

KWR 2021.028 | Mei 2021

Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen

Veldproeven en modelanalyses in het
zandgebied van Nederland voor een meer
robuuste waterhuishouding op lokale en
regionale schaal



Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen

Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een meer robuuste waterhuishouding op lokale en regionale schaal

KWR 2021.028 | Mei 2021

Opdrachtnummer

402088 / 402287

Projectmanager

Klaasjan Raat

Opdrachtgever

Programma Lumbricus

Het kennisprogramma Lumbricus (www.programmalumbricus.nl) is een consortium bestaande uit STOWA, Deltares, KnowH2O, KWR Water Research Institute, FutureWater, Radboud Universiteit, Louis Bolk Instituut, Universiteit Twente, Wageningen Universiteit en Wageningen Environmental Research, waterschap Limburg, waterschap Aa en Maas, en waterschap Vechtstromen.

BTO in het kader van WiCE – Water in de Circulaire Economie

Auteurs

Janine de Wit, Marjolein van Huijgevoort, Dion van Deijl (KnowH2O), Gé van den Eertwegh (KnowH2O), Ruud Bartholomeus

Kwaliteitsborger

Gijsbert Cirkel

Verzonden naar

Betrokkenen bij Programma Lumbricus en WiCE

Dit rapport is openbaar.

Keywords

droogte, wateroverlast, watervoorziening, landbouw, waterhergebruik, klimaatadaptatie, subirrigatie, regelbare drainage, slimme stuwen

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
dr.ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus
T 0306069530
E ruud.bartholomeus@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



KWR

Mei 2021 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Dankwoord

Dit onderzoek had niet kunnen plaatsvinden zonder de medewerking van een groot aantal mensen. Ten eerste zijn dat degenen die medio 2015 het initiatief hebben genomen voor het samenbrengen van meerdere projectvoorstellen in het Programma Lumbricus. Eén van die voorstellen kwam van KnowH2O en KWR, gericht op verdere opschaling en kennisontwikkeling over regelbare/klimaatadaptieve drainage met subirrigatie. In Haaksbergen waren we hier met Bas Worm van Waterschap Vechtstromen al intensief mee bezig sinds 2011. Hetzelfde geldt voor de slimme stuw SAWAX, die KnowH2O, De Bakelse Stroom en Avallo Advies gerealiseerd hebben in 2014, met steun en financiering via Bas Worm. Een tweede versie van de SAWAX hebben we in het kader van Lumbricus in het veld opgesteld.

Binnen Programma Lumbricus hebben we samen met de betrokken waterschappen meerdere proeflocaties samengebracht, om te komen tot een set aan proeven, die allemaal verschillend waren op specifieke onderdelen. Van het huidige waterschap Limburg willen we Diana Kesselmanns bedanken, met wie we de proef te Horst-America in 2016/2017 in gang konden zetten. Van waterschap Aa en Maas willen we Frank van der Bolt en Steffie van Beek-de Keizer bedanken.

Cruciaal voor de proeven waren de agrariërs, die actief meededen en meedoen, meedenken en meewerken: Evert Kremer, Maarten Paarhuis, Robert Geertman, Hendrikus Spoelman, Herman en Gerald Hemstede, Wim Bakhuis, Jeroen Nabben, Léon Steenbergen, René Asbreuk en Wilfried van Dijk. Zonder hen hadden we geen proefvelden en hadden we geen proeven kunnen doen.

Ten slotte dank aan Rob Ruijtenberg, Bas Worm, Marloes van der Kamp en Frank van der Bolt voor de waardevolle opmerkingen bij de verschillende versies van dit rapport.

Het werk dat we samen met landeigenaren, waterschappen en onderzoekers vanuit verschillende disciplines hebben kunnen vormgeven is voor ons heel waardevol. De integraliteit, het begrip voor elkaars problemen en inzichten, helpt om kennisontwikkeling op een specifiek onderdeel altijd in een breder (maatschappelijk) perspectief te plaatsen. Het Programma Lumbricus was hiervoor een waardevol platform. We zijn er trots op dat wij en dit onderzoek daar deel vanuit mocht maken. We willen meer doen dan (toegepast) onderzoek en rapporten schrijven: het gesprek, de samenwerking en het proces vinden we een belangrijk onderdeel van ons kenniswerk.

Samenvatting

Aanleiding

Klimaatverandering zal in Nederland naar verwachting leiden tot vaker voorkomende en langdurigere droge periodes, maar ook tot intensievere buien. Uitgaande van het Deltascenario STOOM, is de verwachting dat de druk op het (grond)watersysteem verder toe zal nemen. De vraag naar zoet water neemt toe, terwijl de beschikbaarheid ervan in de zomerperiode juist afneemt. Het watersysteem raakt hierdoor verder uit balans waardoor de kans op droogteschade aan landbouw, natuur en infrastructuur toeneemt.

In Nederland zijn grote delen van de hoge zandgronden gevoelig voor droogte, omdat hier weinig tot geen water aangevoerd kan worden vanuit het hoofdwatersysteem. De grote uitdaging is om het bodem- en waterbeheer dusdanig in te richten dat het risico op schade door droogte minimaal is voor nu en in de toekomst, zonder daarbij het risico op wateroverlast uit het oog te verliezen. Daarvoor hebben waterbeheerders en agrariërs oplossingen nodig om onder andere de risico's op reductie in gewasopbrengst door zowel droogte als wateroverlast te beperken en dit in te bedden en af te stemmen met de regionale zoetwateropgave.

Onderzochte maatregelen

Regelbare drainage met subirrigatie ('omgekeerde drainage') en de slimme stuw SAWAX (Smart Adaptive Waterlevel eXtender) beogen een bijdrage te leveren aan het beperken van de effecten van watertekorten, maar ook aan het voorkómen van wateroverlast. Dit doen ze door water zoveel mogelijk vast te houden, aan te vullen waar het kan en af te voeren als het moet. De regelbare drainage met subirrigatie wordt specifiek op perceelniveau toegepast. Het doel van subirrigatie is om via een stijging van het grondwaterniveau de vochtbeschikbaarheid van het gewas te verbeteren. Voor de wateraanvoer kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen: oppervlaktewater, gezuiverd restwater (industriële effluent, RWZI-effluent), of grondwater. De SAWAX is bedoeld om waterpeilen in watergangen, die operationeel beheerd worden door het waterschap, mechanisch automatisch door te vertalen naar (instelbaar) hogere peilen in de aangesloten watergangen bovenstrooms van de stuw. Deze laatste watergangen zijn typisch niet in dagelijks operationeel beheer van het waterschap, zoals kavelsloten van agrariërs. De SAWAX laat het peil in deze kavelsloten meebewegen met het door het waterschap gevoerde peil in de hoofdwatergangen. Om ook in de zomerperiode een peilverschil te realiseren kan water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden gepompt.

Doelstelling en onderzoeksopzet

Het doel van dit onderzoek is vierledig:

- ervaring opdoen met en kwantitatieve informatie verzamelen over de werking van regelbare drainage met subirrigatie en SAWAX;
- de bijdrage van deze maatregelen op de waterbeschikbaarheid voor gewassen kwantificeren;
- het effect van de maatregelen op verschillende componenten van de lokale (perceelschaal) waterbalans kwantificeren, met een doorkijk naar regionale schaal;
- inzicht geven in de kansen en knelpunten voor inpassing van de maatregelen in het regionale waterbeheer.

Meetresultaten uit verschillende veldexperimenten zijn gebruikt om een onderbouwd beeld te krijgen van de werking van regelbare drainage met subirrigatie (vier locaties: America, Lieshout, Haaksbergen en Stegeren), gebruikmakend van verschillende bronnen voor wateraanvoer (resp. grondwater, industrieel effluent, RWZI-effluent en oppervlaktewater) en de SAWAX-stuw (één locatie: Stegeren). Op basis van monitoring van de veldexperimenten zijn de maatregelen op perceelschaal geschematiseerd met hydrologische modellen (SWAP en Hydrus-2D). De modelanalyses richten zich op het kwantificeren van effecten van de maatregelen op gewasverdamping, gewasopbrengst en (ook niet bemeten) componenten van de waterbalans. Daarnaast zijn met de modellen varianten doorgerekend die inzicht geven in de effecten van de maatregelen in vergelijking tot enkele

andere inrichtingsmaatregelen, variatie in de aansturing van systemen (variatie in timing en hoeveelheid wateraanvoer), variatie in gewassen en een ander klimaat.

Resultaten

Door de weersomstandigheden binnen de looptijd is qua veldproeven de nadruk komen te liggen op het anticiperen op droog weer via wateraanvoer en subirrigatie. Uit veldmetingen en modelsimulaties (die in staat blijken de metingen te beschrijven), volgt dat subirrigatie via regelbare drainagesystemen in specifieke omstandigheden zorgt voor een stijging van de grondwaterstand en een hoger bodemvochtgehalte in de wortelzone en hiermee een betere vochtvoorziening voor het gewas. Het is niet zonder meer overal een passende maatregel. Een stijging van de grondwaterstand kan alleen worden gerealiseerd als de wegzijging naar de ondergrond beperkt is. Uit de veldexperimenten volgt dat bij een combinatie van een diepe zomergrondwaterstand in de uitgangssituatie (ongeveer -250 cm+mv) en een beperkte wegzijging van 0.1 mm/d de grondwaterstand voldoende (met ongeveer 150 cm) verhoogd kan worden om het gewas van voldoende water te voorzien (Lieshout), maar dat dit bij een combinatie van een zomergrondwaterstand van -140 cm+mv en hoge wegzijging van 1.5 mm/d niet lukt (Stegeren). Een beperkte wegzijging is dus een belangrijkere randvoorwaarde dan de grondwaterstand in de uitgangssituatie.

Naast wegzijging is drainage/grondwaterstroming naar het oppervlaktewater van belang. Deze kan groot zijn (voor America tot zo'n 50% van het aangevoerde water) als het oppervlaktewaterbeheer onvoldoende is aangepast aan de verhoogde grondwaterstand in een perceel met subirrigatie.

De wateraanvoer (i.e. de benodigde hoeveelheid water) voor subirrigatie is afhankelijk van de hydrologische randvoorwaarden (hoeveelheid neerslag, grondwaterstand in de uitgangssituatie, kwel/wegzijging) en varieert daarmee tussen jaren, maar ook tussen de locaties. Het meeste water voedt het diepere grondwater, of draineert naar het oppervlaktewater. De wateraanvoer voor subirrigatie, wanneer toegepast gedurende het gehele groeiseizoen, is hoog. Gemiddeld voor de proeven is deze wateraanvoer voor subirrigatie 500 mm/jaar. Voor elke onderzochte locatie geldt dat maar een (klein) deel van het aangevoerde water ten goede komt aan de gewasverdamping (transpiratie). Voor 2018, bijvoorbeeld, is dit zo'n 2.5% voor Haaksbergen en Stegeren, 9% voor America en 47% voor Lieshout. Het overige water kan worden afgevoerd naar het oppervlaktewater (America: 41% extra drainage naar het oppervlaktewater in 2018, het oppervlaktewaterpeil is onvoldoende aangepast aan het drainageniveau in het aangrenzende proefperceel; Haaksbergen 25%; Lieshout 13%), of voedt het grondwatersysteem (Stegeren: 76% in 2018; America: 19%; Lieshout: 16%; Haaksbergen 0%).

De benodigde hoeveelheid water voor subirrigatie kan worden gestuurd / beperkt door keuzes te maken in de periode waarin subirrigatie plaatsvindt, zonder daarbij het effect op het gewas veel te verminderen. Zo volgt uit scenario-analyses (met America als uitgangssituatie), dat met alleen subirrigatie (5 mm/d) in het voorjaar, een buffer kan worden opgebouwd voor het groeiseizoen en de vochtvoorziening voor het gewas in het groeiseizoen verbetert. Simulaties laten ook zien dat subirrigatie gedurende het hele groeiseizoen (tot en met september) in zeer droge jaren slechts tot 20-40 mm extra transpiratie leidt ten opzichte van het toepassen van subirrigatie tot en met juli. De extra maanden subirrigatie leveren dus nog maar een beperkte extra transpiratie op. In een meer gemiddeld jaar leveren deze extra maanden subirrigatie geen bijdrage meer aan een hogere transpiratie. Scenario-analyses laten ook zien dat 5 mm/d subirrigatie in de drogere jaren 2018 en 2019 weliswaar tot een duidelijke verhoging in transpiratie leidt, maar 3 mm/d niet. Er zit daarmee vanzelfsprekend ook een ondergrens aan de te behalen vermindering van de wateraanvoer voor subirrigatie.

In Stegeren is de SAWAX getest op één locatie in een enkele kavelsloot. In de winterperiode, i.e. periode van neerslagoverschot, zorgde de SAWAX voor een gemiddeld hoger oppervlaktewaterpeil bovenstrooms van de stuw, zoals van de werking van deze stuw verwacht mocht worden. De hogere peilen bovenstrooms zakten mee omlaag bij lagere waterpeilen benedenstrooms. Zo is water geborgen en water vastgehouden bovenstrooms van de SAWAX. Ook is de optie getest met wateraanvoer via een pomp. In de veldproef tijdens de zeer droge zomer in 2019 is het daarbij niet gelukt bovenstrooms het gewenste peilniveau te realiseren. Dit werd veroorzaakt door een te laag ingeschatte pompcapaciteit vanwege een onderschatting van de optredende wegzijging uit het

bovenstroomse pand naar het grondwater; deze was in 2019 groter dan verwacht. Ook bij voldoende pompcapaciteit zou toepassing van de SAWAX op deze locatie in de zeer droge groeiseizoenen van de jaren 2018 en 2019, onvoldoende geleid hebben tot een verbeterde vochtvoorziening van het gewas op de percelen grenzend aan de kavelsloot. Een hoger oppervlaktewaterpeil leidt bij afwezigheid van een neerslagoverschot (zoals in 2019) namelijk niet of nauwelijks tot een hogere grondwaterstand onder de aangrenzende percelen. In meer gemiddelde jaren zal dit effect anders i.c. meer positief zijn. Uit aanvullende modelsimulaties volgde verder dat bij een voldoende hoge pompcapaciteit in de zomer bovenstrooms wél een hoger waterpeil kon worden gerealiseerd.

Conclusies en aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat regelbare drainage met subirrigatie de grondwaterstand op perceelschaal kan verhogen en kan bijdragen aan een verbeterde vochtvoorziening van gewassen, mits de lokale omstandigheden geschikt zijn en voldoende water beschikbaar is. Het watergebruik bij subirrigatie kan echter groot zijn. Het uiteindelijke effect van subirrigatie op de gewasopbrengst en op verschillende componenten van de waterbalans hangt af van het gewas, de bodemopbouw, het bodemtype en het regionale (grond)watersysteem. Daarmee is het een maatregel die niet zomaar succesvol hoeft te zijn op alle locaties en onder alle omstandigheden.

Uit de veldwaarnemingen is gebleken dat de SAWAX goed functioneerde in de afvoer- en aanvoersituatie en dat een grotere pompcapaciteit tot betere resultaten had geleid. Echter, de hydrologische randvoorwaarden op de testlocatie én de extreme weercondities hebben de proef qua wateraanvoer niet succesvol gemaakt; dat ligt niet aan de werking van de SAWAX. Ook voor SAWAX geldt dus dat het geen maatregel is die zonder meer op elke locatie en onder alle omstandigheden succesvol is.

Het ontwerp, inrichting en beheer van regelbare drainage met subirrigatie en SAWAX vergen daarom lokaal maatwerk. Kennis van de lokale waterhuishouding, waterbalans en bodemopbouw is onontbeerlijk om vooraf een goede inschatting te maken van de slagingskans van de maatregel / locatiegeschiktheid voor de maatregel, van de watervraag en van de bijdrage van de maatregel aan de watervoorziening op perceelschaal. De in dit onderzoek gebruikte modelconcepten kunnen in vervolgonderzoek of praktijktoepassingen worden ingezet bij het ontwerp, om inzicht te krijgen in de componenten van de waterbalans, en voor de optimalisatie van de aansturing/het beheer van de systemen.

De maatregelen zijn niet geschikt om ook in zeer droge jaren de gewassen overall optimaal van water te voorzien. Uit dit onderzoek blijkt dat voor de extreem droge jaren 2018 en 2019 het (vanzelfsprekend) lastiger is de grondwaterstand in percelen op peil te houden. In zulke jaren is ook minder aanvoerwater beschikbaar en er zal een deel droogteschade overblijven.

Aanleg van regelbare drainage met als primair doel de functie subirrigatie te benutten is dan ook niet opportuun. Het benutten van drainagesystemen met als primair doel om water af te kunnen voeren wanneer nodig, maar (daarna) systemen ook weer te kunnen aanvullen is daarentegen wel passend.

Het toepassen van subirrigatie genereert een watervraag voor het gehele watersysteem op regionale schaal, waar verschillende sectoren en functies van afhankelijk zijn: het toepassen van subirrigatie op perceelschaal dient ingepast te worden in de regionale balans tussen watervraag en wateraanbod. Daarmee zijn perceelsoplossingen en regionale waterbalans (vanzelfsprekend) niet los van elkaar te zien. Er moet rekening gehouden worden met hoeveel water er beschikbaar is en welke aanvoerbron (oppervlaktewater, gezuiverd restwater, grondwater) het beste benut kan worden. De periode van subirrigatie (gedurende het hele groeiseizoen, alleen in een gedeelte ervan, of juist in de winter) speelt hierbij ook een rol. In de afwegingen over het al dan niet toepassen van maatregelen, wordt aanbevolen zich niet beperken tot getallen voor alleen de bruto aanvoer, maar ook het netto gebruik inzichtelijk te maken. Uit deze studie volgt immers dat een (belangrijk) deel van het aangevoerde water weer terugkomt bij de aanvoerbron of het regionale watersysteem voedt.

Om het totale effect van de maatregel op het regionale grond- en oppervlaktewatersysteem in te schatten en belangen af te wegen zijn ruimtelijke hydrologische modellen nodig. Deze zijn hiervoor geschikt gemaakt, waarbij gebruik is gemaakt van de modelkennis en -resultaten uit deze studie.

Inhoud

Dankwoord	2
Samenvatting	3
Inhoud	7
1 Inleiding	9
1.1 Beschikbaarheid zoetwater	9
1.2 Maatregelen	12
1.2.1 Regelbare drainage met subirrigatie	12
1.2.2 SAWAX slimme stuw	14
1.3 Doelstelling, onderzoeksvragen en methode	16
1.4 Leeswijzer	17
Deel A: Veldexperimenten	18
2 Beschrijving veldexperimenten	19
2.1 Locatiebeschrijvingen case-studies	19
2.1.1 Stegeren - KAD met subirrigatie uit oppervlaktewater en SAWAX-stuw	20
2.1.2 Haaksbergen - subirrigatie met gezuiverd RWZI-effluent	21
2.1.3 Lieshout - subirrigatie met gezuiverd industrieel-effluent	21
2.1.4 America - subirrigatie uit grondwater	22
2.2 Meetopstellingen en apparatuur	23
3 Resultaten veldexperimenten	26
3.1 Monitoring subirrigatie	26
3.1.1 Wateraanvoer	26
3.1.2 Grondwaterstanden	27
3.1.3 Bodemvocht	29
3.2 Monitoring SAWAX-stuw	30
3.3 Ervaring met systemen en veldmetingen	31
3.3.1 Ontwerp en beheer	31
3.3.2 Monitoring	32
4 Deelconclusies	34
Deel B: Modelling en scenarioanalyses	35
5 Modelopzet en scenario's	36
5.1 Modelling: inzicht in componenten van de waterbalans en gewas	36
5.2 Opzet 1D perceelschaal modellen	37
5.3 Opzet 2D perceelschaal modellen	38
5.4 Modelscenario's	38
5.4.1 Variatie timing en hoeveelheid aanvoer	38
5.4.2 Variatie in gewassen	38
5.4.3 Een ander klimaat	39
5.4.4 Verschillen in inrichting	39

6	Modelresultaten	40
6.1	Componenten van de waterbalans	40
6.1.1	Grondwaterniveau	40
6.1.2	Bodemvocht, transpiratie en gewasopbrengst	42
6.1.3	Drainage en infiltratie	43
6.1.4	Kwel en wegzijging	45
6.1.5	Stromingspatronen	46
6.2	Waterbalans op perceelschaal	47
6.3	Modelscenario's	50
6.3.1	Variatie timing en hoeveelheid aanvoer	50
6.3.2	Variatie in gewassen	52
6.3.3	Een ander klimaat	53
6.3.4	Verschillen in inrichting	56
7	Deelconclusies	58
Deel C: Eindconclusies, discussie en aanbevelingen		60
8	Eindconclusies, discussie en aanbevelingen	61
8.1	Eindconclusies	61
8.2	Discussie	64
8.2.1	Veldexperimenten	64
8.2.2	Modelanalyses	66
8.2.3	(Regionale) inpassing van de maatregelen	67
8.3	Aanbevelingen	68
9	Referenties	71
Bijlagen		73
I.	Bodemopbouw	74
II.	SWAP model & SWAP-PEST kalibratie	77
II.1	Opzet SWAP model	77
II.2	Invoer SWAP model	80
II.3	Resultaten kalibratie	86
III.	HYDRUS 2D	88
IV.	Karakteriseren van droogte	91
V.	Meetresultaten	92
VI.	Modelresultaten 2D vergeleken met veldmetingen	95
VII.	Waterbalans	97

1 Inleiding

1.1 Beschikbaarheid zoetwater

Klimaatverandering en beschikbaarheid zoetwater

Klimaatverandering zal in Nederland naar verwachting leiden tot vaker voorkomende en langdurigere droge periodes, maar ook tot intensievere buien (Klein Tank et al., 2014). Uit metingen blijkt al dat de jaarlijkse hoeveelheid neerslag toeneemt¹, evenals de intensiteit en duur van zware buien in de zomer met (lokale) wateroverlast als gevolg. Ook de referentieverdamping vertoont op jaarbasis een stijgende lijn. In het groeiseizoen wordt de kans op langere en intensievere droge periode groter² (Philip et al., 2020). De vraag naar grondwater, bijvoorbeeld voor de productie van drinkwater of voor irrigatie van landbouwgewassen, neemt toe tijdens droge zomers. Uitgaande van het Deltascenario STOOM, is de verwachting dat de druk op het (grond)watersysteem verder toe zal nemen. Het gaat hierbij niet alleen om een grotere watervraag vanuit de landbouw, maar ook vanuit de burger en de industrie (Pronk et al., 2020). Al met al neemt de vraag naar zoet water dus toe, terwijl de beschikbaarheid ervan in de zomerperiode juist afneemt. Het systeem raakt hierdoor verder uit balans³ waardoor de kans op droogteschade aan landbouw, natuur en infrastructuur toeneemt.

Van oudsher is het watersysteem van Nederland ingericht op het snel en intensief afvoeren van water om wateroverlast te voorkomen en de gewenste voorjaarsdrooglegging te realiseren. Agrariërs hebben daarvoor hun land gedraineerd met greppels, sloten en drainagebuizen (Ritzema et al., 2006), terwijl ook de afwatering sterk is vergroot/versneld door de waterschappen. Dit waterbeheer heeft bijgedragen aan een structurele daling van de grondwaterstanden (Knotters and Jansen, 2005). Hoewel wateroverlast en natschade aan gewassen door de ontwatering en afwatering sterk zijn afgenomen, zorgt dit er ook voor dat er in, naar verwachting vaker voorkomende, droge periodes minder water beschikbaar is. Zonder verandering in het waterbeheer, kan de droogteschade in de landbouw oplopen tot 140 miljoen euro per jaar (Klijn et al., 2011), komt de natuur onder druk te staan, en neemt de druk op waterbeschikbaarheid voor drinkwatervoorziening en industrie toe. Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte en natheid voor landbouw én voor andere functies als natuur en drinkwater te beperken zijn dus van groot (economisch) belang.

In Nederland zijn grote delen van de hoge zandgronden (Figuur 1-1) gevoelig voor droogte, omdat hier weinig tot geen water aangevoerd kan worden vanuit het hoofdwatersysteem. In deze regio's wordt daarnaast ook grondwater onttrokken voor de drinkwatervoorziening, de industrie en door agrariërs zelf voor irrigatie van gewassen (van den Eertwegh et al., 2020a). Hoewel wateraanvoer in deze gebieden niet goed mogelijk is kan het bodem- en waterbeheer echter wel anders ingericht worden voor het beperken van risico's en schade door droogte, zonder daarbij het risico op wateroverlast uit het oog te verliezen. Daarvoor hebben waterbeheerders en agrariërs oplossingen nodig om de risico's op reductie in gewasopbrengst door zowel droogte als wateroverlast te beperken en dit in te bedden en af te stemmen met de regionale zoetwateropgave. De uitdaging ligt daarbij in de verschillende tijdschalen waarop droogte en wateroverlast zich manifesteren: wateroverlast komt en gaat snel, terwijl droogte langzaam intreedt en lang na-ijlt. Maatregelen om op steeds grilliger weer te anticiperen liggen dan ook op zowel perceelschaal als regionale schaal (Figuur 1-2). De lokale waterbehoefte moet afgestemd worden met de regionale waterbeschikbaarheid. Dit vraagt om passend bodem- en waterbeheer en een watersysteem met meer sturing en flexibiliteit, zowel op perceelschaal als op schaal van een stroomgebied.

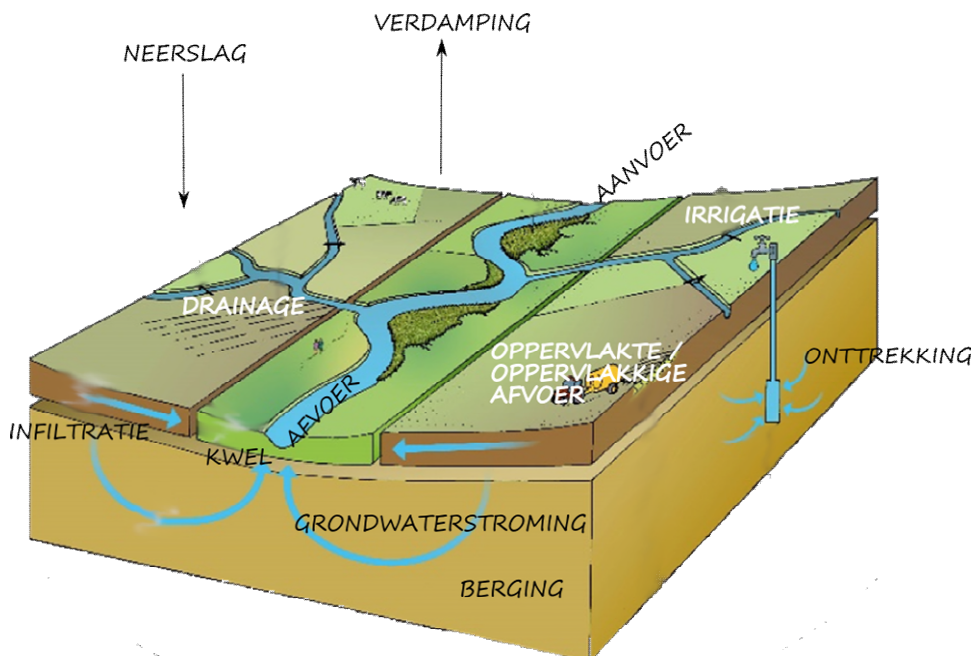
¹ <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0508-jaarlijkse-hoeveelheid-neerslag-in-nederland>

² <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/vaker-droogte-in-het-binnenland>

³ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/attributie-van-de-droogte-van-2018-in-nederland>



Figuur 1-1: Hoge zandgronden in Nederland, met zowel Oost- als Zuid-Nederland (Wing, 2015)



Figuur 1-2: Dwarsdoorsnede van een beekdal en termen van de waterbalans. Voor een robuust watersysteem moeten maatregelen zoveel mogelijk bijdragen aan i) een grotere beschikbaarheid van water en ii) een kleinere druk op het grondwater. Vanuit verschillende compartimenten werken aan het enerzijds vergroten van de aanvulling van grondwater en anderzijds verminderen van de afvoer uit een systeem is van belang om te komen tot een klimaatrobuust stroomgebied (basisfiguur ontleend aan Programma Lumbricus).

Water vasthouden, sparen en aanvullen

Uit de NBW (2006) en DHZ-ZON (2015) is een zogenaamde trits afgeleid voor waterbeheer, om beter bestand te zijn tegen wateroverlast en tegen droogte (Figuur 1-3). De DHZ-ZON 'watertekort-trits' geeft aan hoe we het watertekort en de effecten ervan kunnen reduceren door (1) te sparen in bodem en grondwater, zowel door water beter vast te houden, als het gebruik van het grondwater te verminderen, (2) wateraanvoer via oppervlaktewater en (3) te accepteren en te adapteren. Deze trits sluit aan bij die in het Nationaal Deltaprogramma 2021, waarin in het kader van de deltabeslissing Zoetwater wordt voorgesteld om a) zuinig te zijn met watergebruik, b) water beter vast te houden, c) water slimmer te verdelen en d) schade te accepteren. Als uitgangspunt hierbij wordt genoemd dat de ruimtelijke inrichting van gebieden afgestemd is op de beschikbaarheid van zoet water (zie ook NOVI, 2020).

Voor de hoge zandgronden wordt dus binnen het Deltaplan Zoetwater (Deltaprogramma, 2019) ingezet op het vasthouden en besparen van water. Ondergrondse waterberging en voorraadvorming bieden kansen voor de ontwikkeling van een veerkrachtig watersysteem en een verantwoorde benutting daarvan. In vergelijking met laag-Nederland zijn praktijktoepassingen op de hoge zandgronden in Oost- en Zuid-Nederland echter tot nu toe beperkt, terwijl juist daar droogtegevoelige gebieden liggen, grondwater gewonnen wordt voor drinkwater en de watervraag vanuit meerdere actoren hoog is.

Binnen het in dit rapport beschreven onderzoek zijn veldexperimenten uitgevoerd op de hoge zandgronden met twee specifieke praktijktoepassingen voor het actief beheer van het vasthouden, gebruik en aanvullen van grondwater op perceelniveau: regelbare drainage met subirrigatie ('omgekeerde drainage') en de slimme stuw. De regelbare drainage met subirrigatie wordt specifiek op perceelniveau toegepast, terwijl de slimme stuw het peil in kavelsloten laat meebewegen met het door het waterschap gevoerde peil in de hoofdwatgangen. Beide systemen hebben als doel een bijdrage te kunnen leveren aan het beperken van de effecten van watertekorten, maar ook het voorkómen van wateroverlast: anticiperen op de hydro-meteorologische risico's.



Figuur 1-3: DHZ-ZON-trits uit 2015 (rechterdeel) in combinatie met de VBA-trits NBW uit 2006 (linkerdeel).

Programma Lumbricus

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven maakt onderdeel uit van het thema Bewuste Bodem van het Programma Lumbricus (looptijd 2016-2020). Programma Lumbricus is een samenwerkingsprogramma met onderzoeksinstituten, regionale partijen en lokale agrariërs en terreinbeherende organisaties, waar doelstellingen met betrekking tot waterkwaliteit, zoetwatervoorziening, bodembeheer, klimaatadaptatie en waterveiligheid samenkomen. Kern van het Programma Lumbricus is het ontwikkelen en implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van innovatieve maatregelen op het gebied van bodem, ondergrond en water. Het Lumbricus-thema Bewuste Bodem richt zich op de bodem als sleutel in vocht- en nutriëntenvoorziening voor landbouw en natuur en op een duurzaam bodem- en waterbeheer voor een gezonde bodem in relatie tot gebruiksfuncties. Het thema richt zich met name op de effectiviteit van

hydrologische en bodemaatregelen op perceelniveau en de verbetering van modellen om de effectiviteit te kunnen beoordelen.

1.2 Maatregelen

1.2.1 Regelbare drainage met subirrigatie

Draineren, vasthouden en aanvullen

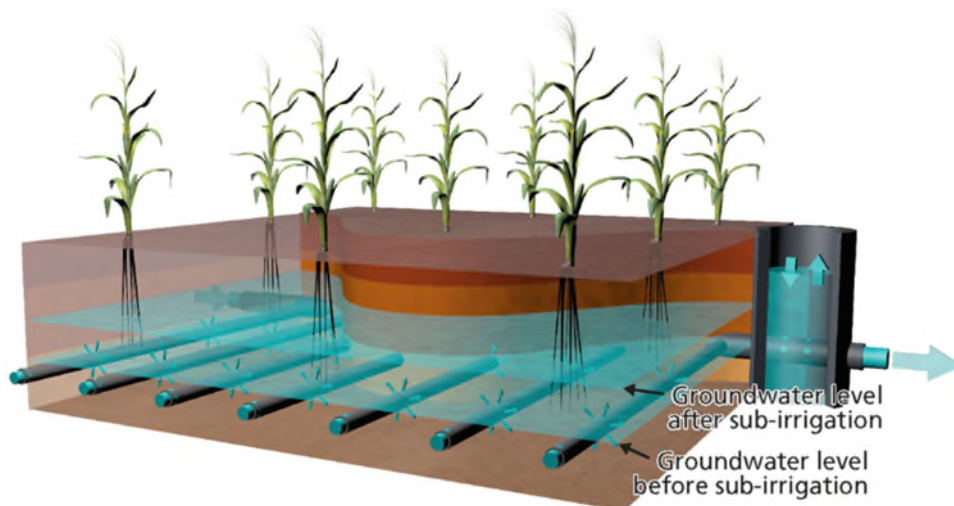
Conventionele buisdrainage is aangelegd om water te draineren en af te voeren naar een sloot, waarbij de drainagebuizen meestal vrij (boven het slootpeil) kunnen uitstromen. Deze drainage is niet stuurbaar, want zodra grondwaterstanden boven het niveau van de drainagebuizen (dan wel slootpeil) komen, start het afvoerproces. Als de slootpeilen hoger zijn dan de drainagebuizen, dan wordt de eventuele afvoer gestuurd en daardoor verminderd. Op deze manier kan een drainagesysteem peilgestuurd worden gemaakt.

Een regelbaar drainagesysteem, zoals toegepast in dit onderzoek, kent een dichte verzamelbuis, waarin alle drainagebuizen uitmonden, en een regelput. In de regelput kan een drempel bediend worden, die de drainagebasis bepaalt, los van de ontvangende sloot. Regelbare drainage is ontwikkeld om zowel water te kunnen afvoeren als vasthouden in de bodem van het perceel. Dit systeem maakt het mogelijk om piekafvoeren te verminderen en heeft het voordeel dat het grondwaterniveau en de bodemvochtcondities actief gestuurd kunnen worden (Ayars et al., 2006).

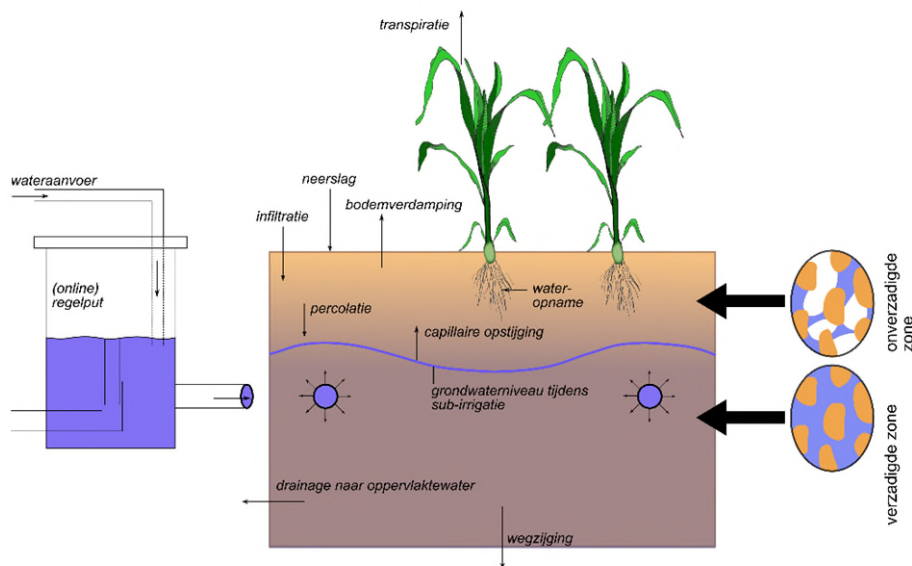
Een regelbaar drainagesysteem bestaat uit een (eventueel al eerder aangelegd) stelsel van drainagebuizen (Figuur 1-4). In het algemeen worden de drainagebuizen op ongeveer 6 - 10 meter afstand parallel aangelegd op een diepte van zo'n 1.2 meter-mv. In plaats van elke buis af te laten voeren op een waterloop, zoals veelal bij conventionele drainage gebeurt, wordt het drainagebuizenstelsel samengebracht via een verzamelleiding, loodrecht op het drainagebuizensysteem. Deze verzamelleiding wordt aangesloten op een regelput, waarmee het drainageniveau en daarmee de drainagebasis actief geregeld kan worden. Hiermee kan water worden afgevoerd als het te nat is ('grondwaterstand boven gewenst ontwateringsniveau'), maar ook worden vastgehouden als drainage en daarmee afvoer van perceelwater ongewenst is.

Door actief water aan te voeren, de drainagebasis te verhogen en de waterhoogte in de put te verhogen tot boven de actuele grondwaterstand in het veld, verandert het drainagesysteem in een infiltratiesysteem. Water infiltreert dan via de drainagebuizen en voedt het grondwater; de grondwaterstand stijgt en via bijbehorende toename van de capillaire opstijging naar de wortelzone worden plantenwortels beter en langer van water voorzien. We noemen dit subirrigatie (Figuur 1-4 en Figuur 1-5). Het doel van subirrigatie is dus om de grondwaterstand en daarmee ook het vochtgehalte in de wortelzone van de plant te verhogen. Het uiteindelijke effect van subirrigatie op de gewasopbrengst en op verschillende componenten van de waterbalans (Figuur 1-5) hangt af van het gewas, de bodemopbouw, het bodemtype en het regionale grondwatersysteem (Bartholomeus et al., 2019). Voor de wateraanvoer kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen: oppervlaktewater, gezuiverd restwater (industriële effluent, RWZI-effluent), of grondwater.

Een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie heeft uiteindelijk drie opties: water draineren, vasthouden én aanvullen. Zo kan gestuurd worden op optimale condities voor het gewas en kan een agrariër het bodemvochtgehalte en de grondwaterstand op zijn perceel actief beheren.



Figuur 1-4: Schematische weergave van een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie. De drainagebuizen worden samengebracht via een verzamelleiding, welke is aangesloten op een regelput, waarmee het drainageniveau en de drainagebasis actief geregeld kan worden. Door het waterniveau in de regelput via externe wateraanvoer te verhogen wordt het systeem gebruikt voor subirrigatie, met als doel het verhogen van de grondwaterstand. De figuur is ontleend aan (Narain-Ford et al., 2020).



Figuur 1-5: Schets van subirrigatie met continue wateraanvoer, waarmee de grondwaterstand en bodemvochtgehalte geregeld kan worden. Subirrigatie werkt door in verschillende componenten van de waterbalans.

Sturen van regelbare drainage met subirrigatie

Het sturen van een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie gebeurt via het peil in de regelput aan de afvoerszijde. Dat kan automatisch worden geregeld, bijvoorbeeld mechanisch via een vlottersysteem of elektronisch via een drukmeter, en kan al dan niet worden gecombineerd met een management-algoritme:

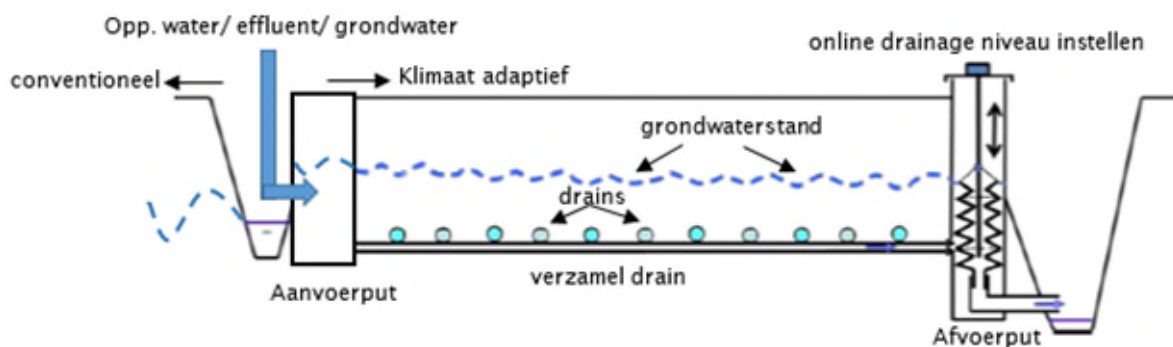
- Een vlottersysteem of drukopnemer kan gebruikt worden voor automatische aansturing van de pomp voor wateraanvoer als functie van de waterstand in de regelput (Figuur 1-6). Indien de waterstand in deze put boven het ingestelde peil komt, stopt de pomp. Indien de waterstand in de regelput onder (bijvoorbeeld 15 cm) het ingestelde peil komt, slaat de pomp aan.
- Met een management algoritme kan de sturing van voorgaande in de tijd worden gevarieerd.

In een deel van de proeven in deze studie is gebruik gemaakt van Klimaat Adaptieve Drainage (KAD): een regelbaar drainagesysteem waarin het drainageniveau via telemetrie (TMX) op afstand mechanisch en stapsgewijs bestuurd kan worden (Figuur 1-7) en waarin tenminste de grondwaterstand als effectmeting wordt geregistreerd (van Bakel

et al., 2013; van den Eertwegh et al., 2013). Het KAD-systeem kan zowel op zonne-energie als op netspanning werken. Het peil in de afvoerput kan automatisch beheerd worden met behulp van het KAD-management-algoritme (Bartholomeus et al., 2015a; Bartholomeus et al., 2015b). Het KAD-management-algoritme combineert veldmetingen, weersvoorspellingen en modelsimulaties voor een aanbevolen drainageniveau in het KAD-systeem. Het aanbevolen KAD-niveau is erop gericht om zowel natschade door zuurstofstress als het onnodig afvoeren van water te voorkomen: water vasthouden zolang het kan, alleen afvoeren als het moet. Een uitgebreidere omschrijving van de automatische sturing is te vinden in De Wit et al. (2021).



Figuur 1-6: Vlottersysteem dat zorgt voor de aansturing van de pomp als functie van de waterstand in de regelput bij de grondwaterproef in America.



Figuur 1-7: Schematische weergave regelbare drainage met KAD-management-algoritme. Links de grondwaterstand zonder regelbare drainage, rechts de geschatte grondwaterstand met regelbare drainage. Aanvoer van water kan onder andere oppervlaktewater, effluent of grondwater zijn. Het drainageniveau kan via een online KAD-management-algoritme dagelijks automatisch gestuurd worden (Bartholomeus et al., 2015b).

