

Ondergrondse druppelirrigatie

Modelonderzoek effect installatiediepte op een zandgrond

Marius Heinen, Wageningen Environmental Research



FOTO: PAUL VAN ZOGGEL



Inhoud

1	Inleiding	3
2	Methode	4
2.1	<i>Hydrus</i>	4
2.2	<i>Bodem, meteo en gewas</i>	4
2.3	<i>Simulatiedomein</i>	4
2.4	<i>Schematisatie en hydrologische randvoorwaarden druppelaar</i>	5
2.5	<i>Onderrand- en zijrandvoorwaarde</i>	6
3	Resultaat	7
3.1	<i>Waterbalans</i>	7
3.2	<i>Watergehalte (r, z) profielen</i>	7
3.3	<i>Grondwaterspiegeldiepte</i>	8
3.4	<i>Watergehaltedynamiek op sensorlocatie</i>	10
4	Discussie	12
	Literatuur	14
	Bijlage A Tijdstippen irrigatie	15
	Bijlage B Drukhoogtedynamiek op sensorlocaties	16
	Bijlage C Resultaat simulaties met SWAP-WOFOST	17

Colofon

Deze studie is uitgevoerd in het onderzoeksprogramma KLIMAP (www.klimap.nl). Klimaatverandering zorgt op de Nederlandse zandgronden voor verandering in het bodem- en watersysteem en daarmee ook in de mogelijkheden voor landbouw en natuur in deze gebieden. 24 Partijen, waaronder regionale overheden, kennisinstellingen en bedrijven, hebben de handen ineen geslagen. Zij onderzoeken samen hoe het water- en bodemsysteem op deze zandgronden klimaatadaptief kan worden ingericht voor landbouw en natuur. In het project KLIMAP ('Klimaatadaptatie in de Praktijk'), dat mede gefinancierd wordt door de Topsectoren Agri & Food en Water & Maritiem, gaan zij aan de slag met handvatten die nodig zijn voor het klimaatbestendig inrichten van de Nederlandse zandgebieden.

De hoge zandgronden zijn gevoelig voor klimaatverandering, doordat het water snel wegzakt of bij hevige regenval afstroomt, is water in droge jaren schaars. Agrariërs zijn daardoor veelal aangewezen op beregening met grondwater. De vraag is hoe we dit schaarse grondwater optimaal kunnen benutten. Eén van de onderzoeksvragen was of ondergrondse druppelirrigatie kan worden toegepast. Dit rapport beschrijft een modelstudie omtrent dit onderwerp.

Het rapport is gereviewd door Ruud Bartholomeus (KWR, Chief Science Officer en Principal Scientist van team Ecohydrologie).

1 Inleiding

Als gevolg van klimaatverandering ervaren we meer drogere periodes in de zomer tijdens het groeiseizoen. Dat betekent dat er een toename zal plaatsvinden van beregening of irrigatie om het neerslagtekort (deels) op te heffen. Bij beregenen treden verliezen op als gevolg van verdampen tijdens het beregenen, het verwaaien naar elders, en interceptie door het gewas. Druppelirrigatie kan gezien worden als een efficiëntere manier om het water toe te dienen. Bij oppervlakkige toediening (beregemen, bovengrondse druppelirrigatie) blijft de bodem aan maaiveld nat, waardoor bodemverdamping een deel van het water verbruikt. Ondergrondse druppelirrigatie kan dit effect opheffen. Afgezien van praktische en economische aspecten over de haalbaarheid van ondergrondse druppelirrigatie is het gewenst om na te gaan of dit een efficiëntere manier van watergeven is, of dat het water dat op (grotere) diepte wordt toegediend alsnog niet beschikbaar is voor opname door het gewas.

Het doel van dit onderzoek was om met behulp van een driedimensionaal simulatiemodel na te gaan of het toegediende water op een zandgrond beschikbaar blijft in de wortelzone voor gewasopname of dat een deel naar de diepere ondergrond stroomt en eventueel terecht komt in het grondwater.

