner het effect is op de grondwaterstand (Figuur 32).

De hoofdwatgangen vormen de basis van het ontwateringsstelsel met regionaal gezien het minimale niveau tot waar grondwater nog afgevoerd kan worden. De beken liggen relatief het laagst in het landschap en zullen als laatste nog grondwater afvoeren (basisafvoer). Het in zijn totaal verhogen van de ontwateringsbasis van het secundair en primair stelsel leidt daarom naast de winter, ook tot een significante stijging van de grondwaterstand in de zomer. Dit zal gevolgen hebben voor bijv. de gewaskeuze en te gebruiken landbouwmachines. Het tijdelijk

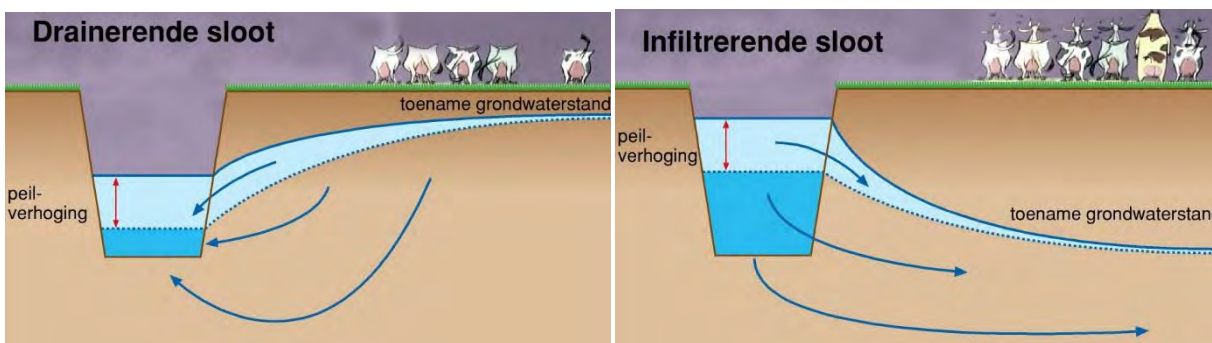
strijken van de stuwen in februari of maart om landbewerkingen en bemesting in het voorjaar beter mogelijk te maken, verlaagt de grondwaterstand in het voorjaar en zomer omdat een groot deel van het vastgehouden winterwater op dat moment wordt afgevoerd. Het is dan steeds de vraag of er voldoende neerslag valt ná het tijdelijk strijken van stuwen en/of ná de afvoer van perceelwater via regelbare drainage om nog enig effect op de grondwaterstand te kunnen hebben.



Figuur 32. Het effect van een stuw op het oppervlaktewaterpeil bij een steil (rechts) en flauw verhang (links).

Het grootste effect van een peilverhoging is de belemmering van de drainage van het grondwater. Als het peil hoger ligt dan de grondwaterstand treedt er infiltratie van het oppervlaktewater naar het grondwater op waardoor de grondwaterstand kan stijgen (Figuur 33) (deze infiltratie verloopt wel traag, zie § 3.3.3). Echter, wanneer de peilopzet op het allerlaatst gebeurt, bijvoorbeeld pas aan het eind van de winter, dan kunnen de effecten van infiltratie veel minder groot zijn waarbij slechts een klein deel van een perceel wordt beïnvloed door het opzetten van het peil.

De effecten kunnen daarnaast worden beïnvloed door de helling van het landschap. Ten eerste beïnvloedt een stuw een minder groot gebied bij een sterker verhang. Ten tweede werken effecten minder sterk door in het grondwater als het grondwatersysteem zich niet-lineair gedraagt, bijvoorbeeld doordat greppels en beken weer gaan lopen bij de stijging van de grondwaterstand.

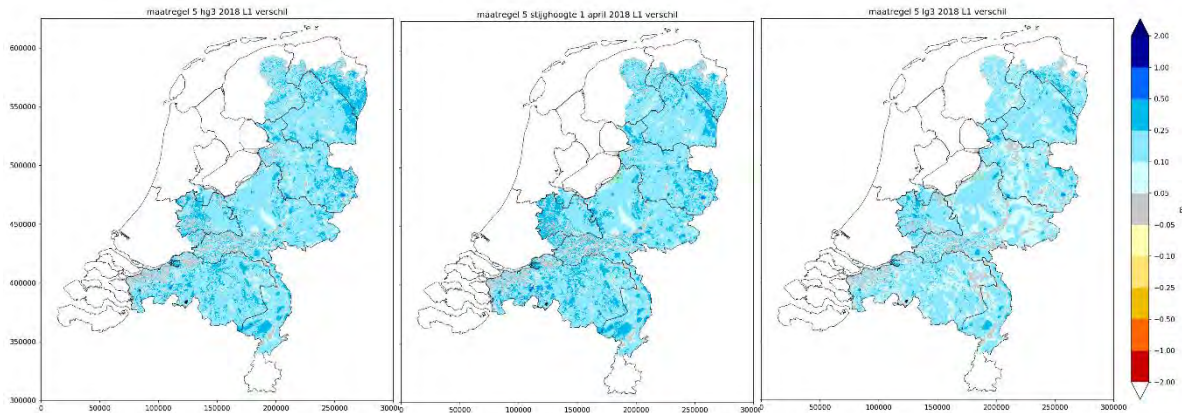


Figuur 33. Het effect van een peilverhoging op de grondwaterstand bij een drainerende (links) en infiltrerende (rechts) waterloop.

Door het grove schaalniveau van het LHM (modelcellen van 250x250 m) leidt het onderscheid maken tussen maatregelen in de verschillende typen systemen (primair, secundair, tertiair) niet helemaal tot de juiste resultaten. Voor veel modelcellen komen de verschillende systemen allemaal in één modelcel voor. Maatregelen in het ene systeem leiden direct (zonder extra weerstand) tot extra afvoer van het andere systeem. Zo worden de effecten van maatregelen in het tertiair systeem onderschat en in het secundair systeem overschat (zie ook Bijlage VI). De combinatie van maatregelen in de drie deelsystemen, dus overal peilverhoging 30 cm omhoog, geeft een realistischer beeld. Deze modelresultaten worden hieronder dan ook besproken. Overigens wordt ook zeker aanbevolen om in alle deelsystemen peil- en slootboderverhogingen door te voeren en geven deze modelresultaten daar inzicht in. Voor onderscheid in effecten van de afzonderlijke deelsystemen is een

grondwatermodel met fijnere resolutie vereist zoals de regionale modellen van de waterschappen (25x25 m).

Figuur 34 laat het effect op de grondwaterstand zien van een permanente peilverhoging van 30 cm van het tertiair, secundair en primair ontwateringsstelsel. Het effect op de HG3 (winter) en op 1 april is vergelijkbaar, in de zomer neemt het effect iets af maar is voor een groot gebied is de verhoging nog steeds 10 tot 20 cm.



Figuur 34. Het berekende effect van een permanente peilverhoging van 30 cm van het tertiair, secundair en primair ontwateringsstelsel op de HG3, grondwaterstand op 1 april en de LG3 (jaar 2018).

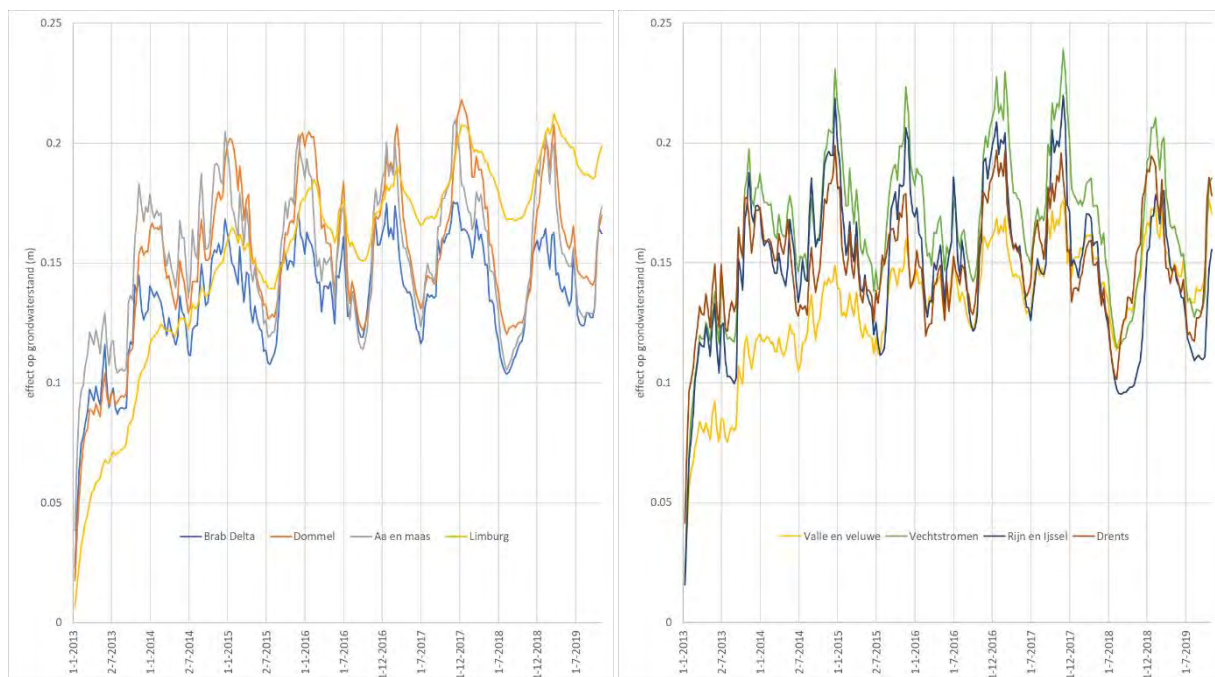
De berekeningen laten verder zien dat het effect in de eerste zomer na uitvoering van de maatregel nog niet maximaal is en het nog 1 of 2 winters duurt voor het maximale effect is bereikt. Dit is duidelijk zichtbaar in Figuur 35, waar het gemiddelde effect op de grondwaterstand per waterschap staat weergegeven (NB: we hebben niet alle waterschappen met zandgronden opgenomen). In de eerste zomer is het effect ongeveer 60% ten opzichte van het effect dat in de 2^e, 3^e, etc. zomer kan worden gehaald. Dit toont dus aan dat het effectiever is om permanent het peil te verhogen, of een slootbodempverhoging door te voeren, dan ad-hoc tijdelijk het stuwpeil te verhogen. Wanneer een peilverhoging niet permanent is, of wanneer het stuwpeil niet wordt of niet kan worden gehandhaafd, zal het effect in de zomer dus altijd minder zijn. Er dient te worden opgemerkt dat het weergegeven effect in Figuur 35 gemiddeld is voor het gehele waterschap. Voor ongeveer de helft van de gebieden zullen de effecten kleiner zijn, voor de andere helft groter. Hoe dit ruimtelijk is verdeeld kan op de kaarten worden bekeken waarvan Figuur 34 een voorbeeld geeft (zie ook droogteportaal.nl). Er is vooral een onderscheid te maken tussen de ontwaterde gebieden en de trage niet ontwaterde gebieden. Hoe sterker een gebied is ontwaterd, des te sneller de grondwaterstand zal reageren op een maatregel in het oppervlaktewatersysteem, maar de grondwaterstand zal dan ook weer sneller dalen door de ontwatering. Voor de trage gebieden wordt het effect langzaam opgebouwd maar blijft dan ook langer effectief door de trage ontwatering als gevolg van de grote afstand tot ontwateringsmiddelen.

In Figuur 35 is te zien dat voor de waterschappen Limburg en Vallei en Veluwe de vertraging van het effect op de grondwaterstand groter is dan voor de andere waterschappen. Dit komt door het relatief grote aandeel van hoger gelegen gebieden met diepere grondwaterstanden en de afwezigheid van ontwateringsmiddelen. Deze zogenaamde trage gebieden blijven significant stijgen, ook nog 5 tot 7 jaar na uitvoering van de maatregelen. Deze maatregelen vinden dus op grotere afstand plaats en werken vertraagd door. Langzaam wordt voor deze gebieden de grondwatervoorraad opgebouwd. Voorbeelden van deze gebieden zijn de Utrechtse heuvelrug, de Veluwe, de Maasduinen en Loonse en Drunense Duinen waar het effect na 7 jaar nog niet maximaal is. Zo wordt er een duidelijk correlatie gevonden tussen de diepte van de gemiddelde grondwaterstand (GLG) en het effect op de LG3 (Figuur 36). Hoe dieper de grondwaterstand in trage, minder ontwaterde gebieden, hoe groter het effect op de LG3 in 2018, indien de maatregelen structureel worden genomen.

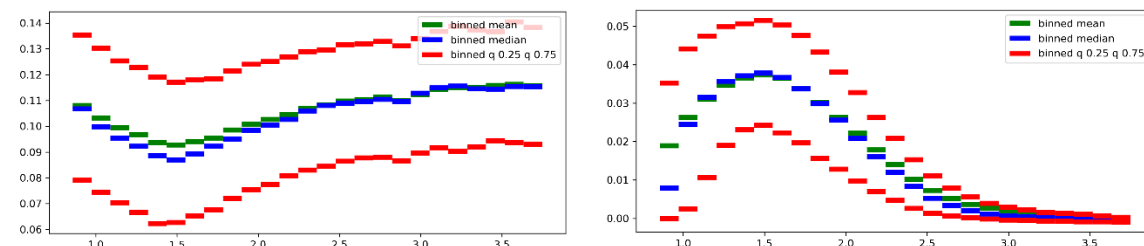
Figuur 35 laat verder zien het effect van maatregelen in het oppervlaktewatersysteem in de droge zomer van 2018

minder groot is dan in de nattere jaren daarvoor.

Het bijna gebiedsdekkende diffuse effect van deze maatregel kan alleen worden gerealiseerd als de ontwateringsbasis van het gehele ontwateringsstelsel wordt verhoogd door permanente peilverhoging via stuwen (er dient voldoende afvoer te zijn voor handhaving peil) of slootboderverhoging. Wanneer de peilverhoging niet in alle waterlopen wordt doorgevoerd, nemen andere waterlopen de drainagefunctie over en zullen effecten minder groot zijn. Wanneer er niet voldoende water beschikbaar is in de secundaire en primaire waterlopen om het stuwpeil te handhaven, zullen de effecten minder zijn dan gepresenteerd. Dit laat het modelscenario M5min zien waarbij voor een minder groot gebied het opgezette peil kan worden gehandhaafd. Effecten op de freatische grondwaterstand zijn voor dit minder optimistisch scenario gemiddeld 15 tot 20% minder groot zowel in de winter als zomerperiode, maar de processen en systeemwerking zijn vergelijkbaar. Een slootboderverhoging is daarom altijd effectiever omdat het minimale ontwateringsniveau altijd blijft gehandhaafd wanneer het grond- en oppervlaktewatersysteem gedurende droge perioden aan het dalen is.



Figuur 35. Het berekende gemiddelde effect op de freatische grondwaterstand per waterschap als gevolg van een peilverhoging van 30 cm van het tertiair, secundair en primair ontwateringsstelsel.

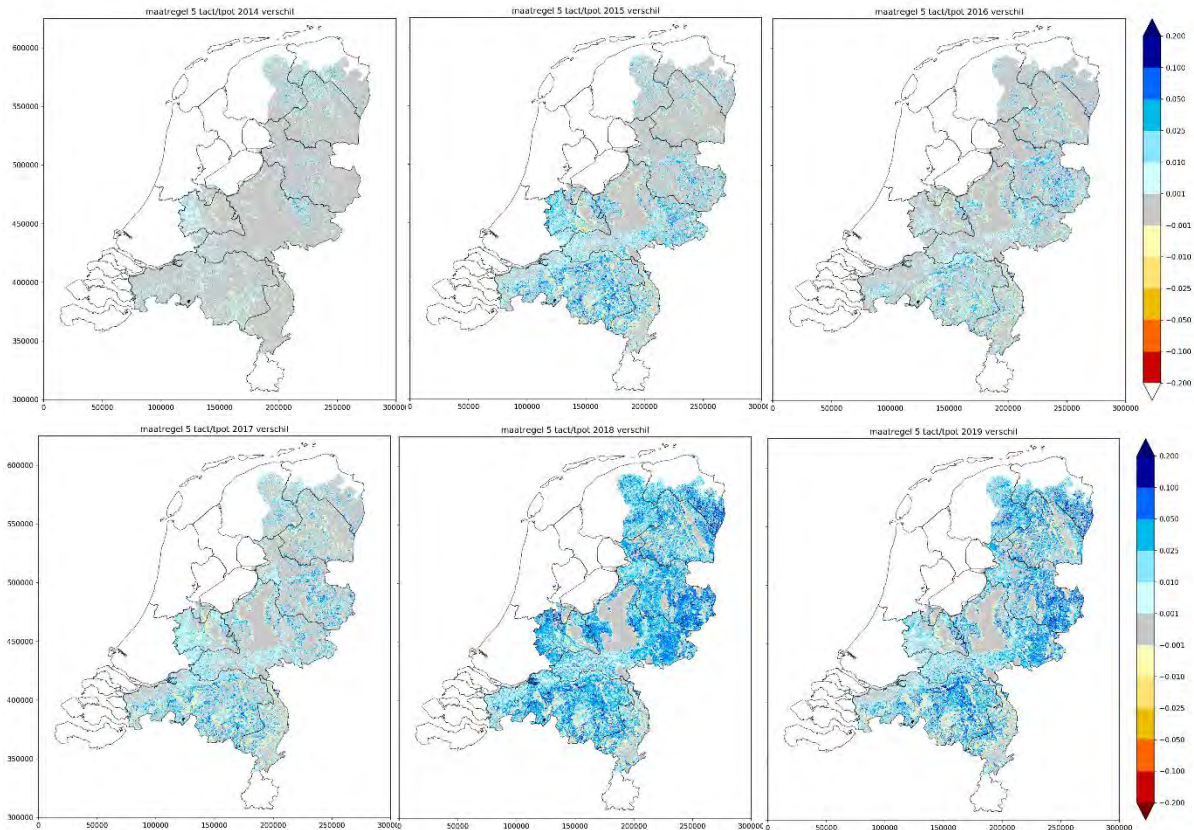


Figuur 36. Correlatiediagrammen tussen berekende GLG in m-mv (x-as) en het effect op de LG₃ in m (links) en Ta/Tp (rechts) als gevolg van een permanente peilverhoging van 30 cm van de tertiaire, secundaire en primaire waterlopen

Effect op Ta/Tp

De grondwaterstandsverhoging leidt tot een toename van de werkelijke transpiratie (Figuur 37) en dus tot een toename van de gewasopbrengst, omdat er dan meer grondwater via capillaire opstijging de wortelzone kan bereiken. De toename van de werkelijke transpiratie als gevolg van deze maatregel is groter naarmate het jaar

droger is en er dus op grote schaal droogtestress optreedt. In een meer gemiddeld jaar wat betreft het cumulatieve neerslagtekort, bijvoorbeeld 2014 en 2016, was er nauwelijks sprake van transpiratiereductie (i.c. werkelijke transpiratie vrijwel gelijk aan potentiële transpiratie).



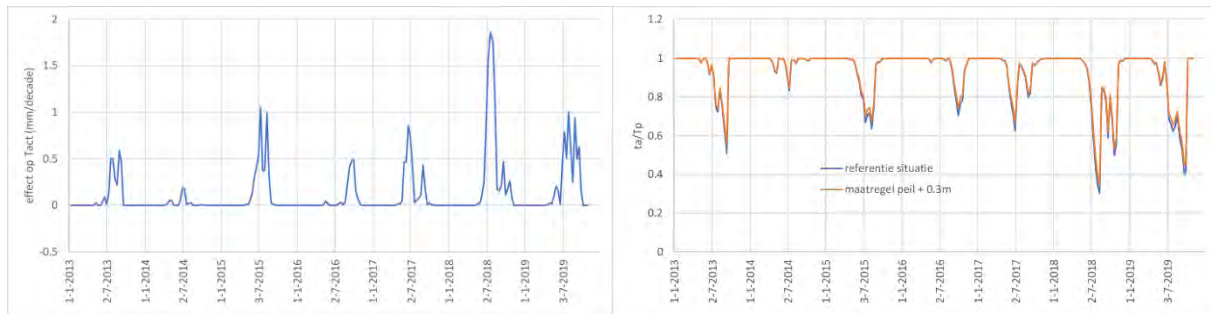
Figuur 37. De toename van de werkelijke transpiratie (toename T_a/T_p) als gevolg van een permanente peilverhoging van 30 cm van de tertiaire, secundaire en primaire waterlopen voor verschillende jaren met tussen haakjes het doorlopend neerslagtekort (De Bilt): 2014 (99 mm), 2015 (210 mm), 2016 (98 mm), 2017 (164 mm), 2018 (358 mm), 2019 (218 mm).

De verschillen tussen de jaren zijn ook goed zichtbaar in Figuur 38 waarin de effecten zijn gemiddeld voor het gehele beheergebied van waterschap De Dommel. Gemiddeld zijn de effecten op de werkelijke transpiratie klein, voor 2018 maximaal 1,8 mm per decade (10 dagen) en dit geldt ook voor T_a/T_p . Ook uit Figuur 39 kan worden opgemaakt dat effecten van de grondwaterstandsverhoging op de werkelijke transpiratie niet heel groot zijn. De gebieden met de grootste effecten laten een stijging van de transpiratie reductie-factor T_a/T_p van 5 tot 15% zien voor 2018.

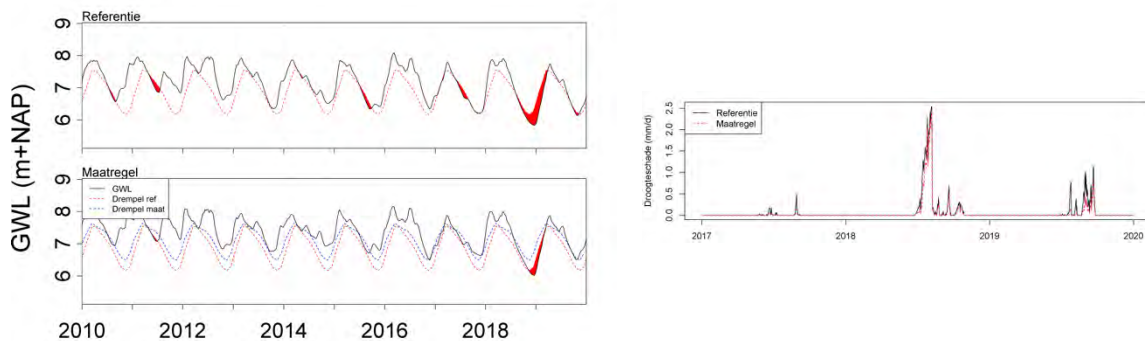
Er zijn geen effecten voor gebieden met een diepe grondwaterstand (> 3 m-mv) zoals de meeste kerninfiltratiegebieden, omdat er vanaf deze diepte geen capillaire opstijging mogelijk is (Figuur 37). Voor de hele ondiepe grondwaterstanden is het effect minder groot omdat hier nauwelijks transpiratie-reductie optreedt door de capillaire opstijging. De grootste effecten van grondwaterstandsverhogingen door peilmaatregelen (maar ook andere maatregelen) op de werkelijke transpiratie worden dan ook gevonden voor gebieden met een grondwaterstand tussen de 1 en 2 m-m.v., met een maximum voor grondwaterstanden 1,5 m-m.v., zoals het correlatiediagram in Figuur 36 laat zien. Hierin is ook te zien dat het effect op de LG3-grondwaterstand een dip vertoont, vermoedelijk door de toegenomen transpiratie.

SWAP-berekeningen tonen ook aan dat het effect op de transpiratie zeer sterk afhangt van de diepte van grondwaterstand in relatie tot capillaire opstijging. Figuur 39 laat zien dat bij een significante verhoging van de

grondwaterstand het effect op transpiratie groter is in 2019 dan in 2018. Dit komt door de lage grondwaterstand (< 3 m) in 2018 vanaf waar geen capillaire opstijging naar de wortelzone mogelijk is. Met een verhoging van 20-30 cm komt de grondwaterstand nog niet hoog genoeg om voor capillaire nalevering te zorgen.



Figuur 38. Het effect op de werkelijke transpiratie (T_a) (links) en T_a/T_p (rechts) gemiddeld voor het waterschap De Dommel als gevolg van een permanente peilverhoging van 30 cm van de tertiaire, secundaire en primaire waterlopen.



Figuur 39. Grondwaterstand (links) berekend met SWAP met en zonder maatregel (stopzetten onttrekkingen leidt tot minder wegzigging) en het effect op de grondwaterdroogte van de peilverhoging (rode vlakken) voor het focusgebied Turfvaart; droogteschade (rechts) berekend met SWAP voor de situatie met en zonder maatregel.

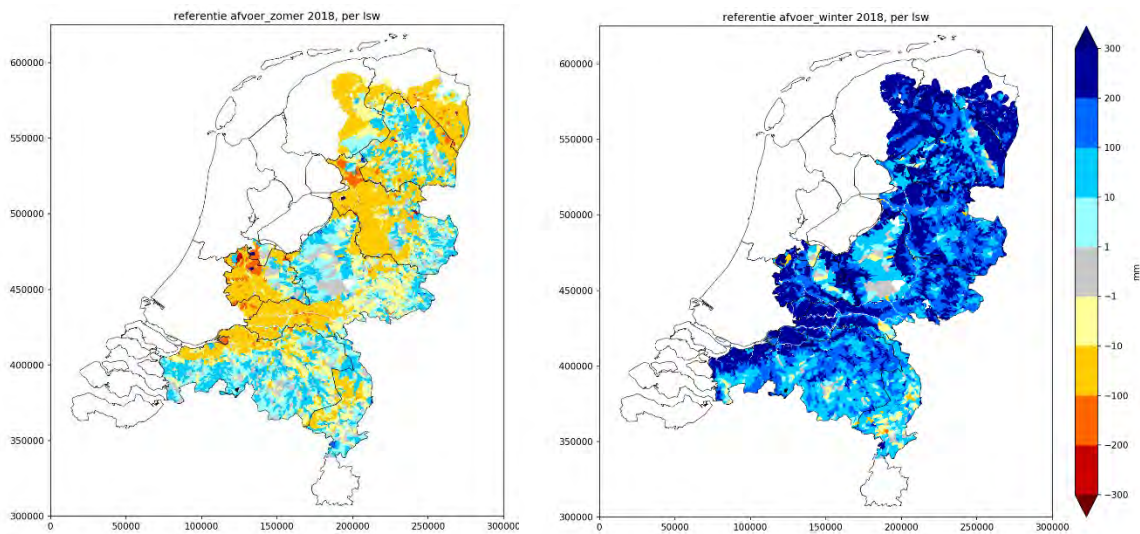
Effect op kwel

De grondwaterstandstijging laat een toename zien van de stijghoogte in de onderliggende watervoerende pakketten. Hoe meer weerstand (door aanwezigheid kleilagen) aanwezig is tussen het freatisch watersysteem en het watervoerend pakket, des te minder groot de absolute effecten naar de diepte zijn, maar des te groter het gebied is waar de effecten optreden. Deze stijghoogte is de drijvende kracht achter kwel en op locaties waar de freatische grondwaterstand minder stijgt (bijvoorbeeld in beekdalen met hoge grondwaterstanden) dan de stijghoogte, treedt een toename van de kwel flux op. Het verschilt per gebied en per jaar of er netto een meer of minder grote kwel flux optreedt. Voor een droog jaar als 2018 geldt voor meer gebieden een netto toename van de kwel dan voor gemiddelde jaren.

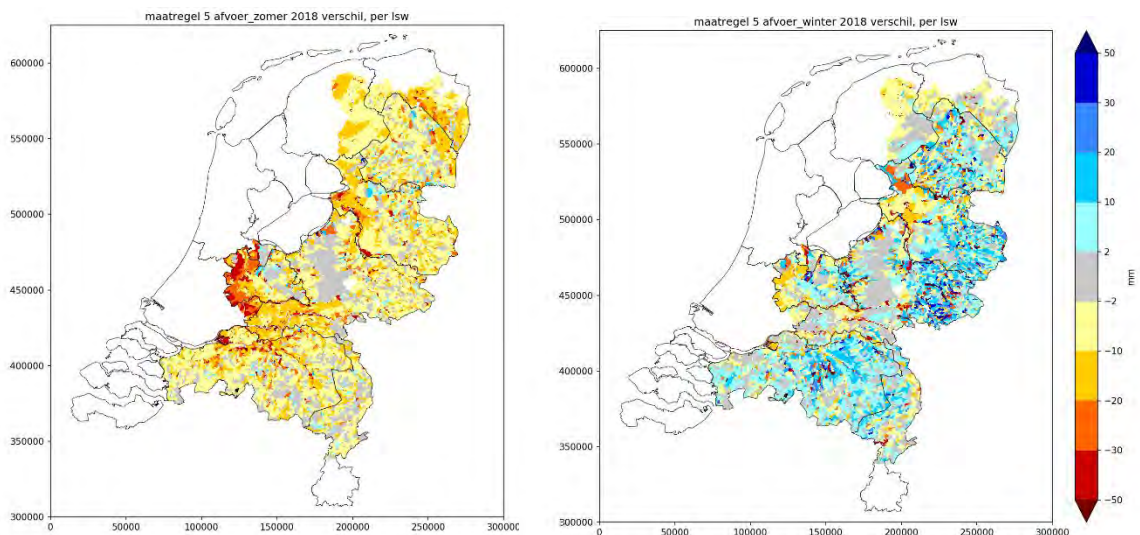
Effect op gebiedseigen afvoer

Het effect op de gebiedseigen afvoer, i.c. op het grondwater dat in een stroomgebied wordt gedraineerd en afgevoerd door het primair, secundair, tertiair systeem en door buisdrainage, is verschillend voor de zomer en de winter (Figuur 40 en Figuur 41). In de eerste winter na uitvoering van de maatregel neemt de netto winterafvoer af, want het grondwater wordt immers vastgehouden. In de opvolgende zomer neemt de afvoer nog meer af omdat er nog meer grondwater wordt vastgehouden. In de daaropvolgende winters wordt er juist meer afgevoerd dan in de situatie zonder maatregel en een groot aandeel hiervan komt voor rekening van toegenomen maaiveldafvoer, omdat grondwaterstanden voor sommige gebieden gedurende de natste perioden boven maaiveld uitstijgen. De grondwatervoorraad wordt opgebouwd en grondwaterstanden stijgen. Wanneer het effect op de

grondwaterstand (op jaarbasis gemiddeld) niet verder meer toeneemt, ontstaat er een nieuwe evenwichtssituatie op jaarbasis waarbij het neerslagoverschot weer (bijna) in zijn geheel wordt afgevoerd (exclusief onttrekkingen). De maaiveldafvoer is dan gedurende de winterperiode significant toegenomen, als ook buisdrainage.



Figuur 40. De referentie netto gebiedseigen grondwaterafvoer zomer (juni, juli, augustus) en winter (december, januari, februari) in 2018 per LSW-gebied (Local Surface Water; in mm per drie maanden). Positief is netto afvoer en negatief is netto infiltratie.



Figuur 41. Het effect op de netto gebiedseigen zomer en winterafvoer van 2018 (in mm per 3 maanden) als gevolg van een permanente peilverhoging van 30 cm van de tertiaire, secundaire en primaire waterlopen.

Door deze maatregel is er dus een verschuiving gedurende het jaar opgetreden met meer gebiedseigen afvoer in de winter (met toegenomen maaiveldafvoer en buisdrainage) en minder in de zomer, en dit manifesteert zich bij gemiddeld hogere grondwaterstanden. De zomerafvoer blijft door deze maatregel dus achter ten opzichte van de referentiesituatie. De basisafvoer wordt door deze maatregel dus niet verhoogd maar juist verlaagd, omdat de drainagebasis van alle ontwateringsmiddelen met 30 cm wordt verhoogd. De basisafvoer zou wel kunnen worden verhoogd door andere type maatregelen in het ontwateringsstelsel, maar dit vergt maatwerk waarbij vermoedelijk de ontwateringsbasis van de grotere waterlopen en beken niet of minder moet worden verhoogd om gedurende de zomer voldoende grondwater te kunnen afvoeren of het dempen van slootjes en waterlopen zodat de drainageweerstand significant toeneemt en de grondwaterafvoer wordt vertraagd. Het verhogen van het

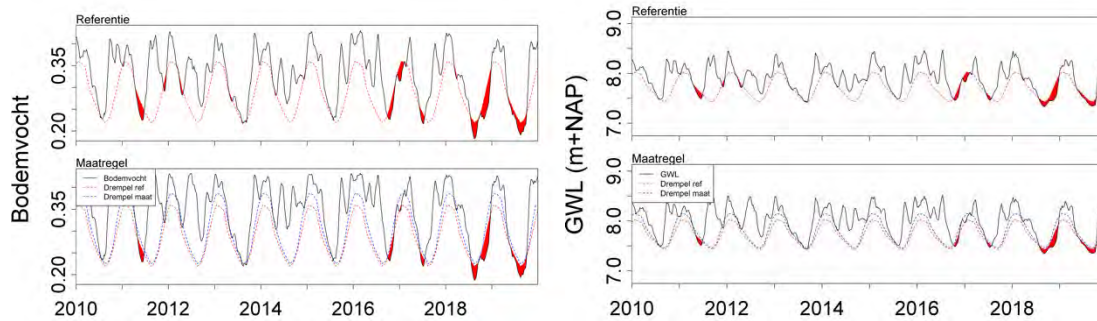
beekpeil druist echter weer in tegen de nodige vernatting langs beken om natuur niet verder te laten verdrogen. Een andere mogelijkheid is tijdelijk peilen te verlagen om basisafvoer weer op gang te brengen. Immers, er is een grote grondwatervoorraad gedurende de winterperiode opgebouwd.

In Tabel 10 staan voor het waterschap De Dommel (zanddeel) de waterbalanstermen (uit het LHM) weergegeven en de effecten op de balans als gevolg van de peilverhoging. De waterbalansanalyse laat zien dat er voor de jaren 2013-2018 als gevolg van de peilverhoging 182 mm minder netto grondwater is afgevoerd (gebiedseigen afvoer via beken sloten en buisdrainage). Dit leidde tot 104 mm extra maaiveldafvoer, 8 mm extra transpiratie, 8 mm minder grondwateronttrekking voor beregening en 6 mm minder beregening. Voor deze periode blijft er 72 mm netto meer (grond)water in het systeem, dat zich uit in een permanente grondwaterstandsstijging en meer berging van bodemvocht in de onverzadigde zone. De waterbalans laat dus duidelijk zien dat een groot deel van het vastgehouden grondwater tot afvoer komt als maaiveldafvoer (in dit geval 57%). Dit kan als ongewenst worden beoordeeld wanneer het landbouwpercelen betreft omdat dit leidt tot piekafvoeren en geassocieerde afspoeling van meststoffen en bestrijdingsmiddelen. De grondwaterstandsstijging leidt tot een geringe toename van de transpiratie en 11% minder beregening. De effecten op de transpiratie zijn juist voor het droge jaar 2018 veel groter dan voor de jaren 2013-2017. Echter, met deze maatregel zou slechts 7% op beregening in het jaar 2018 zijn bespaard.

Tabel 10. Waterbalanstermen in de referentiesituatie en effecten erop als gevolg van een permanente peilverhoging van 30 cm van de tertiaire, secundaire en primaire waterlopen, voor de zes jaren 2013-2018 en voor het droge jaar 2018. Eenheid in mm voor de aangegeven periode: zes jaar 2013 t/m 2018 en één jaar 2018. Gegevens voor beheergebied waterschap De Dommel als geheel.

	Referentie	Effect	Referentie	Effect
	2013-2018	2013-2018	2018	2018
Neerslag (in)	4424.5	0.0	598.2	0.0
ET-actueel (uit)	3202.0	7.8	501.0	6.6
Gebiedseigen afvoer (uit)	840.8	-182.4	115.5	-27.0
Maaiveldafvoer (uit)	117.8	103.7	16.0	15.8
Drinkwater + industrie (uit)	294.0	0.0	49.0	0.0
GW-onttrekking beregening (uit)	69.5	-7.6	25.2	-1.8
Beregening (in)	55.6	-6.1	20.1	-1.4
TOTAAL IN	4480.0	-6.1	618.4	-1.4
TOTAAL UIT	4524.1	-78.5	706.6	-6.4
IN-UIT	-44.1	72.4	-88.3	5.0

Uit de lokale berekeningen voor de focusgebieden blijkt dat de effecten van maatregelen sterk afhankelijk zijn van de gebiedskenmerken. In sommige focusgebieden kunnen de maatregelen maandenlang effect hebben, terwijl in andere gebieden de effecten al na een paar weken verdwenen zijn. Voor het verhogen van het peil in het oppervlaktewater geldt uiteraard dat dit alleen effect heeft als er nog voldoende water beschikbaar is om vast te houden, waar in de simulaties vanuit wordt gegaan. Het effect van de verhoging van de stuwpeilen op de grondwaterstanden in de focusgebieden is relatief klein, zeker in gebieden met relatief diepe grondwaterstanden. In gebieden met ondiepere grondwaterstanden, zoals de Lunterse Beek, is een effect te zien op (de tekorten in) bodemvocht en grondwater (Figuur 42) na een structurele verhoging gedurende 30 jaar. Het verschil is met name zichtbaar in de verschillen tussen de drempelwaarde (20^{ste} percentiel) voor de referentiesituatie en de situatie met maatregel. De peilverhoging leidt tot een kleine afname in de tekorten, maar droogte treedt nog steeds op. Grondwaterstanden en het bodemvocht worden vooral in de winter hoger. Hierdoor is ook geen afname van de droogtestress in de vegetatie zichtbaar, en neemt de zuurstofstress in winter enigszins toe. Dit bevestigt dat het effect van de maatregel van stuwpeilverhoging alleen dan kan worden gerealiseerd, als de ontwateringsbasis van het gehele ontwateringsstelsel wordt verhoogd door permanente peilverhoging via stuwen of slootboderverhoging. Op perceelschaal is het effect van de peilverhoging minder zichtbaar.



Figuur 42. Effect van een structurele stuwpeilverhoging (+30 cm voor het gehele jaar) op bodemvocht (links) en grondwaterstand (rechts) in het stroomgebied van de Lunterse Beek (SWAP-berekening). Verhoging van alleen stuwpeilen is onvoldoende om de droogte op te heffen.

3) Reductie ontwatering in beekdalen

De beken vormen het benedenstroomse uiteinde van een stroomgebied waar het water zich verzamelt en vervolgens het stroomgebied verlaat. Het zijn de laagste delen van een stroomgebied die de basis vormen van het ontwateringsstelsel. Met het verhogen van de beekbodem of het beekpeil in het beekdal wordt de ontwateringsbasis op de laagste delen in het watersysteem verhoogd, waardoor met name in de droge tijden van het jaar grondwater wordt vastgehouden. Immers, bij het voortschrijden van de zomerperiode, wanneer het grondwatersysteem langzaam leegloopt, is het beekdal het laatste en laagste deel van het gebied dat nog grondwater draineert (basisafvoer). Het is effectief deze afvoerroute van grondwater te belemmeren. Het gevolg is echter wel dat de basisafvoer (in ieder geval dat deel dat in het beekdal wordt gegeneerd) afneemt.

Beekbodemverhoging of, als dit niet mogelijk is, beekpeilverhoging zijn effectieve maatregelen om deze ontwateringsbasis te verhogen. Het beekdal zal hierdoor significant vernatten, hetgeen positief is voor aanwezige grondwaterafhankelijke natuur en droge landbouwpercelen op de flanken. Wanneer de landbouwfunctie in de lage delen van het beekdal aanwezig is, wordt het daadwerkelijk uitvoeren van deze maatregel moeilijker, omdat vernatting dan meestal niet gewenst is. Door het geringe verhang van de beek werkt een peilverhoging of slootbodemverhoging over een grote afstand stroomopwaarts door (Figuur 32). Het laten hermeanderen van rechtgetrokken beken (NB: niet doorgerekend) helpt ook bij het creëren van een hogere ontwateringsbasis. Hermeandering zonder expliciet de ontwateringsbasis te verhogen zal de drainage van grondwater niet beperken.

3.3.3 Optie 2: Afwatering - bergen en aanvoeren

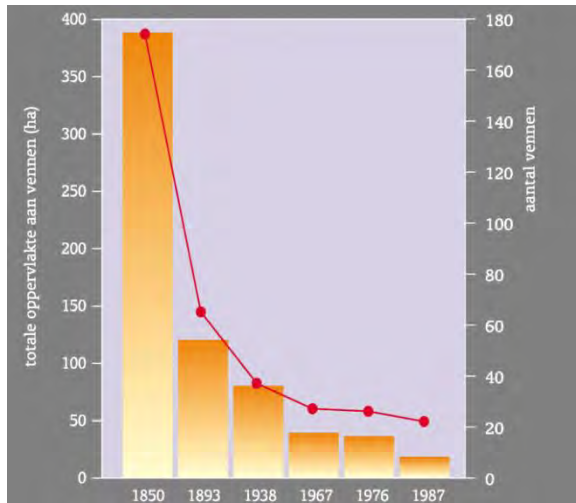
Het afwateringsstelsel is grotendeels gelijk aan het ontwateringstelsel, dus het huidige oppervlaktewaterstelsel vervult beide functies. Ontwatering is bedoeld om grondwaterstanden voldoende laag te houden voor functies als landbouw, infrastructuur en bebouwing. Afwatering heeft de functie het transport van water uit een gebied of transport van het ene gebied naar het andere, inclusief wateraanvoer. De dubbelfunctie van ontwatering én afwatering is meteen ook een belangrijke oorzaak dat de ontwatering te sterk is doorgeslagen, waardoor er te snel en te veel water wordt afgevoerd. Veel waterlopen zijn gedimensioneerd om maatgevende afvoeren te kunnen afvoeren waarbij de ruimte in de diepte is gezocht, met als gevolg een te diepe ontwatering. Aanpak van ontwatering dient daarom hand in hand te gaan met aanpak van afwatering.

1) Bergen van oppervlaktewater in waterlopen, retentiegebieden en (oude) vennen

Het oppervlak aan beken, waterlopen en sloten is relatief, ten opzicht van het totale areaal, klein. De mogelijkheden om daarin water te bergen voor gebruik in droge tijden zijn daarom beperkt. De hoeveelheid kubieke meter water die maximaal geborgen kan worden in het open-water-systeem is beperkt, vergeleken met de hoeveelheid grondwater dat in het achterliggende stroomgebied vastgehouden kan worden. Misschien nog wel belangrijker is het feit dat oppervlaktewater gemakkelijk wegstroomt, zeker in vergelijking tot de snelheid van grondwaterstroming, die weerstand ondervindt van de ondergrond. Met stuwen wordt de afvoer enigszins afgeremd, maar het is een illusie dat hiermee veel water kan worden geborgen. Immers, als er afvoer op een waterloop zit, dan vult de waterloop zich met water waarna het alsnog met dezelfde snelheid het gebied verlaat. De berging zit hem dan alleen in het volume dat zich achter de stuw kan vullen en dat is beperkt. De afvoer kan ook enigszins worden afgeremd door een waterloop niet of minder te maaien en ook hermeandering leidt tot een iets tragere afvoer (en een kleiner verhang, wat ook de afvoer vertraagt). Echter, zoals met stuwen wordt hiermee nauwelijks water geborgen en zijn ze vooral bedoeld voor hogere peilen en daarmee hogere grondwaterstanden. Berging van overtollig water in waterlopen kan wel een belangrijke functie hebben om piekafvoer te reduceren. Ruimte zoeken in de breedte via accoladeprofielen biedt daarmee de sterke voorkeur om de ontwatering zoveel mogelijk te beperken.

Water bergen in overloopgebieden, in bebouwd gebied of andere type retentiegebieden biedt lokaal meer soelaas, omdat meer volume voor berging beschikbaar is en de afvoer op natuurlijke wijze wordt geremd. Natuurgebieden kunnen daarbij een belangrijke functie vervullen door het water vast te houden, zoals in het bodem-watersysteem in beekdalen, vennen, of hoogveengebieden. Door het water vast te houden waar het valt wordt de afvoer van water uit een gebied geremd en blijven de natuurgebieden langer nat. Te denken valt ook aan het aanwijzen van (extensieve) landbouwpercelen als retentiegebied (bijv. natuur-inclusief) waar gedurende natte perioden water wordt geborgen om wateroverlast benedenstrooms te voorkomen of reduceren.

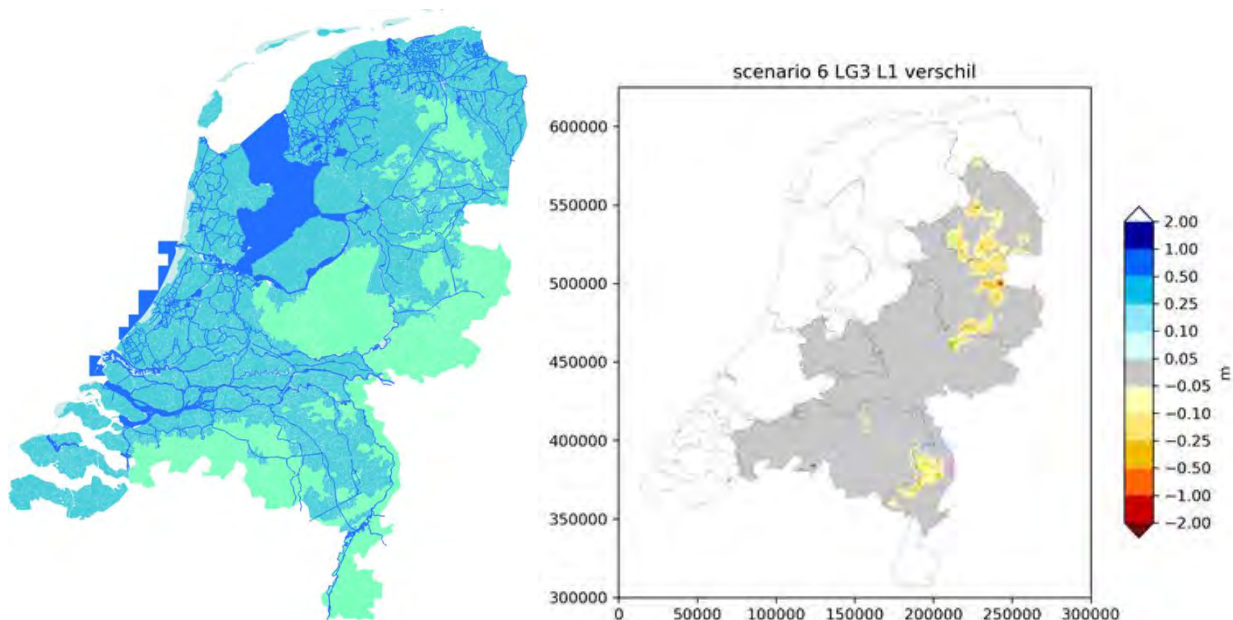
Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze retentiegebieden (zowel in bebouwd, landbouw als natuurgebied) hoofdzakelijk een functie hebben om wateroverlast te voorkomen (bergen van piekafvoeren). Als ze bovenstrooms in het stroomgebied een functie kunnen vervullen als gebied voor grondwateraanvulling (zie richtinggevende maatregelen), dan is dat gunstig voor de waterhuishouding. Voorbeelden hiervan zijn landbouwpercelen als retentiegebied of gebieden waar herstel van oude vennen heeft plaatsgevonden. Sinds 1850 is het aantal vennen in het zandgebied gedecimeerd (Figuur 43). Deze vennen hadden naast een natuurfunctie een belangrijke retentiefunctie en voeding van het grondwatersysteem via vertraagde infiltratie. Herstel van deze vennen helpt dus (hoewel in kleine mate) zowel in bestrijding van droogte als wateroverlast.



Figuur 43. Afname van het aantal vennen (bolletjes, Y-as rechts) en van de totale oppervlakte aan vennen (staafdiagram; Y-as links) sinds 1850 tot en met 1987 voor het stroomgebied van 't Merkske (Bron: De Louw en Stuurman, 2000).

2) Wateraanvoer oppervlaktewater

In bepaalde delen van het zandgebied is wateraanvoer mogelijk vanuit de rivieren Maas en Rijn via aanwezige kanalen (Figuur 44). Dit aan het watersysteem toegevoegde water wordt gebruikt voor het stromend en watervoerend houden van beeksystemen, voor de beregning van landbouwpercelen (als er geen verbod is ingesteld) en het handhaven van het oppervlaktewaterpeil voor bijvoorbeeld gebieden rondom hoogveengebieden zoals de Peel. Een deel van het water infiltrateert in de bodem en zorgt voor een stijging van de grondwaterstand. Figuur 44 laat het effect zien op de LG3 wanneer gestopt wordt met wateraanvoer. Voor een gering areaal is dit effect groter dan +5 cm, het effect is daarmee beperkt. Dit is mede te verklaren door het feit dat infiltratie vanuit waterlopen richting het perceel langzaam verloopt.



Figuur 44. De wateraanvoergebieden in blauw zoals verwerkt in het LHM-versie 3.4 (links) en het effect van het stoppen van wateraanvoer op de LG3 in 2018 (resultaat uit Fase 1).

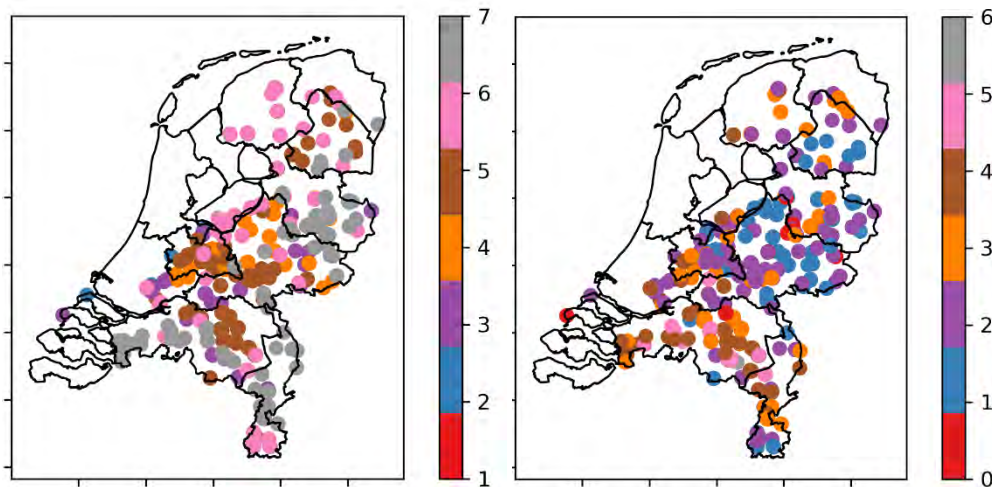
Echter, meer water vanuit de rivieren aan het systeem toevoegen kan meer effectief zijn wanneer het netwerk aan wateraanvoer-waterlopen ook aansluit op haarvaten. Mogelijk zullen hier en daar pompen nodig zijn om het water zo hoog mogelijk in het systeem in krijgen. Hier kan het worden gebruikt voor beregening of kan het de grondwatervoorraad aanvullen (via infiltratie). Elke kuub die op deze manier voor beregening wordt gebruikt, komt niet ten laste van het grondwatersysteem en elke kuub die de bodem insijpelt vult de grondwatervoorraad aan. Dit laatste met voorkeur in de gebieden met diepe grondwaterstanden (zie richtinggevende maatregelen optie 4).

3.3.4 Optie 3: Grondwateronttrekkingen - minder eruit

Onttrekkingen hebben effect op de waterbalans van een gebied; er wordt immers grondwater onttrokken uit het grondwatersysteem. In het zandgebied wordt er met name grondwater onttrokken voor drinkwater, voor proceswater in de industrie, en voor de landbouw voor het beregenen van gewassen. Het tijdelijk of permanent aanpassen van het onttrekkingsdebiet, het verplaatsen van winningen, het compenseren van de effecten van onttrekkingen door extra infiltratie en beregeningsbeleid zijn allemaal mogelijkheden om het grond- en oppervlaktewatersysteem te beïnvloeden en daarmee effecten van droogte zo mogelijk te reduceren.

1) Onttrekkingen grondwater voor proces-en drinkwater

De grotere winningen, hoofdzakelijk voor drinkwater, onttrekken hun grondwater uit de diepere watervoerende lagen, veelal dieper dan 50 m-maaiveld. Figuur 45 toont de locaties van diepe winningen, die grondwater voor drinkwater onttrekken uit diverse watervoerende pakketten. Tevens is de LHM-modellaag weergegeven waaruit wordt onttrokken; LHM kent zeven modellagen die watervoerende pakketten representeren en scheidende kleilagen tussen de watervoerende pakketten. De LHM-lagen zijn tot een watervoerend pakket samengevoegd wanneer de hydraulische weerstand tussen de lagen kleiner is dan 200 dagen. In <http://www.nhi.nu/nl/> staat uitgebreid beschreven welke geologische formaties tot welke LHM-modellaag behoren.



Figuur 45. De LHM modellaag (links) en het watervoerend pakket waaruit grondwater onttrokken wordt voor bereiding van drinkwater (rechts).

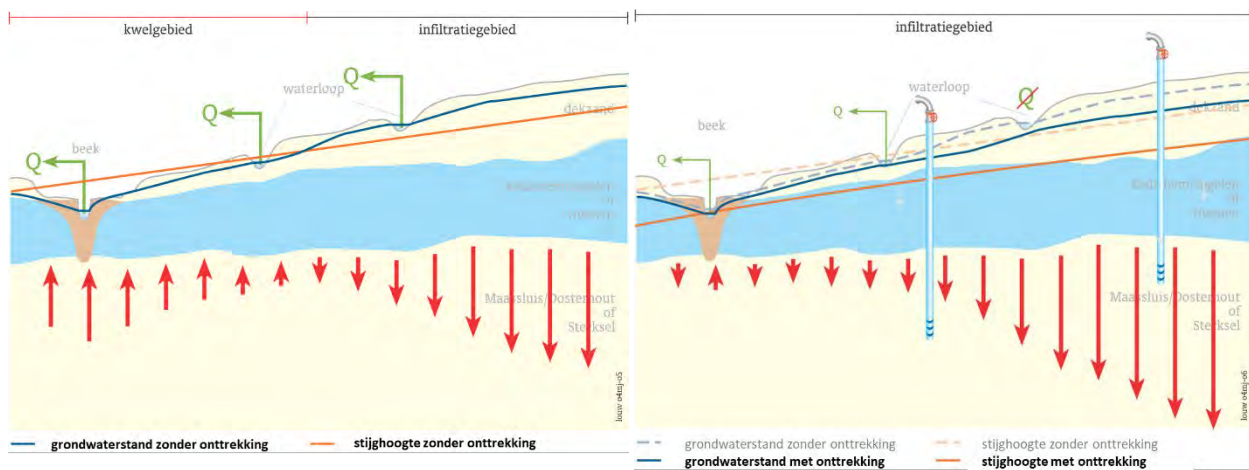
De richtinggevende maatregel 'het reduceren van grondwateronttrekkingen' werken anders dan de maatregelen die in het ondiepe freatisch systeem worden genomen. Effecten strekken zich lateraal uit in het watervoerend pakket waaruit wordt onttrokken en vervolgens verticaal richting het ondiepe systeem. Het hangt af van de hydraulische weerstand tussen de onttrekking en het freatisch systeem hoe groot de effecten op de stijghoogte in het watervoerend pakket zijn waaruit onttrokken wordt en tot op welke afstand deze effecten lateraal uitwerken.

Bij een grote weerstand (bijvoorbeeld 5.000 dagen) daalt de stijghoogte sterker en voor een groter gebied (lateraal) dan bij een lage weerstand. Dit wordt als volgt verklaard. Het is belangrijk te beseffen dat er nauwelijks berging mogelijk is in een verzadigd zandpakket, immers alle poriën zijn al gevuld met water. Wanneer de

onttrekkingskegel in evenwicht is met het grondwatersysteem en niet meer groeit, wordt iedere onttrokken druppel vanuit het freatisch systeem aangevuld. Hoe groter de hydraulische weerstand, des te sterker de stijghoogte over een groter gebied moet dalen om de druppels vanuit het freatisch systeem aangevuld te krijgen. Wanneer het effect van de onttrekking nog niet-stationair is, dus als de onttrekkingskegel nog groeit (of krimpt) in omvang, wordt een deel van de hoeveelheid onttrokken water uit de berging van het watervoerende pakket gehaald en dit aandeel neemt in de tijd af en de aanvulling vanuit het freatisch systeem toe. De hoeveelheid onttrokken water uit de berging van het watervoerend pakket is meestal klein ten opzichte van de hoeveelheid aanvulling vanuit het freatisch systeem. Dit betekent dat veranderingen in onttrekkingsdebieten meestal vrijwel direct (orde dagen) leiden tot het inzetten van de daling van de freatische grondwaterstand (freatische berging) en afname van de drainage door sloten en beken (of toename van de oppervlaktewaterinfiltratie). Voor onttrekkingen onder zeer slecht doorlatende kleilagen met grote hydraulische weerstanden, zoals eigenlijk alleen in de Centrale Slenk het geval is, is de vertraging groter. Bovendien wordt door de grote weerstand het effect op het freatisch systeem over een zeer groot gebied uitgesmeerd.

Bij een onttrekking die in evenwicht met het grondwatersysteem verkeert (onttrekkingskegel is stabiel), is de som van de afname van de freatische berging (die zich uit in grondwaterstandsverlaging), de afname van de afvoer (of toename van oppervlaktewaterinfiltratie) en de afname van de transpiratie (klein aandeel t.o.v. de eerste twee), gelijk aan de hoeveelheid onttrokken grondwater. In een gebied met veel ontwaterende sloten zal het effect van een onttrekking op de grondwaterstand minder groot zijn dan voor een gebied zonder sloten, omdat effecten gecompenseerd worden door minder afvoer, er hoeft dus minder uit de freatische berging te komen. Voor de trage gebieden zonder sloten, kan na de start van een winning nog lange tijd de grondwaterstand dalen omdat het water grotendeels uit de freatische berging moet komen.

De daling van de stijghoogte heeft naast een daling van de grondwaterstand en van de afvoer ook effect op de kwel- en infiltratiesituatie, zoals Figuur 46 schematisch laat zien. Met infiltratie wordt bedoeld de neerwaartse stroming van ondiep freatisch grondwater naar het onderliggende watervoerende pakket en kwel is de omgekeerde, opwaartse stroming. Het areaal infiltratiegebieden wordt groter, evenals de bijbehorende infiltratiefluxen. Het areaal kwelgebieden neemt af en in de overblijvende kwelgebieden neemt de kwelflux af (Figuur 46). In onderstaande alinea's worden deze effecten kwantitatief geïllustreerd op basis van de LHM-berekeningen. Natuurlijk hangen de effecten in concrete gebieden af van de lokale geohydrologische omstandigheden.