1.2.2 SAWAX slimme stuw

Een slimme stuw ofwel Smart Adaptive Waterlevel eXtender (SAWAX, Figuur 1-8) heeft als doel om waterpeilen in watergangen, die operationeel beheerd worden door het waterschap, mechanisch automatisch door te vertalen naar (instelbaar) hogere peilen in de aangesloten watergangen bovenstrooms van de stuw (van Bakel et al., 2019; van Bakel et al., 2020; van den Eertwegh et al., 2018; van den Eertwegh et al., 2020b). Deze laatste watergangen zijn typisch niet in dagelijks operationeel beheer van het waterschap, zoals kavelsloten van agrariërs. De toepassing van SAWAX is ontstaan om ten tijde van afvoer van neerslagoverschot, hetgeen veelal gepaard gaat met peilstijgingen in het open water, bovenstrooms automatisch hogere waterpeilen te realiseren. Hierdoor wordt bovenstrooms door hogere waterpeilen meer water geborgen in de sloten én meer water vastgehouden in aangrenzende percelen, omdat de ontwatering tijdelijk wordt verminderd. Als de waterpeilen weer zakken na een

afvoergolf, dan zakt de SAWAX stuw automatisch mee. Zo ondersteunt de SAWAX het verminderen van benedenstroomse wateroverlast door bovenstrooms water te bergen en water vast te houden, door variabele stuwpeilen mogelijk te maken. Het is raadzaam voor de operationele situatie om niet één de SAWAX te plaatsen in een bovenstrooms deel van een gebied, nabij of in de haarvaten, maar een aantal SAWAX-stuwen te combineren. Zo wordt het bereik van het door het waterschap gevoerde peilbeheer over een veel grotere oppervlakte uitgebreid en effectief ('extender').

In droge tijden kan de SAWAX optioneel uitgebreid worden met een wateraanvoervoorziening, bijv. een pomp op zonne-energie. Als er benedenstrooms van de SAWAX water beschikbaar is, kan water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden aangevoerd om ook in de zomerperiode wateraanvoer en een gewenst peilverschil te realiseren (van Bakel et al., 2019). De bovenstroomse peilverhoging heeft als doel water vast te houden en daarmee de grondwaterstand in bovenstrooms aangrenzende percelen te verhogen. De hydrologische eigenschappen van de locatie zijn mede bepalend voor het succesvol toepassen van de SAWAX. Naarmate er meer water bovenstrooms infiltreert, zal er een groter watervolume nodig zijn om de hogere waterpeilen bovenstrooms te realiseren en te handhaven.



Figuur 1-8: SAWAX (2.0) stuw in Stegeren (foto's: Gé van den Eertwegh), waarmee in de bovenstroomse haarvaten van het watersysteem een tot 0.5 m hoger waterpeil gerealiseerd kan worden dan in de benedenstroomse leggerwaterloop. Het bereik van het door het waterschap gevoerde peilbeheer kan zo tot in de haarvaten effectief worden.

1.3 Doelstelling, onderzoeksvragen en methode

De maatregelen regelbare drainage met subirrigatie en een slimme stuw in de haarvaten via SAWAX (paragraaf 1.2) beogen een bijdrage te kunnen leveren aan het vasthouden, sparen en aanvullen van water in stroomgebieden (paragraaf 1.1): water zoveel mogelijk vasthouden, aanvullen waar het kan en afvoeren als het moet. Echter, er is weinig praktijkervaring opgedaan met deze maatregelen en kwantitatieve informatie over het effect van de maatregelen op de verschillende componenten van de waterbalans, de grondwaterstand, het bodemvochtgehalte en gewasgroei ontbreekt.

Doelstelling

Het doel van dit project is:

- in de praktijk ervaring opdoen met en kwantitatieve informatie verzamelen over de werking van:
 - regelbare drainage met subirrigatie, bij verschillende uitgangssituaties (bodem, waterbeheer) en gebruik van verschillende bronnen van water (oppervlaktewater, gezuiverd restwater, grondwater)
 - een slimme regelbare stuw in de haarvaten via SAWAX

om daarmee:

- de bijdrage van de maatregelen op de waterbeschikbaarheid voor landbouwgewassen te kwantificeren (perceel – agrariër);
- het effect van de maatregelen op verschillende componenten van de lokale (perceelschaal) waterbalans te kwantificeren, met een doorkijk naar regionale schaal (perceel – regio – waterschap);
- inzicht te geven in de kansen en knelpunten voor inpassing van de maatregelen in het regionale waterbeheer, waarin water in een gebied wordt vastgehouden en benut, en de druk op het grondwater wordt verminderd.

Onderzoeksvragen

Deze doelstelling vertaalt zich in de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is het effect van regelbare drainage met subirrigatie op de grondwaterstand en vochtvoorziening voor het gewas en wat zijn de hydrologische randvoorwaarden voor succesvolle inpassing?
2. Wat is het effect van SAWAX op het oppervlaktewaterpeil in kavelsloten en wat zijn de hydrologische randvoorwaarden voor succesvolle inpassing?
3. Wat is het effect van de maatregelen op de verschillende componenten van de waterbalans op perceelsniveau?
4. Welke aspecten moeten worden meegenomen in (regionale) inpassing van de maatregelen?

Methode

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is het in deze rapportage beschreven onderzoek uitgewerkt in drie onderdelen:

- A. Veldexperimenten: er zijn veldexperimenten uitgevoerd met regelbare drainage met subirrigatie en een slimme stuw. De effecten van de maatregelen zijn bemeten om kwantitatieve informatie over de werking van de systemen te verzamelen (dit rapport bevat de metingen tot maart 2020). Daarnaast zijn de ervaringen met de systemen (aanleg, aansturing / beheer) vastgelegd.
- B. Modellering en scenarioanalyses: op basis van monitoring van de veldexperimenten zijn de maatregelen geschematiseerd met hydrologische modellen, waarmee:
 - a. effecten van de maatregelen op niet in het veld bemeten componenten van de waterbalans en gewasopbrengst geduid kunnen worden;
 - b. verschillen in de werking van de systemen als gevolg van verschillende perceelskenmerken / hydrologische randvoorwaarden tussen proeflocaties geduid kunnen worden en zo veldstudies opgeschaald kunnen worden naar meer generieke inzichten;
 - c. regelbare drainagesystemen geautomatiseerd kunnen worden beheerd;

- d. effecten van de maatregelen berekend kunnen worden voor omstandigheden die anders zijn dan in de veldexperimenten, te weten:
 - i. meerdere jaren (het huidige klimaat, i.e. 30 jaar periode)
 - ii. variatie in aansturing van systemen (timing en hoeveelheid wateraanvoer)
 - iii. variatie in gewassen
 - iv. een ander klimaat
 - v. verschillen in inrichting
- C. Eindconclusies, discussie en aanbevelingen: integratie van onderdelen A en B, en beantwoording van de onderzoeksvragen.

1.4 Leeswijzer

De opzet van het rapport volgt de hierboven genoemde onderdelen A, B en C:

- A. Veldexperimenten: omvat achtereenvolgens de beschrijving van de veldexperimenten (H2), de resultaten ervan (H3) en deelconclusies (H4)
- B. Modelling en scenarioanalyses: omvat achtereenvolgens de modelopzet en definitie van de modelscenario's (H5), de modelresultaten, gericht op de verschillende componenten van de waterbalans, en modelscenario's (H6) en deelconclusies (H7)
- C. Eindconclusies, discussie en aanbevelingen, waarin we terugkomen op de gestelde doelen en onderzoeksvragen van het onderzoek.

NB: Dit rapport richt zich op de effecten van de maatregelen op de waterkwantiteit. Effecten op de waterkwaliteit van subirrigatiesystemen waarbij gezuiverd restwater wordt gebruikt zijn eerder beschreven in Bartholomeus et al. (2018a); Bartholomeus et al. (2017); Bartholomeus et al. (2016); Bartholomeus et al. (2018c) en Stofberg et al. (2021).

Deel A: Veldexperimenten

Meetresultaten uit verschillende veldexperimenten zijn gebruikt om een onderbouwd beeld te krijgen van de werking van regelbare drainage met subirrigatie en de SAWAX-stuw. De veldexperimenten dragen gezamenlijk bij aan de benodigde kennisontwikkeling over de werking van de systemen. In dit hoofdstuk geven we eerst een overzicht van de opzet van de verschillende experimenten, de toegepaste maatregelen en de meetopstellingen (H2). Vervolgens beschrijven we de meetresultaten van de veldexperimenten (H3.1 en 3.2). In hoofdstuk 3.3 geven we een overzicht van de praktijkervaringen met de systemen en de monitoring. We sluiten af met deelconclusies (H4).

2 Beschrijving veldexperimenten

2.1 Locatiebeschrijvingen case-studies

Op vijf plekken op de Hoge Zandgronden zijn experimenten met regelbare drainage met subirrigatie opgezet, waarvan de resultaten zijn gebruikt in deze studie (Tabel 2-1, Figuur 2-1). Voor het experiment ingericht bij Vinkel zijn de resultaten nog niet beschikbaar; dit experiment wordt daarom in deze rapportage verder niet meegenomen, maar wordt opgenomen in het onderzoeksprogramma KLIMAP. Voor het behalen van de onderzoeksdoelen zijn bevindingen uit de overige vier experimenten met regelbare drainage met subirrigatie gecombineerd. Daarnaast bevindt zich bij Stegeren een SAWAX-stuw.

De systemen van de proeven met regelbare drainage met subirrigatie zijn in de basis hetzelfde, maar zijn net iets anders aangelegd. Met name de sturing van het drainageniveau in de systemen is verschillend:

- Bij America wordt het niveau geregeld met een vlotter in de regelput, waarbij het vlottersysteem zo is ingesteld dat als de waterstand in de regelput boven het ingestelde peil komt, de pomp stopt.
- In Lieshout wordt het waterniveau in de regelput ingesteld vanuit de waterzuivering en wordt de wateraanvoer hierop automatisch aangepast.
- In Stegeren en Haaksbergen wordt gestuurd met een KAD-systeem; in Stegeren gebeurt dit automatisch via een management-algoritme en in Haaksbergen wordt het drainageniveau handmatig, maar online, ingesteld.

Daarnaast maken de veldexperimenten gebruik van verschillende bronnen van water: oppervlaktewater, gezuiverd restwater en grondwater (Tabel 2-1). Specifieke kenmerken van elk veldexperiment worden hieronder kort toegelicht.

Tabel 2-1: Kenmerken van de verschillende veldexperimenten

	Noord Brabant		Limburg	Overijssel		
	Lieshout	Vinkel*	America	Haaksbergen	Stegeren subirrigatie	Stegeren SAWAX
Maatregel**	Vlotter systeem	Subirrigatie, greppelirrigatie, berekening	Vlotter systeem	KAD sturing	Automatische KAD sturing	SAWAX-stuw
Bron wateraanvoer	Effluent – Bavaria	Oppervlakte- & grondwater	Grondwater	Effluent – RWZI	Oppervlakte water	Oppervlakte water
Ondergrond	Zand, leemlaag > 1 á 1.5 m	Zand	Zand, leemlaag op 2-2.5 meter	Zand, leemlaag vanaf 3 m	Zand, leemlaag op 3 m	Zand, geen leemlaag
Gewas	Gras	Graszoden	Gras	Maïs	Gras	Gras
Monitoring	2015 - 2020	2020 – 202x	2017 -2020	2016 - 2020	2018 - 2020	2018 - 2020

* Voor het experiment ingericht bij Vinkel zijn de resultaten nog niet beschikbaar. Dit experiment wordt daarom niet verder beschreven.

** De werking van de maatregelen is beschreven in paragraaf 1.2



Figuur 2-1: Overzicht met de locaties van de veldexperimenten met regelbare drainage met subirrigatie en SAWAX-stuw.

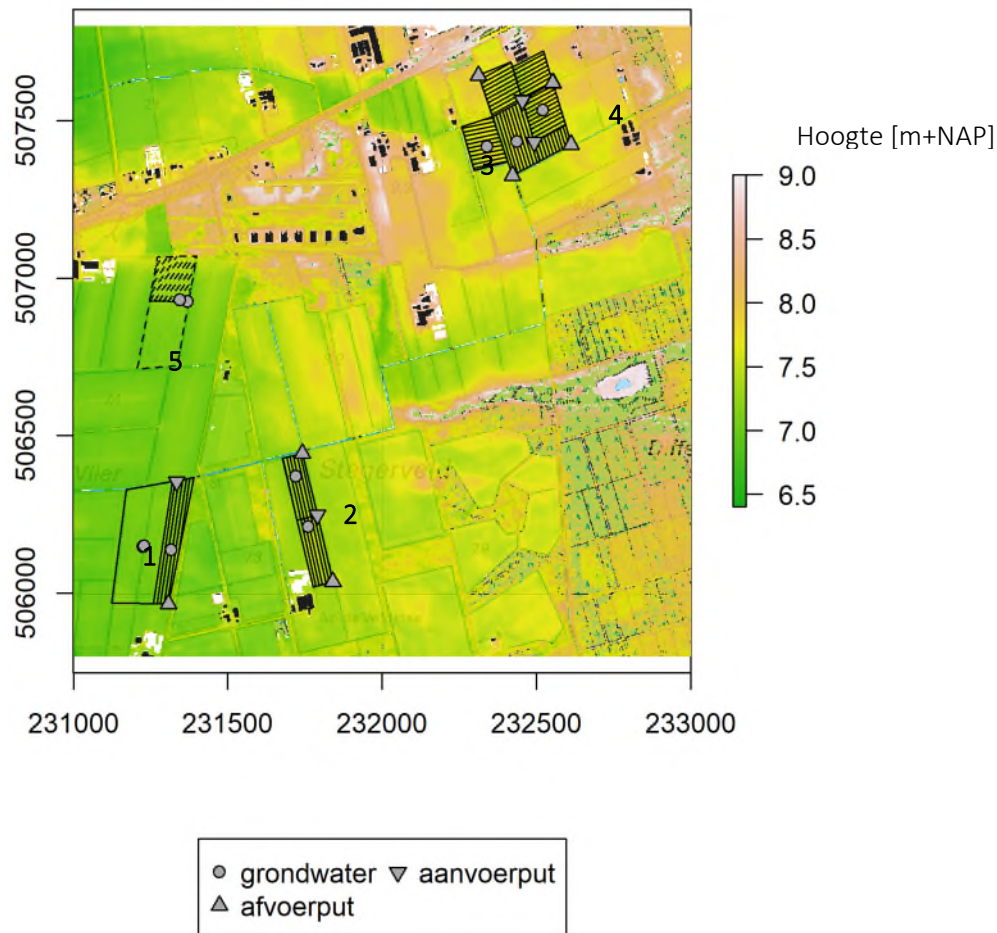
2.1.1 Stegeren - KAD met subirrigatie uit oppervlaktewater en SAWAX-stuw

In 2018 is bij vier agrariërs in Stegeren (Overijssel) een systeem voor regelbare drainage met subirrigatie aangelegd (locaties 1, 2, 3, 4 in Figuur 2-2). Bij alle systemen wordt water voor subirrigatie aangevoerd vanuit het oppervlaktewater. Vanuit het zuiden van het gebied wordt 's zomers water uit de Vecht aangevoerd om de oppervlaktewaterniveaus op peil te houden. Op locatie 1 (Figuur 2-2) is uitgebreid gemonitord om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van de waterbalans van het perceel. Tevens wordt hier automatische KAD-sturing toegepast. Het regelbaar drainagesysteem met subirrigatie bestaat hier uit negen drainagebuizen, op een afstand van zes meter uit elkaar en ongeveer 320 meter lang.

In de overige proefpercelen met subirrigatie in Stegeren zijn alleen grondwaterstanden bemeaten. De meetresultaten voor deze proeven zijn beschreven in De Wit et al. (2021) en maken geen onderdeel uit van deze rapportage.

Bij een vijfde agrariër zijn op het proefperceel geen drainagebuizen aangelegd, maar is een SAWAX-stuw geplaatst in een watergang die beheerd wordt door de agrariër (locatie 5, Figuur 2-2). De watergang staat wel in verbinding met een waterloop van het waterschap. Het perceel bij de SAWAX stuw is uitgebreid gemonitord om de werking van de SAWAX-stuw in beeld te brengen.

De proefpercelen nabij Stegeren liggen ten westen van Hardenberg, ten noorden van De Vecht en ten oosten van Ommen. Geologisch gezien is het een heterogeen gebied met vier watervoerende pakketten. De toplaag wordt gevormd door de ongeveer 8 m dikke zandige Formatie van Boxtel (± 8 m+NAP tot ± 0 m+NAP), gevolgd door de zandige Formatie van Kreftenheye (± 0 m+NAP tot ± 10 m-NAP).



Figuur 2-2: Overzicht meetopstellingen in Stegeren. Bij vier agrariërs is een subirrigatiesysteem geïnstalleerd, bij één agrariër (nummer 5) is een SAWAX-stuw geïnstalleerd. De zwarte strepen op het proefveld geven het buizensysteem aan. De meetresultaten van locaties 2 (KAD met subirrigatie) en 5 (SAWAX) zijn gebruikt voor de analyses in dit rapport. De resultaten van de overige locaties zijn beschreven in De Wit et al. (2021)

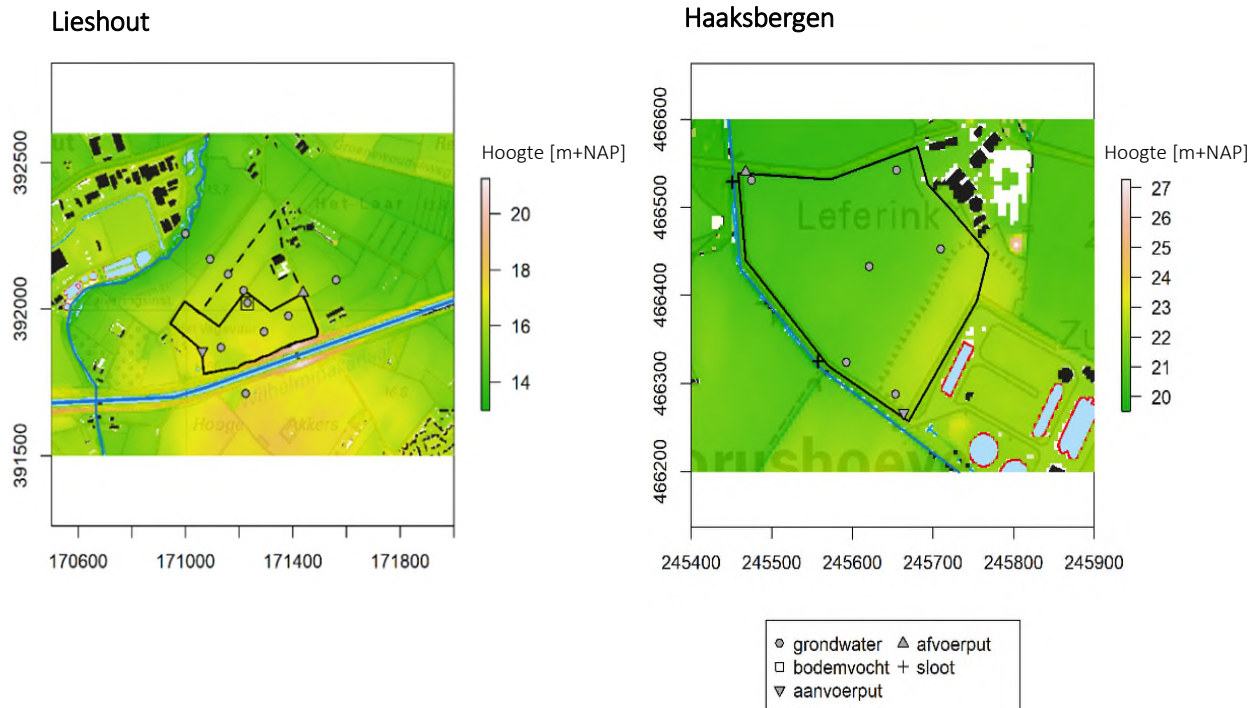
2.1.2 Haaksbergen - subirrigatie met gezuiverd RWZI-effluent

Het experiment met subirrigatie bij Haaksbergen is in 2015 ingericht (Figuur 2-3) en wordt nog steeds gevolgd (2021). Dit proefperceel ligt direct naast de RWZI Haaksbergen. Het aangevoerde water in deze veldproef is het effluent (gezuiverd restwater) van de naastgelegen RWZI. De meetopstelling is ingericht voor het monitoren van de verspreiding van het subirrigatiewater in zowel horizontale als verticale richting, inclusief verspreiding van stoffen in het effluent, zoals resten van geneesmiddelen (Bartholomeus et al., 2017; Bartholomeus et al., 2016; Stofberg et al., 2021). Vanwege de ligging van het perceel, liggen de drainagebuizen in een drietal 'waaiers' en dus niet helemaal parallel. Op het perceel wordt al jaren maïs verbouwd. Uit bodemonderzoek is gebleken dat het perceel heterogeen van aard is. Door deze heterogeniteit kan de ondergrond voor lokale verschillen in doorlatendheid zorgen. In het bodemprofiel, gemaakt midden op het perceel tussen de drains (Bijlage I, Figuur I-1), zijn er verschillende (dikkere) leemlagen te zien.

2.1.3 Lieshout - subirrigatie met gezuiverd industrieel-effluent

Ten zuidoosten van Lieshout is in 2015 een veldexperiment met subirrigatie aangelegd (Figuur 2-3). Het proefperceel, dat 8.5 ha groot is en met een hoogteligging tussen 15.5 en 17.2 m+NAP, heeft in de zomer grondwaterstanden dieper dan twee meter beneden maaiveld. Het aangevoerde water is effluent afkomstig van de nabijgelegen waterzuivering van Bavaria. De drainagebuizen liggen op afstand van 10 meter uit elkaar. Er wordt al jaren gras, en soms op delen ook maïs, verbouwd op het perceel. De veldproef is in detail beschreven in Bartholomeus et al. (2018c). Het perceel grenst aan de Goorloop met een oppervlaktewaterpeil variërend tussen 12.5 en 13.6 m+NAP en het Wilhelminakanaal met een constant peil van 15 m+NAP. In het gebied waarin het

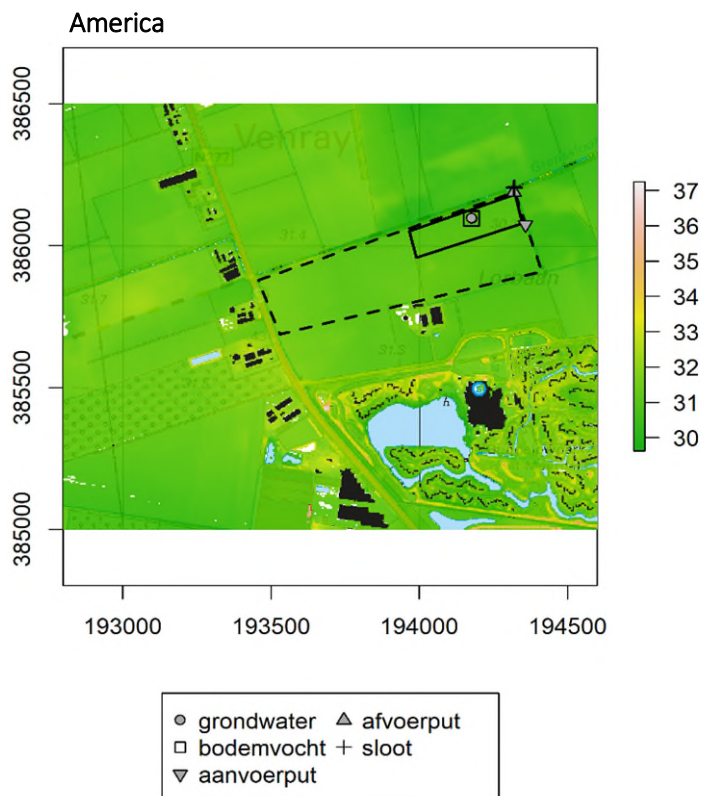
proefperceel ligt bestaat het topsysteem (0–30 m-mv) uit de Nuene Groep, een sterk gelaagd pakket zand-, leem- en veenafzettingen (Broks, 1989; Jalink et al., 2000). Uit lokaal bodemonderzoek (beschreven in Bartholomeus et al. (2018c)) is gebleken dat er in het proefperceel sprake is van een goed doorlatende bovengrond (bovenste 1 á 1.5 m), met daaronder een relatief slecht doorlatende ondergrond (leemlagen) (Bijlage I, Figuur I-1). De drainage-/infiltratiebuizen liggen in deze goed doorlatende bovengrond.



Figuur 2-3: Overzicht meetopstelling in Lieshout (links) en in Haaksbergen (rechts).

2.1.4 America - subirrigatie uit grondwater

In 2016 is een subirrigatiesysteem geïnstalleerd op basis van een regelbaar drainagesysteem op een graslandperceel in America (Limburg) (Figuur 2-4). Het perceel heeft een oppervlakte van 3.77 ha en is deels regelbaar gedraineerd. Het perceel ligt buiten de bufferzone van de Mariapeel. Er zijn 12 drainagebuizen geïnstalleerd op een afstand van 5 meter uit elkaar, gevolgd door 6 drainagebuizen op een afstand van 6 meter. De drainagebuizen zijn ongeveer 400 m lang. Het aangevoerde water wordt onttrokken grondwater uit een naastgelegen grondwaterput met een filter op 11-16 m-mv. De pompcapaciteit is maximaal 10 m³/u. De veldproef is gedetailleerd beschreven in Bartholomeus et al. (2018a). De bodemopbouw bestaat uit een goed doorlatende zandige bovengrond met een leemlaag van 0.3 m dik op ongeveer 2 m-mv (Figuur I-2). Onder de leemlaag bevindt zich weer zand.



Figuur 2-4: Overzicht meetopstelling in America.

2.2 Meetopstellingen en apparatuur

Voor de monitoring en analyse van de effecten van subirrigatie met verschillende bronnen van water, en de SAWAX stuw zijn neerslag, slootpeilen, aanvoer- en afvoerdebieten, grondwaterstanden en bodemvochtgehalten gemeten. Voor Lieshout en Haaksbergen zijn ook uitgebreid waterkwaliteitsaspecten gemeten en voor alle locaties het geleidingsvermogen van aanvoerwater en grondwater (EGV), maar deze zijn niet verwerkt in dit onderzoek.

In deze paragraaf geven we eerst een algemene beschrijving van de technieken en de wijze van interpretatie van de meetresultaten. Vervolgens geven we een overzicht van de meetopstelling per proeflocatie (Tabel 2-2, Figuur 2-2, Figuur 2-3, Figuur 2-4).

Neerslag

Neerslag wordt elke 15 minuten geregistreerd door een neerslagmeter. Neerslag en het aangevoerde water vormen gezamenlijk de wateraanvoer, waarvan een deel naar de vochtvoorziening van het gewas gaat. Aanvullend is voor meteorologische gegevens gebruik gemaakt van gegevens van het KNMI.

Hoeveelheid aanvoerwater

De hoeveelheid aanvoerwater, wordt continu gemeten met een debietmeter. Op de verschillende proeflocaties staan verschillende typen debietmeters:

- In Stegeren (subirrigatie) en Haaksbergen is een (Kamstrup) MULTICAL 21/ flowIQ debietmeter geïnstalleerd in de aanvoerput, die continu het aandebiet registreert. Het water dat wordt aangevoerd, maar niet infiltreert, wordt aan het eind van een systeem weer afgevoerd. De afvoer wordt op deze locaties gemeten met een MULTICAL 21/ flowIQ meter.
- In Lieshout wordt het aangevoerde debiet continu gemeten bij het verdeelwerk op het Bavaria-terrein. Afvoer wordt hier niet met een debietmeter gemeten.

- In America wordt het debiet ieder uur met behulp van een camera gemonitord. De hoeveelheid aanvoer van water is gelijk aan de infiltratiehoeveelheid, zolang er geen water wordt afgevoerd. Afvoer wordt hier niet met een debietmeter gemeten.
- In Stegeren (SAWAX) wordt de hoeveelheid water, die van benedenstrooms van de SAWAX-stuw naar bovenstrooms wordt gepompt, gemonitord met een MULTICAL 21/flowIQ meter.

Waterpeil

Het waterpeil in aangrenzende sloten van de proefpercelen wordt gemeten met Kellerdrukopnemers en CTD-10 sensoren om de relatie tussen het slootpeil en grondwaterstand in het perceel te monitoren. Het waterpeil in de aan- en afvoerputten wordt ook gemeten met Kellerdrukopnemers en CTD-10 sensoren.

Grondwaterstand

Grondwaterstanden worden op verschillende locaties geautomatiseerd (met Kellerdrukopnemers en CTD-10 sensoren) en handmatig (ten behoeve van de correctie van de automatische gegevens) gemeten. De automatische metingen worden elke 15 minuten geregistreerd. Grondwaterstanden worden tussen twee drains en direct naast een drain gemeten. De waarnemingen direct naast en tussen de drains geven weer in welke mate de grondwaterstand wordt verhoogd als gevolg van subirrigatie, en hoe het verloop tussen twee drains is. Daarnaast wordt het grondwater ook op locaties nabij de percelen gemeten ten behoeve van het monitoren van de uitstralingseffecten van subirrigatie in de omgeving. De CTD-sensoren (Conductivity, Temperature, Depth) meten naast de grondwaterstand ook het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) en temperatuur van het water. Met deze sensoren kan een indicatie gemaakt worden van het soort water dat ter plekke in de bodem aanwezig is (neerslag, aangevoerd water, mengvorm).

Bodemvochtgehalte

Het doel van subirrigatie is om via een stijging van het grondwaterniveau de vochtbeschikbaarheid voor het gewas te verbeteren. De directe vochtbeschikbaarheid is moeilijk te meten, maar het bodemvochtgehalte (fractie hoeveelheid water aanwezig in de bodem) is op alle locaties op drie verschillende dieptes gemeten. Bodemvochtgehalten worden gemeten met EC-5 of 5TE sensoren (Meter Group). Deze zijn in het midden van het perceel op verschillende dieptes (bijvoorbeeld 20 cm, 40 cm en 60 cm-mv) tussen twee drains en direct naast een drain geïnstalleerd. Elke 15 minuten wordt een waarneming geregistreerd en de waarnemingen worden dagelijks geautomatiseerd uitgelezen via een telemetrieservice. Waarnemingen geven weer of en in welke mate het bodemvocht in de wortelzone verhoogd wordt als gevolg van subirrigatie.

Tabel 2-2: Overzicht aanwezige meetapparatuur per proef.

	Lieshout	Haaksbergen	America	Stegeren (subirrigatie)	Stegeren (SAWAX)
Bodemvocht	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Neerslag	Ja	Nee	Nee	Ja	Nee
Grondwaterstand	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Aanvoerput - debiet	Ja	Ja (flowIQ)	Ja (camera)	Ja (flowIQ)	n.v.t.
Afvoerput - debiet	Nee	Ja (flowIQ)	Nee	Ja (flowIQ)	n.v.t.
SAWAX-stuw	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	Ja (flowIQ)
Slootpeil	Nee, data via waterschap	Ja	Ja	Ja	Ja
KNMI station	370 (Eindhoven)	674, 682, 290 en 283 ⁴	391 (Arcen)	278, 290 ⁵	278

⁴ Op basis van neerslagstations Rekken (674) en Markelo (682) is de neerslag geschat, de referentie-gewasverdamping is berekend volgens Makkink via KNMI AWS Twente (290) en Hupsel (283).

⁵ De referentie-gewasverdamping is berekend volgens Makkink via KNMI AWS Twente (290) voor de SWAP simulaties en Heino (278) voor de SWAP-PEST kalibratie. Voor de SWAP scenario simulaties is tussen 1990-2000 meteorologische gegevens van het KNMI AWS Twente (290) gebruikt, tussen 2000-2019 zijn de meteorologische gegevens van het KNMI AWS Heino (278) gebruikt.

3 Resultaten veldexperimenten

In de volgende secties worden de gemeten waarden van de hydrologische situatie (wateraanvoer, grondwaterstand, bodemvocht) weergegeven voor de veldproeven met regelbare drainage met subirrigatie en de SAWAX-stuw. Ook geven we een overzicht van de praktijkervaringen met de systemen en de monitoring.

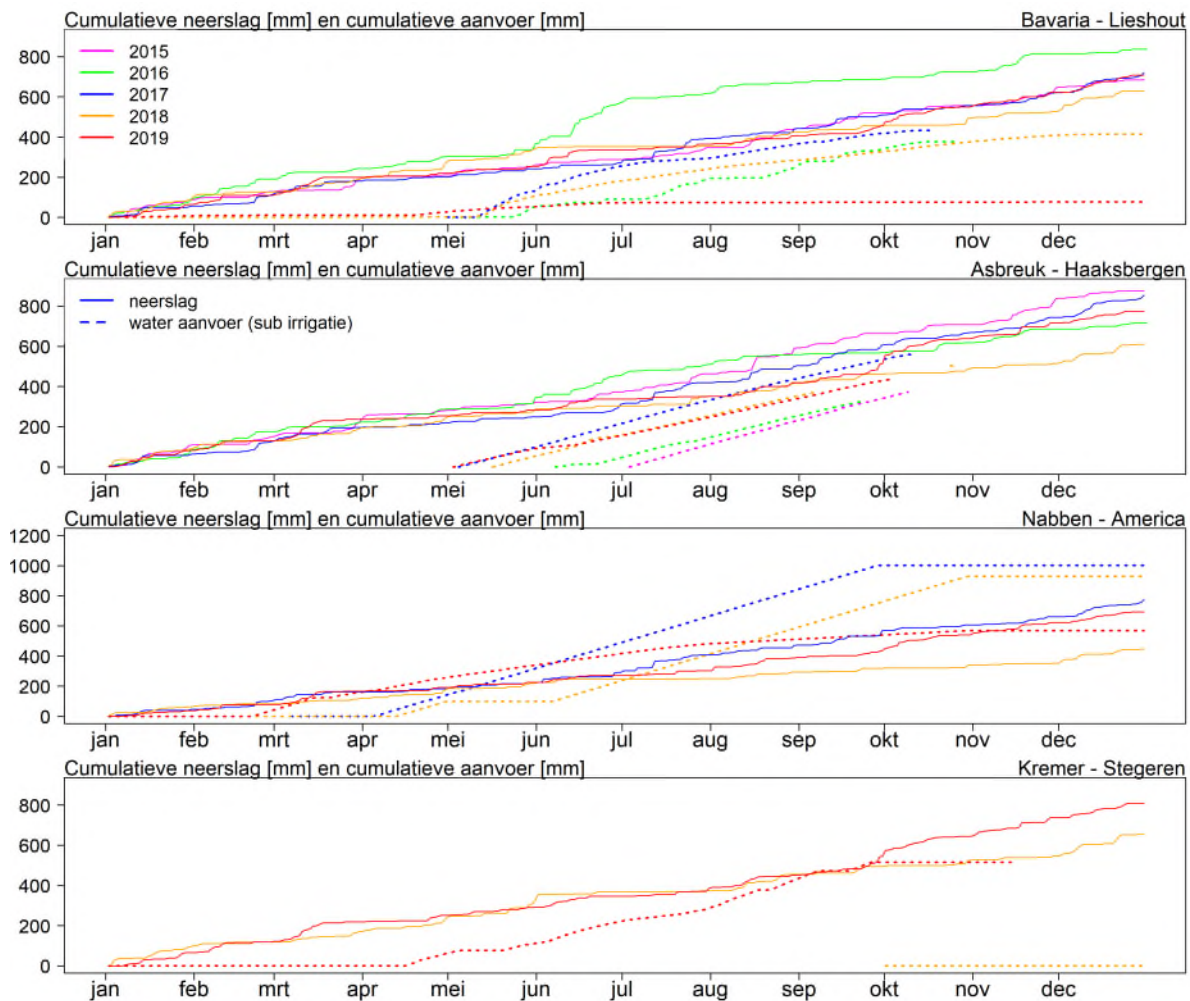
3.1 Monitoring subirrigatie

3.1.1 Wateraanvoer

Neerslag is de eerste bron van water om vast te houden met een regelbaar drainagesysteem, in een vrij-afwaterend gebied zonder wateraanvoer. In de tijdperiode van de subirrigatieproeven was 2016 een relatief nat tot zeer nat jaar. Met name in het zuidoosten van het zandgebied was er sprake van een extreem natte maand juni in 2016. Water vasthouden met regelbare drainage is dan (tot op een zekere hoogte) een optie, al lag de focus vooral op het voorkómen van wateroverlast. Het jaar 2018 was in elke proef een uitzonderlijk droog jaar (Figuur 3-1) (van den Eertwegh et al., 2020a). In 2018 was er daarom ook geen regenwater beschikbaar om vast te houden en een verhoogde grondwaterstand te realiseren.

Als er onvoldoende neerslag beschikbaar is om de gewenste grondwaterstand en het gewenste bodemvochtgehalte te realiseren, vindt er dit onderzoek actief wateraanvoer plaats om het systeem te voeden en het grondwater aan te vullen via subirrigatie. Hiervoor zijn in de experimenten verschillende bronnen van water gebruikt: oppervlaktewater (Stegeren), RWZI-effluent (Haaksbergen), industrieel effluent (Lieshout) en grondwater (America).

Gemiddeld wordt er in elke proef ongeveer 500 mm water aangevoerd per jaar (Figuur 3-1). In het jaar 2017 vond er bij Lieshout ongeveer 400 mm wateraanvoer plaats en bij America meer dan 1000 mm. Tussen de experimenten kunnen de verschillen in benodigde hoeveelheid wateraanvoer dus groot zijn. De aangevoerde hoeveelheid hangt af van de hydrologische randvoorwaarden (hoeveel water is nodig om het grondwaterniveau te verhogen), maar ook simpelweg van de duur van de wateraanvoer in de specifieke proeven. Daarnaast kan de capaciteit van de pompen variëren in de tijd door sloopvuil in het filter voor de pomp, lege accu, etc. Op dagelijkse basis is er in elke proef gemiddeld 2-8 mm subirrigatie geweest.



Figuur 3-1: Cumulatieve neerslag van de dichtstbijzijnde KNMI weerstations (Tabel 2-2: Overzicht aanwezige meetapparatuur per proef.). De cumulatieve aanvoer is gemeten bij elke proef.

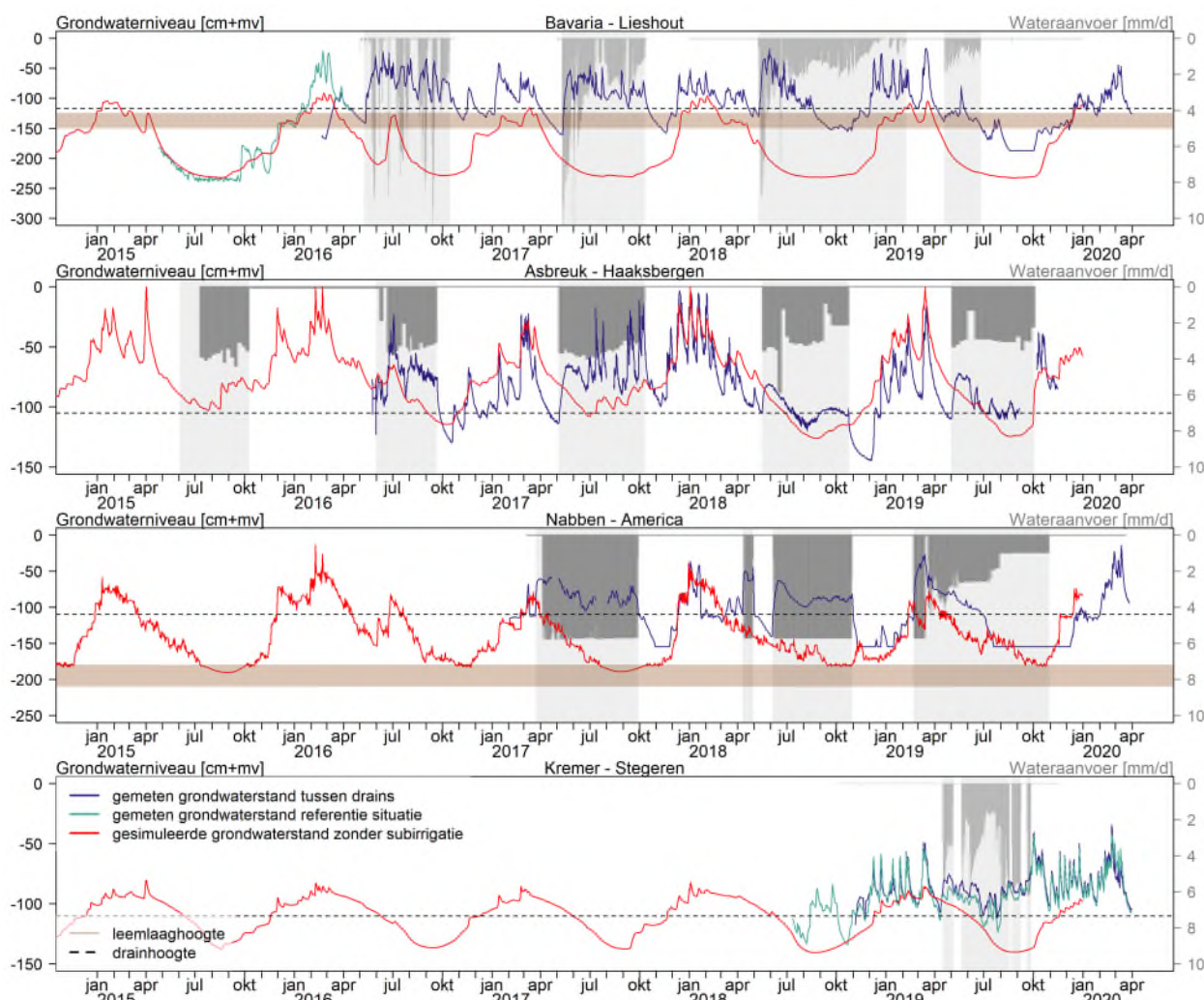
3.1.2 Grondwaterstanden

Effecten van neerslag en wateraanvoer zijn direct in de metingen van het grondwaterniveau zichtbaar (Figuur 3-2). In deze sectie is de reactie op het grondwaterniveau beschreven per jaar en voor elke veldproef:

- 2016: Aan het begin van de subirrigatieperiode in Haaksbergen in 2016 bleef het grondwaterniveau relatief laag, door storingen met de pomp. Eind juli daarentegen is de pomp even uitgezet vanwege te hoge grondwaterstanden door overvloedige neerslag in combinatie met subirrigatie. Figuur 3-2 laat zien dat de daling van de grondwaterstand in Haaksbergen in de drogere maanden augustus en september 2016 maar een paar centimeter was. Dit betekent dat met gemiddeld 3.5 mm/d subirrigatie het grondwaterniveau in Haaksbergen in 2016 vrijwel op peil blijft. Ook in Lieshout was sprake van overvloedige neerslag, wat in combinatie met subirrigatie leidde tot ondiepe grondwaterstanden. De wateraanvoer is enkele keren stopgezet. Pieken in de wateraanvoer bij het weer starten van de wateraanvoer, resulteren in ook hoge pieken in het grondwaterniveau (Figuur 3-2).
- 2017: Het eerste deel van 2017 was relatief droog, waardoor de grondwaterstanden in mei al wat dieper uitgezakt waren. Bij Lieshout was daarom relatief veel water nodig (8 mm) om het grondwaterniveau op peil brengen; de rest van het seizoen is er ongeveer 4 mm water aangevoerd. In Haaksbergen en America is er constant 4 mm en 5.5 mm respectievelijk water aangevoerd, waardoor het grondwaterniveau redelijk op peil is gehouden.