2 Methode

2.1 Hydrus

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van Hydrus_3d (versie 3.04.0140; gedateerd 06-07-2021; Šimůnek et al., 2020; Šejna et al., 2020). Hydrus kent de optie van ondergrondse druppelirrigatie. Echter, het is gebleken dat deze optie niet werkt voor feitelijke driedimensionale configuraties (Šimůnek et al., 2020, pagina 33; Šejna et al., 2020, pagina 202). Hierdoor was het bijvoorbeeld niet mogelijk om ondergrondse druppelirrigatie in een aardappelrug te beschouwen. De beste beschouwing voor ondergrondse druppelirrigatie kan dan uitgevoerd worden door naar een enkelvoudige druppelaar te kijken en dan in een radiaal-symmetrische configuratie de stroming te beschouwen: het driedimensionale proces van waterbeweging rondom een druppelpunt (in (x, y, z)) kan dan in een tweedimensionale (r, z) systeem beschouwd worden (zie verder paragraaf 2.3).

2.2 Bodem, meteo en gewas

In dit voorbeeld beschouwen we een zwaklemige zandgrond (Hn21), hier met zwaklemig, zeer fijn tot matig fijn zand in de bovengrond (0-30 cm) en het bovenste deel van de ondergrond (30-60 cm) (Staringreeks bouwstenen B02 en O02; Heinen et al., 2020), en de diepere laag een leemarme, zeer fijn tot matig fijn zand ondergrond (Staringreeks bouwstenen O01). Dit profiel hoort bij BOFEK eenheid 3015 (Heinen et al., 2021; 2022), het meest voorkomende zandprofiel in Nederland.

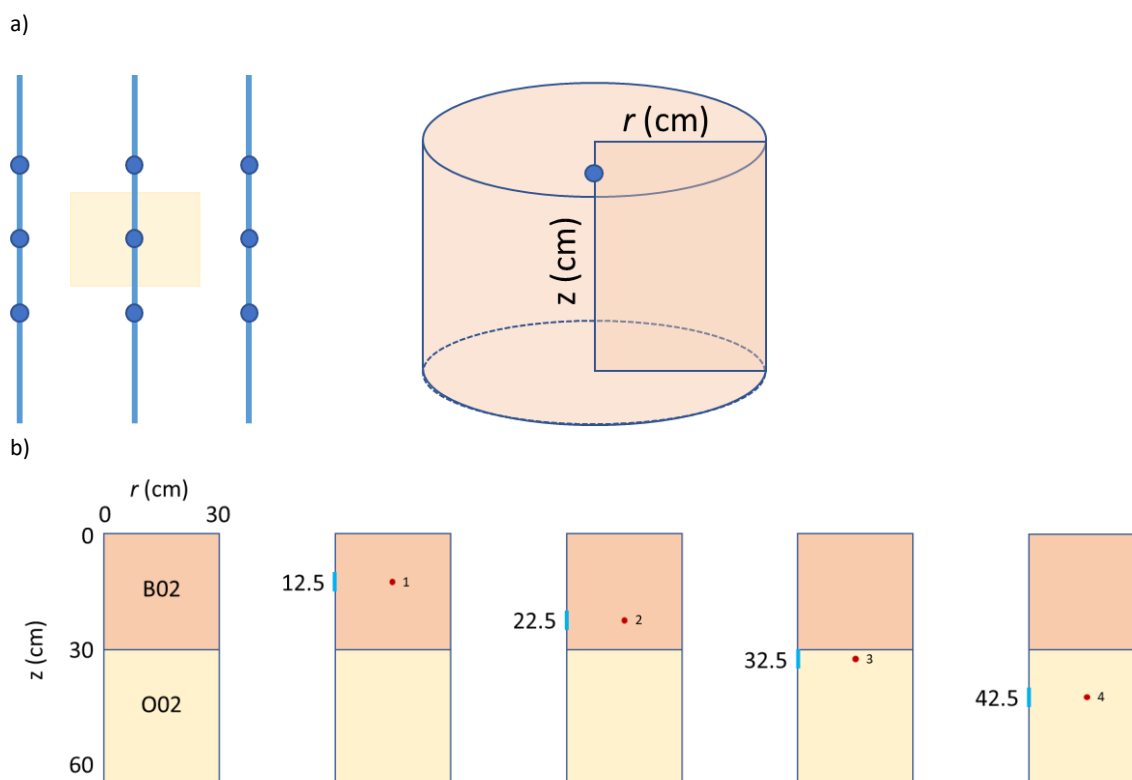
Met SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017; swap.wur.nl) is een voorberekening gemaakt met gewas mais (zaaien: 15 april; opkomst 25 april en oogst 15 oktober) en meteorologische gegevens van KNMI-station De Bilt. Voor het jaar 2018 zijn de neerslag, en door SWAP berekende potentiële bodemverdamping en potentiële gewasverdamping gebruikt als invoer voor Hydrus (Hydrus kent zelf geen gedetailleerde gewasgroeimodule). In Hydrus is de wortelzone vastgelegd op 0-30 cm met een lineair afnemende relatieve wortelverdeling. De transpiratiereductie is berekend volgens het macroscopische concept van Feddes (zie Kroes et al., 2017). Hierbij zijn de volgende parameters gebruikt: $h_1 = -10$ cm, $h_2 = -25$ cm, $h_3 = -320$ cm, $h_3 = -600$ cm, $h_4 = -16000$ cm, $Thigh = 0.5$ cm d^{-1} en $Tlow = 0.1$ cm d^{-1} .