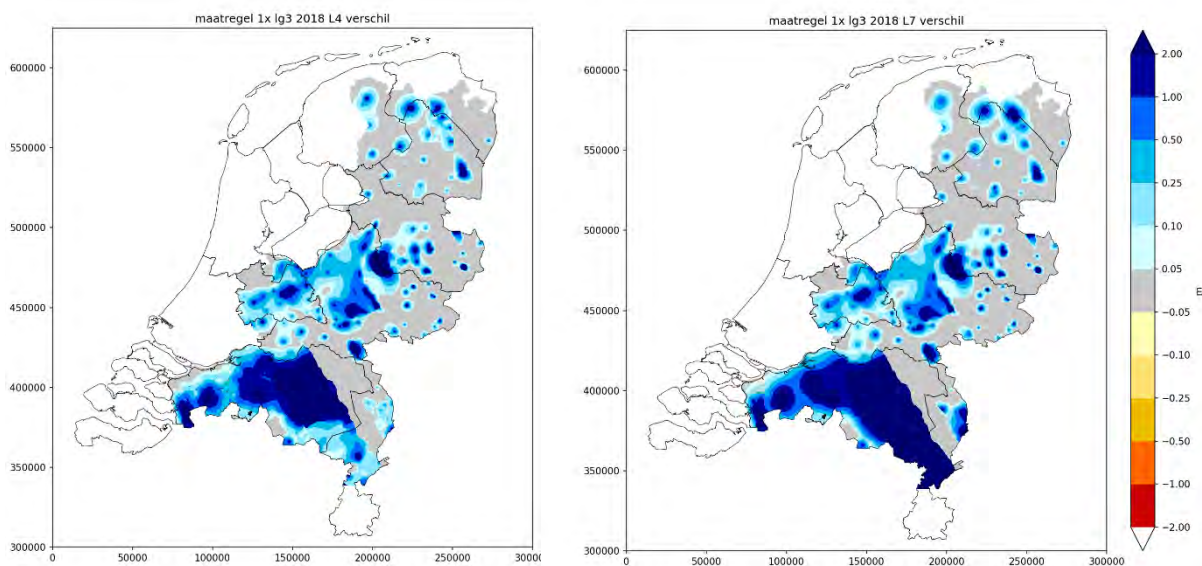


Figuur 46. Schematische weergave van een infiltratiegebied en kwelgebied met grondwaterstand- en stijghoogteverloop en de afvoer van sloten en beken voor een situatie zonder (links) en met grondwateronttrekking (rechts).

Effect op stijghoogte

Modelberekeningen laten de bovengenoemde processen duidelijk zien. Figuur 47 toont het effect op de stijghoogte (LHM-modellaag 4 en 7) voor 2018 als gevolg van het stopzetten van de drinkwaterwinningen. De figuur toont de situatie in 2018 i.c. 5,5 jaar nadat de onttrekkingen in het model zijn stopgezet; de modelmatig maatregel start in 2013. Het effect op de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten is groter dan op de freatische grondwaterstand, waarbij het effect op de stijghoogte doorwerkt naar het ondiepe freatische systeem. In de figuur is duidelijk te zien dat voor geheel West-Brabant en de Centrale Slenk de stijghoogte wordt beïnvloed. Deze invloed wordt voornamelijk veroorzaakt door de relatief grote weerstand tussen het pakket waaruit onttrokken wordt en het freatische pakket, van waaruit de extra aanvulling van het watervoerend pakket als gevolg van de winning moet plaatsvinden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat in het westelijk deel van de Brabantse Wal schijnspiegels voorkomen waardoor effecten van drinkwateronttrekkingen zich anders manifesteren dan met het LHM gesimuleerd.

Het compleet stopzetten van de drinkwaterwinningen is een (te) extreme maatregel; het levert voor dit project alleen een werkwijze op in de vorm van een gevoeligheidsanalyse, die in toekomstige analyses opgevolgd kan worden met meer lokale berekeningen. Door de watervraag te verminderen of door meer gebruik van oppervlaktewater als bron kunnen grondwaterwinningen mogelijk wel worden verminderd, verplaatst of sommige zelfs worden stopgezet in de toekomst. De berekeningen geven handvatten voor zoekgebieden en brengen effecten op het watersysteem in beeld. De watervraag kan verminderd worden door waterbesparing en hergebruik van water binnen huishoudens en de industrie en wel jaarrond, dus ook in de maanden waarin het geen droog weer is. De mate van besparing en hergebruik bepaalt natuurlijk de effectiviteit, mede met het oog op verwachte trends in de watervraag in de (nabije) toekomst.



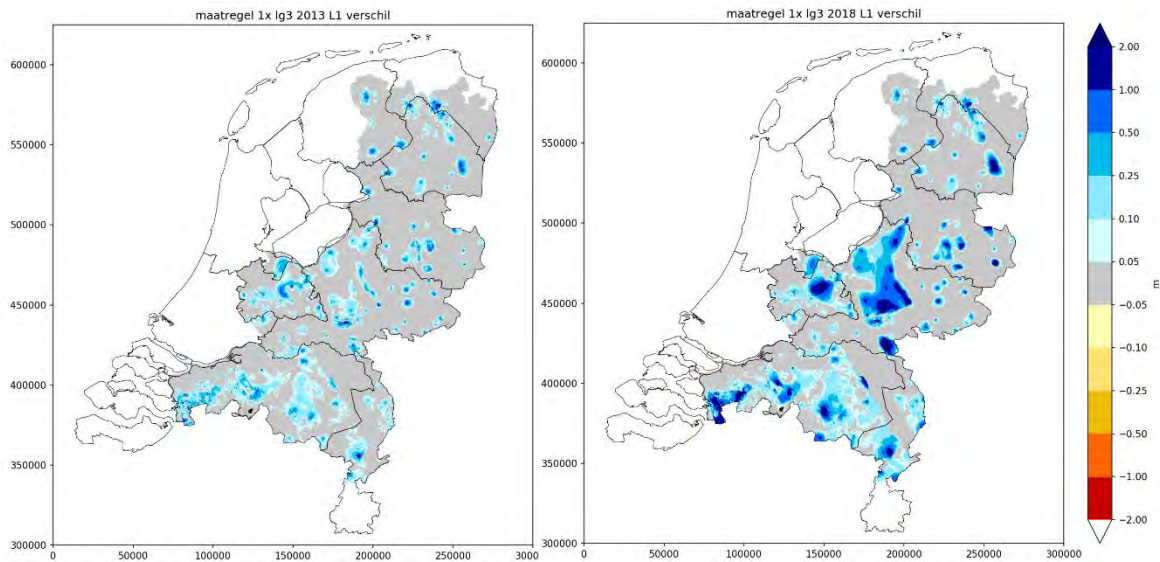
Figuur 47. Het effect in zomer 2018 op de stijghoogte (LG3) in modellaag 4 (links) en 7 (rechts), zo'n 5,5 jaar na het modelmatig stopzetten van de drinkwaterwinningen. De onttrekkingen vinden bijna allemaal plaats in modellaag 4 t/m 7 (Figuur 45).

Effect op de freatische grondwaterstand

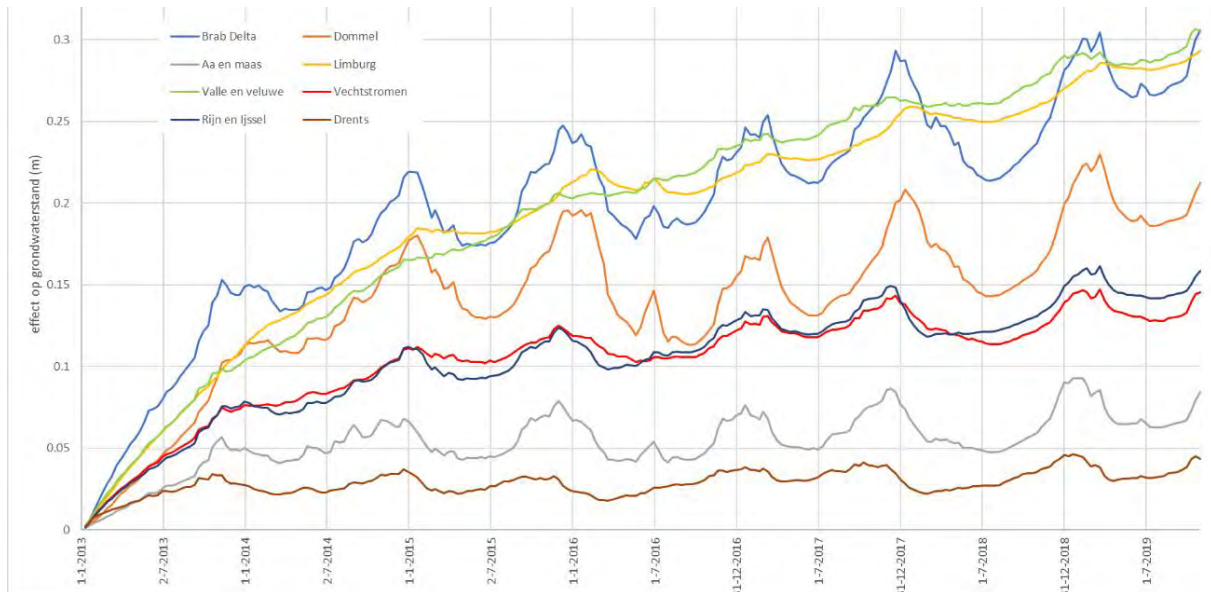
Figuur 48 laat het berekende effect op de freatische grondwaterstand een 0,5 jaar en 5,5 jaar na het modelmatig stopzetten van de drinkwaterwinningen uit grondwater. Het is duidelijk zichtbaar dat het effect na een 0,5 jaar veel minder groot is dan na 5,5 jaar. Dit niet-stationaire effect is ook duidelijk gemaakt in Figuur 49 waar het effect op de grondwaterstand is gemiddeld per waterschap (NB: we hebben niet alle waterschappen met zandgronden opgenomen). Voor de meeste waterschappen is na 7 jaar het effect nog steeds niet maximaal. Dit wordt

veroorzaakt door de zogenaamde trage gebieden met afwezigheid van ontwateringsmiddelen. Hoe groter het aandeel aan dit soort trage gebieden, des te langer de effecten na-ijlen. Het grondwater dat eerst via de drinkwaterwinning het systeem verliet, moet nu via de ontwatering het systeem verlaten. De grondwaterstand stijgt net zo lang totdat er weer evenwicht is tussen de grondwaterstand (opbolling tussen de ontwateringsmiddelen) en het af te voeren neerslagoverschot. Bij een toegenomen hoeveelheid grondwater dat moet worden afgevoerd, is een groter potentiaalverschil nodig (opbolling). Wanneer de effecten op de LG₃ per hydrotype worden bekeken (Figuur 50) is dit effect van de trage gebieden duidelijk te zien. Voor het hydrotype 'Stuwwallen' dat voornamelijk de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug bestaat, blijft het effect op LG₃ ook nog na 6,5 jaar (2019) gestaag toenemen. Tevens is in Figuur 49 een seizoenale gang zichtbaar met grotere effecten in de winter dan in de zomerperiode.

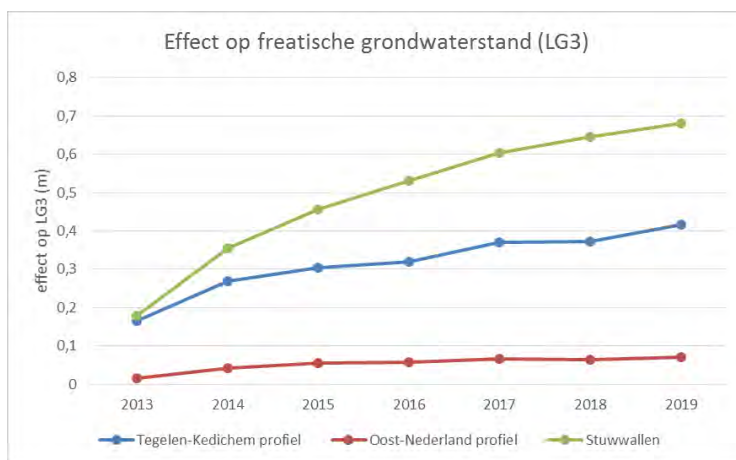
De effecten op de grondwaterstand zijn door het genoemde proces dan ook groter voor de trage gebieden dan voor de ontwaterde gebieden. Maar tevens van groot belang is de hoeveelheid grondwater die wordt onttrokken: hoe meer grondwater wordt onttrokken, des te groter het effect is. In Brabantse Delta wordt het meeste grondwater onttrokken voor drinkwater (87 miljoen m³/jaar) van het gehele zandgebied en voor Aa en Maas het minst (39 miljoen m³/jaar) en dit uit zich in de effecten op de gemiddelde grondwaterstand (Figuur 51). Echter, dat dit niet helemaal een lineaire relatie is als gevolg van de bovengenoemde processen (aandeel trage gebieden met grotere effecten op de grondwaterstand) laat Figuur 51 zien. In deze figuur staat het effect na 5,5 jaar gemiddeld per waterschap (zandgebied) uitgezet tegen de hoeveelheid onttrokken grondwater voor drinkwater per jaar.



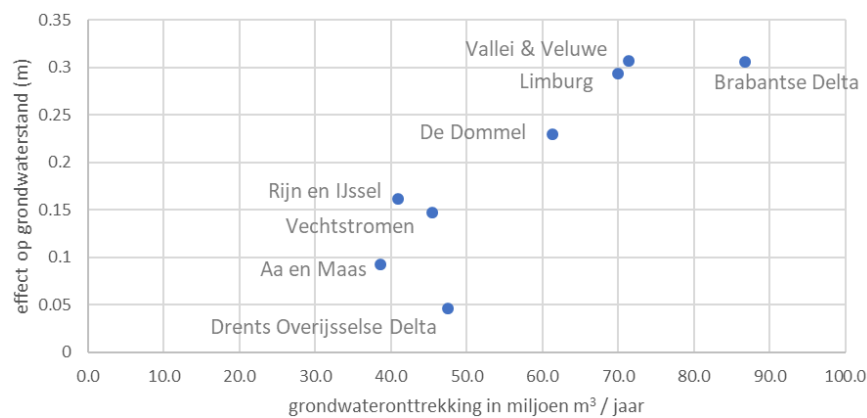
Figuur 48. Het effect op de zomergrondwaterstand (LG₃) in 2013 een 0,5 jaar na modelmatig stopzetten van de drinkwaterwinningenzomer (links) en in 2018 5,5 jaar na het modelmatig stopzetten van de drinkwaterwinningen.



Figuur 49. Het verloop van het effect op de grondwaterstand gemiddeld per waterschap als gevolg van het stopzetten van de winningen op 1 januari 2013.



Figuur 50. Het verloop van het effect op de LG3 door stopzetten van winningen op 1 januari 2013 voor drie verschillende hydrotypes.

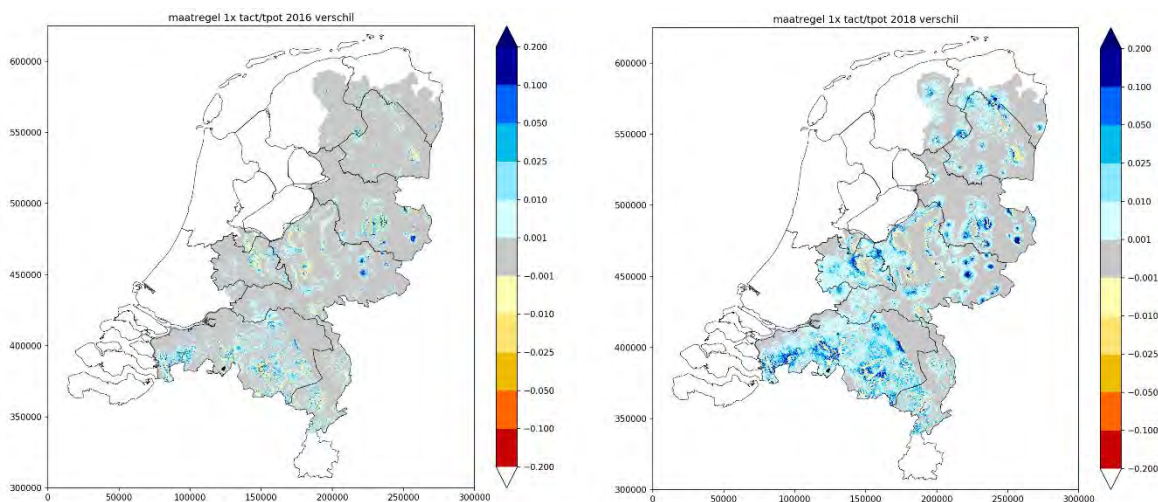


Figuur 51. Het effect op de grondwaterstand gemiddeld per waterschap 6,5 jaar (2019) na stopzetten van de drinkwaterwinningen tegen de hoeveelheid onttrokken grondwater.

Effect op Ta/Tp

De stijging van de grondwaterstand leidt tot een afname van transpiratiereductie (Figuur 52). Het effect op de transpiratiereductie is veel groter voor een droog jaar als 2018, omdat dan de transpiratiereductie groter is en er dus meer winst te halen valt. De effecten op de transpiratie zijn ook hier weer het grootst voor de gebieden met een grondwaterstand tussen 1 en 2 m-m.v., omdat bij deze diepte sprake kan zijn van capillaire nalevering die invloed heeft op de transpiratie; een verhoging van de grondwaterstand leidt dan tot een toename van de capillaire nalevering. Notabene, Figuur 52 laat ook zones met een afname van de Ta/Tp zien die als modelartefact (in MetaSwap) moeten worden aangemerkt. Dit artefact wordt veroorzaakt door de abrupte overgang in de diepte van bodemfysische eenheden met zeer verschillende capillaire eigenschappen. Gemiddeld op waterschapniveau neemt voor Brabantse Delta, Limburg en Vallei en Veluwe (de waterschappen met de grootste onttrokken hoeveelheid grondwater) de transpiratie in 2018 met 0,5 tot 1,5 % toe.

De berekeningen tonen aan dat als gevolg van het modelmatig stoppen van de winningen in 2013, er in 2018 5% minder beregend zou worden voor waterschap De Dommel, 2% voor Vallei en Veluwe en 4% voor Brabantse Delta. Hierbij geldt weer dat dit gemiddeld is over het gehele waterschap; dichtbij de winningen zijn de effecten (veel) groter. Deze percentages geven aan dat het effect van het stoppen van de grondwaterwinningen voor drinkwater beperkt effect hebben op de vermindering van de behoefte aan beregeningswater in de landbouw. De droogtegevoelige landbouwpercelen zijn hoger gelegen in het landschap en hebben een diepere GLG. Deze GLG wordt niet zodanig verhoogd door het stopzetten van onttrekkingen uit het grondwater voor drinkwater, dat landbouwgewassen daarvan via hun wortels en via capillaire opstijging kunnen profiteren. Dan blijft de behoefte aan beregening (grotendeels) in stand.

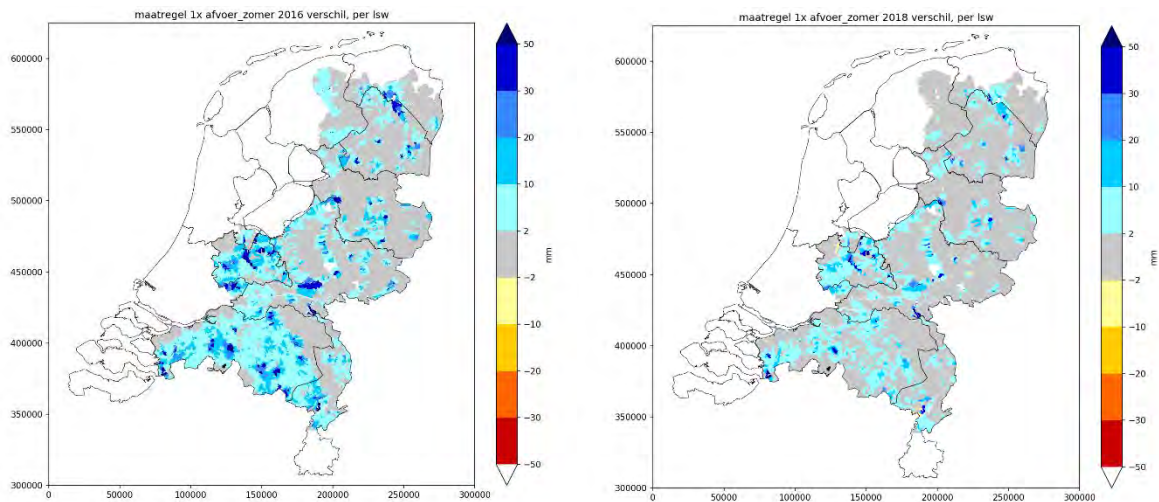


Figuur 52. Het effect op de Ta/Tp ratio voor het jaar 2016 en 2018 als gevolg van het stopzetten van de drinkwaterwinning in 2013.

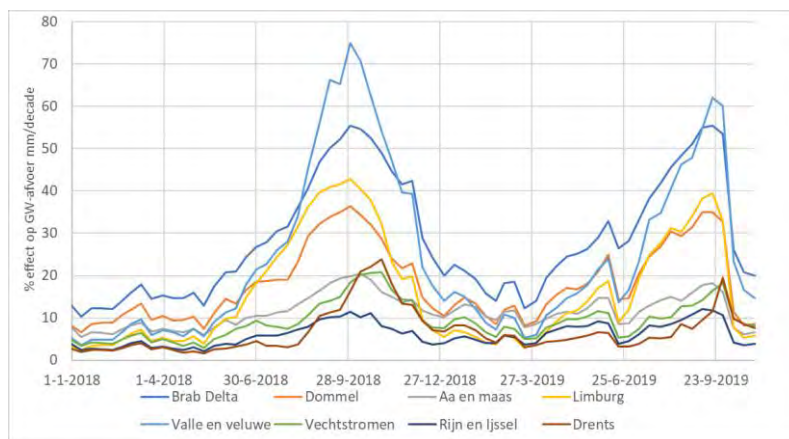
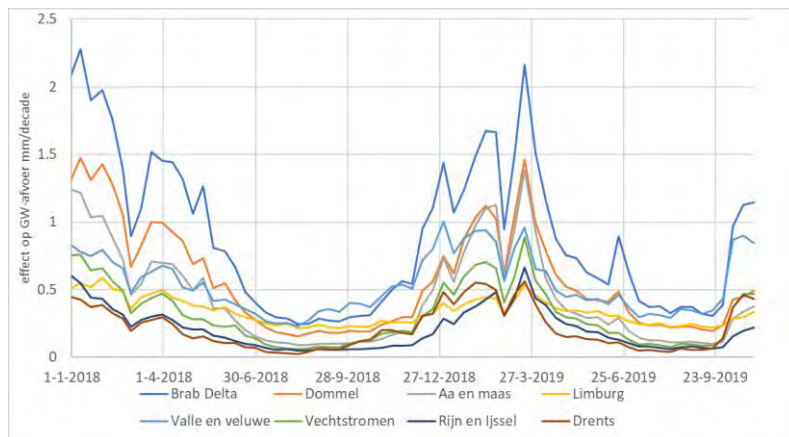
Effect op gebiedseigen afvoer

Het absolute effect van verminderde grondwateronttrekking op de gebiedseigen zomerafvoer is groter voor een natter jaar zoals 2016 (Figuur 53). Gemiddeld per waterschap is het effect op de gebiedseigen afvoer voor 2018 en 2019 weergegeven in Figuur 54. Duidelijk zichtbaar is dat het absolute effect het grootst is tijdens de natte periode wanneer de afvoer goed op gang is. Gedurende de zomer is dit effect in absolute afvoer veel minder, maar er is dan ook veel minder afvoer. In Figuur 54 staat ook het relatieve effect, dus het effect ten opzichte van de afvoer in de referentiesituatie. Hieruit blijkt duidelijk dat de winningen een groot effect op de gebiedseigen zomerafvoer hebben. Gemiddeld voor waterschap Brabantse Delta en Vallei en Veluwe wordt meer dan de helft van de gebiedseigen afvoer beïnvloed door de drinkwaterwinningen. Gezien het feit dat dit gemiddeld is voor het gehele zanddeel van het waterschap betekent dat er stroomgebieden zijn waar nog een veel groter deel van de grondwaterafvoer door winningen wordt beïnvloed. Uiteraard geldt dat hoe dichterbij de winningen en hoe groter

de onttrekkingen, des te groter dit effect. Voor sommige stroomgebieden in het beïnvloedingsgebied van de winning neemt de zomerafvoer toe met meer dan 70 tot 100% wanneer de winningen worden uitgezet.



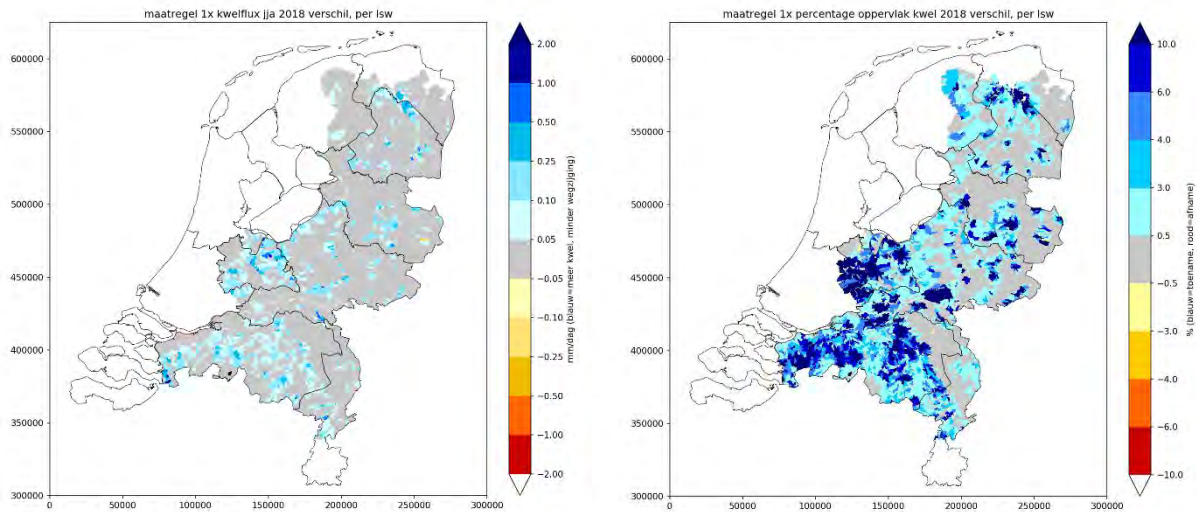
Figuur 53. Het effect op de gebiedseigen zomerafvoer (maanden juni, juli, augustus) voor het jaar 2016 en 2018 als gevolg van het stopzetten van de drinkwaterwinningen per 1 januari 2013 (in mm).



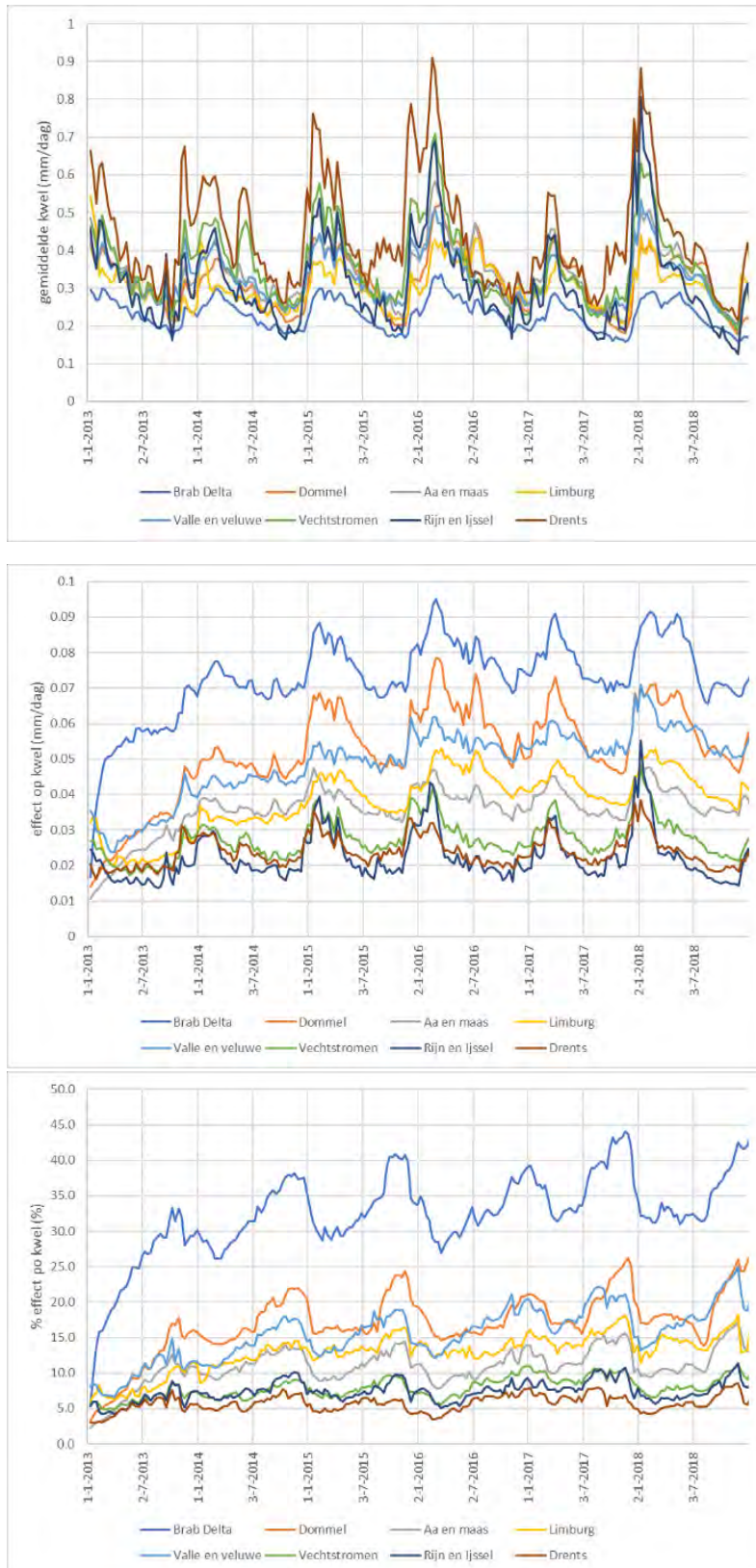
Figuur 54. Het gesimuleerde effect op de gebiedseigen grondwaterafvoer (mm/dag) door het stoppen van de drinkwaterwinningen per 1 januari 2013, gemiddeld voor de verschillende waterschappen (boven) en als percentage van de grondwaterafvoer (onder).

Effect op kwel

Ook de kwel neemt duidelijk toe bij het stopzetten van de winningen en het areaal aan kwelgebieden neemt ook toe (Figuur 55). Het gemiddelde effect per waterschap is voor de gehele periode weergegeven in Figuur 56. Het absolute effect is het grootst voor de maanden februari tot en met april-mei terwijl het relatieve effect (dus effect t.o.v. heersende kwelflux) het grootst is in het najaar. Voor de waterschappen met de grootste drinkwateronttrekkingen, is het effect op de kwel ook het grootst (Brabantse Delta, Dommel, Vallei en Veluwe en Limburg). Voor Brabantse Delta neemt de kwel zelfs (gemiddeld over het waterschap) met 30 tot 44% toe. Ook hier is het belangrijk te melden dat het om gemiddelde waarden per waterschap gaat. De effecten in het intrekgebied dichtbij de winning zullen daarom veel groter zijn dan dit gemiddelde.



Figuur 55. Toename van de zomerkwelflux (juni, juli, augustus) gemiddeld per LSW (in mm/d) voor het 2018 als gevolg van het stopzetten van de drinkwaterwinningen per 1 januari 2013 en de verandering in areaal van infiltratiegebied naar kwelgebied (%).



Figuur 56. Kwelflux gemiddeld per waterschap (boven) en effect op de kwelflux als gevolg van het modelmatig stoppen van de drinkwaterwinningen in mm/dag (midden) en als percentage t.o.v. referentiesituatie (onder).

2) Onttrekkingen grondwater voor beregening

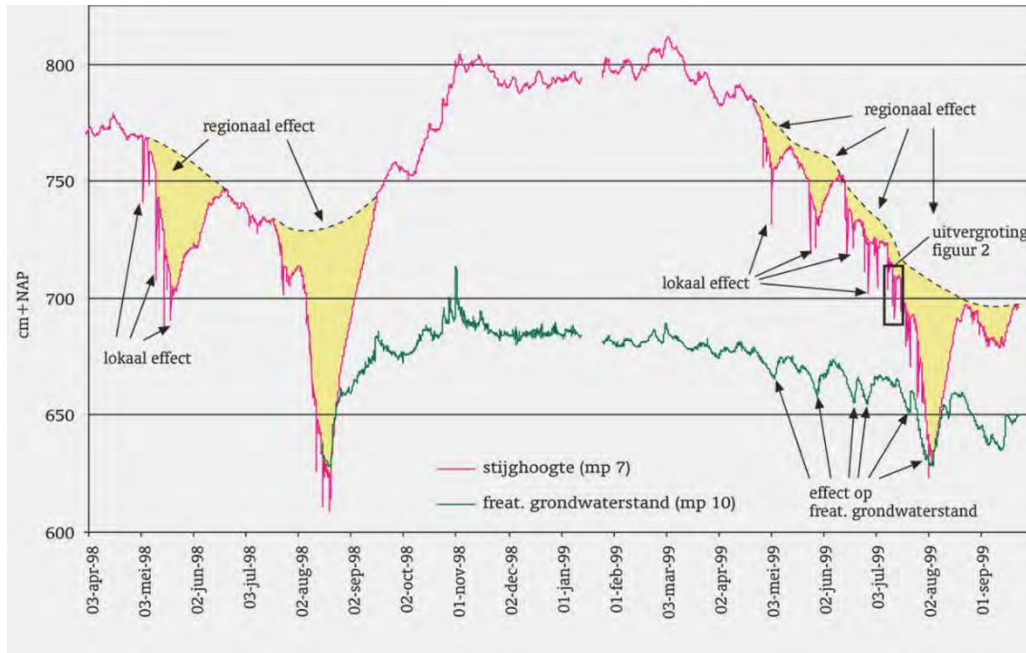
Gedurende droge periodes tijdens het groeiseizoen wordt er grondwater onttrokken voor de beregening van gewassen. De onttrekkingen vinden meestal ondieper plaats dan de onttrekkingen voor drinkwater, overwegend nog in de watervoerende pakketten ondieper dan 30 m, maar voor West-Brabant ook vaker dieper. Een belangrijk ander verschil is dat het onttrekken van grondwater voor beregening een tijdelijk karakter heeft en hoeveelheden per jaar sterk afhankelijk zijn van het jaarlijks neerslagtekort, terwijl drinkwaterwinningen een meer permanent karakter hebben. Zo lieten de registraties van de waterschappen zien dat er in 2018 meer dan tweemaal zoveel is onttrokken voor beregening dan gemiddeld. Deze onttrekkingen vinden met name plaats in de zomermaanden.

Net als de onttrekkingen voor drinkwater, zijn effecten van onttrekkingen voor beregening op het totale watersysteem vrijwel direct merkbaar. Het wel of niet toestaan van beregening voor bepaalde gebieden is dan ook een maatregel die vrij snel effect kan sorteren op het grondwatersysteem, in tegenstelling tot peilmaatregelen in het oppervlaktewatersysteem waarbij de doorwerking op het grondwatersysteem tot significante effecten vertraagd verloopt. Daarnaast geldt dat iedere druppel die uit de ondergrond wordt onttrokken, uiteindelijk wordt aangevuld vanuit het freatisch systeem. Zoals besproken bij de drinkwaterwinningen, daalt hierdoor de grondwaterstand (water komt uit de freatische berging), neemt hierdoor de kwel vanuit het watervoerend pakket naar het freatische pakket af en neemt ook de gebiedseigen afvoer af. Echter, door het tijdelijk karakter manifesteren de effecten zich anders in de tijd dan voor de permanent winningen. De effecten van beregenen uit grondwater op het watersysteem worden hieronder op basis van metingen en modelresultaten besproken.

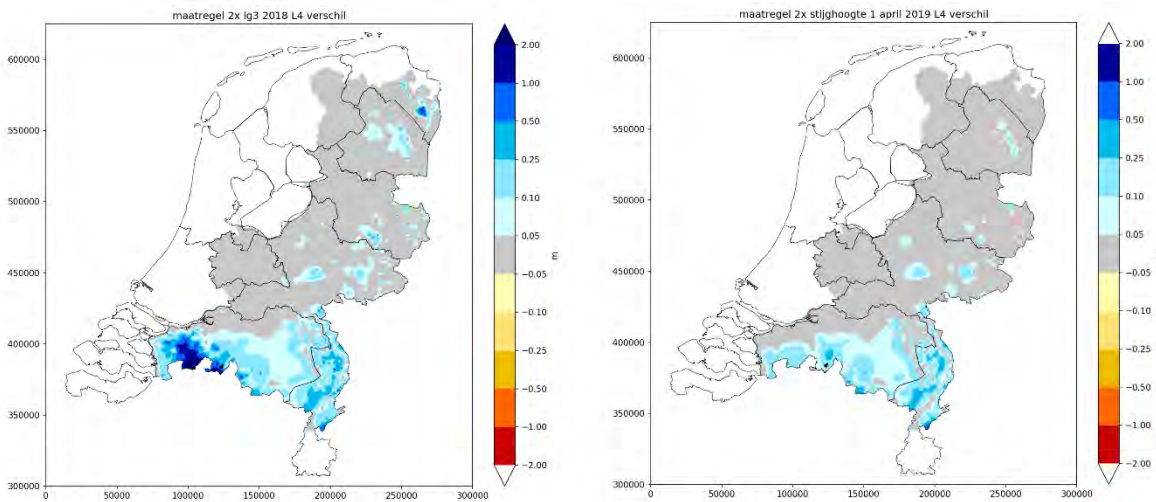
Effect op de stijghoogte

Het effect op de stijghoogte is het grootst voor het pakket waaruit onttrokken wordt en is naast het onttrekkingsdebiet afhankelijk van de hydraulische weerstand tussen het freatisch systeem en de diepte van de onttrekking (en in mindere mate ook de kD van het pakket waaruit onttrokken wordt). Hoe groter deze weerstand, des te groter de daling van de stijghoogte en hoe groter de uitstraling. Immers, de onttrokken hoeveelheid moet in zijn geheel vanuit het freatisch systeem worden aangevuld en dit gaat moeilijker wanneer de weerstand groot is. Grotere stijghoogteverschillen over een groter gebied zijn nodig om deze aanvulling vanuit het freatisch systeem mogelijk te maken.

Voor West-Brabant is deze weerstand tussen onttrekkingsdiepte en freatisch systeem het grootst van het hele zandgebied en hier worden dan ook de grootste effecten op de stijghoogte gevonden. Metingen in het beekdal van de Strijbeekse Beek (West-Brabant) uit eerder onderzoek laten de sterke dalingen van de stijghoogte duidelijk zien (Figuur 57). Deze sterke dalingen zijn te zien voor de perioden dat er beregend wordt (aangeduid met geel) en wanneer gestopt wordt met onttrekken, herstelt de stijghoogte weer. Zo zijn voor 1998 twee duidelijke beregeningsperioden zichtbaar en voor 1999 ongeveer vijf. In de metingen is ook het lokale effect op de stijghoogte te zien van beregening uit de beregeningsput in het beekdal. Wanneer wordt ingezoomd blijkt dat er meestal vanaf 6 uur in de ochtend tot 12 uur in de middag wordt beregend. De som van dit soort individuele onttrekkingen leidt tot het regionale effect dat zich vrijwel in heel West-Brabant manifesteert. West-Brabant kent een vrij sterke weerstandbiedende laag tussen het dunne dekzandpakket en de onderliggende watervoerende pakketten. Hierdoor wordt voor een groot deel van West-Brabant de stijghoogte 0,25 tot 1,5 m verlaagd gedurende de beregeningsperioden. De modelberekeningen laten dit regionale effect ook duidelijk zien (Figuur 58). Ook in andere delen van het zandgebied zijn deze regionale effecten te zien. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat in het LHM gegevens van 2010 zitten waardoor de beregening uit grondwater voor het midden en oosten van het zandgebied wordt onderschat. Anderzijds berekent het LHM voor Limburg een bijna 2 keer zo grote hoeveelheid beregening dan geregistreerd, waardoor de getoonde effecten groter zijn dan in (o.b.v. registraties gebaseerde) werkelijkheid (zie Bijlage VI met meer informatie over beregening in LHM).



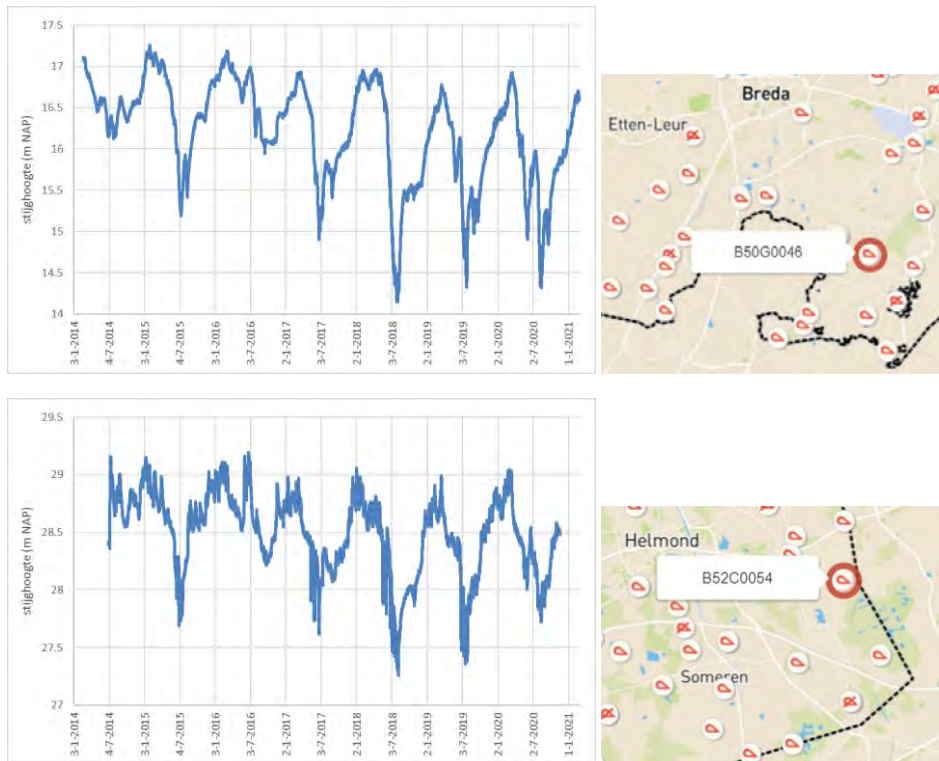
Figuur 57. Het gemeten verloop van de stijghoogte en grondwaterstand in het beekdal van de Strijbeekse Beek beïnvloed door beregening uit grondwater. Het maaiveld zit op ongeveer 7 m+NAP. Bron: De Louw et al. (2000).



Figuur 58. Het effect op de stijghoogte (L4-modellaag 4) in de zomer van 2018 (LG3) (links) en op 1 april 2019 (rechts) als gevolg van het stopzetten van de beregening uit grondwater. Let op: in het LHM-model wordt veel meer beregend in Noord-Brabant en Limburg dan elders in het land waardoor de effecten ook groter zijn.

Figuur 59 laat recente metingen zien die illustreren dat de stijghoogte tijdelijk meer dan een meter kan dalen met de grootste dalingen in 2018, 2019 en 2020 voor het meetpunt in West-Brabant. Ook in Oost-Brabant op de grens met Limburg rond de Peel zijn de dalingen van meer dan een 0,5 m als gevolg van beregening uit grondwater duidelijk zichtbaar (Figuur 59), hier waarschijnlijk veroorzaakt door de weerstand van het hoogveen van de Peel. Op 29 en 30 juli 2018 werd voor beide meetpunten de laagste stijghoogte gemeten, waarna men massaal stopte met beregenen en de stijghoogte weer begon te herstellen. Het duurde tot half september - begin oktober voordat de scherpe dalingen enigszins waren verdwenen. Dit betekent overigens niet dat de stijghoogte helemaal is hersteld. De modelberekeningen laten duidelijk zien dat de effecten sterk na-ijlen (Figuur 58). Op 1 april 2019 is er namelijk nog steeds een effect van 5 tot 25 cm op de stijghoogte te zien als gevolg van het stoppen van beregening in 2018. Hoewel de onttrekking een zeer tijdelijk karakter heeft, zijn effecten tot in het volgende

groeiseizoen merkbaar. Voor de nattere jaren met minder beregening uit grondwater is er ook sprake van na-ijling, maar veel minder.



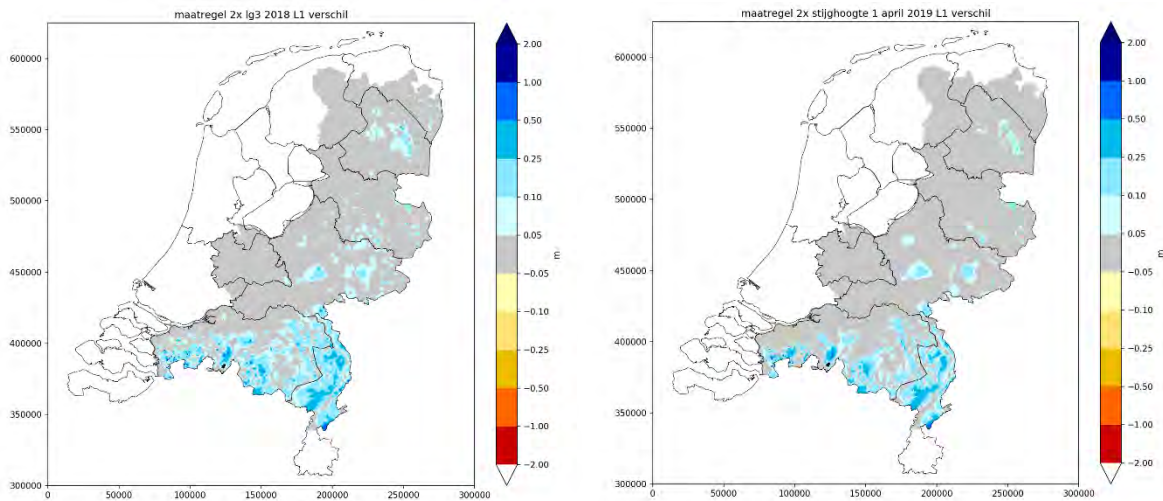
Figuur 59. Het gemeten verloop van de stijghoogte voor meetpunt B50G0046-001 met filterdiepte 25 m (boven) en meetpunt B52C0054-001 met filterdiepte 10 m (onder).

Effect op de freatische grondwaterstand

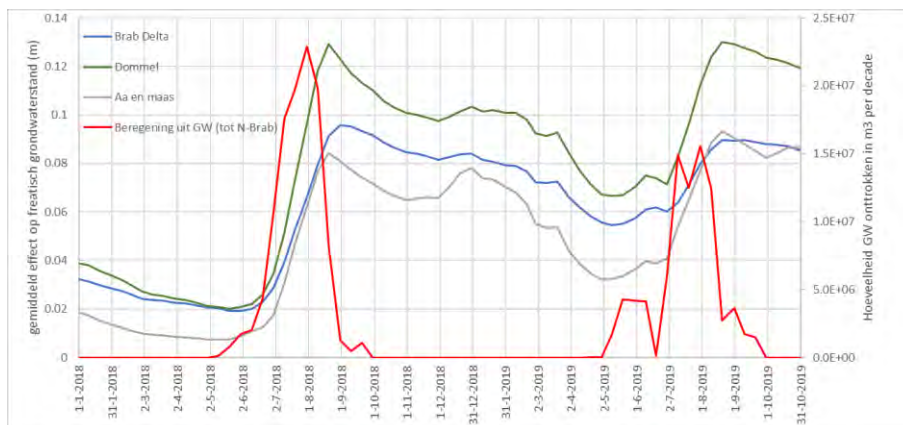
De daling van de stijghoogte als gevolg van beregenen uit grondwater vertaalt zich door naar het freatisch systeem, waardoor freatische grondwaterstanden dalen. De metingen in het beekdal van de Strijbeekse Beek laten deze dalingen in de freatische grondwaterstand (10 tot 30 cm) als gevolg van de regionale daling van de stijghoogte duidelijk zien (Figuur 59). De modelberekeningen tonen aan dat over het gehele gebied waar de stijghoogte door de onttrekkingen wordt beïnvloed er ook een (regionale) significante daling van de freatische grondwaterstand optreedt (Figuur 60). Voor grote delen van Brabant en Limburg wordt een daling van tussen de 5 en 25 cm berekend. De grootste effecten worden gevonden voor de infiltratiegebieden en gebieden met weinig ontwateringsmiddelen, omdat de aanvulling vanuit het freatisch systeem in zijn geheel uit de freatisch berging moet komen en niet gecompenseerd wordt met een reductie van de gebiedseigen afvoer.

De freatische grondwaterstand begint vrijwel direct te dalen wanneer begonnen wordt met onttrekken. Dit is te zien in Figuur 61, waar het gemiddelde effect op de freatische grondwaterstand per waterschap staat weergegeven samen met de onttrokken hoeveelheid grondwater voor beregening. Het grootste effect op de grondwaterstand wordt berekend aan het eind van de beregeningsperiode en valt dus niet samen met de piek in beregening die voor 2018 ongeveer 2 tot 3 weken eerder viel. Het effect op de grondwaterstand blijft dus toenemen gedurende de beregeningsperiode. In Figuur 61 is te zien dat het effect op de freatische grondwaterstand redelijk herstelt in normale jaren (overigens niet helemaal) maar dat dit zeker niet het geval is voor het extreem droge jaar 2018 waarin 2 tot 3 keer zoveel grondwater werd onttrokken voor beregenen dan normaal. Als het groeiseizoen 2019 start is, is nog steeds 40 tot 60% van het maximale effect op de grondwaterstand van einde beregeningsperiode 2018 aanwezig. Dit is ook duidelijk te zien in de ruimtelijke weergave van het effect op 1 april 2019 in Figuur 60. Deze na-ijling wordt veroorzaakt door de combinatie van de

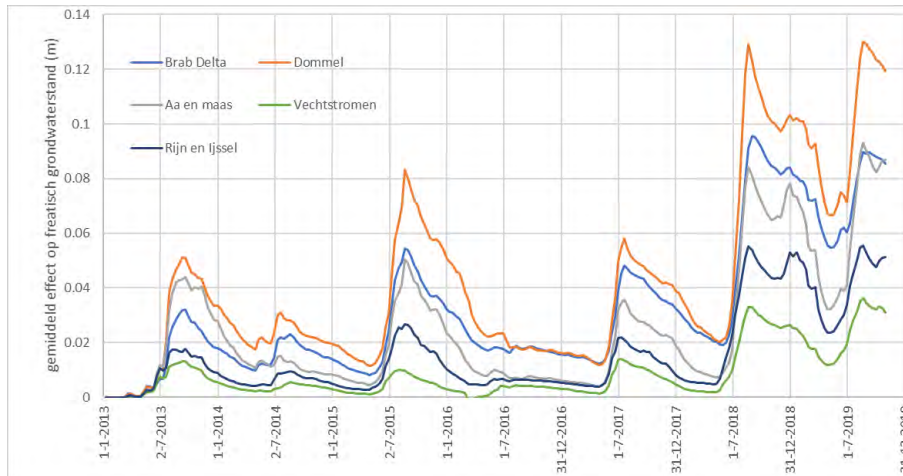
grote hoeveelheid onttrokken grondwater, de na-ijling van de stijghoogte (Figuur 62) en de extreem lage grondwaterstanden als gevolg van de droogte. Effecten van dit soort maatregelen zijn pas helemaal weggevoerd wanneer het grondwatersysteem weer in evenwicht is met het neerslagoverschot en de grondwaterafvoer.



Figuur 60. Het effect op de freatische grondwaterstand (modellaag 1) in de zomer van 2018 (LG3) (links) en op 1 april 2019 (rechts) als gevolg van het stopzetten van de beregening uit grondwater. Let op: in het LHM-model wordt veel meer beregend in Noord-Brabant en Limburg dan elders in het land waardoor de effecten ook groter zijn.



Figuur 61. Het berekende gemiddelde effect op de freatische grondwaterstand (daling) per Brabantse waterschap als gevolg van het beregenen uit grondwater en de hoeveelheid onttrokken grondwater voor beregening in Brabant in m³ per decade (periode van 10 of 11 dagen).

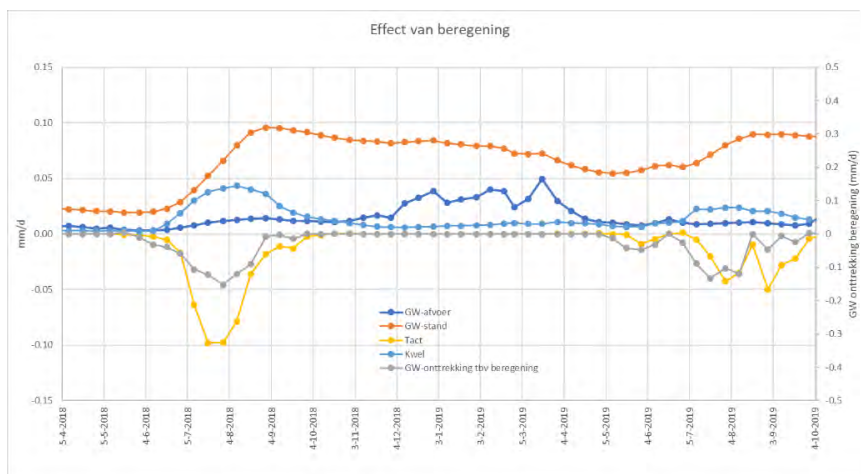


Figuur 62. Het berekende gemiddelde effect op de freatische grondwaterstand per waterschap als gevolg van stoppen met beregenen uit grondwater sinds 1 januari 2013.

Effect op kwel

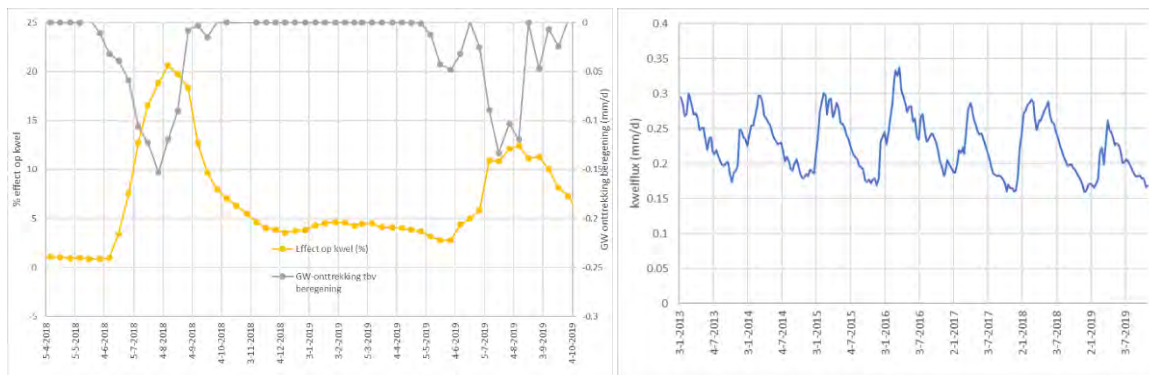
Een dalende stijghoogte als gevolg van beregenen uit grondwater leidt tot een toename van de infiltratie van het freatische systeem naar het pakket waaruit onttrokken wordt en in kwelgebieden leidt het tot minder of zelfs tijdelijk verdwijnen van kwel. De metingen in het beekdal van de Strijbeekse Beek laten dit duidelijk zien (Figuur 59). De stijghoogte in het beekdal daalt hier zo sterk dat het stijghoogteverschil, dat de drijvende kracht is achter de kwelflux in het beekdal en in de winter ongeveer 1,1 m bedraagt, sterk afneemt en daarmee ook de kwel in het beekdal. Voor de perioden met het grootste beregeningseffect verdwijnt de kwel zelfs helemaal voor een periode van enkele weken. Hoe belangrijk dit tijdelijke effect voor de grondwaterafhankelijke vegetatie is, is niet bekend.

Figuur 63 laat het effect zien op de hoeveelheid kwel die optreedt in het waterschapgebied van Brabantse Delta uitgedrukt in mm/dag en in Figuur 64 als percentage van de totale kwel. Het effect lijkt zich vrijwel direct na start van de beregening op te bouwen. Aan het eind van de beregeningsperiode is het effect op de kwel het grootst; de gemiddelde kwel in het hele waterschapsgebied is dan met meer dan 20% gedaald (situatie 2018). Deze gemiddelde afname van een groot gebied impliceert dat er kwelgebieden zijn waar het effect nog veel groter is, vooral in gebieden waar meer beregend wordt. Het effect op de kwel ijlt minstens na tot het moment dat men weer met beregenen begint in 2019.

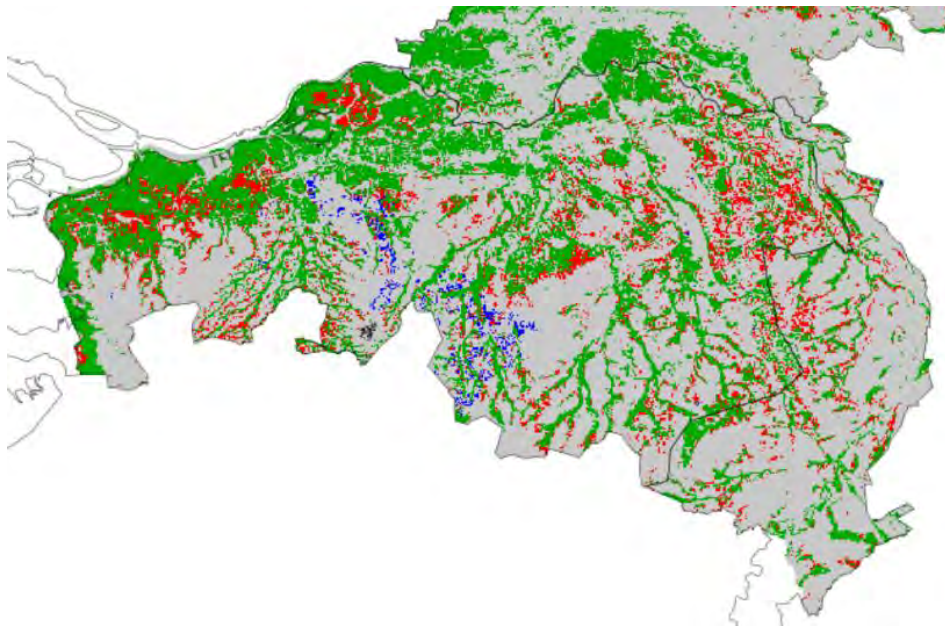


Figuur 63. Het berekende gemiddelde effect op enkele waterbalanstermen voor het waterschap Brabantse Delta van het stoppen met beregenen uit grondwater. Let op, de onttrokken hoeveelheid grondwater voor beregening (in grijs) heeft een andere schaal (op 2^e y-as).