- 2018: Het jaar 2018 was uitzonderlijk droog (van den Eertwegh et al., 2020a). Door de start van subirrigatie werd het freatisch grondwatervniveau aanzienlijk verhoogd in elke proef, maar zakte vervolgens 's zomers uit. De aangevoerde hoeveelheid water in combinatie met de extreem droge zomer is in 2018 in geen enkele proef voldoende geweest om het grondwatervniveau op peil te houden. Begin augustus 2018 zijn er enkele buien geweest, die wel direct zorgen voor een stijging in het grondwatervniveau.
- 2019: Ook 2019 was een zeer droog jaar. Vanwege een sterk teruglopende infiltratiecapaciteit van het systeem in Lieshout (als gevolg van verstopping (Bartholomeus et al., 2020; Van der Schans, 2019)) en de keuze om de wateraanvoer stil te zetten om het systeem te laten herstellen, kon de grondwaterstand niet op peil worden gehouden. Ook in America leek de infiltratiecapaciteit van het systeem af te nemen. In Haaksbergen en America is de totale hoeveelheid neerslag en geïnfiltreerde hoeveelheid water onvoldoende geweest om het grondwatervniveau op peil te houden. Door de neerslag in september 2019 steeg de grondwaterstand in oktober 2019 weer. In Stegeren heeft om technische redenen de pomp niet op volledig capaciteit aangestaan, waardoor slechts een geringe stijging in het freatisch grondwatervniveau is gerealiseerd.

Voor elke proef is een SWAP-model opgezet om ook de grondwaterstand zonder subirrigatie in beeld te brengen (Figuur 3-2). Zo wordt meer inzicht gekregen in het effect van subirrigatie op de grondwaterstand. De modellen zijn nader toegelicht in Deel B. Het gemeten grondwatervniveau met subirrigatie is in elke proef beduidend hoger dan het gemodelleerde grondwatervniveau zonder subirrigatie. In Lieshout is in 2017 een stijging van 170 cm te zien, in America een stijging van 70 cm en in Haaksbergen zo'n 30 cm (Figuur 3-2). In Stegeren is de grondwaterstand eind van de zomer 2019 \pm 30 cm hoger dan zonder subirrigatie, maar dit kan een overschatting zijn. Het gemodelleerde referentie grondwatervniveau is namelijk lager dan het gemeten referentie grondwatervniveau (Figuur 3-2).

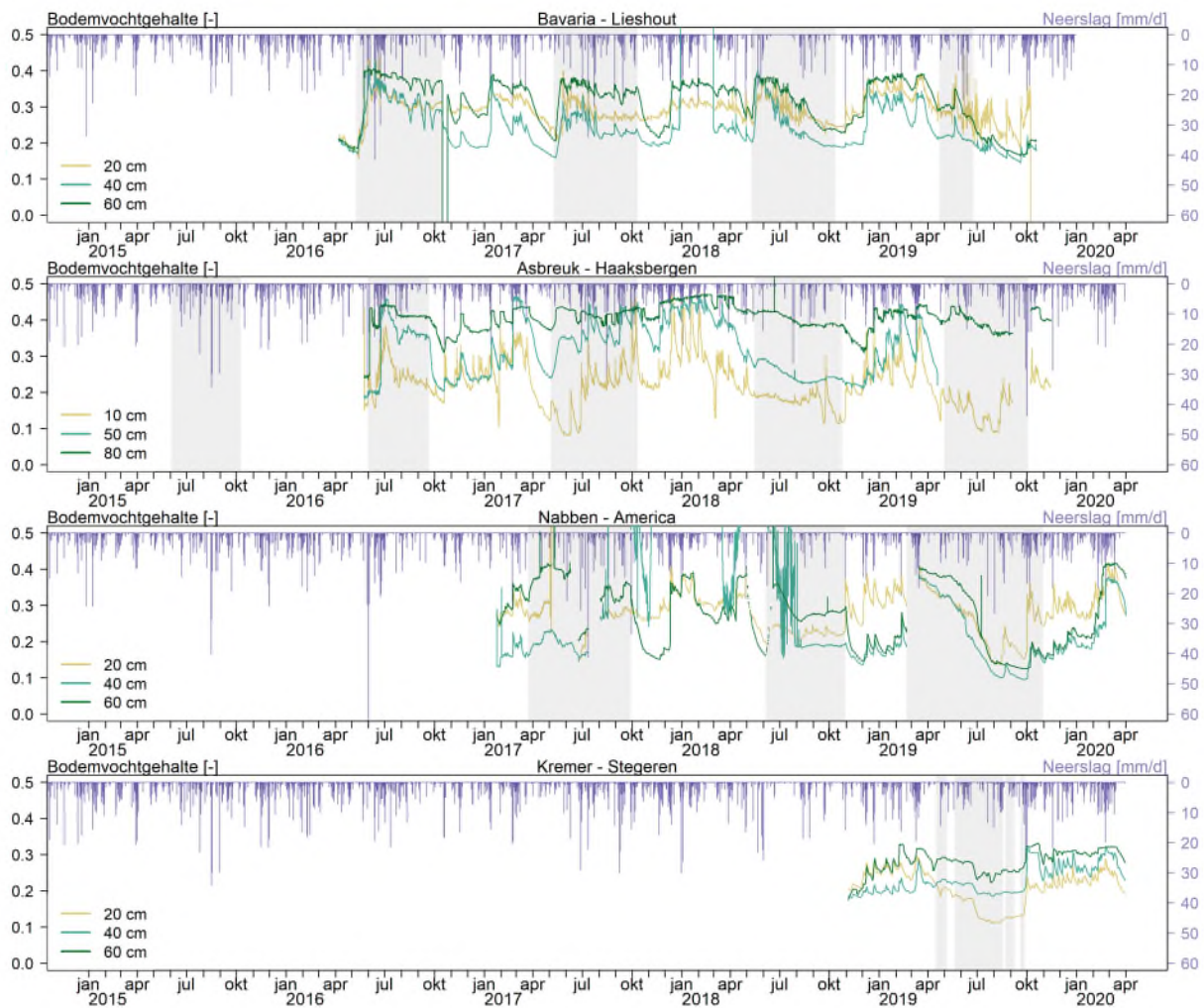


Figuur 3-2: Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden bij de vier verschillende proeven. Het lichtgrijze vlak geeft de periode van wateraanvoer (subirrigatie) weer. In Haaksbergen en America wordt geen referentie grondwaterniveau gemeten. De leemlaag bij Haaksbergen is op ongeveer 3 meter onder maaiveld, in Stegeren is vrijwel geen leemlaag aanwezig. Let op: de schaal van de y-as verschilt per grafiek

3.1.3 Bodemvocht

Er zijn verschillende patronen te onderscheiden in de tijdreeksen van het bodemvochtgehalte. Ten eerste treedt bij elk experiment een verhoging van het bodemvochtgehalte op bij piekbuien (Figuur 3-3). Daarnaast stijgt het bodemvochtgehalte als de wateraanvoer voor subirrigatie start (Figuur 3-3). In Stegeren reageert het bodemvochtgehalte ook op het slootpeil; een verhoging treedt op als het winterpeil wordt ingesteld (eind oktober), een verlaging is te zien als het zomerpeil wordt ingesteld (begin april).

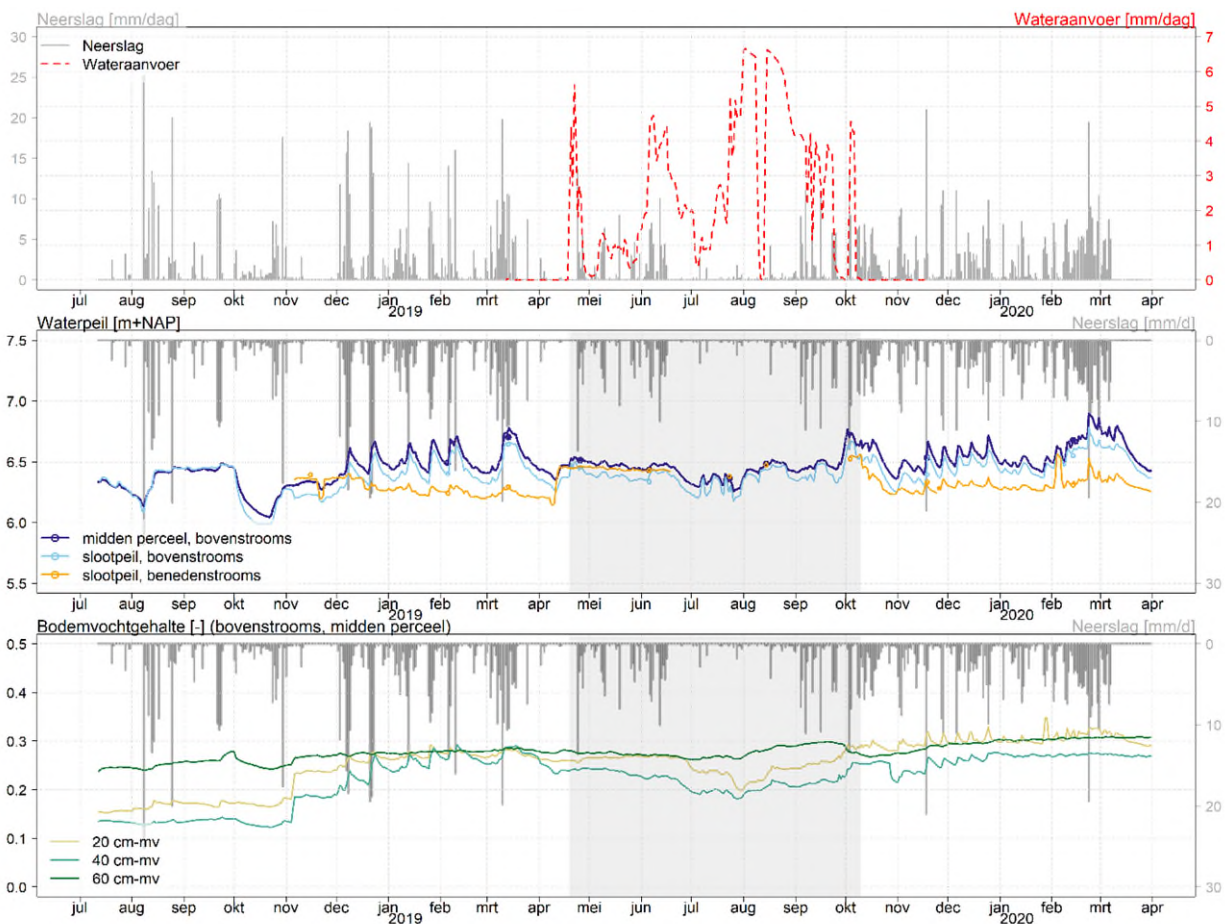
Figuur 3-3 geeft het bodemvochtgehalte tussen twee drains weer voor elke proef. Het bodemvochtgehalte direct naast een drain is een fractie hoger (niet weergegeven).



Figuur 3-3: Gemeten bodemvochtgehalte bij de vier verschillende proeven. Voor Bavaria, Asbreuk en Nabben zijn dit de gemeten waarden tussen twee drains. Voor Stegeren is dit de gemeten waarden bij drain, omdat de metingen tussen de drain als niet betrouwbaar zijn beoordeeld. De metingen op 40 cm diepte bij Nabben vertonen verstoringen in met name januari-augustus 2018.

3.2 Monitoring SAWAX-stuw

In de winter van 2018-2019 was bij de SAWAX-stuw het bovenstroomse oppervlaktewaterpeil hoger dan het benedenstroomse oppervlaktewaterpeil (Figuur 3-4). Vanaf het moment dat het zomerpeil is ingesteld (april 2019), is het helaas niet gelukt om het peil bovenstroomse hoger te houden dan het peil benedenstroomse. Mogelijke oorzaken zijn een te lage pompcapaciteit en een hoge wegzijging van slootwater richting het grondwater. Een hoge wegzijging naar het grondwater is ook waargenomen in een voorgaande proef (van Bakel et al., 2020). In de winter 2019-2020 was het oppervlaktewaterpeil bovenstroomse hoger dan benedenstroomse. De grondwaterstand in het perceel vertoont een nagenoeg gelijk verloop als het waterpeil bovenstroomse van de SAWAX. Doordat in de zomerperiode bovenstroomse van de SAWAX geen hoger peil gerealiseerd kon worden, zijn ook de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte niet verhoogd.



Figuur 3-4: Wateraanvoer en neerslag (boven), grondwaterniveau midden op het perceel en het oppervlaktewaterpeil bovenstrooms en benedenstrooms (midden) en bodemvochtgehalte (onder) bij de SAWAX-proef in Stegeren.

3.3 Ervaring met systemen en veldmetingen

3.3.1 Ontwerp en beheer

Het ontwerp van de onderzochte regelbare drainagesystemen varieerde van plek tot plek. Bestaande systemen zijn gebruikt en aangepast, bijvoorbeeld met een extra aanvoerput, en er zijn nieuwe systemen ontworpen. Alle regelbare drainagesystemen met subirrigatie hebben functioneel gezien goed gewerkt: met de systemen kan de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte worden verhoogd. Echter, er zijn verschillen in bijvoorbeeld de aansturing van systemen en er zijn problemen opgetreden die de werking van de systemen tijdens de experimenten hebben beïnvloed.

Sturen van regelbare drainage met subirrigatie

Zowel de regelbare drainagesystemen met subirrigatie als de SAWAX moeten bediend/ingesteld worden, handmatig dan wel mechanisch of automatisch. Afhankelijk van het boogde doel (vasthouden, draineren, aanvoeren) is de bediening en het beheer van de systemen verschillend. In de proeven zijn de volgende ervaringen opgedaan met betrekking tot de bediening van de systemen:

- America: het vlotterstelsel om de wateraanvoer automatisch aan/uit te schakelen werkte bij America goed. Het drainageniveau hoefde niet te worden aangepast om natschade te voorkomen. Als dat wel nodig was geweest dan had de agrariër dat handmatig kunnen instellen.

- Lieshout: de wateraanvoer en het in te stellen waterniveau in de aanvoerput zijn steeds in nauw contact tussen agrariër, onderzoekers en de beheerders van de waterzuivering ingesteld. De wateraanvoer is zo geregeld dat steeds het gewenste waterniveau in de aanvoerput wordt gerealiseerd. De wateraanvoer stopt dus ook automatisch als dat niveau is bereikt. De wateraanvoer is in 2016 stopgezet (handmatig, op de waterzuivering) als gevolg van de extreem natte zomer, zodat water juist afgevoerd kon worden uit het perceel. Hiervoor is het drainageniveau in de afvoerput door de agrariër verlaagd.
- Haaksbergen: online, via een app, is het drainageniveau enkele keren verlaagd, om natte omstandigheden te voorkomen, of juist verhoogd om een hogere grondwaterstand te realiseren. Onder natte omstandigheden waarin drainage gewenst is, is de wateraanvoer stopgezet (handmatig, op de waterzuivering). Het online aan kunnen passen van het drainageniveau werkt eenvoudig.
- Stegeren: de aansturing van het KAD-systeem is gebaseerd op een online management-algoritme. Het voordeel van deze automatische KAD-sturing op basis van weersvoorspellingen is dat het KAD-systeem vlak voor en tijdens perioden met (piek)buien automatisch lager gezet kan worden, waardoor er indien gewenst voor en tijdens neerslag reeds afvoer plaatsvindt en natschade mogelijk wordt vermeden. Helaas kon dit door de droge weersomstandigheden niet getest worden in deze proef tijdens de looptijd. Met name de wateraanvoer in droge periodes is daarom uitgetest. Het meer en langer vasthouden van water op de percelen lukte maar beperkt.

In Lieshout en America wordt de wateraanvoer dus automatisch stopgezet als de ingestelde waterhoogte in de regelput/aanvoerput voor het regelbare-drainage-subirrigatiesysteem is gerealiseerd, bij Stegeren en Haaksbergen moet dit handmatig. Om het aanvoerdebiet voor subirrigatiesystemen zoals toegepast in Stegeren en Haaksbergen nog verder te verminderen en te optimaliseren, i.e. eventueel overtollig en/of onnodig aangevoerd water te sparen, is een op afstand instelbare of automatisch gestuurde aanvoer via de pompsystemen (in Stegeren op zonne-energie en telemetrie) beter. Zo kan de wateraanvoer in perioden verminderd worden als dat kan (reeds voldoende vocht in wortelzone) of moet (vóór, tijdens en na piekbuien).

Verstopping

Subirrigatie kan leiden tot verstopping van systemen en een afname van de infiltratiecapaciteit. Verstopping kan fysisch zijn, bijv. via zwevende stof die het systeem binnen stroomt. Ook kan er chemische verstopping plaatsvinden via bijv. neerslag van ijzeroxiden. Bacteriologisch kan er ook verstopping optreden. In 2018-2019 is het systeem bij Lieshout verstopt geraakt (Van der Schans, 2019), het is medio 2020 weer hersteld (Bartholomeus et al., 2020). In America zijn in augustus 2020 de verzamelleiding en de twee putten schoongemaakt. Daarnaast is bij Stegeren gebleken dat de waterpomp niet altijd op volledige capaciteit kon draaien, doordat er sloopvuil in het oppervlaktewater en vervolgens in het filter van de pomp aanwezig was. Aandacht voor het voorkómen van verstopping en het langdurig werkzaam houden van systemen is essentieel voor de werking van de maatregel en moet expliciet meegenomen worden in het ontwerp van systemen. Dit geldt voor zowel de samenstelling van het aanvoerwater, als de mogelijkheid om systemen schoon te maken (Van der Schans, 2019).

3.3.2 Monitoring

De experimenten in deze proef hebben tot nog toe een relatief korte doorlooptijd: maximaal vier jaar aan data is geanalyseerd, meestal een kortere periode, waarin zowel kennis over de inrichting en het beheer van de systemen is opgebouwd, als meetgegevens van de effecten van de systemen op verschillende componenten van de waterbalans, zijn verzameld.

In het ideale geval omvat een meetperiode omstandigheden waarin de systemen zowel getest kunnen worden op water afvoeren, vasthouden en aanvullen. Door de overwegend droge jaren in de meetperiode zijn met name meetgegevens verzameld gericht op het water aanvullen met de systemen.

Veldmetingen (via sensoren en veldmetingen) waren erop ingericht om inzicht te krijgen in de effecten van de onderzochte maatregelen op verschillende componenten van het watersysteem: neerslag, debiet van

wateraanvoer en –afvoer van en naar de systemen, waterniveaus in oppervlaktewater en in regelputten, grondwaterstand en stijghoogte, en niet te vergeten bodemvochtgehaltes. De sensoren en handmetingen hebben tot veel feitelijke informatie geleid over de toestand van systemen, de hydrologie en de effecten van de maatregelen, met de volgende ervaringen:

- Metingen van grondwaterstanden en stijghoogten zijn geslaagd en nuttig gebleken om indicaties te krijgen van wegzijging en kwantitatieve informatie te genereren over de effecten van subirrigatie en drainage. Het betreft een eenvoudige meting, die al veel inzicht geeft in het functioneren van de systemen.
- De metingen van bodemvocht zijn veelal geslaagd. Door kalibratie van sensoren worden deze preciezer, maar dit is een kostbaar en tijdrovend karwei. Ook zonder kalibratie geven de bodemvochtmetingen al duidelijk inzicht in het effect van maatregelen op de vochtvoorziening van gewassen.
- Debietmetingen van aanvoer en afvoer zijn nodig om de toch al schaarse metingen van fluxen van de waterbalanstermen beschikbaar te maken voor analyse. Deze metingen zijn belangrijk voor het verkrijgen van kwantitatief inzicht in de benodigde hoeveelheid water voor de maatregelen (dit onderzoek).
- Lokale meting van neerslag verdient zorg en aandacht voor de regenmeter, zowel qua plaatsing, als qua onderhoud. Een alternatief is gebruik van de gevalideerde data van de KNMI-radar.
- Door de metingen via telemetrie en een online portaal te ontsluiten kan continu inzicht worden verkregen in het effect van het weer, een aanpassing in de instellingen van een systeem (agrariër) of een aanpassing aan het oppervlaktewaterbeheer (waterschap) op de grondwaterstand en bodemvochtcondities in het perceel. Onderzoekers en agrariërs hebben zo'n portaal en participatieve monitoring opgezet en ook op dit spoor samengewerkt. Het leverde niet alleen meer informatie op, maar ook systeembegrip, inzicht in handelen en effecten ervan. De combinatie van veldmetingen met sensoren en participatieve monitoring draagt bij aan het leren omgaan met de systemen, zowel ter voorkoming van watertekort als wateroverlast.
- Het is zaak om kinderziektes steeds op korte termijn aan te pakken en te verhelpen. Dat verdient zorg en tijdige actie. Hoe korter de periode van storing en/of falen van apparatuur of sensoren duurt, des te groter de kans van slagen van de proef en van latere analyse. Telemetrische waarneming van functioneren van apparatuur en sensoren is hierbij belangrijk: via online portalen is continu inzicht in de toestand van een perceel en de werking van een systeem mogelijk.
- Agrariërs geven aan dat de vochtvoorziening voor het gewas als gevolg van subirrigatie verbetert. Daardoor is er ook minder beregend (mondelijke mededelingen). De verbeterde vochtvoorziening was voor de proeven in Haaksbergen en America ook zichtbaar in satellietbeelden (index: NDWI) (Bartholomeus et al., 2018b) .

4 Deelconclusies

Het doel van de watermaatregelen zoals vormgegeven in de verschillende veldproeven, was om te kunnen anticiperen op hydro-meteorologische situaties en risico's en het beschikbare zoet water verantwoord benutten: water zoveel mogelijk vasthouden, aanvullen waar het kan en afvoeren als het moet.

Uit de metingen in de veldexperimenten met regelbare drainage met subirrigatie, die overwegend in (zeer) droge periodes hebben plaatsgevonden, blijkt dat:

- voor de proeflocaties per jaar gemiddeld 500 mm water is aangevoerd voor subirrigatie;
- de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte in elk experiment verhoogd worden met behulp van subirrigatie;
- de verhoging dusdanig is dat deze leidt tot een verbeterde vochtvoorziening voor het gewas en een verminderde beregeningsbehoefte;
- het niet is gelukt om in de extreem droge jaren 2018 en 2019 de grondwaterstand gedurende het hele groeiseizoen op het gewenste peil te houden om gewassen optimaal van water te voorzien. De reden hiervoor is een samenspel tussen werkelijke verdamping, het aanvoerdebiet en de wegzijging van subirrigatie-water naar het grondwater.

Uit ervaring en metingen blijkt dat de grondwaterstand op een subirrigatieperceel sneller stijgt dan de grondwaterstand op een perceel zonder subirrigatie, als er na een (qua meteorologie) droge tijd weer neerslag valt. Dit komt doordat subirrigatie de bodem in droge jaren toch vochtiger houdt, waardoor de infiltratie en neerwaarts vochttransport sneller gaan en het grondwater sneller reageert op een neerslaggebeurtenis, dan wanneer er geen subirrigatie had plaatsgevonden. Dus ondanks dat in droge jaren de gewenste vochtvoorziening voor het gewas niet gerealiseerd kan worden, draagt subirrigatie wel bij aan een sneller herstel van het watersysteem ná een meteorologisch droge periode.

In het experiment met SAWAX is het in de proef bij Stegeren niet gelukt in de zomerperiode van het bemeten jaar (2019) een hoger oppervlaktewaterpeil in de kavelsloot bovenstrooms van de hoofdwaterloop te realiseren. De oorzaken zijn een te lage pompcapaciteit in combinatie met een hoge wegzijging. Echter, op basis van een enkel meetjaar kunnen geen verstrekkende conclusies getrokken worden. Wel geven de metingen aan dat in zeer droge perioden en in gebieden met een grote wegzijging het lastig is met SAWAX gedurende het hele jaar het waterpeil in een bovenstroomse kavelsloot te laten meebewegen met de benedenstroomse hoofdwaterloop.

De combinatie van veldproeven, monitoring van de werking van de systemen, online ontsluiting ervan en participatieve monitoring met agrariërs, levert naast kwantitatieve informatie, ook systeembegrip, inzicht in handelen en de effecten ervan. Het draagt bij aan het leren omgaan met de systemen, zowel ter voorkoming van watertekort als wateroverlast. Veldproeven met monitoring dragen zo bij aan kennisoverdracht. Dit geldt niet alleen voor onderzoekers-agrariërs, maar ook met mensen van het waterschap (driehoek onderzoeker-agrariër-waterschapper). Voor het waterschap is het immers van belang de onderzochte maatregelen eventueel mee in te passen in het regionale waterbeheer en de kansen en knelpunten goed te kennen.

Deel B: Modelling en scenarioanalyses

Op basis van monitoring van de veldexperimenten (Deel A) zijn de maatregelen geschematiseerd met hydrologische modellen. De modelanalyses richten zich op effecten van de maatregelen op perceelschaal.

Met de perceelsmodellen wordt ten eerste het effect van de maatregelen op niet in het veld bemeeten componenten van de waterbalans en gewasopbrengst geduid. Het doel van subirrigatie bijvoorbeeld, is om via een stijging van het grondwaterniveau de vochtbeschikbaarheid van het gewas te verbeteren. Dit moet leiden tot een hogere gewasverdamping (transpiratie) en uiteindelijk een hogere gewasopbrengst. Effecten van subirrigatie op de gewasverdamping en op de gewasopbrengst zijn in de experimenten niet gemeten, maar kunnen wel worden gesimuleerd.

Ten tweede is het voor het vergelijken van verschillende situaties van belang om verschillen in de experimenten (problemen tijdens de experimenten, verschillende perioden van wateraanvoer, etc.) weg te werken. Verschillen die in de modellen ontstaan komen vervolgens alleen door verschillen in bodemopbouw, gewas en hydrologische randvoorwaarden. Zo worden de specifieke veldsituaties opgeschaald naar meer generieke inzichten in het effect van de maatregelen op de waterbalans.

Ten derde worden met de modellen scenario's doorgerekend die inzicht geven in de effecten van de maatregelen in vergelijking tot andere inrichtingsmaatregelen, variatie in de aansturing van systemen (variatie in timing en hoeveelheid wateraanvoer), variatie in gewassen en een ander klimaat.

In dit deel beschrijven we de opzet van de perceelsmodellen en definiëren we de modelscenario's die worden doorgerekend (H5). Hoofdstuk 6 geeft de modelresultaten, met achtereenvolgens inzicht in de effecten van de maatregelen op de componenten van de waterbalans, de waterbalans op perceelschaal en een doorkijk naar regionale schaal, en modelscenario's. We sluiten af met deelconclusies (H7).

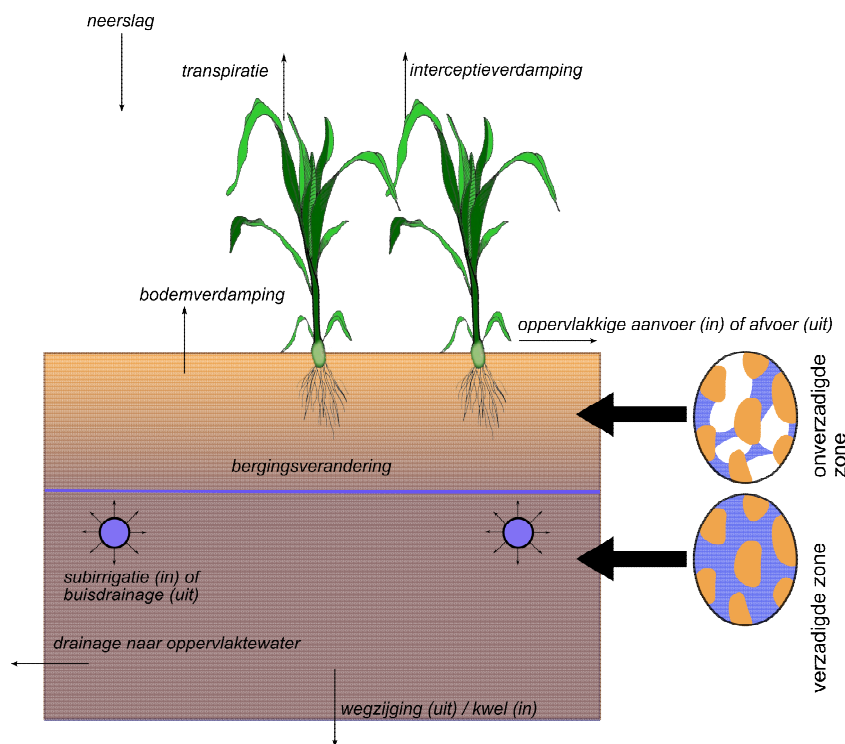
5 Modelopzet en scenario's

5.1 Modelling: inzicht in componenten van de waterbalans en gewas

Gebaseerd op de observaties zijn er voor elke veldproef modellen opgezet om meer inzicht te krijgen in de effecten van de maatregelen op de waterbalanscomponenten, en dus de waterbeschikbaarheid en waterbehoefte.

Om inzicht te krijgen in de effecten van regelbare drainage met subirrigatie op de waterbalans en de vochtvoorziening voor het gewas, is voor elke veldproef een waterbalans op perceelschaal opgesteld. Hiervoor is voor elke veldproef een model opgezet, gekalibreerd aan de veldmetingen (Deel A van dit rapport). De waterbalans op perceelschaal is gedefinieerd als (Figuur 5-1):

$$\begin{aligned} & \text{neerslag} + \text{oppervlakkige aanvoer} + \text{subirrigatie} + \text{flux onderrand} \\ & = \\ & \text{interceptieverdamping} + \text{oppervlakkige afvoer} + \text{transpiratie} + \text{bodemverdamping} + \text{laterale drainage (naar opp.} \\ & \quad \text{water)} + \text{buisdrainage} + \text{bergingsverandering}. \end{aligned}$$



Figuur 5-1: Componenten van de waterbalans

Modelmatige analyses zijn uitgevoerd met een combinatie van SWAP (1D) en Hydrus 2D. Dit zijn modellen voor de onverzadigde zone in interactie met de verzadigde zone. Door de combinatie van SWAP met WOFOST kan gewasgroei in meer detail worden gesimuleerd dan met Hydrus. Veel van de analyses voor perceelsmaatregelen kunnen met SWAP (1D) worden gedaan, waarbij met Hydrus (2D) de doorkijk wordt gegeven naar de stroming van water en het patroon daarvan. Immers, stroming van en naar ontwateringsmiddelen en drainagebuizen is meerdimensionaal. Voor de waterbalans op perceelniveau is het niet altijd relevant om de stroming exact te kennen en volstaat SWAP.

In paragraaf 5.2 en 5.3 wordt de opzet van elk model beschreven. De algemene beschrijving van de modellen staat in Bijlagen II en III.

5.2 Opzet 1D perceelschaal modellen

Met behulp van het dynamische 1D Soil, Water, Atmosphere, Plant (SWAP) model (Kroes et al., 2017) is de hydrologische situatie in de proefpercelen voor regelbare drainage met subirrigatie gemodelleerd. Met SWAP is het mogelijk de werking van een subirrigatiesysteem op perceelschaal te modelleren. Dit geldt voor de waterbalans én bijbehorende fluxen. De gedetailleerde SWAP schematisaties voor elk veldexperiment zijn beschreven in Bijlage II. Op hoofdlijnen zijn voor de opzet van de modellen de volgende zaken van belang:

- Invoer: als invoer worden meteorologische condities (dichtstbijzijnde automatische weerstations (AWS) en regenradar van het KNMI (Tabel 2-2)), bodemfysische parameters volgens van Genuchten (1980), een hydrologische onderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gewaseigenschappen gebruikt.
- Uitvoer: uitvoergegevens zijn op dagbasis en zijn onder meer de grondwaterstand, bodemvochtgehalte, de bodemtemperatuur en de componenten van de waterbalans.
- Gewasgroei: voor de simulaties is binnen SWAP de optie voor gedetailleerde gewasgroei gebruikt, zoals opgezet binnen Waterwijzer Landbouw (Kroes et al., 2017; Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018a). Dit betreft een koppeling tussen SWAP en het gewasmodel World Food Studies (WOFOST) (Boogaard et al., 2014), ofwel SWAP-WOFOST. Het gewas, zoals dit groeide op elk specifiek proefperceel, is gebruikt als invoer. In Haaksbergen is dit maïs, in de andere proeven is dit gras.
- Kalibratie: voor elke proef is het SWAP-model gekalibreerd aan gemeten grondwaterniveaus en bodemvochtgehalten op drie dieptes waarbij gebruik is gemaakt van het algoritme PEST (Doherty, 2010) (zie Bijlage II voor methode en resultaten). Op deze manier worden SWAP-modellen gebruikt worden om de omstandigheden en resultaten van elke veldproef in model te vatten. De kalibraties zijn erop gericht om per proef een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen, de drainageweerstand, de infiltratieweerstand en de hydrologische onderrandvoorwaarde te maken. Voor deze simulaties worden de werkelijke condities uit de proeven gebruikt, zoals de periode van wateraanvoer en de opgelegde drainagehoogte in de regelputten van de systemen. Tijdens de veldproeven variëren deze condities in de tijd en tussen de proeven.
- Vergelijking tussen proeven: om het effect van verschillende uitgangssituaties (de vier proeven) op de werking van regelbare drainage met subirrigatie en de invloed ervan op het gewas en de componenten van de waterbalans te duiden, zijn de gekalibreerde SWAP-modellen gebruikt, maar met een gelijke aansturing van de systemen:
 - o Geen subirrigatie
 - o Structureel subirrigatie tussen 1 april en 30 september en een wateraanvoer van 4 mm/d

Zo worden alle relevante componenten van de waterbalans en bijbehorende fluxen gesimuleerd voor een periode van 30 jaar (1990-2019) en worden de effecten van de maatregel voor de verschillende proeven vergeleken. Voor deze simulaties is uitgegaan van instellingen van de systemen die anders (veelal optimaler) zijn dan tijdens de specifieke omstandigheden gedurende de veldmetingen. Hierdoor komen de simulaties niet volledig overeen met de veldmetingen in specifieke jaren.

Op basis van de gemodelleerde grondwaterstand en bodemvochtgehalte per locatie zijn de grondwaterdroogte en bodemvochtdroogte gekarakteriseerd voor de jaren 2010-2019. Zo wordt inzichtelijk gemaakt in hoeverre regelbare drainage met subirrigatie kan bijdragen aan het voorkómen van droogte op perceelschaal. De gebruikte methode voor het karakteriseren van droogte is beschreven in Bijlage IV.

5.3 Opzet 2D perceelschaal modellen

Om de stroming binnen een perceel in beeld te krijgen is gebruik gemaakt van Hydrus 2D. Met de Hydrus software kunnen 2D- of 3D-modellen worden gemaakt, om het transport van water, stoffen en warmte dynamisch door te rekenen in onverzadigde en verzadigde zones (Šimunek and Šejna, 2018). Een uitgebreide beschrijving van de software en het model is gegeven in bijlage III.

Er is een 2D model is opgezet voor Stegeren, voor zowel regelbare drainage met subirrigatie als SAWAX. De twee proeflocaties zijn op basis van veldwaarnemingen verondersteld vergelijkbaar te zijn qua landgebruik (grasland), bodem (podzol, Hn21), hydrologie (wegzijging) en ontwateringstoestand (afstand en diepte kavelsloten). Er is daarom één basismodel gemaakt dat representatief is voor beide situaties.

In het Hydrus model zijn de gewas- en bodemschematisatie en -parametrisatie van het gekalibreerde SWAP-model voor Stegeren overgenomen. Alle modeleigenschappen worden uitgebreid beschreven in Bijlage III. De 2D-modellen zijn op dagbasis doorgerekend voor de periode 1 januari 2017 t/m 31 december 2019.

Simulaties met Hydrus 2D zijn ten eerste gebruikt om stromingspatronen bij subirrigatie inzichtelijk te maken, voor een periode met een neerslagoverschot en met een neerslagtekort. Daarnaast zijn met Hydrus 2D inrichtingsscenario's doorgerekend (zie 5.4.4).

5.4 Modelscenario's

Met de gekalibreerde modellen kunnen simulaties uitgevoerd worden om inzicht te geven in de effecten van verschillend beheer van de systemen, het type gewas en veranderingen in klimaat op het grondwaterniveau en bodemvochtgehalte. Voor de scenario-analyses met SWAP (5.4.1 - 5.4.3) is hiervoor als basismodel steeds het model van America genomen, omdat hier de grondwaterstand in de uitgangssituatie relatief gemiddeld is ten opzichte van de andere locaties (niet het droogst, maar ook niet het natst) en er een leemlaag aanwezig is die weerstand biedt tegen wegzijging. Voor de simulaties met Hydrus 2D (5.4.4) is als basismodel het Hydrus-model voor Stegeren gebruikt.

5.4.1 Variatie timing en hoeveelheid aanvoer

In de verschillende subirrigatieproeven wordt water aangevoerd op het moment dat gewassen de grootste waterbehoefte hebben, dus in het groeiseizoen (april – oktober). Modelmatig is met SWAP doorgerekend, wat de invloed van subirrigatie is als wateraanvoer plaatsvindt van:

- 1 januari 2019 – 30 april 2019: 4 maanden subirrigatie – winter/ voorjaar
- 1 april 2019 – 31 juli 2019: 4 maanden subirrigatie – voorjaar/ zomer
- 1 april – 30 september: 6 maanden subirrigatie – voorjaar/ zomer

Er zijn situaties doorgerekend met een wateraanvoer van 3 en 5 mm/d, om inzicht te krijgen in het effect van verschillende hoeveelheden wateraanvoer op het effect van subirrigatie.

Deze modelprojecties geven inzicht in het effect van een bepaalde hoeveelheid water en de periode waarin de subirrigatie plaatsvindt op de gewasverdamping en andere componenten van de waterbalans. Dit is van belang, omdat in de praktijk niet op elke plek op elke periode in het jaar water beschikbaar zal zijn.

5.4.2 Variatie in gewassen

Met SWAP-WOFOST is het effect van regelbare drainage met subirrigatie doorgerekend voor verschillende gewassen: gras (groeiseizoen 1 januari – 31 december), het dieper wortelende gewas maïs (groeiseizoen 1 mei – 15 oktober) en aardappel (groeiseizoen 10 mei – 29 september).

Het ingestelde drainagepeil is voor gras -50 cm+mv, voor maïs -95 cm+mv en voor aardappels -70 cm+mv, op basis van de aanname dat het drainageniveau 20 cm lager is dan de maximale worteldiepte van het gewas.

5.4.3 Een ander klimaat

Het effect van regelbare drainage onder een ander klimaat is gesimuleerd met SWAP, met meteorologische data van zowel het huidige klimaat als van KNMI'14 klimaatscenario's (Klein Tank et al., 2014) van KNMI-station Eindhoven (nr. 370) (ongeveer 40 km ten westen van America). Voor dit station is het effect van de maatregel gesimuleerd voor de periode 1990-2019 en voor het zichtjaar 2050. Voor 2050 zijn de getransformeerde reeksen van de KNMI'14 klimaatscenario's Wh, Wl, Gh en Gl gebruikt.

De klimaatscenario's zijn 30-jarige verwachtingen van afwisselend drogere en nattere jaren. De jaarlijkse SWAP-resultaten voor de toekomst zijn daarom niet 1-op-1 te vergelijken met de jaarlijkse SWAP-resultaten van de referentiesituatie. De resultaten van zowel de klimaatscenario's als van de referentieperiode zijn maandelijks gemiddeld en vervolgens over 30 jaar gemiddeld. Door het maandelijks gemiddelde van zowel de referentieperiode als de klimaatscenario's te bepalen worden drogere en nattere jaren wel correct vergeleken. Daarnaast zijn ook de gemiddelde grondwaterstanden in de vorm van GxG's (x=L voor laagste, x=H voor hoogste, x=V voor voorjaar) en LG3 (drie laagste gemeten grondwaterstanden in een hydrologisch jaar 1 april/ 31 maart) voor elk scenario uitgerekend.

5.4.4 Verschillen in inrichting

Op basis van het Hydrus 2D basismodel voor Stegeren zijn vijf scenario's doorgerekend:

- Greppels. Dit is een referentiesituatie. In deze situatie wordt er geen water aangevoerd. Alle sloten voeren alleen water af. Deze situatie is gelijk aan het proefperceel met subirrigatie in Stegeren, maar dan zonder wateraanvoer. Greppels zijn 1 m diep en zijn in Hydrus gemodelleerd als seepage face (wateren af als de drukhoogte bij de greppelwand groter is dan de atmosferische druk).
- Sloot. Deze situatie is gelijk aan het proefperceel met subirrigatie in Stegeren voordat het subirrigatiesysteem werd aangelegd. In deze situatie wordt er alleen water aangevoerd via de sloten. Sloten zijn 1.5 m diep en kennen een opgelegd (gemeten) slootpeil.
- SAWAX. Deze situatie laat het effect zien van de SAWAX stuw. In de zomer wordt water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de SAWAX gepompt, zodat bovenstrooms een hoger slootpeil ontstaat. In de winter blijft het slootpeil bovenstrooms hoger door de stuw. Deze situatie is gelijk aan de veldsituatie van het proefperceel met de stuw. In het model is wat conservatief gerekend qua effect van de stuw: de drukhoogte bovenstrooms (waterpeil) is aangenomen 0.2 m hoger te zijn dan de drukhoogte benedenstrooms.
- Subirrigatie. Deze situatie is gelijk aan de veldsituatie tijdens de subirrigatieproef in Stegeren. Hierbij wordt er water aangevoerd via de sloot grenzend aan het perceel en wordt het water vervolgens in het subirrigatiesysteem gepompt. Het waterniveau in de aanvoerput is vertaald naar de drukhoogterandvoorwaarde van het model. Dit niveau was door problemen met de pomp soms lager dan het peil van de watergang met wateraanvoer.
- Subirrigatie optimaal. Door technische problemen heeft de inlaatpomp van het subirrigatiesysteem tijdens de veldproef niet altijd aangestaan. Om toch het effect te simuleren van een goed functionerend systeem is een situatie doorgerekend waarbij het waterpeil in de aanvoerput gelijk is aan het peil van de watergang met wateraanvoer.

In alle gevallen zijn de waterpeilen in het oppervlaktewater gelijk aan het winter- en zomerpeil dat door het waterschap voor Stegeren wordt ingesteld. De in- en uitgaande waterfluxen worden in Hydrus als resultante van opgelegde waterpeilen en waterhoogte in de wateraanvoerput (bij subirrigatie) berekend. De drijvende kracht is het verschil in drukhoogte van het water tussen het oppervlaktewater en de aanvoerput aan de ene kant en de drukhoogte van het water in de bodem aan de andere kant.