2.3 Simulatiedomein

Zoals hierboven aangegeven zijn simulaties uitgevoerd onder radiaal-symmetrische condities. De werkelijke configuratie van de druppelleidingen en druppelaars is meestal een rechthoekig grid. Elke druppelaar heeft dan betrekking op een bodemoppervlak gelijk aan afstand tussen de druppelleidingen x afstand tussen de druppelaars in de leiding. Een voorbeeld van een dergelijke maatvoering is 75 cm x 40 cm = 3000 cm². Wanneer we dit oppervlak toekennen aan een radiaal-symmetrische bodemcilinder dan komt dat neer op een bodemcilinder met een staal van ongeveer 30 cm (Figuur 1)¹. Radiaal-symmetrisch geeft aan dat er geen gradiënten en dus geen stroming in de tangentiële richting optreedt. Daarmee kan dit systeem uiteindelijk met een tweedimensionale (r, z) configuratie gesimuleerd worden (Figuur 1). We veronderstellen dat rondom elke druppelaar de situatie hetzelfde is, waardoor we het proces en de effecten kunnen bestuderen aan de hand van het simuleren van één druppelaar.

Naast een simulatie zonder druppelirrigatie zijn in totaal zijn vier installatiedieptes van de druppelaar beschouwd: op 12.5 , 22.5 , 32.5 en 42.5 cm. De druppelaar is beschouwd als een kleine lijnbron op $r = 0$ cm (lengte 5 cm). Op $r = 15$ cm naast de druppelaar is in het model een tensiometer gesitueerd welke wordt gebruikt om de startmomenten van de druppelaar te bepalen. De vier situaties worden verder aangeduid als casus 1-4.

¹ Dit geldt uiteraard onder de voorwaarde dat er geen interactie is met de plantrijen; we veronderstellen dat de beworteling overal in de r - of (x,y) -richting hetzelfde is.



Figuur 1. a) Schematische weergave van vertaling van een rechthoekige configuratie rondom een druppelaar naar een radiaal-symmetrische configuratie, en b) schematische weergave van de afmetingen en ligging van de vier druppelaars (lichtblauwe balk) met bijbehorende sensorposities (rode stip).