Figuur 64 laat zien dat de kwelflux een seizoenvariatie vertoont met minder kwel in de zomerperiode en meer in de winterperiode; kwel wordt immers gedreven door het neerslagoverschot. De modelberekeningen laten zien dat het areaal aan kwelgebieden door beregenen uit grondwater tijdelijk significant afneemt (Figuur 65).



Figuur 64. Het berekende gemiddelde effect op de kwelflux uitgedrukt in percentage van de hoeveelheid kwel voor het waterschap Brabantse Delta als gevolg van het stoppen met beregenen uit grondwater (links). De seizoenvariatie van de kwelflux gemiddeld voor het waterschap Brabantse Delta (rechts).

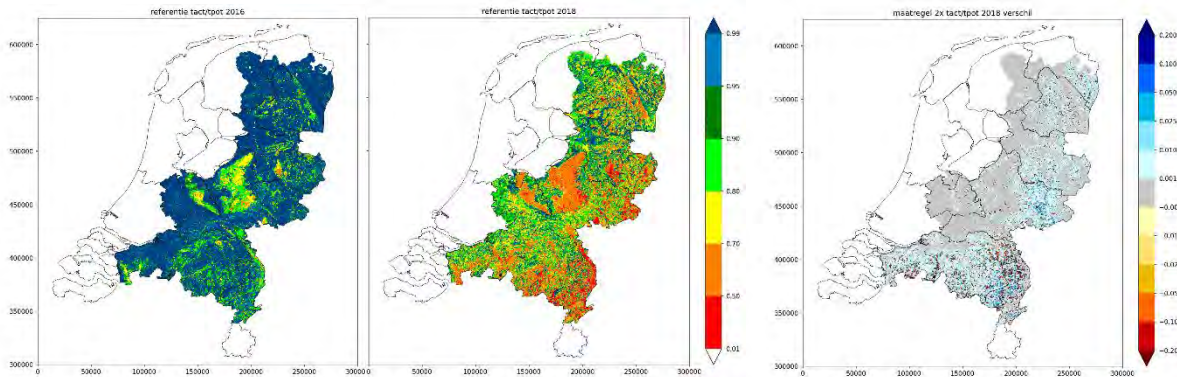


Figuur 65. Alle gekleurde gebieden (rood, groen en blauw) zijn de kwelgebieden zonder beregenen uit grondwater gedurende de periode 21 juli t/m 10 augustus 2018. De rode kwelgebieden verdwijnen gedurende deze periode en veranderen tijdelijk in infiltratiegebieden.

Effect op Ta/Tp

Het grootste deel van de beregeningsgift wordt gebruikt om de transpiratie te vergroten. Het effect op Ta/Tp is daarom uiteraard groot voor de percelen die beregend worden: de gewasverdamping (Ta) neemt sterk af wanneer gestopt wordt met beregening. Dit is in Figuur 63 voor waterschap Brabantse Delta duidelijk zichtbaar. Voor het hele zandgebied staat het effect op Ta/Tp als gevolg van het stoppen met beregenen uit grondwater in Figuur 66 ruimtelijk weergegeven. Voor omringende percelen die niet worden beregend, neemt de gewasverdamping juist (licht) toe als gestopt wordt met beregenen, via de toegenomen capillaire nalevering door de grondwaterstandstijging. Echter, dit gebeurt in veel mindere mate dan dat de gewasverdamping voor het beregende perceel afneemt. Het is belangrijk te beseffen dat een landbouwer die zijn gewassen niet beregent, nadelig kan worden beïnvloed wanneer de buurman wel beregent uit grondwater. De blauwgekleurde gebieden in

Figuur 66 zijn gebieden rondom de oorspronkelijk beregende percelen, waar Ta/Tp toeneemt als gestopt wordt met beregenen uit grondwater op de aangelegde percelen.

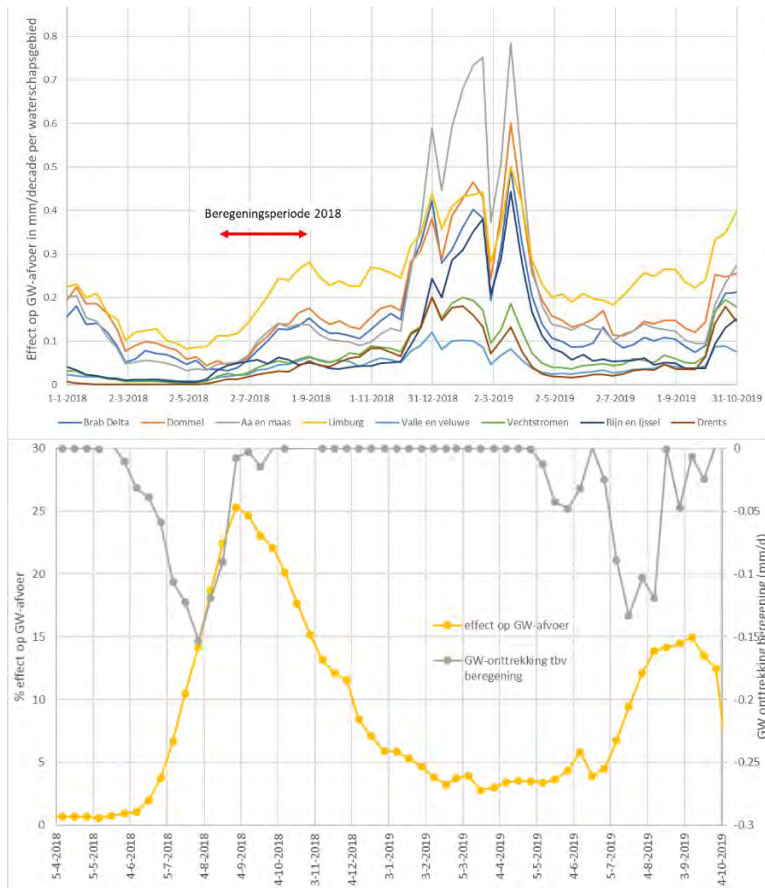


Figuur 66. Ta/Tp voor een relatief nat jaar (links), voor 2018 (midden) en het effect op Ta/Tp wanneer gestopt wordt met beregenen in 2018 (rechts) waarbij de blauwe kleuren een toename van Ta/Tp betekenen en de geel/rode kleuren een afname.

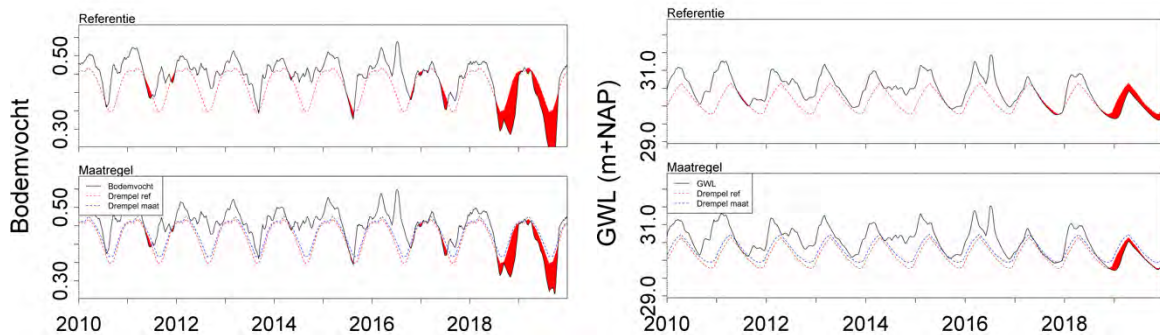
Effect op gebiedseigen afvoer

De gebiedseigen zomerafvoer neemt toe door het stopzetten van de beregening. Figuur 67 laat zien dat het effect zeer lang na-ijlt en sterk toeneemt tijdens de opvolgende winter, wanneer het afvoerproces weer op gang begint te komen. Het relatieve effect is juist het grootst gedurende de beregeningsperiode en maximaal aan het eind van deze periode. Voor Brabantse Delta is aan het einde van de beregeningsperiode ongeveer 25% minder grondwaterafvoer als gevolg van het beregenen uit grondwater. Belangrijk om op te merken is dat dit een gemiddelde is voor het gehele waterschapgebied; voor sommige stroomgebieden met veel beregening neemt de grondwaterafvoer af met meer dan 50 tot 100%.

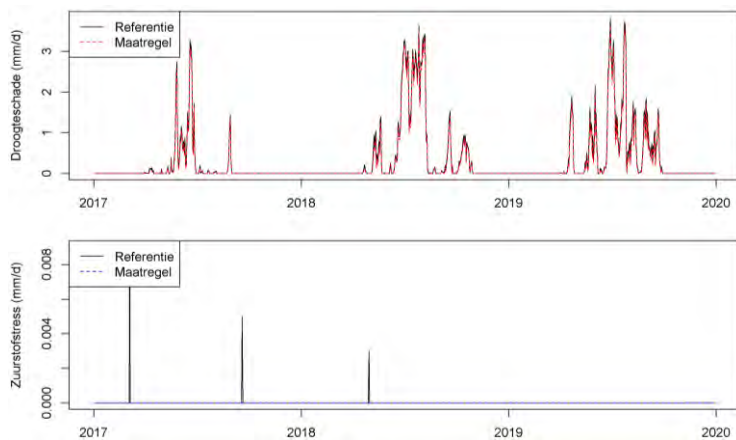
Het stopzetten van onttrekkingen uit het grondwater is op lokale schaal gesimuleerd (met SWAP) als een afname in de wegzijging naar de diepere pakketten, omdat de stijghoogte toeneemt. Op de lokale schaal geldt ook dat het effect afhankelijk is van de gebiedskenmerken. Over het algemeen geldt dat het verkleinen van de wegzijging door het stopzetten van grondwateronttrekkingen de intensiteit van de grondwaterdroogte verkleint. Het effect op de bodemvochtdroogte was echter beperkt door de diepe grondwaterstanden in de meeste focusgebieden. Daarnaast geldt dat hoe eerder in het seizoen de wegzijging wordt verkleind, des te meer invloed op de grondwaterdroogte er is. Als voorbeeld laten we hier het effect van het structureel verminderen van wegzijging zien voor de Deurnsche Peel op de tekorten in bodemvocht en grondwater (Figuur 68). In de Deurnsche Peel zien we dat met het structureel verkleinen van de wegzijging de droogte in het grondwater in 2018 niet helemaal voorkomen had kunnen worden, maar het tekort is wel aanzienlijk kleiner (Figuur 68). Ook het tekort in het bodemvocht is afgenomen, maar minder duidelijk dan voor de grondwaterdroogte. De toename in bodemvocht zorgt voor een minimale vermindering van de droogteschade in de vegetatie (Figuur 69).



Figuur 67. Het effect op de gebiedseigen grondwaterafvoer (in mm/decade) als gevolg van het stoppen met beregenen, gemiddeld voor de verschillende waterschappen (boven) en uitgedrukt als percentage van de grondwaterafvoer Brabantse Delta (onder).

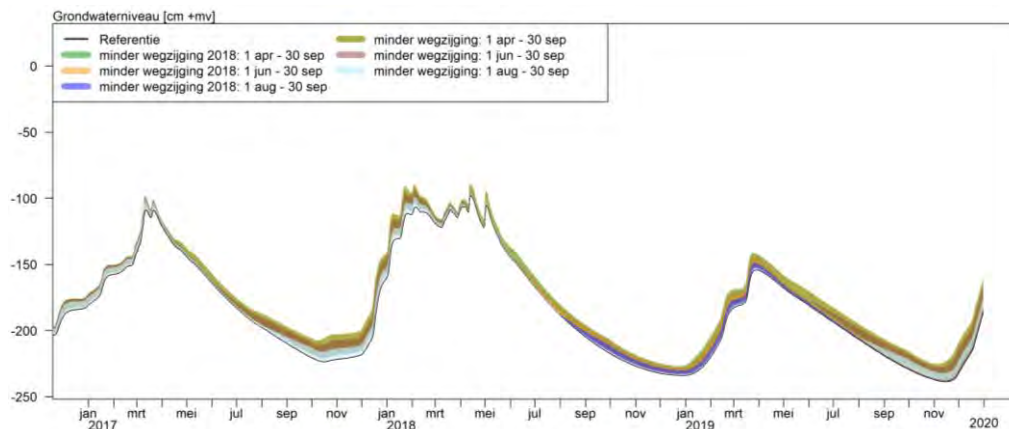


Figuur 68. Berekend effect (met SWAP) van het structureel verkleinen van de wegzijging door stopzetting van grondwateronttrekkingen op bodemvocht (links) en grondwater (rechts) in de Deurnsche Peel (standplaats natuur). Referentie (boven): tijdlijn (zwarte lijn met rode vlakken ter indicatie van droogte) en 20^{ste} percentiel (rode stippellijn). Maatregel (beneden): tijdlijn met effect maatregel (zwarte lijn met rode vlakken ter indicatie van droogte), 20^{ste} percentiel zonder (rode stippellijn) en 20^{ste} percentiel met maatregel (blauwe stippellijn).



Figuur 69. Effect van het structureel verkleinen van de wegzijging op de droogteschade en zuurstofstress voor de vegetatie in de Deurnsche Peel (standplaats natuur). Het effect van de maatregel is minimaal (zeer gering).

Daarnaast is berekend wat de verschillen zijn voor de grondwaterstand ten gevolge van ad-hoc- en structurele maatregelen (Figuur 70). Het verminderen van de wegzijging tijdens de droogte vermindert het tekort in de grondwaterdroogte in dezelfde mate als de structurele vermindering wanneer dit in april gebeurt. Wanneer later ingegrepen wordt, is minder effect zichtbaar dan bij de structurele maatregel. Daarnaast is het effect van de ad-hoc-ingreep alleen nog zichtbaar in de winter 2018-2019 en verdwijnt dit in het voorjaar van 2019. Het na-ijleffect van het stopzetten van de wegzijging en de verschillen tussen ad-hoc- en structurele ingrepen zijn erg afhankelijk van de gebiedskenmerken. In gebieden met een ondiepere grondwaterstand en veel interactie met het oppervlaktewater is vrijwel geen sprake van na-ijling in de volgende winter bijvoorbeeld, omdat hier het systeem 's winters relatief snel wordt aangevuld (met weinig mm neerslagoverschot) en de grondwaterstand in de winter 'afgetopt' wordt door de ontwatering drainage via het oppervlaktewater.



Figuur 70. Effect van het verkleinen van de wegzijging op grondwater op verschillende momenten (vanaf april, juni, augustus 2018 of structureel) in de Deurnsche Peel.

In Fase 1 van dit onderzoek is geconstateerd dat voor waterschap Limburg de berekende hoeveelheid beregning uit grondwater bijna tweemaal zo hoog is dan er is geregistreerd. Een vergelijking tussen een modelberekening met 100% en 50% reductie leert dat bij een 50% -reductie de effecten ongeveer de helft zijn t.o.v. de berekening met 100% reductie. Dit geldt voor alle hydrologische indices, zoals Ta/Tp, afvoer en kwel. De berekeningen van deze 50% reductie passen daarom beter bij de hoeveelheid berekend in Limburg volgens de registraties.

3.3.5 Optie 4: Bevorderen grondwateraanvulling - meer erin

Het vergroten van de grondwateraanvulling leidt tot de toevoeging van extra water aan het bodem- en grondwatersysteem. Dit kan door (1) een verandering van landgebruik naar gewassen of vegetatie die minder verdampen, (2) reduceren van maaiveldafvoer door landbewerking en opheffen van (ondergrond)verdichting, (3) afkoppelen van bebouwd gebied en (4) actieve infiltratie van extra water. Deze maatregelen grijpen allen direct aan op het ondiepe freatisch systeem en vervolgens op het oppervlaktewater en diepere grondwatersysteem.

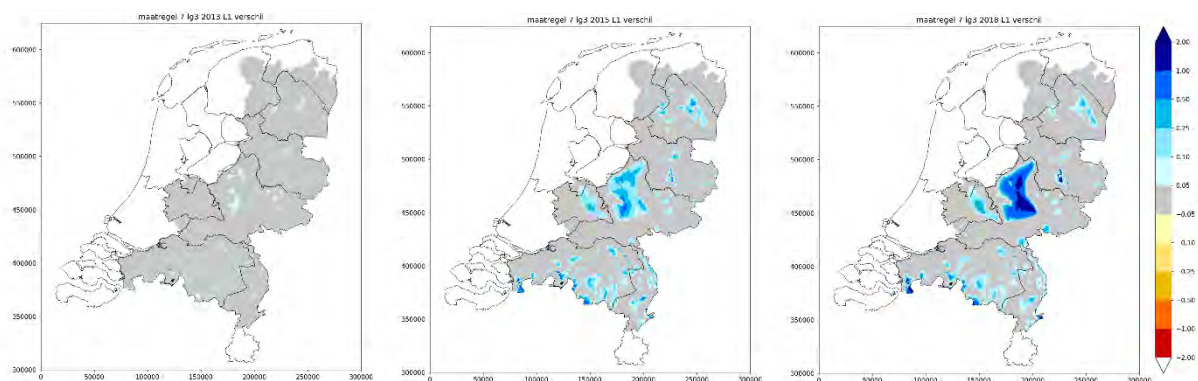
1) Verandering van landgebruik

De mate van transpiratie en interceptieverdamping (verdamping van water dat op de bladeren blijft liggen) verschilt per begroeiingstype. Daarnaast zijn er grote verschillen door het jaar heen, afhankelijk van het groeistadium van de vegetatie en het gewas. Een akker verdampt op jaarbasis doorgaans minder dan een grasmat en donker naaldbos staat bekend als een groot waterverbruiker. De aanplant van naaldbos ter vervanging van heide op de Veluwe is een duidelijk voorbeeld van hoe verandering van landgebruik drastisch heeft bijgedragen aan de vermindering van de grondwateraanvulling en daarmee aan de verlaging van de grondwaterstand en afname van afvoeren van sprengen en bronbeken en kwel op de flanken van de Veluwe. Echter, een belangrijk gegeven is ook de toegenomen gewasopbrengst in de landbouw, die een bijna lineair verband houdt met de werkelijke plantverdamping. Witte et al. (2019) berekenden een daling van de grondwaterstand van 15 tot 30 cm over de periode 1950-2010 voor de provincie Noord-Brabant als gevolg van de toename van de gewasopbrengst en veranderingen in landgebruik.

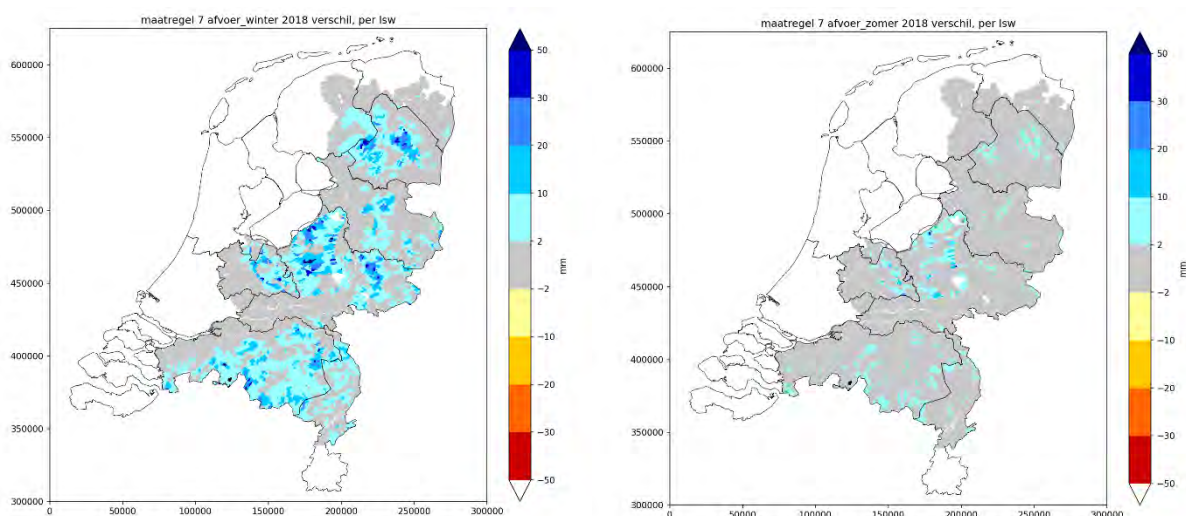
Figuur 71 laat zien wat het effect is van de verandering van naaldbos naar heide, die minder water verdampt. Uiteraard zijn er alleen effecten te zien voor de gebieden waar nu naaldbos staat. Effecten van de toename van de grondwateraanvulling zijn het grootste in de zogenaamde trage gebieden zonder noemenswaardige ontwateringsmiddelen. De grondwaterstand blijft stijgen totdat er weer een evenwicht wordt bereikt tussen de grondwateraanvulling, grondwaterstand (opbolling tussen drainagemiddelen) en afvoer van het neerslagoverschot. Hier geldt bij benadering dat de opbolling die nodig is om het neerslagoverschot af te voeren, kwadratisch toeneemt met de afstand tot de drainagemiddelen.

Bovendien is bij benadering de snelheid waarmee de grondwaterstand reageert op externe invloeden omgekeerd evenredig met deze drainageafstand-in-het-kwadraat en recht-evenredig met het doorlaatvermogen (Kraijenhoff van de Leur, 1958). Dit verklaart waardoor de effecten groter zijn voor gebieden met een grote drainageafstand en het voor die gebieden langer duurt voordat er evenwicht is bereikt. In Figuur 71 is te zien dat de effecten voor de Veluwe (met als 'drainagemiddelen' de Gelderse Vallei, Flevopolders, het IJsseldal en de Betuwe) het grootst zijn; na 5,5 jaar is hier nog steeds geen evenwicht bereikt.

Als gevolg van een hogere grondwaterstand neemt de gebiedseigen afvoer toe. Als de (nieuwe) evenwichtssituatie is bereikt en grondwaterstanden stoppen met stijgen, dan zal uiteindelijk de (nieuwe) gebiedseigen afvoer gelijk zijn aan het (nieuwe) neerslagoverschot. Een verhoging van de grondwaterstand leidt ook tot een verhoging van de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten en wanneer kwelgebieden in de invloedsfeer liggen ook tot een toename van de kwelflux naar watersystemen in de omgeving. Zo neemt de afvoer van sprengen en bronbeken op de flanken van de Veluwe significant toe als gevolg van deze maatregel, voor de winterperiode veel meer dan voor de zomerperiode (Figuur 72).



Figuur 71. Effect op de freatische grondwaterstand (LG3) voor 2013, 2015 en 2018 als gevolg van verandering van naaldbos naar heide vanaf begin 2013.



Figuur 72. Effect op de gebiedseigen afvoer door omvorming naaldbos naar heide, in de winter (links) en de zomer (rechts) van 2018.

De berekeningen zijn alleen uitgevoerd voor omvorming van naaldbos naar heide maar elke landgebruiksverandering zal zijn effect hebben, afhankelijk van hoeveel de begroeiing verdampt. Uiteraard geldt dat hoe groter het oppervlak is waar de extra grondwateraanvulling optreedt, des te groter de effecten zijn. Verandering van naaldbos naar loofbos is een maatregel die steeds vaker wordt toegepast of toegepast gaat worden. Voor de landbouwgebieden kan gedacht worden aan gewassen die droogteresistent zijn en minder water verdampen. Dit werkt op twee vlakken positief, namelijk dat er minder beregend hoeft te worden, waardoor het watersysteem minder wordt belast en er meer grondwateraanvulling optreedt.

2) Maaiveldafvoer beperken

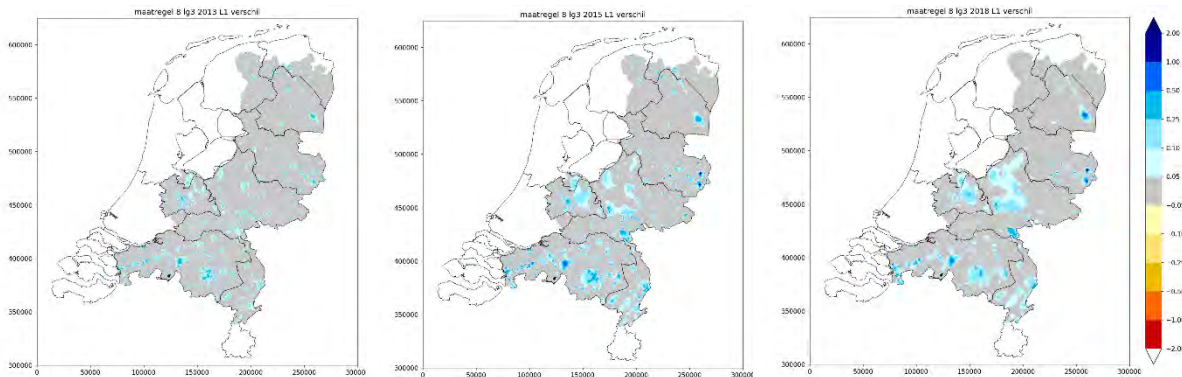
In sommige gebieden treedt tijdens natte perioden in de winter of intensieve buien in de zomer maaiveldafvoer op. Maaiveldafvoer is groot in de hellende gebieden van Zuid-Limburg en de stuwwallen van Oost-Twente. Al het water dat als maaiveldafvoer het perceel verlaat, komt niet ten goede aan het bodem- en grondwater en het beperken ervan leidt tot een vergroting van de grondwateraanvulling. Maaiveldafvoer kan worden beperkt door het creëren van microreliëf of het bevorderen van de infiltratiecapaciteit via landbewerking. In Zuid-Limburg worden agrariërs gestimuleerd om op deze manier de grondwateraanvulling te bevorderen, een aanpak die kennisoverdracht en bewustwording vereist.

3) Afkoppelen bebouwd gebied

Een groot deel van het bebouwd gebied bestaat uit gebouwen en bestrating waar het regenwater wordt opgevangen en naar het riool wordt geloosd. Dit water komt niet ten goede aan het bodem- en

grondwatersysteem. Steeds meer gemeenten proberen te voorkomen dat dit water zomaar naar de rioolzuivering wordt geloosd. Ook particulieren kunnen helpen de grondwateraanvulling te bevorderen door meer groen in de tuinen ('tegels er uit') en het hemelwater in de tuin te laten infiltreren.

Figuur 73 laat het effect op de grondwaterstand (LG₃) zien wanneer voor het bebouwd gebied gemiddeld 100 mm/jaar extra wordt geïnfiltrerd. De effecten beperken zich meestal tot het bebouwd gebied en een smalle zone eromheen. Voor de trage gebieden zonder ontwateringsmiddelen kunnen effecten na jaren nog opbouwen voor een groter uitstralingsgebied. De effecten zijn verder vergelijkbaar als besproken bij verandering van landgebruik.



Figuur 73. Effect op de freatische grondwaterstand (LG₃) voor 2013, 2015 en 2018 als gevolg van afkoppelen van bebouwd gebied met een extra infiltratie van 100 mm/jaar.

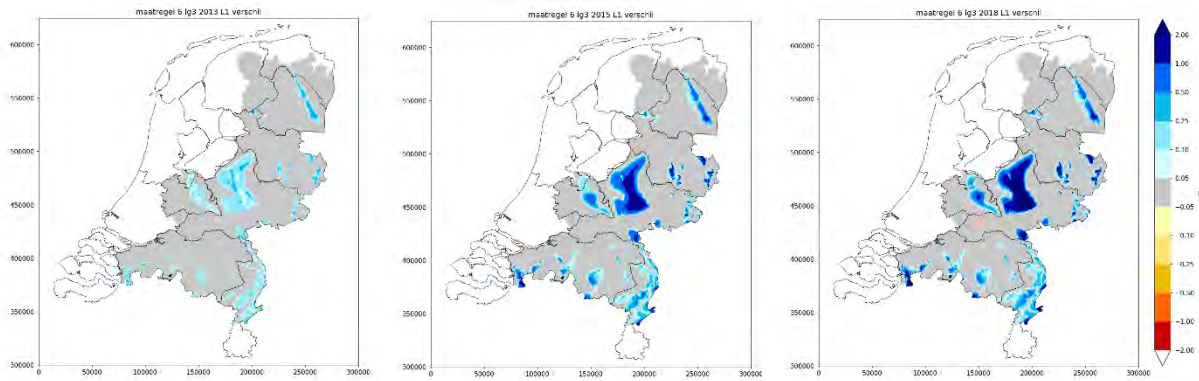
4) Ondergronds opslaan van water

In de winter wordt het grootste deel van het neerslagoverschot via het afwateringstelsel afgevoerd naar de rivieren en belandt uiteindelijk in de Noordzee. Via de rivieren Maas en Rijn komt op jaarbasis ruim tweemaal zoveel zoet water Nederland binnen dan er aan neerslag valt (jaarsom) en ook dit water verdwijnt grotendeels ongebruikt in de zee. Het IJsselmeer is het grootste zoetwaterbekken van Nederland waar rivierwater wordt geborgen. Echter, de capaciteit van dit meer wordt al maximaal gebruikt en er verdamp't s zomers veel water uit het IJsselmeer, naar schatting 75 à 100 m³/s. Deze verdamping is qua ordegrrootte vergelijkbaar met het debiet van de IJssel onder droge condities in het vanggebied van de Rijn.

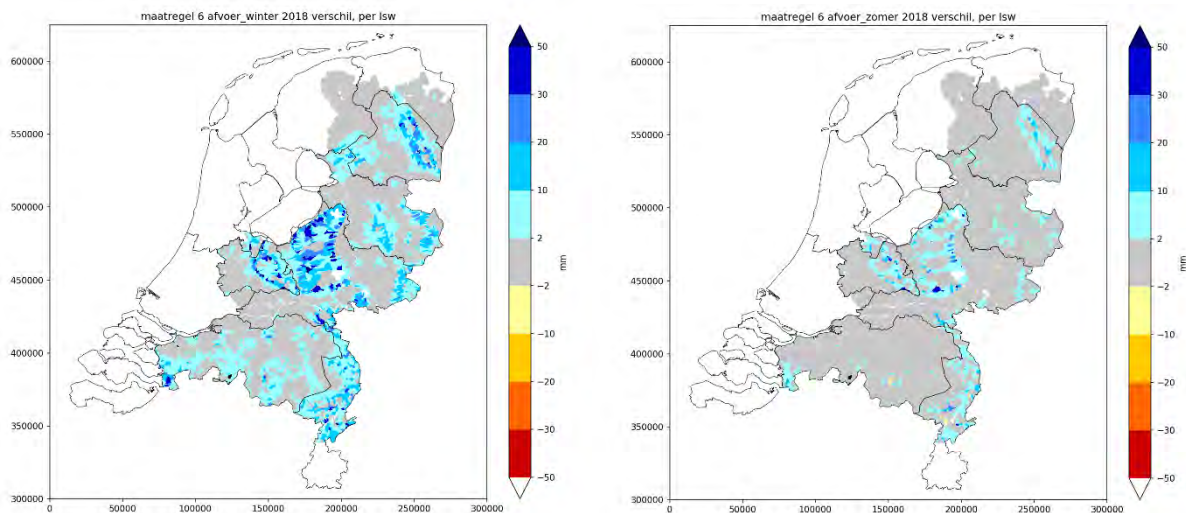
De ondergrond biedt ruimte om een deel van dit extra rivierwater op te slaan. De relatief hoger gelegen gebieden met diepe grondwaterstanden (> 2,5 m-mv) kunnen hiervoor dienen. Dit zijn overigens ook de trage gebieden waar ontwateringsmiddelen ontbreken en waar grondwater relatief lang kan worden vastgehouden. Het opgeslagen water komt ten goede aan de grondwatervoorraad, de afvoer van beken, de kwel naar natuurgebieden en kan indien nodig worden gebruikt voor de landbouw (beregening) gedurende het groeiseizoen, als compensatie voor effecten van drinkwateronttrekkingen of ter aanvulling van het grondwatersysteem. De huidige infrastructuur is nog niet geschikt om grote hoeveelheden rivierwater af te tappen en op de hoger gelegen gebieden te laten infiltreren, maar de bestaande kanalen en rivieren kunnen hier de basis voor vormen. Percelen kunnen geschikt worden gemaakt om het water via het maaiveld te laten infiltreren. Daarnaast kan het grondwater actief aangevuld worden op percelen door gebruik te maken van sub-irrigatie, waarbij water aangevoerd wordt via een regelbaar drainage systeem (bijv. KAD). Er valt ook aan andere bronnen te denken voor infiltratie zoals RWZI-effluent, kwelwater en het neerslagoverschot dat gedurende het winterhalfjaar in het ontwaterd gebied wordt afgevoerd naar de zee. Belangrijk aandachtspunt ten slotte is de (chemische) samenstelling van het te infiltreren water.

Figuur 74 laat het effect zien op de freatische grondwaterstand (LG₃) van extra grondwateraanvulling van 100 mm per winterhalfjaar voor gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2,5 m. Voor de meeste gebieden blijft de grondwaterstand na 5,5 jaar nog steeds stijgen. Door de afwezigheid van ontwateringsmiddelen blijft het grondwater lang in het systeem. Door de almaar toenemende grondwatervoorraad gaan aangrenzende gebieden

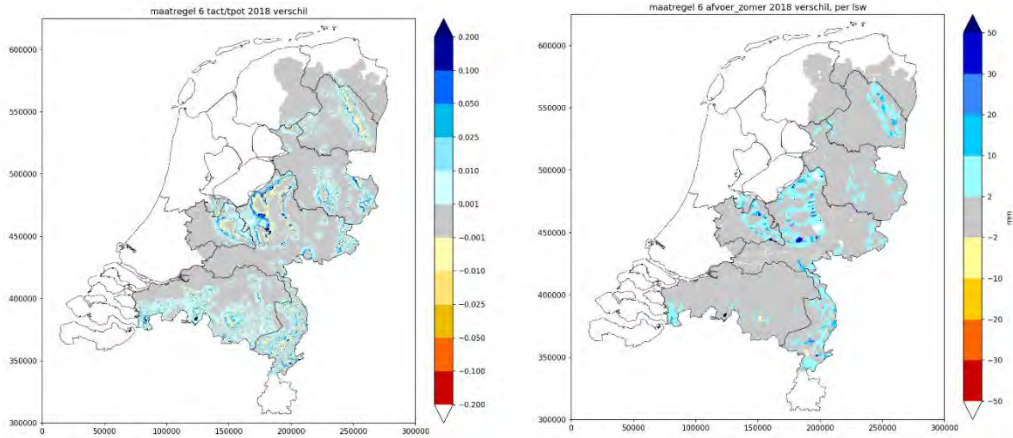
meer grondwater afvoeren via sloten, bronbeekjes of sprengen, zoals op de Veluwe (Figuur 75). Ook kwel in aangrenzende kwelgebieden neemt toe door deze maatregelen. Effecten op de transpiratie voor de gebieden waar wordt geïnfiltrteerd zijn verwaarloosbaar. Immers, de grondwaterstand stijgt maar blijft nog steeds te diep om via capillaire opstijging de wortelzone te bereiken. Daar is deze maatregel ook niet voor bedoeld. Er is enig positief effect te zien in de omringende gebieden (Figuur 76).



Figuur 74. Effect op de freatische grondwaterstand (LG3) voor 2013, 2015 en 2018 als gevolg van extra infiltratie gedurende de winter van 100 mm/jaar voor gebieden met een GHG dieper dan 2,5 m.

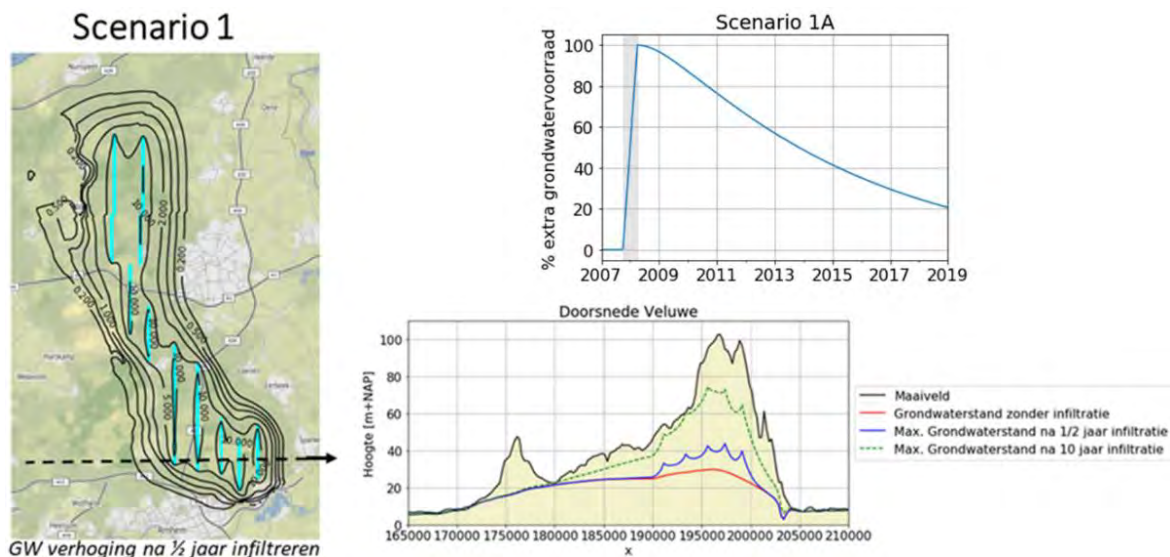


Figuur 75. Het effect op de gebiedseigen afvoer als gevolg van de infiltratie van 100 mm extra water per winterhalfjaar voor gebieden met een grondwaterstand > 2,5 m-mv, in de winter van 2018 (links) en de zomer van 2018 (rechts).



Figuur 76. Effect op Ta/Tp (2018; links) en de zomerafvoer (2018; rechts) als gevolg van extra infiltratie gedurende de winter van 100 mm/jaar voor gebieden met een GHG dieper dan 2,5 m.

Er dient te worden opgemerkt dat 100 mm infiltratie gedurende de winter een zeer geringe hoeveelheid is en dat het grondwatersysteem veel meer aan kan, zeker als de grondwaterstand dieper dan 10 m onder maaiveld staat zoals op de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug en Sallandse Heuvelrug. De Louw et al. (2020) berekenden voor de Veluwe met het LHM het effect op de grondwatervoorraad en afvoer van sprengen als gevolg van eenmalig een winterhalfjaar infiltreren van 330 miljoen m³ met een infiltratiesnelheid van 100 mm/dag. Dit idee staat bekend als de 'Nationale Gieter'. De grondwaterstand stijgt ter hoogte van de infiltratie met maximaal 10 m (Figuur 77). Aan de randen neemt de afvoer van sprengen en bronbeken significant toe. Zoals in Figuur 77 te zien is, is 5 jaar na infiltratie 55% van het geïnfiltreerde water nog onder de Veluwe aanwezig. Dit toont aan dat de zogenaamde trage gebieden met diepe grondwaterstanden en afwezigheid van ontwatering zeer geschikt zijn om extra water tijdelijk op te slaan, mits uiteraard de samenstelling van het infiltratiewater en de doorwerking ervan in kwelgebieden in orde zijn.



Figuur 77. Effect op de grondwaterstand op de Veluwe als gevolg van infiltratie van 330 miljoen m³ water met een infiltratiesnelheid van 100 mm/dag gedurende een winterhalfjaar over een oppervlak van 1800 ha (uit De Louw et al., 2020).

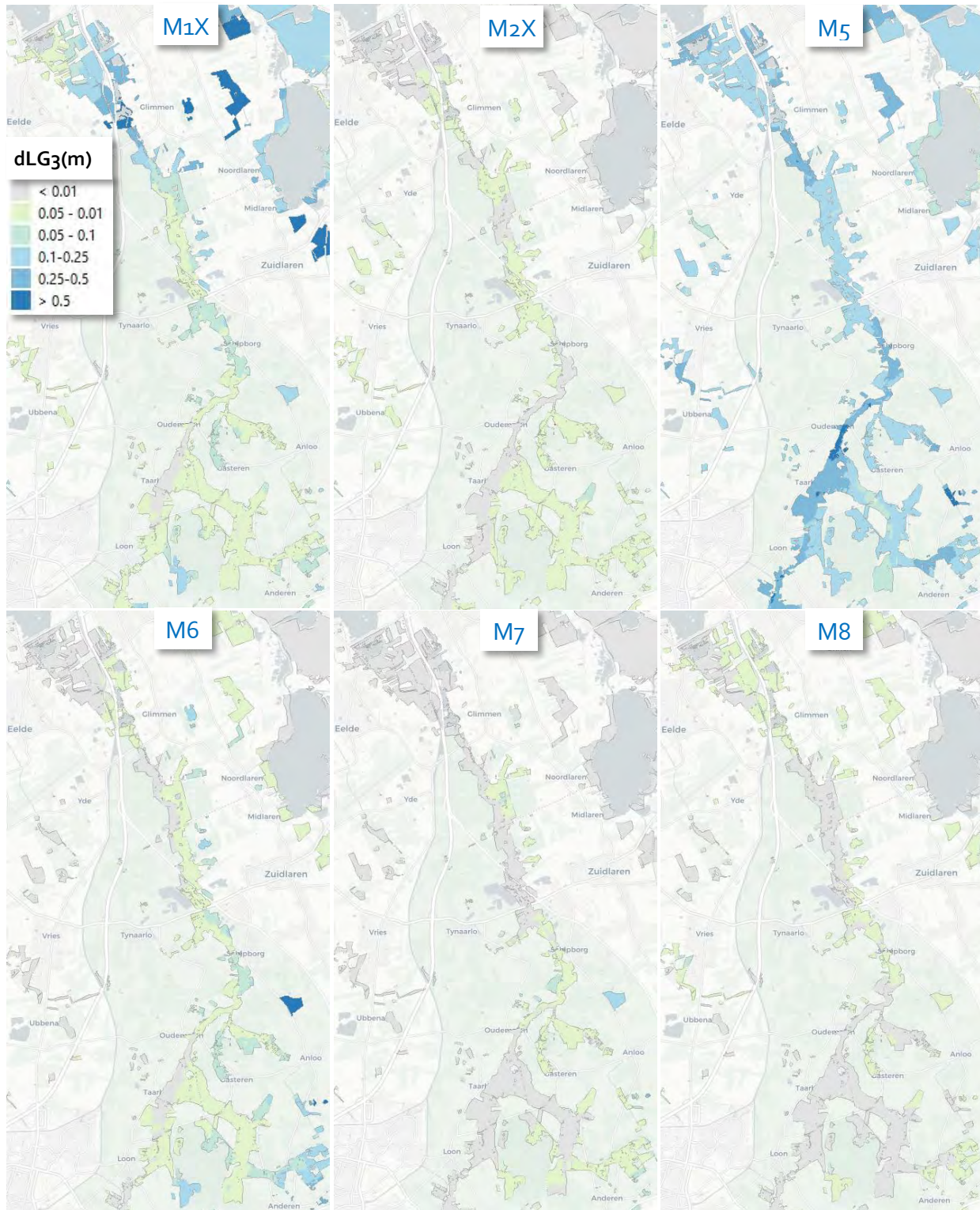
3.4 Hydrologische effecten van de structurele maatregelen voor natuurgebieden

3.4.1 De effecten van zes structurele maatregelen geïllustreerd met vijf natuurgebieden

Een belangrijke reden om het droogteonderzoek te starten, waren de zorgen over de gevolgen van het droge jaar 2018 voor de natuur. Het belangrijkste doel van de maatregelen is dan ook de schadelijke effecten op de natuur zoveel mogelijk te beperken. Op het droogteportaal kan bekeken worden wat het effect is van de maatregelen op de LG3 in 2018 vergeleken met de LG3 in 2018 zonder maatregelen (dLG3). Hier tonen we het effect voor de in Figuur 20 aangegeven vijf natuurgebieden en de maatregelen M1X, M2X, M5, M6, M7 en M8; zie Figuur 78 t/m Figuur 82. De effectiviteit van iedere maatregel verschilt per gebied. Toch zijn er enkele algemene conclusies te trekken:

1. Het verhogen van het stuwpeil en de drainagebasis (M5) zet in alle gebieden gemiddeld gezien het meeste zoden aan de dijk;
2. Op de tweede plaats qua effectiviteit staat in deze selectie van gebieden het beëindigen van de drinkwaterwinning (M1X: Drentse Aa, Westelijke Langstraat, De Dommel) het stoppen van beregenen (M2: landgoed Singraven) en ondergrondse zoetwaterberging (M6: Korenburgerveen);
3. Bij het Korenburgerveen en de Dommel is het stoppen met beregenen (M2X) vrijwel net zo effectief als het beëindigen van de drinkwaterwinning (M1X);
4. Binnen de gebieden is er variatie in de effectiviteit van de maatregelen ten gevolge van het landgebruik en de geohydrologische eigenschappen. Zo is het sluiten van de drinkwaterwinning (M1X) wel de effectiefste maatregel in het noordelijk deel van de Drentse Aa (bij Glimmen en Noord- en Zuid-Laren).

Deze regionale en lokale verschillen laten zien dat het uitvoeren van maatregelen om maatwerk vraagt. De resultaten tonen echter ook aan wat al heel lang bekend is, namelijk dat de belangrijkste oorzaak van de verdroging van natuurgebieden de ontwatering in de landbouw is, gevolgd door de winning van grondwater voor de drinkwatervoorziening en de industrie (Beugelink en Claessen, 1995).



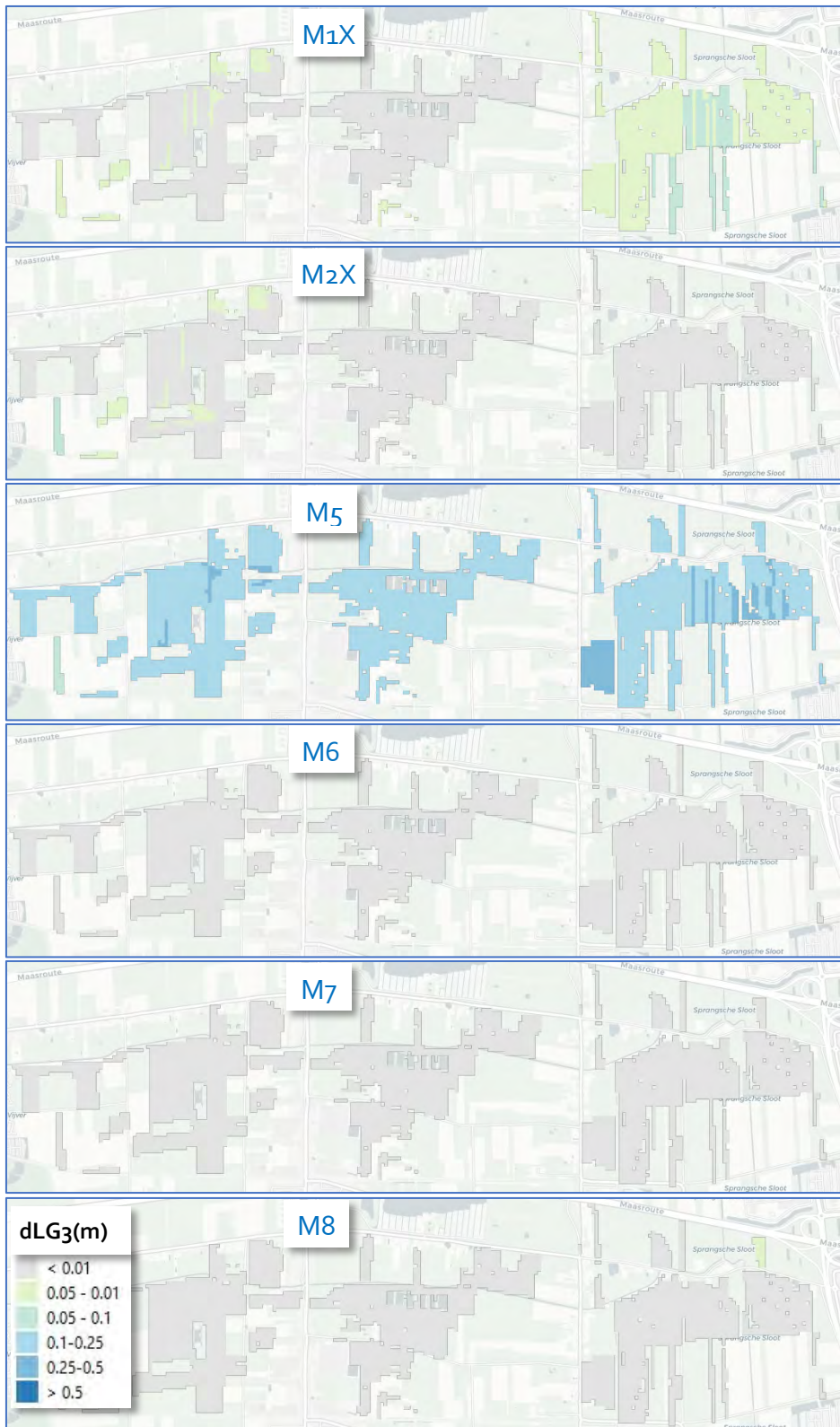
Figuur 78. Met het LHM gesimuleerde stijging van de laagste grondwaterstand (dLG₃) onder de grondwaterafhankelijke natuur van de Drentse Aa en omgeving door een aantal hypothetische maatregelen: M1X – Drinkwaterwinning stoppen, M2X – Beregening stoppen, M5 – Stuwpeil en drainageniveau +30 cm; M6 – Ondergrondse zoetwaterberging, M7 – Naaldbos naar heide, M8 – Afkoppelen bebouwd gebied.



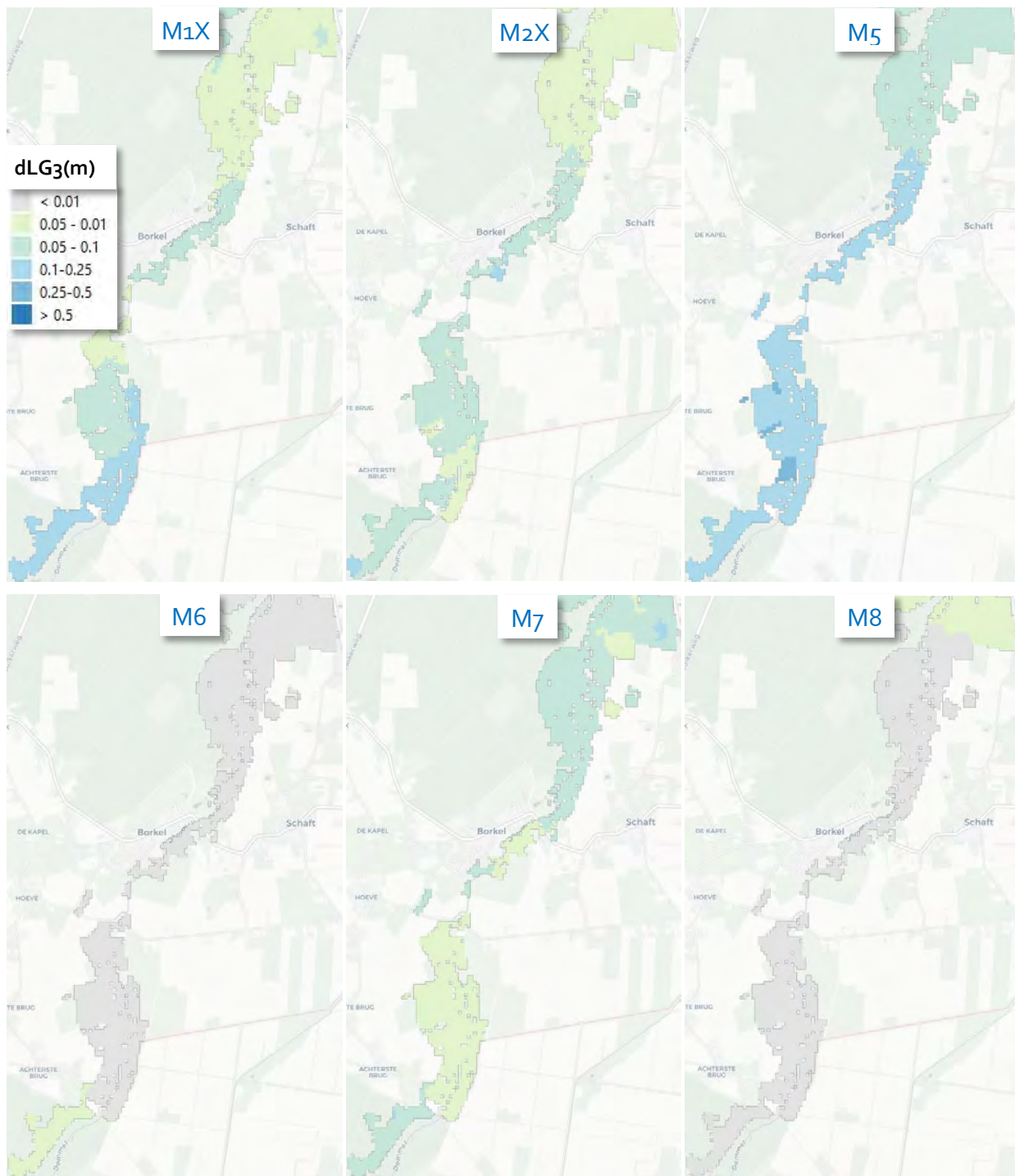
Figuur 79. Met het LHM gesimuleerde stijging van de laagste grondwaterstand (dLG₃) onder de grondwaterafhankelijke natuur van Landgoed Singraven door een aantal hypothetische maatregelen: M1X – Drinkwaterwinning stoppen, M2X – Beregening stoppen, M5 – Stuwpeil en drainageniveau +30 cm; M6 – Ondergrondse zoetwaterberging, M7 – Naaldbos naar heide, M8 – Afkoppelen bebouwd gebied.



Figuur 8o. Met het LHM gesimuleerde stijging van de laagste grondwaterstand (dLG₃) onder de grondwaterafhankelijke natuur van Het Korenburger veen en omgeving door een aantal hypothetische maatregelen: M_{1X} – Drinkwaterwinning stoppen, M_{2X} – Beregening stoppen, M₅ – Stuwpeil en drainageniveau +30 cm; M₆ – Ondergrondse zoetwaterberging, M₇ – Naaldbos naar heide, M₈ – Afkoppelen bebouwd gebied.



Figuur 81. Met het LHM gesimuleerde stijging van de laagste grondwaterstand (dLG₃) onder de grondwaterafhankelijke natuur van de Westelijke Langstraat door een aantal hypothetische maatregelen: M_{1X} – Drinkwaterwinning stoppen, M_{2X} – Beregening stoppen, M₅ – Stuwpeil en drainageniveau +30 cm; M₆ – Ondergrondse zoetwaterberging, M₇ – Naaldbos naar heide, M₈ – Afkoppelen bebouwd gebied.



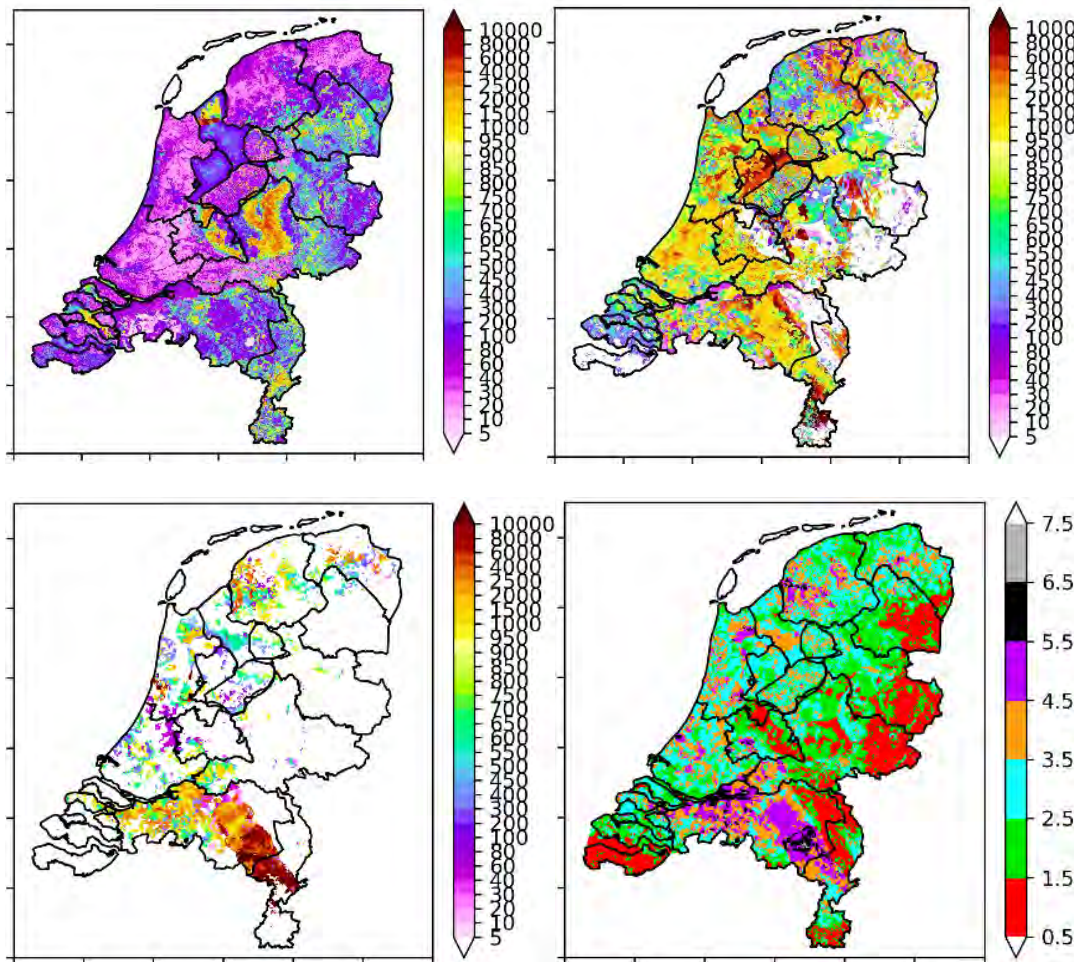
Figuur 82. Met het LHM gesimuleerde stijging van de laagste grondwaterstand (dLG₃) onder de grondwaterafhankelijke natuur van de Dommel en omgeving door een aantal hypothetische maatregelen: M_{1X} – Drinkwaterwinning stoppen, M_{2X} – Beregening stoppen, M₅ – Stuwpeil en drainageniveau +30 cm; M₆ – Ondergrondse zoetwaterberging, M₇ – Naaldbos naar heide, M₈ – Afkoppelen bebouwd gebied.