6 Modelresultaten

6.1 Componenten van de waterbalans

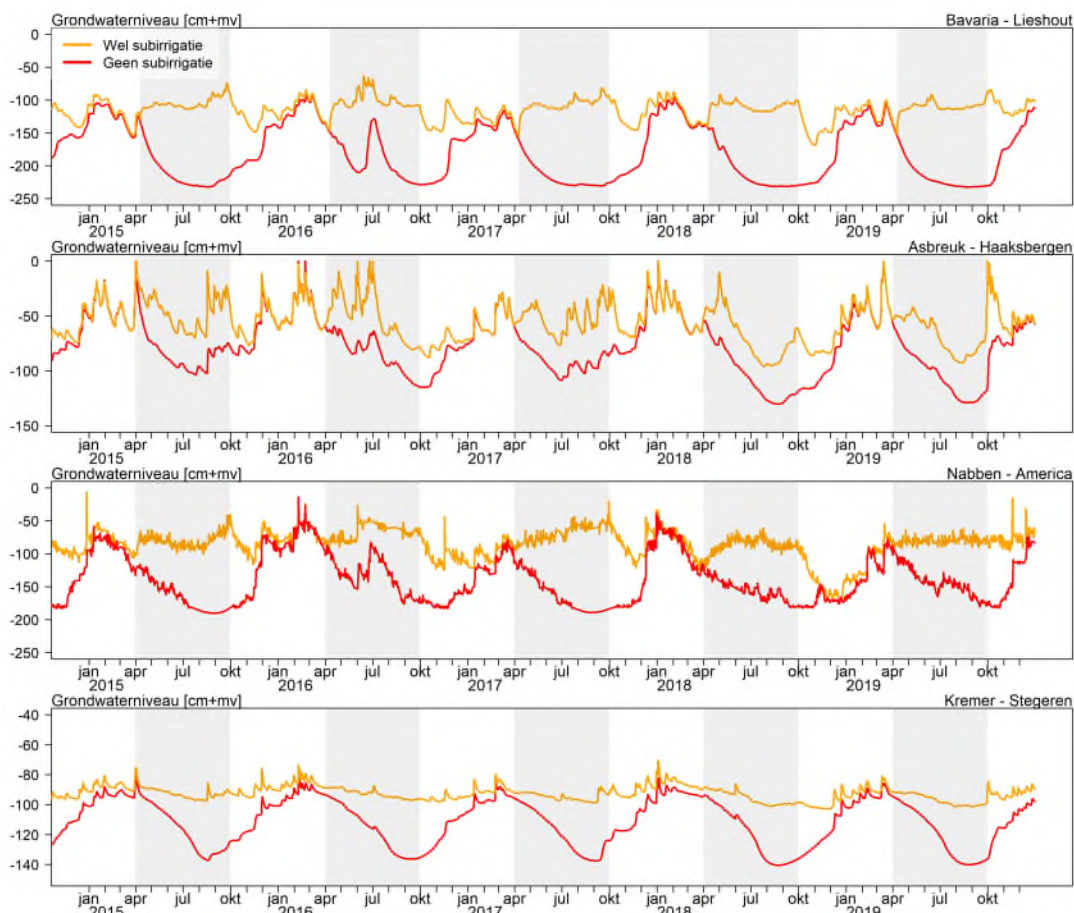
6.1.1 Grondwaterniveau

Subirrigatie heeft voor elke proeflocatie een ander (gemodelleerd) effect op de grondwaterstand als gevolg van locatie specifieke eigenschappen (Figuur 6-1):

- Lieshout: het grondwaterniveau stijgt in de zomermaanden met ± 140 cm
- Haaksbergen: het grondwaterniveau stijgt met ± 40 cm in de zomermaanden
- America: het grondwaterniveau stijgt met ± 50 cm.
- Stegeren: er is een vrij constant waterniveau zichtbaar als gevolg van wateraanvoer en dit niveau kan ook in het najaar vastgehouden worden (Figuur 6-1).

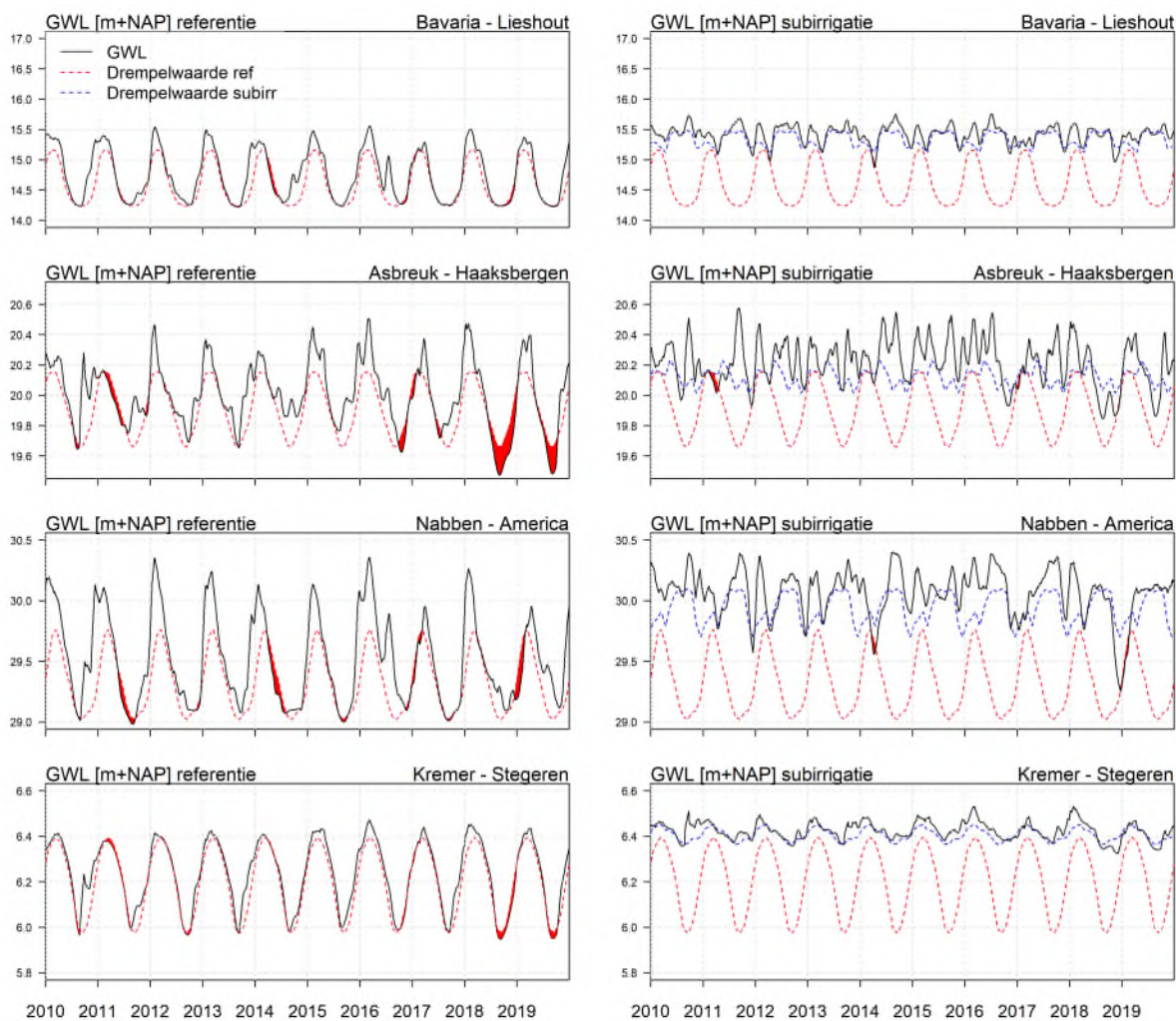
Het grondwaterniveau kan gedurende de wateraanvoerperiode op peil gehouden worden voor alle locaties, al zakken de grondwaterstanden in de droge jaren 2018 en 2019 wel wat dieper weg t.o.v. andere jaren. Na de wateraanvoerperiode (oktober) zakt het grondwaterniveau in het droge jaar 2018 snel uit voor Lieshout, Haaksbergen en America. In de andere jaren blijft het grondwaterniveau ook in het najaar nog enige tijd hoger.

Voor America geldt dat in werkelijkheid de grondwaterstand na het starten van subirrigatie sneller stijgt dan met SWAP gemodelleerd wordt. Om de snelle stijging in het grondwaterniveau (bij het aanzetten van de wateraanvoer) te simuleren was 7 dagen 10 mm/d wateraanvoer nodig, terwijl dit in werkelijkheid 5 mm/d was.



Figuur 6-1: Gemodelleerd grondwaterniveau met SWAP voor vier locaties, een simulatie zonder subirrigatie en met structureel subirrigatie tussen 1 april en 30 september.

Door de stijging van de grondwaterstanden door de wateraanvoer worden de percelen minder gevoelig voor droogte (Figuur 6-2). Er zijn wel grote verschillen in de verhoging van de grondwaterstanden tussen de locaties. De hydrologische droogte (grondwater) in 2018 en 2019, bijvoorbeeld, kan in Stegeren en Lieshout volledig worden opgeheven door de wateraanvoer via subirrigatie. In America en Haaksbergen lukt dit niet volledig. De verandering in drempelwaarde (het 20ste percentiel; alle waarden onder dit percentiel geven aan dat droogte voorkomt, zie Bijlage IV) is ook compleet anders in de verschillende gebieden. In Stegeren en America is een duidelijke stijging te zien van de grondwaterstand en drempelwaarde gedurende het hele jaar, terwijl in Haaksbergen geen stijging zichtbaar is in de winter en een beperkte stijging in de winter in Lieshout. De dynamiek in de grondwaterstand is in alle gevallen sterk veranderd door de subirrigatie met als resultaat een vlakker grondwaterstand, die gedurende het hele jaar verhoogd is. Oftewel subirrigatie zorgt ervoor dat de percelen minder gevoelig zijn voor droogte.



Figuur 6-2: Droogte in het grondwater (rode vlakken) voor de referentiesituatie (geen subirrigatie) en de situatie met subirrigatie berekend met de variabele drempelwaardemethode met de drempelwaarde uit de referentiesituatie.

6.1.2 Bodemvocht, transpiratie en gewasopbrengst

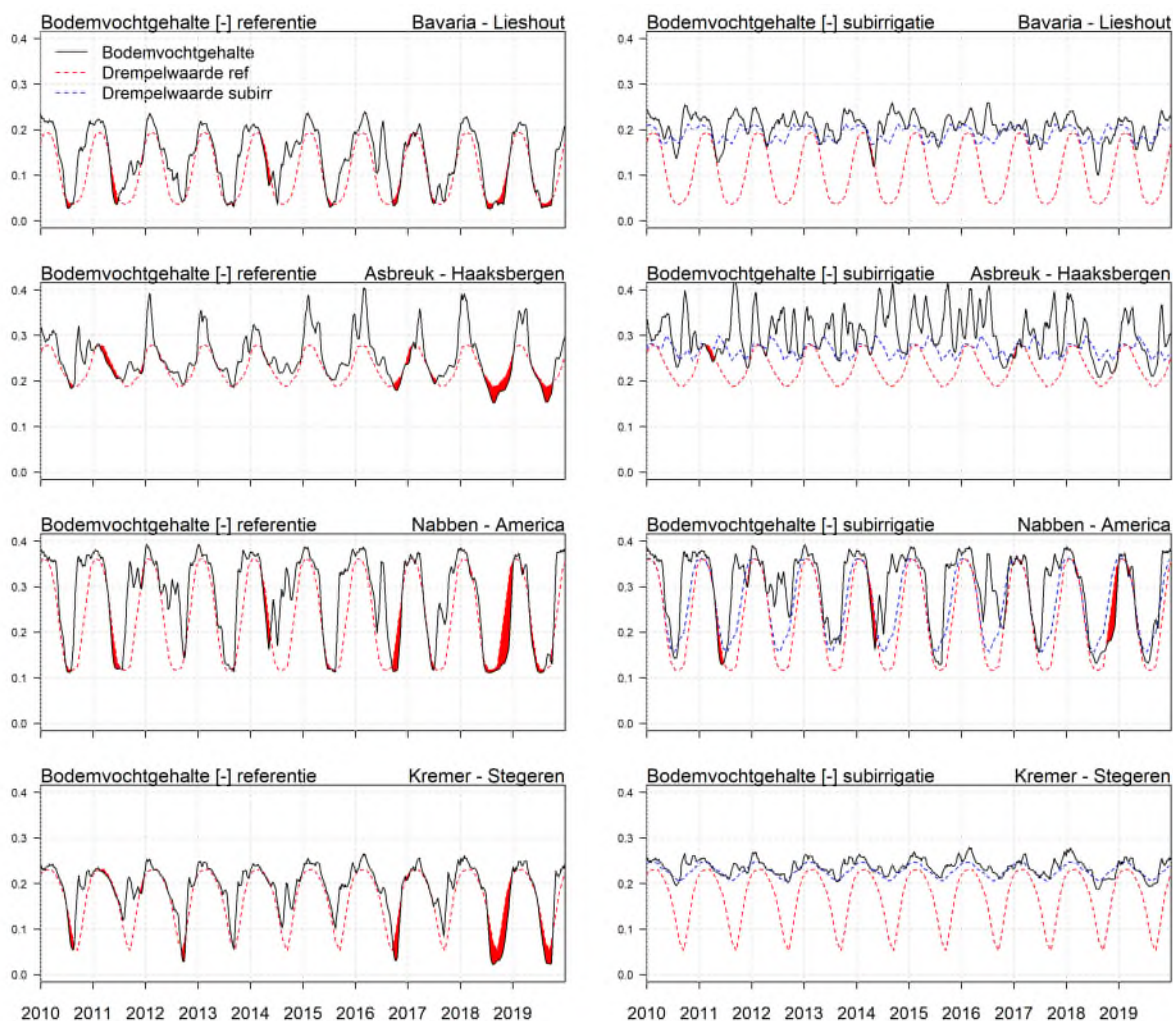
Logischerwijs is er in het algemeen meer transpiratiereductie in drogere jaren (1991, 2003, 2009, 2018, 2019) dan in nattere jaren (1993, 1995, 1998, 2014). De actuele gewasopbrengst is, daaropvolgend, ook over het algemeen lager in drogere jaren dan in de andere jaren (Figuur 6-3). Het effect van subirrigatie op de transpiratie verschilt voor de veldlocaties (Figuur 6-3):

- Lieshout: subirrigatie heft de transpiratiereductie nagenoeg helemaal op, met een hogere gewasopbrengst als gevolg.
- Haaksbergen: het valt op dat er minimale transpiratiereductie is in de modelsimulatie zonder subirrigatie. Mogelijk komt dit doordat in de simulatie zonder subirrigatie de grondwaterstand en bodemvochtcondities te gunstig worden voorgesteld. Daarnaast is in de simulaties gebruik gemaakt van een vast niveau in de putten voor wateraanvoer; het waterniveau is niet verlaagd indien te natte omstandigheden dreigen. In de simulatie met subirrigatie zijn hierdoor dusdanig natte condities gecreëerd dat er natschade aan het gewas (maïs) optreedt en het gewas niet optimaal heeft kunnen transpireren.
- America: subirrigatie leidt elk jaar tot minder transpiratiereductie en dus tot een grotere opbrengst van het gewas.
- Stegeren: er is ten opzichte van de andere locaties meer variatie tussen de jaren te zien in zowel de transpiratiereductie als de actuele gewasopbrengst (Figuur 6-3). Subirrigatie vermindert de transpiratiereductie enigszins met name in drogere zomers (1991, 2003, 2018), maar heft deze niet volledig op.



Figuur 6-3: Gemodelleerde transpiratiereductie per jaar over de maanden juni, juli en augustus met SWAP (links) en gemodelleerde gewasopbrengst per jaar (rechts) voor een simulatierun zonder subirrigatie en subirrigatie structureel tussen 1 april en 30 september.

Door subirrigatie neemt het bodemvochtgehalte (20 cm –mv) in de zomer in alle experimenten toe (Figuur 6-4); er zijn wel grote verschillen in de toename tussen de proeven. Voor alle locaties wordt de bodemvochtdroogte in 2018 en 2019 in de zomer opgeheven met subirrigatie. Alleen in het najaar van 2018 treedt nog een bodemvochtdroogte op in America. In alle gebieden is een grotere toename te zien in het bodemvocht in de zomer (verschil tussen de drempelwaarden (Bijlage IV) voor bodemvochtdroogte voor de situatie met en zonder subirrigatie) dan in het najaar en winter. Dit grotere verschil in bodemvochtgehalte heeft ook effect op het gewas; transpiratiereductie neemt af en gewasopbrengst toe (Figuur 6-4). Alleen in Haaksbergen neemt de gewasopbrengst niet toe door het hogere bodemvochtgehalte, maar af door de eerder genoemde te natte condities door de modelinstellingen. Hoewel de bodemvochtdroogte op 20 cm-mv is opgeheven, treedt wel nog transpiratiereductie op (Figuur 6-3). De wortelzone is dus nog te droog voor een optimale watervoorziening voor het gewas.



Figuur 6-4: Droogte in bodemvocht (rode vlakken) voor de referentiesituatie en de situatie met subirrigatie berekend met de variabele drempelwaardemethode met de drempelwaarde uit de referentiesituatie.

6.1.3 Drainage en infiltratie

Als het oppervlaktewaterpeil lager is dan de grondwaterstand draineert een deel van het water naar het oppervlaktewater (ontwatering). Als oppervlaktewater wordt gebruikt als wateraanvoerbron voor subirrigatie wordt het gedraineerde water dus ook weer gebruikt voor subirrigatie. Bij goed beheer van de systemen wordt het waterverlies naar het oppervlaktewater beperkt, bijvoorbeeld door de ontwatering door de aangrenzende sloot of beek aan te passen. Om meer inzicht te krijgen in het waterverlies naar het oppervlaktewater is de drainagecomponent van de waterbalans met SWAP gemodelleerd.

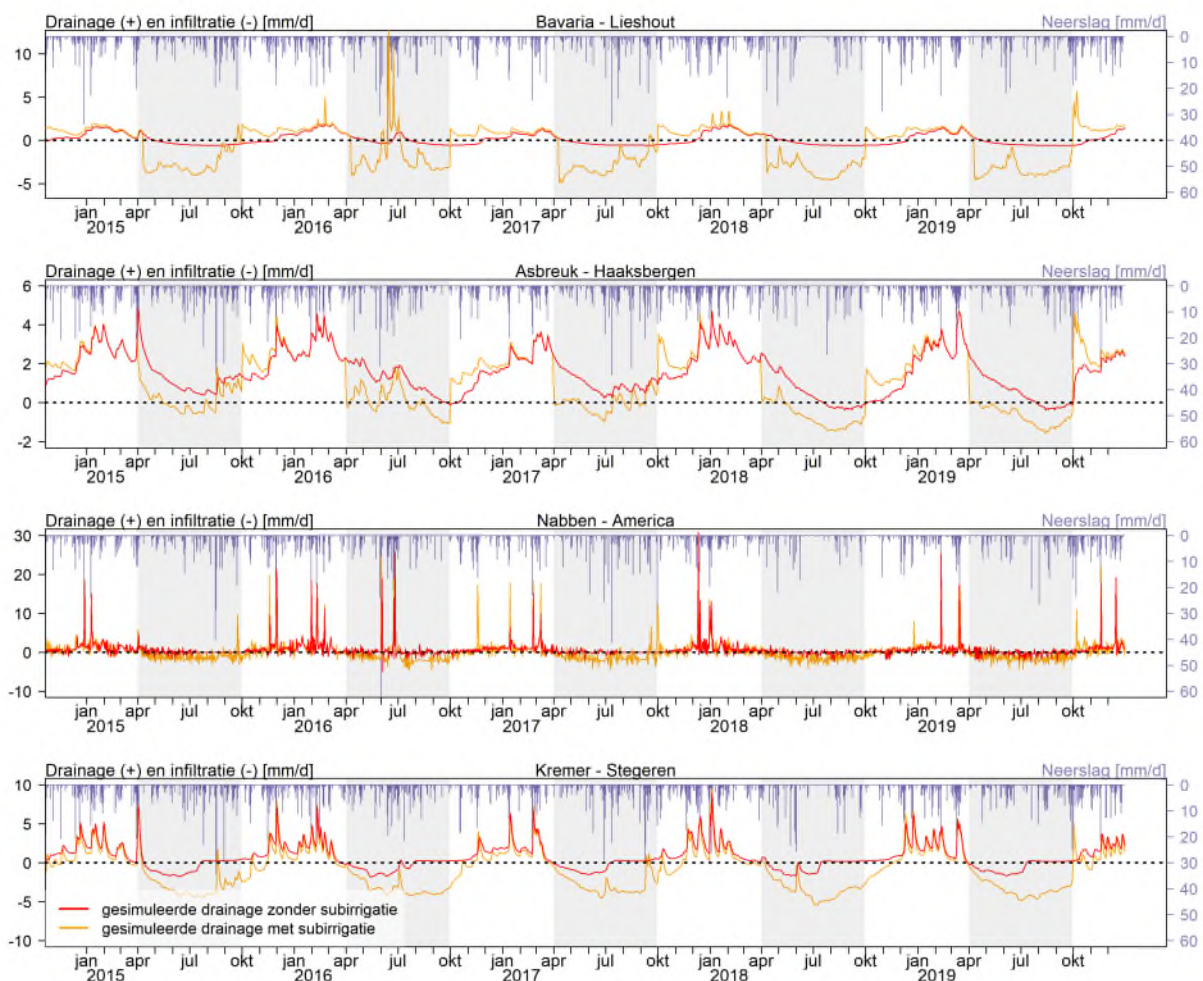
De drainage naar het oppervlaktewater verschilt tussen de verschillende proeven. Ook hangt deze af van het tijdstip van het jaar en van het wel of niet toedienen van subirrigatie (Figuur 6-5). Voor deze figuur geldt dat als er in de situatie met subirrigatie sprake is van een negatieve drainage, er meer water in het grondwatersysteem wordt ingebracht, dan er weer via drainage naar het oppervlaktewater uit verdwijnt.

Allereerst vindt er over het algemeen drainage naar het oppervlaktewater plaats in de winter (Figuur 6-5). In de zomermaanden vindt er voor met name Stegeren in de situatie zonder subirrigatie infiltratie vanuit het oppervlaktewater plaats. Subirrigatie heeft het volgende effect op drainage voor de verschillende locaties:

- Voor Lieshout, America en Stegeren is te zien dat subirrigatie leidt tot een negatieve drainageflux: er gaat meer water het watersysteem in dan er weer via drainage naar het oppervlaktewater verdwijnt.

Voor America geldt dat er water wordt rondgepompt: er wordt grondwater gebruikt voor subirrigatie, maar een deel ervan vult het grondwater ook weer aan.

- Bij Haaksbergen geldt dat in de situatie met subirrigatie de drainageflux ook tijdens subirrigatie positief blijft: veel van het geïnfiltreerde water draineert weer naar het oppervlaktewater. Een deel van het rwzi-effluent dat anders direct op het oppervlaktewater zou worden geloosd, komt zo indirect alsnog in het oppervlaktewater terecht. Voor de droge jaren 2018 en 2019 geldt voor Haaksbergen dat er meer water het watersysteem in gaat dan er weer wordt afgevoerd. Bij toepassing van subirrigatie vindt er dan dus netto aanvulling van het grondwatersysteem plaats.



Figuur 6-5: Gemodelleerd drainage met SWAP voor vier experimenten, een simulatie zonder subirrigatie en met structureel subirrigatie tussen 1 april en 30 september. Positieve drainage is water dat lateraal draineert naar het oppervlaktewater of afvoer. Negatieve drainage is subirrigatie en een kleiner deel bestaat uit water dat direct van het oppervlaktewater het perceel instroomt.

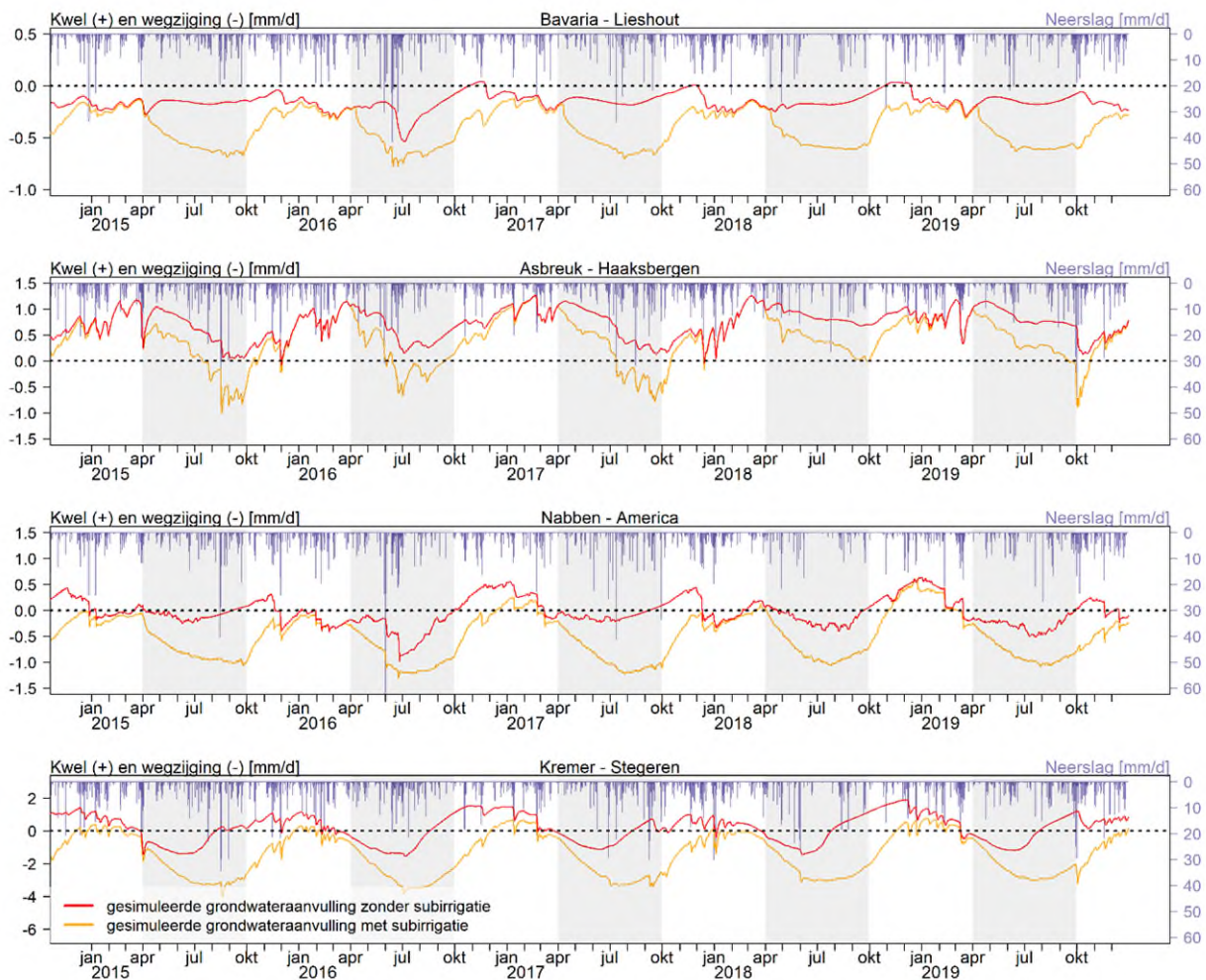
6.1.4 Kwel en wegzijging

Er vindt (min of meer) verticale stroming plaats van en naar het (regionale) grondwater, waardoor water het bodemprofiel op diepte verlaat (wegzijging) en/of binnenkomt (kwel). De kwel of wegzijging wordt met name bepaald door de verticale weerstand van de bodem en het regionale watersysteem. Zo zorgen leemlagen voor een grotere weerstand tegen wegzijging. Dit betekent dat er meer grondwateraanvulling zal zijn op locaties waar de verticale stroming gemakkelijker gaat dan op locaties waar minder verticale stroming aanwezig is. Via modelsimulaties met SWAP is de wegzijging per locatie ingeschat. De gemodelleerde waarden in Figuur 6-6 moeten als indicatie voor de orde grootte van de waarden gezien worden.

Het water dat aan de onderkant van de gemodelleerde SWAP-kolommen het bodemprofiel verlaat wordt gezien als grondwateraanvulling (wegzijging), het water dat het bodemprofiel vanuit de onderrand binnenkomt, is kwelwater. De gemodelleerde wegzijging voedt het regionale grondwatersysteem en wordt daarom niet per definitie beschouwd als verliespost bij de beoordeling van subirrigatie.

Simulaties laten zien dat de wegzijging toeneemt bij subirrigatie ten opzichte van een situatie zonder subirrigatie (Figuur 6-6); er wordt immers actief water toegevoegd aan het grondwatersysteem. Doordat er meer water in het grondwatersysteem aanwezig is, zal een deel van het water als regionale grondwateraanvulling dienen. In de proef in America wordt er ondiep grondwater onttrokken als wateraanvoerbron, en wordt het grondwatersysteem ook weer deels aangevuld door wegzijging (Figuur 6-6). Een deel van het grondwater wordt hier in feite rondgepompt. Het water dat niet ten goede komt aan transpiratie, of draineert naar het oppervlaktewatersysteem, vult het grondwater weer aan.

De orde grootte van wegzijging in Stegeren (-6 mm/d tot 2 mm/d) ligt hoger dan bij de andere proeven (-1.5 mm/d tot 1.5 mm/d). Dit betekent dat er in Stegeren relatief veel grondwateraanvulling is ten opzichte van de andere subirrigatieproeven.



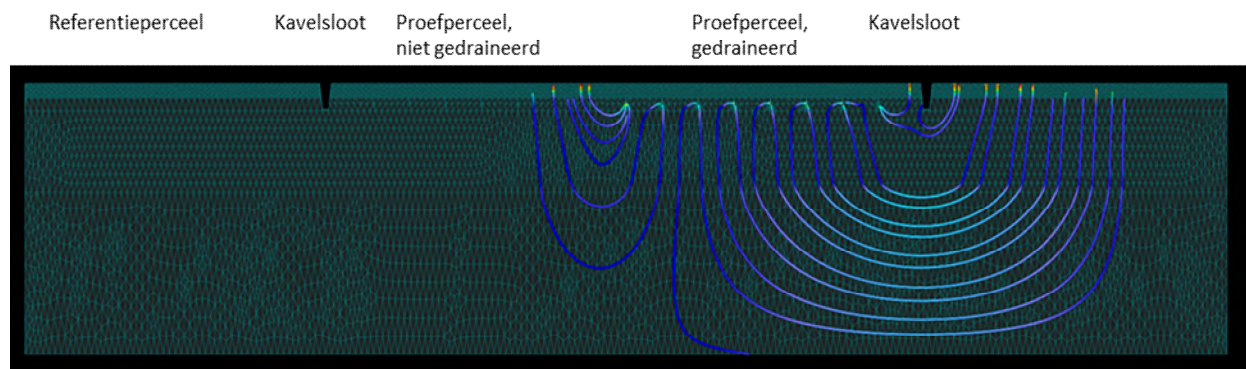
Figuur 6-6: Gemodelleerde onderrand flux in SWAP voor vier experimenten, een simulatie run zonder subirrigatie en met structureel subirrigatie tussen 1 april en 30 september. Een positieve onderrand flux betekent water dat het bodemwatersysteem ingaat, oftewel grondwateraanvulling. Een negatieve onderrand flux betekent water dat het bodemwatersysteem verlaat, oftewel wegzijging. Water dat via wegzijging het bodemwatersysteem verlaat, is grondwateraanvulling naar het diepere pakket.

6.1.5 Stromingspatronen

Stromingspatronen van grondwater op perceelniveau bij subirrigatie zijn gemodelleerd met Hydrus 2D voor Stegeren. De resultaten van het 2D-model zijn vergeleken met de veldmetingen; resultaten hiervan zijn uitgewerkt in Bijlagen VI.

Typische wintersituatie (januari 2018)

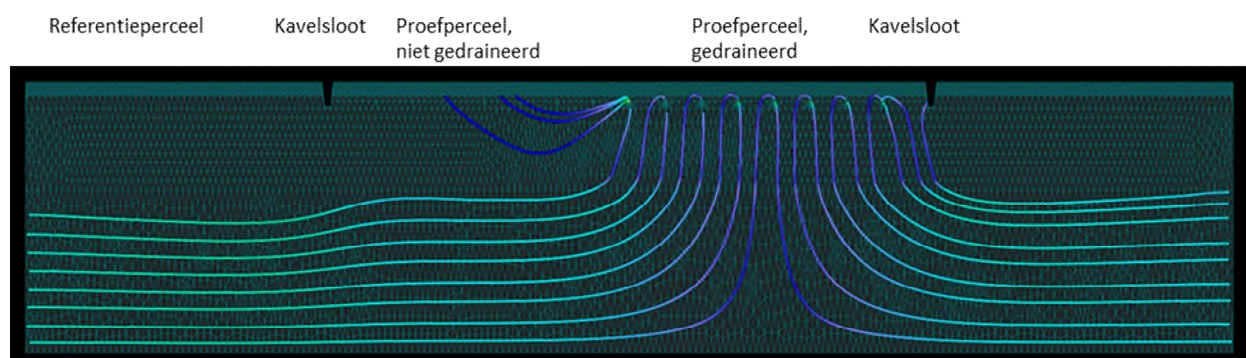
In een typische wintersituatie met een neerslagoverschot (neerslag > verdamping) kan de grondwaterstand stijgen tot boven het niveau van de drainagemiddelen en boven het ingestelde niveau in de afvoerput. Hierdoor kan er afvoer van het perceel naar de kavelsloot plaatsvinden. Er zullen ook perioden zijn zonder neerslag, dan is alleen de subirrigatie de bron van water. Figuur 6-7 schematiseert het proefperceel in Stegeren met subirrigatie in een periode zonder neerslag in de winter (januari 2018). In de figuur is weergegeven (van links naar rechts): het referentieperceel, de kavelsloot, het proefperceel – niet gedraineerd, het proefperceel gedraineerd, de kavelsloot en het perceel ernaast. De subirrigatie op het proefperceel voedt in de winter het grondwater van het proefperceel, maar ook het niet gedraineerde stuk (westelijk) van het proefperceel en een deel rechts (oostelijk) van het gedraineerde proefperceel. Het subirrigatie-water wordt niet afgevoerd via de kavelsloot omdat het waterpeil daarvoor te hoog is (tegendruk). Stroombanen kunnen deels de diepte in gaan tot vrijwel aan de onderrand van het modeldomein. De berekening laat zien dat het proefperceel niet geïsoleerd is van haar omgeving en dat het dus geen op zichzelf staand systeem is.



Figuur 6-7: Hydrus-2D - stroombanen met sub-irrigatie in winter (NB: Z-as 3x vergroot), situatie januari 2018. Rechts is oostzijde. Breedte van dwarsdoorsnede is 200 m, diepte is 15 m.

Typische (na)zomersituatie (september 2019)

In een typische (na)zomersituatie met een neerslagtekort (neerslag < verdamping) is subirrigatie met oppervlaktewater de bron van water voor het proefperceel. In de zomersituatie 2019 stroomt het via subirrigatie in de bodem geïnfiltreerde water voornamelijk weg naar de diepere ondergrond op het proefperceel in Stegeren (Figuur 6-8). In het bovenste deel van de ondergrond (tot 6 m-mv) is de grondwaterstroming voornamelijk verticaal. Dieper in de ondergrond (6 en 15 m-mv) is er meer laterale grondwaterstroming (Figuur 6-8). De verspreiding van het subirrigatie-water naar de westkant (links in de figuur) is groter en het grondwater stroomt in de zomersituatie ook verder naar de oostkant van het perceel. In de zomersituatie is de laterale component van de stroming groter dan in de winter. Het subirrigatie-water voedt daarmee ook het grondwater links en rechts van het proefperceel.



Figuur 6-8: Hydrus 2D - stroombanen sub-irrigatie in (na)zomersituatie (NB: Z-as 3x vergroot), situatie september 2019. Rechts is oostzijde. Breedte van dwarsdoorsnede is 200 m, diepte is 15 m.

6.2 Waterbalans op perceelschaal

Met behulp van de 30-jarige SWAP modellen is de jaarlijkse waterbalans per proeflocatie opgemaakt. Verschillende componenten van de waterbalans met bijbehorende resultaten per locatie zijn in paragraaf 6.1 in de vorm van tijdreeksen beschreven. In deze paragraaf wordt de verhouding tussen de verschillende componenten van de waterbalans beschouwd.

De jaarlijkse verhouding tussen de verschillende componenten van de waterbalans per locatie wordt vooral beïnvloed door het totaal aangevoerde water voor subirrigatie en de meteorologische omstandigheden. In Tabel 6-1 is als voorbeeld de waterbalans voor het perceel met subirrigatie in Stegeren in de jaren 2017, 2018 en 2019 weergegeven. Het jaar 2018 was overduidelijk het droogste jaar in de meetperiode met de hoogste temperaturen in de zomer. De transpiratie is hierdoor, in de situatie met subirrigatie, het hoogst. Daarnaast neemt de wegzijging beduidend toe als gevolg van subirrigatie. Ook neemt als gevolg van subirrigatie de laterale drainage (directe drainage naar het oppervlaktewater) toe. Hoewel dit ook een waterverlies op perceelschaal is, komt het water in de sloot terecht, waar het in het geval van Stegeren eerder ook uit is onttrokken.

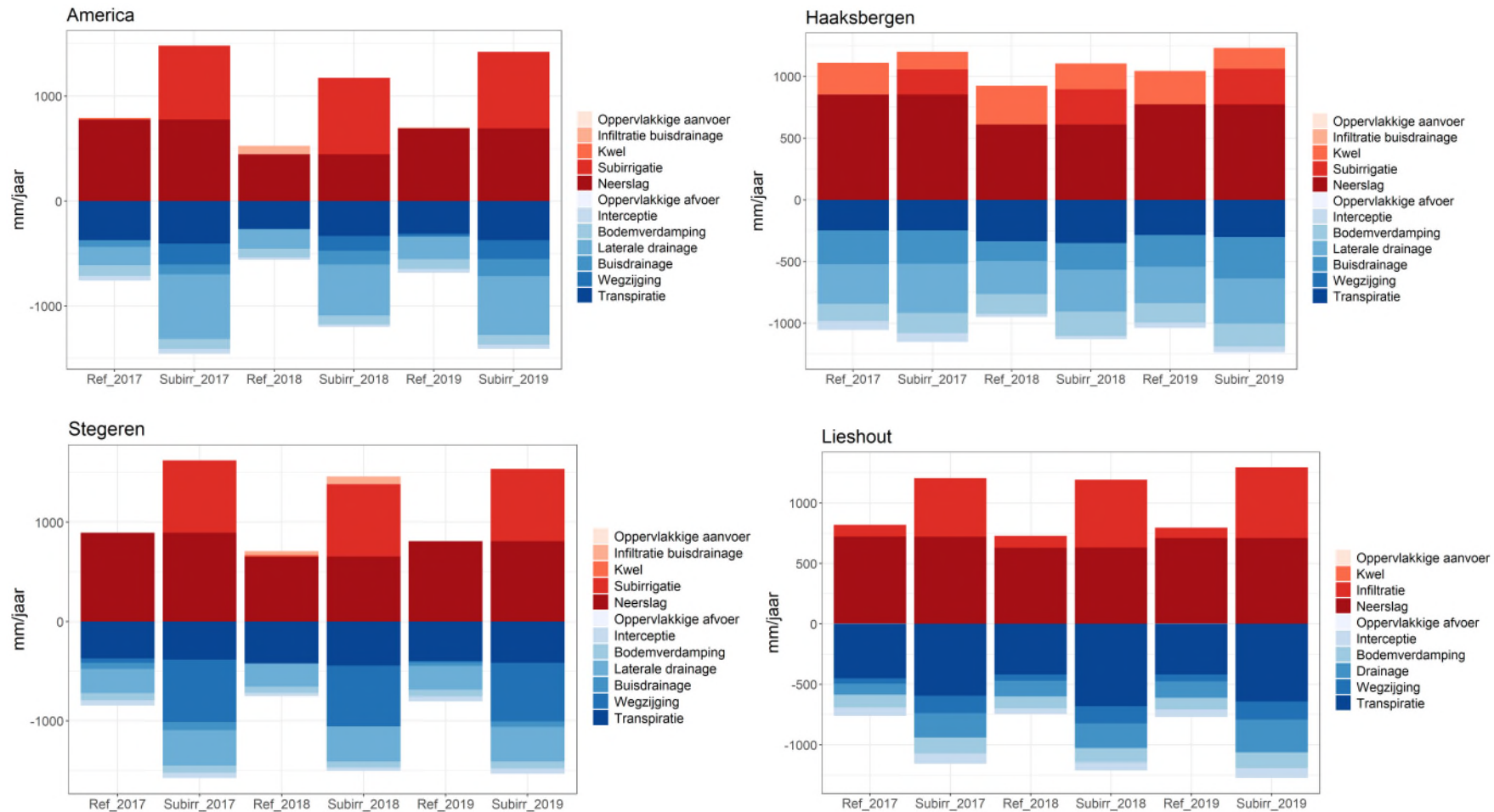
Tabel 6-1: Gesimuleerde waterbalansen op jaarbasis [mm] voor 2017, 2018 en 2019 voor een situatie zonder subirrigatie (1) en een situatie met structureel 4 mm/d subirrigatie tussen 1 april en 30 september (2). De waterbalans is opgesteld met het SWAP model van Stegeren. Positieve waarden bergingsverandering is water dat in het bodemwatersysteem is opgeslagen, negatieve waarden is water dat het bodemwatersysteem heeft verlaten.

		2017		2018		2019	
		1	2	1	2	1	2
In	Neerslag	893.6	896.3	654.0	654.0	809.3	809.3
	Oppervlakkige aanvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subirrigatie	0.00	728.0	0.00	728.0	0.00	728.0
	Infiltratie buisdrainage	0.00	0.00	36.2	79.5	0.00	0.00
	Kwel	0.00	0.00	18.84	0.00	0.00	0.00
	Som	893.6	1624.3	709.04	1461.5	809.3	1537.3
Uit	Interceptie	52.5	53.58	32.74	34.23	49.66	51.69
	Oppervlakkige afvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Transpiratie	371.8	383.1	422.0	444.1	396.5	415.0
	Bodemverdamping	72.0	72.2	61.4	61.2	67.3	69.5
	Laterale drainage (drainage naar opp. water)	246.0	358.0	234.0	354.0	240.0	350.0
	Buisdrainage	58.7	81.0	0.00	0.00	33.9	55.2
	Wegzijging	44.38	628.93	0.00	610.71	15.5	589.86
	Som	845.38	1576.81	750.14	1504.24	802.86	1531.25
Bergingsverandering		48.22	44.79	-41.1	-42.74	6.44	6.05

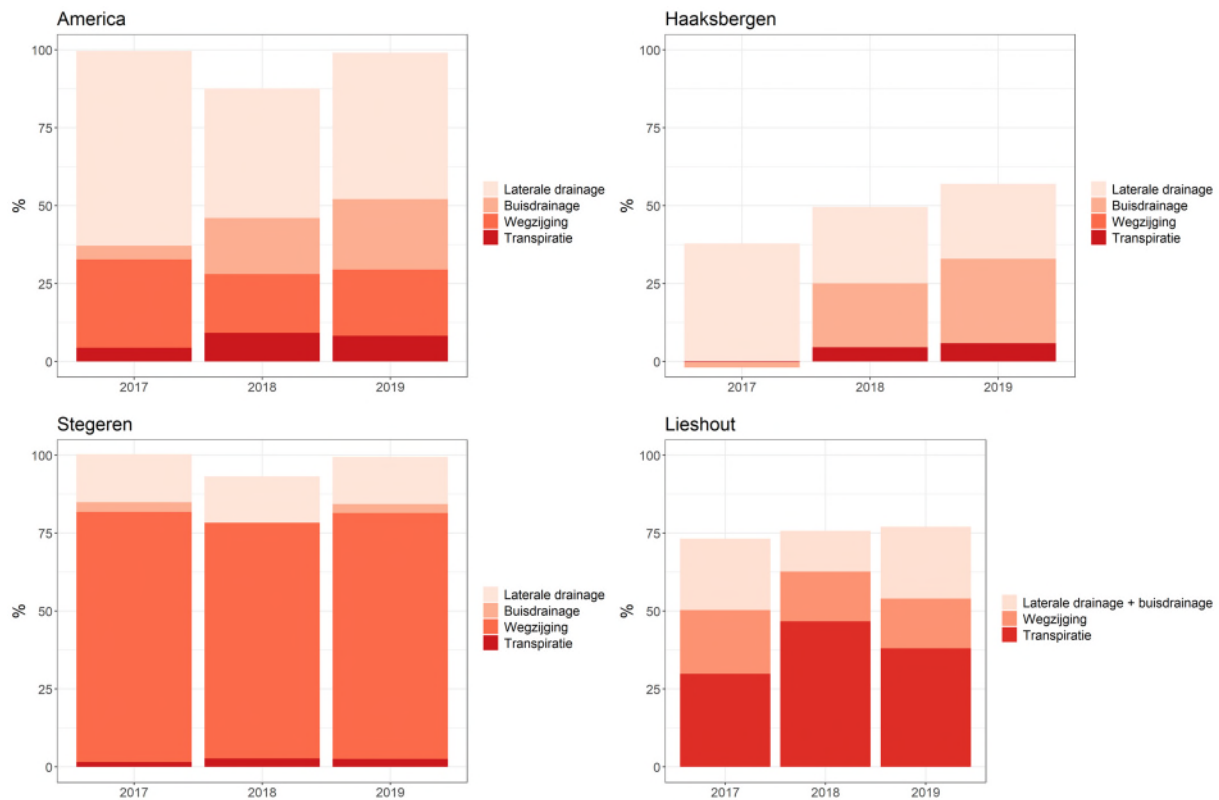
In Figuur 6-9 (gebaseerd op Tabel 6-1, Tabel VII-1, Tabel VII-2, Tabel VII-3) zijn de gemodelleerde waterbalansen voor Stegeren, Lieshout, Haaksbergen en America weergegeven voor de jaren 2017, 2018 en 2019. Figuur 6-10 geeft het aandeel (in procenten) van het aangevoerde water voor subirrigatie dat ten goede komt aan de transpiratie, wegzijgt naar de ondergrond en/of via buisdrainage en drainage via de de ondergrond naar het oppervlaktewater wordt afgevoerd.

Subirrigatie heeft het volgende effect op de waterbalans voor de verschillende locaties voor de jaren 2017-2019:

- Lieshout: een groot deel (30-47%) van het aangevoerde water voor subirrigatie komt ten goede aan de gewasverdamping. 16 – 22% van het water vult het diepere grondwater aan en 13-23% draineert naar het oppervlaktewater.
- Haaksbergen: een groot deel van het aangevoerde water voor subirrigatie (ongeveer 50%) wordt of via de ondergrond, of via de buisdrainage afgevoerd naar het oppervlaktewater. Als (een deel van) het RWZI-effluent in Haaksbergen in deze proef niet voor subirrigatie zou worden gebruikt, zou het direct op het oppervlaktewater worden geloosd. Indirect komt een groot deel van het aangevoerde water alsnog in het oppervlaktewater terecht. Subirrigatie leidt tot een 35-55% lagere kwel in het perceel.
- America: hier wordt grondwater onttrokken voor subirrigatie, waarvan 5-10% ten goede komt aan de gewasverdamping, een aanzienlijk deel draineert naar het oppervlaktewater (41-62%) en een deel vloeit terug als grondwateraanvulling (19-28%). Deze drainage naar het oppervlaktewater is ongewenst, en kan worden voorkomen door het oppervlaktewaterbeheer af te stemmen op het in te stellen grondwaterniveau in het perceel met subirrigatie.
- Stegeren: van het water dat wordt gesubirrigated, gaat 75-80% het ondiepe watersysteem uit als extra wegzijging door subirrigatie. Een kleiner deel wordt gebruikt als extra transpiratie (1.5-2.5%) of verlaat het perceel via drainage (15%).



Figuur 6-9: Gesimuleerde waterbalans voor de locaties voor de situatie met (Subirr) en zonder (Ref) subirrigatie voor 2017, 2018 en 2019. Door de modelinstellingen gebruikt in het 30-jarige SWAP model voor Lieshout geeft 'Infiltratie' de totale hoeveelheid water aanwezig in de drainagebuizen (zowel via laterale instroming als gevolg van slootpeil/ drainagehoogte en subirrigatie (wateraanvoer buizensysteem)) weer. 'Drainage' geeft de laterale drainage (drainage naar opp. water) en buisdrainage weer.



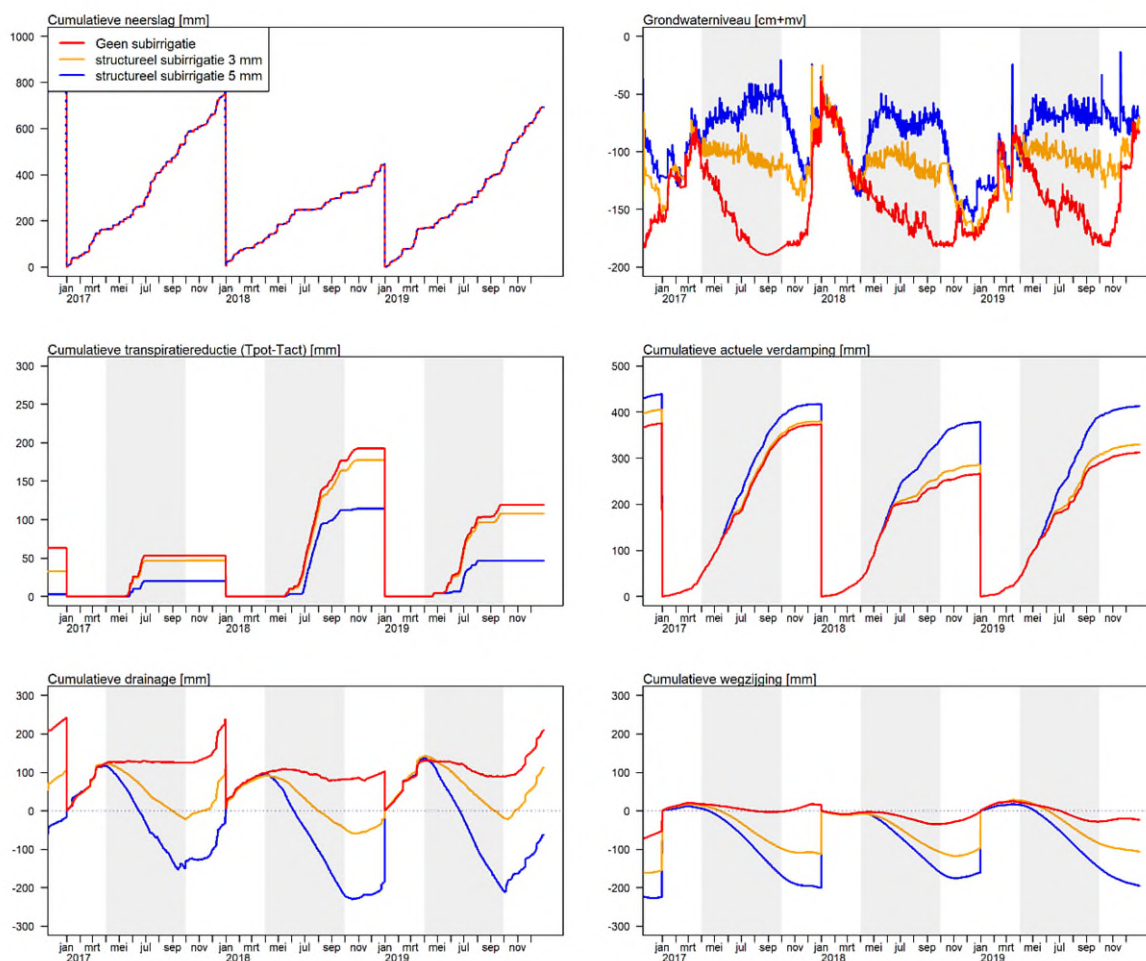
Figuur 6-10: Aandeel (in procenten) van het aangevoerde water voor subirrigatie dat ten goede komt aan de transpiratie, wegzijgt naar de ondergrond en/of via buisdrainage en drainage via de de ondergrond naar het oppervlaktewater wordt afgevoerd. De procentuele getallen zijn gebaseerd op de gemodelleerde waterbalans component met SWAP (met subirrigatie – zonder subirrigatie) t.o.v. de wateraanvoer in het betreffende jaar (2017, 2018 of 2019). Bij Lieshout geeft, door de modelinstellingen, de waterbalanspost 'drainage' zowel de laterale drainage (drainage naar oppervlaktewater) als buisdrainage weer i.p.v. enkel de laterale drainage zoals voor de andere locaties.

6.3 Modelscenario's

6.3.1 Variatie timing en hoeveelheid aanvoer

Het effect van variatie in de hoeveelheid wateraanvoer voor subirrigatie en de timing van de aanvoer is geanalyseerd voor simulaties met een wateraanvoer van 3 mm/d en 5 mm/d (Figuur 6-11). Hiervoor is het gekalibreerde SWAP-model van America als basismodel gebruikt (zie paragraaf 5.4).

Er is een duidelijke stijging in de grondwaterstand te zien als gevolg van subirrigatie (Figuur 6-11). Met 3 mm/d wateraanvoer blijft de grondwaterstand rond de -90/-100 cm+mv. Met 5 mm/d wateraanvoer kan een grondwaterstand van rond de -50/-60 cm+mv worden gerealiseerd. In de wintermaanden zakt het niveau weer uit. Een hogere grondwaterstand heeft ook direct tot gevolg dat actuele transpiratie stijgt (Figuur 6-11). In de drogere jaren 2018 en 2019 is het verschil in actuele transpiratie tussen geen subirrigatie en 3 mm/d subirrigatie gering, terwijl bij 5 mm/d een duidelijker verschil aanwezig is. Hieruit volgt dat de grondwaterstand van -90/ -100cm+mv te diep is om het vochtgehalte in de wortelzone dusdanig te verhogen, dat die ook tot een duidelijk hogere transpiratie leidt. Als gevolg van subirrigatie nemen de jaarlijkse drainage en wegzijging toe (Figuur 6-11); deze toename is vanzelfsprekend het grootst bij een aanvoer van 5 mm/d. In deze projecties lijkt 5 mm/d subirrigatie het meest gunstige voor de gewasgroei. Die situatie is verder uitgediept voor verschillende perioden van wateraanvoer (Figuur 6-12).



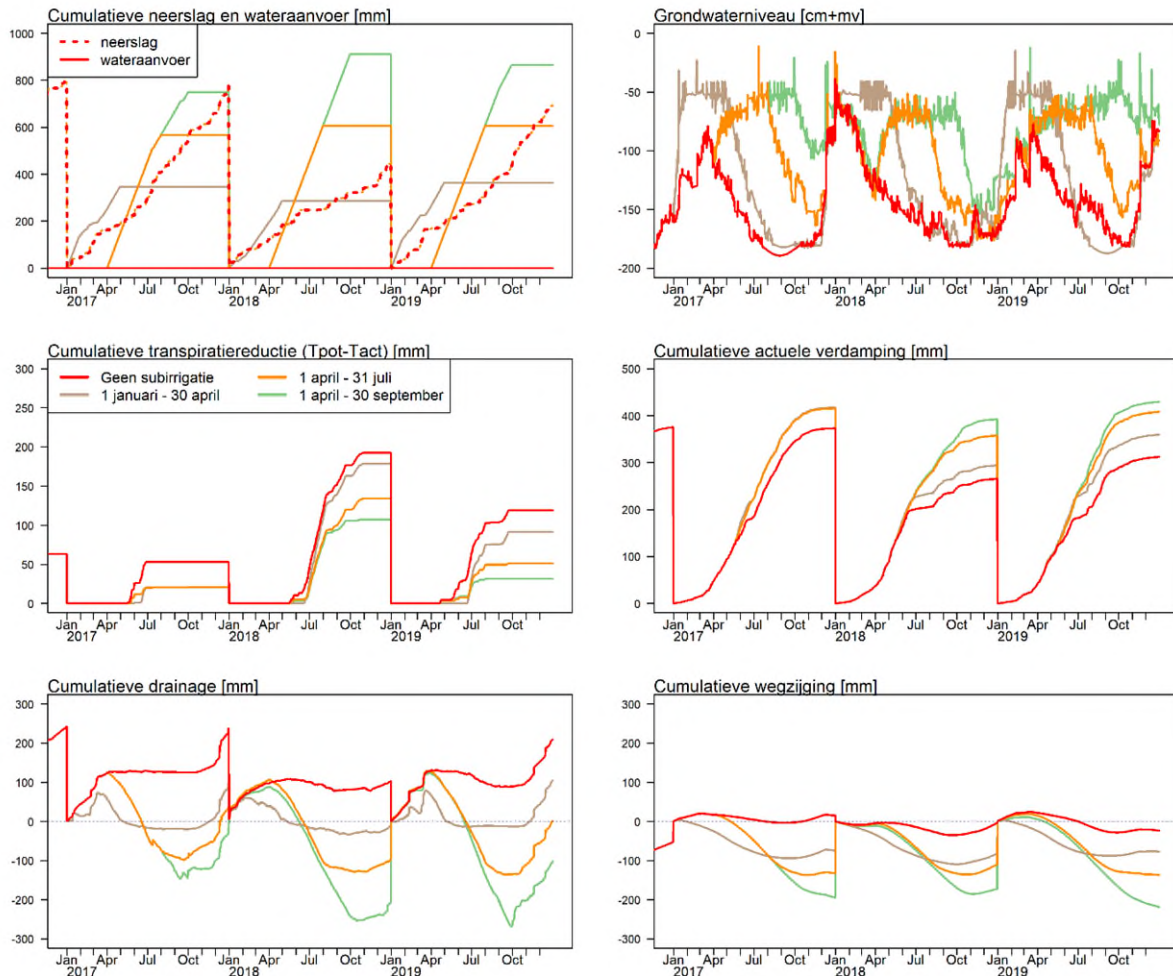
Figuur 6-11: Gemodelleerde waterbalans, met het SWAP-model van America als basismodel, voor 2017-2019 met drie scenario's: geen subirrigatie, structureel wateraanvoer 3 mm/d, structureel wateraanvoer 5 mm/d. Hierbij betekent structureel tussen 1 april en 30 september. Positieve drainage is water dat het bodemwatersysteem uitgaat (laterale drainage, afvoer), negatieve drainage is water dat het bodemwatersysteem in komt (subirrigatie, lateraal). Positieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem in komt (van het diepe pakket naar het ondiepe pakket), negatieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem verlaat (water van het ondiepe pakket naar het diepe pakket).

De grondwaterstand reageert snel op wateraanvoer; deze stijgt direct als er wateraanvoer plaatsvindt. Echter zakt de grondwaterstand ook weer snel uit als de wateraanvoer stopt.

Voor de scenario's wateraanvoer in de winter (1 januari – 30 april), in het voorjaar (1 april – 31 juli) en in het groeiseizoen (1 april – 30 september) is het effect op componenten van de waterbalans gesimuleerd (Figuur 6-12). In drogere jaren (2018 en 2019) is de actuele transpiratie het hoogst bij subirrigatie in het volledige groeiseizoen; de transpiratiereductie neemt het meest af (Figuur 6-12). Wateraanvoer tussen 1 april en 31 juli, geeft daarna de hoogste actuele transpiratie. Twee extra maanden subirrigatie (verschil scenario voorjaar- en groeiseizoenwateraanvoer) in 2018 (neerslag = 445 mm) leidt tot 35 mm extra transpiratie (Tact). In 2019 (neerslag = 692 mm) levert deze twee extra maanden met subirrigatie 21 mm extra transpiratie op. In 2017, een natter jaar met een neerslag van 776 mm, is dit verschil in transpiratie maar 0.19 mm. Het aangevoerde water in augustus en september is in 2017 met name naar drainage en wegzijging (grondwateraanvulling) gegaan.

Water aanvoeren in de winter lijkt in 2017 hetzelfde resultaat voor het gewas te hebben gebracht als wateraanvoer in de zomer. Een kanttekening hierbij is dat er in de zomermaanden voldoende neerslag beschikbaar was (juli 2017 was relatief nat), waardoor de transpiratiereductie niet meer toenam (Figuur 6-12). Daarnaast is een risico van winteraanvoer dat het perceel begin maart te vochtig is voor grondbewerking. Echter blijkt uit de resultaten van het jaar 2017 wel dat de bodem voldoende water kan vasthouden (bufferen) voor optimale gewasverdamping in

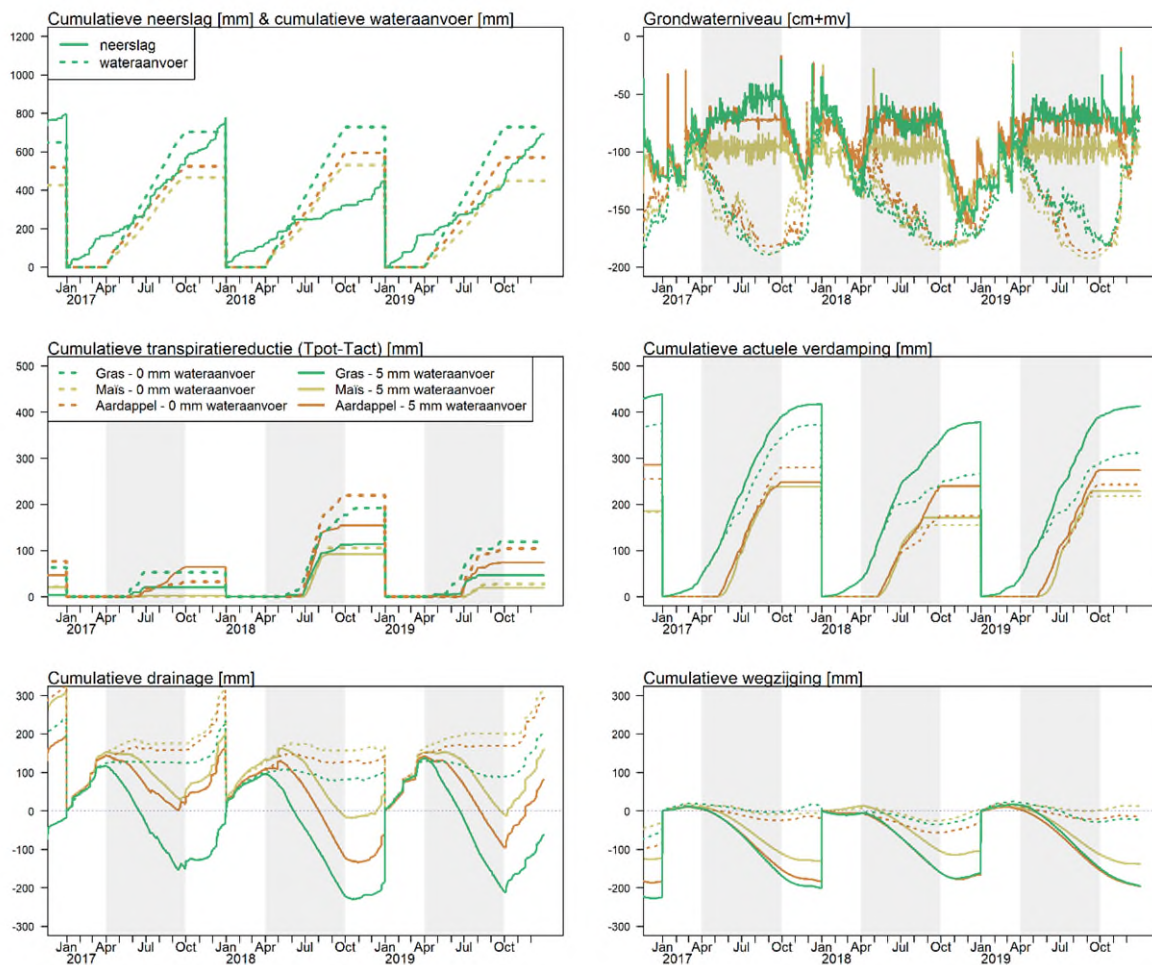
het groeiseizoen (Figuur 6-12). Daarnaast leert de praktijk ook dat een uitgezakte grondwaterstand in een subirrigatiesysteem na een drogere periode, relatief sneller herstelt als er weer vochtaanvulling is dan een uitgezakte grondwaterstand zonder een subirrigatiesysteem. Subirrigatie in de winter zal daardoor mogelijk interessant kunnen zijn in vervolproeven of toepassingen, om het grondwater aan te vullen en natter het groeiseizoen in te gaan.



Figuur 6-12: Gemodelleerde waterbalans, met het SWAP-model van America als basismodel, voor 2017-2019 met vier scenario's van perioden van wateraanvoer: tussen 1 januari en 30 april, tussen 1 april en 31 juli en tussen 1 april en 30 september en geen subirrigatie. In scenario's met wateraanvoer is dit 5 mm/d. Positieve drainage is water dat het bodemwatersysteem uitgaat (laterale drainage, afvoer), negatieve drainage is water dat het bodemwatersysteem in komt (subirrigatie, lateraal). Positieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem in komt (van het diepe pakket naar het ondiepe pakket), negatieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem verlaat (water van het ondiepe pakket naar het diepe pakket).

6.3.2 Variatie in gewassen

Het ingestelde drainageniveau voor de verschillende gewassen (maïs -95 cm+mv, aardappels -70 cm+mv, gras -50 cm+mv) leidt vanzelfsprekend tot verschillende grondwaterstanden (zie paragraaf 5.4.2). Zonder subirrigatie zakt het grondwaterniveau bij alle gewassen uit tot ongeveer -180 cm+mv, met subirrigatie (5 mm/d) wordt het grondwaterniveau duidelijk verhoogd (Figuur 6-13). Uit Figuur 6-13 blijkt de transpiratiereductie ook voor maïs, dat dieper kan wortelen, niet wordt opgeheven. Dit heeft te maken met de wortelontwikkeling, die aan het begin van het groeiseizoen nog ondiep is, terwijl het drainageniveau is ingesteld op een vast niveau van -100cm-mv. Een dynamisch drainageniveau, dat afhankelijk is van het groeisstadium van het gewas, kan dit voorkomen. De diepere drainagebasis voor maïs zorgt wel een relatief lage wateraanvoer en lagere drainage- en wegzijgingsflux dan voor gras en maïs (Figuur 6-13).



Figuur 6-13: Gemodelleerde waterbalans, met het SWAP-model van America als basismodel, voor 2017-2019 met de gewassen gras, mais en aardappel. In scenario's met wateraanvoer is dit 5 mm/d tussen 1 april en 30 september. Positieve drainage is water dat het bodemwatersysteem uitgaat (laterale drainage, afvoer), negatieve drainage is water dat het bodemwatersysteem in komt (subirrigatie, lateraal). Positieve wegziqing is water dat het bodemwatersysteem in komt (van het diepe pakket naar het ondiepe pakket), negatieve wegziqing is water dat het bodemwatersysteem verlaat (water van het ondiepe pakket naar het diepe pakket).

6.3.3 Een ander klimaat

De invloed van klimaatverandering op de waterbalans op een perceel met en zonder subirrigatie is gesimuleerd met de KNMI'14 klimaatscenario's (Figuur 6-14). Hiermee wordt onderzocht in welke mate subirrigatie onder de verschillende klimaatprojecties kan bijdragen aan de vochtvoorziening van gewassen. De resultaten zijn weergegeven als gemiddelden per maand, zodat de referentiesituatie (1990-2019) is te vergelijken met de klimaatscenario's (2036-2065).

De neerslag neemt voor de klimaatscenario's in de zomermaanden (juli, augustus en september) af ten opzichte van de referentiesituatie (Figuur 6-14). Opgemerkt wordt dat de neerslag in de rest van het jaar juist hoger is. Het is hierbij belangrijk om te realiseren dat de klimaatscenario's vrij nat zijn ten opzichte van de referentiesituatie (Tabel 6-2). Een droger jaar (2058) in het klimaatscenario G1 heeft bijvoorbeeld 805 mm neerslag t.o.v. een droger jaar in de referentiesituatie (2018) met 630 mm neerslag.

Allereerst vergelijken we de situatie op een perceel zonder subirrigatie. De grondwaterstand zakt met het warmste en droogste scenario (Wh) verder uit dan in de referentieperiode. De grondwaterstanden van de andere drie klimaatscenario's liggen in de zomermaanden (JJA), mogelijk als gevolg van een nattere winter, net iets boven de referentiesituatie. Hoewel de grondwaterstand in de zomer redelijk vergelijkbaar is aan de referentieperiode neemt de actuele transpiratie toe. In juni kan dit gemiddeld 10 mm/maand meer transpiratie zijn. Als gevolg van de

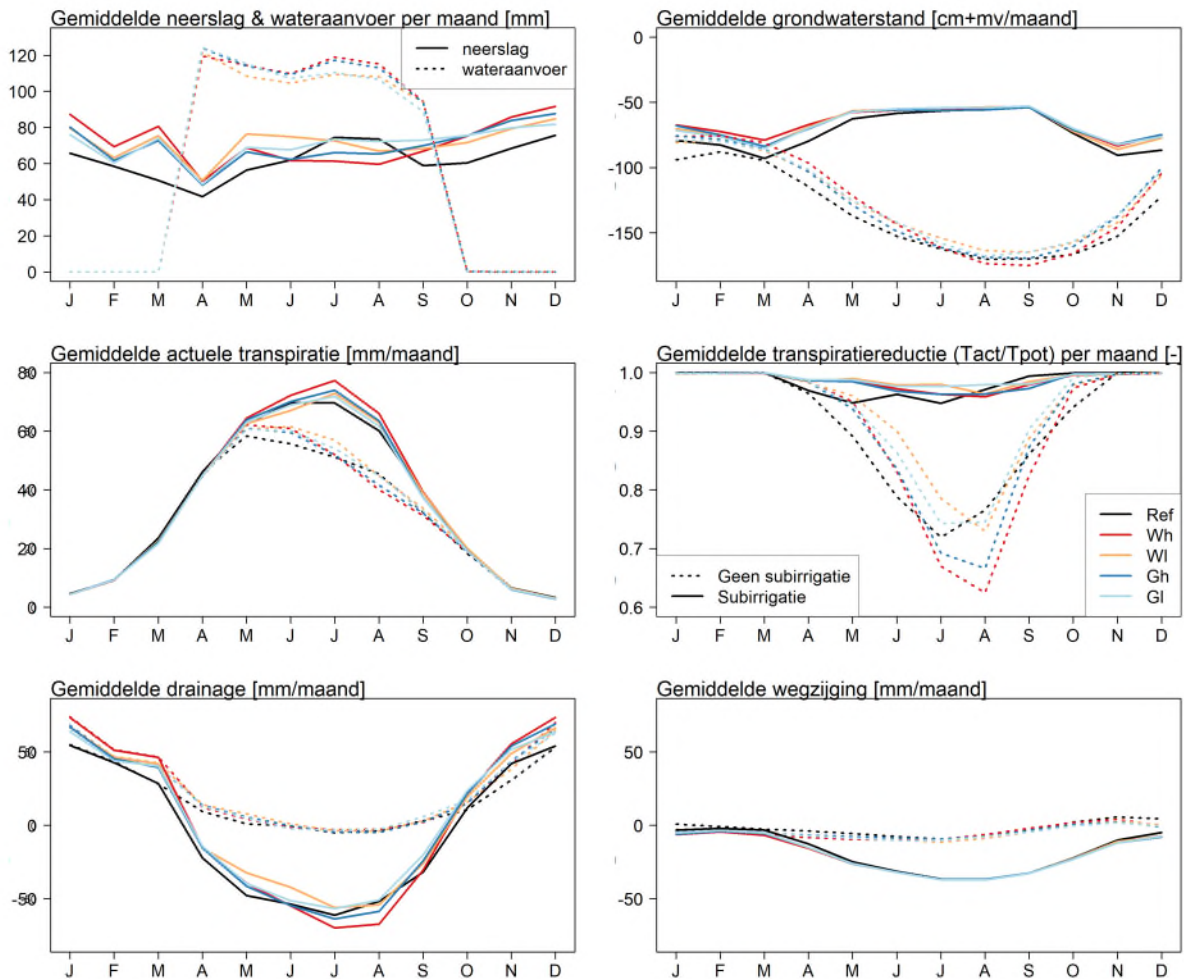
combinatie van hogere temperaturen en minder neerslag (klimaatscenario's Wh en Gh) neemt de transpiratiereductie in de zomermaanden (JJA) duidelijk toe ten opzichte van de referentieperiode. De gewassen zullen hier dus meer te maken krijgen met droogtestress in het groeiseizoen. De gemiddelde drainage en wegzijging zijn in de klimaatscenario's vergelijkbaar met de referentiesituatie (Figuur 6-14). In de winter betekent dit drainage (water draineert vanuit het perceel de sloot in), 's zomers treedt dit vrijwel niet op. De gemiddelde wegzijging (kwel en wegzijging) is 's zomers vooral negatief (water sijpelt van het ondiepe pakket naar het diepe pakket), 's winters is er nagenoeg geen wegzijging (Figuur 6-14).

Als subirrigatie (5 mm/d) wordt toegediend (structureel tussen 1 april – 30 september), verandert de waterbalans aanzienlijk ten opzichte van een situatie zonder subirrigatie. De grondwaterstand stijgt duidelijk in de zomermaanden. Het verschil tussen de klimaatscenario's is hier beperkt.

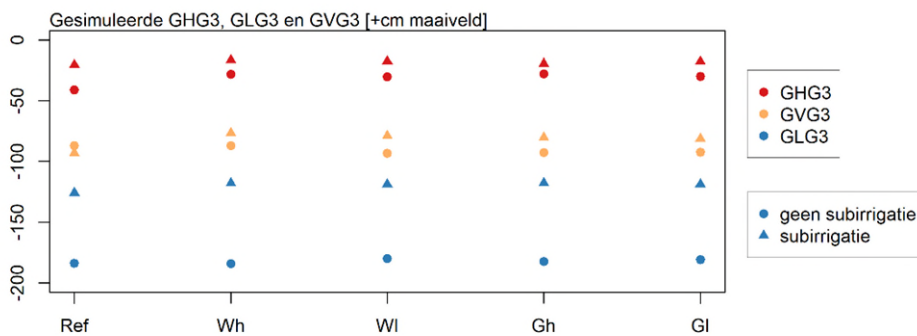
De GxG's (GHG, GVG en GLG), uitgerekend met en zonder subirrigatie, en voor elk klimaatscenario (Figuur 6-15), stijgen iets in de klimaatscenario's t.o.v. de referentiesituatie. Tussen de klimaatscenario's zijn de verschillen gering. Wel is er duidelijk te zien dat met name de GLG stijgt met subirrigatie (Figuur 6-15). Doordat er met subirrigatie meer water beschikbaar is voor het gewas, stijgt de actuele transpiratie met subirrigatie ongeveer met 20 mm per maand t.o.v. zonder subirrigatie. In het droogste klimaatscenario (Wh) is de transpiratiereductie zonder subirrigatie het grootst, maar deze kan nagenoeg worden opgeheven: het gewas kan bijna optimaal transpireren (Figuur 6-14).

Tabel 6-2: Gemiddelde jaarlijkse neerslag en referentie verdamping voor KNMI'14 klimaatscenario's 2050 voor Wh, Wl, Gh en Gl en de referentieperiode (1990-2019). Het AWS KNMI station 370 (Eindhoven) is gebruikt als meteorologische input.

	Gemiddelde neerslag per jaar [mm]	Gemiddelde referentie verdamping per jaar [mm]
referentie	746.51	572.46
Wh	858.69	614.03
Wl	863.79	594.90
Gh	840.06	601.78
Gl	851.78	590.20



Figuur 6-14: Gemodelleerde gemiddelde waterbalans per maand, met het SWAP-model van America als basismodel, voor de referentiesituatie (1990-2019) en KNMI'14 klimaatscenario's 2050 voor Wh, WI, Gh en GI. In scenario's met wateraanvoer is dit 5 mm/d tussen 1 april en 30 september. Het AWS KNMI station 370 (Eindhoven) is gebruikt als meteorologische input. Positieve drainage is water dat het bodemwatersysteem uitgaat (laterale drainage, afvoer), negatieve drainage is water dat het bodemwatersysteem in komt (subirrigatie, lateraal). Positieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem in komt (van het diepe pakket naar het ondiepe pakket), negatieve wegzijging is water dat het bodemwatersysteem verlaat (water van het ondiepe pakket naar het diepe pakket).



Figuur 6-15: Gemodelleerde GxG's (x=L voor laagste, x=H voor hoogste, x=V voor voorjaar) voor KNMI'14 klimaatscenario's 2050 voor Wh, WI, Gh en GI en de referentieperiode (1990-2019). In scenario's met subirrigatie is er dagelijks 5 mm wateraanvoer tussen 1 april en 30 september. Het AWS KNMI station 370 (Eindhoven) is gebruikt als meteorologische input.

6.3.4 Verschillen in inrichting

Het 2D model bij Stegeren is gebruikt om een vijftal scenario's door te rekenen (zie paragraaf 5.4.4):

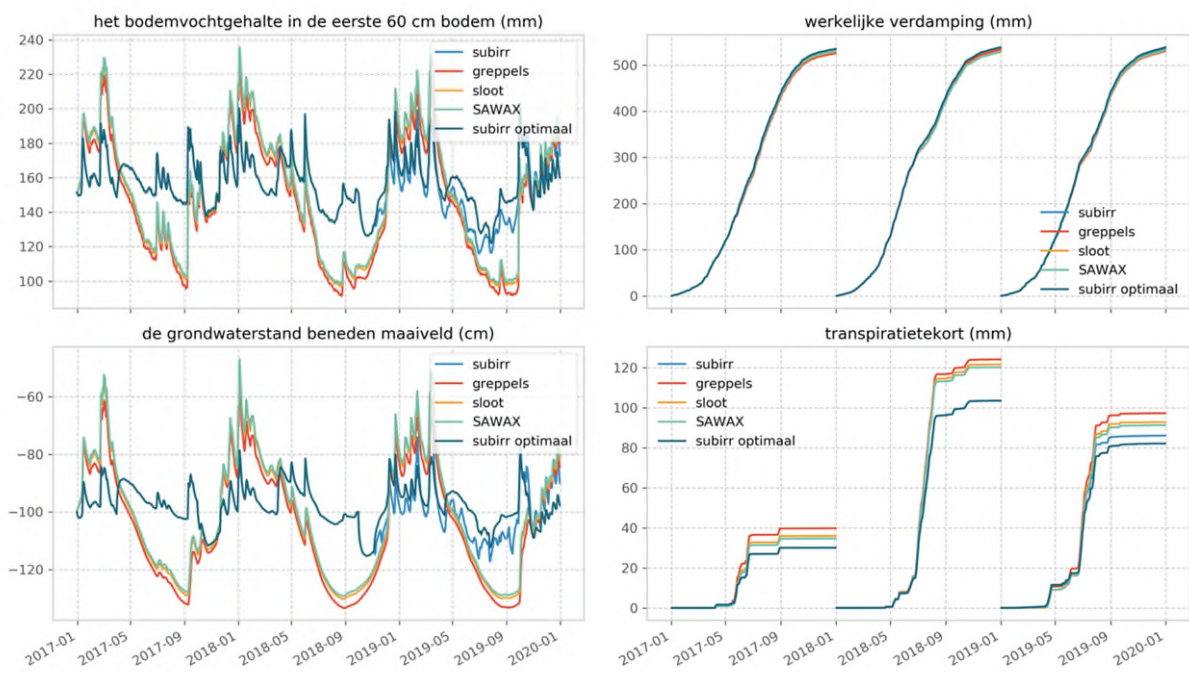
1. Greppels – referentiesituatie zonder wateraanvoer/infiltratie/subirrigatie;
2. Sloot – infiltratie van aanvoerwater via sloot naar perceel; geen (regelbaar) drainagesysteem aangelegd;
3. SAWAX – idem 2 met slimme stuw en wateraanvoer, met een +0,2 m hoger stuwpeil bovenstrooms (conservatieve instelling van stuw);
4. Subirrigatie – idem 2 met regelbaar drainagesysteem en wateraanvoer die suboptimaal is, omdat we gemeten waterstand in de aanvoerput hebben genomen als (drukhoogte)randvoorwaarde; door tijdelijk falende waterpompen is deze waterstand soms te laag;
5. Subirrigatie optimaal – idem 4 met optimale wateraanvoer, constant hoge waterstand in put aangenomen (0,5 m boven drainniveau).

Het berekend watervolume aan bodemvocht in de laag van 0 tot 60 cm-mv en de grondwaterstand in scenario 4 (Figuur 6-16, 'subirr') en scenario 5 (Figuur 6-16, 'subirr optimaal') laat duidelijk een vlakker patroon zien t.o.v. de meer fluctuerende lijnen voor de andere drie scenario's. De vlakkere lijnen geven weer dat het drainagesysteem (met subirrigatie) een dempende werking heeft op het grondwaterniveau en bodemvochtgehalte. In natte perioden (winterperiode) zijn het watervolume en de grondwaterstanden lager (droger) in de situaties met drainagesysteem door de drainerende werking. In droge perioden (zomerperiode) zijn ze juist hoger (natter) doordat er subirrigatie (wateraanvoer) plaatsvindt met het drainagesysteem. De grondwaterstand en het bodemvochtgehalte zijn, logischerwijs, hoger in het scenario subirrigatie-optimaal (5) dan in het scenario subirrigatie (4) in drogere perioden (Figuur 6-16).

De grondwaterstand en bodemvochtgehalte gemodelleerd in de verschillende situaties greppels (1), sloot (2) en SAWAX (3) lijken sterk op elkaar, behalve dat duidelijk te zien is dat de SAWAX-stuw in staat is in de winter bovenstrooms meer water vast te houden in de perceelbodem. In dit model is een stuwpeil van +0,2 m aangenomen; in werkelijkheid kan de stuw verder omhoog worden gezet om een groter positief verschil te maken op het vlak van water vasthouden.

Het effect op de transpiratie van het grasland is in positieve zin het grootst bij subirrigatie-optimaal (5). De reductie in transpiratie (potentiële – werkelijke transpiratie) daalt daarbij 10-15% in de droge jaren 2018 en 2019. Absoluut gezien vergroot subirrigatie-optimaal (5) de transpiratie op het gemodelleerde perceel met 3%. De reden voor dit percentage is de met name neerwaartse stroming van subirrigatiewater in het groeiseizoen door wegzijging naar en voeding van het regionale grondwater.

Het effect op de transpiratie van het grasland bij de situaties sloot en SAWAX is gering t.o.v. de situatie greppels. Infiltratie van slootwater via de oever naar het perceel is niet effectief voor het verhogen van de gewasverdamping.



Figuur 6-16: Hydrus 2D – modelresultaten voor het bodemvochtgehalte, grondwaterstand, werkelijke verdamping en transpiratietekort voor de verschillende inrichtingsscenario's

7 Deelconclusies

Het doel van de modellering en scenarioanalyses was om de effecten van maatregelen op perceelschaal te duiden, gericht op de grondwaterstand en vochtbeschikbaarheid voor het gewas, de componenten van de waterbalans en gewasopbrengst. Hiervoor zijn de maatregelen uit de veldexperimenten geschematiseerd met hydrologische modellen.

Uit de modelresultaten volgt dat:

- de grondwaterstand met subirrigatie dusdanig verhoogd kan worden dat dit leidt tot een betere vochtvoorziening voor het gewas. De transpiratiereductie neemt af en de gewasopbrengst toe.
- subirrigatie de effecten van droogte in het weer, op droogte in het grondwater en bodemvocht kan beperken, maar dat in zeer droge jaren als 2018 en 2019 de grondwater- en bodemvochtdroogte niet voor alle locaties volledig kan worden opgeheven.
- de wateraanvoer voor subirrigatie afhankelijk is van de hydrologische randvoorwaarden (hoeveelheid neerslag, grondwaterstand in de uitgangssituatie, kwel/wegzijging) en daarmee voor een specifieke locatie varieert tussen jaren, maar ook tussen de locaties. Voor elke onderzochte locatie geldt dat maar een (klein) deel van het aangevoerde water ten goede komt aan de gewasverdamping. Voor deze simulaties is uitgegaan van een continu beschikbare wateraanvoer van 4 mm/d gedurende het hele groeiseizoen. Het grootste deel van het water voedt het freatische grondwater, maar een deel ervan wordt afgevoerd via drainage naar het oppervlaktewater of zijgt weg naar het diepere grondwater. In Stegeren, een locatie met een hoge wegzijging in de uitgangssituatie, gaat zo'n 2% van het aangevoerde water naar de gewasverdamping en zo'n 80% vloeit naar het diepere grondwater. In Haaksbergen, een locatie met een beperkte wegzijging in de uitgangssituatie, gaat zo'n 2.5% van het aangevoerde water naar de gewasverdamping, maar zo'n 50% draineert naar het oppervlaktewater. In Lieshout, de situatie met de diepste grondwaterstand in de uitgangssituatie maar een beperkte wegzijging, komt ruim een derde van het aangevoerde water ten goede aan de gewasverdamping, zo'n 20% vult het diepere grondwater aan en 20% draineert naar het oppervlaktewater. In America, met ook een beperkte wegzijging in de uitgangssituatie komt 5-10% van het aangevoerde water ten goede aan de gewasverdamping, maar draineert zo'n 50% naar het oppervlaktewater.
- de benodigde hoeveelheid water verder kan worden gestuurd door keuzes te maken in de periode waarin subirrigatie plaatsvindt. Zo volgt uit de simulaties dat met subirrigatie (5 mm/d) alleen in het voorjaar een buffer kan worden opgebouwd voor het groeiseizoen en de vochtvoorziening voor het gewas verbetert. Simulaties laten ook zien dat subirrigatie gedurende het hele groeiseizoen (tot en met september) in zeer droge jaren slechts tot 20-40 mm extra transpiratie leidt ten opzichte van subirrigatie tot en met juli. In een meer gemiddeld jaar leveren deze extra maanden subirrigatie geen bijdrage meer aan een hogere gewasverdamping. Uit deze scenarioberekeningen volgt dat met een bewuste aansturing van systemen het watergebruik kan worden beperkt, zonder dat dat veel invloed heeft op de vochtvoorziening van het gewas. Scenario-analyses laten ook zien dat 5 mm/d subirrigatie in de drogere jaren 2018 en 2019 weliswaar tot een duidelijke verhoging in transpiratie leidt, maar 3 mm/d niet.
- de benodigde hoeveelheid water afhangt van het gewas. Met name de worteldiepte is hiervoor bepalend. Bij een dieper wortelend gewas kan een diepere grondwaterstand volstaan en is een lagere wateraanvoer nodig.
- ook voor de KNMI'14 klimaatscenario's geldt dat subirrigatie bij kan dragen aan de vochtvoorziening van het gewas.

- een optimaal functionerend subirrigatiesysteem met voldoende wateraanvoer de hoogste bijdrage kan leveren aan de vochtvoorziening van het gewas, vergeleken met wateraanvoer via alleen een sloot, via een sloot met een SAWAX stuw, en met een subirrigatiesysteem dat te kampen heeft met storingen in de wateraanvoer. Belangrijk is dat een subirrigatiesysteem waarvoor de wateraanvoer niet optimaal is, kan leiden tot lagere grondwaterstanden en een lagere vochtvoorziening van het gewas. Voor de SAWAX stuw geldt dat weliswaar bij een voldoende pompcapaciteit het oppervlaktewaterpeil verhoogd kan worden, maar dat dit in zeer droge jaren als 2018 en 2019 niet leidt tot een verbeterde vochtvoorziening van het gewas.

Deel C: Eindconclusies, discussie en aanbevelingen

8 Eindconclusies, discussie en aanbevelingen

De maatregelen regelbare drainage met subirrigatie en SAWAX beogen een bijdrage te kunnen leveren aan het vasthouden, sparen en aanvullen van water in stroomgebieden. Een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie heeft drie opties: water draineren, vasthouden én aanvullen. Zo kan gestuurd worden op optimale condities voor het gewas en kan een agrariër het bodemvochtgehalte en de grondwaterstand op zijn perceel actief beheren. Het doel van subirrigatie is om het grondwatersysteem aan te vullen en de grondwaterstand en daarmee ook het vochtgehalte in de wortelzone van de plant te verhogen. De SAWAX is bedoeld om waterpeilen in watergangen, die operationeel beheerd worden door het waterschap, mechanisch automatisch door te vertalen naar (instelbaar) hogere peilen in de aangesloten watergangen bovenstrooms van de stuw. Deze laatste watergangen zijn typisch niet in dagelijks operationeel beheer van het waterschap, zoals kavelsloten van agrariërs. De SAWAX laat het peil in deze kavelsloten meebewegen met het door het waterschap gevoerde peil in de hoofdwatergangen. Om ook in de zomerperiode een peilverschil te realiseren kan water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden gepompt (op zonne-energie).