3.4.2 Bufferzones rondom grondwaterafhankelijke natuur

Grondwaterafhankelijke natuur is gebaat bij hoge grondwaterstanden en vaak bij de aanwezigheid van kwel. Het is daarom zinvol om speciale aandacht te schenken aan de effectiviteit van bufferzones rondom grondwaterafhankelijk natuur waar hydrologische maatregelen worden uitgevoerd. Immers, effecten zijn het

grootst op de locatie waar ze worden uitgevoerd en nemen af met afstand van deze locatie. De spreidingslengte is een maat voor de uitstraling van effecten (Figuur 83). Over een afstand ter grootte van éénmaal de spreidingslengte is van het hydrologisch effect nog 36% over, bij driemaal de spreidingslengte is het effect kleiner dan 5%.

Voor maatregelen die direct ingrijpen op het freatisch grondwatersysteem, zoals oppervlaktewatermaatregelen en verandering in de grondwateraanvulling, is de freatische spreidingslengte van belang. Bij de freatische spreidingslengte speelt naast het doorlaatvermogen van het pakket ook de slootafstand een belangrijke rol; hoe groter de slootafstand, des te groter de spreidingslengte. Voor maatregelen in de onderliggende watervoerende pakketten zoals grondwateronttrekkingen, is de spreidingslengte van het watervoerende pakket waaruit wordt onttrokken van belang. In Figuur 83 is te zien dat de trage gebieden met een grote 'slootafstand', zoals de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug, een grote freatische spreidingslengte (> 1.000 m) hebben en sterk ontwaterde gebieden met een dun freatisch pakket, zoals het hydrotype "Kedichem/Tegelen profiel" in West-Brabant een kleine freatische spreidingslengte (< 100 m). Over het algemeen is de spreidingslengte van de diepere watervoerende pakketten veel groter dan die van het freatisch pakket.



Figuur 83. De spreidingslengte in [m] van (1) het freatisch pakket of eerste watervoerend pakket (linksboven), (2) het tweede watervoerend pakket (rechtsboven), (3) het derde watervoerend pakket (linksonder) en het aantal [-] aanwezige watervoerende pakketten (rechtsonder).

Bij het bepalen van de grootte van de bufferzone rondom grondwaterafhankelijke natuur is het logisch om dit op basis van de spreidingslengte te doen, en afhankelijk van de maatregel dient de freatische of dieper watervoerend

pakket spreidingslengte te worden gebruikt. Dit is echter een uitwerking die op gebiedsniveau moet plaatsvinden en is niet binnen deze droogtestudie uitgevoerd. Echter, om het inzicht in de effectiviteit van bufferzones te vergroten, zijn binnen deze studie verkennende berekeningen uitgevoerd. Daartoe zijn bufferzones van 500 m rondom grondwaterafhankelijke natuur bepaald waarvoor drie verschillende type maatregelen doorgerekend: (1) peilopzet van 30 cm van het gehele ontwateringsstelsel, (2) geen drinkwaterwinningen, (3) geen beregening uit grondwater. De maatregelen worden niet alleen in de bufferzone genomen maar ook in het natuurgebied zelf. De keuze van 500 m is arbitrair en is geen optimale bufferzonegrootte. Die kan in de praktijk kleiner of juist (veel) groter uitvallen om een voldoende effectiviteit te bereiken.

Uit Tabel 11 blijkt dat voor het zandgebied 38% van de hoeveelheid onttrokken grondwater voor drinkwater binnen 500 m van een nat natuurgebied of in het natuurgebied zelf wordt onttrokken. Voor waterschappen Brabantse Delta, De Dommel en Limburg is dit percentage het hoogst. Voor beregening geldt dat volgens de LHM-berekeningen 27% van het onttrokken grondwater in het natte natuurgebied of in een zone van 500 m rondom plaatsvindt.

De ruimtelijke effecten van de bufferzonemaatregelen staan weergegeven in Figuur 84 en zijn samengevat voor het natuurbeheertype Nat schraalland en Vochtig hooiland in Tabel 12. Ze worden hieronder kort besproken.

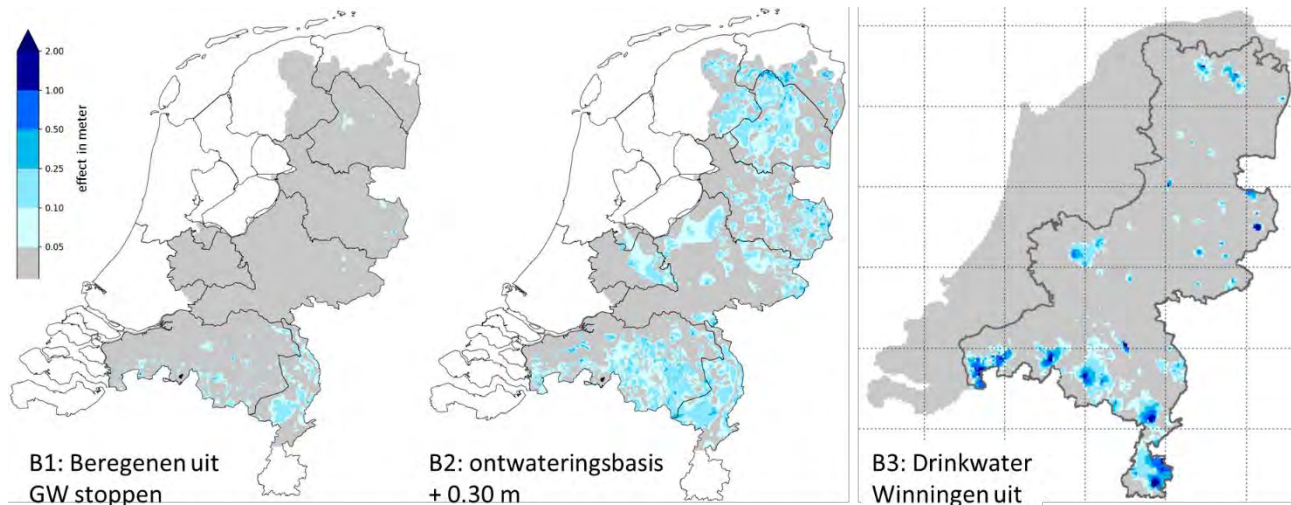
Tabel 11. Per waterschap de hoeveelheid onttrokken grondwater voor drinkwater in het totale waterschapsgebied en in de natte natuurgebieden met een 500 m brede bufferzone, evenals het percentage van winningen en beregening uit grondwater in deze bufferzonegebieden.

Waterschap	Onttrokken hoeveelheid drinkwater in miljoen m3 per jaar		% drinkwateronttrekking	% beregenen uit grondwater
	Totale gebied	in natuurgebied en bufferzone	in natuurgebied en bufferzone	in natuurgebied en bufferzone
Aa en Maas	39	12	31	23
Brabantse Delta	87	41	47	19
WS De Dommel	61	37	60	37
Vallei & Veluwe	71	13	19	20
Drents Overijsselse Delta	47	13	27	33
WS Rijn en IJssel	41	10	24	25
Vechtstromen	45	8	17	29
WS Limburg	69	41	59	27
totaal	461	174	38	27

1) Verhoging ontwateringsbasis in bufferzones rondom natte natuur

Het verhogen van de ontwateringsbasis in bufferzones van 500 m rondom natuur en in de natuurgebieden (maatregel B2) is effectief om de grondwaterstanden in natuurgebieden te verhogen (Figuur 84, midden). De effectiviteit van deze maatregel in de bufferzone is ongeveer 60 tot 75% van het effect wanneer die in het gehele zandgebied wordt uitgevoerd (vergelijking maatregel M5 met B2 in Tabel 12). Door de hogere freatische grondwaterstanden in de natuurgebieden, die meer toenemen dan de stijghoogte toeneemt, neemt zowel de zomerafvoer als de zomerkwel in de natuurgebieden af.

De opmerking dient te worden gemaakt dat veel vernattingsmaatregelen al in natuurgebieden zijn uitgevoerd en dat dit bufferzone-scenario, waarin ook maatregelen in het natuurgebied worden genomen, daarom een (behoorlijke) overschatting van het effect kan geven. Het nemen van maatregelen buiten het natuurgebied in alleen de bufferzone zal leiden tot een kleiner effect op de grondwaterstand in het natuurgebied, maar tot een groter effect op de kwel en gebiedseigen afvoer in het natuurgebied. Een uitgebreidere en gedetailleerde analyse op gebiedsniveau voor het verkennen van de effectiviteit maatregelen in bufferzones is daarom nodig.



Figuur 84. Berekend effect op de LG₃ (2018) als gevolg van drie (links, midden, rechts) verschillende maatregelen in een bufferzone van 500 m rondom natuurgebieden. In verband met de schaal zijn de natuurgebieden en bufferzones niet op de kaart weergegeven, deze kunnen gecombineerd met de effecten in het www.droogteportaal.nl worden weergegeven.

Tabel 12. Het effect van verschillende maatregelen inclusief de bufferzone-maatregelen samengevat voor de twee natuurgebeertypen Nat schraalland (in totaal 4.320 ha) en Vochtig hooiland (13.210 ha). De bufferzonemaatregelen B₁, B₂ en B₃ zijn doorgevoerd in het natuurgebied en in een bufferzone van 500 m rondom natuurgebied. B₁: geen berekening uit grondwater, B₂: ontwateringsbasis + 30 cm, B₃: geen drinkwaterwinningen.

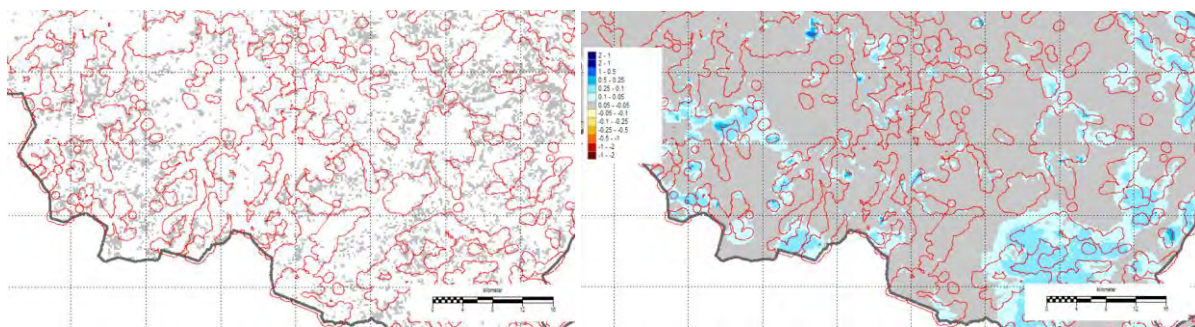
		NAT SCHRAALLAND										bufferzone		
		4320 ha										M2X	M5	M1X
parameter	REF	M1	M1X	M2	M2X	M5	M6	M7	M8	M9	B1	B2	B3	
Effect op LG3 voor 2018		m	0.027	0.049	0.012	0.024	0.171	0.068	0.024	0.012	0.294	0.012	0.128	0.019
Effect op HG3 voor 2018		m	0.022	0.039	0.004	0.007	0.175	0.072	0.022	0.012	0.285	0.003	0.132	0.014
Effect op LG3 voor 2018 Modellaag 7		m	0.367	0.724	0.029	0.053	0.149	0.097	0.039	0.023	0.671	0.022	0.082	0.344
Effect op Ta/Tp voor 2018	0.92	-	0.002	0.005	0.001	0.001	0.021	0.003	0.002	0.001	0.031	0.000	0.013	0.002
Effect op zomerafvoer 2018 (lsw)		mm/zomer	1.23	2.40	0.42	0.87	-12.66	1.43	0.71	0.74	-8.26	0.42	-8.61	0.72
Effect op zomerkwel 2018	1.08	mm/d	0.05	0.09	0.03	0.07	-0.02	0.06	0.03	0.02	0.16	0.04	-0.07	0.03
Effect op zomerkwelOpp 2018	69	%	1.1	2.1	1.0	1.7	-2.2	1.2	0.3	0.5	0.8	1.1	-3.2	0.4
		VOCHTIG HOOILAND										bufferzone		
		13120 ha										M2X	M5	M1X
parameter	REF	M1	M1X	M2	M2X	M5	M6	M7	M8	M9	B1	B2	B3	
Effect op LG3 voor 2018		m	0.020	0.035	0.008	0.016	0.149	0.034	0.012	0.009	0.221	0.007	0.088	0.016
Effect op HG3 voor 2018		m	0.014	0.024	0.003	0.005	0.155	0.037	0.010	0.009	0.214	0.002	0.094	0.012
Effect op LG3 voor 2018 Modellaag 7		m	0.199	0.391	0.022	0.039	0.137	0.051	0.020	0.017	0.424	0.017	0.067	0.209
Effect op Ta/Tp voor 2018	0.92	-	0.002	0.004	0.000	0.001	0.023	0.002	0.002	0.001	0.028	0.000	0.010	0.002
Effect op zomerafvoer 2018 (lsw)		mm/zomer	1.22	2.45	0.39	0.78	-13.00	0.92	0.66	0.54	-9.32	0.32	-6.36	0.84
Effect op zomerkwel 2018	0.76	mm/d	0.04	0.08	0.02	0.04	-0.03	0.04	0.02	0.01	0.08	0.02	-0.06	0.04
Effect op zomerkwelOpp 2018	66	%	1.3	2.5	0.6	1.2	-1.9	0.5	0.4	0.3	0.4	0.6	-2.5	0.6

2) Drinkwaterwinningen in bufferzones rondom natte natuur stoppen

Ongeveer 38% van het onttrokken volume aan grondwater voor drinkwater in het projectgebied wordt onttrokken in de bufferzones van 500 m rondom grondwaterafhankelijke natuur. Het stopzetten van deze winningen in deze bufferzones (maatregel B₃) heeft dan ook een groot effect op het watersysteem daar waar deze winningen worden beëindigd, zoals in Figuur 84 (rechts) is te zien, en dan met name in Noord-Brabant en Limburg. Lage grondwaterstanden in de zomer (LG₃) nemen voor natuurgebieden met bufferzones waar drinkwaterwinningen zijn gesitueerd toe met lokaal meer dan 0,5 m. In het beïnvloedingsgebied van de winning neemt de kwel in de natte natuurgebieden gedurende de zomermaanden toe met waardes tot >0,5 mm/dag. Een en ander hangt natuurlijk af van de hydraulische weerstand tussen watervoerend pakket en bovenliggende lagen en hoeveelheid grondwater die wordt onttrokken. Het is zinvol om specifiek voor de winningen die in de bufferzones zijn gesitueerd te verkennen of reductie of verplaatsing een optie is, rekening houdend met beschermbaarheid van de grondwaterkwaliteit voor drinkwaterproductie en in combinatie met andere ingrepen (ontwatering, berekening uit grondwater).

3) Berekening uit grondwater in bufferzones rondom natte natuur stoppen

De effecten van het stoppen van beregening uit grondwater in de bufferzones rondom natte natuur leiden niet op ruime schaal tot grote effecten op de LG3. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat slechts een klein deel van de onttrekkingen voor beregening plaatsvindt in bufferzones; landbouwgebieden rond natte natuurgebieden zijn immers door hogere grondwaterstanden minder droogtegevoelig. Dit is duidelijk te zien in Figuur 85, waar voor een deel van Noord-Brabant is ingezoomd. Waar veel beregend wordt vanuit het grondwater in de bufferzones, zijn de effecten groter. Afhankelijk van de hoeveelheid onttrokken water voor beregening kan lokaal de grondwaterstand 10 tot 30 cm stijgen als gevolg van het stoppen van onttrekkingen. Ook kwel wordt lokaal sterk beïnvloed door beregening met een toename van kwelfluxen van 0,5 tot 1 mm/d als onttrekkingen stoppen in/bij sommige gebieden. Vanuit bescherming van natte natuurgebieden geredeneerd, is het dus zinvol om beregening in bufferzones niet toe te staan (NB: lokale analyse nodig). De effecten zijn echter groter wanneer voor een groot gebied rondom natte natuur beregening wordt gestopt. De som van de onttrokken hoeveelheid grondwater leidt namelijk voor Noord-Brabant en Limburg tot een diffuus onttrekkingspatroon dat gezamenlijk een significant effect heeft. Het heeft daarom zin om te sturen met onttrekkingsbeleid voor beregening in de landbouw op deelgebied- of waterschapniveau, om droogteschade voor natte natuur te reduceren of te voorkomen. Er wordt aanbevolen om met een regionaal grondwatermodel op een gedetailleerdere schaal dan het LHM verschillende mogelijkheden te verkennen welk beregeningsbeleid past bij bescherming van natuur en het watersysteem (o.a. droogvallen beken) en met oog voor de gewasproductie in de landbouw. Hierbij kan specifiek geanalyseerd worden waar en in welke mate deze maatregel uitwerkt.



Figuur 85. Uitsnede voor deel van Noord-Brabant en Limburg met in grijs de potentieel beregende percelen (links). De rood-omlijnde gebieden zijn de natuurgebieden met 500 m bufferzone (links) en het effect op de LG3 in 2018 wanneer beregening in de rode gebieden wordt gestopt (maatregel B1).

3.5 Overzicht en vergelijking van de maatregelen

In deze paragraaf worden de effecten van maatregelen op het watersysteem samengevat met de belangrijkste bevindingen. Wat deze bevindingen betekenen voor het handelingsperspectief wordt besproken in Hoofdstuk 6. De effecten zijn gebaseerd op berekeningen met het LHM en met SWAP, aangevuld met watersysteemkennis.

3.5.1 Overzicht

Maatregelen in de ontwatering: water vasthouden

- Met het LHM zijn verschillende maatregelen in het oppervlaktewatersysteem doorgerekend. Echter, door het schaalniveau met modelcellen van 250x250 m is het niet goed mogelijk gebleken accuraat het effect van maatregelen van de afzonderlijke type ontwateringsmiddelen door te rekenen. Bijvoorbeeld, het modelmatig verhogen van het peil van het tertiaire systeem (de haarvaten) in een modelcel leidt direct tot meer drainage door het secundaire en primaire systeem in dezelfde modelcel. Er is immers maar één grondwaterstand per modelcel die de drainage naar het oppervlaktewater bepaalt. In werkelijkheid is dit anders en kan lokaal rondom een sloot de grondwaterstand worden verhoogd zonder dat dit tot extra drainage leidt door grotere waterlopen op grotere afstand. In een modelcel (van 250x250 m²) liggen alle

ontwateringsmiddelen in feite bij elkaar terwijl er in werkelijkheid een afstand tussen waterlopen van maximaal 250 m mogelijk is. Er wordt dan ook aanbevolen om met gedetailleerdere modellen (bijvoorbeeld de regionale modellen met modelcellen van 25x25 m²) de niet-stationaire effecten van afzonderlijke systemen te verkennen. De onderstaande bevindingen zijn daarom gebaseerd op het scenario waarbij het gehele ontwateringsstelsel (primaire, secundaire en tertiaire) het peil is verhoogd, SWAP-berekeningen en kennis uit eerdere projecten aangaande waterconserving en verdrogingsbestrijding.

- Het verhogen van het oppervlaktewaterpeil (d.m.v. stuw, dam, regelbare drainage i.p.v. conventionele drainage, etc.) belemmert de afvoer / drainage van grondwater en leidt daarmee tot hogere grondwaterstanden.
- Aanpak van alleen het haarvatensysteem heeft effect in de winterperiode bij een neerslagoverschot en dit effect neemt af gedurende het groeiseizoen, omdat het vastgehouden grondwater weglekt naar ontwateringsmiddelen in de omgeving, als die niet ook aangepakt worden. Vaak is dan in de zomerperiode nauwelijks nog iets van het effect merkbaar.
- Indien voor het gehele ontwateringsstelsel het ontwateringsniveau wordt verhoogd, zijn wel nog steeds significante effecten in de zomer aanwezig, gemiddeld ongeveer 50-60% van het effect in het winterhalfjaar.
- De grondwaterstand zal nergens verder stijgen dan de verhoging van de ontwateringsbasis die is doorgevoerd. Gemiddeld voor de waterschappen was het effect van een verhoging van 30 centimeter op de LG3 in 2018 ongeveer 12 tot 14 cm.
- Wanneer sloten worden gedempt, kan een groter effect worden bereikt door de significante vergroting van de slootafstand (dit heeft een kwadratisch effect op de grondwaterstand). Het effect hiervan is in deze studie niet berekend en er wordt aanbevolen om de effectiviteit van deze kansrijke maatregel in meer gedetailleerdere studies te verkennen.
- De effecten variëren tussen gebieden waarbij een onderscheid in ontwaterde en niet-ontwaterde gebieden kan worden gemaakt. Hoe sterker een gebied is ontwaterd, des te sneller de grondwaterstand zal reageren op een maatregel in het oppervlaktewaterstelsel, maar de grondwaterstand zal dan ook weer sneller dalen door de ontwatering. Voor de trage gebieden wordt het effect langzaam opgebouwd, maar blijft dan ook langer effectief door de trage ontwatering als gevolg van de grote afstand tot ontwateringsmiddelen.
- Het maximale effect wordt voor de meeste gebieden pas bereikt 1,5 tot 2,5 jaar na doorvoering van de maatregel. Dit toont aan dat een structurele reductie van de ontwatering veel effectiever is (30 tot 70%) dan een incidentele reductie. Peilbeheer als maatregel waarbij het peil tijdelijk wordt verhoogd, behoort tot de categorie ad-hoc-ingreep en is dus veel minder effectief. Voor de zogenaamde trage gebieden bouwt het effect zich nog steeds verder op na 6,5 jaar vanaf doorvoering van de structureelmaatregel.
- Significant effect van de grondwaterstandsverhoging op de transpiratie beperkt zich tot de gebieden met een grondwaterstand tussen ongeveer 1 en 2 m-mv. Transpiratiereductie speelt nauwelijks een rol bij ondiepere grondwaterstanden door voldoende capillaire opstijging vanaf de grondwaterspiegel en voor diepere grondwaterstanden is capillaire opstijging tot in de wortelzone niet aan de orde.
- De gebieden met de grootste effecten laten een stijging van de transpiratie reductie-factor T_a/T_p van 5 tot 15% (betekent een hogere werkelijke plantverdamping) zien voor 2018 als gevolg van de verhoging van de grondwaterstand. Op waterschapsniveau neemt de beregeningsbehoefte slechts af met 7-8% voor een extreem droog jaar als 2018. Deze afname is niet zo groot, omdat de stijging van de freatische grondwaterstand onvoldoende is om de wortelzone via capillaire nalevering van voldoende water te voorzien. Dat komt doordat de grondwaterstand in 2018 daar al te diep voor was weggezakt. Voor

individuele percelen kan het effect groter zijn, echter op regionaal watersysteemniveau zet het weinig zoden aan de dijk.

- Door verhoging van het gehele ontwateringsstelsel wordt er grondwater vastgehouden. Echter, dit speelt alleen in de eerste 1,5 tot 2,5 jaar wanneer grondwaterstanden nog structureel stijgen en het stopt min of meer totdat het neerslagoverschot en afvoer weer in evenwicht zijn met elkaar. Vanaf dit moment wordt het gehele neerslagoverschot (exclusief grondwateronttrekking en een beetje extra transpiratie) op jaarbasis weer afgevoerd. Er vindt wel een verschuiving van de afvoer plaats in tijd en in de manier hoe het grondwater wordt afgevoerd. In de zomer vindt er minder gebiedseigen afvoer plaats door de verhoogde ontwateringsbasis, terwijl in het winterhalfjaar meer grondwater wordt afgevoerd waarbij de toename vooral zit in toegenomen buis- en greppeldrainage en maaiveldafvoer. De snelle afvoercomponent neemt dus toe. In werkelijkheid ligt dit genuanceerder omdat maaiveldafvoer kan worden belemmerd door een ruw oppervlak of dammen langs de sloot. De basisafvoer in de zomer lijkt door deze maatregel dus af te nemen. Ook hier valt aan te sleutelen. De basisafvoer kan worden verhoogd door het dempen van sloten waardoor de drainageweerstand toeneemt of het extra vastgehouden water in de winter, te laten afvoeren in beken en grotere waterlopen door een lager peil te hanteren. Echter, dit laatste druist weer in tegen de verdrogingsbestrijding van beekdalen.

Drinkwater- en industriële onttrekkingen: minder eruit

- Het onttrekken van grondwater voor drinkwater en industrie heeft een grote impact op het watersysteem. De stijghoogte daalt het sterkst in de watervoerende pakketten waaruit onttrokken wordt.
- De daling van de stijghoogte werkt door tot in het freatisch systeem, immers elke onttrokken druppel dient te worden aangevuld vanuit het freatisch systeem.
- Hoe groter de hydraulische weerstand tussen de onttrekking en het freatisch systeem, des te groter de daling van de stijghoogte en des te groter de uitstraling. Immers, hoe groter de weerstand, des te moeilijker de aanvulling is vanuit het freatisch systeem is, waardoor grotere stijghoogteverschillen over een groot gebied nodig zijn om de hoeveelheid onttrokken grondwater vanuit het freatisch systeem aan te vullen. Bij een grotere weerstand worden de effecten op het freatisch systeem dus over een groter gebied uitgesmeerd met als gevolg dat het effect per oppervlak kleiner is.
- Het effect op de freatische grondwaterstand is veelal groot en permanent door het permanente karakter van de winningen.
- Door het permanente karakter van deze onttrekkingen, zijn de effecten veelal in evenwicht met het watersysteem, wat wil zeggen dat de effecten niet meer verder toenemen maar op een bepaald niveau blijven. Echter, wanneer men start of stopt met een onttrekking of het debiet aanpast kunnen effecten lang na-ijlen.
- De berekeningen laten zien dat na stoppen van een drinkwaterwinning (of starten van een winning), effecten op de grondwaterstand na 6,5 jaar nog niet stationair zijn, de effecten zijn dan nog steeds bezig op te bouwen. Dit geldt met name voor de zogenaamde trage gebieden waar ontwateringsmiddelen ontbreken. Hier zijn de effecten het grootst en na 6,5 jaar nog altijd groeiende.
- Het is evident dat effecten op de freatische grondwaterstand groter zijn bij grotere onttrekkingsdebieten en groter zijn naarmate men dichterbij de locatie van een waterwinning komt. Dit hangt mede af van de weerstand van de scheidende laag boven het pakket, van waaruit water gewonnen wordt. Er is een duidelijke relatie tot de hoeveelheid onttrokken grondwater (voor drinkwater) en het gemiddelde effect per waterschapsgebied. De effecten op de freatische grondwaterstand zijn gemiddeld voor het gehele waterschapsgebied (zanddeel) ongeveer 30 cm voor de waterschappen Vallei en Veluwe, Limburg en Brabantse Delta waar meer dan 70 miljoen m³ grondwater voor drinkwaterproductie wordt onttrokken

(gegevens LHM uit 2010). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de effecten zeer scheef verdeeld zijn met veel grotere effecten dichtbij de winningen tot geen effecten op grotere afstand van de winningen.

- De drinkwateronttrekkingen hebben een groot effect op de gebiedseigen afvoer. Bijna iedere druppel die wordt onttrokken komt niet tot afvoer. Voor de zomerperiode in 2018 leidt dit enkele weken tot een reductie van 40 tot 70% van de gebiedseigen afvoer wanneer dit gemiddeld wordt op waterschapsniveau. Dit geldt voor de vier waterschappen met de grootste drinkwateronttrekkingen (Brabantse Delta, Vallei en Veluwe, Limburg en De Dommel). Voor stroomgebieden dichtbij de winning zijn de effecten groter en leiden in sommige situaties tot volledige droogval.
- Het effect op de transpiratie is op waterschapsniveau klein. Voor een droog jaar als 2018 neemt deze slechts 0,5 tot 1.5% toe wanneer wordt gestopt met onttrekken voor de vier waterschappen waar het meest onttrokken wordt. Lokaal kunnen de effecten groter zijn en dan vooral voor percelen met een grondwaterstandsdiepte rond de 1,5 m-m.v. en dichtbij de winning. Wat betreft de waterbalans, is de toename van de transpiratie in 2018 ongeveer 7 tot 13% van de hoeveelheid onttrokken grondwater. Gemiddeld neemt de beregeningsbehoefte af met slechts 5%.
- De kwelflux wordt sterk beïnvloed door het onttrekken van grondwater. Het stoppen met onttrekken leidt in de infiltratiegebieden tot een afname van de infiltratie en in de kwelgebieden tot een toename van de kwel. Het areaal aan kwelgebieden neemt rondom de winningen met 5 tot 20% toe wanneer de winning wordt gestopt. Het effect op de kwel loopt in de zomerperiode van 2018 op tot 15-20% gemiddeld voor de waterschappen Dommel, Limburg en Vallei en Veluwe. Voor Brabantse Delta is dit zelfs 35 tot 45%.

Onttrekkingen uit grondwater voor beregening: minder eruit

- Beregenen uit grondwater heeft direct een effect op de stijghoogte, die het sterkst daalt in de watervoerende pakketten van waaruit onttrokken wordt.
- Deze daling werkt direct door in het freatisch systeem, want de hoeveelheid water die onttrokken wordt moet vanuit het freatisch systeem worden aangevuld.
- De laterale uitstraling van de effecten manifesteren zich in de watervoerende pakketten waaruit onttrokken wordt en de mate van uitstraling is afhankelijk van de hydraulische weerstand tussen de onttrekking en het freatisch systeem. Hoe groter deze weerstand, des te groter de uitstralingseffecten en des te groter de daling van de stijghoogte zullen zijn.
- Het effect op de freatische grondwaterstand is het grootst gedurende de beregeningsperiode en is maximaal aan het einde van de beregeningsperiode.
- Voor een extreem droog jaar zoals 2018 ijlt het effect op de grondwaterstand na tot tenminste het volgende groeiseizoen. Effecten op de grondwaterstand zijn dan nog voor zo'n 40 tot 60% aanwezig. In normale jaren treedt veel meer herstel op gedurende de winter, maar er is dan nog steeds geen sprake van volledig herstel.
- Voor kwel geldt hetzelfde: effecten zijn maximaal aan het einde van de beregeningsperiode en ijlen na tot in het volgende groeiseizoen voor een extreem droog jaar als 2018. Voor sommige stroomgebieden waar veel beregend wordt, kan de kwel 80-100% afnemen. Gemiddeld voor de zuidelijke waterschappen en Rijn en IJssel neemt de zomerkwel (jun-jul-aug) tussen 20 en 23% af.
- De gebiedseigen grondwaterafvoer neemt procentueel het sterkst af gedurende de beregeningsperiode, gemiddeld met 25%, maar voor stroomgebieden waarin veel beregend tot 100%. Dit betekent dat beken kunnen droogvallen als gevolg van beregening uit grondwater.
- Het grootste absolute effect op de grondwaterafvoer vindt plaats in de winterperiode als het

grondwatersysteem weer gevuld is en afvoer grootschalig op gang komt.

- Het effect op de transpiratie is erg groot voor de percelen waar beregend wordt. Immers, dat is het doel van beregening en zeer effectief om droogtestress tegen te gaan. Echter, door de daling van de freatische grondwaterstand als gevolg van de onttrekkingen, neemt voor de niet beregende percelen de transpiratie licht af.

Bevorderen grondwateraanvulling: meer erin

- De grondwateraanvulling kan worden bevorderd door verandering van landgebruik naar gewassen die minder verdampen (bijvoorbeeld het vervangen van naaldbomen door vegetatie die minder water verdampt), het belemmeren van maaiveldafvoer of door infiltratie van water dat wordt aangevoerd (bronnen als rivierwater, RWZI-effluent en neerslagoverschot).
- De waterbalans wordt direct en significant beïnvloed afhankelijk van de hoeveelheid die wordt geïnfilteerd, er komt immers meer in het systeem. Meer grondwateraanvulling leidt tot meer kwel, meer gebiedseigen afvoer en hogere grondwaterstanden; de grondwatervoorraad neemt toe. Voor aangrenzende gebieden met een oorspronkelijke grondwaterstand tussen 1 en maximaal 2,5 m-m.v. neemt ook de transpiratie toe.
- Voor tijdelijke opslag van water door kunstmatige infiltratie van water zijn de trage gebieden met grondwaterstanden dieper dan 2,5 tot 10 m-m.v. geschikt. Hoe dieper de grondwaterstand, des te meer ruimte is er om grondwater op te slaan in de ondergrond. Een groot voordeel van deze trage gebieden is dat het geïnfilteerde water relatief lang wordt vastgehouden door de afwezigheid van ontwatering. Daardoor is de bufferende werking groot. In waterwingebieden kan kunstmatige infiltratie in diepe watervoerende pakketten ook een optie zijn hoewel er altijd veel minder bergingsruimte beschikbaar is in (half) afgesloten met water verzadigde watervoerende pakketten dan in de onverzadigde zone boven de grondwaterstand.
- Opslag van water kan het best in de winter plaatsvinden wanneer er een neerslagoverschot is. Het opgeslagen water kan eventueel worden aangesproken in de zomerperiode voor drinkwater, beregening of dienen als bron van extra kwel en gebiedseigen water ten behoeve van natuur.
- De kwaliteit van het te infiltreren water is een belangrijk aandachtspunt.

3.5.2 Vergelijking van gevoeligheid verschillende maatregelen

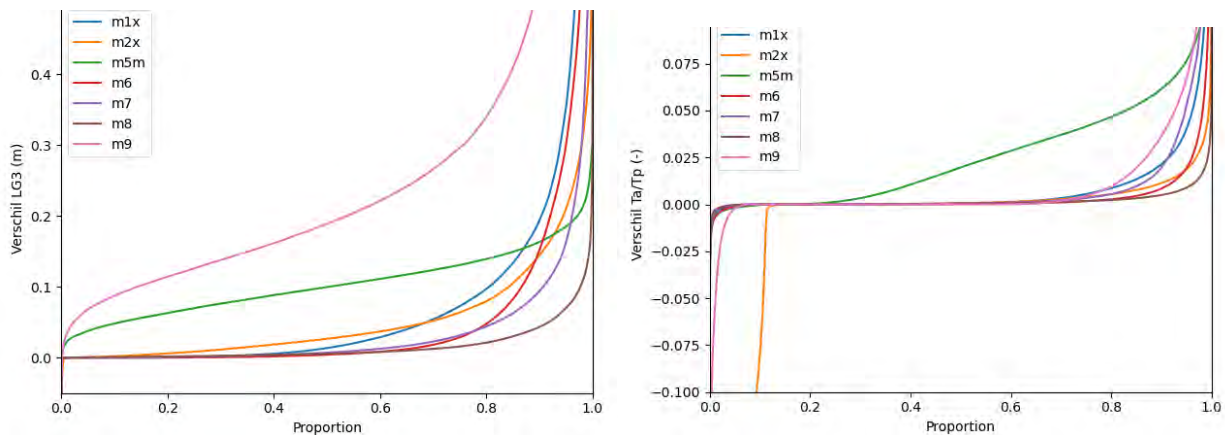
Met het LHM is berekend hoe gevoelig verschillende hypothetische maatregelen zijn voor het watersysteem (bijv. op LG3). Resultaten hiervan zijn gepresenteerd in voorgaande tekst. In deze paragraaf worden de gevoeligheden van de maatregelen met elkaar vergeleken, ondanks de beperking dat de mate van uitvoering, de locatie en de grootte van het gebied waar de maatregelen worden uitgevoerd van elkaar verschillen. De maatregel 'verandering van naaldbos naar heide' wordt bijvoorbeeld alleen doorgevoerd voor de gebieden waar in de huidige situatie naaldbos aanwezig is. Hetzelfde geldt voor afkoppeling van regenwater in stedelijk gebied van RWZI's, infiltratie van water in gebieden met een grondwaterstand > 2,5 m-m.v. en het stoppen van drinkwaterwinningen en van beregenen uit grondwater. Ook is 'alleen' een verhoging van het drainageniveau met 30 cm doorgerekend; andere veranderingen zoals het dempen van sloten zijn ook mogelijk.

Figuur 86 laat de cumulatieve frequentieverdeling zien van het gesimuleerde effect op de LG3 en Ta/Tp in 2018. De maatregel in het ontwateringsstelsel (M5min) laat voor een groot deel van het beschouwde gebied een significant effect zien op de freatische grondwaterstand. Daarmee wordt het totale ontwateringsstelsel aangepakt en voor dit ontwaterd gebied, dat een groot deel van het zandgebied omvat, zijn dan ook significante effecten te zien. De andere typen maatregelen laten voor een veel kleiner deel van het gebied effecten zien: in slechts 10 tot 20% van het gebied wordt een groter effect berekend dan voor de maatregel in ontwatering. Uiteraard is dit direct afhankelijk van het areaal waarover de maatregel wordt uitgevoerd. Bijvoorbeeld

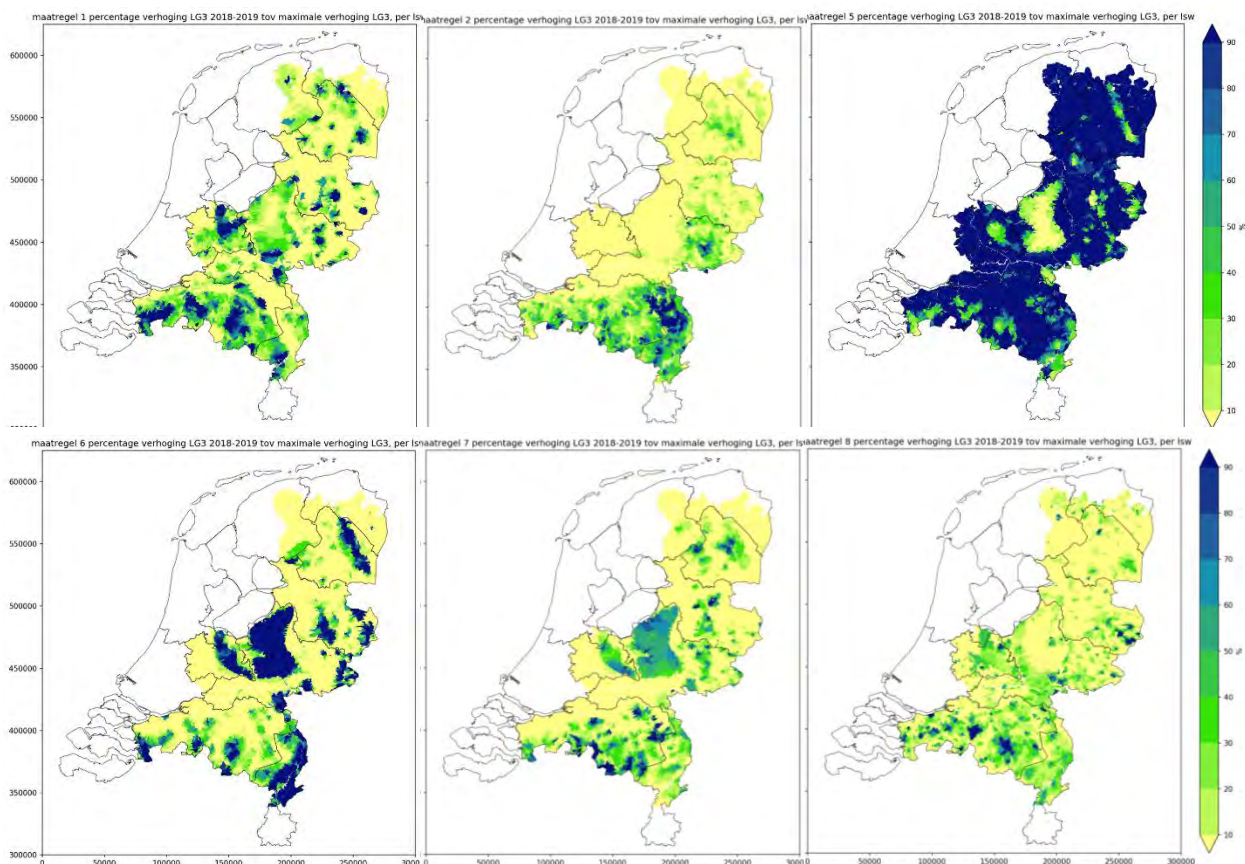
omvorming van naaldbos naar heide vindt alleen daar plaats, waar in de huidige situatie naaldbos aanwezig is.

Het samengevatte effect op T_a/T_p is vanzelfsprekend ook het grootst voor de maatregel die voor het grootste deel van het gebied de grondwaterstand verhoogt, M5min. Opvallend is het effect van beregenen uit grondwater, het stoppen hiermee leidt voor ongeveer 10% van het gebied tot een afname van de transpiratie (T_a/T_p gaat omlaag) maar ook een verhoging van ongeveer 5% van het gebied. Immers, het onttrekken van grondwater voor beregening leidt tot grondwaterstands daling en vermindert daarmee de capillaire nalevering aan de wortelzone en beïnvloedt dus ook de transpiratie van de percelen rondom de beregende percelen.

Om de ruimtelijke verschillen duidelijker te maken, is per LSW bepaald wat het maximale berekende effect is op de LG₃ (2018 en 2019) voor één van de zes richtinggevendende maatregelen, en vervolgens is per maatregel het effect uitgedrukt als percentage van dit maximale effect (Figuur 87). 100% betekent bijvoorbeeld dat deze maatregel voor deze locatie het grootste effect heeft in vergelijking tot de andere vijf maatregelen (Figuur 87). Ook op deze kaarten is duidelijk zichtbaar dat maatregelen in ontwatering voor het grootste deel van het zandgebied het effectiefste zijn om de grondwaterstand te verhogen. Echter, het effect van de verhoging van de grondwaterstand kan nooit meer zijn dan die van de ontwateringsbasis, in dit geval 30 cm. Andere typen maatregelen kunnen regionaal wel grotere effecten veroorzaken, zoals het reduceren van drinkwaterwinning of omvorming van naaldbos naar heide, zoals in Figuur 87 is te zien. Maar deze beperken zich duidelijk tot het gebied waar de maatregel wordt uitgevoerd. De omvorming van naaldbos naar heide heeft voor de hoger gelegen gebieden als de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug een groot effect op de grondwaterstand. Door afwezigheid van ontwateringsmiddelen kan de grondwaterstand verder doorgroeien dan in ontwaterde gebieden.



Figuur 86. Distributiediagrammen van het effect op de LG₃ (2018) en T_a/T_p (2018) door de maatregelen (zie Tabel 9).



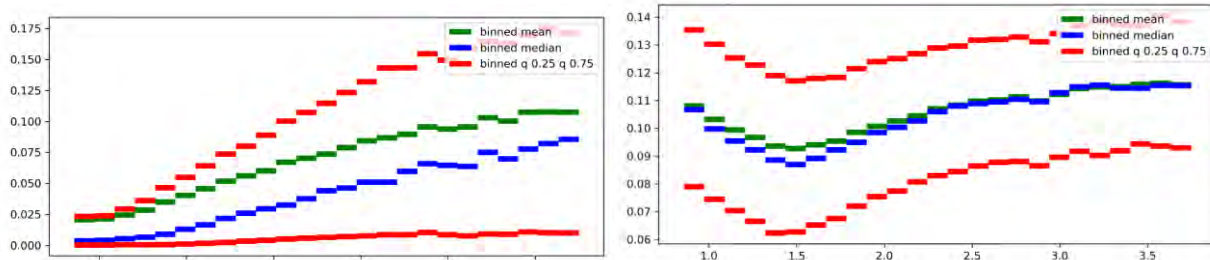
Figuur 87. Gevoeligheid van het watersysteem voor zes verschillende maatregelen. Weergegeven is hoeveel het gesimuleerde effect van een maatregel is op de LG₃ in 2018-2019 als percentage van het maximale effect van alle maatregelen afzonderlijk: M1: 50% Reductie drinkwaterwinning; M2: 50% Reductie beregening uit grondwater; M5: Stuwpeil en ontwateringsbasis +30 cm; M6: Ondergrondse zoetwaterberging; M7: Naaldbos naar heide; M8: Afkoppelen stedelijk gebied – bevorderen infiltratie met 100 mm/jaar).

3.5.3 Ruimtelijke variatie van effecten

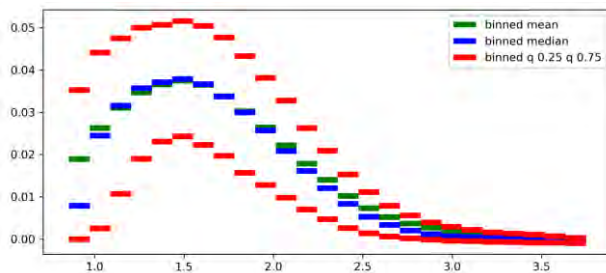
Het zandgebied is verdeeld in verschillende hydrotypen die verschillen in geohydrologische eigenschappen. De verschillende hydrotypen blijken nauwelijks onderscheidend te zijn qua effecten van maatregelen. Opvallend is wel dat effecten op de LG₃ in de ontwatering gemiddeld iets groter zijn voor het oostelijk en noordelijk zandgebied dan voor het zuidelijk zandgebied. Daarnaast zijn verschillen te zien tussen de relatief hoge gebieden zoals de stuwwallen en het lössgebied, en de overige hydrotypen. Naast dat dit de trage gebieden zijn waar effecten op grondwaterstanden lang najlen en uiteindelijk veel groter kunnen worden dan in het overige gebied, speelt ook de mate waarin de maatregel wordt uitgevoerd een grote rol. Bijvoorbeeld op de hogere stuwwallen is geen ontwatering aanwezig en het verhogen van de ontwateringsmiddelen heeft hier op korte termijn dan ook weinig effect. Het omvormen van naaldbos naar heide heeft juist weer een groot effect voor dit hydrotype omdat er veel naaldbos aanwezig is. De locatie waar de maatregel wordt uitgevoerd, speelt dus een belangrijke rol.

Tevens blijkt uit de ruimtelijke effect-kaarten zoals in dit hoofdstuk besproken, dat de variatie van effecten van maatregelen binnen een hydrotype groter zijn dan tussen hydrotypen. Uit de geproduceerde correlatiediagrammen blijkt dat de diepte van de grondwaterstand (i.c. GLG) in een gebied een goede correlatie vertoont met effecten van maatregelen (Figuur 88). De GLG is te zien als een soort 'grondwatersysteem-indicator'. Over het algemeen geldt dat gebieden met een ondiepe GLG intensiever zijn ontwaterd en een kwelcomponent, dan wel een geringe wegzijgingscomponent hebben. De gebieden met een van nature diepere GLG zijn minder intensief ontwaterd (water afvoeren is immers niet nodig). Dit zijn veelal gebieden waar ook de

wegzijgingscomponent groter is. De effecten op de grondwaterstand als gevolg van het modelmatig stoppen van de winningen zijn gemiddeld groter in gebieden waarin de GLG van dieper ligt. Hier speelt de afwezigheid van ontwateringsmiddelen een grote rol die effecten op de grondwaterstand bufferen. Immers, een deel van het onttrokken debiet komt tot uiting in minder gebiedseigen afvoer. Bij afwezigheid van ontwateringsmiddelen wordt de hoeveelheid onttrokken grondwater alleen aangevuld vanuit het freatische systeem, met een freatische grondwaterstands daling tot gevolg. Eenzelfde positieve correlatie is zichtbaar voor het effect van de verhoging van de ontwateringsbasis, echter deze vertoont een dip voor een GLG rond 1,5 m-mv. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de toename van de transpiratie als gevolg van een hogere grondwaterstand. Zoals in Figuur 8g is te zien, is het effect op de transpiratie het grootst voor GLG's tussen 1 en 2 m-mv.



Figuur 88. Correlatie tussen GLG (x-as) en het effect op de LG_3 (y-as) voor de maatregel alle winningen uit (links) en ontwateringsbasis +30 cm (rechts).

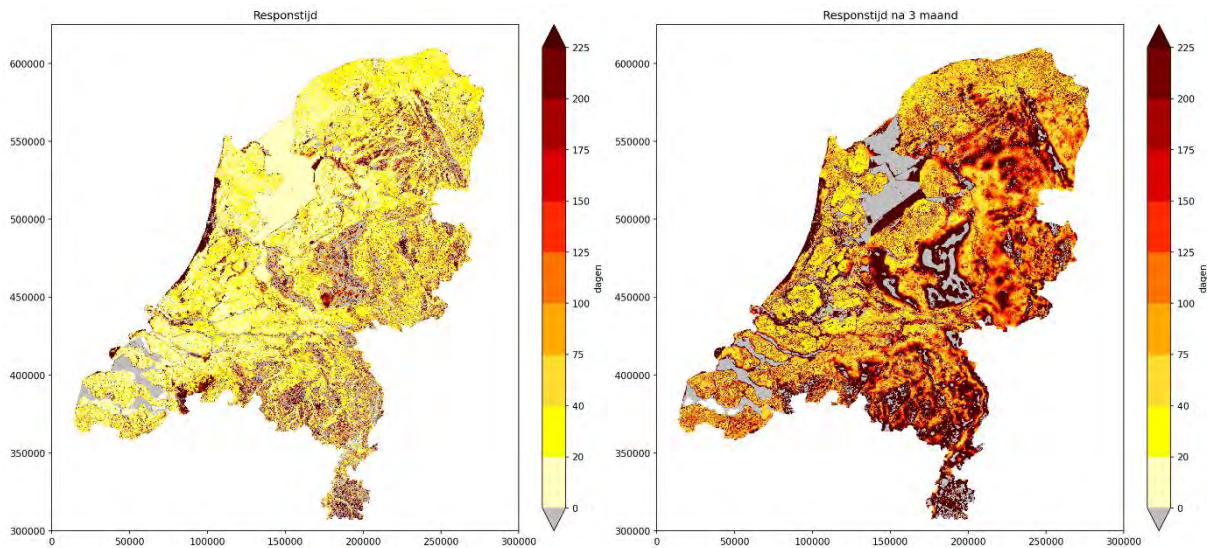


Figuur 89. Correlatie tussen GLG (x-as) en het effect op T_a/T_p als gevolg van de maatregel ontwateringsbasis +30 cm.

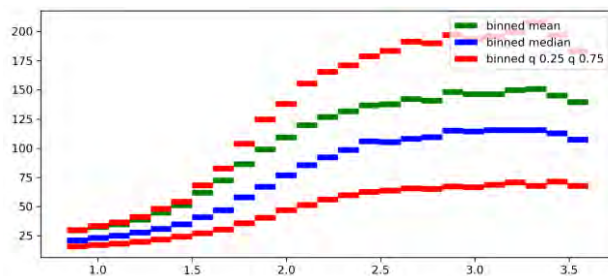
Bij de bespreking van de effecten in dit hoofdstuk wordt veelal gesproken over trage en snelle gebieden. Met het LHM is de responstijd of reservoircoëfficiënt (Bijlage V) van het grondwatersysteem berekend door de grondwaterstand vanuit een GHG-situatie te laten uitzakken (grondwaterstand daalt door drainage van het grondwater) en de snelheid van de daling voor 10 dagen te bepalen (natuurlijke logaritme). De gebieden met een grote responstijd zijn de hoger gelegen gebieden die gekenmerkt worden door diepe grondwaterstanden (> 2,5 m-mv) en veelal afwezigheid van ontwateringsmiddelen (Figuur 90). De afwezigheid van ontwateringsmiddelen, dan wel een grote afstand tot het dichtstbijzijnde ontwateringsmiddel, maakt dat deze gebieden traag leeglopen; de drainageweerstand is dan groot. Deze gebieden komen nog duidelijker naar voren wanneer de responstijd wordt berekend als het grondwatersysteem drie maanden de tijd heeft om uit te zakken. Voor meerdere gebieden staat de grondwaterstand dan onder het ontwateringspeil waardoor de afstand tot actieve ontwateringsmiddelen groter wordt en het systeem nog trager wordt. Uit de correlatie-analyse tussen de GLG en de responstijd is een duidelijke relatie zichtbaar die laat zien dat het systeem trager wordt bij een diepere grondwaterstand (Figuur 91).

De responstijdenkaart geeft een indicatie van waar grondwater niet snel via het oppervlaktewatersysteem wordt afgevoerd en dus lang kan worden vastgehouden (de trage gebieden). De hoeveelheid vast te houden water kan worden vergroot door bijvoorbeeld extra infiltratie, verandering van landgebruik maar ook door minder grondwater uit het systeem te halen (onttrekkingen reduceren). Effecten van dit type maatregelen die direct ingrijpen op de waterbalans (meer grondwateraanvulling, minder onttrekkingen) zijn het grootst voor dit soort trage gebieden. Maatregelen in het ontwateringsstelsel kunnen ook effect hebben op deze gebieden, al duurt het

lang voordat de maatregel in gebieden in de omgeving effect heeft op de grondwaterstanden in de trage gebieden. De ontwaterde gebieden reageren in de meeste gevallen snel op ingrepen in de ontwatering, hoe intensiever het gebied is ontwaterd, des te sneller de respons is. Echter, indien water wordt vastgehouden door extensivering van de ontwatering, zijn effecten ook weer snel uitgewerkt voor deze snelle gebieden. Opgemerkt moet worden dat het gegeven aantal dagen in de responstijdenkaart alleen gebruikt mag worden om snellere en tragere gebieden van elkaar te onderscheiden. Het aantal dagen geeft geen exact inzicht in hoe snel een maatregel doorwerkt (zie bijlage V). Naast de respons op het freatisch systeem van het afvoerproces, zoals verkregen met het LHM, is de reactie van de grondwaterstand op een recharge-event afgeleid uit tijdreeksanalyse (bijlage V). Deze geeft inzicht in de tijd die het duurt dat een recharge event (bijvoorbeeld neerslag, maar ook 'actieve' infiltratie) effect laat zien in de grondwaterstand.



Figuur 90. De responstijd (in dagen) voor de situatie bij de GHG waarbij het gehele ontwateringsstelsel actief is (links) en na drie maanden uitzakken wanneer alleen het hoofd-ontwateringsstelsel nog actief is (rechts). NB: de grijze gebieden hebben responstijd groter dan 225 dagen.



Figuur 91. Correlatiediagram tussen de GLG (x-as) in m-m.v. en de responstijd (y-as) in dagen.

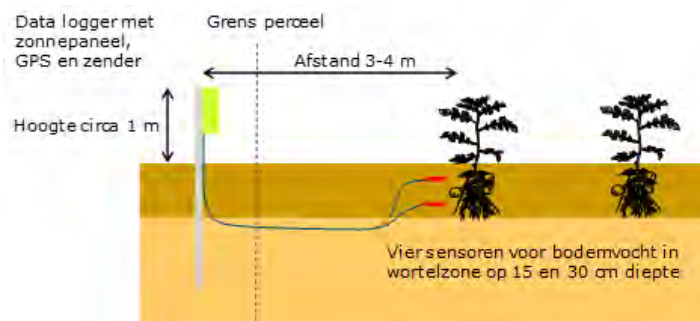
4. Data en informatie voor toestand, analyse en beleid

Om het beschikbare oppervlaktewater en grondwater optimaal te kunnen afstemmen op de behoeftes verschillende landgebruiksfuncties, is het nodig dat de informatievoorziening over het watersysteem op orde is. Metingen en registraties dienen structureel, betrouwbaar en up-to-date te zijn. In het droogteproject zijn er verschillende deelstudies verricht om de gegevensinwinning te verbeteren en te ontsluiten. Tevens is inzicht gekregen in de tekortkomingen in de huidige informatievoorziening. In dit hoofdstuk tonen we de resultaten van de deelonderzoeken en onze bevindingen.

4.1 Meetnet bodemvocht

In het kader van het droogteproject zijn elf meetlocaties ingericht in de periode november 2019 – februari 2020 in landbouw- en natuurgebieden voor nauwkeurige metingen van bodemvocht. De locaties zijn geselecteerd in overleg met geïnteresseerde waterschappen en provincies. Criteria voor selectie waren een goede verdeling over landbouw- en natuurgebieden en over droge en vochtige terreinen. De locaties moesten representatief zijn voor het omliggende gebied. Verder zijn de locaties gekozen in de buurt van operationele grondwaterstandsbuizen met een langjarige meetreeks.

Figuur 92 toont schematisch de meetopstelling. Op 15 en 30 cm-m.v. in de wortelzone zijn bodemvochtsensoren geplaatst. Op iedere diepte wordt met twee sensoren gemeten (in duplo) om een beeld te krijgen van de bodemheterogeniteit en ter controle van het sensorsignaal. De sensoren zijn verbonden met een datalogger met zonnepaneel en zender. De bodemvochtmetingen zijn online toegankelijk via www.droogteportaal.nl.



Figuur 92. Meetopstelling voor bodemvocht.

Het deelrapport 'Bodemvochtmetingen in zandgebieden van Hoog Nederland' beschrijft de meetlocaties en het verloop van bodemvochtmetingen en grondwaterstanden in het jaar 2020 (Van Dam en Gooren, 2021). De metingen van vochtgehalten en grondwaterstanden in 2020 tonen allerlei variaties in bodemvochtverloop en interactie bodemvocht – grondwater, afhankelijk van het weer op de specifieke locatie, de vegetatie, de bodemopbouw, de diepte van de grondwaterstand en regionale grondwaterstroming. De bodemvochtmetingen kunnen gebruikt worden voor diverse doeleinden, zoals 'early warning' voor droogte, inschatting droogtestress voor vegetatie, kalibratie van gegevens uit verwerkte remote sensing informatie, en kalibratie van (agro)hydrologische modellen.

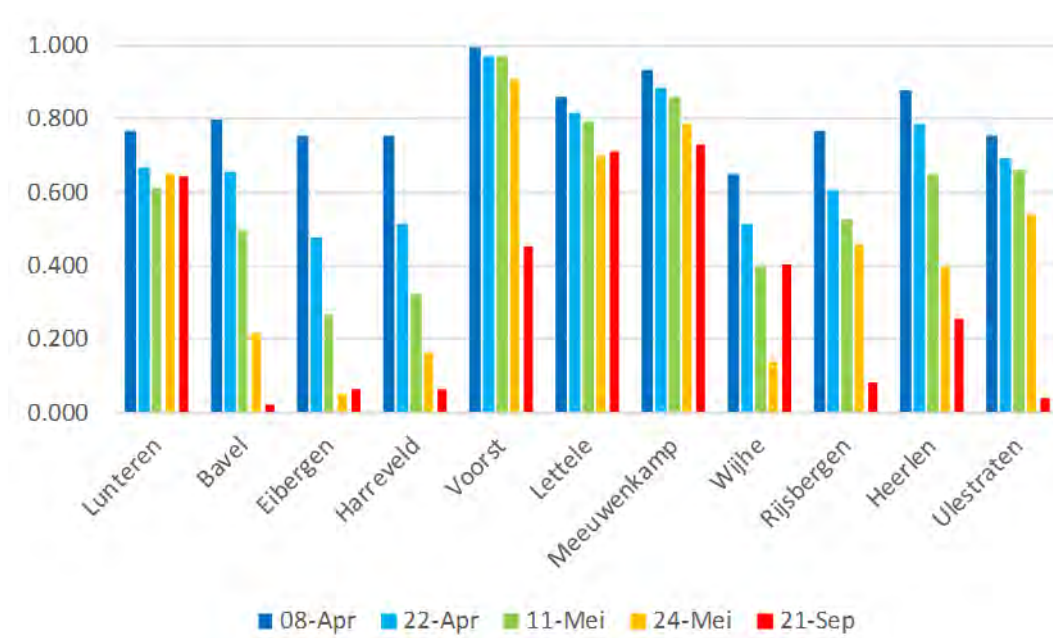
De bodemvochtmetingen stellen ons in staat de fractie beschikbaar bodemvocht vast te stellen in de wortelzone tussen veldcapaciteit ($pF=1,0$) en verwelkingspunt ($pF=4,2$). Dit is belangrijke informatie voor mogelijke droogtestress voor de vegetatie en voor de te verwachten grondwateraanvulling. Figuur 93 laat de fractie beschikbaar bodemvocht zien van de elf locaties op verschillende momenten in 2020. Aan het begin van het groeiseizoen, op 8 april 2020, beginnen een aantal locaties reeds met een lager vochtgehalte door de droge

maand maart. Aan het einde van het groeiseizoen, op 21 september, is bij sommige locaties de wortelzone uitgedroogd tot verwelkingspunt, terwijl op andere locaties het bodemvocht op peil blijft of deels is aangevuld. De bodemvochtmetingen geven snel en betrouwbaar inzicht in de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht voor de vegetatie en de kans op grondwateraanvulling voor diverse plekken op de hoge zandgronden. Aangezien de bodemvochtmetingen tijdens dit project gestart zijn, gaat het om korte tijdreeksen. WAM heeft sinds 1-4-2016 een bodemvochtmeetnet in bedrijf; op meetlocaties binnen dat meetnet zijn meetreeksen beschikbaar (meetdieptes 5, 10, 20, 40 en 80 cm-m.v.).