In dit onderzoek is praktijkervaring opgedaan met de maatregelen en is het effect van de maatregelen op de verschillende componenten van de waterbalans, de grondwaterstand, het bodemvochtgehalte en gewasgroei gekwantificeerd.

8.1 Eindconclusies

Uit de resultaten van het onderzoek volgen de volgende antwoorden op de onderzoeksvragen:

1. *Wat is het effect van regelbare drainage met subirrigatie op de grondwaterstand en vochtvoorziening voor het gewas en wat zijn de hydrologische randvoorwaarden voor succesvolle inpassing?*

Subirrigatie via regelbare drainagesystemen zorgt voor een stijging van de grondwaterstand en hoger bodemvochtgehalte in de wortelzone en hiermee een betere vochtvoorziening voor het gewas. Een daling van de grondwaterstand vanuit het voorjaar kan met subirrigatie worden omgezet in een stijging. Binnen de proeven is met subirrigatie een tot 150 cm hogere grondwaterstand gerealiseerd dan zonder subirrigatie het geval zou zijn geweest.

Zo'n stijging van de grondwaterstand kan alleen worden gerealiseerd als de wegzijging naar de ondergrond beperkt is. Uit de veldexperimenten volgt dat bij een combinatie van een diepe zomergrondwaterstand in de uitgangssituatie (ongeveer -250cm+mv) en een beperkte wegzijging van 0.1mm/d de grondwaterstand voldoende verhoogd kan worden om het gewas van voldoende water te voorzien, maar dat dit bij een combinatie van een zomergrondwaterstand van -140cm+mv en hoge wegzijging van 1.5mm/d niet lukt. Een beperkte wegzijging is dus een belangrijkere randvoorwaarde dan de grondwaterstand in de uitgangssituatie.

Uit de verschillende proeven (America, Haaksbergen, Lieshout) blijkt dat de combinatie van (matig fijn) zand en een dunne leemlaag op diepte, voor voldoende weerstand zorgt om een stijghoogteverschil tussen het diepe en ondiepe pakket te creëren. Uit de resultaten bij Stegeren (matig fijn zand, leemlaag ontbreekt) blijkt dat bij het ontbreken van een leemlaag het moeilijker is om een stijghoogteverschil tussen het diepe en ondiepe pakket te creëren.

Naast wegzijging is drainage naar het oppervlaktewater van belang. Deze kan groot zijn als het oppervlaktewaterbeheer onvoldoende is aangepast aan de verhoogde grondwaterstand in een perceel met subirrigatie. Voor de proef in America geldt dat zo'n 50% van het aangevoerde water draineert naar het oppervlaktewater.

Het effect van regelbare drainage met subirrigatie hangt ook af van de bewortelingsdiepte van het gewas. Bij een diepwortelend gewas hoeft de grondwaterstand minder te worden verhoogd om het gewas van voldoende water te voorzien. Echter, dit geldt alleen als het wortelprofiel reeds goed ontwikkeld is. Als de worteldiepte nog ondiep is, zal ook grondwaterstand ondieper moeten zijn om het gewas van voldoende water te voorzien. Een te hoge grondwaterstand leidt tot natschade aan het gewas. Beheer/aansturing van de systemen dat zich richt op een dynamische instelling van de gewenste grondwaterstand en drainagebasis, is nodig om steeds te anticiperen op te droge of te natte condities.

Naast randvoorwaarden voor wegzijging, drainage naar het oppervlaktewater en gewenste grondwaterstand is het weer van belang. Weinig neerslag en een hoge verdamping zorgen voor een hogere watervraag vanuit subirrigatie. Uit dit onderzoek volgt dat bij een hoge watervraag in zeer droge jaren de gewenste grondwaterstand niet altijd en overal kan worden bereikt.

Uniforme vuistregels, met 'harde getallen' voor randvoorwaarden waarbij regelbare drainage met subirrigatie kan worden ingepast zijn niet te geven. Het ontwerp, inrichting en beheer van regelbare drainage met subirrigatie vergt lokaal maatwerk, waarbij de in dit onderzoek gebruikte modelconcepten kunnen worden gebruikt om de effecten op de verschillende componenten van de waterbalans vooraf in te schatten.

2. *Wat is het effect van SAWAX op het oppervlaktewaterpeil in kavelsloten en wat zijn de hydrologische randvoorwaarden voor succesvolle inpassing?*

In Stegeren is de SAWAX getest op één locatie in een enkele kavelsloot. In de winterperiode, i.e. periode van neerslagoverschot, zorgde de SAWAX voor een gemiddeld hoger oppervlaktewaterpeil bovenstrooms van de stuw, zoals van de werking van deze stuw verwacht mocht worden. De hogere peilen bovenstrooms zakten mee omlaag bij lagere waterpeilen benedenstrooms. Zo is water geborgen en water vastgehouden bovenstrooms van de SAWAX. Ook is de optie getest met wateraanvoer via een pomp. In de veldproef tijdens de zeer droge zomer in 2019 is het daarbij niet gelukt bovenstrooms het gewenste peilniveau te realiseren. Dit werd veroorzaakt door een te laag ingeschatte pompcapaciteit vanwege een onderschatting van de optredende wegzijging uit het bovenstroomse pand naar het grondwater; deze was in 2019 groter dan verwacht. Ook bij voldoende pompcapaciteit zou toepassing van de SAWAX op deze locatie in de zeer droge groeiseizoenen van de jaren 2018 en 2019, onvoldoende geleid hebben tot een verbeterde vochtvoorziening van het gewas op de percelen grenzend aan de kavelsloot. Een hoger oppervlaktewaterpeil leidt bij afwezigheid van een neerslagoverschot (zoals in 2019) namelijk niet of nauwelijks tot een hogere grondwaterstand onder de aangrenzende percelen. In meer gemiddelde jaren zal dit effect anders i.c. meer positief zijn. Uit aanvullende modelsimulaties volgde verder dat bij een voldoende hoge pompcapaciteit in de zomer bovenstrooms wél een hoger waterpeil kon worden gerealiseerd.

3. *Wat is het effect van de maatregelen op de verschillende componenten van de waterbalans op perceelsniveau?*

Subirrigatie heeft effect op alle componenten van de waterbalans (Figuur 8-1), uiteraard behalve op neerslag. De wateraanvoer voor subirrigatie is afhankelijk van de hydrologische randvoorwaarden (hoeveelheid neerslag, grondwaterstand in de uitgangssituatie, kwel/wegzijging) en varieert daarmee tussen jaren, maar ook tussen de locaties. Voor elke onderzochte locatie geldt dat maar een (klein) deel van het aangevoerde water ten goede komt aan de gewasverdamping. Het meeste water voedt het diepere grondwater, of draineert naar het oppervlaktewater. Dit hangt af van de hydrologische randvoorwaarden en is dus locatieafhankelijk. Voor het inschatten van het effect van de maatregel op de waterbalans op perceelsniveau is dus altijd een locatie-specifieke analyse nodig van de lokale waterhuishouding, waterbalans en bodemopbouw.

De wateraanvoer (i.e. de benodigde hoeveelheid water) voor subirrigatie, wanneer toegepast gedurende het gehele groeiseizoen, is hoog. Gemiddeld voor de proeven is de wateraanvoer voor subirrigatie 500 mm/jaar. Slechts een klein deel van dit water komt ten goede aan een verhoogde gewasverdamping (transpiratie). Voor 2018, bijvoorbeeld, is dit zo'n 2.5% voor Haaksbergen en Stegeren, 9% voor America en 47% voor Lieshout. Het resterende water kan worden afgevoerd naar het oppervlaktewater (America: 41% extra drainage naar het oppervlaktewater in 2018, het oppervlaktewaterpeil is onvoldoende aangepast aan het drainageniveau in het

aangrenzende perceel; Haaksbergen 25%, Lieshout 13%), of voedt het grondwater (Stegeren 76% in 2018; America: 19%; Lieshout: 16%; Haaksbergen 0%).

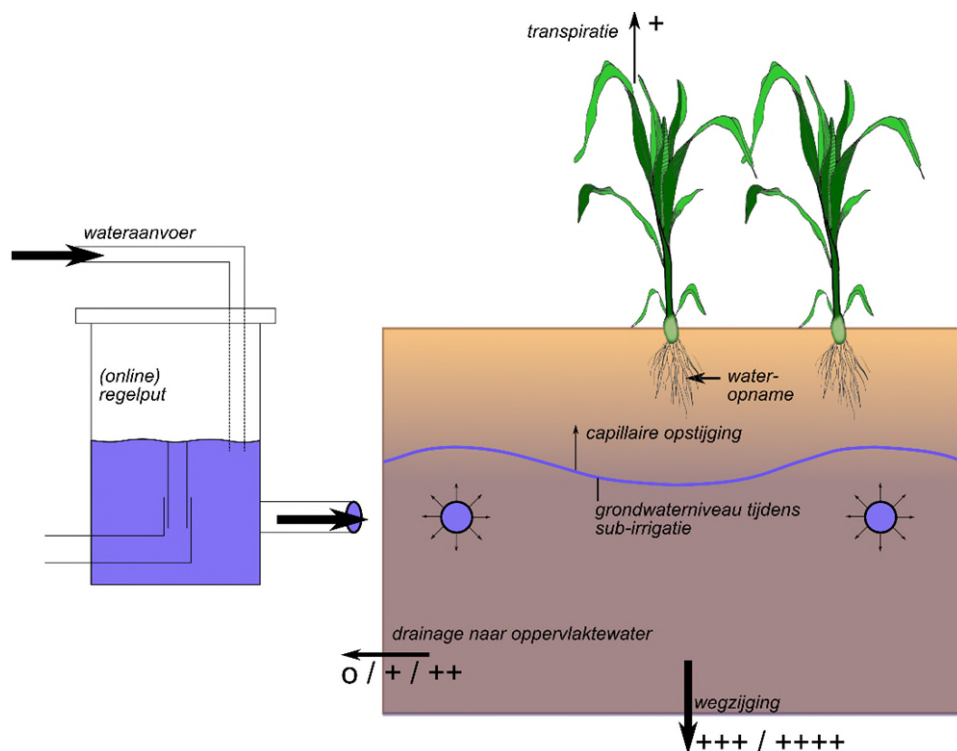
Uit de veldwaarnemingen is gebleken dat de SAWAX goed functioneerde in de afvoer- en aanvoersituatie en dat een grotere pompcapaciteit tot betere resultaten had geleid. Echter, de hydrologische randvoorwaarden op de testlocatie én de extreme weercondities hebben de proef qua wateraanvoer niet succesvol gemaakt en is de waterbalans op perceelsniveau niet/nauwelijks beïnvloed; dat ligt niet aan de werking van de SAWAX.

4. Welke aspecten moeten worden meegenomen in (regionale) inpassing van de maatregelen?

De wateraanvoer bij subirrigatie is groot en ook voor SAWAX moet water beschikbaar zijn om naar bovenstrooms aan te voeren. Echter, de maatregelen dragen ook bij aan de grondwateraanvulling en een lagere beregeningsvraag. Aanvullend op bovengenoemde randvoorwaarden, is voor de (regionale) inpassing van de maatregelen daarom van belang dat:

- er een bron van water is (oppervlaktewater, gezuiverd restwater, grondwater) die voldoende groot is en verantwoord kan worden benut zonder problemen elders te veroorzaken. Hierbij is het ook van belang dat het netto gebruik inzichtelijk wordt gemaakt. Water dat onttrokken wordt uit het oppervlaktewater, kan immers na bodempassage via drainage deels weer terugkomen in het oppervlaktewater. Ook dient inzichtelijk te worden gemaakt of aangevoerd water voor subirrigatie als verlies moet worden geduid als het wegzijgt naar het grondwater, of dat grondwateraanvulling een positief neveneffect is van de maatregel.
- het watergebruik wordt beperkt. De benodigde hoeveelheid water voor subirrigatie kan worden gestuurd / beperkt door keuzes te maken in de periode waarin subirrigatie plaatsvindt, zonder daarbij het effect op het gewas veel te verminderen. Zo volgt uit scenario-analyses (met America als uitgangssituatie), dat met alleen subirrigatie (5 mm/d) in het voorjaar, een buffer kan worden opgebouwd voor het groeiseizoen en de vochtvoorziening voor het gewas in het groeiseizoen verbetert. Simulaties laten ook zien dat subirrigatie gedurende het hele groeiseizoen (tot en met september) in zeer droge jaren slechts tot 20-40 mm extra transpiratie leidt ten opzichte van het toepassen van subirrigatie tot en met juli. De extra maanden subirrigatie leveren dus nog maar een beperkte extra transpiratie op. In een meer gemiddeld jaar leveren deze extra maanden subirrigatie géén bijdrage meer aan een hogere transpiratie. Scenario-analyses laten ook zien dat 5 mm/d subirrigatie in de drogere jaren 2018 en 2019 weliswaar tot een duidelijke verhoging in transpiratie leidt, maar 3 mm/d niet. Er zit daarmee vanzelfsprekend ook een ondergrens aan de te behalen vermindering van de wateraanvoer voor subirrigatie.
- het doel van de maatregelen niet uit het oog wordt verloren. Een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie heeft drie opties: water draineren, vasthouden én aanvullen. Uit dit onderzoek blijkt dat voor de extreem droge jaren 2018 en 2019 het (vanzelfsprekend) lastiger is de grondwaterstand op peil te houden, door minder voeding vanuit neerslag, en een een grotere benodigde wateraanvoer. Daarmee zijn de maatregelen niet geschikt om ook in zeer droge jaren de gewassen overall optimaal van water te voorzien. Er zal veelal een deel droogteschade overblijven. Aanleg van regelbare drainage met als primair doel de functie subirrigatie te benutten is dan ook niet opportuun. Het benutten van drainagesystemen om primair water af te kunnen voeren wanneer nodig, maar (daarna) systemen ook weer te kunnen aanvullen is daarentegen wel passend.

Op deze aspecten wordt nader ingegaan in de discussie.



Figuur 8-1: Indicatie van de effecten van subirrigatie op enkele componenten van de waterbalans. Een beperkt deel van het aangevoerde water komt ten goede aan het gewas voor transpiratie, het grootste deel gaat via de ondergrond naar het oppervlaktewater of vult via wegzijging het regionale grondwater aan. De verhouding tussen drainage naar oppervlaktewater en wegzijging is afhankelijk van de hydrologische randvoorwaarden, die deels ook beïnvloed kunnen worden. Zo kan door het hanteren van een hoger slootpeil drainage naar het oppervlaktewater worden beperkt en wegzijging worden vergroot. Bij het ontwerpen en inpassen van de maatregel dient daarom het hele watersysteem beschouwd te worden, inclusief de locatie en periode waarin water beschikbaar is.

8.2 Discussie

Het doel van de watermaatregelen zoals vormgegeven in de verschillende veldproeven, was om te kunnen anticiperen op hydro-meteorologische situaties en risico's en het beschikbare zoet water verantwoord benutten: water zoveel mogelijk vasthouden, aanvullen waar het kan en afvoeren als het moet. Meetresultaten uit verschillende veldexperimenten zijn gebruikt om een onderbouwd beeld te krijgen van de werking van regelbare drainage met subirrigatie en de SAWAX-stuw. De metingen en analyses dragen gezamenlijk bij aan de benodigde kennisontwikkeling over de werking van de systemen, het effect van de maatregelen op de watervoorziening voor gewassen, en het effect van de maatregelen op de verschillende componenten van de waterbalans.

8.2.1 Veldexperimenten

Met betrekking tot de veldproeven dienen de volgende zaken te worden opgemerkt, in relatie tot beantwoording van de onderzoeksvragen:

- Door de weersomstandigheden binnen de looptijd is qua veldproeven de nadruk komen te liggen op anticiperen op droog weer via wateraanvoer en subirrigatie. Een natte periode, eventueel met kans op wateroverlast, heeft zich niet of nauwelijks voorgedaan binnen de doorlooptijd van de proeven. Daardoor hebben we onvoldoende kans gezien om in de praktijk te testen en effecten te zien van water vasthouden. Daarnaast is in de ontwerpen ook niet met zulke extreem droge weerscondities rekening gehouden.
- Bij veldexperimenten zijn we natuurlijk afhankelijk van het optredende weer. Ook kan er in proeven van alles misgaan qua systemen en techniek, daarbij moeten kinderziekten worden verholpen. In het veld kun je worden geconfronteerd met omstandigheden die vooraf niet waren voorzien. Voor zowel subirrigatie

als SAWAX bleek de benodigde ingeschatte capaciteit van de pompen in de veldexperimenten niet altijd voldoende voor de extreem droge weerscondities vanaf 2018.

- Er is op de proeflocaties veel water nodig geweest om met subirrigatie de beoogde grondwaterstandsverhoging te realiseren. Hierbij moet wel met de volgende aspecten rekening worden gehouden:
 - o Voor de proeven zijn niet op voorhand ideale locaties gekozen, zoals een diepe zomergrondwaterstand in de uitgangssituatie (zo'n -250cm+mv in Lieshout), slechts een dunne leemlaag in de ondergrond (America), of helemaal geen leemlaag (Stegeren). Daarmee is ook gezocht naar de grenzen van de werking van de systemen. Op locaties met gunstiger hydrologische randvoorwaarden is de kans groot dat de grondwaterstand verhoogd kan worden, met minder wateraanvoer. Dit volgt ook uit het vergelijken van de veldproeven, waaruit blijkt dat op een locatie met een beperkte wegzijging en een ondiepe grondwaterstand in de uitgangssituatie (vanzelfsprekend) minder water nodig is om de gewenste grondwaterstandsverhoging te realiseren.
 - o De meetperiode wordt gekenmerkt door zeer droge weerscondities. In minder extreme jaren zal de wateraanvoer minder zijn, maar is ook het te behalen effect op het gewas kleiner.
 - o In de proeven is ervoor gekozen gedurende het hele groeiseizoen de grondwaterstand op een ingesteld peil te handhaven. Deze keuze vraagt ook om een continue wateraanvoer. Nu bekend is hoe snel de grondwaterstand verhoogd kan worden met subirrigatie, kunnen de systemen ook slimmer gebruikt worden. Een continue wateraanvoer is namelijk wellicht niet nodig om de gewassen van voldoende water te voorzien. Dit kan de totale watervraag verminderen, maar behoeft nader onderzoek over het effect op de vochtvoorziening voor het gewas (zie ook paragraaf 8.3).
- Voor SAWAX is slechts één locatie onderzocht, waarvoor ook voor slechts één meetjaar meetgegevens zijn geanalyseerd en de pompcapaciteit voor deze locatie te laag bleek om bovenstrooms van de SAWAX een hoger waterpeil te realiseren. Op basis van deze beperkte meetperiode kunnen dan ook geen vergaande conclusies getrokken worden.
- Voor de veldproeven is, met uitzondering van regelbare drainage met subirrigatie in Stegeren, geen gebruik gemaakt van metingen in een referentieperceel, waar de maatregelen niet zijn toegepast. In plaats daarvan is de referentiesituatie steeds ingeschat op basis van modelberekeningen en zijn de resultaten daarvan getoetst aan metingen tijdens periodes zonder subirrigatie. Resultaten laten zien dat deze werkwijze geschikt is voor het analyseren van de werking van deze maatregel, omdat er een nagenoeg instantaan en duidelijk effect is op grondwaterstanden en bodemvochtgehaltes. Een belangrijk voordeel van deze werkwijze is dat de monitoring beperkt kan worden tot enkel de proefpercelen.
- Het effect van de maatregelen op de gewasverdamping en gewasopbrengst is niet in het veld gemeten, maar ingeschat met modelsimulaties. Werkelijke verdamping meten is complex, net zoals het nauwkeurig bepalen van de drogestofopbrengst van gewassen op de percelen. Bovendien zou voor het meten van het effect van de maatregelen op de gewasverdamping en gewasopbrengst wél gewerkt moeten worden met referentiepercelen om het effect van de maatregel inzichtelijk te maken. Voor een deel kan remote sensing informatie soelaas bieden. Kwalitatieve analyses van remote sensing-beelden van de proefpercelen America en Haaksbergen laten namelijk een positief effect zien van subirrigatie op het gewas ten opzichte van naastgelegen percelen zonder subirrigatie (Bartholomeus et al., 2018b). Ook volgens de agrariërs is op een perceel met subirrigatie de gewasopbrengst hoger dan op een perceel zonder subirrigatie, of is er minder beregening nodig om het gewas van voldoende water te voorzien.

8.2.2 Modelanalyses

Met betrekking tot de modelanalyses dienen de volgende zaken te worden opgemerkt:

- Om de effecten van de onderzochte maatregelen op verschillende componenten van de waterbalans op perceelschaal te simuleren is de modelcode SWAP gebruikt, gecombineerd met het algoritme PEST om voor elke proef het model te kalibreren aan metingen. Deze werkwijze is voor dit onderzoek operationeel gemaakt in een R-script en kan relatief eenvoudig ook voor nieuwe toepassingen worden ingezet. Uit dit onderzoek blijkt dat met SWAP de werking van regelbare drainage met subirrigatie goed in beeld kan worden gebracht en zo ook niet-gemeten componenten van de waterbalans geduid kunnen worden. Door gebruik te maken van WOFOST voor het simuleren van gewasgroei kan ook het effect van de maatregelen op de gewasopbrengst worden ingeschat, waarbij we voor de parametrisatie van WOFOST gebruik hebben gemaakt van de meest actuele kennis uit Waterijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018b). Hydrus 2D blijkt een nuttige aanvulling op SWAP om ook stroombanen ruimtelijk inzichtelijk te maken, zodat een beter beeld ontstaat van hoe het water bij subirrigatie zich verspreidt binnen een perceel, maar ook naar aangrenzende percelen, kavelsloten en de diepere ondergrond.
- De aansturing van het KAD-systeem in Stegeren is gebaseerd op een online management-algoritme, waarvoor ook SWAP in combinatie met PEST als kern dient. Het voordeel van deze automatische KAD-sturing op basis van weersvoorspellingen is dat het KAD-systeem vlak voor en tijdens perioden met (piek)buien automatisch lager gezet kan worden, waardoor er indien gewenst voor en tijdens neerslag reeds afvoer plaatsvindt en natschade mogelijk wordt vermeden. Technisch is dit gerealiseerd (De Wit et al., 2021), maar helaas kon dit door de droge weersomstandigheden niet getest worden.
- Voor extrapolaties buiten de meetperiode, of om scenario's door te rekenen voor bijvoorbeeld klimaatgemiddelde condities (30 jaar), zijn er aannames gedaan voor de aansturing van de systemen die zoveel mogelijk gelijk zijn voor de verschillende locaties. Echter, deze aansturing is wellicht niet altijd het meest correct voor de specifieke condities in verschillende jaren. Zo is voor deze analyses de wateraanvoerperiode gelijk voor elke locatie (1 april – 30 september), en de wateraanvoer is maximaal 4 mm/d. Daarnaast wordt in deze situaties (binnen een seizoen) een vaste drainagehoogte in de regelputten gehanteerd, terwijl deze in werkelijkheid juist variabel zal zijn: een ondiepe drainagehoogte om water vast te houden, maar een diepe drainagehoogte als er water moet worden afgevoerd om wateroverlast te voorkomen. Deze variabele instelling van de drainagehoogte is in de 30-jaar modelprojecties in deze studie niet meegenomen. Hierdoor zijn bijvoorbeeld voor Haaksbergen in de modelstudie te natte omstandigheden ingesteld, waardoor natschade is gesimuleerd. In werkelijkheid treden deze omstandigheden niet op, omdat dan het beheer van het systeem wordt aangepast: een diepere drainagehoogte was gewenst voor een optimale vochtuishouding. In een vervolgstudie zou ook voor de 30-jaar scenario's via het ontwikkelde sturingsalgoritme voor KAD op dagbasis het gewenste drainageniveau kunnen worden bepaald en ingesteld.
- Uit het veldexperiment van Lieshout blijkt dat na een aantal jaar van subirrigatie de infiltratieweerstand van het systeem kan toenemen, waardoor het lastiger wordt de gewenste grondwaterstandsverhoging te realiseren (Bartholomeus et al., 2020; Bartholomeus et al., 2018c; Van der Schans, 2019). Echter is de infiltratieweerstand in SWAP een constante in de tijd. Een gewenste aanpassing in SWAP is het inbouwen van een optie waarin de infiltratieweerstand een functie van tijd is. In de modelsimulaties in deze studie is gerekend met een constante infiltratieweerstand en blijven de systemen in de modellering optimaal functioneren.
- De mate van wegzijging naar de ondergrond, i.c. de voeding van het grondwater, is voor een groot deel bepalend voor de hoeveelheid water die aangevoerd moet worden via subirrigatie. Uit eerdere modelberekeningen (Bartholomeus et al., 2019) volgt dat wanneer sprake is van enige weerstand tegen wegzijging, de benodigde netto wateraanvoer voor subirrigatie lager is dan voor beregening, omdat verwaaiing en interceptieverdamping niet voorkomen bij subirrigatie. De totale wateraanvoer bij

subirrigatie is wel hoger dan bij beregening, maar als het meeste water naar de ondergrond gaat blijft het behouden in het grondwatersysteem (Bartholomeus et al., 2019).

8.2.3 (Regionale) inpassing van de maatregelen

In deze studie zijn de effecten van de maatregelen op perceelschaal inzichtelijk gemaakt. Met betrekking tot de inpassing van de maatregelen op andere locaties en eventuele inpassing op regionale schaal zijn verschillende aspecten van belang. Hierbij richten we ons met name op watervraag en waterbeschikbaarheid en het gebruik van regionale hydrologische modellen om het totale effect van de maatregelen op het grond- en oppervlaktewatersysteem te kwantificeren:

- Zoals aangegeven is de hydrologische situatie op een locatie, als omgevingsrandvoorwaarde die verder reikt dan een perceel, belangrijk voor de geschiktheid van een perceel voor regelbare drainage met subirrigatie en daarmee voor de positieve effecten ervan. Het is belangrijk om op te merken dat op perceelschaal deze randvoorwaarde niet of nauwelijks te beïnvloeden is.
- Voor subirrigatie kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen van zoet water, zoals oppervlaktewater, lokaal grondwater en gezuiverd restwater. Deze bronnen zijn aanvullend op 'perceelseigen' water, waarin via het neerslagoverschot water in natte delen van een perceel ten goede komt aan de drogere delen: via de regelbare drainagesystemen worden deze verschillen binnen een perceel vanzelf vereffend. Dit is een positieve bijwerking van een regelbaar drainagesysteem.
- In Stegeren wordt oppervlaktewater gebruikt voor subirrigatie. Voor de wateraanvoer naar Stegeren wordt een bepaald debiet onttrokken aan de Vecht. Met behulp van een eenvoudige verkennende berekening is getracht een indicatie te geven van de effecten van subirrigatie op grotere schaal voor het gebied Stegeren. De SWAP resultaten op perceelschaal in Stegeren zijn, met behulp van de grootte van het gebied in hectares, geëxtrapoleerd naar een waterbalans op regionale schaal (Bijlagen VII). Hierbij is uitgegaan van scenario's waarbij op 20% en 40% van al het grasland subirrigatie toegepast wordt. Op deze manier kan een indicatie gegeven worden van de effecten van maatregelen op verdamping en grondwateraanvulling als deze op meerdere percelen in een gebied zouden worden toegepast. Dit is een verkennende berekening en de resultaten geven een eerste schatting van de effecten van de maatregel op de waterbalans op regionale schaal.

In het stroomgebied van Stegeren is in totaal 196.04 ha aan grasland aanwezig. Het perceel met regelbare drainage met subirrigatie is ± 2.5 ha, dit is 1.28% van het totale grasland (196.04 ha) (Tabel VII-4). Als bij 20% van het grasland in het groeiseizoen continu subirrigatie toegepast zou worden, is er $\pm 285,376$ m³ subirrigatie nodig. Voor 40% grasland met subirrigatie betekent dit $\pm 570,752$ m³. Het is interessant om te weten hoeveel water in werkelijkheid het wateraanvoer gebied Stegeren in wordt gepompt. Op die manier kan worden vergeleken of het realistisch is om 20% van het gebied te bedienen met regelbare drainage met subirrigatie. Exacte gegevens zijn helaas niet beschikbaar. Echter, gebiedsbeheerders geven aan dat het realiseren van deze wateraanvoer voor Stegeren niet realistisch is.

Een deel van het aangevoerde water zal zorgen voor extra transpiratie, een deel draineert terug naar het oppervlaktewater, zowel via de buisdrainage als via de ondergrond, en de wegzijgingsflux en grondwateraanvulling zal toenemen. Daarnaast kan structurele subirrigatie op grotere schaal als voordeel hebben dat de bergingsverandering structureel stijgt, waardoor er op den duur minder water nodig is voor subirrigatie. Ook zullen, door het toepassen van subirrigatie, agrariërs minder grondwater onttrekken voor beregening. Dit kan een extra stijging van het diepere grondwater betekenen, omdat het diepere grondwater minder wordt belast.

Echter, om dit totale effect van de maatregel op het regionale grondwatersysteem in te schatten (relevant voor waterschappen, provincies en diverse watergebruikers en functies), zijn ruimtelijke hydrologische

modellen nodig. Deze zijn hiervoor geschikt gemaakt, waarbij gebruik is gemaakt van de modelkennis en -resultaten uit deze studie (Bartholomeus (red.), 2021).

- Bij Haaksbergen en Lieshout wordt gezuiverd restwater gebruikt, dat anders geloosd zou worden op het oppervlaktewater. Bij Haaksbergen komt het grootste deel van het gesubirrigeerde water alsnog via drainage in het oppervlaktewater; bij Lieshout gaat een deel ook naar het oppervlaktewater, maar vult ook een deel het grondwater aan. In America wordt lokaal grondwater onttrokken onder het perceel, als voorbeeld voor een toepassing waar geen oppervlaktewater beschikbaar is. Een deel van het water kan op deze locatie echter draineren naar het lokale oppervlaktewater, als dat niet gestuwd wordt. Een ander deel zijgt weg als grondwateraanvulling voor het regionale watersysteem. Dit benadrukt het belang van het afstemmen van grondwaterbeheer en oppervlaktewaterbeheer: door een hoger oppervlaktewaterpeil kan (onnodige, onbedoelde) drainage naar het oppervlaktewater worden voorkomen, als subirrigatie leidt tot hogere grondwaterstanden op percelen.

De verdeling van perceelwater naar de wortelzone voor transpiratie, naar het oppervlaktewater voor afvoer en naar het grondwater voor aanvulling is belangrijk voor de beoordeling van de maatregel én op welke locatie die wordt toegepast. Ook hiervoor geldt dat ruimtelijke hydrologische modellen gebruikt moeten worden, om het totale effect van de maatregel op (de druk op) het grond- en oppervlaktewatersysteem te kwantificeren. Door Waterschap Aa en Maas is een eerste analyse uitgevoerd voor de omgeving Lieshout, waarbij de watervraag voor subirrigatie op verschillende percelen in het gebied is gemodelleerd met hun ruimtelijk hydrologisch model en vervolgens wordt afgezet tegen de waterbeschikbaarheid (Brakkee et al., 2021).

8.3 Aanbevelingen

De ervaringen vanuit de veldexperimenten, de modellering en de interpretatie van de resultaten tot randvoorwaarden voor inpassing van systemen leiden tot diverse aanbevelingen, zoals voor verbeterde aansturing, beheer en onderhoud van systemen, en aspecten die meegenomen kunnen worden in eventuele regionale inpassing:

- Regelbare drainage en subirrigatie zou altijd geplaatst moeten worden in de context van het zowel kunnen anticiperen op wateroverlast als watertekort. Het wordt niet aanbevolen om subirrigatie alleen toe te passen om droogte op te lossen. Subirrigatie is in beginsel een aanvulling op de huidige systemen voor drainage die op locaties nodig blijven om natschade te voorkomen; wanneer en waar mogelijk kunnen systemen ook omgekeerd gebruikt worden. Zo kan het interessant zijn om na een periode van drainage, voor bijvoorbeeld landbewerking, het systeem weer actief aan te vullen. Mogelijk kan in gebieden waar wateraanvoer mogelijk is via regelbare drainage met subirrigatie een hogere grondwaterstand gecreëerd worden en meer water worden vastgehouden. Nu er meer bekend is over de werking van de systemen wordt aanbevolen om zulke toepassingen verder te onderzoeken.
- In de in deze studie gekozen opzet van de veldproeven en modelsimulaties is gedurende het hele groeiseizoen water aangevoerd voor subirrigatie. Uit de modelscenario's volgt ook dat het watergebruik verminderd kan worden door slimmere aansturing van de systemen, zonder een groot effect op de waterbeschikbaarheid voor het gewas. Het wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek de aansturing en het beheer van de systemen verder te verbeteren, gericht op een lager watergebruik. Hierbij valt te denken aan de periode van wateraanvoer, alleen aanvullen als het nodig is (via pompsturing) en een analyse of een continu hoge grondwaterstand wel nodig is. Systemen reageren snel, dus een continue aanvoer is wellicht niet nodig.
- De gebruikte modelconcepten kunnen in vervolgonderzoek of praktijktoepassingen worden ingezet bij het ontwerp en de optimalisatie van de aansturing/het beheer van de systemen. De modellen geven kwantitatief inzicht in de waterbalans en de bijbehorende fluxen, zodat de bijdrage van een beschikbare

hoeveelheid water aan de gewasverdamping en aan de grondwateraanvulling kan worden afgewogen. Dit kan worden gedaan voor verschillende typen gewassen, maar ook voor klimaatscenario's, zoals is gedemonstreerd in deze studie.

- Voor vervolgonderzoek is het van belang te onderzoeken hoe regelbare drainagesystemen met subirrigatie langdurig werkzaam kunnen worden gehouden, zonder verlies aan met name infiltratiecapaciteit. De ervaringen met betrekking tot gedeeltelijke verstopping van systemen, zoals opgedaan in de verschillende proeven binnen deze studie (ontstane problemen en het oplossen daarvan), zouden moeten worden benut bij het vormgeven van nieuwe toepassingen.
- In deze studie zijn waterkwaliteitsaspecten en kosten/baten niet beschouwd. Het mag duidelijk zijn dat hiervoor in vervolgonderzoek en in (grootschaliger) praktijktoepassing wel extra aandacht voor moet zijn.
- Elk (beheer)gebied heeft zijn fysieke grenzen en heeft een bepaalde, vaak begrensde capaciteit aan waterbeschikbaarheid (gebruik van restwater of oppervlaktewater voor subirrigatie beïnvloedt bijvoorbeeld ook beekafvoeren), of dat nu aanvoer via oppervlaktewater is of de aanwezige grondwatervoorraad met bijbehorende grondwaterstand. Beter gezegd: in welke mate daarmee aan de waterbehoefte kan worden voldaan, dat is de vraag. Het toepassen van subirrigatie genereert een watervraag voor het gehele watersysteem op regionale schaal, waar verschillende sectoren en functies van afhankelijk zijn: het toepassen van subirrigatie op perceelschaal dient ingepast te worden in de regionale balans tussen watervraag en wateraanbod. Daarmee zijn perceelsoplossingen en regionale waterbalans (vanzelfsprekend) niet los van elkaar te zien. Er moet rekening gehouden worden met hoeveel water er beschikbaar is; de periode van subirrigatie (gedurende het hele groeiseizoen, alleen in een gedeelte ervan, of juist in de winter) speelt hierbij ook een rol. In de afwegingen over het al dan niet toepassen van maatregelen, wordt aanbevolen zich niet beperken tot getallen voor alleen de bruto aanvoer, maar ook het netto gebruik inzichtelijk te maken. Uit deze studie volgt immers dat een (belangrijk) deel van het aangevoerde water weer terugkomt bij de aanvoerbron of het regionale watersysteem voedt.
- In de context van het 'robuuste watersysteem' blijft het nodig om het totale watergebruik te bezien in balans met de beschikbaarheid van zoet water in het gebied en grondwaterstanden in het gebied (infrastructuur, natuur, ...). Belangrijk is ook de relatie tussen opties voor wateraanvoer van bovenstrooms en de minimaal nodige stroming van grondwater en oppervlaktewater-afvoer naar benedenstroomse gebieden. Maatregelen kunnen er aan bijdragen water vast te houden, afvoer te beperken tot de situaties waarin het echt nodig is, en het grondwater 'actief' aan te vullen, met als doel de druk op het grondwater te verminderen. Dit moet bijdragen aan betere waterbeschikbaarheid voor verschillende gebruiksfuncties: natuur, drinkwater, landbouw en industrie. Daarmee worden de effecten van perceelsmaatregelen ook niet sectoraal beschouwd (i.e. effect voor de landbouw), maar is het onderdeel van een integrale, stroomgebiedsbrede analyse van de doorwerking van de maatregelen door het hele watersysteem en op alle betrokken actoren. Het wordt aanbevolen alle belanghebbenden/actoren te betrekken bij de effecten van maatregelen, voor hun directe eigen belang, maar ook voor indirecte belangen en eventueel tegenstrijdige belangen in het beheer en gebruik van het regionale systeem. Hier kan in vervolgprojecten meer nadruk op worden gelegd, gebruikmakend van de in deze studie verkregen inzichten.
- Binnen de studie zijn modelprojecties uitgevoerd om inzicht te geven in verschillen in beheer van systemen in de tijd. Inpassing in ruimte, aansturing in tijd, en in relatie tot het regionale grond- en oppervlaktewaterbeheer dient in een vervolgstap te worden opgepakt. Of en hoe de maatregel, inclusief goed beheer, kan worden ingepast in het regionale watersysteem kan worden berekend met ruimtelijke hydrologische modellen, die hiervoor reeds geschikt worden gemaakt. Daarnaast kunnen op basis van de kennis uit deze studie geschiktheidskaarten worden opgesteld en kunnen via conceptuele denkkaders kansen en knelpunten van maatregelen gestructureerd worden benoemd. Aanbevolen wordt om zowel voor een conceptueel denkkader (structureel inzicht in kansen en knelpunten van toepassing van

systemen), technisch systeem (verbeteren systemen), monitoring en beheer (samen ervaring opbouwen, zowel agrariër als waterschap) als de regionale analyse (beschikbare bronnen, inpassing in ruimte en tijd in het watersysteem, geschiktheidskaarten, hydrologische modellen), verder kennis op te bouwen. Deze studie heeft veel inzichten opgeleverd. De genoemde vervolgstappen zijn nodig om te komen tot een verantwoorde inpassing van systemen in het waterbeheer voor alle betrokken actoren op lokale én regionale schaal.

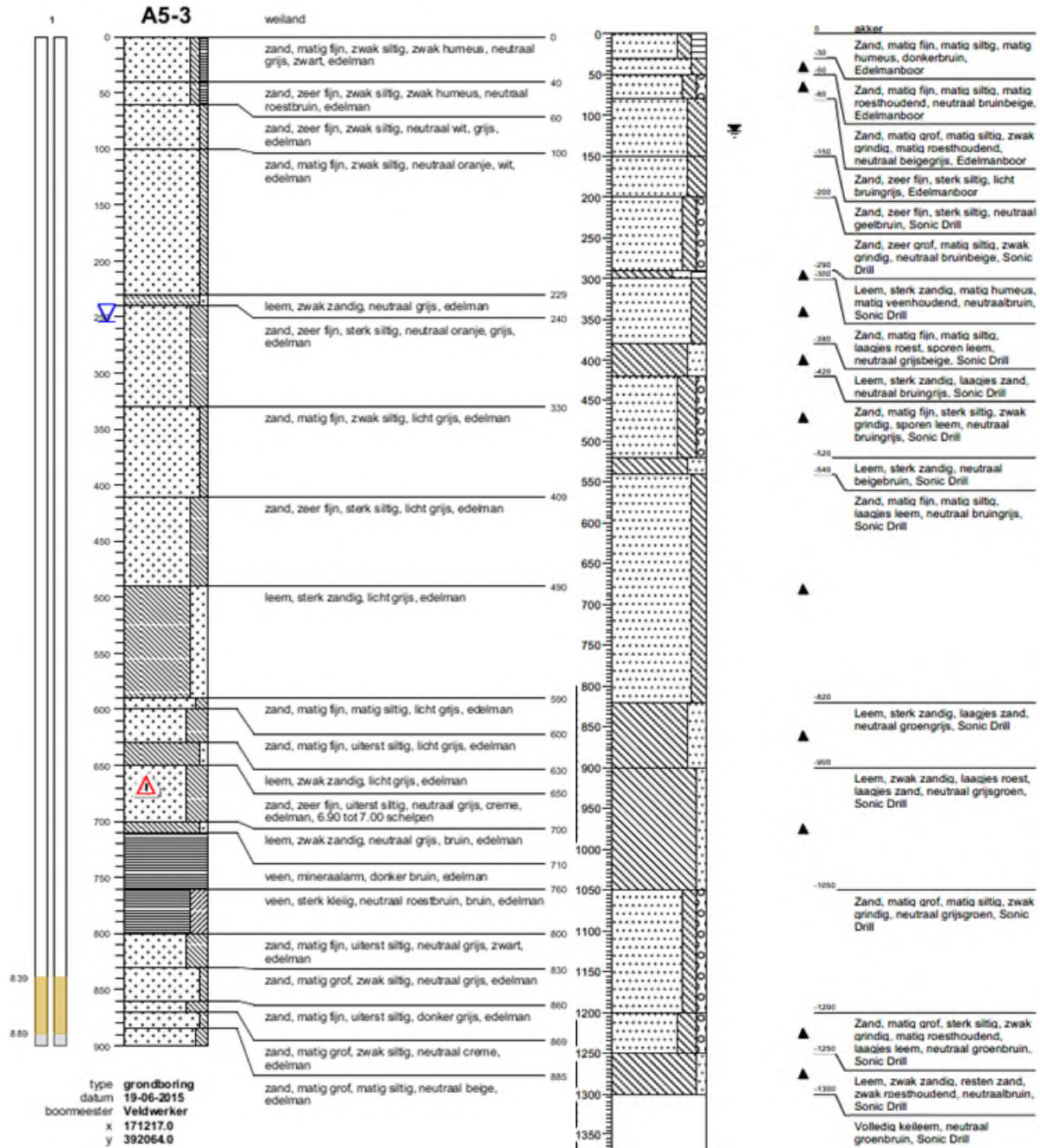
9 Referenties

- Ayars J.E., Christen E.W., Hornbuckle J.W. (2006) Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 86:128-139. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.07.004.
- Bartholomeus (red.) R.P. (2021) Programma Lumbricus, Integrale benadering van een klimaatrobuuste inrichting en beheer van stroomgebieden. Een overzicht. Stowa 2021.05, Amersfoort.
- Bartholomeus R., van den Eertwegh G., Simons G. (2015a) Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage, *Stromingen : vakblad voor hydrologen* 24 (4): 27 - 42, 2015.
- Bartholomeus R., van den Eertwegh G., van Huijgevoort M. (2018a) Subirrigatie met grondwater - Monitoring veldproef America, Waterschap Limburg. KWR 2018.029, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R., Van Huijgevoort M., Van den Eertwegh G., Van Deijl D. (2019) Efficiëntie van berekening en subirrigatie uit grondwater - Modelmatige analyses met SWAP en Hydrus-2D. KWR 2019.059, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Rozema J., Van Huijgevoort M. (2020) Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening - Bavaria. KWR 2020.152.
- Bartholomeus R.P., Simons G.W.H., Van den Eertwegh G.A.P.H. (2015b) Anticipating on amplifying water stress: Optimal crop production supported by climate-adaptive water management. KWR 2015.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Stofberg S.F., van den Eertwegh G.A.P.H., Cirkel D.G. (2017) Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen - 2016. BTO 2017.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., van den Eertwegh G.A.P.H., Cirkel D.G. (2016) Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen. BTO 2016.050, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Van den Eertwegh G.A.P.H., Van Huijgevoort M. (2018b) Subirrigatie met grondwater - Monitoring veldproef America, Waterschap Limburg. KWR 2018.029, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Van Loon A.H., Van Huijgevoort M.H.J. (2018c) Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw - Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria. KWR 2018.089, KWR, Nieuwegein.
- Boogaard H.L., de Wit A.J.W., Te Roller J.A., van Diepen C.A. (2014) WOFOST CONTROL CENTRE 2.1; User's guide for the WOFOST CONTROL CENTRE 2.1 and the crop growth simulation model WOFOST 7.1. 7. Wageningen (Netherlands), Alterra, Wageningen University & Research Centre.
- Brakkee E., Van Rens C., Van Huijgevoort M., Bartholomeus R. (2021) Hergebruik industrieel restwater Bavaria: inzicht in mogelijkheden voor opschaling van subirrigatie voor de landbouwwatervoorziening. KWR 2021.022, KWR, Nieuwegein.
- Broks. (1989) Geohydrologisch onderzoek winplaats Lieshout WOB. Broks Adviezen, 's Hertogenbosch.
- de Vos J.A., Raats P.A.C., Feddes R.A. (1997) Water flow and nutrient transport in a layered silt loam soil. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands. pp. 287.
- De Wit J., Van Huijgevoort M., Van den Eertwegh G., Van Deijl D., Bartholomeus R. (2021) Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren. Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020). KWR, Nieuwegein. KWR 2021.029.
- Deltaprogramma. (2019) Doorwerken aan de delta: nuchter, alert en voorbereid : inclusief: Deltaplan Waterveiligheid, Deltaplan Zoetwater, Deltaplan Ruimtelijke adaptatie, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Den Haag.
- Doherty J. (2010) PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer. Comput., Brisbane, Queensland, Australia.
- Heinen M., Massop H., Hack-ten Broeke M., Breman B., van den Eertwegh G., Bartholomeus R., Eekeren N.v., Deru J., Louw P.d., Wassink W., Worm B. (n.d.) Rapportage Fase 1 gebiedsanalyse, proeftuin Oost (Stegeren), Programma Lumbricus – Bewuste Bodem, Cluster 2.
- Hisdal H., Tallaksen L.M., Clausen B., Peters E., Gustard A., VanLauen H. (2004) Hydrological drought characteristics. *Developments in water science* 48:139-198.