Reeds tientallen jaren wordt intensief onderzoek gedaan naar technieken om met satellietwaarnemingen de variatie van bodemvocht in kaart te brengen (Rodriguez-Fernandez et al., 2019). Tot nu toe is de nauwkeurigheid van deze technieken beperkt omdat de informatie zich beperkt tot de bovenste 5 cm van de bodem, of de waarnemingen gehinderd worden door vegetatie (El Hajj et al., 2018). De automatische bodemvochtmetingen die in het kader van het droogteproject worden gedaan, kunnen gebruikt worden om de remote sensing technieken meer representatief te maken voor de wortelzone.

Om inzicht te krijgen in de droogte in het bodemvocht op langere termijn zijn simulaties gedaan met het agrohydrologische model SWAP (Kroes et al., 2017). In verband met het ontbreken van betrouwbare bodemvochtgegevens, is SWAP voor deze toepassing alleen gekalibreerd op aanwezige grondwaterstandgegevens (Figuur 94). Het resultaat is weergegeven in Figuur 95.

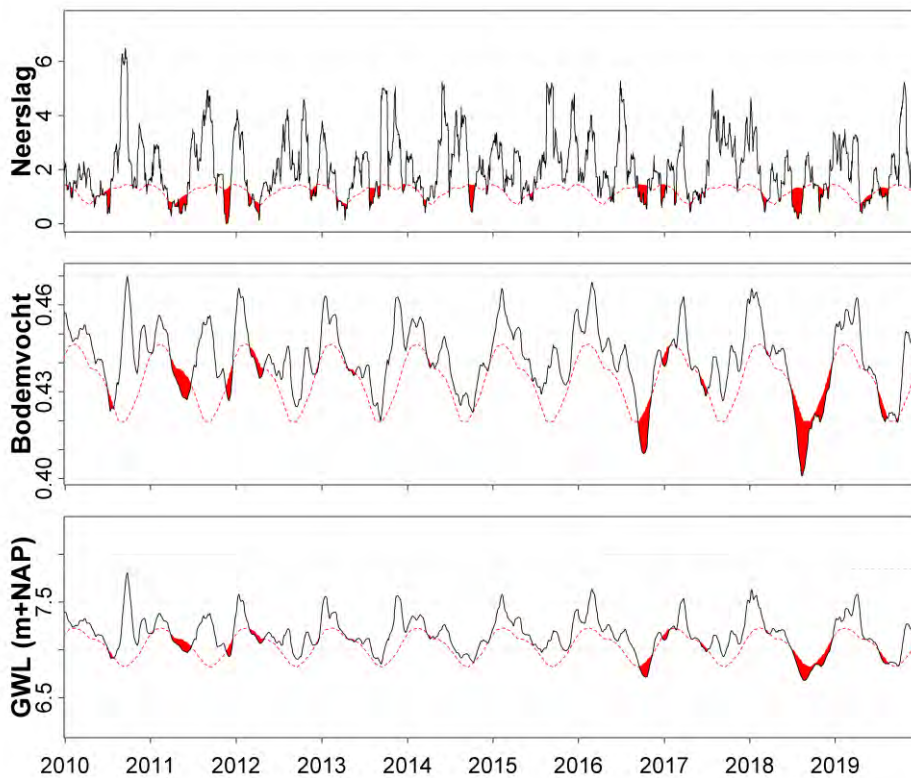
Nu ook bodemvochtgegevens beschikbaar zijn, kan SWAP in vervolgprojecten beter gekalibreerd worden. Daarmee verhogen we de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten en analyses. Dit biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid om, uitgaande van de actuele bodemvochtsituatie en voor verschillende weerscenario's, met het gekalibreerde model nauwkeurige voorspellingen te doen van droogtestress voor landbouw en natuur.



Figuur 93. Fractie beschikbaar bodemvocht voor de elf meetlocaties op vijf momenten in 2020.



Figuur 94. Gemeten bodemvochtgehalte en grondwaterstand in het jaar 2020 op locatie Lettele. De bodemvochtmetingen op 30 cm diepte zijn betrouwbaar voor slechts één sensor.

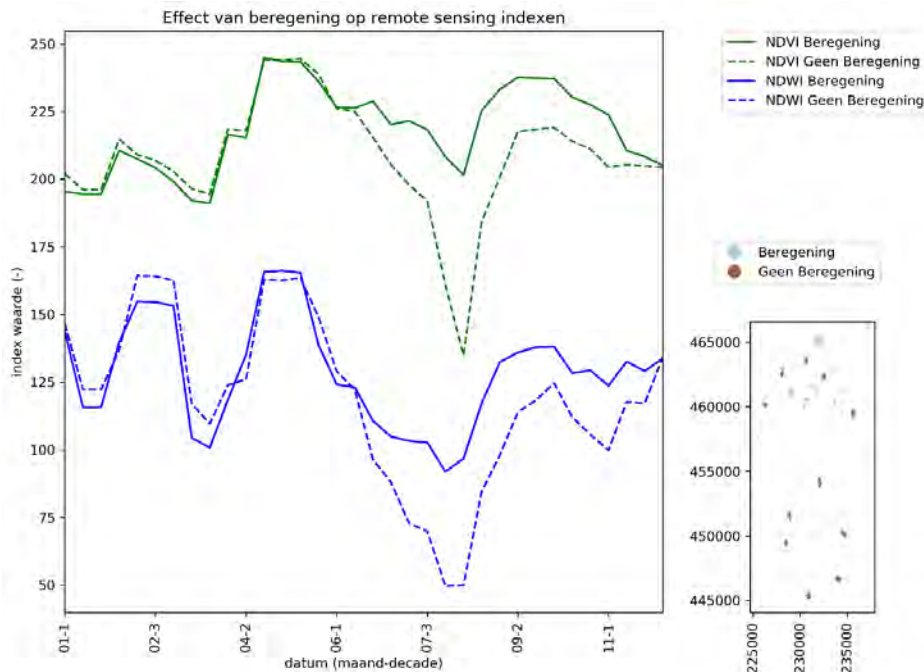


Figuur 95. Droogte in neerslag (mm), gesimuleerd bodemvocht (-) en gesimuleerde grondwaterstand (m) voor de bodemvochtlocatie Lettele. De zwarte lijn is de actuele waarde, de rode stippellijn is het 20ste percentiel.

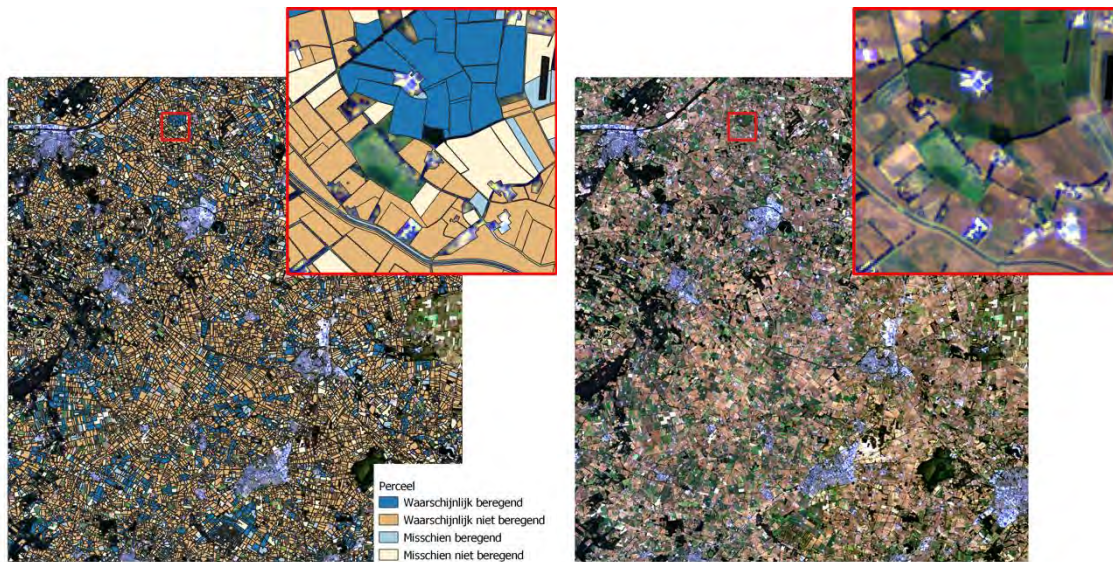
4.2 Monitoring beregening via satellietwaarnemingen

Binnen het project is een methode ontwikkeld om de beregende percelen te detecteren aan de hand van satellietbeelden en vervolgens daaruit beregeningshoeveelheden te schatten. De methode is als volgt (KnowH2O, 2021, in voorbereiding). Uit eerdere analyses met data uit 2018 bleek dat er een verschil is in spectrale reflectie tussen beregende en niet-beregende percelen (Van den Eertwegh et al., 2019; rapport Fase 1). Dit verschil in reflectie is waargenomen in droogtegevoelige indices (bijv. NDVI en NDMI). Het grootste verschil in indexwaarden is waargenomen in augustus 2018 (Figuur 96). Op basis van multispectrale satellietbeelden (10 m pixel schaal) classificeren we voor grasland en snijmaïs eerst pixels die waarschijnlijk wel beregend zijn en die waarschijnlijk niet beregend zijn. Als trainingsdataset gebruiken we veldinformatie van provincie Gelderland, LTO Noord en ZLTO (via een enquête vergaard). Deze dataset wordt gebruikt om een herkenningsalgoritme te ijken. Daarna classificeren we met dit algoritme percelen grasland en snijmaïs in hele studiegebied, op basis van het spectrale signaal per pixel. Met de BRP-kaart voor het projectgebied maken we vervolgens de detectie wel/niet beregende percelen vlakdekkend. De resulterende beregeningskaart (Figuur 97) geeft duidelijk aan welke percelen waarschijnlijk zijn beregend in de zomer van 2018, en welke niet. De hier getoonde kaart komt voort uit een analyse die voor 2018 is uitgevoerd voor een voorbeeldgebied in het oosten van Gelderland. Het gebied bestaat voor 64% uit landbouwpercelen. In het voorbeeldgebied bestaat het landbouwareaal voor 92% uit de gewassen snijmaïs of grasland (22% en 70%) en een kleiner deel (8%) uit overige gewassen. De kaart geeft alleen voor snijmaïs en grasland weer of er beregening heeft plaatsgevonden. Uit een validatie blijkt dat het classificatie-algoritme goed werkt: ruim 98% van de geselecteerde validatiepercelen is correct geclassificeerd (14 percelen snijmaïs, 26 percelen grasland).

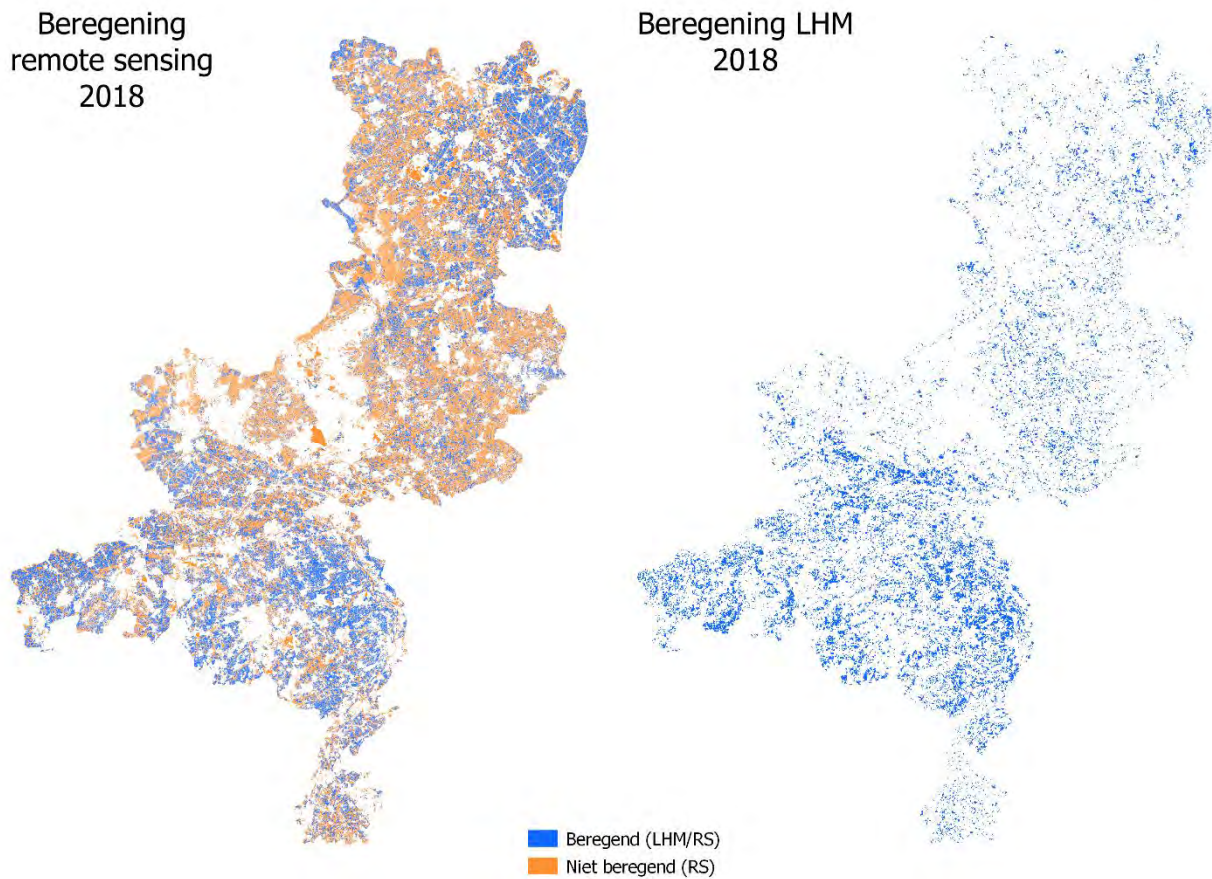
Voor het gehele studiegebied is vervolgens het beregende areaal bepaald voor 2018 volgens bovenstaande methode en is verder aangenomen dat 100% van het akkerland is beregend (Figuur 98). In deze kaart zijn gras- en maïspancelen met veel capillaire nalevering eruit gefilterd aan de hand van de bodemkaart (kritieke z-afstand) en de LG3 in 2018 (LHM), omdat het algoritme deze percelen ten onrechte als 'beregend' classificeerde.



Figuur 96. Effect van beregening op berekende remote sensing-gewasindices NDVI en NDWI (zie Fase 1 rapport; NDWI is in deze rapportage vervangen door NDMI) in de periode januari t/m medio november 2018 voor een aantal percelen binnen de provincie Gelderland (perceelgegevens: Teun Spek, provincie Gelderland, 2019).



Figuur 97. Kaart detectie beregende percelen 2018 - voorbeeldgebied Oost-Gelderland. Links het detectie-resultaat en rechts de satellietfoto. Overige kaarten zijn te vinden op <https://droogteportaal.nl/achtergrondinformatie.html> 'beregeningsdetectie'.



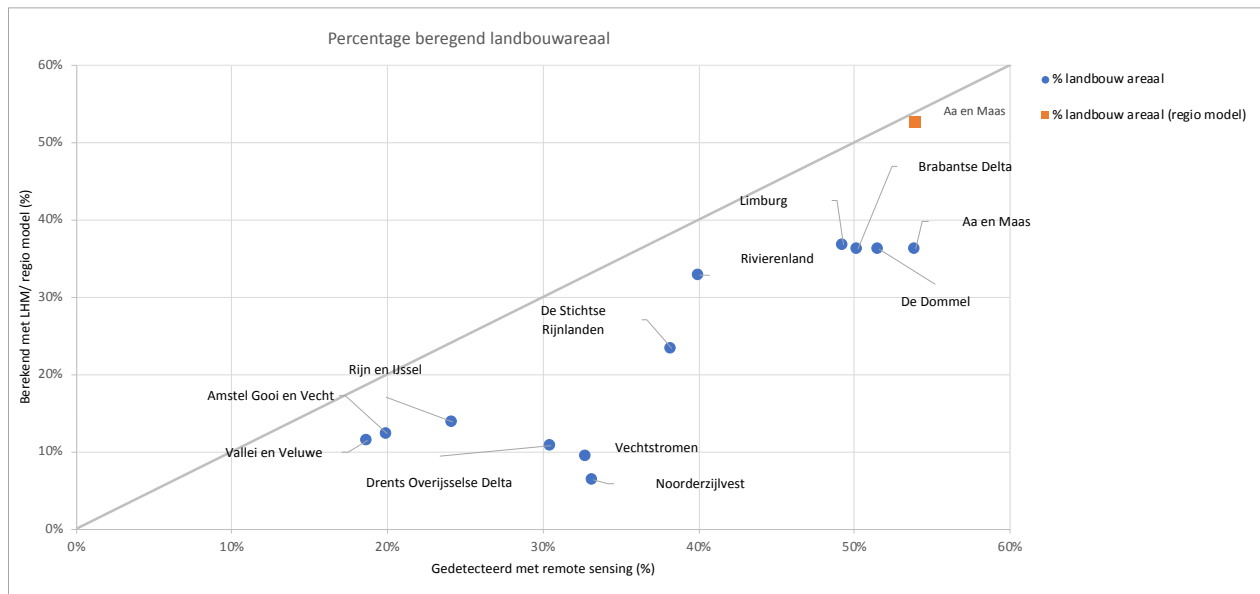
Figuur 98. Links: beregende en niet-beregende percelen voor 2018 bepaald op basis van remote sensing-informatie. Voor akkerland is aangenomen dat 100% van het areaal beregend wordt. Rechts: beregend areaal in het LHM in 2018.

In Figuur 18 en de begeleidende tekst in § 2.1.6 is te zien en te lezen hoeveel er beregend wordt in beheergebieden van waterschappen, bepaald uit LHM-berekeningen, remote sensing informatie en bekende registraties van de waterschappen. Bij het bepalen van de hoeveelheid beregening voor de remote sensing methode is het gedetecteerd beregend areaal vermenigvuldigd met een totale geschatte beregeningsgift van 100 mm/jaar. De berekende en registreerde waterhoeveelheden zijn tevens in een scatter-diagram tegen elkaar uitgezet (Figuur 19), alsmede het percentage beregend landbouwareaal (Figuur 99).

Bij vergelijking van Figuur 19 in § 2.1.6 en Figuur 99 valt een aantal zaken op. Over het algemeen is er een redelijke goede en positieve correlatie tussen de hoeveelheden bepaald met het LHM en RS; de afwijkingen met de 1:1-lijn zijn niet groot. Voor Limburg berekent het LHM echter een veel hogere hoeveelheid beregening dan op basis van RS wordt geschat. Ook het regionale IBRAHYM model simuleert een hogere beregeningsgift dan geregistreerd, namelijk, 68 miljoen m³. Voor beheergebieden van de waterschappen Drents Overijsselse Delta en Vechtstromen berekent LHM juist minder beregening. Daarnaast is opvallend dat ondanks dat de hoeveelheden tussen LHM en RS (en registraties Brabantse waterschappen) redelijk met elkaar overeenkomen, RS een veel groter oppervlak (ongeveer 1,5 keer) detecteert dan in LHM is ingevoerd (Figuur 99). De potentieel beregende percelen in LHM stammen uit 2010 en een update hiervan is een logische vervolgstap op basis van de nieuwe RS-data (dit project) en de WEcR-studie (Van Asseldonk et al., 2021). Het feit dat met minder oppervlak aan beregende percelen ongeveer dezelfde hoeveelheid beregening wordt berekend als zowel de RS-analyse en als de registraties (m.u.v. Limburg) aangeven, betekent dat waarschijnlijk LHM de beregeningsgift overschat. Indien in LHM een gewasspecifieke pF-grenswaarde wordt overschreden (gerelateerd aan vochttekort), dan wordt beregening toegepast met een gewas-specifieke gift, duur en rotatieperiode (gemiddeld 20-25 mm over 7 tot 10 dagen). Het zou kunnen dat de beregeningsvraag wel goed wordt berekend maar dat de bijbehorende handeling van de agrariër (beregening) niet helemaal goed klopt: hij of zij beregent niet zoveel om het totale vochttekort op te heffen als het LHM veronderstelt. Het lopende onderzoek van WEcR (gereed najaar 2021) gaat meer informatie geven over beregeningsgiften en keuzes van agrariërs voor beregening.

Het feit dat LHM de beregeningshoeveelheid in Limburg overschat in vergelijking met RS en de registraties ligt mogelijk in het feit dat in deze provincie diepere grondwaterstanden worden aangetroffen dan bijvoorbeeld gemiddeld in Noord-Brabant. Hierdoor treedt minder capillaire nalevering naar de wortelzone op met als gevolg hogere vochttekorten. LHM vult dat in zijn geheel aan terwijl in werkelijkheid de agrariër dat niet doet, is onze hypothese. De onderschatting voor Vechtstromen van LHM ten opzichte van de RS-analyse geeft mogelijk aan dat sinds 2010 (datum potentieel beregende percelen in LHM) het aantal beregende percelen voor Vechtstromen zeer sterk is toegenomen. De onderschatting voor Drents-Overijsselse Delta zou op hetzelfde kunnen wijzen, hoewel hier ook het grote aandeel natte gebieden (Wieden, Weerribben) een rol speelt, die RS mogelijk ten onrechte als beregend heeft aangewezen.

Met RS en ook met de studie van WEcR die nog in uitvoering is (gereed najaar 2021), zijn en komen er nieuwe onafhankelijke bronnen over beregening. De combinatie van deze data met een regionaal grondwatermodel zoals het LHM (beregening op basis van meteorologie en vochttekorten) biedt veel meerwaarde om kennis te vergaren over effecten en efficiëntie van beregening ten behoeve van beleid of optimalisatie. Het is een logische stap om deze nieuwe data over beregening in de modellen in te voeren. Deze stap wordt ondersteund met de publicatie van IPO en UvW (2021), waarin valt te lezen dat meer aandacht moet worden besteed aan nauwkeurige registraties door de waterschappen van werkelijke hoeveelheden onttrokken water voor beregening.



Figuur 99. Scatter-diagram voor het percentage (%) berekend landbouwareaal voor 2018 bepaald via remote sensing-informatie vs. berekend met het LHM.

4.3 Data en informatie voor waterbeheer

In Nederland wordt veel gemeten en geregistreerd. 'Meten is weten', horen we vaak (reactie: 'modelleren is begrijpen'). Echter, de praktijk leert dat vele metingen niet voldoen aan de meetvraag of het meetdoel, dan wel dat er geen correcte meetvraag is gesteld op basis van wetgeving, beleidsdoelen en beleidsvragen. Meten leidt dan niet tot weten, laat staan tot begrijpen. Daarnaast is de praktijk te weerbarstig om succesvol langdurig te meten en te registreren, over generaties heen.

Informatie die relevant is voor de duiding van droogte en voor passend beleid en maatregelen betreft een aantal componenten behorende bij het watersysteem:

- Inrichting en beheer;
- Actuele toestand van watersysteem;
- Watergebruik.

4.3.1 Inrichting en beheer

Inrichting, waterbeheer en ingrepen daarin kunnen vastgelegd worden in een beheerregister van het waterschap of Rijkswaterstaat. Zodra deze zaken vastliggen en duurzaam worden gehandhaafd, dan is er sprake van een Legger. Het is van belang om steeds bij te houden hoe diep en breed watergangen zijn, waar welke stuwen staan en hoe die worden bediend en waar welke watergangen worden geschoond en uitgebaggerd. Ook wanneer er maatregelen getroffen worden qua beheer en inrichting is het nuttig om informatie hierover vast te leggen, want ze zullen waarschijnlijk de toestand van het watersysteem beïnvloeden. Veel basisgegevens in Nederland zijn echter niet op orde en dit bemoeilijkt een analyse bij droogte of wateroverlast.

Daarnaast worden er in natuurgebieden herstelmaatregelen uitgevoerd door o.a. terreinbeheerders en provincies. De registratie wat er waar en wanneer betreffende deze maatregelen is uitgevoerd is vaak onvolledig en niet op orde. Daarmee is de interpretatie van een effectmonitoring en evaluatie achteraf vaak moeilijk uit te voeren.

4.3.2 Actuele toestand van het watersysteem

De hydrologische toestand van een watersysteem is belangrijk om te kennen: wat is de waterstand buiten in het veld van de beek, is er sprake van droogval? Hoe vochtig is de landbouwbodem, het natuurgebied, wat is de stand

van het grondwater? Wat is het effect van neerslag en verdamping? Van het watergebruik? Is er ruimte voor onttrekkingen? Hoe staat het met de wateraanvoer en de effecten ervan? Is het droog of is er (al) sprake van droogte?

Droogte is per definitie relatief, dat wil zeggen, of er sprake is van droogte wordt altijd bepaald t.o.v. een langjarige referentieperiode. Daarom moet er rekening mee gehouden worden, dat een optredende droogte mogelijk afgebeeld wordt op een reeds verdroogde uitgangssituatie, die reeds jarenlang speelt, namelijk de laatste 30 jaar. Ten opzichte van een niet-verdroogde situatie zou het effect van droogte nog extremer uitpakken. Aangezien droogte per definitie dus een afwijking is van de normale (langjarige) situatie, is het belangrijk om voldoende informatie te hebben over deze normale situatie. Voor het bepalen van de referentie ('normaal') is een meetperiode van 30 jaar gewenst, zodat een goed beeld gevormd kan worden van neerslag en verdamping, bodemvocht, grondwaterstanden en beekafvoeren, naast andere aspecten die van invloed zijn op het optreden van droogte. Voor het duiden van extreme droogte is een periode van 30 jaar nog steeds een relatief korte periode en zouden zelfs nog langere reeksen nodig zijn. Bij het bepalen van een referentiesituatie of 'normaal' wordt ervan uitgegaan dat er geen andere grote ingrepen gedaan worden die het hydrologische systeem beïnvloeden. Als dat uitgangspunt niet klopt binnen de langjarige periode, dan zal er sprake kunnen zijn van een trend en/of een sprong in de meetreeksen door systeemveranderingen.

Het KNMI heeft langjarig reeksen van neerslag en referentiegewas-verdamping volgens Makkink beschikbaar op locaties van meetstations. Daarmee hebben we nog geen informatie over de werkelijke verdamping van bodem en vegetatie/gewassen. Meetreeksen hiervan zijn schaars, bijv. te Cabauw of het Loobos zijn ze wel beschikbaar. Ook de verdamping uit open water (NB: IJsselmeer) is een factor van belang binnen Nederland. Uit de analyse van de berekende verdamping in dit project bleek dat modelberekeningen afwijken van resultaten op basis van modelmatig verwerkte satellietdata. Werkelijke verdamping is niet alleen vaak na neerslag de grootste post op de waterbalans, het is ook een maat voor de gewasproductie in de landbouw. Langere en meer meetreeksen van werkelijke verdamping zijn nuttig en nodig, net zoals het vaker vergelijken van cijfers voor verdamping uit diverse modelberekeningen.

In de praktijk blijkt dat betrouwbare langjarige meetreeksen voor een periode van 30 jaar voor grondwaterstanden of stijghoogten en afvoeren nauwelijks beschikbaar zijn in Nederland. Ook betrouwbare langjarige metingen van debieten van beken zijn zeer beperkt beschikbaar. Bodemvochtmetingen zijn zo wie so niet of zeer schaars aanwezig, laat staat langjarig. Daarnaast ontbreekt vaak de informatie over onttrekkingen uit grond- en oppervlaktewater en over externe invloeden op het systeem. Daarmee is het vaststellen van de referentie voor de toestand van het watersysteem en het watergebruik op basis van metingen zeer moeilijk tot onmogelijk.

Een volgend probleem bij het verzamelen en analyseren van (actuele) metingen is de vertraging bij de aanlevering en de verwerking door bronhouders. Hoewel veel organisaties overstappen op real-time monitoren van grondwaterstanden en afvoeren, zijn bijv. veel grondwaterstanden pas later, i.c. 3 of 6 maanden na de meting, beschikbaar binnen portalen als DINO-loket. De wet Basis Registratie Ondergrond (BRO) zou hierin verbetering kunnen aanbrengen, maar het proces van inrichting en van data aanleveren verloopt traag. Hierdoor is het (nog) niet mogelijk om via de BRO een goed beeld te krijgen van de actuele situatie buiten. Voor veel veldmetingen van zowel debieten als grondwaterstanden zijn de metingen verdeeld over meerdere organisaties binnen Nederland, waarbij soms ook de verwerking en interpretatie/duiding verschilt van bronhouder tot bronhouder. Daarmee ontstaat geen compleet en geen uniform actueel beeld over de situatie buiten op de regionale schaal.

Om beter te anticiperen op veranderingen in bodemvocht, zijnde de tweede indicator van droogte bij droog weer na het (potentieel) neerslagtekort als eerste indicator, in grondwaterstanden en in beekafvoeren, is een ruimtelijk, gebiedsdekkend overzicht met actuele bodemvochtmetingen, grondwaterstanden en beekafvoeren uit stroomgebieden nodig. Voor het opstellen van de referentiesituatie is het van belang om metingen op dezelfde locatie te handhaven, zodat langjarige reeksen ontstaan. Natuurlijk zijn veldmetingen lokaal van aard (behalve afvoeren uit stroomgebieden), maar ze geven mits goed uitgevoerd lokaal een correct beeld van de (actuele)

toestand. Waterschappen, provincies en waterbedrijven kunnen wellicht de handen in elkaar slaan en hydrologische meetnetten verbeteren, meer 'online' maken en langjarig bestendigen.

4.3.3 Watergebruik

Tijdreeksen met data van de onttrekkingen uit het grond- en oppervlaktewater zijn cruciaal om de droogte te duiden. Hierbij gaat het ook om de kleinere onttrekkingen waarvoor geen vergunning verplicht is en om de actuele onttrokken hoeveelheden (deze wijkt soms af van de hoeveelheid water waarvoor een vergunning is afgegeven). Natuurlijk begint de informatievoorziening al te verbeteren als er cijfermateriaal zou zijn op seizoensbasis of per periode van drie maanden. Het registreren van onttrekkingen binnen het seizoen, van putlocaties en filterdieptes is belangrijk. Het Landelijk Grondwater Register (LGR) is niet compleet en niet up-to-date, evenals de data bij waterschappen ten aanzien van meldingen en vergunningen voor onttrekkingen (IPO en UvW, 2021).

Uit onze inventarisatie en uit IPO en UvW (2021) blijkt dat de operationele omgang met en het beleid aangaande onttrekkingen van grond- en oppervlaktewater verschilt per waterschap en per provincie. Sommige waterschappen hebben geen informatie over de hoeveelheid grondwater die voor berekening wordt onttrokken en hebben geen registratieplicht. Andere waterschappen zijn nog bezig om hun informatie te verwerken. Voor waterschappen waarvoor wel gegevens beschikbaar zijn, geldt dat deze gebaseerd zijn op een bepaald percentage respondenten. Bij weer andere waterschappen lijkt de registratie op orde.

De registratie van de onttrekking van water voor berekening is een ondergeschoven kindje. Het beeld anno nu is dat het waterschap bepaalt wie, wanneer, waar en hoeveel kuub water er per jaar onttrokken mag worden uit het oppervlaktewater. Het waterschap bepaalt, via de route van meldingsplicht, waar, hoe diep en hoeveel water per jaar, of beter, per kwartaal er uit het grondwater onttrokken mag worden tot een maximum van 150.000 m³/jaar (NB: berekening vindt veelal plaats in zomerseizoen). Het waterschap dient een register met deze informatie bij te houden. Alle overige onttrekkingen uit het grondwater >150.000 m³/jaar zijn vergunningplichtig en worden door de provincie beoordeeld en al dan niet vergund aan watergebruikers. Ook de provincie heeft een register met deze informatie.

Tot zover hoe het zou kunnen gaan. In de praktijk blijken de registers onvolledig en niet up-to-date te zijn. Daarnaast gaat de melding en/of vergunning uit van watervolumes op jaarbasis, terwijl de feitelijke onttrekkingen tijdens droge perioden (weken tot maanden per jaar) plaatsvinden, juist op het moment dat grondwaterstanden en stijghoogten toch al dalen. Uit CBS-analyses (zie sectie 3.1) en gegevens van WEcR in het kader van deze studie (zie sectie 3.3) volgt dat naast het tekort aan neerslag, voornamelijk de toename van grondwaterwinning voor berekening de balans tussen watervraag en wateraanbod in 2018 ernstig heeft verstoord. Dit bevestigt het belang van goede en actuele registraties van onttrekkingen, om daar vervolgens indien nodig tijdig beperkingen aan op te leggen vóór en tijdens een droge periode. Het is voor het overeind houden van de functionaliteit van ons watersysteem tijdens droog weer nuttig voor beheerders om te weten *waar hoeveel* water er *wanneer* onttrokken wordt in de actuele situatie, niet alleen achteraf. Koppeling van actuele onttrekkingen aan grondwaterstanden buiten in het veld helpt hierbij. Toetsen van de wenselijkheid en de mogelijkheid om water te onttrekken vooraf, tijdens en erna is steeds van belang.

4.4 Droogteschade aan de landbouw

Exacte metingen van zowel gewasopbrengsten als beregeningsgiften zijn niet beschikbaar, waardoor vertrouwd moet worden op opgaves uit de praktijk, inschattingen met modelberekeningen en interpretatie van remote sensing-beelden. Metingen van beregeningshoeveelheden zijn dus onvolledig, hetgeen een accurate analyse verhindert. Dit is een ongewenste situatie, die opgelost dient te worden om het inzicht in het gebruik en het aanbod van water te vergroten en de betrouwbaarheid van maatregel-effect analyses te vergroten.

4.5 Droogteschade aan de natuur

Om de effecten van droog weer en droogte op een natuurlijke vegetatie vast te stellen worden tijdreeksen van vegetatieopnamen op bepaalde locaties, de zogenaamde 'Permanente Kwadraten' (PQ's), in combinatie met

metingen van standplaatscondities voor bodemvocht, zuurgraad en nutriënten geanalyseerd. Deze tijdreeksen zijn echter beperkt beschikbaar. Metingen worden niet ieder jaar uitgevoerd en zijn vertraagd beschikbaar. Ook worden vaak niet exact dezelfde locaties bezocht. Uniforme waarnemingen zijn moeilijk uit te voeren met de vele verschillende waarnemers, ook al zijn de instructies hetzelfde.

4.6 Droogteportaal

Binnen dit project is een droogteportaal opgezet om tegemoet te komen aan de genoemde wensen ten aanzien van verzameling van resultaten van dit project en van meetgegevens uit het veld, www.droogteportaal.nl. Wat betreft de meetgegevens wordt o.a. de actuele situatie van neerslag, (potentieel) neerslagoverschot, bodemvocht, grondwater en afvoeren van stroomgebieden voor het Nederlandse zandgebied weergegeven, voor zover data online beschikbaar zijn. Aansluitend bij onze analysemethodiek in het project worden ook eenduidige, actuele en gestandaardiseerde droogte-indices bepaald voor meteorologische droogte (SPI, SPEI) en grondwaterdroogte (SGI). Op deze manier komen alle beschikbare gegevens samen in één portaal en geven direct een beeld van de huidige toestand buiten in het veld. Dit is uiteraard wel nog steeds afhankelijk van de beschikbaarheid van real-time metingen bij de betreffende bronhouders zoals betrokken waterschappen en provincies.

4.7 Aanbevelingen

Door de beperkte beschikbaarheid van metingen is het nodig om voor een volgend droogte-onderzoek de juiste meetdoelen en meetvragen op te stellen, daarna a) het aantal metingen/meetlocaties doelgericht effectief uit te breiden, gegeven ruimtelijke variatie in hydrologie en watergebruik, en b) meetreeksen zover en zo goed mogelijk te verlengen met modellen voor de droogteanalyse. Om deze modellen te kalibreren en valideren blijven metingen van de eerder genoemde variabelen van groot belang, zeker onder extreme condities zoals tijdens droogte en wateroverlast. Ook hierbij is een nationaal overzicht met actuele en betrouwbare informatie cruciaal. Remote sensing-informatie is gebleken nuttig te zijn als extra bron van informatie voor zowel het watersysteem en het watergebruik als de gebruiksfuncties landbouw en natuur.

Voor de gebruiksfuncties landbouw en natuur geldt dat structureel en langjarig informatie nodig is over:

- Land- en tuinbouw: drogestof-opbrengst geoogst product, financiële informatie over geoogst product, onttrekkingen water voor beregening. De inhoud van het Bedrijven InformatieNet (BIN) van MinLNV lijkt in de meeste gevallen te voldoen aan de informatievraag; dit verdient wellicht een nadere evaluatie;
- Natuur: toestand vegetatie en fauna, soortensamenstelling en vegetatiebedekking, toestand waterhuishouding, zuurgraad en voedselrijkdom, registratie van maatregelen in en om natuurgebieden. In veel gevallen laten de monitoring en registraties te wensen over (zie sectie 3.2).

Gegeven de verantwoordelijkheid, de taken en de rollen van het Rijk (m.n. MinlenW, MinLNV; o.a. Algemene Rekenkamer, 2021), de provincies en de waterschappen (en deels gemeenten), dient de structurele monitoring van het watersysteem, de landbouw en de natuur en registraties van watergebruik in Nederland ter hand te worden genomen. De verschillende overheden dienen daarin samen te werken met de landeigenaren en de TBO's van natuurgebieden. Nederland bestaat uit landschappen en regio's, die verschillend van aard en karakteristiek zijn. Dat feit verdient monitoring die én voldoet aan deze verschillen én op nationaal niveau een uniforme evaluatie mogelijk maakt, à la KRW. Koepels als IPO, UvW, VNG en LTO ondersteunen bestuurlijke afstemming met het Rijk. Om taken als regie, opdrachtgeverschap, planning, uitvoering en evaluatie langjarig uit te voeren, dienen logische partijen te worden gevonden. Daarna is samenwerking 'in de gehele keten' het devies, met zo min mogelijk maar wel voldoende hiërarchie. Eén partij moet de baas zijn, iedere partij moet verantwoording afleggen.

5. Conclusies

5.1 Duiding van droogte 2018 en 2019

De droogte van 2018 en ook die van 2019 was zichtbaar in alle componenten van het watersysteem in het zandgebied van Nederland. Het tekort aan neerslag leidde samen met een hoge verdampingsvraag tot droogte in bodemvocht, grondwater en beekafvoer, met droogval van beken tot gevolg. Deze hydrologische effecten werden versterkt doordat er ten gevolge van de grotere waterbehoefte meer water werd onttrokken voor de drinkwatervoorziening en de landbouw, met name in de zomermaanden. De onttrekkingen voor drinkwater waren in 2018 op jaarbasis 5% groter en in de zomermaanden 30% groter. De onttrekkingen voor de watervoorziening van de landbouw waren in 2018 in de zomermaanden 2 tot 3 keer groter dan in de periode 2003 t/m 2017. De droogte van 2018 was meer uniform voor het gehele zandgebied dan de droogte van 2019, die vooral het oosten van het land trof. De droogte in 2018 en duurde ook langer dan in van 2019. Hydrologische effecten van de droogte van 2018 ijlden, via diepe watervoerende pakketten, veelal na in 2019.

Zowel aan de bovenkant (neerslagtekort; bodem- en oppervlaktewater) als aan de onderkant (grondwater; onttrekkingen) van het bodem-watersysteem in het zandgebied van Nederland werd het droger en droger:

- De voortplanting van de meteorologische droogte (ordegrootte, omvang, tijd van ontstaan en tot herstel) in de verschillende componenten van het systeem (bodemvocht in wortelzone, grondwater, afvoer) is afhankelijk van gebiedskarakteristieken. Deze bepalen de reactiesnelheid van het hydrologische systeem en de mate en snelheid van hydrologisch herstel bij een neerslagoverschot.
- In de huidige situatie bleken de ontwatering en afwatering door het watersysteem onvoldoende ingesteld op droogte. In natte wintermaanden werd het neerslagoverschot afgevoerd en onvoldoende vastgehouden als buffer voor eventueel daaropvolgende tijden met een neerslagtekort. Ingrepen vonden in 2018 en 2019 ad-hoc en te laat plaats, waardoor ze nauwelijks effect sorteerden.
- Wateraanvoer heeft daar waar mogelijk plaatsgevonden voor de lokale watervoorziening en met name voor de watervoerendheid van anders droogvallende beeksystemen.
- Qua watergebruik waren de onttrekkingen uit het grondwater voor drinkwater, maar met name die voor beregening van landbouwgewassen groter dan normaal en daardoor versterkten ze de gevolgen van droog weer voor landbouw en natuur, juist tijdens het groeiseizoen. Onttrekkingen uit het oppervlaktewater werden regionaal verboden, aan grondwateronttrekkingen voor beregening werden nauwelijks beperkingen opgelegd.
- De land- en tuinbouw in het zandgebied hadden last van droogte, met name qua droge-stofopbrengst van gewassen. Dat bleek ook uit onze berekeningen ten aanzien van de transpiratiereductie en de vegetatie-indices, afgeleid uit remote sensing beelden. Met name de gebieden in het oosten en noordoosten van Nederland hadden last. Ook is er veel beregend en zijn er extra (variabele) kosten hiervoor gemaakt van grofweg € 3.000,-/jaar gemiddeld per bedrijf voor akkerbouw- en melkveebedrijven in het zandgebied van Nederland. Met uitzondering van akkerbouwbedrijven in het noordoosten van Nederland zijn de jaarinkomens in 2018 en 2019 voor akkerbouw- en melkveebedrijven in het zandgebied van Nederland echter gelijk gebleven of erop vooruitgegaan in vergelijking met andere, minder droge jaren. Dat komt door de hogere marktprijzen voor producten.
- In een enquête gaven natuurbeheerders aan dat de droogte in 2018 en 2019 matig tot grote schade had aangericht aan de natuur. Vooral beken, venen en bronnen leden schade, evenals natuurtypen die kenmerkend zijn voor natte en vochtige, voedselarme standplaatsen. Voorbeelden hiervan zijn hoogveen, natte heide en vennen (afhankelijk van regenwater) en natte schraallanden (afhankelijk van schoon kwelwater). Een deel van de terreinbeheerders verwacht dat het herstel ten minste vijf jaar kan duren, mits we jaren krijgen met een 'normaal' neerslagpatroon. De resultaten van de enquête werden in grote lijnen bevestigd met een statistische analyse van duizenden vegetatieplots: meer soorten gingen in de droge jaren in aantal en bedekking achteruitgingen (namelijk 50%), dan vooruit (35%) en de de

botanische natuurwaarde van de vegetatie daalde met 6 tot 18%. Door regenwater gevoede natte systemen zoals hoogvenen, natte heiden, zure vennen, en van door basenrijke kwelgevoede systemen zoals blauwgraslanden en trilvenen, wezen op een aanzienlijk verlies aan karakteristieke soorten. Er werd echter geen verband gevonden tussen het hydrologische effect van de droogte, en de grootte van de vegetatierespons. Mogelijk komt dat doordat de administratie van de gegevens sterk te wensen overliet. Een andere verklaring is dat de vegetatie van locaties met de grootste hydrologische droogte in 2018, zich al in voorgaande jaren aan drogere condities had aangepast door effecten van verdroging.

5.2 Analyse van hypothetische maatregelen

Het onderzoek laat zien dat de huidige inrichting en het beheer van ons zoetwatersysteem, in combinatie met het gebruik van grond- en oppervlaktewater, niet in staat zijn om de effecten van een meteorologische droogte, veroorzaakt door weinig neerslag samen met een hoge verdampingsvraag, op het grondwatersysteem en watervoerendheid van beken te beperken. Landbouw, natuur en het watersysteem zelf (o.a. door droogval van beken) ondervinden hiervan schade. Ad-hoc-ingrepen in het oppervlaktewatersysteem vlak vóór of tijdens droog weer hebben nauwelijks effect. Maar ook structurele maatregelen werken onvoldoende door op het grondwatersysteem, wanneer deze alleen worden doorgevoerd in watergangen die in direct beheer zijn van waterschappen. De meeste watergangen worden immers beheerd door landeigenaren. Alleen structurele maatregelen in het watersysteem tot en met de haarvaten van het systeem werken daarom voldoende door. Hiervoor zijn aanpassingen nodig in beleid, inrichting en beheer van het huidige oppervlaktewatersysteem, alsmede ten aanzien van wateronttrekkingen.

Reductie van grondwateronttrekkingen is wel een zinvolle ad-hoc-ingreep, want die is direct van invloed op de grondwaterstand en op kwelstromen. Juridisch, technisch en sociaal-economisch is deze maatregel echter niet eenvoudig op te leggen; zoiets vergt voorbereidingstijd. Het is in ieder geval van groot belang meer grip te krijgen op de hoeveelheid water die wordt onttrokken uit grond- en oppervlaktewater tijdens perioden van droogte. Zonder feitelijke kennis over dit waterverbruik is het immers lastig beleid en beheer voeren. Door registraties van onttrekkingen van tevoren en toezicht op onttrekkingen tijdens droog weer te verbeteren én door structureel meer flexibel in ruimte en tijd te zijn om te kunnen variëren in locaties en hoeveelheden, kan beter met droogte omgegaan worden.

Er zijn in deze studie enkele richtinggevende maatregelen doorgerekend met het LHM, waarmee inzicht wordt verkregen in de gevoeligheid van het watersysteem voor richtinggevende maatregelen, als deze extreem zouden worden doorgevoerd. De maatregelen zijn daarmee hypothetisch en in de eerste plaats bedoeld om de gevoeligheid van het systeem in beeld te brengen. Voor alle richtinggevende maatregelen geldt dat de haalbaarheid qua locaties, de mate van uitvoering, maar ook qua maatschappelijk draagvlak en wettelijke kaders, nader moet worden onderzocht en dat daarbij ook evenwichtige combinaties van maatregelen kunnen worden overwogen.

Uit de analyses volgt:

- Aanvulling grondwater vergroten: als in infiltratiegebieden, i.c. gebieden met een 'diepe' gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) van >2,5 m-m.v., meer aanvulling van grondwater wordt gerealiseerd, wordt de grondwatervoorraad daar logischerwijs vergroot, waardoor in droge tijden hieruit weer kan worden geput. Vergroten van de grondwateraanvulling dient wél samen te gaan met maatregelen in het ontwateringsysteem, want als het aangevulde grondwater wordt afgevoerd via ontwatering, is de aanvulling netto niet effectief.
- Ontwatering: vermindering van ontwatering is effectief als het gehele ontwateringsysteem van een gebied aangepakt wordt, van de beken, tot de waterschap-waterlopen, tot en met de haarvaten van het watersysteem. Wanneer dit niet wordt gedaan, nemen de niet-verhoogde waterlopen de drainage van grondwater over en is het netto-effect een stuk kleiner, of wordt deze teniet gedaan binnen een korte tijdperiode. Het areaal aan land (ha) en de lengte van de waterlopen (120.000 km in het zandgebied),

waar aanpassing van ontwatering aan de orde kan zijn, is groot. Uit de analyses volgt dat ingrepen hierin een duidelijke positieve bijdrage leveren aan het vasthouden van water in bodem en grondwater en het realiseren van permanent hogere grondwaterstanden. De grondwaterstand neemt significant toe door het verhogen van het ontwateringspeil en dit effect is maximaal ongeveer één tot drie jaar na uitvoering van de maatregel. Voor de trage, hoger gelegen gebieden kan dit langer duren. *Dit toont aan dat structurele reductie van de ontwatering veel effectiever is dan tijdelijke peilverhogingen in oppervlaktewater.* In de periode dat de grondwaterstand nog structureel stijgt, wordt er water vastgehouden, daarna is het afvoerproces weer in evenwicht met het neerslagoverschot minus de onttrekkingen. Er wordt dan niet meer grondwater vastgehouden, echter het afvoerproces verschuift in de tijd van meer afvoer in de winter, vooral door toename van buisdrainage en maaiveldafvoer, naar minder afvoer in de zomer. De basisafvoer wordt verhoogd als het peil van beken en grotere waterlopen deels niet worden verhoogd, echter dit druist in tegen de gedachte van bestrijding van verdroging langs deze beken. De verhoging van de grondwaterstand leidt voor gebieden met een grondwaterstand tussen 1 en 2 m-m.v. tot meer gewasverdamming. In dit traject wordt de capillaire nalevering over het algemeen sterk beïnvloed door grondwaterstandsveranderingen. Voor deze gebieden zal er minder beregening nodig zijn. Echter, op waterschapniveau blijkt dat de beregeningsbehoefte met maximaal 10% kan worden verlaagd als gevolg van een verhoging van 30 cm van de ontwateringsbasis.

- Afwatering: de watergangen die het waterschap beheert zijn vaak breder en dieper dan sloten in het haarvatensysteem. De leggerwatergangen hebben een belangrijke functie bij zowel *de ontwatering als de afwatering* van een gebied. Uit deze studie volgt dat om water vast te houden en hogere grondwaterstanden te realiseren het van belang is om de *ontwateringsfunctie van deze watergangen te reduceren, terwijl de afwatering functioneel intact* blijft. Voor waterlopen met stuwen bestaat de mogelijkheid hogere stuwpeilen te hanteren; bij droogte kan er onvoldoende water zijn om stuwpeilen te handhaven. Het is dus van belang om hogere stuwpeilen te realiseren en dusdanig te verhogen, dat ze ook daadwerkelijk de ontwatering reduceren. Anders is er alleen sprake van een verhoogde berging van water in stuwvakken.
- Wateraanvoer: de aanvoer van water leidt tot een grotere beschikbaarheid van zoet water in een gebied. Watergangen kunnen hierdoor watervoerend blijven. Er kan eventueel meer oppervlaktewater onttrokken worden, hetgeen kan leiden tot minder gebruik van grondwater. Als wateraanvoer leidt tot een waterpeil in de ontvangende watergang dat hoger is dan de grondwaterstand ter plekke, dan leidt dat tot infiltratie naar het grondwater bij/rondom de watergang. Bekend is dat slechts een deel van dit aanvoerwater in de bodem infiltreert. Als de aanvoer en daarmee de peilopzet niet permanent is, zorgt deze voor een geringe stijging van de grondwaterstand langs de watergangen, waarmee het grondwater-voedende effect van wateraanvoer op gebiedsniveau van beperkte invloed is.
- Onttrekkingen uit grondwater voor drink- en proceswater: onttrekkingen in diepe watervoerende pakketten hebben een grote invloed op stijghoogten van het grondwater, zowel lateraal (X,Y) als verticaal (Z). Onttrokken hoeveelheden worden vrijwel direct aangevuld uit alle richtingen, met name en uiteindelijk uit het freatische pakket, omdat de bergingsverandering in de watervoerende pakketten ongeveer nihil is. Onttrekkingen beïnvloeden grondwaterstanden, kwel- en infiltratiepatronen en de afvoer van beken. In voorkomende gevallen is het voor het beperken van de effecten van droogte effectief om de druk op het grondwater door grondwateronttrekkingen te verminderen, tijdelijk of permanent. De haalbaarheid hiervan verdient nader onderzoek: om dit te bereiken kan gedacht worden aan het optimaliseren van onttrekkingshoeveelheden van bestaande putten in ruimte en tijd op de landgebruiksfuncties die worden beïnvloed, het verplaatsen van winningen waar de druk op het grondwater groot is, het zoeken naar alternatieve bronnen zoals oppervlaktewater en het compenseren van onttrekkingen door extra infiltratie.
- Onttrekkingen uit grondwater voor beregening: ook de effecten van onttrekkingen van grondwater voor beregening uit de ondiepe ondergrond, vaak ondieper dan de winningen voor drinkwater, op het watersysteem zijn direct merkbaar. Het sterk verminderen van beregening, of maatregelen die de

irrigatievraag van gewassen verminderen, zijn dan ook ingrepen die vrijwel direct effect sorteren, vooral op het freatische grondwatersysteem. Als gevolg van beregenen uit grondwater dalen grondwaterstanden, nemen kwelstromen af en neemt de beekafvoer af. In natuurgebieden kan de kwel helemaal wegvallen en beken droogvallen bij gebrek aan basisafvoer. De effecten op de grondwaterstand, afvoer en kwel nemen gedurende de beregeningsperiode steeds verder toe. Gedurende een extreem droog jaar als 2018 ijlen de effecten van deze tijdelijke onttrekkingen zelfs nog na tot het volgende groeiseizoen, met name de effecten op de freatische grondwaterstand zijn dan nog significant (40 tot 60%). De daling van de grondwaterstand leidt voor sommige percelen tot een lichte daling van de gewasverdamping waardoor gewassen op niet-beregende percelen extra droogteschade kunnen oplopen ten gevolge van onttrekkingen voor beregening op naburige percelen. Het ruimtelijke effect van een ondiepe onttrekking uit zich meer lokaal dan die uit diepe watervoerende pakketten onder weerstand-biedende kleilagen. Echter, een sterk regionaal effect is zichtbaar in gebieden met veel beregeningsputten, zoals in het oosten van Noord-Brabant. In het westen van Noord-Brabant wordt juist uit het dieper watervoerend pakket onttrokken voor beregening, waardoor de ruimtelijke uitstraling van de onttrekkingen groot is.

- Hydrologische bufferzones rondom natuurgebieden: hydrologische bufferzones rondom grondwaterafhankelijke natuur, zeker als ze qua omvang afgestemd zijn op de lokale geohydrologische condities, kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het tegengaan van verdroging van natuur, zo blijkt uit onze analyse. In deze bufferzones moet daarvoor wel de grondwaterstand structureel worden verhoogd ten gunste van hogere grondwaterstanden in natte natuur, door reductie van de ontwatering, door beperking van onttrekkingen en door wateraanvoer.

5.3 Informatievoorziening – monitoring van droog weer en propagatie van droogte

De huidige beschikbaarheid van actuele en accurate gegevens over de toestand van ons watersysteem (voorraad, grondwaterstanden en waterpeilen, afvoeren) en van informatie over de vraag naar en het aanbod van water is onvoldoende om het nog beschikbare (schaarse, beperkte) grond- en oppervlaktewater op een optimale manier te verdelen over verschillende gebruikers. Zo worden onttrekkingsgegevens vanuit de landbouw onvolledig geregistreerd en zijn beekafvoeren en bodemvochtgehalten onvoldoende beschikbaar om tijdig te anticiperen op dreigende tekorten voor verschillende gebruikers van het systeem. Tijdreeksen van de toestand van natuurlijke vegetaties in combinatie met metingen van grondwaterstand, bodemvocht, zuurgraad en nutriënten zijn er nauwelijks. Het is voor het overeind houden van de functionaliteit van ons watersysteem tijdens droog weer nuttig voor beheerders om te weten waar (X,Y,Z) hoeveel water (m³) er wanneer onttrokken wordt in de actuele situatie, niet alleen achteraf. Effecten van maatregelen kunnen dan beter in beeld worden gebracht.

De combinatie van directe metingen in het veld, interpretatie van remote sensing-beelden en hydrologische modellen, zoals toegepast in deze studie, geeft een zo volledig mogelijk beeld om i) de toestand van het watersysteem continu in beeld te brengen, ii) deze uniform te interpreteren, iii) voorspellingen te doen op korte termijn en voor het hele groeiseizoen, iv) eerder en beter te anticiperen op nabij-toekomstig weer en v) effecten van maatregelen door te rekenen. Door actuele metingen en droogte-indices voor een uniforme duiding van droogte te ontsluiten, worden verschillen binnen en tussen regio's continu inzichtelijk gemaakt. Betrokken actoren krijgen *hetzelfde inzicht* van de toestand van het bodem-watersysteem en kunnen *gezamenlijk maatregelen treffen* om schade als gevolg van droogte te beperken.

6. Aanvullende bevindingen en overwegingen voor beleid

6.1 Informatievoorziening en het monitoren van droogte

6.1.1 Beschikbaarheid data voor dit project

We ondervonden dat informatie over de toestand van het watersysteem voorafgaand en ten tijde van de droogte onvoldoende compartimenten van het watersysteem omvatte en niet volledig actueel was. We hebben bij het uitvoeren van analyses voor dit project last (gehad) van een tekort aan goede en bruikbare veldinformatie om de droogte te duiden. Er zijn diverse informatie- en dataportalen op basis van online sensoren in het veld. Deze bevatten zelden informatie over het bodemvocht in de wortelzone. Daarnaast variëren de portalen in de manier waarop meetdata worden geïnterpreteerd: is het droog weer met voorziene effecten op het grondwater (stand dalend) en het oppervlaktewater (afvoer dalend), of is er al sprake van droogte in het specifieke compartiment van het watersysteem?

Genomen maatregelen tijdens de droogte zijn nauwelijks geregistreerd en ook de registratie van beoogde effecten van maatregelen was zeer beperkt. Gegevens over de droogteschade aan landbouwgewassen waren er deels wel, waarbij het zaak was zowel de opbrengsten (kg) als de prijs van de producten (€) te beschouwen, omdat beide reageerden op de droogte.

6.1.2 Naar een actueel www.droogteportaal.nl

Binnen dit project is een methode opgezet om (de doorwerking van) droogte in het hele watersysteem op een uniforme wijze te duiden. Door actuele metingen én een uniforme duiding ervan voor het gehele zandgebied door middel van veldmetingen en droogte-indices te ontsluiten via www.droogteportaal.nl, worden verschillen tussen regio's continu inzichtelijk gemaakt. Tevens krijgen alle betrokken actoren hetzelfde inzicht van de toestand van het systeem en kunnen gezamenlijk tijdig maatregelen worden getroffen en effecten ervan worden beoordeeld. Er is dus een aanvullende behoefte gebleken aan inzicht over de *actuele toestand* van het bodem(grond)watersysteem:

- meer online informatie aan de ene kant, generiek verwerkt op kaart en in grafieken e.d., alsmede
- duiding van deze informatie (is het *droog* of is er sprake van *droogte*), alsmede
- overzicht over het gehele zandgebied van Nederland, door combinatie van neerslag en verdamping, bodemvocht, grondwaterstand en beekafvoer: diverse componenten van het gehele bodem(grond)watersysteem, bij elkaar in een overzichtelijk portaal.