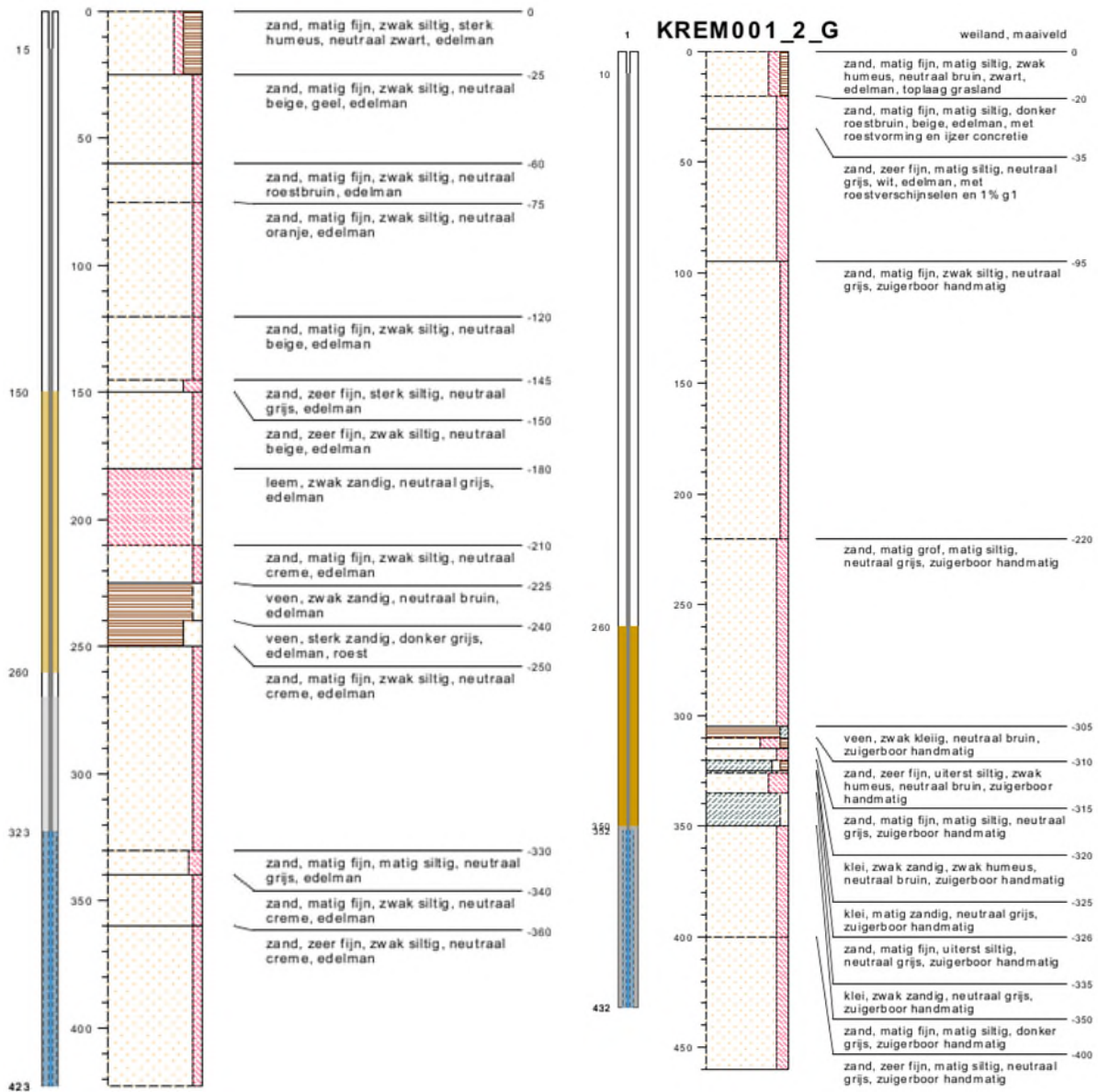
- Jalink M.H., Laeven M.P., Van Boschginga W. (2000) Winplaatsonderzoek Lieshout, Eindrapport, KOA 99.225, Kiwa N.V. Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- Klein Tank A., Beersma J., Bessembinder J., Hurk B.v.d., Lenderink G. (2014) KNMI'14 : klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt.
- Klijn F., ter Maat J., van Velzen E., Hunink J., Goorden N., Kielen N., Werkman W., Barse G., Beumer V., Delsman J. (2011) Zoetwatervoorziening in Nederland : landelijke analyse knelpunten in de 21e eeuw, Deltares.
- Knotters M., Jansen P.C. (2005) Honderd jaar verdroging in kaart. Stromingen : vakblad voor hydrologen 11:19-32.
- Kroes J.G., van Dam J.C., Bartholomeus R.P., Groenendijk P., Heinen M., Hendriks R.F.A., Mulder H.M., Supit I., van Walsum P.E.V. (2017) SWAP version 4 : theory description and user manual Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Narain-Ford D.M., Bartholomeus R.P., Dekker S.C., van Wezel A.P. (2020) Natural Purification Through Soils: Risks and Opportunities of Sewage Effluent Reuse in Sub-surface Irrigation, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews), Springer International Publishing, Cham. pp. 1-33.
- Philip S.Y., Kew S.F., van der Wiel K., Wanders N., van Oldenborgh G.J. (2020) Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. Environmental Research Letters 15:094081. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>.
- Pronk G., Dooren T.v., Stofberg S., Bartholomeus R. (2020) Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening. BTO 2020.011, KWR, Nieuwegein.
- Ritzema H.P., Nijland H.J., Croon F.W. (2006) Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation. Agric. Water Manag. 86:60-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.026>.
- Šimunek J., Šejna M. (2018) HYDRUS User Manual Version 3. Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media., PC-Progress, Prague, Czech Republic
- Skaggs R.W., Tang Y.K. (1979) Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. Transactions of the ASAE 22:326-0333.
- Stofberg S.F., Bartholomeus R.P., Van den Eertwegh G.A.P.H., Raat K. (2021) Restwaterhergebruik in de landbouw - Subirrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen 2015-2019. KWR, Nieuwegein. In voorbereiding. .
- van Bakel J., van den Eertwegh G., Worm B., Mensink J. (2019) Slim peilbeheer in haarvaten van watersystemen met SAWAX-stuw, Stromingen : vakblad voor hydrologen 25 (2): 5 - 16, 2019.
- van Bakel J., van den Eertwegh G.A.P.H., van Deijl D., Mensink J. (2020) SAWAX - slimme stuw voor optimaal waterbeheer. Verslag van veldproef te Arriën 2015-2019. Eindrapport.
- van Bakel P.J.T., van den Eertwegh G.A.P.H., Massop H., Brandsma J. (2013) Klimaatadaptieve drainage - Landelijke geschiktheid van conventionele, samengestelde peilgestuurde, peilgestuurde drainage en KAD. Eindrapportage Werkpakket 3: Landelijke geschiktheid., Future Water, Wageningen.
- van den Eertwegh G., Bartholomeus R., de Louw P., Witte F., van Dam J., van Deijl D., Hoefsloot P., van Huijgevoort M., Hunink J., America I., Pouwels J., de Wit J. (2020a) Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland : het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen, KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G., van Bakel J., Mensink J. (2018) SAWAX - slimme stuw voor optimaal waterbeheer. Verslag van veldproef te Arriën 2015-2017, KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G., van Bakel J., van Deijl D., Mensink J. (2020b) SAWAX – Slimme stuw voor optimaal waterbeheer., KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G.A.P.H., van Bakel P.J.T., Stuyt L., van Iersel A., Kuipers L., Talsma M., Droogers P. (2013) KlimaatAdaptieve Drainage - Een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen - Samenvatting resultaten Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling', FutureWater, Wageningen.
- Van der Schans M. (2019) Evaluatie oorzaken verstopping drains Bavaria.
- van Genuchten M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal 44:892-898.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw. (2018a) Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie STOWA, Amersfoort.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw. (2018b) Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. STOWA rapport 2018-48.
- Wing. (2015) Wel goed water geven! Werkprogramma zoetwatervoorziening hoge zandgronden 2016-2021.
- Yevjevich V.M., Colorado State University H., Water Resources P. (1967) An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology papers ; no. 23.

Bijlagen

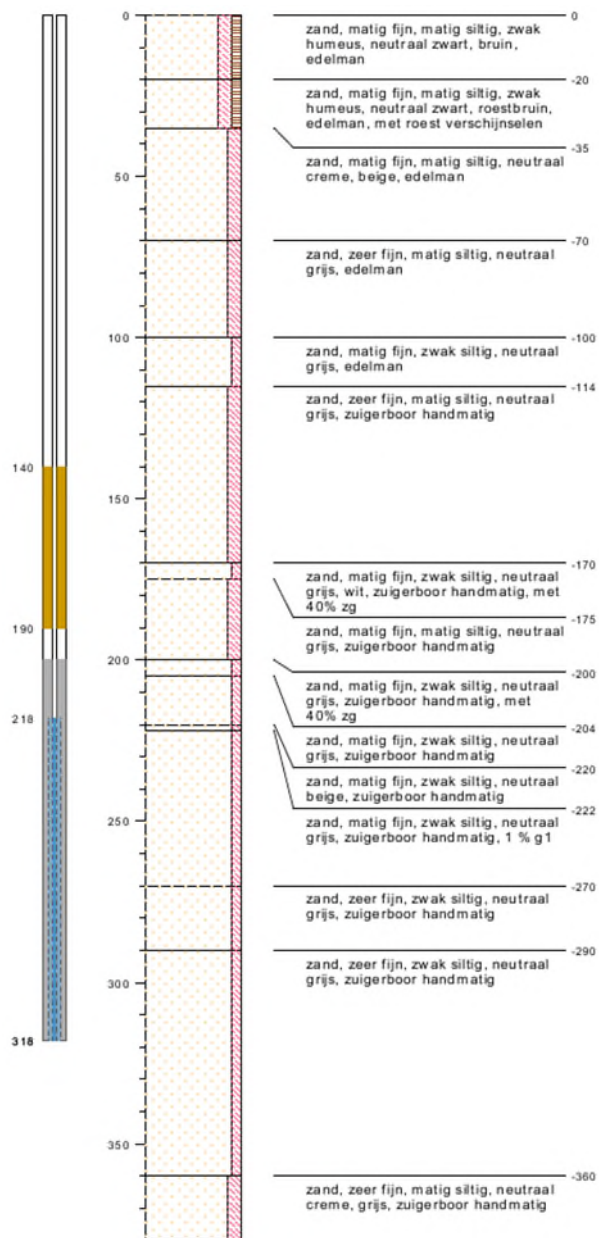
I. Bodemopbouw



Figuur I-1: Bodemopbouw in Lieshout (links) en Haaksbergen (rechts).



Figuur I-2: Bodemopbouw in America (links) en Stegeren subirrigatie (rechts).



Figuur I-3: Bodemopbouw in Stegeren bij de SAWAX stuw.

II. SWAP model & SWAP-PEST kalibratie

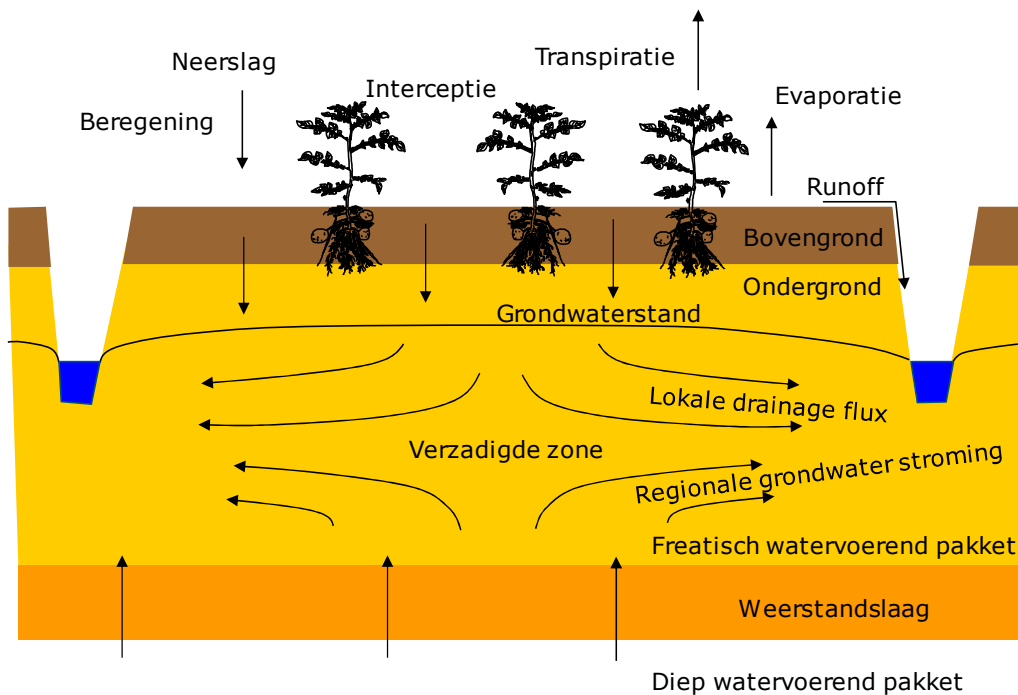
II.1 Opzet SWAP model

Met behulp van het dynamische 1D Soil, Water, Atmosphere, Plant (SWAP) model (Kroes et al., 2017) is de hydrologische situatie in de proefpercelen gemodelleerd. Er is gebruik gemaakt van versie 4.0.1. Het SWAP modeldomein is een doorsnede van de bodem midden op het perceel waarbij de belangrijkste hydrologische processen worden gemodelleerd (Figuur II-1). SWAP simuleert hoofdzakelijk het verticale transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde zone (drainage wordt horizontaal gesimuleerd). Als invoer worden meteorologische condities, bodemfysische parameters volgens Van Genuchten (van Genuchten, 1980), een hydrologische onderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gedetailleerde gewaseigenschappen gebruikt. Uitvoergegevens zijn op dagbasis en zijn onder meer de grondwaterstand, bodemvochtgehalte, de bodemtemperatuur en de gewasverdamping (potentiële en werkelijke transpiratie).

De transpiratiereductie is het verschil tussen potentiële en werkelijke (actuele) transpiratie, veroorzaakt door te natte of te droge omstandigheden in de wortelzone met als gevolg zuurstofstress (natte condities) of droogteschade (droge condities). De relatieve transpiratie is berekend als de som van de werkelijke transpiratie in de zomermaanden juni, juli en augustus gedeeld door de som van potentiële transpiratie in de zomermaanden juni, juli en augustus. Er is geen transpiratiereductie als de relatieve transpiratie 1 is (actuele transpiratie is gelijk aan de potentiële transpiratie). Dit betekent dat er voldoende water in de bodem aanwezig is om aan de watervraag van het gewas te voldoen. Als de relatieve transpiratie lager is dan 1 (actuele transpiratie is lager dan de potentiële transpiratie), is er te weinig water aanwezig voor het gewas om optimaal te transpireren.

De transpiratiereductie wordt beïnvloed door verschillende factoren als de meteorologische parameters (o.a. luchttemperatuur, neerslag en de referentieverdamping), de bodemfysische parameters en het wortelstelsel. Vervolgens hebben deze parameters, en dus de transpiratiereductie, ook invloed op de gewasopbrengst.

Voor de simulaties is binnen SWAP de optie voor gedetailleerde gewasgroei gebruikt, zoals opgezet binnen Waterwijzer Landbouw (Kroes et al., 2017; Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018a). Dit betreft een koppeling tussen SWAP en het gewasmodel WOrld FOod STudies (WOFOST) (Boogaard et al., 2014), ofwel SWAP-WOFOST. Het SWAP-model is gekalibreerd aan metingen met PEST (Doherty, 2010), op basis van de gemeten grondwaterniveaus en bodemvochtgehalten op drie dieptes (Bartholomeus et al., 2015b). De kalibraties zijn erop gericht om een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen, de drainageweerstand, de infiltratieweerstand en de weerstand van de diepe weerstandslaag te maken. Het gekalibreerde dynamische SWAP-PEST model is gebruikt om de SWAP-simulaties te verlengen naar 30 jaar (1990-2019).



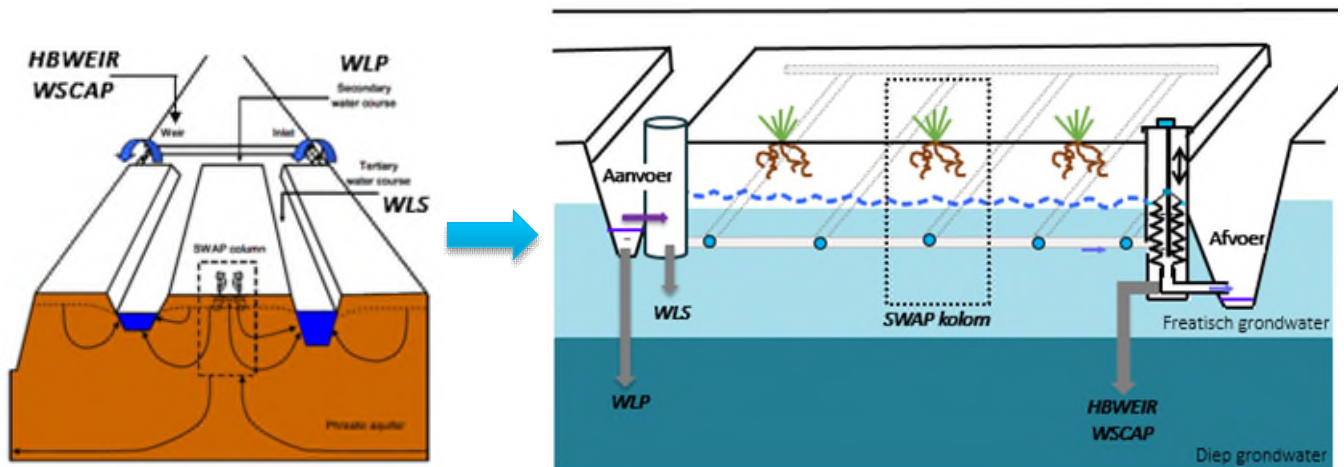
Figuur II-1: SWAP model domein met belangrijke hydrologische processen. Figuur is ontleend aan (Kroes et al., 2017).

Schematisatie regionale drainage in SWAP

In het 1D agrohydrologische model SWAP (Soil, Water, Atmosphere Plant) is in dit project de optie 'extended drainage' gebruikt. Hoewel het model een 1D model is, is het mogelijk om te rekenen met verschillende drainagelagen in het systeem. De verschillende lagen zijn van verschillende orde grootte met een hiërarchisch systeem. Hoewel er in werkelijkheid meerdere grondwaterniveaus zijn, wordt met SWAP één grondwaterniveau berekend. In het SWAP model is aangenomen dat de grotere oppervlakte wateren op een dendritische manier bij elkaar komen. Op dit punt is er één inlaatpunt op het sub-regionale systeem (Figuur II-2), die uitmondt op de aanvoerende waterloop (A-watergang) van het gebied. Water kan van de aanvoerende waterloop terug naar de grotere oppervlaktewater door een stuw (Figuur II-2). Als laatste bevinden de kleinere waterlopen (B-watergang) zich tussen twee percelen. De percelen wateren in het model af op deze watergangen, of worden gevoed door deze watergangen (afhankelijk van het watergangpeil en het grondwaterniveau). In het SWAP model is aangenomen dat het oppervlaktewaterpeil in de hele regio dezelfde diepte onder maaiveld heeft.

Allereerst moet in SWAP worden aangegeven met hoeveel drainagelagen er gerekend wordt door middel van 'number of subsurface drainage levels' (NRSRF). De karakteristieken van elk drainageniveau moeten hierbij worden ingevoerd. Dit betekent: afstand tussen twee rivieren/ drains (L), de diepte (ZBOTDRE), het grondwaterniveau voor maximale infiltratie (GWLINF), de drainageweerstand (RDRAIN) en de infiltratieweerstand (RINF). De grootste rivieren en kanalen zijn in SWAP aangeduid als 'primary water course' met bijbehorend 'surface water level of primary system' (WLP). Het is mogelijk om het WLP volledig onafhankelijk te laten functioneren van het kleinere regionale systeem (SWSRF = 3). Bij deze mogelijkheid zijn de waterpeilen van deze watergang per datum invoer in het model. De data dat er geen waterpeilen beschikbaar zijn, wordt er lineair geïnterpoleerd tussen data die wel beschikbaar zijn. In werkelijkheid zal er echter wel interactie zijn tussen de primary water course en de secondary water course, zoals bij een inlaatpunt van gebiedsvreemd water. De watervoerende watergang is in SWAP aangegeven als 'secondary water course' met bijbehorend 'surface water in secondary water course' (WLS), die op twee manieren als invoer kan dienen. Als eerste kan het oppervlaktewaterniveau als invoer worden opgegeven (SWSEC = 1). Daarnaast kan het oppervlaktewaterniveau ook worden gesimuleerd (SWSEC = 2). Als het oppervlaktewaterniveau wordt gesimuleerd moet de beheerperioden van de stuw worden ingevoerd (NMPER). Hieronder valt hoeveel water maximaal het regionale gebied wordt ingepompt (WSCAP) en de stuw

kenmerken. In dit project is gebruik gemaakt van een gefixeerde stuw, waarbij de stuw kenmerken zijn weergegeven met een exponentiële relatie. De hoogte van de stuw (HBWEIR), de afvoercoëfficiënt (ALPHAW), en de afvoerexponent (BETAW).



Figuur II-2: Schematisatie van het oppervlakte water systeem in SWAP (links). Linker figuur is ontleend aan (Kroes et al., 2017). Rechts het oppervlaktewatersysteem in SWAP in een situatie met subirrigatie.

Schematisatie KAD-systeem in SWAP

Het KlimaatAdaptieve drainagesysteem (KAD) op perceelschaal kan ook worden gezien als een op zichzelf staand sub-regionaal systeem als Figuur II-2. In de schematische weergave van het KAD-systeem zijn er 2 'subsurface drainage levels' (NRSRF = 2). De verschillende drainageniveaus zijn als een hiërarchisch systeem opgebouwd in SWAP. Dit betekent dat het grootste systeem is drainage niveau 1, gevolgd door het kleinere drainageniveau. In het KAD-systeem model is het eerste drainageniveau de oppervlaktewatergang (A-watergang), het tweede drainageniveau is het subirrigatiesysteem.

De primaire water course is de oppervlaktewatergang (A-watergang), die onafhankelijk functioneert van het perceelsysteem (SWSRF = 3). De secondary water course is de hoogte van het peil in de put (aanvoer- of regelput, het waterniveau in beide putten zijn vrijwel gelijk). De balg, het systeem dat in de regelput aanwezig is, is gelijk aan de drainagebasis van het perceel. In SWAP is dit gelijk aan de stuw met bijbehorende stuwkenmerken. De hoogte van de balg wordt aangegeven met HBWEIR, de afvoercoëfficiënt is ALPHAW, en de afvoerexponent is BETAW. De hoeveelheid water die maximaal het subirrigatiesysteem wordt ingepompt bij de aanvoerput, wordt weergegeven met WSCAP.

Opzet SWAP en SWAP-PEST model

In dit project is het SWAP-model gekalibreerd met PEST (Doherty, 2010), op basis van de gemeten grondwaterniveaus en bodemvochtgehalten op drie dieptes. Het gekalibreerde dynamische SWAP-PEST model is gebruikt om de SWAP-simulaties te verlengen naar 30 jaar (1990-2019). In beide modellen is gebruik gemaakt van 'extended drainage'. In de (offline) kalibratie is het 'surface water level of secondary system' (WLS), oftewel het peil in de put invoer, invoer (Bartholomeus et al., 2015b). In het verlengde, 30-jarige SWAP model, wordt het WLS-niveau gesimuleerd en wordt de hoogte van de balg/vlotter (HBWEIR) ingevoerd met daarbij de maximaal aangevoerde hoeveelheid water (WSCAP). Het exact gebruikte aangevoerde water in SWAP wordt tijdens de modellering bepaald aan de hand van het drainageniveau (peil in de put) en de groeiomstandigheden van de plant (zuurstofstress of droogtestress). Als bijvoorbeeld de pompcapaciteit 5 mm/d is, kan het zijn dat er in het SWAP model maar 3 mm/d wordt gemodelleerd. Om de resultaten van de verlengde 30-jarige SWAP modellen van de vier verschillende veldexperimenten zo goed mogelijk te vergelijken, zijn de periodes van wateraanvoer elk jaar en bij elke proef gelijk (1 april – 30 september).

II.2 Invoer SWAP model

Lieshout

Tabel II-1: Toelichting input SWAP model bij Lieshout

	Input
Bodemopbouw	Verschillende lagen, beschreven in Bartholomeus et al. (2018).
Meteorologie	AWS KNMI Station Eindhoven (nr. 370)
Onderrandvoorwaarde	De onderrand van het model is gebaseerd op een hydrologische onderrand waar een gemiddelde stijghoogte (AQAVE) van 225 cm is opgelegd, de amplitude van de sinus (AQAMP) is 50 cm en de weerstand van de scheidende laag (RIMLAY) is 1367 dagen.
Gewasgroeimodel	Het gedetailleerde gewasgroeimodel (WOFOST)
Drainagemodule	Basic drainage, beschreven in Bartholomeus et al. (2018)
Drainageparameters	Niet aanwezig
Stuwparameters	Niet aanwezig
Slootpeilen	Drainage naar niveau 1: -370 cm Drainage naar niveau 2: -155 cm Drainage naar niveau 3: <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 april – 15 april: -120 cm ○ 15 april – 30 september: -70 cm ○ 1 oktober – 31 maart: -250 cm
Wateraanvoer	Niet aanwezig
Referentieniveau	16.55m+NAP

Haaksbergen

Tabel II-2: Toelichting input SWAP model bij Haaksbergen

	Input
Bodemopbouw	Zes verschillende lagen zoals beschreven in Bartholomeus et al. (2016).
Meteorologie	Het KNMI AWS station Twenthe (nr. 290).
Onderrandvoorwaarde	De onderrand van het model is gebaseerd op een hydrologische onderrand waar een gemiddelde stijghoogte (AQAVE) van -250 cm is opgelegd, de amplitude van de sinus (AQAMP) is 50 cm en de weerstand van de scheidende laag (RIMLAY) is 500 dagen. De AQAVE en RIMLAY zijn gekalibreerd (Tabel II-5) a.d.h.v. observaties.
Gewasgroeimodel	<i>SWAP-PEST</i> : het simpel maïs model <i>SWAP-WOFOST</i> : het algemeen gedetailleerde maïs model (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018)
Drainagemodule	Extended drainage
Drainageweerstand	<ol style="list-style-type: none"> De drainageweerstand (RDRAIN1) is 1000 d, de infiltratieweerstand (RINF1) is 100000 d (ter voorkoming van niet realistisch slootaanvoer bij lagere grondwaterstanden). De drainageweerstand (RDRAIN2) is 304 d, de infiltratieweerstand (RINF2) is 385 d. RDRAIN1, RDRAIN2 en RINF1 zijn gekalibreerd met <i>SWAP-PEST</i> (Tabel II-5).
Stuwparameters (SWAP-WOFOST model)	De werking van de balg, in <i>SWAP</i> , wordt o.a. bepaald door de hoogte van de balg (cm), de afvoercoëfficiënt α_{input} ($m^3-\beta s^{-1}$) en de afvoerexponent β (-) (Kroes et al., 2017). <ul style="list-style-type: none"> Hoogte balg: bij <i>SWAP-WOFOST</i> is een gemiddelde waarde van -100cm+mv (1 oktober – 31 maart) en -50 cm+mv (1 april – 30 september) gebruikt. Afvoercoëfficiënt α_{input}: $3.0 m^3-\beta s^{-1}$ Afvoerexponent β: 1.4765
Slootpeilen	<i>SWAP-PEST</i> : De slootpeilen (WLP) zijn gebaseerd op de metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij Haaksbergen. <i>SWAP-WOFOST</i> : -170 cm tussen 1990 – apr. 2016, daarna aangevuld met metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij Haaksbergen (apr. 2016 – 2019)
Wateraanvoer (SWAP-WOFOST model)	<i>SWAP-PEST</i> : parameter wordt niet gebruikt <i>SWAP-WOFOST</i> : $4 mm d^{-1}$ tussen 1 april en 30 september
Referentieniveau	20.77m+NAP

America

Tabel II-3: Toelichting input SWAP model bij America

	Input
Bodemopbouw	De bodem is ingedeeld in een toplaag van 0 – 35cm, en een benedenlaag (35-205 cm en 225-495 cm). In de benedenlaag is een smalle leemlaag aanwezig (205-225 cm). De zandige lagen zijn leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1/ B1). De leemlaag is met zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2/B2 volgens de Staringreeks 2001). De leemlaag is gedefinieerd als zandige leem (O14, Staringreeks 2001). Met behulp van de kalibratie met SWAP-PEST zijn de parameters van de eerste twee lagen locatie specifieker gemaakt (Tabel II-5).
Meteorologie	Het KNMI AWS station Arcen (nr. 391).
Onderrandvoorwaarde	De onderrand van het model is gebaseerd op een hydrologische onderrand waar een gemiddelde stijghoogte (AQAVE) van -140 cm is opgelegd, de amplitude van de sinus (AQAMP) is 50 cm en de weerstand van de scheidende laag (RIMLAY) is 1013 dagen. De AQAVE en RIMLAY zijn gekalibreerd (Tabel II-5) a.d.h.v. observaties.
Gewasgroeimodel	SWAP-PEST: het simpel gras model SWAP-WOFOST: het gedetailleerde gras model
Drainagemodule	Extended drainage
Drainageweerstand	<ol style="list-style-type: none"> 1. De drainageweerstand (RDRAIN1) is 295 d, de infiltratieweerstand (RINF1) is 10000 d (ter voorkoming van niet realistisch slootaanvoer bij lagere grondwaterstanden). 2. De drainage- en infiltratieweerstand zijn gelijk aan elkaar (9d). RDRAIN1 is gekalibreerd met SWAP-PEST (Tabel II-5).
Stuwparameters (SWAP-WOFOST model)	<ul style="list-style-type: none"> • Hoogte vlotter: -50 cm • Afvoercoëfficiënt α_{input}: $3.0 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ • Afvoere exponent β: 1.4765
Slootpeilen	De slootpeilen (WLP) zijn 's winters -180.0 cm+mv, 's zomers -160 cm+mv. Deze zijn gebaseerd op de metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij America.
Wateraanvoer (SWAP-WOFOST model)	SWAP-PEST: parameter wordt niet gebruikt SWAP-WOFOST: 4 mm d^{-1} tussen 1 april en 30 september
Referentieniveau	30.9 m+NAP

Stegeren (subirrigatie)

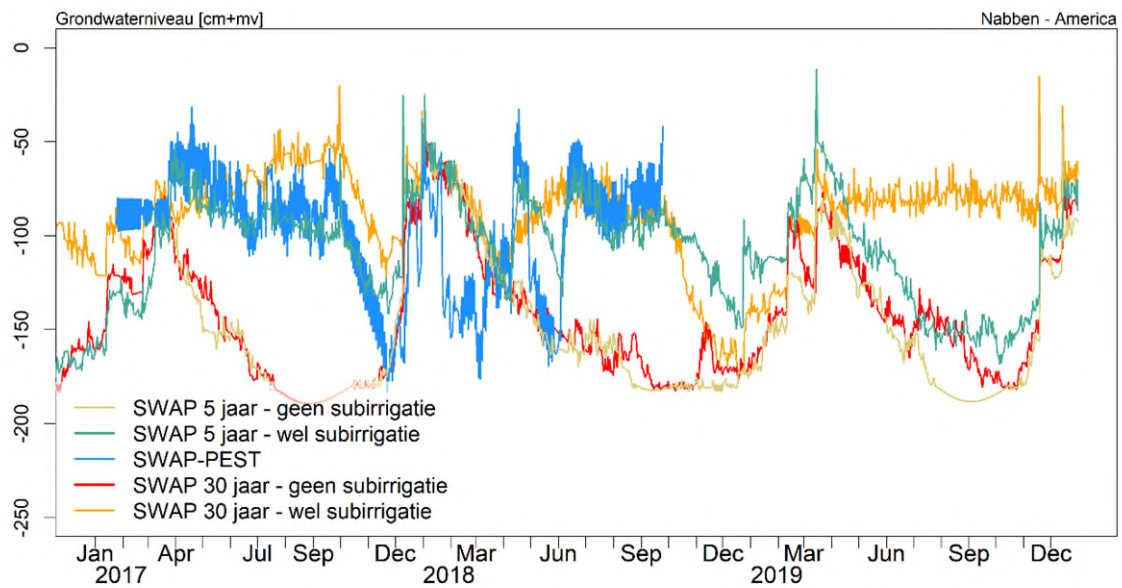
Tabel II-4: Toelichting input SWAP model bij Stegeren (subirrigatie)

	Input
Bodemopbouw	De bodem is ingedeeld in een toplaag van 0 – 30 cm en de benedenlaag 30 – 500 cm met zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2/B2 volgens de Staringreeks 2018). Met behulp van de kalibratie met SWAP-PEST zijn deze parameters locatie specifiek gemaakt (Tabel II-5).
Meteorologie	SWAP-PEST: KNMI AWS station nummer 278 (Heino) SWAP-WOFOST: het KNMI AWS station nummer 290 (Twenthe) voor de SWAP-WOFOST simulaties. Dagelijkse regengegevens met daarbij de duur van de bui is meegenomen in SWAP.
Onderrandvoorwaarde	De onderrand van het model is gebaseerd op een hydrologische onderrand waar een gemiddelde stijghoogte (AQAVE) van 125 cm –mv is opgelegd (gebaseerd op peilbuis ondiep filter), de amplitude van de sinus (AQAMP) is 50 cm en de weerstand van de scheidende laag (RIMLAY) is 500 dagen. Deze drie waarden worden gekalibreerd (Tabel II-5) a.d.h.v. observaties.
Gewasgroei-model	SWAP-PEST: het simpel gras model SWAP-WOFOST: het gedetailleerde gras model
Drainagemodule	Extended drainage
Drainageweerstand	<ol style="list-style-type: none"> De zijkant van het model heeft een drainageweerstand (RDRAIN1) die is geschat volgens slootafstand * factorL = 140 * 1.7 dm⁻¹ (Van der Gaast et al., 2006). De zijkant van het model heeft als infiltratieweerstand (RINFI) dezelfde waarde als de drainageweerstand (RDRAIN). De drainage- en infiltratieweerstand van het drainagesysteem zijn geschat op 50 d. <p>Alle vier deze parameters zijn gekalibreerd met SWAP-PEST (Tabel II-5).</p>
Referentieniveau	Het referentieniveau van het maaiveld is 7.35m+NAP, dit is maaiveldhoogte tussen de drain bij Stegeren
Stuwparameters (SWAP-WOFOST model)	De werking van de balg, in SWAP, wordt o.a. bepaald door de hoogte van de balg (cm), de afvoercoëfficiënt α_{input} (m ³ - β s ⁻¹) en de afvoere exponent β (-) (Kroes et al., 2017). <ul style="list-style-type: none"> Hoogte balg: een gemiddelde waarde van -50cm+mv (1 oktober – 31 maart) en -22.5cm+mv (1 april – 30 september). Dit is gebaseerd op de metingen. Afvoercoëfficiënt α_{input}: 3.0 m³-β s⁻¹ Afvoere exponent β: 1.4765
Slootpeilen	SWAP-PEST: De slootpeilen (WLP) zijn gebaseerd op de metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij Stegeren. SWAP-WOFOST: -250 cm tussen 1990 - nov. 2018, daarna aangevuld met metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij Stegeren (nov. 2018 – 2019)
Wateraanvoer (SWAP-WOFOST model)	SWAP-PEST: parameter wordt niet gebruikt. SWAP-WOFOST: 4 mm d ⁻¹ tussen 1 april en 30 september

Tabel II-5: Swap-input voor vier verschillende subirrigatieproeven.