We voegen deze actuele set aan gegevens en informatie toe aan www.droogteportaal.nl (werk in uitvoering; stand juni 2021). Aansluitend bij onze analysemethodiek in het project willen we hiermee eenduidige, actuele en gestandaardiseerde droogte-indices kunnen bepalen, voor alle relevante systeemcompartimenten (wortelzone, grondwater, oppervlaktewater). Samen met KNMI-data over de meteorologische droogte zijn we daarmee 'compleet' qua actuele informatie voor alle betrokkenen. Zo kunnen we vanuit het zandgebied van Nederland vroegtijdig de beheerders aldaar en ook op nationaal niveau (LCW, RWS) in het kader van het Deltaprogramma Zoetwater qua beslissingen ondersteunen.

6.1.3 Registratie van onttrekkingen

Uit onze inventarisatie in Fase 1 en uit IPO en UvW (2021) blijkt dat de operationele omgang met en het beleid aangaande onttrekkingen van grond- en oppervlaktewater verschilt per waterschap en per provincie. Sommige waterschappen hebben geen informatie over de hoeveelheid grondwater die voor beregening wordt onttrokken en hebben geen registratieplicht. Andere waterschappen zijn nog bezig om hun informatie te verwerken. Voor waterschappen waarvoor wel gegevens beschikbaar zijn, geldt dat deze gebaseerd zijn op een bepaald percentage respondenten.

Uit CBS-analyses en gegevens van WEcR-WUR in het kader van deze studie volgt dat naast het tekort aan neerslag, de toename van grondwaterwinning voor drinkwater én voor de berekening de balans tussen watervraag en wateraanbod in 2018 en 2019 ernstig heeft verstoord. *Freatische grondwaterstanden zijn daardoor te diep weggezakt voor landbouwgewassen, voor vegetaties in (normaal gesproken) natte natuurgebieden en voor de watervoerendheid van beken.* Dit bevestigt het belang van goede en actuele registratie van onttrekkingen, om daar vervolgens indien nodig tijdig beperkingen aan op te leggen vóór en tijdens een droge periode.

De registratie van de onttrekking van water voor berekening is echter een ondergeschoven kindje. Het algemene wensbeeld is dat de provincie en het waterschap (NB: taken zijn verdeeld) bepalen wie, wanneer, waar en hoeveel kuub water er per jaar onttrokken mag worden uit het oppervlaktewater en uit het grondwater (zie o.a. IPO en UvW, 2021). Deze bepaling hangt af van de toestand van het watersysteem. Het waterschap bepaalt, via de route van meldingsplicht, waar, hoe diep en hoeveel water per jaar, of beter, per maand of kwartaal er uit het grondwater onttrokken mag worden tot een maximum van 150.000 m³/jaar (NB: berekening vindt veelal plaats in zomerseizoenen). Het waterschap dient een register met deze informatie bij te houden. Alle overige onttrekkingen uit het grondwater >150.000 m³/jaar zijn vergunning-plichtig en worden door de provincie beoordeeld en al dan niet vergund aan watergebruikers. Ook de provincie heeft een register met deze informatie. Tot zover hoe het zou kunnen gaan. In de praktijk blijken de registers onvolledig en niet up-to-date te zijn. Daarnaast gaat de melding en/of vergunning uit van watervolumes op jaarbasis, terwijl de feitelijke onttrekkingen tijdens droge perioden (weken tot maanden per jaar) plaatsvinden, juist op het moment dat grondwaterstanden en stijghoogten toch al dalen.

Het is voor het overeind houden van voldoende functiebediening (landbouw, natuur, infrastructuur, aquatische ecologie) van ons watersysteem tijdens droog weer nuttig voor beheerders om te weten *waar* en *hoeveel* water er *wanneer* onttrokken wordt in de actuele situatie, *niet alleen achteraf*. Koppeling van actuele onttrekkingen aan actuele grondwaterstanden buiten in het veld helpt hierbij.

6.2 Beoordeling van het waterbeheer tijdens de droogte

De maatregelen ter voorkoming van droogteschade in de jaren 2018 en 2019 zijn aangestuurd door verschillende bestuurslagen. Als er sprake leek te zijn van droogte, zijn bij Rijk, provincies, waterschappen en terreinbeherende organisaties calamiteitenteams aan de slag gegaan om de droogte en de negatieve effecten ervan te bestrijden. Eerst werden onttrekkingen uit oppervlaktewater verboden, daarna werden in een beperkt aantal deelgebieden onttrekkingen uit grondwater verboden door waterschappen Vechtstromen en Rijn en IJssel. Op diverse plekken in het zandgebied werd droogval van beken geconstateerd en deels voorkomen via wateraanvoer om enig debiet en stroming te realiseren, met een zeer beperkt tot geen effect op het grondwatersysteem. Ook stuwpeilen werden verhoogd, rijplaten werden verticaal in watergangen gedrukt en (skippy-) ballen werden voor het afsluiten van watergangen uitgedeeld om de afvoer van water te beperken en water op te slaan, voor zover er water aanwezig was in de droge tijd. Deze maatregelen vonden echter pas plaats op het moment dat Nederland al in een hydrologische droogtetoestand verkeerde. Een verdere toename van de droogte is hiermee misschien vertraagd, maar men was te laat om nog water vast te houden in de bodem. Het optrekken van stuwen in de watergangen van het waterschap droeg beperkt bij aan het bestrijden van de droogte. Op de eerste plaats omdat maar een klein deel van de totale ontwatering met stuwen beïnvloed kan worden (maximaal 5%) waardoor het positieve effect op het grondwatersysteem onvoldoende is geweest. Naast dat maar een deel van de leggerwaterlopen gestuwd kan worden, heeft een stuw veelal een korte doorwerking naar bovenstreams, waardoor maar een deel wordt beïnvloed. Daarnaast is het volume aan water (m³) beperkt in het open water systeem. Bovendien moet er water beschikbaar zijn om te bergen in oppervlaktewater, water dat er in droge tijden onvoldoende of niet is. Maatregelen die op een groter deel van (i.c. beter alle) leggerwaterlopen betrekking hebben en ook op het niveau van kavelsloten worden uitgevoerd, zouden, mits tijdig genomen, effectiever zijn geweest.

De huidige inrichting, het gebruik en het beheer van ons zoetwatersysteem waren en zijn niet geschikt om de effecten van een meteorologische droogte en de als gevolg hiervan tegelijkertijd optredende onttrekkingen te

beperken. Maatregelen in het oppervlaktewatersysteem werken alleen effectief door op het grondwatersysteem, als deze tijdig, structureel én tot in de haarvaten worden doorgevoerd. Hierbij dienen we te beseffen dat de haarvaten van het watersysteem zich vaak en grotendeels bevinden in eigendom en operationeel beheer van landeigenaren (>2.000.000 ha land). Het waterschap kan via het beheer van de eigen watergangen (o.a. via peilbeheer, inlaatbeheer en maaibeheer) dus maar een beperkte invloed uitoefenen; de grondeigenaren bepalen immers zelf de ontwatering van hun eigen land via drainagemiddelen en kavelsloten. Maar het waterschap kan wel beleidsregels opstellen die de ontwatering op kavelniveau beperken, zoals het verplicht stellen van regelbare drainage (NB: gepast beheer, registreren) als er reeds gangbare buisdrainage aanwezig is, of het aanbrengen van stuwen in kavelsloten (NB: gepast beheer, registreren). Van deze beleidsruimte is echter veelal geen gebruik gemaakt, terwijl juist de Legger Watersysteem mogelijkheden biedt om voorwaarden op te leggen aan breedte en (vooral) diepte van watergangen in particulier beheer. Het waterschap is verantwoordelijk voor alle watergangen.

Met klem wijzen we erop dat het lokaal hier en daar beperken van de ontwatering op kavelniveau weinig tot geen effect zal sorteren. Als het het gehele ontwateringsysteem wordt aangepast, i.c. het grootste deel van de leggerwatergangen en 120.000 km aan waterlopen, dan kunnen we het watersysteem en het functioneren ervan positief beïnvloeden en klimaatrobuust maken (meer water-bufferend bodem-watersysteem). Natuurlijk zullen mitigerende maatregelen nodig zijn om wateroverlast op een acceptabel niveau te houden. Daarvoor is ruimte nodig in het landschap van het landelijk gebied. We moeten parallel ook werken aan geohydrologisch passende bufferzones rondom natuurgebieden, waar de ontwatering en grondwateronttrekkingen beperkt zijn, met consequenties voor landbouw en drinkwatervoorziening.

6.3 Overwegingen bij onderzochte maatregelen

De maatregelen, zoals met het LHM hypothetisch doorgerekend, moeten niet als direct praktisch toepasbaar worden beschouwd. Uiteindelijk worden de passende keuzes in gebieden zelf gemaakt en zijn detailuitwerkingen nodig. Daarbij hoeft het niet zo te zijn dat de maatregel die in de berekeningen in deze studie het grootste effect geeft, ook de meest passende keuze is. Bovendien zal het niet voor alle maatregelen realistisch zijn deze ook in dezelfde extreme mate door te voeren als voor deze studie is gedaan. Met betrekking tot de onderzochte maatregelen en eventuele praktische inpassing ervan geven we graag de volgende overwegingen en aandachtspunten mee:

- Aanvulling vergroten: we kunnen bij dezelfde neerslag minder laten verdampen via aanpassing van de natuurlijke vegetatie, bijv. van dicht naaldbos naar loofbos naar heide, en door gewaskeuzes in de landbouw. Zo wordt het neerslagoverschot groter. Dit moet dan wel in de bodem infiltreren en niet oppervlakkig afstromen, bijvoorbeeld doordat de bodem is verdicht. Als bijvoorbeeld een dichte opstand van naaldhout wordt vervangen door vegetatie die minder water verdampt en door deels stuifzand, scheelt dat zo'n 50 à 200 mm per jaar; dit is jaarlijks 500 tot 2.000 m³ water per hectare.

Opgemerkt moet worden dat de parametrisatie van verdamping van verschillende typen bossen in hydrologische modellen op een beperkte kennisbasis is gebaseerd. Het berekende effect van zo'n maatregel is daarmee richtinggevend en de onzekerheidsmarges zijn groot.

Naast het vergroten van de grondwateraanvulling via vegetatiebeheer, kan water worden geïnfilteerd in hoger gelegen infiltratiegebieden die ondergronds voldoende ruimte hebben (boven de GHG) om deels te vullen met water. Hogere en drogere gebieden kunnen 's winters worden gevoed met het lokale neerslagoverschot, of water met vergelijkbare kwaliteit dat van elders uit de regio komt (bijv. beekwater), dan wel (eventueel voorgezuiverd) rivierwater. Daarbij moet nadrukkelijk rekening worden gehouden met de chemische samenstelling van het water (het dient te passen bij de gewenste samenstelling van het grondwater) en met de kosten van infrastructuur en van energie voor wateraanvoer.

Het neerslagoverschot dat in bebouwd gebied in het riool verdwijnt, belast de RWZI's en is een verliespost voor het grondwatersysteem in en direct rondom het bebouwd gebied. Het water dat op daken en wegen valt, kan in de bodem infiltreren, vult daarmee het grondwatersysteem aan, hetgeen weer zal leiden tot

hogere grondwaterstanden. Vooral bebouwd gebied waar de grondwaterstand zich dieper dan 2,5 m beneden maaiveld bevindt, is hiervoor geschikt.

- Ontwatering: de ontwatering moet beter afgestemd worden op sparen/vasthouden. Dit zijn de twee doelen die we nastreven: een grotere watervoorraad in het bodem-grondwatersysteem en met name *hogere grondwaterstanden*. Als het bodem- en grondwater via ontwatering het oppervlaktewater bereikt heeft, kan er alleen nog via berging voorkomen worden dat het wordt afgevoerd uit gebieden, en die mogelijkheden zijn beperkt.

Binnen de huidige inrichting van het watersysteem kan het verhogen van stuwpeilen in boerensloten met bijv. LOP-stuwen (Landbouw OntwikkelingsPlan) en SAWAX slimme stuwen (Smart Adaptive WATERlevel eXtender) bereikt worden, waarbij de boer zelf de bediening verzorgt. Bij goed gebruik (NB: belangrijk punt van aandacht) leiden deze stuwen tot het vasthouden van water in de bodem als de ontwatering wordt beperkt. Gebruik leidt ook tot meer waterberging in de particuliere kavelsloten (NB: relatief gering aantal m³). Toepassing van regelbare drainage als er al gangbare drainage aanwezig is (ombouwen) kan een optie zijn, maar alleen indien deze systemen correct bediend worden, met het doel water (deels) niet af te voeren, maar vast te houden door de drainagedrempel hoog in te stellen. Dit kan door bijvoorbeeld de drainagedrempel bij grasland jaarrond in te stellen op 0,5 m-m.v. Slootboderverhoging tot bijvoorbeeld 0,7 m-m.v. of hoger en ook het dempen van kavelsloten (indien mogelijk), is effectiever, want dit beperkt direct de ontwatering van al het aangesloten land. Deze maatregelen hebben effect op het landgebruik en moeten samengaan met maatregelen in het systeem dat door het waterschap wordt beheerd; ook hier moet de afvoer worden beperkt door de drainagebasis te verhogen en de ontwateringsfunctie te beperken. Belangrijk is dat deze maatregelen grootschalig en in samenhang moeten worden toegepast, dan pas zullen ze effect sorteren op het watersysteem, anders niet tot zeer beperkt (lokaal).

Belangrijk(st)e maanden voor water vasthouden zijn februari en maart, maar dit zijn ook de maanden waarin landbewerking voor de landbouw start. Het Rijk heeft hierin een rol, bijvoorbeeld in het kader van de mestwetgeving. Nieuwe regels zoals voor uitrijden van mest en/of investeringsprogramma's voor bijvoorbeeld extra mestopslag randvoorwaarden bieden om op korte termijn in de haarvaten van het watersysteem aan de slag te kunnen met maatregelen die ons beter bestand maken tegen droogte.

Vernatting kan leiden tot een toenemende kans op wateroverlast bij intensieve regenval. Om dit risico beheersbaar te houden is het enerzijds zaak om de afwatering via verbreding van watergangen hierop aan te passen (zie sectie 'afwatering'). Anderzijds kunnen functies die gevoelig zijn voor wateroverlast op hogere gronden geplaatst worden, zodat er geen gevoelige teelten laag in het beekdal en andere van nature natte laagtes plaatsvinden. Keuzes en ingrepen in de ruimtelijke inrichting liggen voor de hand (zie ook sectie 'landgebruik en ruimtelijke inrichting').

- Afwatering: ongeveer 15 tot 20% van alle watergangen is in operationeel beheer van het waterschap. Het grootste deel van de haarvaten van het watersysteem bevindt zich zoals reeds gezegd in eigendom en operationeel beheer van landeigenaren. Via de Legger Watersysteem kan het waterschap sturing en kaders geven aan het te voeren beheer van deze watergangen, bijvoorbeeld door aan te geven hoe breed en diep een watergang mag zijn.
- Verder kan, om bij een geringere ontwatering toch het afvoervermogen van de watergangen te behouden, het natte profiel worden verbreed, met op de bodem eventueel een smal zomerprofiel (accoladeprofiel). Een speciale vorm van profielaanpassing is het laten hermeanderen van in het verleden gekanaliseerde beken. Deze maatregel is bijvoorbeeld met succes toegepast in de Springendalse beek (Twente). In de Hierdense beek (Veluwe) is zandsuppletie toegepast. Binnen het bestaande profiel is zo de beekbodembodem verhoogd en de beek heeft zijn eigen route gemaakt. Daarnaast stroomt de Hierdense beek sindsdien ook regelmatig over in omliggend bos. Waterschap Vallei en Veluwe heeft hermeandering onder meer toegepast in een deel van de Lunterse beek en een groot deel van de Modderbeek. In

navolging van 'Ruimte voor de Rivier' zijn dit voorbeelden van 'Ruimte voor de Beek'. De maatregelen hebben een grotere berging in open water tot gevolg, maar de opstuwning reduceert juist ook de ontwatering van aanpalend land. Het is wel zaak de hermeandering qua hoogteligging in het landschap zodanig uit te voeren, dat de drainerende werking van de nieuw aangelegde meanderende beek maximaal wordt gereduceerd.

- Wateraanvoer: in delen van het zandgebied van Nederland is wateraanvoer mogelijk vanuit de rivieren Maas en Rijn. Deze aanvoer wordt onder andere gebruikt voor het handhaven van waterpeilen voor bijvoorbeeld gebieden rondom hoogveengebieden, zoals de Peel. Ook is wateraanvoer bedoeld om beken te laten stromen, tenminste met een klein debiet: met een minimale wateraanvoer vallen deze beken (net) niet droog. Aanvoerwater wordt her en der ook gebruikt voor beregening van gewassen.

Wateraanvoer is daarmee een alternatieve bron van zoetwater. Als daardoor grondwater gespaard kan worden, is dat gunstig voor het grondwatersysteem. Wanneer meer water vanuit de rivieren voor het zandgebied beschikbaar komt, kan dit water ook worden gebruikt om het grondwater aan te vullen via infiltratievennen of bekkens of een netwerk aan infiltratiesloten. Aandachtspunt hierbij is en blijft de chemische samenstelling van het aanvoerwater.

- Onttrekkingen: aan het effect van onttrekkingen uit het oppervlaktewater op het ecologisch functioneren van waterlopen is in deze studie niet gerekend. Toch is het van belang dit te benoemen, onder meer omdat er een verband is met de maatregelen 'Afwatering' en 'Ontwatering'. Watergangen die droogvallen dan wel stagnant (stilstaand) water bevatten, functioneren vaak ecologisch gezien slecht. Als droogval en/of stagnant water ongewenst is en veroorzaakt wordt doordat de basisafvoer en/of eventuele kwel 's zomers wegvalt, dan zijn ingrepen nodig die de toestroom voldoende verhogen, dan wel die de waterverliezen verkleinen, bijvoorbeeld via wateraanvoer of een verbod op onttrekkingen zodra de minimaal gewenste stroomsnelheid of waterdiepte wordt onderschreden.

Beregening is een manier om de gewasverdamping te laten toenemen en droogteschade of permanente schade aan gewassen te voorkómen. Echter, de besproken keerzijde met negatieve effecten op het watersysteem, is evident. Het heeft daarom zin op zoek te gaan naar significant meer efficiënte manieren van irrigatie dan via haspelberegening, bijvoorbeeld ondergrondse druppelirrigatie of subirrigatie. Het is zeker de moeite waard om te verkennen of voor gebieden met een gemiddeld hoge beregeningsvraag extra grondwatervoorraad kan worden gecreëerd door kunstmatige infiltratie van overtollig water in de winter voor gebruik in de zomer voor beregening (NB: let op aspect waterkwaliteit). Juist de gebieden met een grote beregeningsvraag hebben diepere grondwaterstanden, daar is capillaire opstijging tot in de wortelzone niet of nauwelijks mogelijk, en het zijn deze relatief hoger gelegen gebieden die geschikt zijn voor de extra opslag van water.

De grotere winningen, hoofdzakelijk voor drink- en proceswater in de industrie, onttrekken grondwater jaarrond uit de diepere watervoerende lagen, veelal dieper dan 50 m-m.v. Voor beregening van landbouwgewassen wordt er gedurende droge periodes meestal juist uit ondiepere lagen grondwater onttrokken (vaak tot maximaal 25 m-m.v.; uitzonderingen in o.a. West-Brabant). Een belangrijk ander verschil is dat het onttrekken van grondwater voor beregening een tijdelijk karakter heeft; i.e. de totale hoeveelheid water wordt onttrokken in een korte periode en geeft dus een piekbelasting op het systeem in een al droge periode. Het is van belang om niet alleen naar totale onttrekkingshoeveelheden te kijken, maar dergelijke belangrijke verschillen in de periode waarin wordt onttrokken expliciet mee te wegen.

Grondwaterafhankelijke natuur is gebaat bij voldoende hoge grondwaterstanden, juist onder droge omstandigheden. Sommige natuurtypen zijn ook gebaat bij de toestroom van (basisch) kwelwater naar de wortelzone. Onttrekkingen uit het grondwater verlagen de grondwaterstand op lokaal en regionaal niveau en reduceren kwelstromen, waardoor de natuurlijke vegetatie schade kan ondervinden. De permanente onttrekkingen van grondwater onder natuurgebieden en/of bufferzones hebben vrijwel direct invloed (zie Tabel 11). Tijdelijke onttrekkingen voor beregening nabij bufferzones in vooral het groeiseizoen zijn ook relevant voor deze thematiek. Het effect van een grondwaterwinning kan mogelijk

worden gecompenseerd bijvoorbeeld door (liefst ondiepe) infiltratie van oppervlaktewater in de winter als er een neerslagoverschot is.

Tegelijkertijd wordt door drinkwaterbedrijven aandacht gevraagd voor waterbesparing door huishoudens en bedrijven/industrie. Gezien het aandeel van drinkwatergebruik door burgers op het totale grondwatergebruik, zal een structurele verlaging van het drinkwatergebruik de druk op het grondwater verminderen, ook of juist tijdens droog weer. De trend in de tijd is echter omgekeerd, verwacht wordt dat er een grotere watervraag in de (nabije) toekomst zal zijn.

Flexibele winningen die óf gedurende het winterhalfjaar óf gedurende het zomerhalfjaar worden gebruikt (NB: niet doorgerekend in dit project), kunnen mogelijk de effecten van droogte op gebruiksfuncties beperken. Het winnen van grondwater in ontwaterde gebieden leidt namelijk enkel tot een verminderde afvoer (NB: let op droogval). In de wintermaanden bij een neerslagoverschot hoeft een verminderde afvoer geen probleem te zijn. Als toepassing van deze winningen de onttrekkingen van grondwater in gebieden zonder ontwatering kunnen reduceren, dan worden deze diepe, traag reagerende gebieden zonder ontwatering ontzien, waardoor daar de grondwatervoorraad groeit. Gedurende het zomerhalfjaar kunnen deze gebieden worden gebruikt voor grondwaterwinning en worden de zogenaamde natte (natuur)gebieden ontzien. De winningen zijn dan beter in te passen.

Ten slotte kan overwogen worden winningen te verplaatsen naar locaties waar ze minder effect hebben op landbouw en met name op natuur. Het schone kwelwater uit de Veluwe dat in de Flevopolders naar boven komt, zou bijvoorbeeld kunnen worden afgevangen voor de productie van drinkwater, in plaats van het kwelwater te lozen op het IJsselmeer.

Drinkwaterbedrijven werken binnen hun lange-termijn-visies aan toekomstige vormen van en bronnen voor drinkwaterproductie. Indien gekozen wordt voor het stoppen van een winning dient er elders een winning gerealiseerd te worden. Dit is geen sinecure in verband met andere functies, beschermbaarheid van bronnen en waterkwaliteit, ook van oppervlaktewater.

- Hydrologische bufferzones rondom natuurgebieden: het watertekort en daarmee de droogteschade aan natuurlijke vegetatie door droogte in de Nederlandse praktijk anno nu wordt voor het grootste deel veroorzaakt door verlies van voornamelijk grondwater naar de omgeving. De ontwatering van de omgeving (reductie gewenst) en de grondwateronttrekkingen (reductie gewenst) zijn hier met name debet aan. Binnen het natuurgebied dient het streven te zijn om maximaal water te sparen en vast te houden in tijden van neerslagoverschot en de afwatering zoveel mogelijk te stoppen, voor zover dat nog niet gebeurt.

De omvang van bufferzones wordt bij voorkeur bepaald door geohydrologische eigenschappen van de 3D-ondergrond ter plekke. Deze zijn een maat voor de invloed die de omgeving, met alle hydrologische activiteiten erbij, heeft in het landschap en in de diepte. Naarmate de lokale geohydrologie maakt dat de directe omgeving meer en/of sneller invloed heeft op de waterhuishouding van het natuurgebied, moet de bufferzone groter en dieper zijn om gewenste effecten voor de natuur te kunnen realiseren. Daarnaast leidt een analyse van de berekende spreidingslengte van het freatische en eerste watervoerend pakket tot een gewenste vergroting van de huidige bufferzones. De grootte van bufferzones verschilt ook per maatregel die voor het betreffende gebied voor ogen is. Bij het beperken van effecten van grondwateronttrekkingen is een grotere bufferzone vereist dan voor het extensiveren van de ontwatering.

Vernatting van de bufferzones en stopzetten van grondwateronttrekkingen hebben tot logisch gevolg dat voor deze gebieden naar een andere vorm dan de momenteel gangbare landbouw moet worden gezocht als grondwaterstanden te hoog worden, naar een landgebruik dat hierbij past. Maatregelen in de hydrologie van bufferzones maken ook dat een combinatie met andere beleidsdossiers voor de hand ligt (o.a. stikstofdepositie, bemesting en waterkwaliteit, broeikasgassen). Wellicht kunnen bufferzones een aparte functie krijgen, met duidelijke aanpassingen in het kader van beheer van agrarische gronden.

6.4 Ruimtelijke inrichting, adaptatie en acceptatie van schade

'Niet alles kan overal' – Adviescollege Stikstofproblematiek, 2019.

De Nederlandse zandgebieden zijn in hoge mate ingericht om het land te ontwateren en water snel af te voeren, om mogelijke wateroverlast te voorkomen. Na de extreme neerslag in de zomer van 2016 in het zuidoosten van het land met als gevolg veel wateroverlast, volgden de zomers van 2018, 2019 en 2020 met aanzienlijke watertekorten voor met name natuur en landbouw. Deze verschillen confronteren ons helder met de opgave waar we voor staan. Het gaat niet alleen om ontwatering en afwatering, maar ook om beheer van grondwatervoorraden (voldoende volume) en beheer van grondwaterstanden (voldoende hoog).

Onze analyses hebben naar voren gebracht dat een transitie nodig is naar een klimaatrobuust en toekomstbestendig landelijk gebied en watersysteem. Dit leidt tot een rigoureuze aanpak van de landinrichting en landgebruik, het watersysteem en van het watergebruik. Daarom moeten er (politieke) keuzes worden gemaakt, reeds op te starten op de korte termijn, ten gunste van een situatie buiten in het veld op de (middel)lange termijn:

- Integrale oplossingen zijn nodig, omdat de waterhuishouding en het gebruik van water in ons landschap ruimtelijk samenhangt. Maatregelen op meerdere parallelle sporen zijn nodig in een gebiedsaanpak: ontwatering, afwatering, onttrekking, ruimtelijke inrichting en leren accepteren van droogteschade én natschade onder extreme condities. Enerzijds moet water zoveel mogelijk worden vast gehouden, verschillende bronnen van water efficiënt en verantwoord worden benut en voorraden worden aangevuld. Anderzijds dient het gebruik van grondwater te worden beperkt. Doen we dit niet, dan komen watervraag en wateraanbod (NB: grondwaterstanden moeten hoog genoeg blijven, kwelstromen en beekafvoeren op orde) steeds verder uit elkaar te liggen. Dit voorkómen vergt een inspanning van alle actoren: zowel waterschappen en agrariërs die grond- en oppervlaktewater beheren en water moeten vasthouden, als (gebruikers van) drinkwater, industrie en landbouw die water uit het systeem onttrekken en dit watergebruik moeten beperken. Hoe en waar dit gebeurt, en welke innovaties hiervoor nodig zijn, is geen onderdeel van deze studie. De regie voor uitvoering van maatregelen ligt met name bij de provincies, gezien vanuit het oogpunt van grondwaterbeheer. Uit deze studie blijkt wel dat alleen wanneer aanpassingen structureel en tot in de haarvaten van het systeem worden doorgevoerd, deze dan pas de schadelijke gevolgen van een meteorologische droogte wezenlijk beperken.
- Aanpassingen van de inrichting en het gebruik van het watersysteem en daarmee een betere bestendigheid tegen droogte, zullen alleen werken als deze samengaan met aanpassingen in het landgebruik. Daar is in deze studie niet expliciet aan gerekend, maar het landgebruik in de ruimte anders positioneren biedt kansen. Sterker nog, werken aan een meer robuust bodem-water-systeem dat beter met droogte kan omgaan komt niet op gang als er geen ruimtelijke aanpassingen geschieden. Als we vanuit het watersysteem en de eventuele risico's en schade die gepaard gaan met droogte en wateroverlast redeneren, concluderen we dat extreme locaties hoog en droog (droogteschade) zowel als laag en nat (natschade en wateroverlast) alleen tegen hogere (maatschappelijke) kosten goed bediend kunnen worden voor elke vorm van landgebruik. Om op die plekken risico's en daarmee schade te beperken, is het denkbaar dat aldaar geen kapitaalintensieve vormen van landgebruik meer plaats gaan vinden in de (nabije) toekomst. Als we naar schatting en als voorbeeld de 10% laagste (in het beekdal) en de 10% hoogste gronden (op de flanken/rug) extensief of anders gaan gebruiken, dan scheelt dat aanzienlijke kosten en ontstaat er direct ook meer ruimte voor het watersysteem en -beheer.
- Naast het uitvoeren van ad-hoc-ingrepen en structurele maatregelen, is het ook een optie om meer te accepteren: droogteschade én natschade in de landbouw eerder en meer accepteren dan we nu doen en voorkómen als dat kan, door herinrichting en landgebruik. Accepteren zal betekenen dat de gewasopbrengst kan dalen en dat de gewaskeuze en –positionering (welk gewas waar verbouwen) wordt aangepast: een overgang naar gewassen die beter bestand zijn tegen een incidenteel droge bodem. In het kader van het (meer, beter) vasthouden en daarmee sparen van het neerslagoverschot in de bodem in de winter is het relevant om het bemesten en bewerken van land in het vroege voorjaar (momenteel

vanaf 15 februari) qua timing hierop af te stemmen. Dit kan gerealiseerd worden in het licht van maatschappelijke kosten en baten, gebaseerd op een gezonde mix van landbouwkundige gewasproductie, natuurkwaliteit, het behalen van de gewenste KRW-doelen in 2027 en een duurzaam functionerend bodem-(grond)watersysteem. Als we meer dan nu een deel van de droogteschade in de landbouw accepteren en niet opheffen door irrigatie, dan houden we meer en eerder voldoende zoetwater over om goed te verdelen over alle gebruikers en functies.

- Verdroging van natuur, broeikasgassen, het stikstofdossier en klimaatveranderingen met onder andere meer en vaker droogte tot gevolg kunnen samenkomen in een 'Deltaplan Robuust Nederland'. Na de ruilverkavelingen en landinrichtingen in het verleden, na het Nationaal Bestuursakkoord Water en het programma 'Ruimte voor de Rivier' (NB: alle gericht op teveel water, wateroverlast en waterveiligheid) is het tijd voor additioneel omdenken (te droog hoort er ook bij) en investeringen in het regionale en lokale watersysteem en een betere integratie van landbouw- en natuurdoelen. Wellicht staan we aan vooravond van een 'Ruilverkaveling 2.0'-periode met het oog op klimaatveranderingen.

6.5 'Watertransitie'

Het watersysteem dient ons allen, droogte is ook een vorm van wateroverlast en waterveiligheid. Naast de aanvoer van water in de zomer via de grote rivieren, die ook onder druk staat door klimaatveranderingen, moeten we ons binnenlands systeem en de omgang ermee opwaarderen. We moeten onze eigen 'waterbroek' beter en langer ophouden. De hoge zandgronden hebben deels een specifieke problematiek, die nationaal in verband kan en moet worden gebracht met andere verschijningsvormen van droogte in het veenweidegebied (ontwatering en bodemdaling) of polders en kustgebieden (ontwatering en verzilting). Aan de andere kant blijft het bij een generieke set aan aanbevelingen (o.a. ENBW, 2006; DHZ-ZON, 2015):

- Water vasthouden en daarmee sparen in het bodem-grondwatersysteem, daar waar het als regen valt; aanpalende maatregelen nemen, zodat het gespaarde water niet ongebruikt weglekt;
- Functie volgt water(peil): geen kapitaalintensief landgebruik (bebouwing, 'cash crops', ...) in delen van stroomgebieden die droog zijn (bijv. 10% hoogste delen), dan wel nat zijn (bijv. 10% laagste delen);
- Water een sterke rol laten spelen in de ruimtelijke inrichting en landgebruiksvormen;
- Bufferzones rondom natte natuur realiseren en handhaven;
- Let op waterkwaliteit: water dat schoon is, moet schoon blijven.

Op basis van deze studie bevelen we daarnaast aan:

- Freatische grondwaterstanden moeten structureel omhoog: minder grondwater onttrekken en regenwater tijdig, meer en langer vast te houden in de bodem (sparen), daar waar het valt; deze maatregel doorvoeren tot in de haarvaten van het watersysteem;
- Grondwateraanvulling in infiltratiegebieden significant vergroten door aanpassingen in begroeiingstypen (verdamping omlaag), afkoppelen bebouwd gebieden (kunstmatig) water te infiltreren in de winter in hoge gebieden (NB: let op aspect waterkwaliteit);
- Druk op het grondwater verminderen door grondwateronttrekkingen in het groeiseizoen te reduceren. Hiervoor is actuele, operationele informatie nodig, naast in voldoende mate buffers en alternatieven voor de watervraag;
- Informatie inzake het gebruik en de toestand van het watersysteem uniformeren en op orde brengen. Bijzondere aandacht is daarbij nodig voor a) het door waterschap en provincie op een degelijke wijze registreren van actuele, operationele onttrekkingen uit oppervlaktewater en grondwater en voor b) het operationeel in beeld hebben van de actuele toestand van het watersysteem: bodemvocht, freatische grondwaterstand, stijghoogte en beekafvoer;

- Als grondwaterstanden structureel omhoog worden gebracht zal niet elk landgebruik nog op elke plek mogelijk zijn. Deze consequentie kan niet genegeerd worden en vraagt aanpassingen aan de inrichting van het platteland en het landgebruik.
- Watertransitie te combineren met transitie inzake ruimtelijke inrichting, meststoffen, energie, broeikasgassen en landbouw.

Ten slotte: watertransitie en adaptief waterbeheer vragen om een omslag in denken en doen. Er moet een balans worden gezocht tussen het voorkómen van wateroverlast en het beperken van de effecten van droogte, naast het meer en beter accepteren van schade. De uitdaging ligt onder meer in de verschillende tijdschalen waarop droogte en wateroverlast zich manifesteren: wateroverlast komt en gaat snel, terwijl droogte langzaam intreedt en lang na-ijlt. Een watersysteem dat én geschikt is om water voldoende snel af te voeren én ook beheerders en landeigenaren in staat stelt om water vast te houden om grondwatervoorraden aan te vullen, levert een wezenlijke bijdrage aan een toekomst van robuust watervoorraadbeheer, waarbij grondwaterstanden voldoende gehandhaafd kunnen blijven. Klimaatveranderingen i.c. meer grillige en extreme weercondities kunnen zo met veerkracht en buffering beter opgevangen en verwerkt worden.

Literatuur

- Algemene Rekenkamer (2021). Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Rapport bij het Jaarverslag 2020.
- Beugeling, G.P. & F.A.M. Claessen (1995). Operationalisatie van de 25%-doelstelling verdroging: maatregelen, kosten en effecten. RIVM/Riza.
- Bloomfield J., Marchant B. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 17:4769-4787.
- De Louw, P.G.B. & R.J. Stuurman (2000). Mogelijkheden voor watersysteemoptimalisatie door actief peilbeheer in het Merkske stroomgebied. TNO-rapport NITG 00-123-B.
- De Louw, P.G.B., R.J. Stuurman & G. van Wirdum (2000). Ecohydrologische systeemanalyse van de Strijbeekse Heide. Bestrijding van verdroging vennen en beekdal. TNO-rapport NITG 00-212-B.
- De Louw, P.G.B., P.T.M. Vermeulen, J. Reckman & R.J. Stuurman (2001). Waterconservering en peilbeheer in het BeNeLux-middegebied. Deelrapport 3: Bepaling van de effecten van waterconservering. TNO-rapport NITG 01-055-B.
- De Louw, P.G.B., J. van Bakel, J. Buma, H. Hakvoort & A. Veldhuizen (2006). Vergroting Retentiewerking. TNO-rapport 2006-U-R- 122/A.
- De Louw, P.G.B, J. Peters, V. Kaandorp & A. Oost (2020). Verkennend rekenen aan grootschalige infiltratie op de Veluwe. H₂O – juni 2020.
- DHZ-ZON (2015). Wel goed water geven! Door regionaal samenwerkende partners Oost- en Zuid-Nederland. Bestuurlijk vastgesteld door RBO Rijn-Oost en Stuurgroep RBOM-DHZ in mei 2015.
- El Hajj, M., N. Baghdadi, M. Zribi, N. Rodriguez-Fernandez, J.P. Wigneron, A. Al-Yaari, A. Al Bitar, C. Albergel & J.C. Calvet (2018). Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at locations in Southwestern France. *Remote sensing*, 10, 569.
- ENBW, Werkgroep (2006). Evaluatie Nationaal Bestuursakkoord Water. Eindrapport Verantwoordend Spoor. Werkgroep ENBW, juli 2006. Definitief rapport.
- Hisdal H., Tallaksen L.M., Clausen B., Peters E., Gustard A. (2004). Hydrological Drought Characteristics, in: L. M. Tallaksen and H. A. J. van Lanen (Eds.), *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Elsevier Science B. V. pp. 139–198.
- IPO en UVW (2021). Overzicht grondwateronttrekkingen.
- Kraijenhoff van de Leur, D. (1958). A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient. *De Ingenieur* 70: 87–94.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit & P.E.V. van Walsum (2017). SWAP version 4; Theory description and user manual. Wageningen Environmental Research, Report 2780.
- Lloyd-Hughes B., Saunders M.A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22:1571-1592.

- Massop, H.Th.L., C. Schuiling & A.A. Veldhuizen (2013). Update landelijke potentiële beregeningskaart voor het NHI op basis van landbouwmetingen 2010. Alterra-rapport 2382. Wageningen.
- 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 (2002). Hydrologische woordenlijst. NHV Special no. 5. NHV-Werkgroep Hydrologische woordenlijst.
- NHV (2015). Verdamping in de Hydrologie. NHV Special no. 8. NHV-Werkgroep Verdamping.
- NSOB (2020). Verdeel(de) verantwoordelijkheid. Een reflectie op samenwerking bij de aanpak van droogte in de Achterhoek.
- Peters, E. (2003). Propagation of drought through groundwater systems. PhD thesis Wageningen University, Wageningen, 2003.
- Planbureau voor de Leefomgeving (2021). Naar een uitweg uit de stikstofcrisis. Overwegingen bij een integrale, effectieve en juridisch houdbare aanpak. PBL, Den Haag, PBL-publicatienummer 4520.
- Rodriguez-Fernandez, N., A. Al Bitar, A. Colliander & T. Zhao (2019). Soil moisture remote sensing across scales. Remote Sensing, 11, 190.
- Runhaar, J., W. van Landuyt, C. L. G. Groen, E. J. Weeda, & F. Verloove (2004). Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen. Gorteria 30:12-26.
- Shukla S., Wood A.W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical research letters 35.
- Van Asseldonk, M., R. Stokkers, J. Jager & R. van der Meer (2021). Economische effecten van droogte in 2018 en 2019: een regionale analyse akkerbouw en melkveehouderij. Wageningen, Wageningen Economic Research, Nota 2021-014.
- Van Dam, J.C. & H.P.A. Gooren (2021). Bodemvochtmetingen in zandgebieden van Hoog Nederland. Deelrapport van het project 'Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland'. KnowH₂O, KWR, WUR, HSS, FWE.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., R. Bartholomeus, P. de Louw, J.P.M. Witte, J.C. van Dam, D. van Deijl, P. Hoefsloot, C. Clevers, D. Hendriks, M. van Huijgevoort, J. Hunink, N. Mulder, J. Pouwels & J. de Wit (2019). Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Rapportage Fase 1: ontwikkeling van uniforme werkwijze voor analyse van droogte en tussentijdse bevindingen. KnowH₂O, KWR, Deltares, WUR, HSS, FWE.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., R. Bartholomeus, P. de Louw, J.P.M. Witte, J.C. van Dam, D. van Deijl, P. Hoefsloot, M. van Huijgevoort, J. Hunink, I. America, J. Pouwels & J. de Wit (2020). Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen. Rapportage Fase 2. KnowH₂O, KWR, Deltares, WUR, HSS, FWE.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., J. van Bakel, H. Massop, J. van Dam, F. Bosveld & A. Veldhuizen (2020). Efficiëntie van berekening - een deskstudy naar kennis en inzicht ten aanzien van waterverliezen bij midden op de dag beregenen vergeleken met beregenen in de nachtelijke uren. KnowH₂O, WEnR, WUR-SLM, De Bakelse Stroom. Notitie, augustus 2020.
- Van Ek, R., S. Klop, J. de Wit, R.P. Bartholomeus, & J.P.M. Witte (2021). Effecten van droogte 2018 op natuurlijke vegetatie. Analyse van vegetatieopnamen en grondwaterstanden op de Hogere Zandgronden van Nederland. Witteveen+Bos, FWE, KWR.

Van der Meer, R.W. (2020). Watergebruik in de land- en tuinbouw 2017 en 2018. Wageningen, Wageningen Economic Research, Nota 2020-030.

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23:1696-1718.

V&W, Ministerie van (1994). Evaluatienota Water; regeringsbeslissing; aanvullende beleidsmaatregelen en financiering 1994-1998. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, SDU, Den Haag, 164 p.

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

Witte, J.P.M., P. de Louw, R. van Ek, R.P. Bartholomeus, G.A.P.H. van den Eertwegh, H.K. Gilissen, H.F.M.W. van Rijswick, G.P. Beugelink, R.J. Ruijtenberg & W. van der Kooij (2020). Aanpak droogte vraagt transformatie waterbeheer. *Water Governance*:120-131.

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

Witte, J.P.M., R. van Ek, J. Runhaar & G.A.P.H. van den Eertwegh (2020) Verdroging van de Nederlandse natuur: bijna een halve eeuw goed onderzoek en falende politiek. *Stromingen 2020* (26) nr. 2, pag 65-79.

Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk, & J.J. Buyse (2019). Forensic hydrology reveals why groundwater tables in the province of Noord-Brabant (the Netherlands) dropped more than expected. *Water* 11:1-14.

Yevjevich V.M. (1967). Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *An. Hydrology papers* (Colorado State University); no. 23.

Bijlagen

I Berekening van droogte-indices

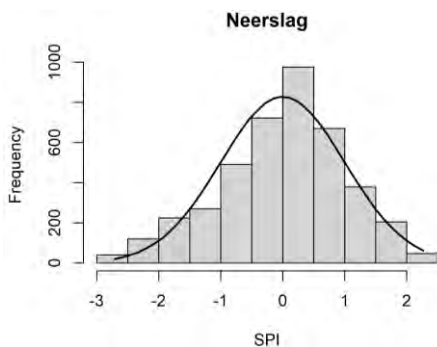
Om de verschillende kenmerken van elk type droogte goed in kaart te brengen, is het belangrijk om alle hydrologische variabelen (neerslag, verdamping, bodemvocht, afvoer en grondwater) mee te nemen in de evaluatie van de droogte. We maken gebruik van gestandaardiseerde indices voor elke variabele, waardoor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

De gestandaardiseerde indices zijn bepaald voor neerslag (SPI, McKee et al. 1993), neerslagtekort (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010), bodemvocht (SMI), afvoer (SRI, Shukla and Wood 2008) en grondwater (SGI, Bloomfield and Marchant, 2013). Alle indices zijn op dezelfde manier bepaald voor de verschillende variabelen.

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 100). Op basis van de normaal verdeelde anomalieën kan dan de kans op voorkomen, of herhalingsjijd van droogte bepaald worden (Tabel 13).

De indices kunnen bepaald worden 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 standaardnormaal 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.



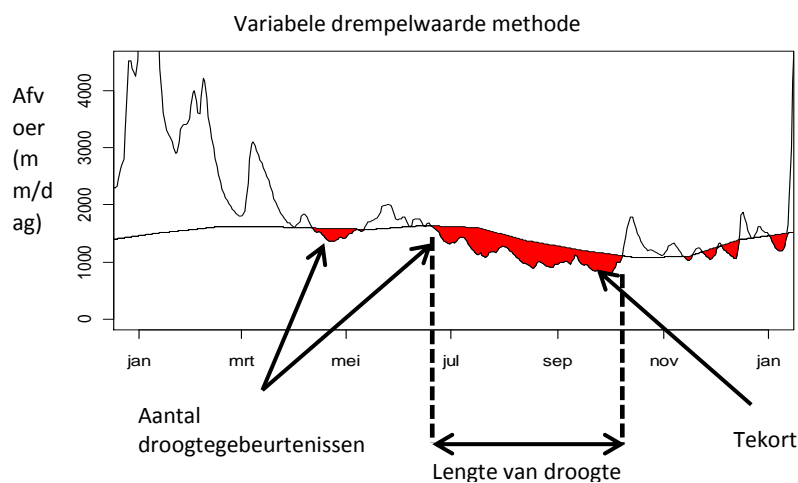
Figuur 100. Voorbeeld van de verdeling van SPI-waarden gebaseerd op neerslagdata gefit met een Gammaverdeling en omgezet naar de standaardnormaal verdeling.

Tabel 13. Classificatie van droogte gebaseerd op de waarde van de gestandaardiseerde index en bijbehorende waarschijnlijkheden (Lloyd-Hughes and Saunders 2002).

Waarde van index	Categorie	Waarschijnlijkheid %	Herhalingstijd
2 of meer	Extreem nat	2.3	1/44
1.5 tot 1.99	Zeer nat	4.4	1/22
1.0 tot 1.49	Matig nat	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	Zeer droog	4.4	1/22
-2 of minder	Extreem droog	2.3	1/44

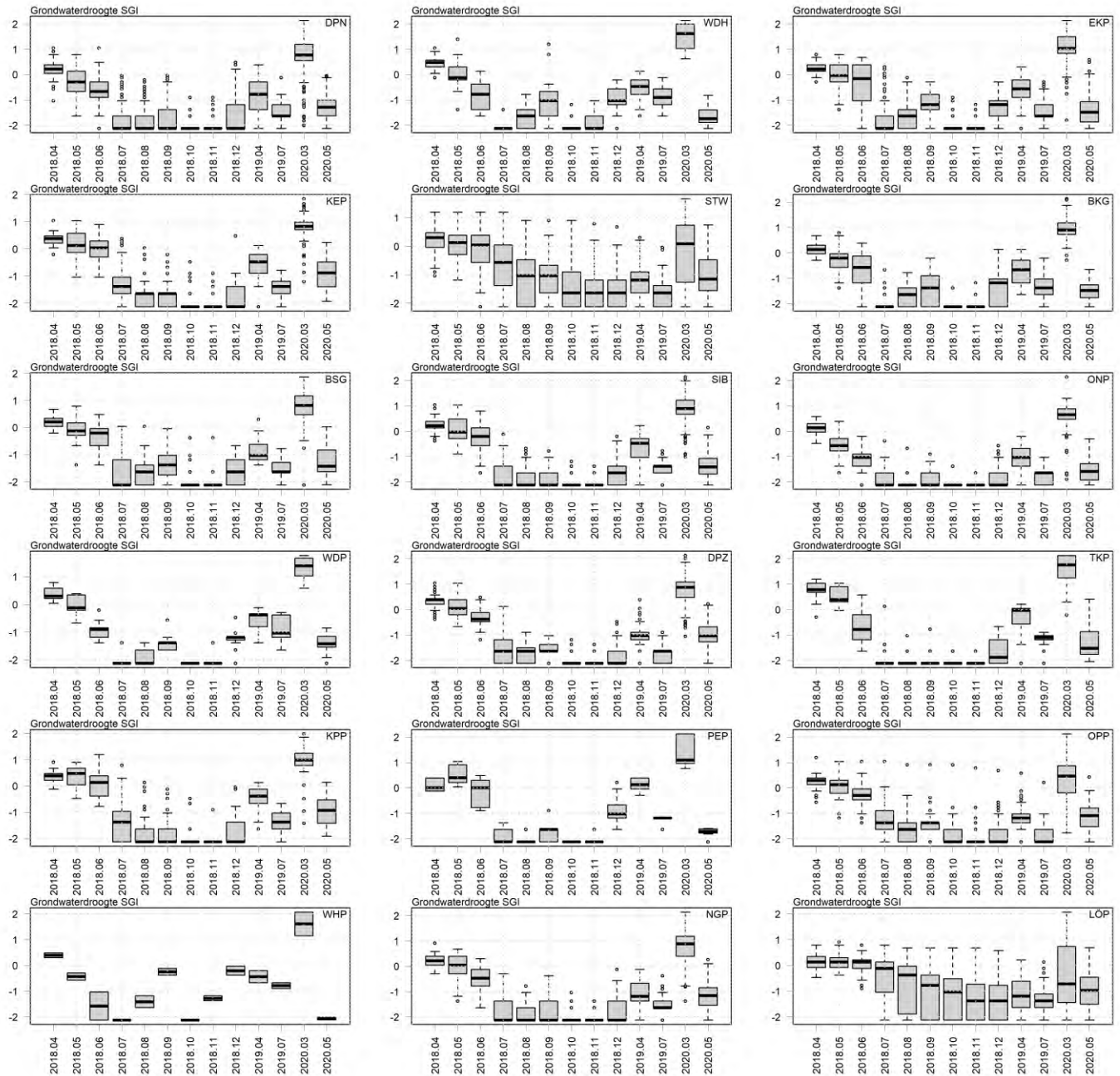
Naast de gestandaardiseerde indices kan droogte ook afgeleid worden op basis van anomalieën in de tijdreeks. Hiervoor is de variabele drempelwaarde methode (Figuur 101) gebruikt (Yevjevich, 1967, Hisdal et al., 2004). Hierbij wordt er vanuit gegaan dat alle waarden onder een bepaald percentiel aangeven 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 droogte, 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 beschikbare data. 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).

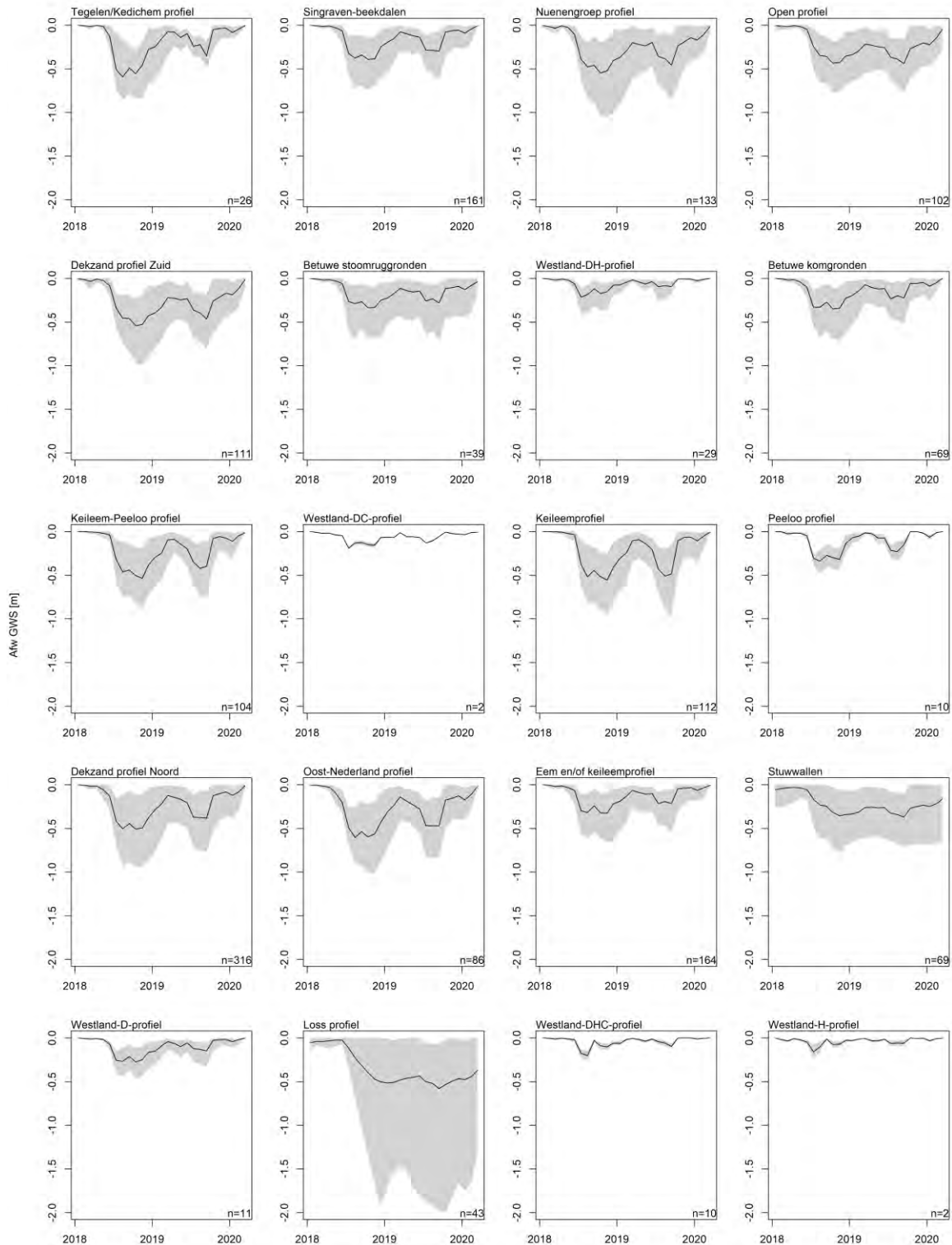


Figuur 101. Variabele drempelwaarde methode en droogtekenmerken.

II Duiding droogte



Figuur 102. Ontwikkeling van grondwaterdroogte in de tijd voor de hydrotypen. Grondwaterdroogte is weergegeven als SGI (y-as), waarvoor voor de peilbuizen in elk hydrotype een boxplot is opgesteld. De donkere verticale lijn geeft de mediaan, de boven- en onderkant van de box geven respectievelijk het 25^{ste} en 75^{ste} percentiel. De stippellijnen geven het 10^{de} en 90^{ste} percentiel. De punten zijn uitschieters. De grootte van de boxen geeft inzicht in de spreiding van de SGI binnen een hydrotype.



Figuur 103. Afwijking van de grondwaterstand per maand in de periode 2018 – 2020 ten opzichte van de mediaan van de grondwaterstand voor die maand in de periode 1990-2019, gebaseerd op simulaties met tijdreeksmodellen, voor een drietal hydrotypen. De zwarte lijn geeft het gemiddelde verschil van de afwijkingen voor alle peilbuizen in een hydrotype en de bandbreedte geeft de 10^{de} en 90^{ste} percentielen.

III Kaart grondwaterafhankelijke natuur

Samen met Teun Spek van de provincie Gelderland is via de volgende selectieprocedure een rasterkaart (resolutie: 250 m) gemaakt van grondwaterafhankelijke natuur die door het waterbeheer kan worden beïnvloed:

1. Eerst is de natuur binnen het zandlandschap geselecteerd op basis van de nationale beheertypenkaart.
2. Vervolgens hebben we daarvan alleen de natuur met grondwatertrap I, II, III of V genomen (via 'has their centre in selection file'), aangevuld met alle beheertypen die obligaaf grondwaterafhankelijk zijn. We hebben nu alle grondwaterafhankelijke natuur bij elkaar.
3. Maar niet al die natuur kan ook worden beïnvloed door het waterbeheer. Daarom zijn tot slot alle gridcellen vlakken verwijderd die wijzen op een schijnspiegel (GHG volgens het LHM dieper dan 3 m beneden maaiveld, of schijnspiegel aangegeven op de bodemkaart).

Tabel 14. Beheertypen die volgens het projectteam obligaaf grondwaterafhankelijk zijn.

TYPE	Naam
N03.01	Beek en bron
N05.01	Moeras (vervalt per 31-12-2020)
N05.02	Gemaaid rietland
N06.01	Veenmosrietland en moerasheide
N06.02	Trilveen
N06.03	Hoogveen
N06.04	Vochtige heide
N06.05	Zwakgebufferd ven
N06.06	Zuur ven of hoogveenven
N10.01	Nat schraalland
N10.02	Vochtig hooiland
N12.02	Kruiden- en faunarijk grasland
N13.01	Vochtig weidevogelgrasland
N14.01	Rivier- en beekbegeleidend bos
N14.02	Hoog- en laagveenbos
N14.03	Haagbeuken- en essenbos
N15.02	Dennen-, eiken-, en beukenbos
N16.04	Vochtig bos met productie (nieuw per 01-01-2018)
N17.06	Vochtig en hellinghakhout (nieuw per 1-1-2017)

IV Hydrologische droogte per combinatie van natuurtype en hydrotype

Om te onderzoeken hoe de waterhuishouding in verschillende delen van het projectgebied en in verschillende soorten natuur in de twee droge jaren heeft afgeweken van de normale situatie, zijn tabellen gemaakt waarin de met het LHM gesimuleerde hydrologische grootheden zijn weergegeven per combinatie van natuurtype en hydrotype. De oppervlakten, uitgedrukt in aantal rekencellen van 250 m, van de voor het projectgebied relevante natuurtypen per hydrotype zijn opgenomen in Tabel 15. Oppervlakten van ten hoogste 3 rekencellen (18.75 ha) zijn buiten beschouwing gelaten omdat dat aantal onvoldoende representatief is voor uitspraken op het niveau van hydrotypen. Tevens is in Tabel 15 aangegeven of het natuurtype grondwaterafhankelijk is, en of het afhankelijk is van de toestroom van kwelwater. Op die wijze zijn de rijen van de tabel ook gesorteerd: eerst naar kwelafhankelijkheid (ja/nee), dan naar grondwaterafhankelijkheid (ja/soms/nee), en dan pas naar de code van het natuurtype. In de hierna gepresenteerde tabellen getoonde gemiddelde waarden per natuurtype zijn telkens gewogen naar de oppervlakten van die typen binnen de hydrotypen, dus naar de resultaten van Tabel 15.

Tabel 15. Oppervlakte (in # 250 m cellen) per combinatie van hydrotype (Figuur 3) en natuurtype. Oppervlakte < 4 cellen weggelaten, alsmede niet relevante hydrotypen en natuurtypen. Typen gesorteerd naar grondwaterafhankelijkheid (gw-afh) en kwelafhankelijkheid (kwel-afh).

	gw-afh	kwel-afh	totaal	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	ja	ja	685	45	55	58	19	26	29		45	19	19	4	191	10	15	32	89	4		19
N06.02 Trilveen	ja	ja	74					14											5	51		4
N06.05 Zwakgebufferd ven	ja	ja	178						11	7		89	8	18	8	15						6
N10.01 Nat schraalland	ja	ja	592	40		62	61	17	41		43	24	15		112	23	13		29	87		10
N10.02 Vochtig hooiland	ja	ja	1456	31	25	117	63	55	128		107	33	20	28	330	27	23	13	209	175	8	43
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	ja	ja	968	41	142	121	28		4	30	155	79	28		188	13	23	26	44		14	22
N05.01 Moeras	ja	nee	1409	30	70	28	17	39	103		34	8	6	86	136	6	13	33	304	320	52	32
N05.02 Gemaaid rietland	ja	nee	287						17					11	6		5	5	29	208		6
N06.01 Veenmosrietland en moerasheide	ja	nee	289			7									4				30	242		
N06.03 Hoogveen	ja	nee	597			117		31	281		9	48	4	62								45
N06.04 Vochtige heide	ja	nee	2252			165	75	542	350		428	112	44	95	64	46	72		4			255
N06.06 Zuur ven of hoogveenven	ja	nee	316			11	9	106	47		52	7	8	5	5	6	13					47
N13.01 Vochtig weidevogelgrasland	ja	nee	897	45	14			14	54		33				141		14	12	382	113		
N14.02 Hoog- en laagveenbos	ja	nee	1439	14	12	74	26	48	113		172	77	70	26	112	10	12	12	71	497		83
N14.03 Haagbeuken- en essenbos	ja	nee	1450	91	74	98	58	7	14	234	235	26	66	24	131	8	20	61	241	17	7	14
N05.02 Gemaaid rietland	ja	nee	287						17					11	6		5	5	29	208		6
N16.04 Vochtig bos met productie	ja	nee	1916	161	58	239	35	10	11	5	415	77	57		148	11	133	44	205	23	5	264
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	soms	nee	9845	252	903	613	339	698	615	279	787	327	318	274	1708	324	400	186	692	530	75	290
N12.03 Glanshaverhooiland	soms	nee	275	7	172	5				4	5		7		4			39	17			
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	soms	nee	653	9	14	70	29	46	35	34	67	46	29	43	99	62	19	18				33
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	soms	nee	15021	78	100	1227	907	2068	787	356	1446	629	1123	219	629	4136	567	6	10	25		704
N17.03 Park- en stinzenbos	soms	nee	440	15	18	78	91	29	16		18	6			19	82	15	33	16			4
N07.01 Droge heide	nee	nee	5262			229	347	645	236	20	550	47	225	5	66	2518	117					257
N07.02 Zandverstuiving	nee	nee	647			10	53	105	5		121		13			322	11					7
N11.01 Droog schraalland	nee	nee	620		40	46	16	33	33	41	35	4	66	23	92	138	7	21	4			13
N16.03 Droog bos met productie	nee	nee	25369	99	74	3166	1390	2103	1906	83	3069	800	1041	271	669	6848	1445	11	53	40		2301

Bodemvochtdroogte

De droogte zoals die door planten wordt ervaren doordat ze onvoldoende vocht hebben voor potentiële transpiratie, is alleen geanalyseerd voor natuurtypen die altijd of soms onafhankelijk zijn van freatisch grondwater. De anomalie in bodemvochtdroogte van 2018 en 2019 is weergegeven in respectievelijk Tabel 16 en Tabel 17. Bodemdroogte is hier gedefinieerd als de verhouding tussen werkelijke en potentiële transpiratie (T_a/T_p), de anomalie als het absolute verschil in deze verhouding met de voorgaande drie decennia: $T_a/T_p(2018 \text{ of } 2019) - T_a/T_p(1988-2017)$. Hoe roder de kleur, des te meer de transpiratiereductie T_a/T_p in het droge jaar in absolute zin afweek van de gemiddelde transpiratiereductie in de voorgaande 30 jaar. Voorbeeld: in 2018 was de transpiratiereductie van natuurtype N12.02 gemiddeld 12% groter dan in de voorgaande 30 jaar.

Vergelijking (Tabel 18) van beide tabellen toont aan dat 2018 over het algemeen een stuk droger was dan 2019. In 2019 sloeg de droogte vooral toe in het oosten des lands, wat verklaart dat in de oostelijk gelegen hydrotypen de droogte juist groter was (*KEP Keileemprofiel* en *KPP Keileem-Peeloo profiel*) of vrijwel hetzelfde (*SIB Singraven-beekdalen*, *PEP Peeloo profiel*) als in 2018.

Tabel 16. Bodemdroogte 2018 (%), uitgedrukt als absoluut verschil in transpiratiereductie ten opzichte van een gemiddeld jaar.

Ta/Tp(2018)-Ta/Tp(1988-2017)	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	-12	-11	-15	-11	-10	-11	-9	-21	-14	-20	-16	-9	-7	-20	-14	-12	-9	-5	-9	-14
N12.03 Glanshaverhooiland	-16	-14	-17	-16				-17	-12		-7		-10			-17	-12			
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	-24	-23	-22	-28	-24	-22	-22	-20	-24	-27	-24	-26	-21	-26	-24	-19				-26
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	-21	-15	-23	-21	-21	-20	-18	-23	-19	-24	-23	-9	-15	-25	-22	-10	-10	-9		-21
N17.03 Park- en stinzenbos	-18	-14	-10	-18	-18	-17	-8		-24	-19			-15	-26	-26	-10	-7			-15
N07.01 Droge heide	-22			-25	-22	-20	-21	-29	-24	-30	-25	-24	-20	-22	-25					-23
N07.02 Zandverstuiving	-22			-24	-22	-21	-17		-26		-28			-21	-21					-28
N11.01 Droog schraalland	-20		-21	-13	-22	-20	-18	-23	-23	-16	-22	-25	-17	-20	-23	-17	-22			-26
N16.03 Droog bos met productie	-23	-16	-21	-22	-22	-21	-22	-25	-23	-23	-21	-10	-18	-26	-24	-11	-8	-11		-24

Tabel 17. Bodemdroogte 2019 (%), uitgedrukt als absoluut verschil in transpiratiereductie ten opzichte van een gemiddeld jaar.

Ta/Tp(2019)-Ta/Tp(1988-2017)	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	-7	-3	-9	-7	-3	-12	-9	-10	-10	-16	-15	-5	-4	-14	-6	-3	-2	-2	-4	-11
N12.03 Glanshaverhooiland	-7	-1	-7	-10				-9	-9		-6		-6			-6	-3			
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	-15	-4	-9	-18	-9	-19	-19	-10	-17	-18	-18	-19	-13	-13	-9	-1				-19
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	-17	-7	-19	-16	-12	-21	-18	-11	-16	-18	-22	-6	-11	-17	-14	-4	-7	-6		-19
N17.03 Park- en stinzenbos	-11	-8	-5	-11	-9	-16	-6		-16	-13			-9	-19	-9	-1	-1			-19
N07.01 Droge heide	-17			-22	-9	-22	-24	-14	-24	-27	-24	-19	-18	-13	-17					-20
N07.02 Zandverstuiving	-16			-28	-8	-30	-15		-24		-26			-8	-17					-21
N11.01 Droog schraalland	-16		-15	-11	-10	-23	-21	-11	-20	-14	-26	-26	-16	-11	-9	-10	-6			-20
N16.03 Droog bos met productie	-18	-9	-14	-18	-14	-20	-22	-8	-20	-18	-22	-8	-14	-18	-14	-3	-2	-10		-18

Tabel 18. Verschil in bodemdroogte tussen 2019 en 2018 (%). Het jaar 2019 was natter qua bodemdroogte, behalve in KEP en KPP en in sommige natuurtypen binnen een hydrotype.

	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	4.2	8	6	4	7	-1	0	11	4	4	1	4	3	6	8	9	7	3	5	3
N12.03 Glanshaverhooiland	9.6	13	10	6				8	3		1	4				11	9			
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	9.0	19	13	10	15	3	3	10	7	9	6	7	8	13	15	18				7
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	4.6	8	4	5	9	-1	0	12	3	6	1	3	4	8	8	6	3	3		2
N17.03 Park- en stinzenbos	7.1	6	5	7	9	1	2		8	6			6	7	17	9	6			-4
N07.01 Droge heide	5.4			3	13	-2	-3	15	0	3	1	5	2	9	8					3
N07.02 Zandverstuiving	6.7			-4	14	-9	2		2		2			13	4					7
N11.01 Droog schraalland	3.9		6	2	12	-3	-3	12	3	2	-4	-1	1	9	14	7	16			6
N16.03 Droog bos met productie	5.0	7	7	4	8	1	0	17	3	5	-1	2	4	8	10	8	6	1		6

Grondwaterdroogte

Meteorologische droogte leidt uiteindelijk tot het dieper wegzakken van de grondwaterstand, met name in de zomer. Voor het beoordelen van de grondwaterdroogte is de anomalie van de laagste grondwaterstand in 2018 en in 2019 berekend: de afwijking van de laagste grondwaterstand in beide jaren (berekend als LG₃: het gemiddelde van de drie laagste dagwaarden) met de gemiddeld laagste stand in de afgelopen 30 jaar, de GLG. Het resultaat voor 2018 en 2019 is opgenomen in respectievelijk Tabel 19 en Tabel 20, terwijl Tabel 21 het verschil in de anomalie tussen beide jaren laat zien. Alleen typen die altijd of in sommige gevallen afhankelijk zijn van een hoge grondwaterstand, zijn in de tabellen opgenomen.

Voor de grondwaterdroogte geldt dat die in veel mindere mate in de tijd verbonden is met de meteorologische droogte (ook veel rode cellen in Tabel 10): de grondwaterdroogte ijlt na op de bodemdroogte. De najiling is vooral groot in traag reagerende hydrotypen, zoals LÖP *Löss profiel*, STW *Stuwwallen*, NGP *Nuenengroep profiel* en DPZ *Dekzand profiel Zuid*. Vooral in natuurtype N15.02 *Dennen-, eiken- en beukenbos* zakte de grondwaterstand in 2019 nog verder weg dan in 2018. In hydrotypen met een beheerst peil daarentegen (zoals BKG *Betuwe komgronden*, BSG *Betuwe stoomruggronden*, DPN *Dekzand profiel Noord*) was de laagste grondwaterstand enigszins hersteld.

Tabel 19. Grondwaterdroogte 2018 (cm), uitgedrukt als verschil in de LG3 van 2018 en de GLG.

LG3(2018)-GLG	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	-20	-15	-24	-31	-20	-24	-25		-16	-23	-35	-17	-17	-34	-19	-15	-19	-19	-18	-18
N06.02 Trilveen	-17				-18												-19	-17		-9
N06.05 Zwakgebufferd ven	-18						-23	-32	-18	-27	-14	-17	-10			-16				-17
N10.01 Nat schraalland	-20	-8		-33	-22	-19	-17		-19	-37	-17		-15	-28	-30			-18	-14	-22
N10.02 Vochtig hooiland	-21	-15	-21	-30	-20	-18	-20		-22	-40	-18	-14	-18	-27	-20	-16	-24	-19	-12	-19
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	-28	-31	-29	-36	-24		-18	-50	-26	-35	-18		-25	-16	-32	-17	-20		-2	-20
N05.01 Moeras	-18	-22	-26	-27	-17	-22	-17		-15	-30	-13		-16	-21	-6	-21	-16	-22	-13	-7
N05.02 Gemaaid rietland	-16							-12					-10	-10		-41	-14	-20	-16	-8
N06.01 Veenmosrietland en moerasheide	-18			-11									-10					-19	-18	
N06.03 Hoogveen	-23			-19		-26	-24		-29	-32	-13	-20								-18
N06.04 Vochtige heide	-27			-36	-33	-29	-25		-27	-34	-31	-18	-23	-26	-25			-16		-21
N06.06 Zuur ven of hoogveenven	-25			-41	-47	-28	-27		-21	-27	-15	-19	-17	-50	-22					-14
N13.01 Vochtig weidevogelgrasland	-21	-24	-17				-23	-17		-26			-23		-33	-5	-20	-20		
N14.02 Hoog- en laagveenbos	-21	-15	-19	-32	-22	-22	-20		-25	-31	-18	-11	-23	-22	-33	-9	-21	-15		-26
N14.03 Haagbeuken- en essenbos	-25	-22	-26	-36	-23	-19	-29	-15	-31	-29	-23	-21	-35	-13	-42	-19	-21	-17	-12	-24
N05.02 Gemaaid rietland	-16							-12					-10	-10		-41	-14	-20	-16	-8
N16.04 Vochtig bos met productie	-25	-22	-28	-36	-22	-22	-22	-48	-25	-31	-18		-20	-23	-24	-19	-24	-25	-13	-20
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	-24	-20	-25	-29	-22	-23	-23	-45	-24	-34	-52	-21	-20	-19	-26	-17	-21	-15	-23	-22
N12.03 Glanshaverhooiland	-28	-18	-31	-24				-115	-16	-14	-12							-20	-21	
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	-30	-31	-31	-35	-20	-27	-27	-88	-22	-46	-14	-25	-24	-22	-29	-24				-19
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	-29	-25	-18	-33	-27	-27	-26	-83	-21	-36	-18	-21	-26	-34	-15	-11	-19	-15		-22
N17.03 Park- en stinzenbos	-22	-26	-27	-29	-20	-20	-20		-14	-26			-18	-24	-15	-21	-21			-10

Tabel 20. Grondwaterdroogte 2019 (cm), uitgedrukt als verschil in de LG3 van 2019 en de GLG.

LG3(2019)-GLG	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ	
N03.01 Beek en bron	-13	-7	-15	-24	-13	-15	-18		-15	-19	-35	-9	-12	-41	-10	-5	-4	-13		-16	
N06.02 Trilveen	-11				-13													-14	-11		-7
N06.05 Zwakgebufferd ven	-17						-17	-20	-17	-20	-24	-6	-3			-21				-23	
N10.01 Nat schraalland	-17	-5		-28	-16	-20	-19		-15	-35	-27		-12	-35	-13			-8	-10	-18	
N10.02 Vochtig hooiland	-17	-7	-13	-23	-13	-18	-19		-19	-42	-26	-9	-15	-31	-13	-5	-14	-16	-12	-18	
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	-20	-13	-6	-27	-15		-16	-58	-24	-33	-27		-22	-17	-14	-4	-1			-18	
N05.01 Moeras	-12	-15	-13	-19	-8	-11	-12		-12	-26	-16		-8	-15	-4	-19	-5	-15	-8	-4	
N05.02 Gemaaid rietland	-11							-8					-3	-10		-23	-2	-13	-12	-2	
N06.01 Veenmosrietland en moerasheide	-13			-7									-11					-12	-13		
N06.03 Hoogveen	-16			-8		-19	-17		-36	-28	-16	-18								-10	
N06.04 Vochtige heide	-22			-27	-34	-22	-20		-25	-27	-32	-17	-17	-24	-18			-19		-16	
N06.06 Zuur ven of hoogveenven	-21			-32	-54	-20	-21		-21	-22	-21	5	-13	-64	-20					-10	
N13.01 Vochtig weidevogelgrasland	-15	-14	-11				-23	-12		-20			-17		-24	-1	-14	-15			
N14.02 Hoog- en laagveenbos	-18	-8	-24	-24	-13	-17	-17		-26	-30	-29	-11	-19	-31	-15	1	-9	-11		-32	
N14.03 Haagbeuken- en essenbos	-19	-11	-16	-26	-14	-16	-22	-22	-29	-31	-26	-13	-33	-13	-18	-6	-4	-3	-6	-29	
N05.02 Gemaaid rietland	-11							-8					-3	-10		-23	-2	-13	-12	-2	
N16.04 Vochtig bos met productie	-18	-9	-13	-27	-17	-15	-8	-37	-21	-32	-20		-16	-25	-22	-4	-7	-17	-8	-17	
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	-20	-9	-8	-22	-16	-19	-21	-54	-23	-33	-59	-12	-17	-30	-18	-4	-12	-10	-21	-23	
N12.03 Glanshaverhooiland	-12	-9	-11	-17				-123	-23		-17	-14						-3	-13		
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	-29	-13	-18	-34	-21	-19	-20	-100	-26	-47	-23	-14	-19	-28	-22	-12				-26	
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	-31	-14	-18	-26	-31	-23	-21	-91	-23	-34	-26	-11	-24	-43	-20	-2	-12	-11		-24	
N17.03 Park- en stinzenbos	-19	-15	-11	-20	-18	-13	-10		-16	-19			-13	-34	-17	-7	-8			-13	

Tabel 21. Verschil in grondwaterdroogte tussen 2019 en 2018. De laagste standen waren in 2019 minder diep dan in 2018, behalve in trage systemen als LÖP, NGP, ONP, OPP en STW en in sommige natuurtypen binnen een hydrotype.

	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ	
N03.01 Beek en bron	6.4	8	9	7	7	9	7		1	4	0	8	5	-7	9	10	11	6		2	
N06.02 Trilveen	5.5				5													5	6		2
N06.05 Zwakgebufferd ven	1.1					6	12		1	7	-10	11	7		-5					-6	
N10.01 Nat schraalland	3.2	3		5	6	-1	-2		4	2	-10		3	-7	17			10	4	4	
N10.02 Vochtig hooiland	4.1	8	8	7	7	0	1		3	-2	-8	5	3	-4	7	11	10	3	0	1	
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	7.9	18	23	9	9		2	-8	2	2	-9		3	-1	18	13	19			4	
N05.01 Moeras	6.4	7	13	8	9	11	5		3	4	-3		8	6	2	2	11	7	5	3	
N05.02 Gemaaid rietland	4.8							4					7	0		18	12	7	4	6	
N06.01 Veenmosrietland en moerasheide	5.1			4									-1					7	5		
N06.03 Hoogveen	6.8			11		7	7		-7	4	-3	2								8	
N06.04 Vochtige heide	4.8			9	-1	7	5		2	7	-1	1	6	2	7			-3		5	
N06.06 Zuur ven of hoogveenven	4.5			9	-7	8	6		0	5	-6	24	4	-14	2					4	
N13.01 Vochtig weidevogelgrasland	5.9	10	6			0	5		6				6		9	4	6	5			
N14.02 Hoog- en laagveenbos	2.5	7	-5	8	9	5	3		-1	1	-11	0	4	-9	18	10	12	4		-6	
N14.03 Haagbeuken- en essenbos	5.6	11	10	10	9	3	7		-7	2	-2	-3	8	2	0	24	13	17	14	6	
N05.02 Gemaaid rietland	4.8							4					7	0		18	12	7	4	6	
N16.04 Vochtig bos met productie	6.8	13	15	9	5	7	14	11	4	-1	-2		4	-2	2	15	17	8	5	3	
N12.02 Kruiden- en faunarijck grasland	4.5	11	17	7	6	4	2	-9	1	1	-7	9	3	-11	8	13	9	5	2	-1	
N12.03 Glanshaverhooiland	16.3	9	20	7				-8	-7		-3	-2				17	8				
N12.05 Kruiden- en faunarijck akker	1.1	18	13	1	-1	8	7	-12	-4	-1	-9	11	5	-6	7	12				-7	
N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	-2.2	11	0	7	-4	4	5	-8	-2	2	-8	10	2	-9	-5	9	7	4		-2	
N17.03 Park- en stinzenbos	3.7	11	16	9	2	7	10		-2	7			5	-10	-2	14	13			-3	

Zomerkwel-droogte

Voor natuurtypen die afhankelijk zijn van de aanvoer van baserijk kwelwater, is de anomalie in de zomerkwel berekend. Op natuurtype *No3.01 Beek en bron na*, was in 2018 de kwelintensiteit doorgaans hoger dan gemiddeld (Tabel 22), maar in 2019 juist lager (Tabel 23, Tabel 24). Blijkbaar was de stijghoogte onder het freatische pakket pas in 2019 zover uitgezakt, dat dit tot uitdrukking kwam in een lagere kwelintensiteit naar de geselecteerde natuurtypen: diepere stijghoogten ijlen langer na dan freatische grondwaterstanden.

Tabel 22. Zomerkweldroogte 2018 (mm/d), uitgedrukt als verschil in kwelintensiteit ten opzichte van een gemiddeld jaar. In veel kwelafhankelijke natuurtypen steeg de intensiteit van de kwel naar het topsysteem, waarschijnlijk ten gevolge van de daling van de grondwaterstand in het kwelgebied. Dit geldt niet voor alle locaties, vooral niet voor *No3.01*. NB: of de vergrote kwelintensiteit de wortelzone heeft bereikt is vervolgens de vraag.

Zomerkwel(2018)-Zomerkwel(1988-2017)	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	-0.07	-0.14	-0.16	-0.17	-0.17	0.05	0.02		-0.01	-0.04	-0.06	-0.28	-0.10	0.04	0.05	-0.02	-0.03	0.19		-0.03
N06.02 Trilveen	0.03				0.07												0.15	0.01		-0.02
N06.05 Zwakgebufferd ven	0.07					0.08	0.06		0.05	0.13	0.06	0.18	0.06		0.13					0.02
N10.01 Nat schraalland	0.11	0.07		0.23	0.16	0.11	0.25		0.18	0.03	0.04		0.06	0.03	-0.07			-0.01	0.06	0.26
N10.02 Vochtig hooiland	0.14	0.15	0.00	0.16	0.13	0.34	0.15		0.22	0.05	0.07	0.05	0.19	-0.02	0.08	0.01	0.12	0.06	0.00	0.05
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	0.01	-0.11	-0.18	-0.01	-0.17		0.15	0.02	0.16	0.05	0.08		0.06	-0.08	0.17	-0.06	0.03		0.00	0.12

Tabel 23. Zomerkweldroogte 2019 (mm/d), uitgedrukt als verschil in kwelintensiteit ten opzichte van een gemiddeld jaar. In veel kwelafhankelijke natuurtypen daalde de kwel, waarschijnlijk ten gevolge van de daling van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder het freatische pakket. Dit geldt niet voor alle locaties, vooral niet voor *No3.01*.

Zomerkwel(2019)-Zomerkwel(1988-2017)	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	-0.16	-0.18	-0.23	-0.23	-0.18	0.01	-0.06		-0.13	-0.15	-0.20	-0.56	-0.25	0.00	-0.09	0.01	-0.01	0.12		-0.17
N06.02 Trilveen	0.03				0.06												0.11	0.02		-0.03
N06.05 Zwakgebufferd ven	-0.10					-0.05	0.06		-0.15	0.04	-0.29	0.11	0.02		-0.04					-0.07
N10.01 Nat schraalland	-0.10	-0.18		0.02	-0.05	-0.12	-0.18		-0.07	-0.01	-0.26		-0.27	-0.06	-0.08			-0.02	0.04	-0.02
N10.02 Vochtig hooiland	-0.01	-0.02	-0.12	0.05	-0.11	0.08	-0.02		-0.03	0.00	-0.27	-0.10	0.01	-0.15	-0.13	0.01	0.06	0.04	0.00	-0.21
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	-0.11	-0.14	-0.18	-0.08	-0.23		-0.19	-0.04	-0.06	-0.02	-0.26		-0.17	-0.26	-0.04	-0.05	-0.04		0.00	-0.14

Tabel 24. Verschil zomerkweldroogte tussen 2018 en 2019 (mm/d). De gevolgen van de droogte werken nu pas echt door op de kwel uit het diepere watervoerende pakket: het systeem ijlt na.

	Gem	BKG	BSG	DPN	EKP	KEP	KPP	LÖP	NGP	ONP	OPP	PEP	SIB	STW	TKP	WDP	WDH	WHP	WAT	DPZ
N03.01 Beek en bron	-0.08	-0.04	-0.07	-0.06	-0.01	-0.04	-0.08		-0.12	-0.11	-0.14	-0.27	-0.15	-0.04	-0.14	0.04	0.02	-0.08		-0.13
N06.02 Trilveen	0.01				0.00												-0.03	0.02		-0.01
N06.05 Zwakgebufferd ven	-0.17					-0.13	0.00		-0.20	-0.09	-0.35	-0.07	-0.04		-0.17					-0.09
N10.01 Nat schraalland	-0.20	-0.25		-0.21	-0.21	-0.23	-0.43		-0.25	-0.04	-0.31		-0.32	-0.09	-0.02			-0.02	-0.02	-0.29
N10.02 Vochtig hooiland	-0.15	-0.17	-0.12	-0.11	-0.24	-0.26	-0.17		-0.25	-0.05	-0.34	-0.15	-0.19	-0.14	-0.20	0.00	-0.06	-0.02	0.00	-0.26
N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	-0.13	-0.03	0.00	-0.07	-0.06		-0.33	-0.06	-0.22	-0.07	-0.35		-0.24	-0.18	-0.21	0.01	-0.07		0.00	-0.26

V Responstijd

Algemeen

- De responstijd wordt wel gedefinieerd als de tijd die het duurt voordat de invloed van een verandering van 'een invloedsfactor' op de grondwaterstand is uitgewerkt (Bagelaar, 2007). Hier wordt wel onderscheid gemaakt in invloedsfactoren: de responstijd op een neerslaggebeurtenis kan/zal anders zijn dan die van een grondwaterwinning. Ofwel: voor verschillende invloedsfactoren geldt een andere responstijd.
- Responstijd, reservoirconstante, reservoircoëfficiënt (Kraijenhoff van de Leur, 1958) en reactiecoëfficiënt worden vaak door elkaar gebruikt. De reservoirconstante, ook wel de reactiecoëfficiënt, geldt als een eigenschap van een aquifer. De reservoircoëfficiënt hangt af van de effectieve porositeit, doorlatendheid / transmissiviteit en de gemiddelde afstand tussen waterlopen en geldt voor horizontale stroming. Voor 'natuurlijk' gedraineerde aquifers wordt de reservoircoëfficiënt ook wel geïnterpreteerd als de responstijd. Waarden van de responstijd van 1 tot 20 of 30 dagen gelden in het algemeen voor kunstmatig gedraineerde percelen en waarden van 300 tot 2.000 dagen voor de afvoer uit aquifers (Peters, 2003 *vide* Vereniging Voor Landinrichting, 1992).

Gebruik responstijd binnen dit onderzoek

Binnen het droogteonderzoek worden twee verschillende responstijden gebruikt:

- 1) Respons van het freatisch systeem op het afvoerproces (afgeleid uit LHM-simulaties): hoe snel zakt de grondwaterstand uit vanuit een periode met een hoge grondwaterstand, zonder grondwateraanvulling? De onverzadigde zone is in deze benadering 'uitgeschakeld'. Het resultaat laat zien wat het effect is van ontwatering op de snelheid van het uitzakken van de grondwaterstand en heeft dus betrekking op het afvoerproces.

Deze responstijd geeft informatie over de doorwerking van een droogte in het weer op een droogte in het grondwater. Peters (2003) concludeerde dat in het algemeen een maximum in de grondwaterdroogte voorkomt bij een responstijd van ongeveer 200 dagen.

De responstijd voor het afvoerproces is niet 1:1 te vertalen naar een responstijd voor herstel. Het geeft in beginsel aan hoe snel het systeem leegloopt. Het weer laten 'vollopen' van het systeem gaat trager (en is afhankelijk van het neerslagoverschot). Daarmee moeten we voorzichtig zijn om de responstijd als 'exacte' tijd te gebruiken om aan te geven hoe lang het duurt voordat een maatregel, zoals peilverhoging, doorwerkt in het grondwatersysteem. Hiervoor is tevens de informatie uit de tijdreeksanalyse relevant (Ad 2): hoe lang duurt het voordat een recharge-event zichtbaar is in de grondwaterstand.

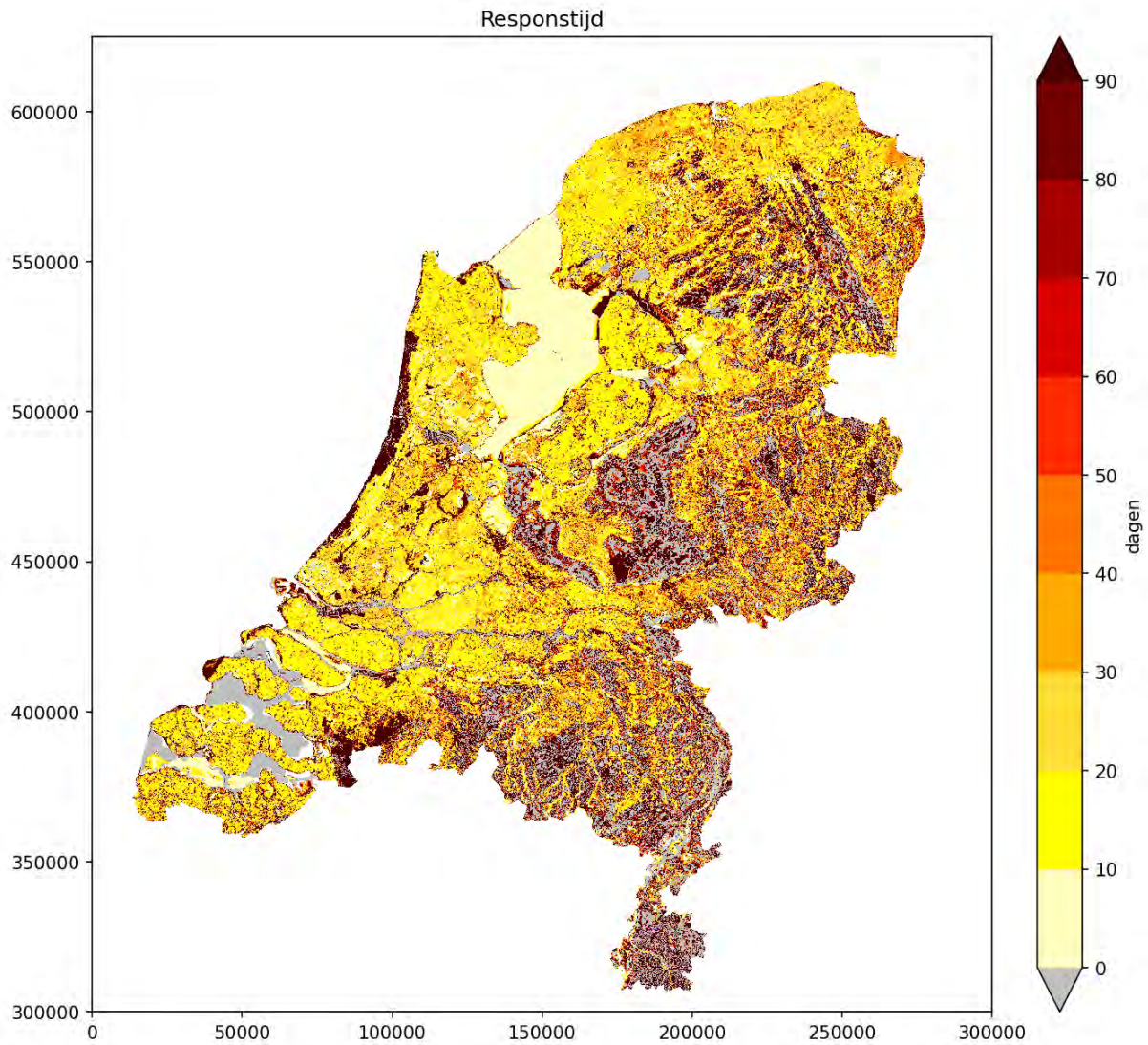
Desalniettemin zijn het proces van 'leeglopen' en 'herstel' wel gecorreleerd: een systeem dat snel leegloopt, zal ook weer sneller vollopen bij een neerslagoverschot, mits het oppervlaktewaterbeheer daar voldoende op is afgestemd. Voor een traag systeem zal dit langer duren.

- 2) Reactie van de grondwaterstand op een recharge-event (afgeleid uit tijdreeksanalyse): geeft inzicht in de tijd die het duurt dat een recharge event (bijvoorbeeld neerslag, maar ook 'actieve' infiltratie) effect laat zien in de grondwaterstand. Deze hangt met name samen met de dikte van de onverzadigde zone.

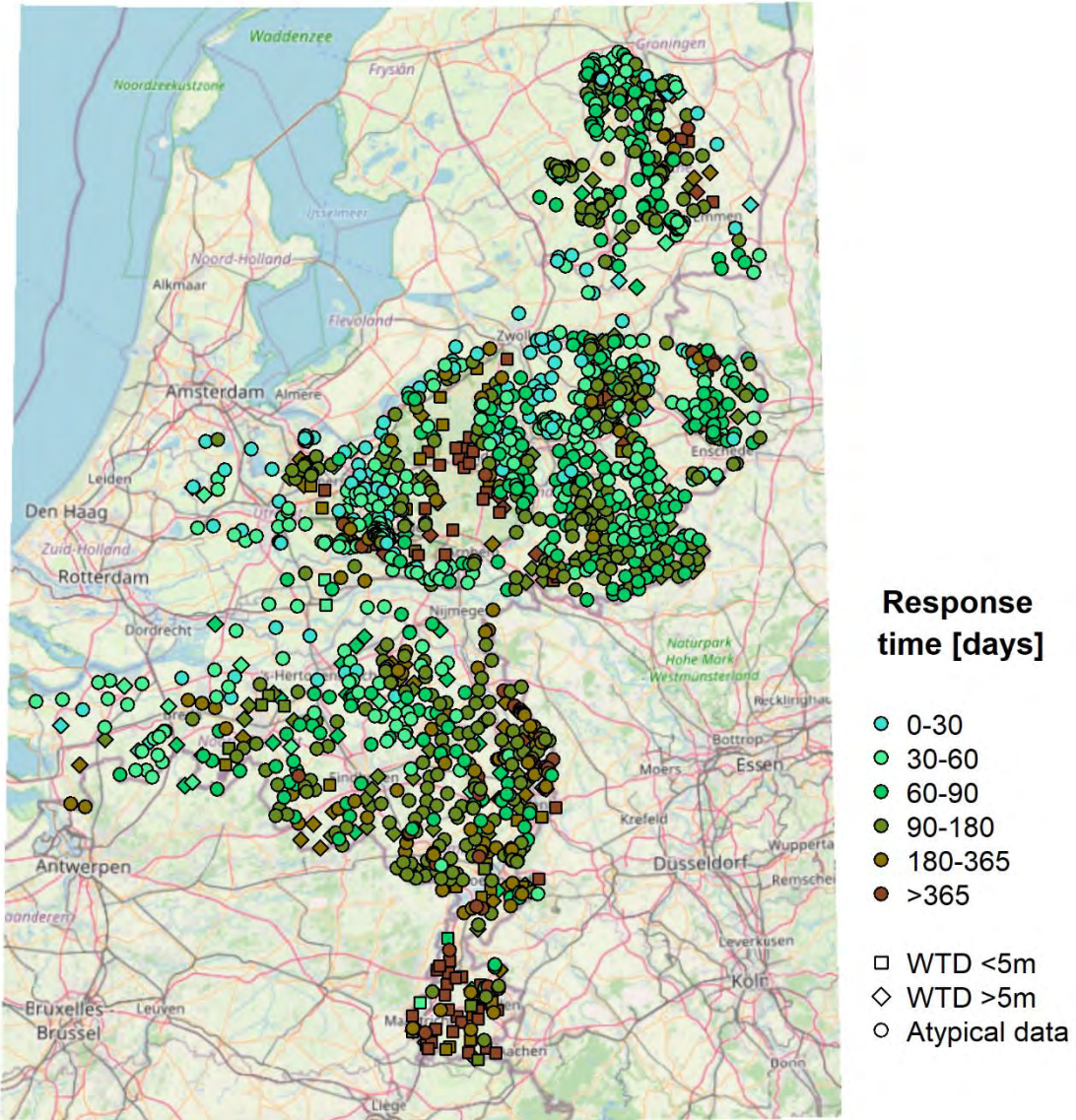
Gebruik responstijd in de droogtestudie:

- Definitie 1 geeft inzicht in hoe snel een droogte in het weer (aanvulling = 0, ook uit het bodemvocht) doorwerkt in het grondwater (i.e. reactie op droogte). Daarnaast geeft het een indicatie van het herstel van grondwaterstanden als bijvoorbeeld een winning stopt (maatregelen in het grondwater), maar de reactietijd zal een factor groter zijn dan de berekende responstijd. De responstijd is dan ook indicatief; het zijn eerder klassen van trage tot snelle systemen.

- Definitie 2 geeft inzicht in het effect van een maatregel 'aan maaiveld' die de grondwateraanvulling beïnvloedt en hoe snel een maatregel reactie laat zien in het grondwater.
- De term responstijd geeft richting aan hoe snel een maatregel kan doorwerken, maar het is niet te koppelen aan een exact aantal dagen cq. hoe lang je kunt wachten om een maatregel te nemen.
- In plaats van het hanteren van de term responstijd, kan daarom wellicht ook de term respons-coëfficiënt worden gebruikt.



Figuur 104. Responstijden berekend met het LHM.



Figuur 105. Reactie van de grondwaterstand op een recharge-event, afgeleid uit tijdreeksanalyse.

VI LHM-rekenmodel

Algemeen

Met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM, versie 3.4) zijn verkennende berekeningen uitgevoerd 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, gewasverdamping en oppervlaktewaterafvoer voor een droog jaar als 2018 of juist voor een gemiddeld jaar als 2016.

In Fase 1 waren de gesimuleerde ingrepen in het watersysteem gericht op het korte termijn handelingsperspectief of wel mogelijkheden om op korte termijn het watersysteem te beïnvloeden (zie Fase 1 rapport, Van den Eertwegh et al., 2019). De analyses in Fase 1 maakte duidelijk dat de mogelijkheden om het watersysteem op korte termijn bij te sturen zeer beperkt zijn en dat structurele maatregelen nodig zijn om het watersysteem droogtebestendig te maken. Daarom lag het accent in Fase 2 en 3 (dit rapport) op de verkenning van meer structureel, langere termijn effecten. Daartoe zijn verschillende structurele oplossingsrichtingen doorgerekend voor een periode van 6,5 jaar. De ingrepen worden in het LHM modelmatig doorgevoerd per 1 januari 2013 en worden onderzocht voor de daarop volgende jaren tot en met oktober 2019, met de focus op het extreem droge jaar 2018. Het zijn dus middellange termijn effecten die voor deze verkenning worden gepresenteerd terwijl de effecten voor bepaalde ingrepen op lange termijn nog groter kunnen zijn.

De ingrepen 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 handvatten voor de waterbeheerders voor verdere verkenning van mogelijke ingrepen in het watersysteem. Het is denkbaar dat bepaalde extreme ingrepen voor bepaalde deelgebieden wel in beeld komen als mogelijke maatregel. Het is bijvoorbeeld onrealistisch om de drinkwaterwinningen voor het gehele zandgebied te stoppen maar het verplaatsten of stoppen van winningen kan voor een bepaalde regio wel realistisch zijn.

Waarom LHM?

Het LHM is een grootschalig, landsdekkend model en heeft daarom een grovere resolutie (modelcellen van 250x250 m²) dan de meeste regionale modellen (meestal modelcellen van 25x25 m²). LHM wordt veelvuldig ingezet voor verkennende scenario-berekeningen op nationaal niveau voor het Deltaprogramma Zoetwater. Binnen deze droogtestudie voor het gehele zandgebied is er voor gekozen om de verkennende vlakdekkende berekeningen met LHM uit te voeren. Belangrijkste redenen zijn (1) eenduidige verkenning van oplossingsrichtingen voor het gehele studiegebied, (2) modelresultaten zijn voor het gehele gebied beschikbaar en niet slechts voor een deel van het gebied. Het is rekentechnisch niet mogelijk om het gehele zandgebied met de regionale modellen (zoals Ibrahim, Azure) door te rekenen (te lange rekentijden, en verschillende modellen met verschillende concepten) (3) Watersysteemwerking en effecten van ingrepen kunnen tussen gebieden kunnen met elkaar worden vergeleken, (4) beregeningsbehoefte wordt automatisch berekend op basis van meteo- en vochtcondities (dat is niet in alle regionale modellen het geval), (5) LHM heeft een oppervlaktewater-module (MOZART) die een waterbalans van het oppervlaktewater op LSW-niveau bijhoudt (local surface water = substroomgebied). Het LHM houdt op deze manier bij of er voldoende water is om een bepaald oppervlaktewaterpeil te handhaven en kan er alleen de hoeveelheid water vanuit de waterloop infiltreren die beschikbaar is. In de meeste regionale modellen worden deze oppervlaktewater processen niet meegenomen. (6) In het LHM zitten de belangrijkste processen van het watersysteem ingebouwd en de doorwerking van ingrepen op de verschillende aspecten van het watersystemen (stijghoogte, grondwaterstand, kwel, Ta/Tp, gebiedseigen afvoer) kan daarmee globaal goed in beeld worden gebracht.

Uiteraard heeft het grove schaalniveau van LHM nadelen. Berekende effecten kunnen op lokaal schaalniveau met de werkelijkheid verschillen en er is geen onderscheid in effecten op een schaalniveau kleiner dan 6,25 ha (het

oppervlak van een modelcel). Het ontwateringsproces (en relatie grondwater-oppervlaktewater) kan op dit grove schaalniveau minder goed worden gesimuleerd dan met de beschikbare regionale grondwatermodellen. Er komen vaak meerdere typen ontwatering (primair, secundair en tertiair) met verschillende ontwateringsdiepte in één modelcel voor. Deze ontwateringsmiddelen binnen één modelcel worden allen aangestuurd door één grondwaterstand. De kleinere slootjes met een hoger ontwateringsniveau (tertiair systeem) draineren vaak niet omdat de gemiddelde grondwaterstand onder het ontwateringsniveau staat. De grotere en diepere sloten en waterlopen nemen de ontwatering van het tertiair systeem in veel gevallen over. Hoewel het proces van droogvallen van kleinere slootjes met een hoger ontwateringsniveau (in een modelcel) door het model wordt gesimuleerd, wordt de toename van de drainagegeweerstand als gevolg van een grotere slootafstand niet meegenomen. Het droogvallen van sloten en het effect van ingrepen in de verschillende typen ontwatering wordt door de fijnere resolutie beter door de regionale modellen gesimuleerd.

Daarnaast is belangrijk te beseffen dat de modelinvoer de resultaten sturen en daar dient bij beoordeling van de resultaten rekening te houden. Uiteraard speelt de geohydrologische opbouw een belangrijke rol maar ook ontwatering en onttrekkingen. Zo stammen de onttrekkingsgegevens van de drinkwaterwinningen en het areaal aan potentieel beregende percelen uit 2010 (Massop et al., 2013). Wanneer in werkelijkheid meer of minder beregend wordt uit het grondwater heeft dit direct invloed op de berekende effecten. Op <http://www.nhi.nu/nl/> is uitgebreide informatie beschikbaar over de modelinvoer en concepten van het LHM, inclusief geohydrologische opbouw, ontwatering, onttrekkingen en berekeningbehoefte. Er dient te worden opgemerkt dat de geohydrologie van het Krijtlandschap in Zuid-Limburg, Brabantse Wal en De Peel meer complex is dan in de LHM-versie 3.4 wordt meegenomen waardoor aan de resultaten voor deze gebieden minder waarde wordt gehecht. Voor het Krijtlandschap zijn daarom aanvullende berekeningen uitgevoerd met het regionale Ibrahim-model (zie Bijlage VII).

Modelscenario's

Vijftien modelscenario's zijn gedefinieerd die globaal inzicht geven in de response van het watersysteem als gevolg van structurele richtinggevende maatregelen op lange termijn (Tabel 25). Het zijn ingrepen die modelmatig binnen het LHM relatief eenvoudig zijn door te voeren en worden voor het gehele studiegebied doorgevoerd (12 modelscenario's) en voor 500 m brede bufferzones rondom natte natuur (drie modelscenario's). De modelscenario's zijn extreem doorgevoerd (zoals bijvoorbeeld verhoging drainagebasis voor alle sloten) om de respons van het watersysteem goed en maximaal in beeld te brengen en geen dus per definitie geen realistisch beeld van uit te voeren maatregelen geven. De keuzes van de modelscenario's zijn o.a. gebaseerd op de input van projectgroep. De modelscenario's staan opgesomd in tabel 1 en worden hieronder kort beschreven. Eerst wordt wat uitgebreider ingegaan op het referentiemodel.

Ref-model: LHM situatie 2013-2019

Als referentie-model is het beschikbare huidige LHM-model versie 3.4 gebruikt. Er wordt op dagbasis gerekend voor de periode 1 januari 2013 tot 1 oktober 2019. 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 (Maas bij Monsin (B) en Rijn bij Spijk/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 2013-2019.

- 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 landbouw-meitellingen uit 2010 (Massop et al., 2013). De beregeningslocaties in het LHM en de verdeling tussen beregenen uit grond- en oppervlaktewater als bron stammen dus uit 2010.
- Indien een gewasspecieke pF-grenswaarde wordt overschreden (gerelateerd aan vochttekort), dan wordt beregening toegepast met een gewasspecifieke gift, duur en rotatieperiode (gemiddeld 20-25 mm over 7 tot 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. In het model wordt 20% meer grondwater voor beregening onttrokken dan de toegepaste beregeningsgift ervan uitgaande dat een deel verloren gaat via verdamping (beregeningverliezen).
- Het is duidelijk dat er sinds 2010 een ontwikkeling heeft plaatsgevonden in de hoeveelheid potentieel beregende percelen. Er zijn aanwijzingen dat met name in het oostelijk zandgebied, maar ook in het zuiden, de laatste 10 jaar de hoeveelheid beregening is toegenomen en dit zit dus niet in de LHM-versie die voor deze studie is gebruikt. De gebruikte LHM-versie laat zeer waarschijnlijk een onderschatting van de beregening en het beregende areaal zien.

Alle modelscenario's worden per 1 januari 2013 t/m 1 oktober 2019 doorgevoerd voor het gehele zandgebied (M1 t/m M9) en voor bufferzones rondom natte natuur ter grootte van 500 m (B1 t/m B3).

M1: Reductie van drinkwaterwinningen.

Dit modelscenario kent twee varianten: (M1) reductie van de drinkwaterwinningen met 50% en (M1x) reductie van 100%. Grondwateronttrekkingen hebben effect op de waterbalans van een gebied; er wordt immers grondwater onttrokken uit het grondwatersysteem. In het zandgebied wordt ongeveer 500 miljoen m³ per jaar onttrokken. Het reduceren van alle drinkwaterwinningen is onrealistisch maar het tijdelijk of permanent aanpassen van het onttrekkingsdebiet van bepaalde winningen, het verplaatsen van winningen, het compenseren van de effecten van onttrekkingen door extra infiltratie zijn allemaal mogelijkheden om het grond- en oppervlaktewatersysteem te beïnvloeden en daarmee effecten van droogte te verminderen. Uiteraard laten de modelresultaten alleen effecten zien waar op dit moment drinkwateronttrekkingen voorkomen en automatisch betekent dit dat effecten minder groot zijn als er minder wordt onttrokken (en vice versa).

M2: Reductie van beregenen uit grondwater.

Dit modelscenario kent twee varianten: (M2) reductie van de beregenen uit grondwater met 50% en (M2x) reductie van 100%. Net als de drinkwateronttrekkingen, heeft beregenen uit grondwater een direct effect op de waterbalans. Het grote verschil is dat beregening uit grondwater een tijdelijk karakter heeft maar juist wel in een periode dat er minder water beschikbaar is. Voor beregenen uit grondwater wordt er in een relatief korte periode veel grondwater onttrokken en dit verschilt sterk per jaar afhankelijk van de meteorologische situatie. Tijdelijke beregeningsverboden en beregeningsbeleid (waar is hoeveel en wanneer toegestaan) zijn mogelijkheden om effecten van droogte op het watersysteem te verminderen. Dit model-scenario wordt extreem doorgevoerd door alle beregening uit het grondwater stop te zetten voor de gehele gesimuleerde periode (2013-2019), of een reductie van 50%. Dit is geen realistische situatie maar brengt de ruimtelijke verschillen en effecten op het watersysteem wel duidelijk in beeld. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de gegevens van potentieel beregende percelen in het LHM stammen uit 2010 en veranderingen sindsdien zitten niet in het model.

M3 Peilverhoging + 30 cm primair en secundair ontwatering (veelal leggerwaterlopen).

Met dit scenario worden het peil van de primair en secundair ontwateringsysteem 30 cm opgezet. Dit kan in praktijk worden gedaan door stuwpeilen te verhogen, drempels aan te leggen, hermeandering of minder maaien. Modelmatig wordt dit gedaan voor de gehele modelperiode (geen onderscheid in zomer en winterpeil). Echter, handhaving van dit opgezette peil is niet altijd mogelijk en is afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid water.

Het LHM berekent deze beschikbare hoeveelheid water en vertaalt dit door naar het peil in de waterloop. Zoals hierboven beschreven is door het grove schaalniveau van LHM niet helemaal goed mogelijk om onderscheid te maken in de bijdrage van de verschillende typen ontwatering. Er komen vaak meerdere type ontwateringsmiddelen met verschillende ontwateringsniveau's in een modelcel voor en de diepste ontwatering heeft daardoor een onevenredig aandeel in de ontwatering. Het beoogde M3-scenarios geeft daarom waarschijnlijk een overschatting van het effect. Dit scenario wordt daarom verder niet wordt in deze rapportage besproken.

Tabel 25. Beschrijving van de verschillende richtinggevend maatregelen die met het LHM zijn doorgerekend.

Symbol	Beschrijving		Opmerking
M1	Reductie van drinkwaterwinningen – 50%	Minder eruit	
M1x	Reductie van drinkwaterwinningen – 100%	Minder eruit	
M2	Reductie van beregenen uit grondwater - 50%	Minder eruit	
M2x	Reductie van beregenen uit grondwater - 100%	Minder eruit	
M3	Peilverhoging + 30 cm primair en secundair ontwatering (veelal leggerwaterlopen)	Vasthouden	Deze scenario's worden verder niet besproken omdat door het schaalniveau van het model de bijdrage van de afzonderlijke ontwateringstypen niet goed te maken is.
M4	Verhoging + 30 cm ontwateringsbasis tertiair systeem (veelal het haarvatensysteem)	Vasthouden	
M5	Combinatie van M3 + M4	Vasthouden	Dit scenario is optimistischer dan M5min wat betreft de beschikbaarheid van water in de zomer voor handhaving peil.
M5min	Combinatie van M3 + M4, minimale variant	Vasthouden	In vergelijking met M5 is minder water beschikbaar voor handhaving peil in de zomer en de effectiviteit daarmee iets minder groot.
M6	Ondergrondse zoetwaterberging, infiltratie van 100 mm gedurende het winter halfjaar voor gebieden met een GHG dieper dan 2,5 m-mv.	Meer erin	
M7	Omvorming van naaldbos naar heide.	Meer erin	
M8	Afkoppeling regenwater bebouwd gebied, bevorderen infiltratie, 100 mm/jaar.	Meer erin	
M9	Samengesteld scenario, combinatie van M1, M2, M5, M6, M7, M8.	Combinatie	
B1	Geen beregening uit grondwater (M2x) in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.	Minder eruit	<ul style="list-style-type: none"> • Overall is een bufferzone van 500 m rondom natte natuur toegepast. • De effectiviteit van een bufferzone verschilt per gebied afhankelijk van de geohydrologie. De effectieve grootte kan dus groter of kleiner zijn dan de toegepaste 500 m. • De grootte van bufferzones zou het best op basis van de spreidingslengte per type gebied kunnen worden afgeleid.
B2	Verhoging van peil en ontwateringsbasis met 30 cm van gehele ontwateringsstelsel (primair, secundair, tertiair) (M5) in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.	Vasthouden	
B3	Geen grondwateronttrekkingen voor drinkwater (M1x) in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.	Minder eruit	

M4 Verhoging + 30 cm ontwateringsbasis tertiair systeem (veelal het haarvatensysteem).

In dit scenario wordt het haarvatensysteem aangepakt door zoveel mogelijk grondwater, zo hoog mogelijk in het systeem vast te houden. Hiertoe wordt de ontwateringsbasis van het tertiaire ontwateringssysteem 30 cm verhoogd. Dit kan in de praktijk op verschillende manieren zoals het plaatsen van stuwtdjes of dammetjes in de sloten, duikers afsluiten of structurele slootbodemplhogingen. Ook dit scenario representeert niet de werkelijkheid omdat in de praktijk zeer waarschijnlijk nooit het gehele haarvatensysteem wordt aangepakt. Het studiegebied kent momenteel in de praktijk slechts een klein % van de kavelsloten dat wordt aangepakt, maar het brengt wel de gevoeligheid van zo'n maatregel in beeld. Echter, het is denkbaar dat er gebieden zijn waar deze ingreep wel in elke sloot wordt doorgevoerd.

Zoals hierboven besproken is het niet goed mogelijk om met het schaalniveau van LHM de bijdrage van het tertiair systeem goed te modelleren (in werkelijkheid is de bijdrage vermoedelijk groter). Dit scenario zal daarom zeer waarschijnlijk een onderschatting van het effect geven. Om die reden wordt dit scenario niet besproken in deze rapportage.

M5 Peilverhoging + 30 cm primair en secundair ontwatering en verhoging ontwateringsbasis tertiair systeem (= combinatie van M3 en M4).

Zoals bij M3 en M4 toegelicht is het onderscheid tussen de verschillende typen ontwatering door het schaalniveau in LHM minder goed te maken. Dit scenario M5 combineert M3 met M4 waarbij het gehele ontwateringsniveau 30 cm wordt verhoogd en waardoor er geen onderscheid gemaakt hoeft te worden tussen de verschillende typen ontwatering. Er wordt daarom verondersteld dat dit scenario daarmee redelijk de werkelijkheid benaderd en de resultaten van dit scenario worden dan ook besproken bij de oplossingsrichting 'vasthouden' door maatregelen in het ontwateringssysteem. Naast de m5-variant die aan de optimistische kant zit wat betreft peilhandhaving gedurende de zomer, is er ook een M5-min variant doorgerekend waarbij minder water beschikbaar is voor handhaving van oppervlaktewaterpeilen. De effecten van de M5-min variant zijn daarom iets minder groot dan de M5-variant en de waarheid ligt vermoedelijk ergens tussen in.

M6 Ondergrondse zoetwaterberging.

Met dit modelscenario wordt voor gebieden met een GHG dieper dan 2,5 m-mv extra infiltratie van 100 mm gedurende het winter halfjaar toegepast. Er wordt ervan uitgegaan dat in de winter extra water beschikbaar is om in de ondergrond te bergen. Dit kan water dat via de slootjes wordt afgevoerd zijn, maar ook rivier of kanaalwater of RWZI-effluent. Er moet voldoende ruimte zijn om extra water in de ondergrond te kunnen bergen en daarom is gekozen voor de grens van 2,5 m-mv. De hoeveelheid infiltratie is relatief gering en in werkelijkheid zou infiltratie van grotere hoeveelheden water mogelijk moeten zijn. Zeker voor gebieden met diepe grondwaterstanden zoals op de meeste stuwwallen en dekzandruggen.

M7 Omvorming van naaldbos naar heide.

Naaldbomen, met name donker naaldbos, verdampen meer dan loofbomen en heide. Met dit modelscenario wordt verkend wat de effecten zijn als overal waar naaldbos aanwezig is, dit wordt vervangen door heide.

M8 Afkoppeling regenwater bebouwd gebied, bevorderen infiltratie, 100 mm/jaar.

In bebouwd gebied gaat veelal het water dat op wegen en gebouwen valt, rechtsreeks het riool in. Met dit modelscenario wordt verkend wat de effecten zijn als we in bebouwd gebied gemiddeld 100 mm/jaar extra van dit water kunnen infiltreren.

M9 Samengesteld modelscenario, combinatie van M1, M2, M5, M6, M7, M8.

Met dit modelscenario worden verschillende ingrepen gecombineerd om in beeld te brengen hoeveel de grondwaterstand zou kunnen stijgen wanneer alle doorgerekende ingrepen met elkaar worden gecombineerd.

B1 Geen berekening uit grondwater in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.

Rondom alle natte natuurgebieden zijn bufferzones van ongeveer 500 m breed gedefinieerd waar binnen bepaalde type ingrepen worden uitgevoerd. De keuze van 500 m is arbitrair en in werkelijkheid zal de meest efficiënte bufferzone juist groter of kleiner zijn afhankelijk van de hydrogeologie en ontwatering. Met deze bufferzone modelscenario's wordt verkend hoeveel effect kan worden bereikt wanneer maatregelen niet overal maar alleen in de bufferzones (inclusief natte natuurgebied) worden uitgevoerd.

Voor dit bufferzone modelscenario B1 wordt in de bufferzones (inclusief natte natuurgebieden) berekening uit grondwater helemaal gestopt (M2x maar dan alleen in bufferzone).

B2 Verhoging van peil en ontwateringsbasis met 30 cm van gehele ontwateringsstelsel (primaire, secundaire, tertiaire) in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.

Voor dit bufferzone modelscenario B2 wordt in de bufferzones (inclusief natte natuurgebieden) het ontwateringsniveau van het primaire, secundaire en tertiaire stelsel 30 cm verhoogd (M5 maar dan alleen in bufferzone).

B3 Geen grondwateronttrekkingen voor drinkwater in bufferzone van 500 m rondom natte natuur.

Voor dit bufferzone modelscenario B3 worden in de bufferzones (inclusief natte natuurgebieden) alle drinkwaterwinningen gestopt (M1x maar dan alleen in bufferzone).

Model resultaten: effecten op verschillende aspecten van het watersysteem in beeld

Het belangrijkste doel van deze modelberekeningen is de response van het totale watersysteem op de verschillende structurele ingrepen voor het droogtejaar 2018 en 2019 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 modellen: 2,3,4,7)
- Kwel (flux tussen modellaag 1 en 2)
- Gebiedseigen afvoer (van grondwater naar oppervlaktewater, inclusief maaiveldafvoer) en infiltratie van oppervlaktewater (van oppervlaktewater naar grondwater)
- Transpiratie-reductie (Ta/Tp)

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 weerstand-biedende 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 modellen 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 modellen 2, 3, 4 en 7 geselecteerd omdat deze modellen 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 (o.a. 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 op een nationale schaal niet goed zichtbaar zijn, omdat kwelgebieden vaak klein 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 8.000 LSWs en ze komen redelijk overeen met de stroomgebiedgrenzen van de kleinere stroomgebieden. 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 (verandering van het areaal kwelgebied, in %). Dit is zowel op modelcelniveau als op LSW-niveau in beeld gebracht.

Gebiedseigen 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 die naar het grondwater infiltreert (Figuur 55). 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). Ook maaiveldafvoer (grondwater dat via maaiveld wordt afgevoerd) zit in deze gebiedseigen afvoer verwerkt.

De afwijking tussen van de werkelijke transpiratie (T_a) t.o.v. de potentiële transpiratie (T_p) is een goede maat om de droogtestress (vochtttekort) van gewassen uit te drukken. Deze wordt uitgedrukt in T_a/T_p .

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, HG₃
- Kwel: gemiddeld voor de zomermaanden juni, juli en augustus
- Gebiedseigen grondwaterafvoer: gemiddeld voor de zomermaanden juni-juli-augustus, en gemiddeld voor de winterperiode december, januari en februari
- T_a/T_p : bepaald voor het gehele jaar.

1 april geeft het begin van het groeiseizoen aan en toen was de droogte nog niet gestart. De LG₃ is vergelijkbaar met de GLG alleen dan voor een specifiek jaar. Het zijn de drie laagste grondwaterstanden van een jaar bepaald op de 14e en 28e van iedere maand. Idem voor HG₃ en GHG.