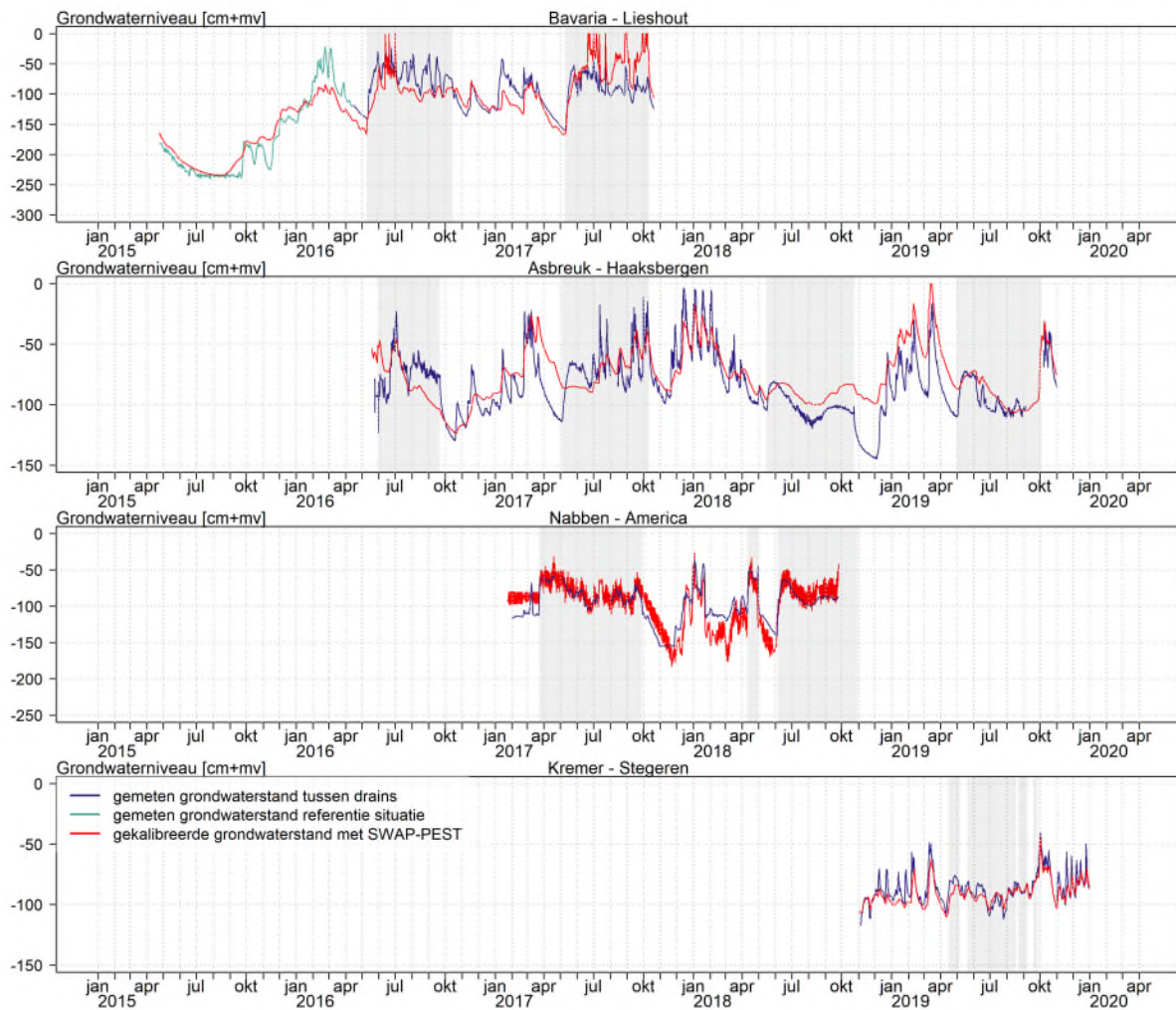
	Lieshout	Haaksbergen	America	Stegeren
Bodemlaag 1				
ORES	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200
OSAT	0.4200	0.3500	0.4300	0.4339
ALFA/ ALFAW	0.0276	0.0234	0.0234	0.0194
NPAR	1.4910	1.801	1.8010	2.298
KSAT	12.52	23.41	23.4100	93.24
KSATEXM	33.13	150.0	44.44225	186.5
LEXP	0.0276	0.000	0.000	0.000
H_ENPR	0.000	0.000	0.000	0.0194
Bodemlaag 2				
ORES	0.0200	0.0200	0.0100	0.0200
OSAT	0.4200	0.3800	0.3600	0.3870
ALFA/ ALFAW	0.0213	0.0234	0.0224	0.0161
NPAR	1.9510	1.951	2.2860	2.5244
KSAT	12.68	12.68	15.2200	22.762
KSATEXM	28.11	150.0	66.52687	45.524
LEXP	0.0213	0.168	0.000	0.0160
H_ENPR	0.000	0.000	0.000	0.000
Stijghoogte in het diepe pakket (onderrandvoorwaarde)				
AQAVE	-225.0	-40.0	-175.0	-110.0
AQAMP	50.0	0.0	50.0	25.3
AQTMAX	30.0	30.0	1.00	30.0
Verticale weerstand (RIMLAY)	5000.0	100.0	275.0	100.0
HDRAIN	-250.0	-130.0	-75.0	-75.0
Drainage karakteristieken				
Drainage niveau 1				
L	400.0	400.0	400.0	140.0
ZBOTDRE	-200.0	-200.0	-200.0	-15.0
GWLINF	-200.0	-200.0	-200.0	-350.0
RDRAIN	800.0	800.0	800.0	335.0
RINFI	800.0	800.0	800.0	335.0
RENTRY	0.0	0.0	0.0	1.0
REXIT	0.0	0.0	0.0	1.0
WIDTHR	100.0	100.0	100.0	50.0
TALUDR	2.0	2.0	2.0	0.1
Drainage niveau 2				
L	6.0	6.0	6.0	6.0
ZBOTDRE	-100.0	-150.0	-100.0	-125.0
GWLINF	-100.0	-150.0	-100.0	-125.0
RDRAIN	10.0	60.0	10.0	19.3
RINFI	10.0	60.0	10.0	19.3
RENTRY	0.0	0.8	0.0	0.8
REXIT	0.0	0.8	0.0	0.8
WIDTHR	10.0	10.0	10.0	10.0
TALUDR	5.0	5.0	5.0	0.1

SWAP model vergelijking

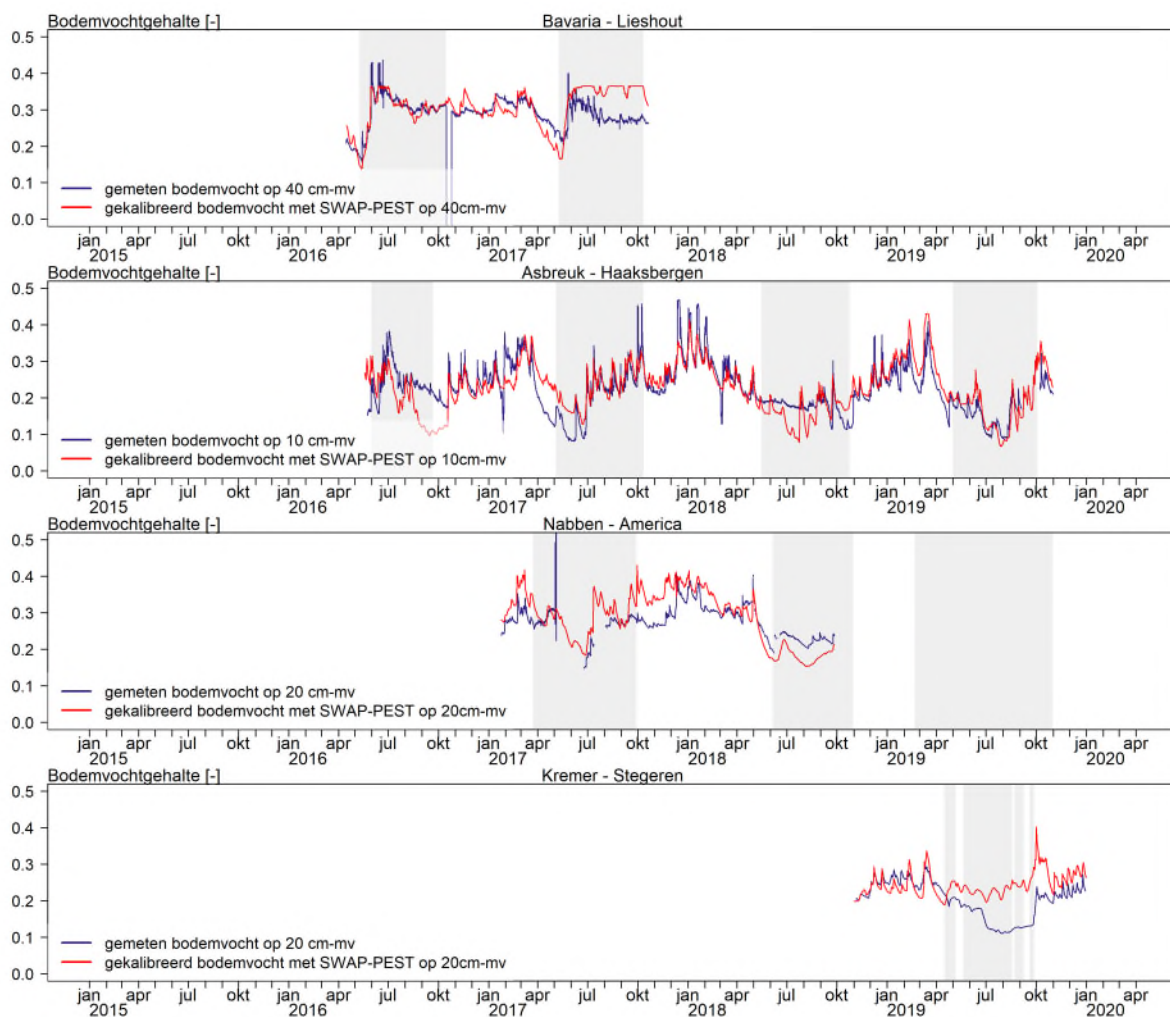


Figuur II-3: Gesimuleerde grondwaterstand voor 5 situaties. 1) SWAP model voor 5 jaar zonder subirrigatie, 2) SWAP model met extra wateraanvoer t.o.v. de gemeten wateraanvoer, 3) gekalibreerd SWAP-PEST model op basis van veldmetingen grondwater en bodemvocht, 4) SWAP model voor 30 jaar zonder subirrigatie, 5) SWAP model voor 30 jaar met structureel 4 mm subirrigatie tussen 1 april en 30 september.

II.3 Resultaten kalibratie



Figuur II-4: Gemeten en met gekalibreerde grondwaterstanden

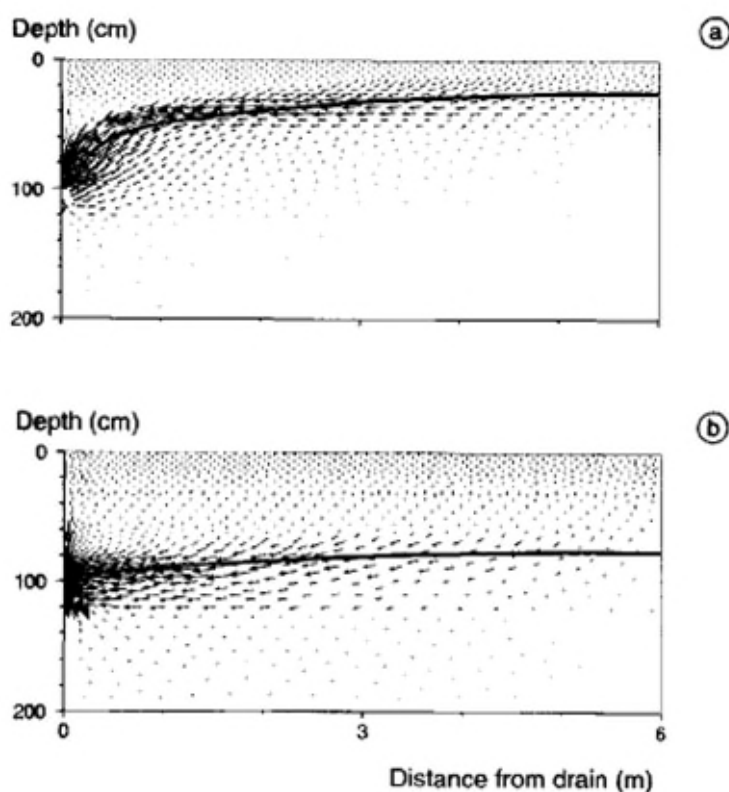


Figuur II-5: Gemeten en met gekalibreerde bodemvochtgehaltenes. Let op: de dieptes waarvoor de bodemvochtgehaltenes zijn gegeven zijn niet voor alle proeven gelijk, vanwege het aantal beschikbare metingen en de betrouwbaarheid van de metingen.

III. HYDRUS 2D

Achtergrond en algemene beschrijving model

Stroming van water en opgeloste stoffen in het bodemprofiel van landbouwpercelen vindt plaats aan/over het maaiveld, in de onverzadigde zone boven de grondwaterspiegel en in de verzadigde zone vanaf de grondwaterspiegel. In principe is deze stroming tijdsafhankelijk en driedimensionaal (3D). Afhankelijk van de situatie kan de dimensionaliteit vereenvoudigd worden van 3D naar 2D of van 2D naar 1D. De stroming van water en stoffen van en naar drainagebuizen en kavelsloten of andere watergangen kent ook 3D componenten. Volgens (de Vos et al., 1997) modelleerde de stroming naar drainagebuizen met een SWMS 2D-model (Figuur III-1).



Figuur III-1: Stroming (2D) van water naar een drainagebuis (links in de figuren) in een drainagesituatie. Drainafstand is 12 m. Boven (a): situatie met een infiltratie-drainage-intensiteit van 15 mm/d (opbolling), beneden (b) 1 mm/d. Bron: (de Vos et al., 1997).

De richting van de pijlen in Figuur III-1 geeft de stromingsrichting aan. Deze is duidelijk 2D, en in werkelijkheid 3D. Omdat we in onze proeven te maken hebben met drainagebuizen voor drainage en subirrigatie, waarbij water dat via subirrigatie in de bodem terecht is gekomen er via een volgende drainage-gebeurtenis ook weer afgevoerd kan worden en de stromingssituatie tenminste 2D is, hebben we ervoor gekozen een latere opvolger van het SWMS 2D te gebruiken, namelijk Hydrus.

Met de Hydrus software kunnen 2D- of 3D-modellen worden gemaakt, om het transport van water, stoffen en warmte dynamisch door te rekenen in onverzadigde en verzadigde zones (Šimunek and Šejna, 2018). Het gehele bodemgrondwatersysteem wordt daarmee als rekendomein afgedekt. De gebruikte theorie en gemodelleerde processen zijn veelal identiek aan die van SWAP. Het grote verschil tussen SWAP en Hydrus zit in de dimensies van rekenen (2D of 3D vs. 1D) en in het feit dat in Hydrus een watergang en/of drainagebuis als ontwateringsmiddel fysiek kan worden geschematiseerd en in het modeldomein opgenomen kan worden, inclusief bijbehorende

randvoorwaarden. De Hydrus 2D-modellen zijn opgezet om de werking van subirrigatie beter te kunnen duiden en inzicht te krijgen in de stromingspatronen. In de XZ-dimensie kunnen de vragen en uitkomsten voldoende duidelijk in beeld worden gebracht; een 3D-model is niet nodig. Ook is het opzetten van een 3D-model niet eenvoudig in de zin van benodigde informatie over het modeldomein, de modelgrootte (groter) en de rekentijden (nemen toe).

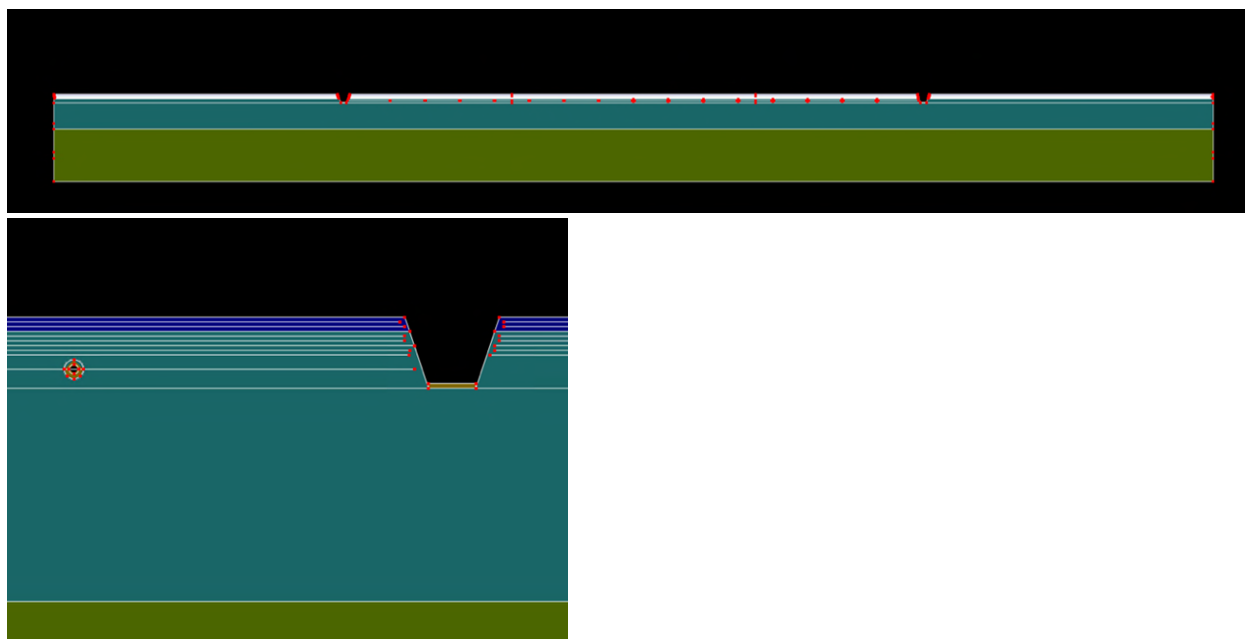
Modelschematisatie

De volgende modeleigenschappen zijn gebruikt in Figuur III-2:

- Gewas: gras
- Bodemopbouw:
 - Diepte 0 tot 6 m-mv gelijk aan SWAP (Boxtel formatie)
 - Diepte 6 tot 15 m-mv: Kreftenheye formatie ($K_{\text{sat}} = 0,5 \text{ cm/d}$)
- Worteldiepte 0,3 m
- Interactie met oppervlaktewater
 - Greppels (1 m diep)
 - Sloot (1,5 m diep; peilbeheer door waterschap)
 - SAWAX
 - Subirrigatie
 - Subirrigatie optimaal

De volgende modeleigenschappen worden in SWAP conceptueel benaderd, maar zijn fysiek geschematiseerd in Hydrus-2D:

- Rekendomein (XZ-richting): 200 m lang (X) en 15 m diep (Z)
- Drains (scenario's Sub-irrigatie, Sub-irrigatie optimaal)
 - Aantal drains: 8
 - Drainafstand: 5 m
 - Draindiepte: 1,2 m-mv
- 2 x Watergang, bodem 1 m breed op 1.5 m t.o.v. maaiveld met 1:3 talud



Figuur III-2: 2D-modelschematisatie Hydrus, met detail in onderste deel figuur. Breedte 200 m, diepte 15 m.

De bovenrandvoorwaarde, met neerslag, evaporatie, transpiratie en verdamping van interceptiewater, is overgenomen uit SWAP of op gelijke wijze berekend. De gemiddelde wateraanvoer naar de drainagebuizen is gelijkgesteld voor de SWAP- en Hydrus-modellen door modelparameters (i.c. de verzadigde doorlatendheid K_{sat}) rondom de drainagebuizen in het 2D-model enigszins aan te passen. De onderrand in het 2D-model kent geen speciale systeemweerstand, maar de bodemparameters die op die diepte (6 m-mv) gelden. Dat heeft tot gevolg gehad dat we als onderrandvoorwaarde een dichte onderrand (geen stroming over deze rand) hebben aangebracht op 15 m-mv. Vervolgens zijn er twee verticale randvoorwaarden opgelegd. Deze randvoorwaarden volgen de regionale grondwaterstand binnen Stegeren met een sinusbeweging. In Figuur III-3 zijn isohypsen van de stijghoogte van het regionale grondwater getekend op/rond 1-7-2018.

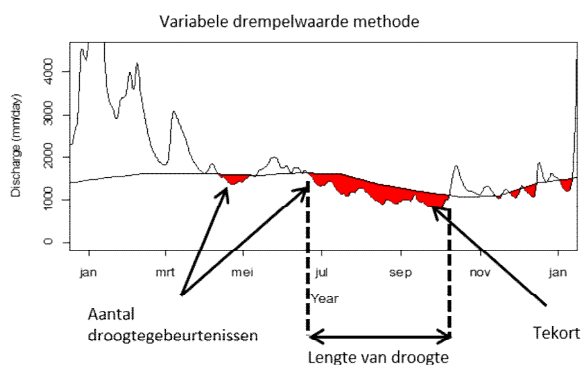


Figuur III-3: Isohypsen grondwater in regio Stegeren op/rond 1-7-2018.

Het effect van de watergang en de gevoerde waterpeilen is meegenomen in de modelanalyse, door een watergang met gangbare afmetingen en met een zomer- en winterpeil te schematiseren. De drainagebuizen zitten als kleine fysieke openingen in het 2D-model. Deze openingen in het model zijn qua diameter kleiner dan de drainagebuizen buiten in het veld (\varnothing 60 mm). Dit heeft te maken met de omrekening van de werkelijke diameter naar de zogenaamde 'effectieve' diameter, omdat de werkelijke drainagebuis maar op een beperkt aantal plekken geperforeerd is. Slechts een klein deel van het buis-oppervlak is dus open (bijv. (Skaggs and Tang, 1979)). Zoals aangegeven is voor de drainagebuizen zowel een variabele drukhoogte als randvoorwaarde aangehouden binnen de 2D-modellen. Dit sluit aan bij de subirrigatiepraktijk waarbij een overdruk (bijv. +0.5 m) op het drainage/subirrigatiesysteem gezet in de aanvoerput, waarna water in het veld via de gekoppelde drainagebuizen in de bodem dringt. De flux die op deze wijze in Hydrus-2D berekend wordt (aanvoer via de drains), is mede een functie van de gradiënt in de drukhoogte in de bodem waar de drainbuizen liggen. Initiële berekeningen lieten zien dat naarmate de eerste drainbuis dichterbij de watergang ligt, er meer water via deze drainbuis wordt aangevoerd dan via de buizen verderop in het perceel. Bij de gebruikte peilen in de watergang is er namelijk een zone nabij de watergang waar de drukhoogte-gradiënten groter zijn, waardoor via de eerste drain meer water via subirrigatie wordt toegediend (berekende flux) dan via de volgende drains. Dit eerste berekeningsresultaat heeft consequenties voor de afstand tot de watergang die men wil toepassen bij de aanleg en werking van drainagebuizen tijdens subirrigatie (Bartholomeus et al., 2019).

IV. Karakteriseren van droogte

Water vasthouden in het systeem is belangrijk om droogteschade aan gewassen tegen te gaan. Daarnaast kan het nadelige effecten van droogte op het hele watersysteem verminderen. Hiervoor is gekeken naar de effecten van de maatregelen op verschillende droogtetypes (bodemvocht- en hydrologische droogte): in welke mate dragen de maatregelen bij aan het beperken van de doorwerking van droogte in het weer (meteorologische droogte) op droogte in bodemvocht en grondwater? Droogte kan worden afgeleid op basis van anomalieën in de tijdreeksen van de verschillende hydrologische componenten. Hiervoor is de variabele drempelwaarde methode (Figuur IV-1) gebruikt (Hisdal et al., 2004; Yevjevich et al., 1967). Met deze methode wordt ervanuit 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 seizoensgevoeligheid. Door rekening te houden met de variabiliteit tussen de seizoenen kan droogte in elk seizoen voorkomen, in plaats van enkel in de zomer. Voor elke droogte kunnen verschillende karakteristieken berekend worden, zoals het aantal droogtegebeurtenissen, de lengte, het totale tekort en de intensiteit. De variabele drempelwaarde methode is toegepast op bodemvocht en grondwaterdata. Voor de droogte analyse is het belangrijk om de klimatologische variabiliteit mee te nemen door gebruik te maken van lange tijdreeksen. Daarom wordt de droogte hier bepaald uit de resultaten van de SWAP-modellering over 30 jaar. De effecten van de maatregelen worden bepaald door de methode toe te passen op de referentiesituatie (gesimuleerde resultaten zonder subirrigatie) en de situatie met subirrigatie. De verschuiving in de drempelwaarde (het maandelijkse 20^{ste} percentiel) geeft een goede indicatie van de verschuivingen in de lagere waarden. Daarnaast kan door het toepassen van de drempelwaarde gebaseerd op de referentiesituatie op de resultaten van de modellen met subirrigatie bepaald worden wat het effect is op de droogte.



Figuur IV-1: Variabele drempelwaarde methode en droogtekenmerken. De rood gekleurde vlakken geven periodes van droogte.

V. Meetresultaten

Deze bijlagen is gebruikt om de diverse meetgegevens te presenteren nodig bij de data-analyse van de verschillende locaties. In Tabel V-1 zijn de meta-metgegevens van de verschillende locaties weergegeven, in Tabel V-2 zijn een aantal metingen van het grondwaterniveau, bodemvocht en wateraan- en afvoer weergegeven.

Tabel V-1: Meta-gegevens voor de vier locaties met watermaatregelen (op locatie Stegeren zijn twee proefvelden).

	Lieshout	Haaksbergen	America	Stegeren subirrigatie	Stegeren SAWAX
Maaiveld [m+NAP]	16.55	20.77	30.9	7.35	7.20
Diepte drains [m+NAP]	15.38	19.71	29.8	6.25	n.v.t.
Afstand tussen drains [m]	10	6?	6	6	n.v.t.
Diepte leemlaag [m+NAP]	15.05-15.30	17.77-17.87 16.67-16.97 15.27-15.52 10.27-12.57 7.77-8.27	28.8-29.10	n.v.t.	n.v.t.

Tabel V-2: Metingen grondwatervniveau (GWL), bodemvocht en debiet voor meetpunten bij drain (BD) en tussen drain (TD) voor de vier locaties met watermaatregelen.

	Haaksbergen				America			Stegeren subirrigatie	
	2016	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2018	2019
GWL in juli BD [cm+mv]	-70				-90	-70	-120	n.v.t	-100
GWL in juli TD [cm+mv]	-70	-70	-110	-110	-110	-110	-140	n.v.t	-100
Theta in juli BD – 20cm [-]	0.30 <small>(10 cm-mv)</small>				0.20	0.22	0.12	n.v.t	0.12
Theta in juli BD – 40cm [-]	0.40 <small>(50 cm-mv)</small>				0.17	0.20	0.20	n.v.t	0.19
Theta in juli BD – 60cm [-]	0.43 <small>(80 cm-mv)</small>				0.35	0.38	0.30	n.v.t	0.25
GWL ondiep – GWL diep in juli [m]	0.10				1.1	1.35	1.0	n.v.t	0.30
Tot. Wateraanvoer	324 mm	562 mm	503 mm	439 mm	1001 mm	928 mm	569 mm	n.v.t	515.2 mm
Tot. waterafvoer								n.v.t	

	Lieshout			
	2016	2017	2018	2019
GWL in juli BD [cm+mv]	-62	-81	-87	-130
GWL in juli TD [cm+mv]	-63	-81	-96	-154
Theta in juli BD – 20cm [-]	0.29	0.23	0.25	0.21
Theta in juli BD – 40cm [-]	0.35	0.31	0.29 (meting tot 10- 07)	0.11
Theta in juli BD – 60cm [-]	0.34	0.63	-	-
GWL ondiep – GWL diep in juli [m]	1.17	1.08	-	-
Tot. Wateraanvoer	377 mm / 28.000 m ³	433 mm / 36.500 m ³	414 mm/ 35.220 m ³	77 mm/ 6.560 m ³
Tot. waterafvoer	-	-	-	-

VI. Modelresultaten 2D vergeleken met veldmetingen

De Hydrus 2D-berekeningen zijn bedoeld als aanvulling op de 1D SWAP berekeningen en sluiten qua fluxen aan de bovenrand aan bij de SWAP-resultaten. Neerslag en werkelijke verdamping via transpiratie en evaporatie zijn (vrijwel) gelijk. We willen met name de 2D stroming in beeld brengen en laten zien waar het water in het modeldomein vandaan komt en naartoe stroomt. Bodemfysisch gezien nemen we in het 2D-model de gecalibreerde parameters van SWAP over. We rekenen met een isotroop medium, d.w.z. de verticale doorlaatfactor is gelijk aan de horizontale. We hebben de modelparameters verder niet gecalibreerd.

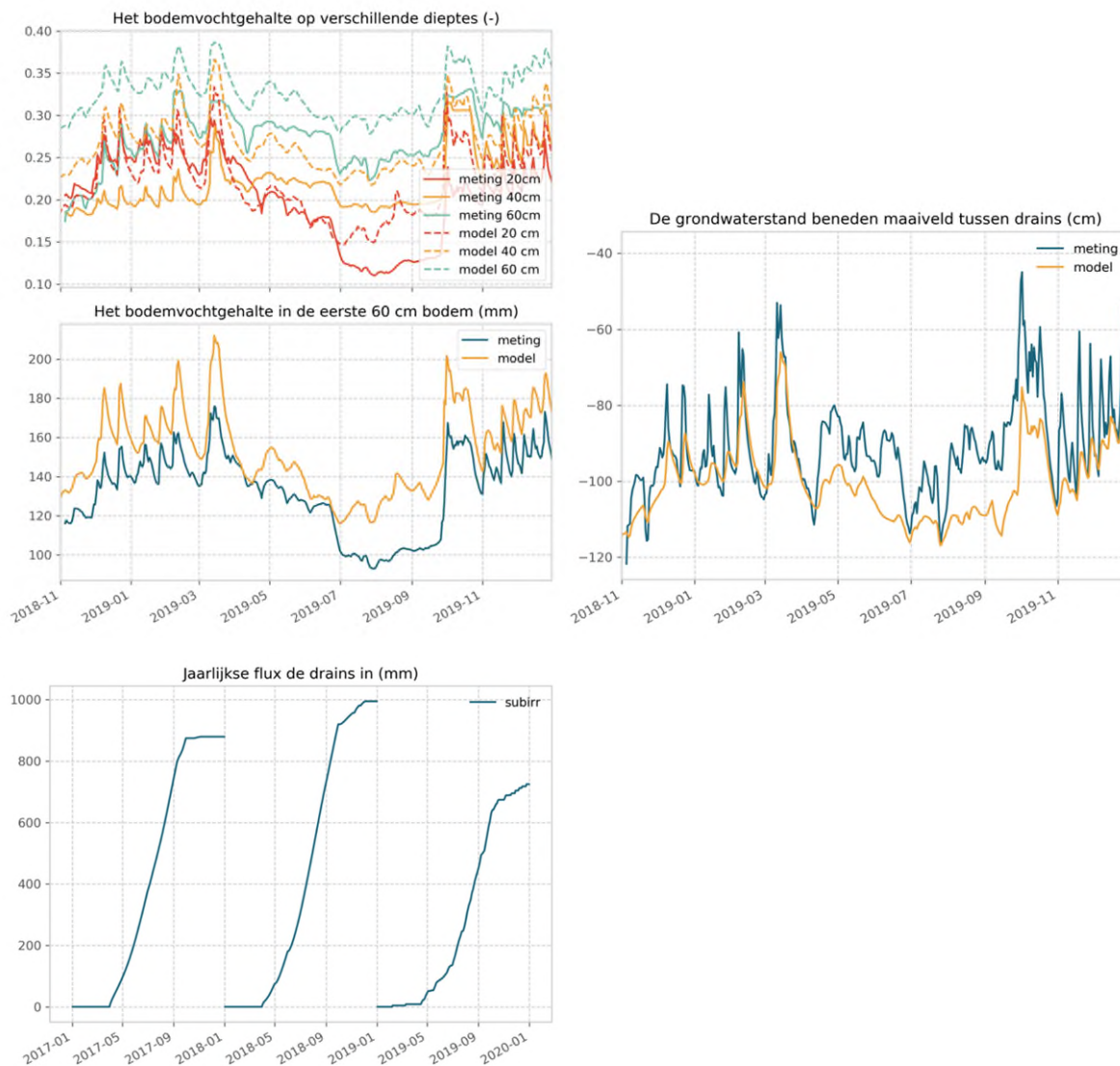
In Hydrus berekenen we de subirrigatieflux door de drukhoogte in de wateraanvoerput van het systeem te gebruiken als randvoorwaarde. Via de weerstand van de bodem bij de drainagebuizen en de gradiënt in de drukhoogte binnen het rekendomein wordt deze flux bepaald. De berekende subirrigatieflux komt overeen met de gemeten wateraanvoer in het veld. Dit betekent samen met de bovenrandflux van het model via neerslag en verdamping dat we de interactie met het grondwater via stroming van water goed in beeld kunnen brengen. Gegeven de modelrand op 15 m-mv die dicht is (geen flux over deze rand), betekent dit dat we de 2D-grondwaterstroming in beeld kunnen brengen. Deze wordt (natuurlijk) beïnvloed door de zij-randvoorwaarden van het modeldomein via een opgelegde drukhoogte.

Het modeldomein is geplaatst in een vrijwel oost-west-richting. Er is een gradiënt in de stijghoogte binnen de 15 m diepe freatische aquifer van zuidwest naar noordoost, aflopend naar zuidwest (Vechtdal). Deze gradiënt is grofweg 6 cm per 100 m, afgeleid van stijghoogtemetingen in twee (DINO-) peilbuizen binnen Stegeren. De stijghoogten laten een sinusvormig verloop zien over het jaar met een gemiddelde ter plekke van het modeldomein rond de diepteligging van de drainbuizen op 1,1 m-mv en een amplitude van ongeveer 0,2 m. Het modeldomein is 200 m breed, de rechterrand (oost) kent daardoor een gemiddelde stijghoogte (vertaald naar drukhoogte) die 0,12 m hoger is dan die aan de linkerkant (west).

De 2D-berekeningen komen niet geheel overeen met de veldmetingen van bodemvocht en grondwaterstand. De berekeningen laten een onderschatting zien in de berekende grondwaterstand midden tussen de drainbuizen in de zomer. Dit betekent dat in het model een te geringe horizontale (laterale) waterstroming wordt berekend. Dit kan te maken hebben met de aanname van een anisotroop medium met een factor 3 in het gebruikte model ($K_h/K_v=3,0$). Als we een grotere anisotropie-factor zouden gebruiken i.c. de verzadigde horizontale doorlaatfactor ($K_{s,h}$) groter maken dan driemaal de verticale ($K_{s,v}$), dan verbetert het modelresultaat. In Van Bakel et al. (2020) is met een factor $K_{s,h}/K_{s,v}=10,0$ gerekend. De berekeningen laten een overschatting zien van het berekende bodemvochtgehalte op 20 en 40 cm-mv. Dit levert een verschil van 40 mm waterschijf op in de bovenste 60 cm van de bodem (modelberekening te nat). Als neerslag en verdamping aan de bovenrand in voldoende mate kloppen én het bodemvocht wordt overschat en de grondwaterstand wordt onderschat, dan betekent dit dat binnen het model het water niet goed verdeeld is. De onverzadigde heeft te veel water en de verzadigde zone te weinig. Getalsmatig klopt dit ongeveer. Het water moet eigenlijk sneller/meer vanuit de onverzadigde zone naar de freatische zone stromen. Daarop zouden we de modelparameters kunnen aanpassen, hetgeen we niet gedaan hebben (geen kalibratie).

Zoals gezegd zijn de fluxen aan de bovenrand van het model via neerslag en verdamping van bodem en gewas gelijk aan die van SWAP. De met het 2D-model berekende wateraanvoer via de drains is ongeveer gelijk aan de debietmetingen in het veld. Als de opgelegde drukhoogten aan de zijranden van het model afgeleid zijn uit

veldmetingen in het gebied van stijghoogten (niveau en sinusvorm), dan kan de berekende grondwaterstroming in het model plausibel geacht worden. Daarmee schrijven we niet de berekende afwijkingen t.o.v. veldmetingen weg, maar kunnen we wel naar de stromingspatronen gaan kijken, bij een iets te laag niveau van de berekende grondwaterstanden.



Figuur VI-1: Hydrus-2D - modelresultaten vergeleken met veldmetingen

VII. Waterbalans

Waterbalans effluent industrie bij Lieshout

Tabel VII-1: Gesimuleerde waterbalansen [mm] voor 2017, 2018 en 2019 voor een situatie zonder subirrigatie (1) en een situatie met structureel 4 mm subirrigatie tussen 1 april en 30 september. De waterbalans is opgesteld voor het SWAP model van Lieshout. Positieve waarden bergingsverandering is water dat in het bodemwatersysteem is opgeslagen, negatieve waarden is water dat het bodemwatersysteem heeft verlaten. * Door de modelinstellingen gebruikt in het 30-jarige SWAP model voor Lieshout is dit de totale hoeveelheid water aanwezig in de drainagebuizen (zowel via laterale instroming als gevolg van slooppeil/ drainagehoogte, en subirrigatie (wateraanvoer buizensysteem)). ** Door de modelinstellingen geeft de waterbalans post 'drainage' zowel de laterale drainage (drainage naar opp. water) als buisdrainage weer.

		2017		2018		2019	
		1	2	1	2	1	2
In	Neerslag	720.4	720.4	630.2	630.2	707.5	707.5
	Oppervlakkige aanvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Infiltratie*	97.1	484.6	96.7	561.6	86.6	584.9
	Kwel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>Som</i>	810.5	1205.0	726.9	1191.8	794.1	1292.4
Uit	Interceptie	70.8	85.6	48.0	69.9	62.0	83.1
	Oppervlakkige afvoer	2.4	0.7	0.7	1.0	1.8	1.6
	Transpiratie	449.9	594.5	419.2	681.4	419.6	642.2
	Bodemverdamping	107.0	133.2	96.7	117.0	96.6	130.3
	Drainage**	90.3	201.3	130.8	204.8	135.5	270.2
	Wegzijing	44.8	144.1	51.5	141.4	56.4	149.7
	<i>Som</i>	765.2	1159.2	746.9	1214.8	772.0	1277.1
<i>Bergingsverandering</i>		52.2	45.8	-20.1	-23.0	22.2	15.3

Waterbalans effluent RWZI bij Haaksbergen

Tabel VII-2: Gesimuleerde waterbalansen [mm] voor 2017, 2018 en 2019 voor een situatie zonder subirrigatie (1) en een situatie met structureel 4 mm subirrigatie tussen 1 april en 30 september. De waterbalans is opgesteld voor het SWAP model van Haaksbergen. Positieve waarden bergingsverandering is water dat in het bodemwatersysteem is opgeslagen, negatieve waarden is water dat het bodemwatersysteem heeft verlaten. * de hoeveelheid subirrigatie is in deze waterbalans onderschat. In het 30-jarige SWAP model Haaksbergen zijn vaste drainagepeilen in de regelput gehanteerd. In de overgangsfase van winterpeil (-100 cm-mv) naar zomerpeil (-10 cm-mv) vult het model het bodemwatersysteem (in 2019) in 2 dagen met de onrealistische hoge waarde van 3764 mm water. Dit getal is buiten beschouwing gelaten in de weergegeven waterbalans. Als gevolg van de eenmalige hoge wateraanvulling is er de rest van het groeiseizoen (tot 2 april t/m 30 september) ongeveer 2 mm subirrigatie per dag (som groeizoen is weergegeven in de waterbalans).

		2017		2018		2019	
		1	2	1	2	1	2
In	Neerslag	853.5	853.5	610.2	610.2	774.4	774.4
	Oppervlakkige aanvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subirrigatie	0.00	203.2*	0.00	285.3*	0.00	287.2*
	Infiltratie buisdrainage	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Kwel	257.3	143.9	313.8	210.7	270.5	168.6
	<i>Som</i>	1110.8	1200.6	924.0	1106.2	1044.9	1230.2
Uit	Interceptie	72.1	71.8	24.5	25.0	42.6	45.0
	Oppervlakkige afvoer	0.6	1.1	2.7	3.1	4.0	16.9
	Transpiratie	247.7	247.3	336.5	349.6	285.4	302.4
	Bodemverdamping	139.7	163.2	161.5	198.2	156.2	186.6
	Laterale drainage (drainage naar opp. water)	321.0	398.0	268.0	338.0	296.0	365.0
	Buisdrainage	274.9	271.4	159.2	217.8	257.3	335.1
	Wegzijging	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>Som</i>	1056.0	1152.8	952.4	1131.7	1041.5	1251.0
<i>Bergingsverandering</i>		54.9	47.8	-25.5	-25.5	3.4	-20.8

Waterbalans grondwaterproef bij America

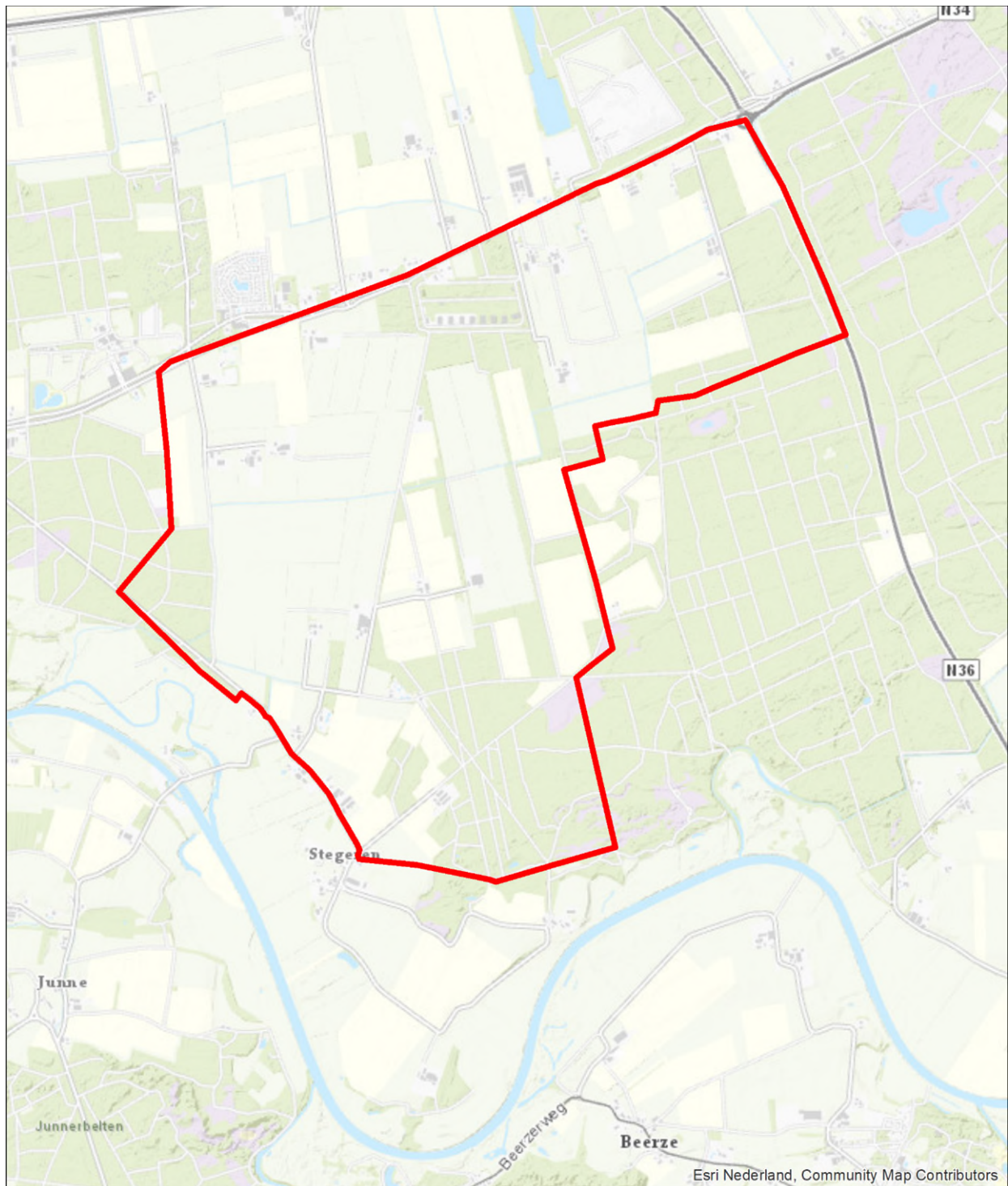
Tabel VII-3: Gesimuleerde waterbalansen [mm] voor 2017, 2018 en 2019 voor een situatie zonder subirrigatie (1) en een situatie met structureel 4 mm subirrigatie tussen 1 april en 30 september. De waterbalans is opgesteld voor het SWAP model van America. Negatieve waarden voor flux onderrand betekent wegzijging, positieve waarden voor flux onderrand betekent kwel. Negatieve waarden buisdrainage betekent water dat in de winterperiode het buizensysteem inloopt, positieve waarden buisdrainage is afvoer via het buizensysteem. Positieve waarden bergingsverandering is water dat in het bodemwatersysteem is opgeslagen, negatieve waarden is water dat het bodemwatersysteem heeft verlaten.

		2017		2018		2019	
		1	2	1	2	1	2
In	Neerslag	775.6	775.6	445.2	445.2	692.2	692.2
	Oppervlakkige aanvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subirrigatie	0.00	704.1	0.00	728.0	0.00	728.0
	Infiltratie buisdrainage	0.00	0.00	81.1	0.00	7.9	0.00
	Kwel	14.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>Som</i>	790.39	1479.7	526.3	1173.2	700.1	1420.2
Uit	Interceptie	43.28	45.09	22.62	23.45	37.65	41.63
	Oppervlakkige afvoer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Transpiratie	372.9	404.4	265.7	332.7	312.4	372.4
	Bodemverdamping	103.0	99.0	83.6	84.7	92.1	91.9
	Laterale drainage (drainage naar opp. water)	174.0	614.0	184.0	486.0	218.0	560.0
	Buisdrainage	63.5	94.2	0.00	131.0	0.00	164.4
	Wegzijging	0.00	199.3	3.62	141.2	23.78	178.82
	<i>Som</i>	756.68	1455.99	559.54	1199.05	683.93	1409.15
<i>Bergingsverandering</i>		33.71	23.69	-33.24	-25.8	16.17	11.05

Gebied Stegeren verkenning regionale waterbalans

Tabel VIII-4: Landgebruik in Stegeren volgens BRP2016 (Heinen et al., n.d.).

Landgebruik	Ha	Percentage
Bouwland	119.32	40.9%
Grasland	196.04	67.1%
Overig	0.39	0.1%
Totaal	292.0	100.0%



Figuur VIII-1: Stroomgebied Stegeren zoals gebruikt voor de berekening van de regionale waterbalans.

Tabel VII-5: Gebiedswaterbalans berekend over mm/ hele stroomgebied (196.04 ha) voor Stegeren, waarden zijn gebaseerd op extrapolatie van de SWAP simulatie bij Stegeren

		Regelbare drainage zonder subirrigatie	Regelbare drainage met subirrigatie		
		1.28%	1.28%	20%	40%
In	Neerslag	809.3	809.3	809.3	809.3
	Oppervlakkige aanvoer	0.00	0.00	0.00	0.00
	Subirrigatie	0.00	9.3 mm / 18,200 m3	145.6 mm/ 285,376 m3	291.1 mm/ 570,752 m3
	Infiltratie buisdrainage	0.00	0.00	0.00	0.00
	Kwel	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>Som</i>	<i>809.3</i>	<i>818.6</i>	<i>954.9</i>	<i>1100.44</i>
Uit	Interceptie	49.66	49.7	50.1	50.5
	Oppervlakkige afvoer	0.00	0.0	0.0	0.0
	Transpiratie	396.5	396.7	400.2	403.9
	Bodemverdamping	67.3	67.3	67.7	68.2
	Laterale drainage (drainage naar het opp. water)	240.0	241.4	262.0	284.0
	Buisdrainage	33.9	34.2	38.2	42.4
	Wegzijging	15.5	22.8	130.4	245.2
	<i>Som</i>	<i>802.86</i>	<i>812.2</i>	<i>948.5</i>	<i>1094.2</i>
	<i>Bergingsverandering</i>	<i>6.11</i>	<i>6.44</i>	<i>6.36</i>	<i>6.28</i>