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, laten modelscenario, parameter en periode zien. 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. De figuren en ascii's zijn te bekijken en te downloaden via het droogteportaal.nl.

Ook zijn modelresultaten (referentie en effecten) samengevat (meestal gemiddeld) per waterschap, per hydrotype, per focusgebied en per natuurbeheertype. Deze tabellen zijn in excel beschikbaar en via het droogteportaal te raadplegen.

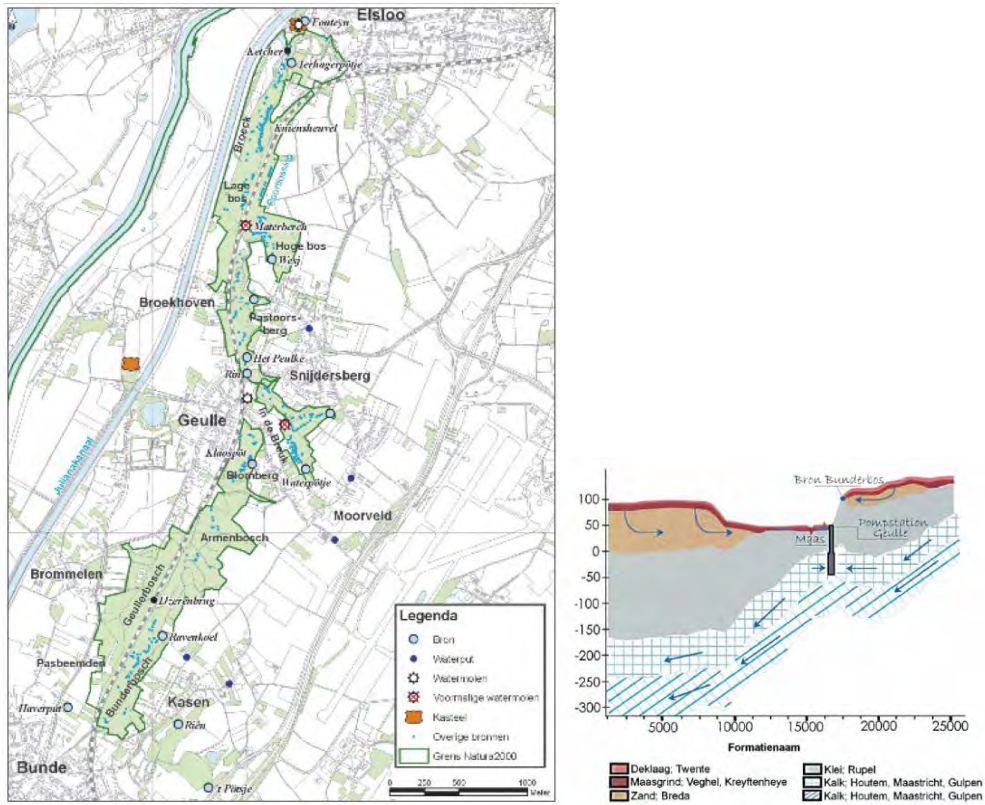
VII Effecten van maatregelen in het Krijtlandschap van Zuid-Limburg

De geohydrologie van het Krijtlandschap in Zuid-Limburg is complex en deze complexiteit is niet voldoende goed meegenomen in de versie van het LHM (3.4) die voor deze droogtestudie is gebruikt. Daarom zijn de modelresultaten voor dit gebied (Zuid-Limburg) dan ook steeds in de figuren gemaskeerd. Om toch een beeld te krijgen van effecten van maatregelen zijn extra berekeningen uitgevoerd met het regionale grondwatermodel IBRAHYM voor het N-2000 gebied (focusgebied) Bunder- en Elslooërbos. De berekeningen zijn door SWECO uitgevoerd. WML, de provincie Limburg en het waterschap Limburg hebben recent de geohydrologische schematisatie voor het Krijtlandschap in dit grondwatermodel IBRAHYM verbeterd. Echter, alleen een stationaire versie van dit grondwatermodel was beschikbaar de berekeningen, een model dat daarmee ook weer zijn beperkingen heeft. De verbeterde geohydrologische schematisatie is inmiddels ook in een nieuwe versie van het LHM overgenomen zodat dit gebied in vervolg-projecten in de (nationale) berekeningen beter kan worden meegenomen.

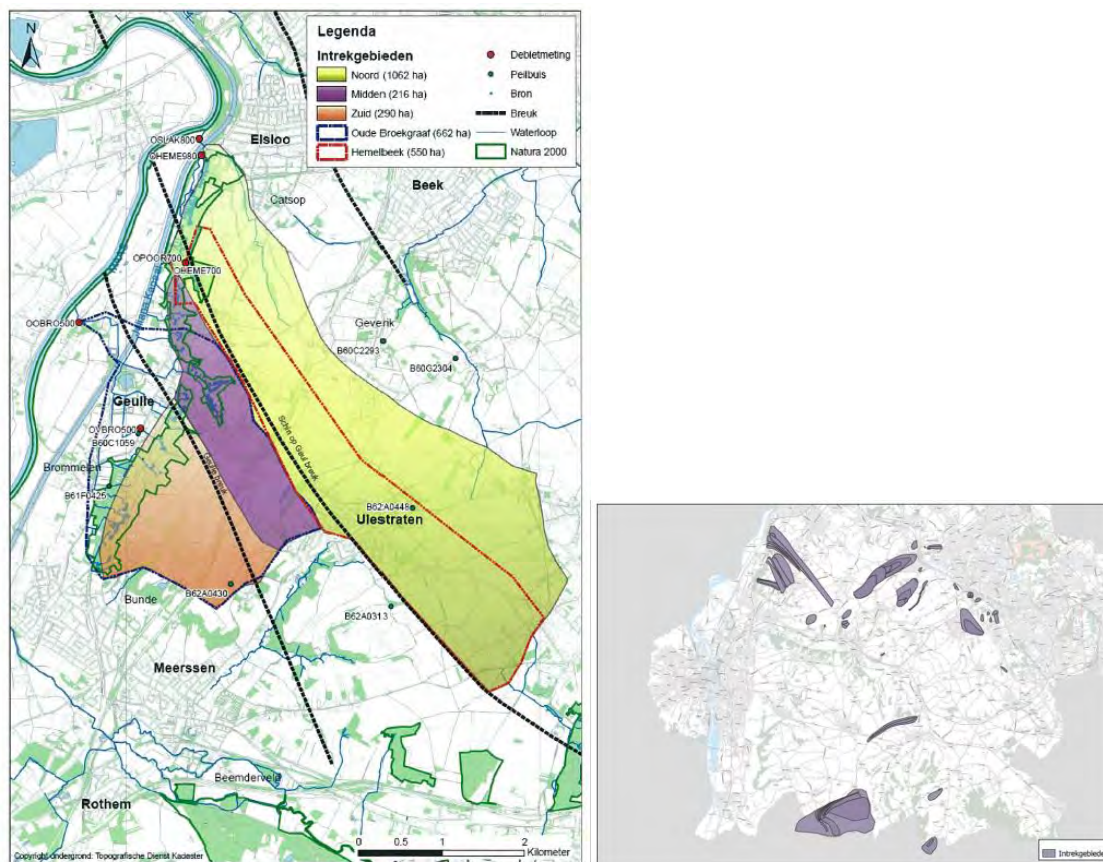
Korte gebiedsbeschrijving

Het gaat hier om het gebied dat zich globaal uitstrekt tussen de zuidkant van Geulle en de Materberg op de flanken van de overgang van hogergelegen gebied naar het Maasdal ten westen van het gebied. Ondiep komen Tertiaire slecht-doorlatende kleilagen voor, Klei van Boom (Formatie van Rupel) en de Klei van Goudsberg (Formatie van Tongeren) die een belangrijke rol spelen bij de geohydrologie van het gebied. De kleien zijn zo slecht-doorlatend dat een groot deel van het neerslagoverschot als grondwater over deze kleilagen richting het westen stroomt richting de Maas en op de flanken van de helling van de Maasterrassen uittreedt in bronnen en kwelzones. Deze bronnen en de kwel zijn kalkrijk en van grote ecologische en landschappelijke waarde.

Voor Het Bunder- en Elslooërbos (Figuur 106) gaat het naast behoud van de oppervlakte vooral om de verbetering van de kwaliteit de van de kalktufbronnen, eiken-haagbeukenbossen en vochtige alluviale bossen. In het Bunder- en Elslooërbos spitsen de knelpunten zich toe op de bovengrondse toestroom van water vanaf de hoger gelegen gebieden en de kwaliteit daarvan (te voedselrijk) en de verdroging als gevolg van het deels afvangen van de natuurlijke kwelstromen (De Mars et al., 2017). De intrekgebieden van deze bronnen en kwelzones zijn dan ook van groot belang voor herstel. De begrenzing van deze intrekgebieden zijn met een grondwatermodel door RHKDHV berekend (De Mars et al., 2009) en weergegeven in Figuur 107). Voor meer informatie over dit N-2000 gebied wordt verwezen naar de vele rapporten (o.a. De Mars et al., 2009, 2017).



Figuur 106. De ligging van het N-2000 gebied Bunder- en Elslooërbos. De locaties van de bronnen zijn aangegeven in blauw (links) en (rechts) schematische doorsnede loodrecht op het Maasdal en Maasterras met situering van het gebied op de flanken (De Mars et al., 2009).



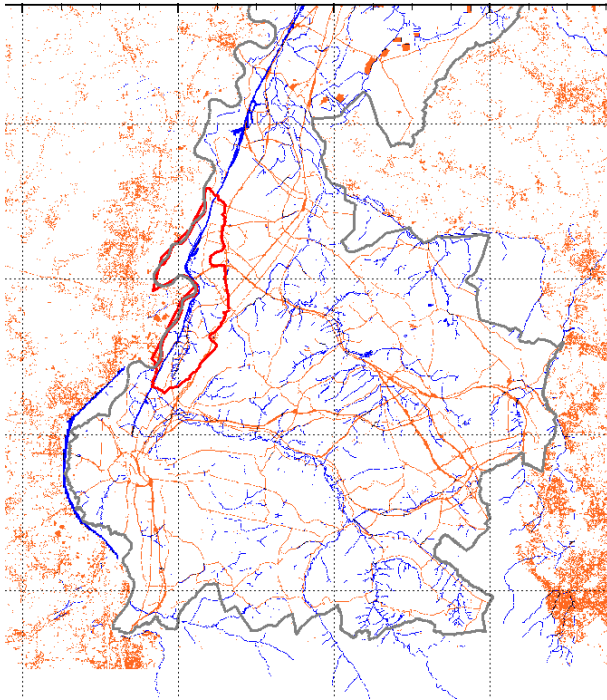
Figuur 107. Begrenzing van de intrekgebieden van de bronnen en kwelzones van het Bunder- en Elslooërbos (De Mars et al., 2009).

Verkennde berekeningen: modelscenario's

De modelscenario's die met het stationaire regionale grondwatermodel IBRAHYM zijn in overleg met waterschap en provincie Limburg doorgerekend en zijn in lijn met de ingrepen die met het LHM zijn doorgerekend voor de andere zandgebieden in deze droogtestudie. Gezien het feit dat de bronnen en kwel op de flanken van het Maasterras de belangrijkste aandacht hebben bij herstel van dit N-2000 gebied, zijn ook de doorberekende oplossingsrichtingen hierop gericht. Daarbij de eerder berekende intrekgebieden leidend te laten zijn. De maatregelen die zijn doorgerekend met het regionale model IBRAHYM staan weergegeven in Tabel 26. In Figuur 108 staat het onderscheid in primaire en secundaire waterlopen weergegeven.

Tabel 26. De modelscenario's die met het stationaire grondwatermodel IBRAHYM zijn doorgerekend.

Scenario	Beschrijving
1	Peil primaire watergangen 30 cm omhoog in het gehele Krijtgebied
2	Peil secundaire en tertiaire systeem 30 cm omhoog in het gehele Krijtgebied
3	Landbouwgebied binnen aangegeven intrekgebied bronnen: grondwateraanvulling (RCH) + 50 mm/jaar (0,137 mm/d)
4	Landbouwgebied binnen aangegeven intrekgebied bronnen: grondwateraanvulling (RCH) + 100 mm/jaar (0,274 mm/d)
5	Landbouwgebied binnen aangegeven intrekgebied bronnen: ondiepe onttrekking toevoegen, evenredig met totaal debiet van 0,5 miljoen m ³ /jaar (evenredig verdelen, één onttrekking per ongeveer 20 ha)
6	Alle onttrekkingen stopzetten in straal van 7,5 km rondom gebied
7	Voor bebouwd gebied, vaste grondwateraanvulling invoeren van 0,6 mm/d



Figuur 108. De ligging van primaire watergangen (blauw) en secundaire-tertiaire watergangen (oranje). In rood is de grens van het N-2000 gebied Bunder- en Elslöoërbos weergegeven.

Modelresultaten

Tabel 27 toont een aantal waterbalanstermen van het gebied Bunder- en Elslöoërbos voor de referentiesituatie en de verschillende modelscenario's en in Tabel 28 is berekende afvoer van bronbeken samengevat. Per maatregel wordt kort ingegaan op het stationaire effect met de focus op het N-2000 gebied.

Tabel 27. De waterbalanstermen van het Bunder en Elslöoërbos voor de verschillende scenario's, in m³ per dag. De waarden bij Referentie zijn absoluut, de waarden bij de verschillende scenario's zijn relatief, ten opzichte van de Referentie.

Scenario	Kwel [m ³ /d]	Infiltratie uit primair oppervlakte- water [m ³ /d]	Laterale grondwater- stroming IN [m ³ /d]	Grondwater- aanvulling [m ³ /d]	Wegzijing [m ³ /d]	Drainage naar primair oppervlakte- water [m ³ /d]	Laterale grondwater- stroming UIT [m ³ /d]
Ref	35320	1740	679	32746	37434	3774	3907
1	+ 72	+ 12	- 5	0	+ 129	- 155	+ 23
2	+ 59	- 8	1	0	0	+ 58	+ 28
3	+ 18	0	0	+ 180	+ 181	+ 5	+ 3
4	+ 36	- 1	0	+ 361	+ 362	+ 9	+ 6
5	??	0	- 2	0	- 394	- 40	+ 14
6	+ 147	- 2	+ 3	0	+ 22	+ 58	+ 38
7	- 1501	+ 21	+ 31	- 4707	- 4856	- 441	- 312

Tabel 28. De berekende afvoer van de bronbeekjes van het Bunder en Elsloërbos voor de verschillende scenario's, in m³ per dag. De waarden bij Referentie zijn absoluut, de waarden bij de verschillende scenario's zijn relatief, ten opzichte van de Referentie.

Scenario	Afvoer bronbeekjes [m ³ /d]
Ref	4900
1	- 108
2	+ 10
3	+ 70
4	+ 140
5	- 893
6	+ 50
7	- 522

Een eerste interpretatie van alle resultaten levert op dat voor de meeste scenario's de meeste effecten ten opzichte van de referentie gering zijn ($\approx <3\%$ verandering). Dit geldt niet voor de effecten bij scenario's 5 en 7. Ook scenario's 3 en 4 hebben enig effect op grondwateraanvulling en wegzijging.

Maatregel 1: Peil primaire watergangen 30 cm omhoog

Deze maatregel zorgt voor een verhoging van de grondwaterstanden met 10 tot 30 cm, zie Figuur 109. Ook in het gebied zelf (rood) stijgen de grondwaterstanden. Deze maatregel zorgt voor een verlaging van de afvoer van de bronbeekjes. Door de verhoging van het waterpeil kan er minder water gedraineerd worden, waardoor het water lokaal wordt vastgehouden en voor een grondwaterstandsstijging zorgt. Ook neemt de hoeveelheid wegzijging toe als gevolg van de grotere waterdruk in het freatische pakket en minder afvoer van het freatische grondwater en deels uit zich dat ook in een toename van de kwel. Omdat de maatregel wordt toegepast op het regionale oppervlaktewater, is het effect niet merkbaar in het laaggelegen deel van het gebied. Het effect zou voor de bronbeken positief kunnen uitpakken wanneer het peil van de bronbeken deels of niet wordt verhoogd, zoals wel in het modelscenario is gedaan. Dat leidt dan wel tot afvoer uit het gebied.

Maatregel 2: Peil secundaire en tertiaire watergangen 30 cm omhoog

Het effect van deze maatregel is veel lokaler dan het effect van maatregel 1, vanwege de kleinere dimensies van de sloten waarin het peil is verhoogd en ook het geringe aantal sloten in het gebied. Opvallend en direct een belangrijk kenmerk van het Krijtlandschap is het geringe ontwatering van het plateau. Veelal het totale neerslagoverschot vindt zijn weg naar de diepere ondergrond en de hoeveelheid die overblijft na het onttrekken van grondwater, treedt op grotere afstand uit in de dalen en flanken als kwel. De effecten van deze maatregelen bevinden zich grotendeels buiten het gebied, hetgeen zowel te zien is in Figuur 109 als in de cijfers van Tabel 28. Ook de afvoeren van de bronbeekjes worden nauwelijks verhoogd door deze maatregel.

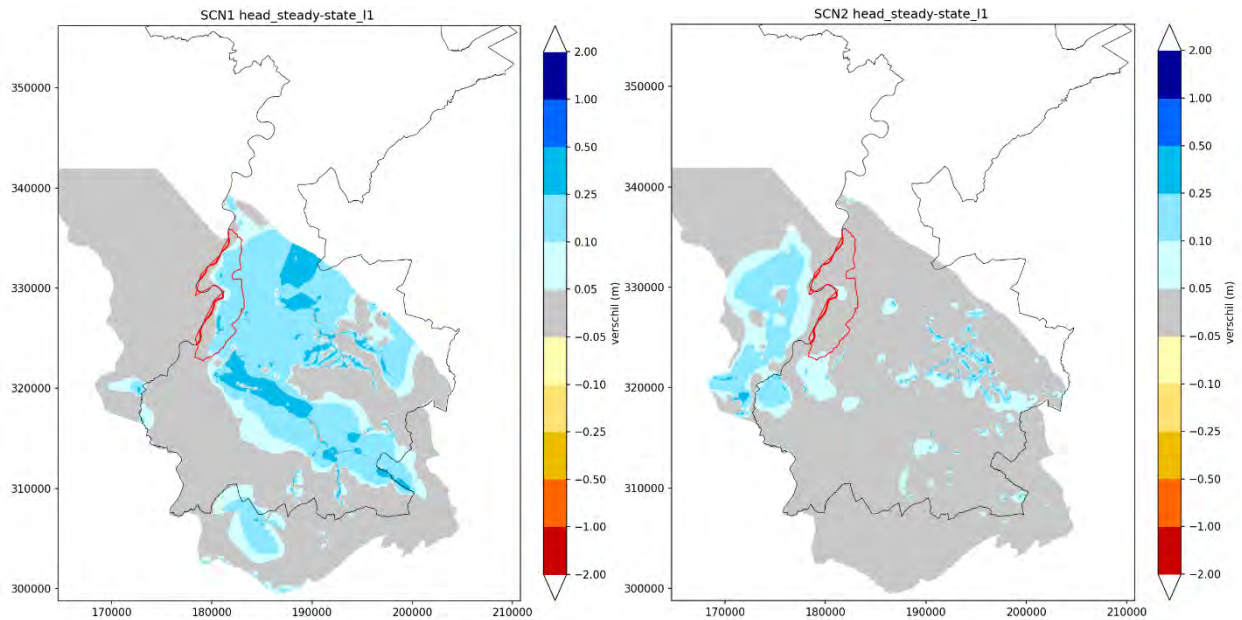
Maatregel 3: Landbouwgebieden binnen intrekgebieden: grondwateraanvulling + 50 mm/jaar

Met deze maatregel wordt het effect van meer grondwateraanvulling berekend. Meer grondwateraanvulling kan bijvoorbeeld worden bewerkstelligd door maaiveldafvoer te beperken en infiltratie te bevorderen. In het zuidoosten van het gebied bevindt zich landbouwgebied binnen het intrekgebied. De maatregel zorgt daar voor een stijging van de grondwaterstand met 10-30 cm. De vergroting van de wegzijging met 181 m³/dag is gelijk aan de extra grondwateraanvulling door deze maatregel. Door de extra grondwateraanvulling stijgt de afvoer van de bronbeekjes met 70 m³/dag ($<2\%$ meer dan in referentie), dat is ongeveer 40% van de extra grondwateraanvulling van 180 m³/dag en kan als effectief voor de bronbeken worden beoordeeld.

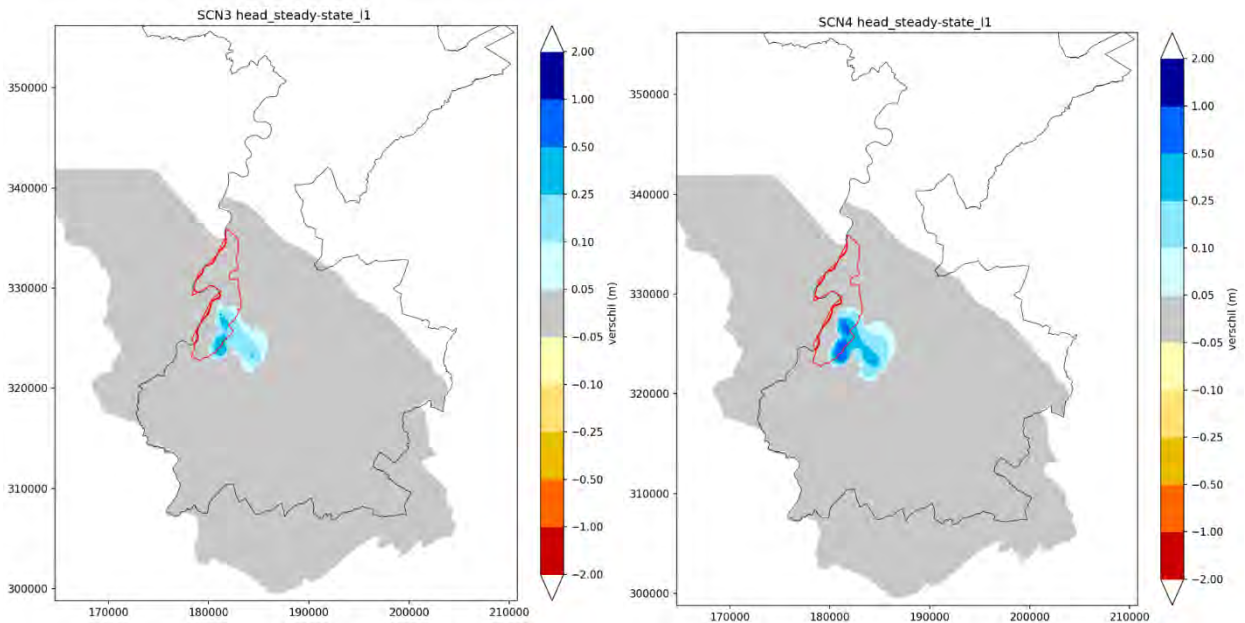
Maatregel 4: Landbouwgebieden binnen intrekgebieden: grondwateraanvulling + 100 mm/jaar

In deze extremere variant van maatregel 3 stijgt de grondwaterstand met 20 tot 80 cm in het landbouw-intrekgebied. Dit kan wellicht problemen opleveren voor de landbouw door te hoge grondwaterstanden. Het

effect van de maatregel is tweemaal zo groot als bij maatregel 3: de wegzijsing in het gebied is vergroot met 362 m³/dag (≈+1% ten opzichte van referentie) en de afvoer van de bronbeekjes is vergroot met 140 m³/dag.



Figuur 109. Effect op de stationaire grondwaterstand als gevolg van modelscenario 1 en 2.

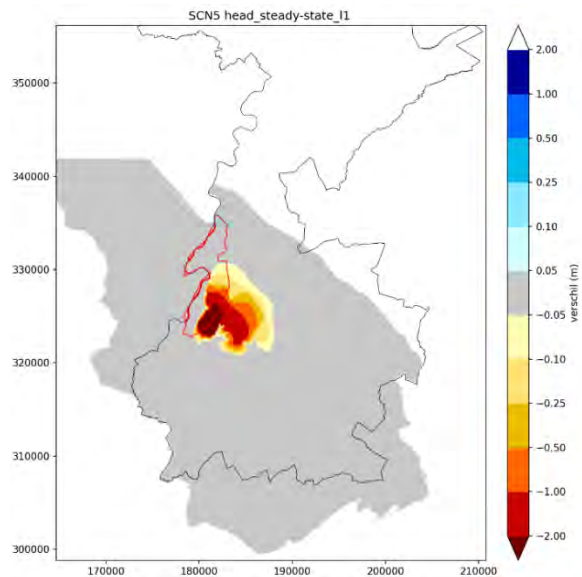


Figuur 110. Effect op de stationaire grondwaterstand als gevolg van modelscenario 3 en 4.

Maatregel 5: Ondiepe onttrekking landbouwgebied binnen intrekgebieden

Momenteel zijn er volgens de provincie en waterschap geen ondiepe grondwateronttrekkingen in het intrekgebied van de bronbeken aanwezig. Om te verkennen wat effecten zijn van mogelijk toekomstige onttrekkingen, zijn de effecten van onttrekkingen met een totaal debiet van 0,5 miljoen m³/jaar in het intrekgebied doorgerekend. Deze maatregel zorgt voor een duidelijke verlaging van de grondwaterstand, lokaal zelfs tot 7 meter (!). Daarnaast neemt de afvoer van de bronbeken af met 890 m³/dag oftewel 0,33 miljoen m³/jaar; dit is 65% van de hoeveelheid

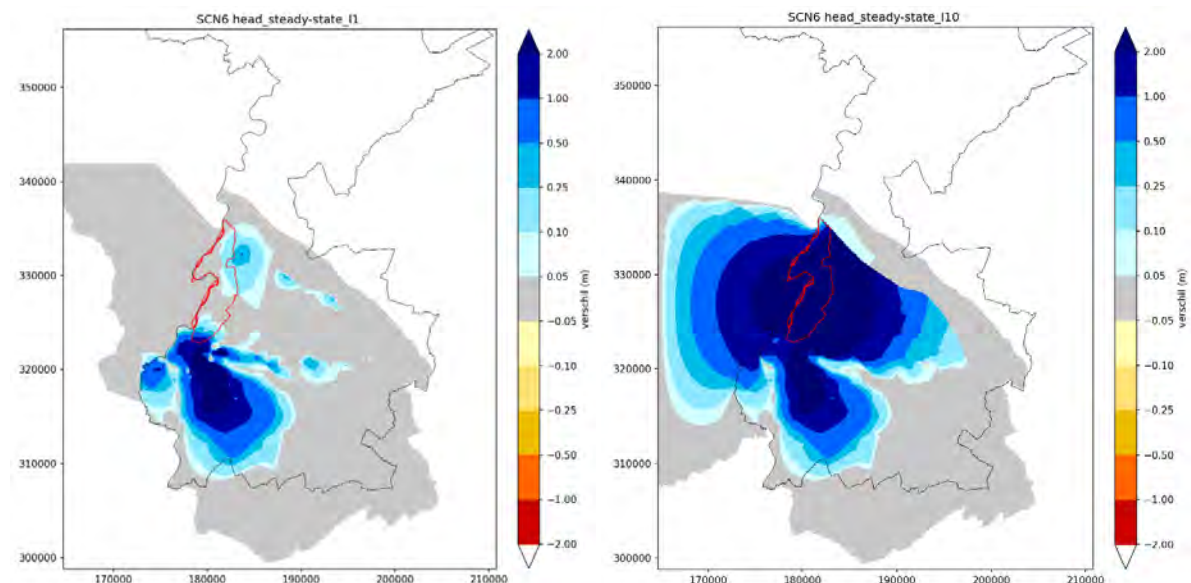
onttrokken grondwater voor beregning. Grondwater onttrekken uit het ondiepe systeem heeft dus een negatieve impact op de afvoer naar en van de bronbeken.



Figuur 111. Effect op de stationaire grondwaterstand als gevolg van modelscenario 5.

Maatregel 6: Alle onttrekkingen rondom Bunder- en Elslooërbos stoppen

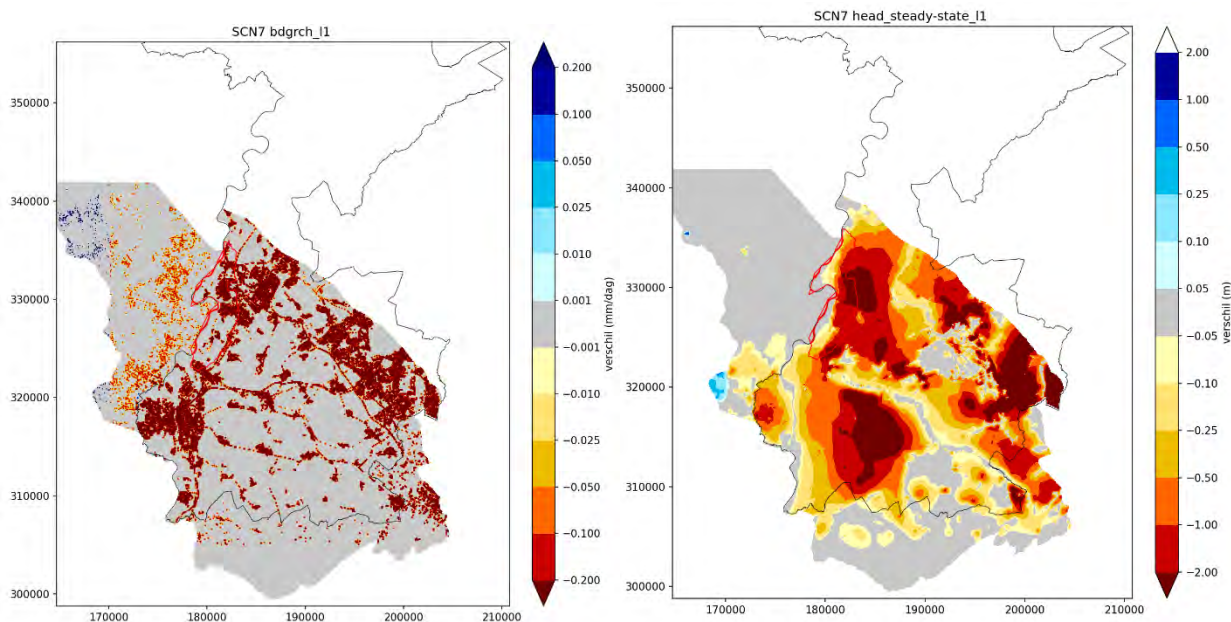
Deze maatregel, alle onttrekkingen stoppen in een straal van 7,5 km rondom Bunderbos, zorgt vooral in het zuiden van het gebied voor een stijging van de grondwaterstanden met iets meer dan 1 m. Op de stijghoogte van het diepere grondwatersysteem zijn de effecten groter. In het noordoosten van het gebied is het effect van de maatregel ook merkbaar, daar stijgt de grondwaterstand ongeveer 20 cm. Ook de afvoer van de bronbeekjes stijgt als gevolg van deze maatregel iets, echter in vergelijking met de grondwateronttrekkingen relatief heel weinig omdat beide systemen (diep versus ondiep met bronbeken) grotendeels gescheiden zijn door de slechtdoorlatende tertiaire kleilagen. Met name in het zuiden van het N-2000 gebied is er meer hydraulisch contact en zijn de effecten op het freatisch ondiep systeem dus groter.



Figuur 112. Effect op de stationaire grondwaterstand en de stijghoogte in modellaag 10 als gevolg van modelscenario 6.

Maatregel 7: In bebouwd gebied vaste grondwateraanvulling van 0,6 mm/dag (ruim 200 mm/jaar)

Bij beoordeling van de resultaten van dit scenario is een fout in het stationaire IBRAHYM-model ontdekt. De fout is erin geslopen bij de vertaling van de niet-stationaire grondwateraanvulling volgens METASWAP naar een stationaire aanvulling in MODFLOW en gaat met name voor stedelijk gebied fout. Dit is gecommuniceerd richting waterschap en provincie Limburg en vereist nader onderzoek. De resultaten van dit scenario worden daarom hier niet besproken.



Figuur 113. Effect op de stationaire grondwaterstand en de stijghoogte in modellaag 10 als gevolg van modelscenario 7.

Samenvatting van bevindingen

Met het stationaire regionale grondwatermodel IBRAHYM is een aantal scenario's doorgerekend vergelijkbaar met modelscenario's die voor de rest van het zandgebied met het LHM zijn doorgerekend. In dit regionale model zit de geohydrologie van het Krijtlandschap beter geschematiseerd in dan in de versie van het LHM die voor de droogtestudie is gebruikt. Inmiddels is in de nieuwste LHM-versie de geohydrologische schematisatie van het IBRAHYM-model voor het Krijtgebied overgenomen. Een nadeel van deze versie van het IBRAHYM-model is dat het een stationair grondwatermodel betreft en er dus geen onderscheid kan worden gemaakt tussen effecten in de bijv. de winter en zomer.

Wat betreft watersysteemwerking en effect van maatregelen is het grote verschil tussen het gebied Bunderbos-Elslooërbos en het zandgebied, de aanwezigheid van de ondiepe ligging van de Tertiaire kleilagen die het diepe van het ondiepe grondwatersysteem scheidt en de oorzaak is van het voorkomen van de bijzondere bronbeken op de flanken van de hellingen van het Maasterras. Deze situatie is enigszins te vergelijken met de oostelijke stuwwallen van Twente, waar keileem voor vergelijkbare bronnen zorgt.

Zoals ook voor het zandgebied buiten Zuid-Limburg geldt, zijn maatregelen die direct ingrijpen op de waterbalans zoals grondwateraanvulling en onttrekkingen het meest effectief voor beïnvloeding van de afvoer van beken en bronnen en van kwel. Voor de bronbeken leidt extra grondwateraanvulling in het intrekgebied van de bronbeken tot een toename van de afvoer. Het uit het freatisch systeem onttrekken van grondwater, bijv. voor beregening in de land- en tuinbouw, leidt tot een afname van de bronbeekafvoer met ongeveer 65% van de onttrokken hoeveelheid grondwater. Het reduceren van de drinkwaterwinningen heeft een groot effect voor een groot gebied op de stijghoogte en freatische grondwaterstand, maar veel minder voor het Bunder- en Elslooërbos (m.u.v. het zuidelijke deel), door de aanwezigheid van de Tertiaire kleilagen die het diepe van het ondiepe systeem scheidt.

Maatregelen in het ontwateringsysteem hebben nauwelijks invloed op de afvoer van de bronbeken, mede omdat er ook weinig ontwatering aanwezig is in het intrekgebied van deze bronnen. Als we het geheel van de scenario's overzien, dan heeft scenario 4 de meest positieve effecten voor het N-2000 gebied.

VIII Vegetatie-indices op basis van remote sensing informatie

(zie ook Van den Eertwegh et al., 2019)

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, NDWI (Fase 1) of NDVI en NDMI (Fase 3).

NDMI 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 NDMI 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.

NDMI

De NDMI is een maat voor het watergehalte in vegetatie en 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). Hoge NDMI-waarden betekenen een hoog watergehalte in de vegetatie.

NB: de NDWI is een maat voor oppervlaktewater aan het aardoppervlak, in Fase 1 gebruikt om bijv. vennen te detecteren.

Voordelen:

- Eenvoudige berekening vanuit meerdere platformen (satelliet, airborne en drone)
- Geeft directe waardering van het watergehalte in een vegetatie. Staat in die zin dichterbij 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 open water.

Processtappen

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

Stap 1. Atmosferische correctie met senzcor

SenzCor 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 NDMI zijn 30-dagen maximale waarde composieten gemaakt in het kader van dit project. Bij het maken van composieten gaat het om

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

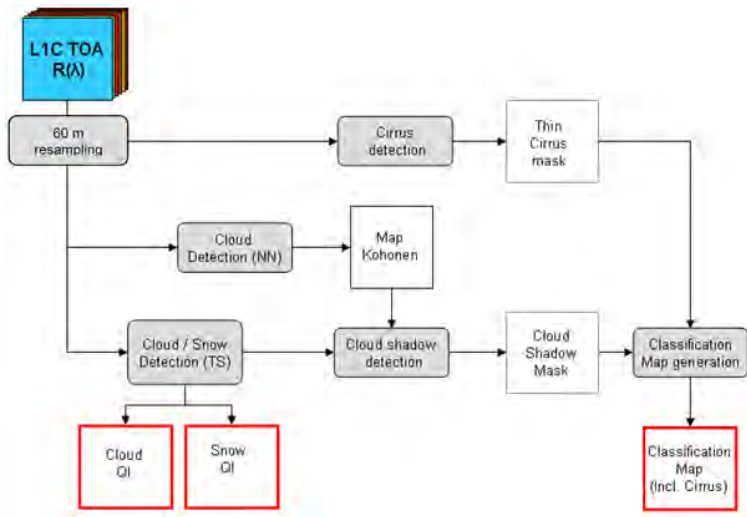
Deze composieten moeten problemen voorkomen bij Sentinel 2 gegevens voor één enkele datum, zoals die wolken vervuiling, atmosferische problemen, reflectie van het oppervlak, en geometrie van de belichting (Holben, 1986).

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 (zei 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);
- bepaling van bijbehorende kwaliteitsindicatoren.



Figuur 114. 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.

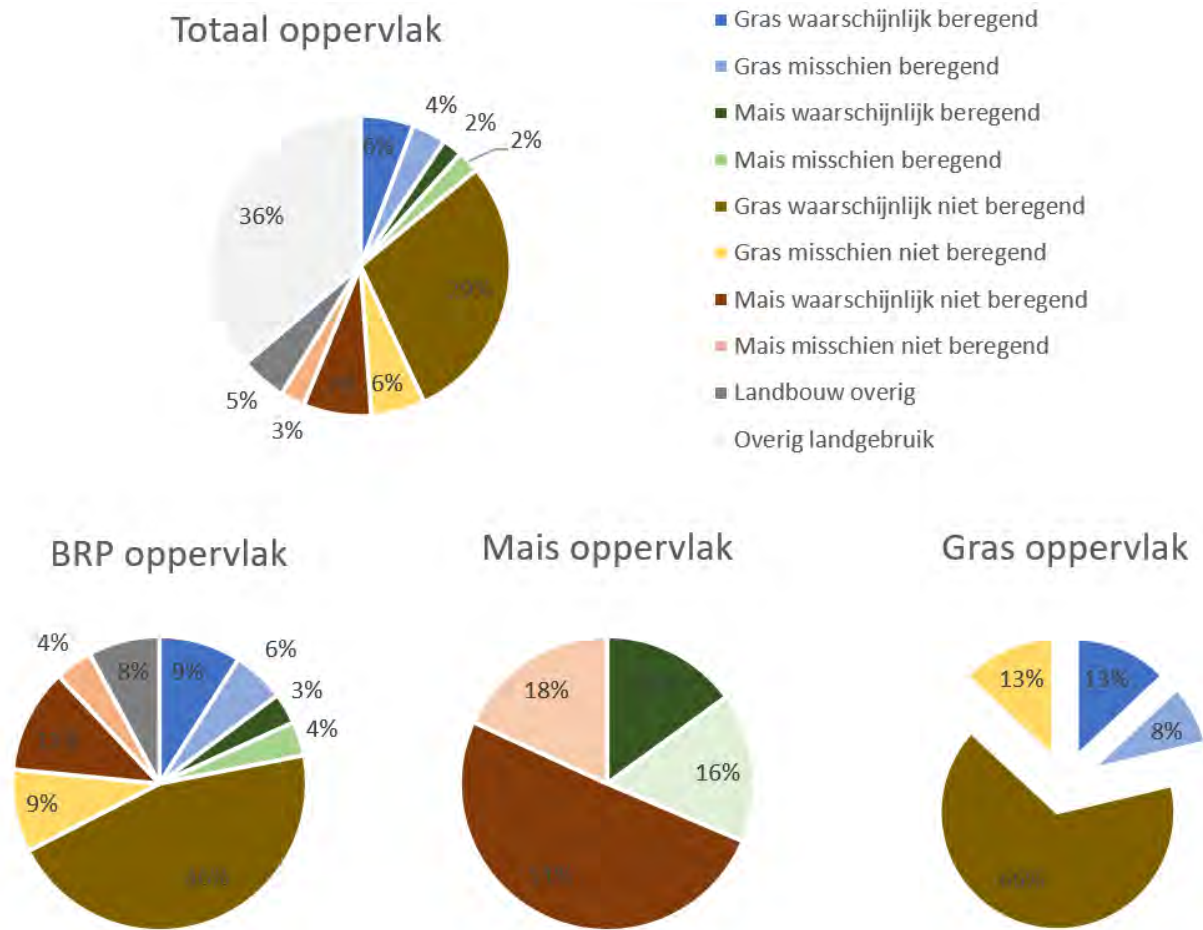
Het toegepast algoritme is defensief/aan de 'veilige' kant, wat zorgt voor een laag aantal foute toewijzingen. Als er water wordt gedetecteerd, dan is de kans groot dat het ook werkelijk water is. Dit resulteert in een (kleine) onderschatting van het aantal waterpixels. Vandaar dat we in het kader van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

IX Detectie van beregende percelen op basis van remote sensing informatie

Zie ook Van den Eertwegh et al., 2019.

Testgebied Oost-Gelderland, 2018

Met de beregeningskaart kan het totaal beregend areaal in het project gebied worden geschat. Ter illustratie laten we hier zien dat in Oost-Gelderland in 2018 zo'n 15 % van het totale areaal werd beregend, i.c. ongeveer 20% van het landbouwareaal. Voor het gewas snijmais geldt dat ruim 30% is beregend en voor grasland is dat ruim 20%.



Figuur 115. Oppervlakte beregend areaal voorbeeldgebied Oost-Gelderland in 2018.

Met kengetallen over het aantal beregeningsbeurten en de hoeveelheid gift (mm) per beregeningsbeurt, kan de onttrekking ten behoeve van de landbouw worden geschat. Een mogelijk scenario voor het voorbeeldgebied Oost-Gelderland is weergegeven in Tabel 29.

Tabel 29. Scenario voor onttrekkingen in voorbeeldgebied Oost-Gelderland in 2018.

Gewas	Beregeningsgift (mm)	Aantal	Totaal (mm)	
Gras	20	4	80	
Mais	30	4	120	
Overig	30	5	150	
Scenario	Onttrekking gras (mm)	Onttrekking mais (mm)	Onttrekking landbouw overig (mm)	Totaal onttrekking (mm)
Mais + Gras	8	5	-	13
Mais + Gras + Overig	8	5	8	20

X Berekende verdamping en vegetatie–indices uit remote sensing informatie

Beekloop (WDD), Vlootbeek (WL), Hupselse Beek (WRIJ)

Overige focus-stroomgebieden: zie <https://droogteportaal.nl/achtergrondinformatie.html>

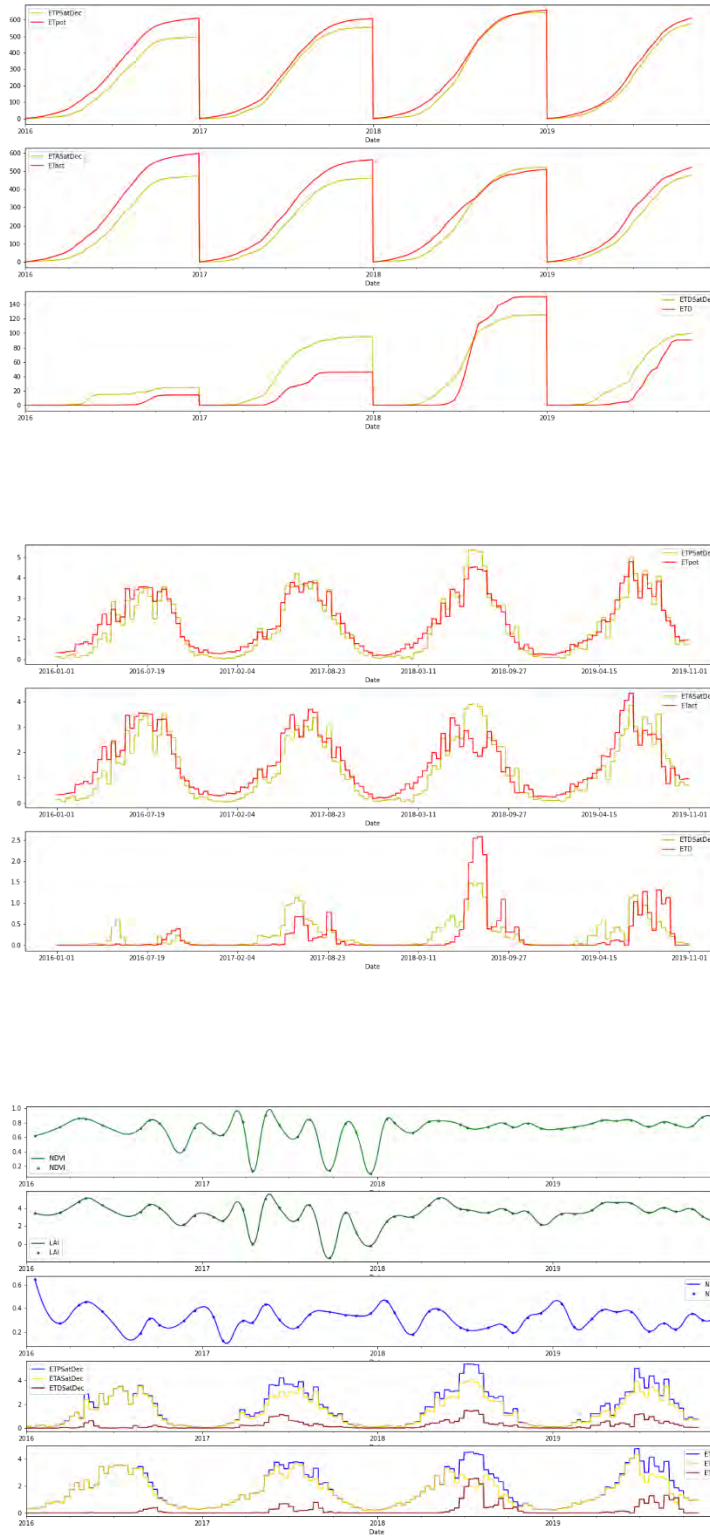
Verklaring/bijscript figuren.

Bovenste figuur. Berekende cumulatieve potentiële (ETp) en werkelijke verdamping (ETa) per jaar van focus-stroomgebied in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA-ET in groen (beheerder namens STOWA: R. Crook) en LHM-resultaten in rood. Van boven naar beneden: ETp, ETa en reductie (ETp minus ETa) in [mm/jaar].

Middelste figuur. Berekende potentiële (ETp) en werkelijke verdamping (ETa) per decade van focus-stroomgebied in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA-ET in groen (beheerder namens STOWA: R. Crook) en LHM-resultaten in rood. Van boven naar beneden: ETp, ETa en reductie (ETp minus ETa) in [mm/decade].

Onderste Figuur. Berekende gewasindex NDVI (boven), LAI (tweede van boven), NDMI (derde van boven) en potentiële (ETpot) werkelijke verdamping (ETact) en reductie per decade [mm/decade] van focus-stroomgebied in de vier jaren 2016 t/m 2019. Bron van data: SATDATA-ET (een na onderste) en LHM-resultaten (onderste).

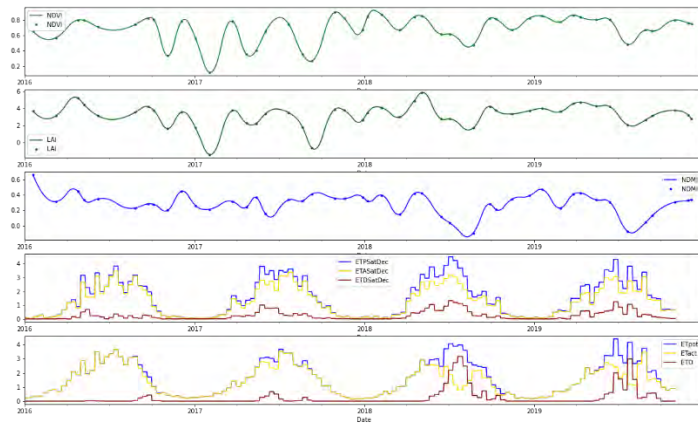
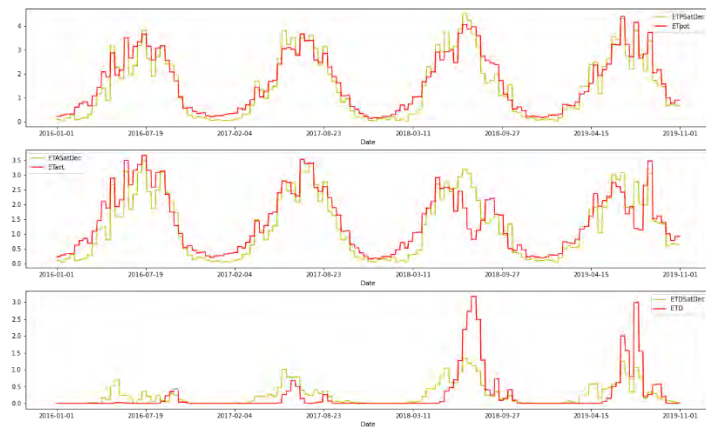
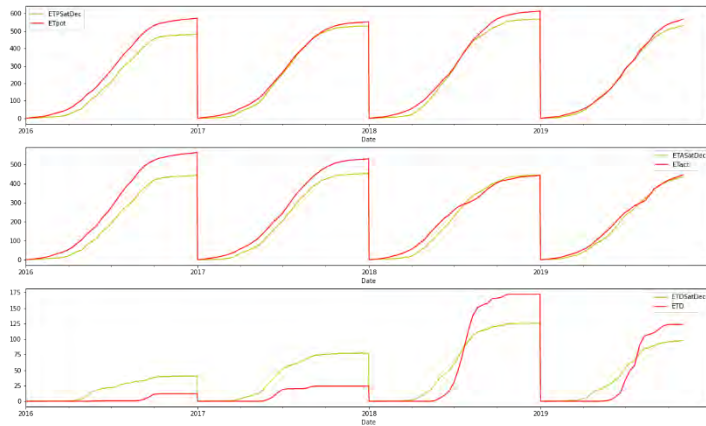
Beekloop (WDD):



Vlootbeek (WL):



Hupselse Beek (WRIJ):



XI Hydrologische begrippenlijst

Zie ook: NHV (2002). Hydrologische woordenlijst; NHV (2015). Verdamping in de hydrologie.

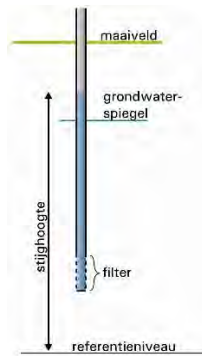
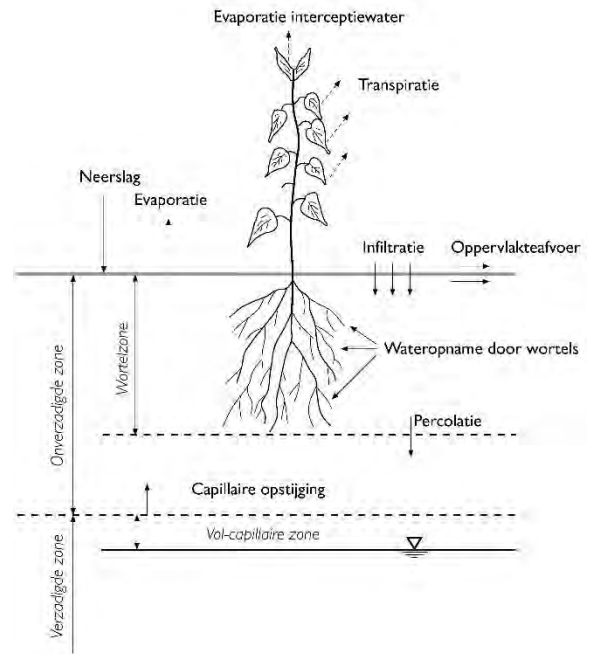
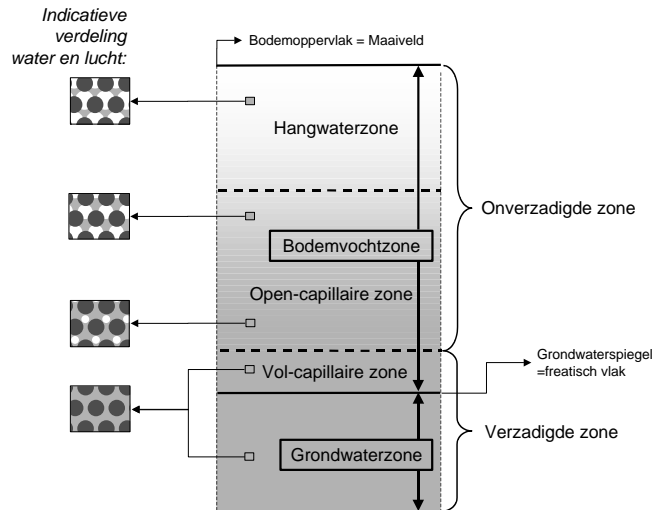
en <https://www.helpdeskwater.nl/waterbegrippen/>

Begrip	Betekenis
Grondwaterstand	De hoogte van een punt waar het <i>grondwater</i> een <i>drukhoogte</i> gelijk aan nul heeft t.o.v. een referentieniveau. De <i>absolute waterdruk</i> is dan gelijk aan de druk van de atmosfeer.
Freatisch grondwater	Water in de <i>verzadigde zone</i> met een vrije <i>grondwaterspiegel</i> .
Stijghoogte	De som van <i>drukhoogte</i> en <i>plaatshoogte</i> . In de onverzadigde zone komt deze overeen met de afstand tussen het tensiometerpeil, gemeten in het beschouwde punt, en het referentieniveau ten opzichte waarvan de <i>plaatshoogte</i> is bepaald. In de verzadigde zone kan deze grootte worden gemeten met een <i>piëzometer</i> waarvan de hoogte t.o.v. een referentievlak bekend is. Het resultaat heeft betrekking op de plaats waar het <i>filter</i> is gesteld.
Bodemvocht	In de onverzadigde zone, boven de vrije grondwaterspiegel aanwezig vocht, meestal uitgedrukt in volume % ten opzichte van volume bodem.
Wortelzone	De grondlaag waarin de levende wortels van een bepaalde vegetatie aanwezig zijn, meestal beschouwd als de laag waarin het overgrote deel van de wortels zich bevindt.
Grondwater	Water beneden het grondoppervlak, meestal beperkt tot <i>water</i> beneden de <i>grondwaterspiegel</i> .
Oppervlaktewater	Het <i>water</i> dat stroomt over of verblijft op het aardoppervlak.
Debiet	Het vloeistofvolume dat per tijdseenheid door een doorsnede stroomt.
Afvoer	Debiet uit een specifiek (stroom)gebied.
Waterpeil	Kortstondig gemiddelde van de hoogteligging van de waterspiegel t.o.v. een referentievlak, zoals <i>NAP</i> .
Ontwatering	De <i>afvoer</i> van <i>water</i> uit percelen over en door de grond en eventueel door drainbuizen en <i>greppels</i> naar een stelsel van grotere <i>waterlopen</i> .
Drainage	De <i>afvoer</i> van <i>water</i> over en door de grond en via het waterlopenstelsel.

Afwatering	De <i>afvoer</i> van <i>water</i> via een stelsel van open <i>waterlopen</i> naar een <i>lozingspunt</i> van het <i>afwateringsgebied</i> .
Kwel	In het algemeen: het diffuus uittreden van <i>grondwater</i> . In het bijzonder: het uittreden van <i>grondwater</i> onder invloed van grotere <i>stijghoogten</i> elders in het <i>hydrologische systeem</i> . Het uittreden kan onder meer geschieden direct aan het grondoppervlak, in sloten, <i>drains</i> , of via een <i>capillaire opstijging</i> .
Kwelflux	Het volume <i>water</i> dat door <i>kwel</i> de grond uittreedt, per eenheid van tijd en per eenheid van doorsnede (oppervlak).
Capillaire opstijging	Grootheid: opwaarts gerichte <i>volumestroomdichtheid</i> van <i>water</i> boven de <i>grondwaterspiegel</i> . Proces: opwaartse stroming van <i>water</i> boven de <i>grondwaterspiegel</i> .
LG ₃	Het gemiddelde van de laagste drie grondwaterstanden op de 14 ^e en 28 ^e van de maand in een zomerperiode (1 april tot 1 oktober)
HG ₃	Het gemiddelde van de hoogste drie grondwaterstanden op de 14 ^e en 28 ^e van de maand in een winterperiode (1 oktober tot 1 april)
SPI	De Standardized Precipitation Index (SPI) is een index die wordt gebruikt om zowel droge als natte omstandigheden te monitoren. De SPI vergelijkt de <i>hoeveelheid neerslag</i> die is gevallen met wat er normaal (periode van 30 jaar) aan regen volgens de klimatologie mag worden verwacht.
SPEI	De Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) is een index die wordt gebruikt om zowel droge als natte omstandigheden te monitoren. De SPEI vergelijkt het <i>potentieel neerslagoverschot</i> als het verschil tussen neerslag en referentiegewas-verdamping met het potentieel neerslagoverschot dat normaal (periode van 30 jaar) volgens de klimatologie mag worden verwacht.
SGI	De Standardized Groundwater Index (SGI) is een index die wordt gebruikt om zowel droge als natte omstandigheden te monitoren. De SGI vergelijkt de <i>grondwaterstand</i> of <i>stijghoogte</i> die optreedt met de grondwaterstand of stijghoogte die normaal (periode van 30 jaar) mag worden verwacht.
ET ref MAK	De <i>verdamping</i> van een uitgebreid uniform, van buiten droog referentiegewas-oppervlak met een hoogte van 8-15 cm dat voldoende van <i>water</i> is voorzien. Deze wordt met behulp van de vergelijking van Makkink berekend. Definitie van een referentiegewas: een uitgestrekt oppervlak van groen gras van uniforme hoogte, actief groeiend, de grond helemaal bedekkend en goed voorzien van water.
ET _p	De referentiegewas-verdamping wordt gebruikt voor het vaststellen van de <i>potentiële verdamping</i> van een gewas ET _p : $ET_p = k_c ET_{ref}$, waarbij k_c een gewasfactor is.
Ep	De potentiële verdamping van de (kale) bodem.

Ea	De werkelijke verdamping van de (kale) bodem.
Tp	De potentiële verdamping i.c. transpiratie van de plant / de vegetatie.
Ta	De werkelijke verdamping i.c. transpiratie van de plant / de vegetatie.
Ta/Tp	De verhouding tussen de werkelijke en potentiële verdamping i.c. transpiratie van de plant / de vegetatie, als maat voor de reductie van de potentiële transpiratie door stress (te nat, te droog, te heet).

Begrippen - illustraties - bron: Jan-Philip Witte/FWE (2021)





© KnowH2O – KWR – Deltares – FWE – WUR SLM – HSS (2021)