2.4 Schematisatie en hydrologische randvoorwaarden druppelaar

In Hydrus is een ondergrondse druppelaar aan te sturen via een sensor: bij het overschrijden van een bepaalde drukhoogte start de irrigatie. In Tabel 1 zijn enkele karakteristieke kengetallen die hiervoor nodig zijn gegeven. De laatste kolom in Tabel 1 geeft het feitelijke aantal gerealiseerde irrigaties. Per casus is de sensor geplaatst op dezelfde diepte als de druppelaar en op $r = 15$ cm (halverwege de straal van de bodemcilinder). Normaalgesproken heerst in de druppelleiding een druk van 1000 cm (of iets meer), maar simulaties met deze waarde voor h -druppelaar waren niet mogelijk². Omdat de druppelaar nu iets is uitgerekt tot een lijnbron is verondersteld dat de druk lager ingesteld moet worden. De uiteindelijke waterflux die Hydrus vanuit de druppelaar naar de bodem hanteert is een functie van de druk in de druppelaar en de drukhoogte in de bodem ter hoogte van de druppelaar. Via *trial-and-error* zijn handmatig de parameterinstellingen voor h -druppelaar en h -trigger (de drukhoogte gemeten door de sensor waarbij irrigatie gestart moet worden) ingesteld zodanig dat de gewenste irrigatie gift (ca 120 mm verspreid over 6 vergelijkbare momenten) voor alle casussen gerealiseerd werd (Tabel 1). Voor de vier basissituaties is de duur van de irrigatie vastgelegd op 0.25 d. De situatie met druppelaar op 22.5 cm diepte is nogmaals doorgerekend waarbij vaker, maar per keer minder water werd gegeven. Dit scenario was bedoeld om na te gaan of het efficiënter is om vaker kleine beetjes te geven dan af en toe een grote hoeveelheid. Deze casus is aangeduid met 2_HF (HF = hoge frequentie). Naast deze vijf druppelirrigatie simulaties zijn ook simulaties uitgevoerd zonder irrigatie en met irrigatie als berekening (uniform over gehele bodemoppervlakte³).

² Dit is niet nader uitgezocht.

³ Hiervoor werd op de dagen 180, 187, 196, 206, 214, en 233 (vergelijkbaar met de momenten waarop meestal druppelirrigatie werd gesimuleerd) de neerslag aangevuld met 21 mm water per dag.

Tabel 1. Informatie over de diepte van de ondergrondse druppelirrigatie, de bijbehorende sensordieptes, en enkele invoergegevens voor aansturing automatische druppelirrigatie in Hydrus, en het aantal resulterende druppelirrigatie events.

Casus#	Diepte (cm)	Sensor (r, z) (cm, cm)	h Trigger (cm)	h Druppelaar (cm)	Duur (d)	Aantal irrigaties
1	10-15	(15,13)	-250	20	0.25	5
2	20-25	(16,23)	-130	50	0.25	6
3	30-35	(16,33)	-100	70	0.25	6
4	40-45	(15,42)	-87	75	0.25	6
2_HF	20-25	(16,23)	-115	50	0.04	37

#: voor alle druppelirrigatie scenario's geldt dat de instellingen "optimum flux" en "exponent" aan elkaar gelijk waren: $8 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$ en 0.5.

2.5 Onderrand- en zijrandvoorwaarde

In dit onderzoek zijn alle zijranden, uitgezonderd de plek waar druppelirrigatie plaatsvindt, beschouwd als ondoorlatende randen: er is sprake van een geïsoleerde bodemkolom in de r - of (x, y) -richting. Voor de onderrand is gekozen om een $q(h)$ randvoorwaarde te kiezen. Hierbij vindt afvoer van water plaats op basis van de afstand van het freatisch vlak tot aan de onderzijde van het gesimuleerd profiel. De totale profieldiepte was 300 cm. De twee benodigde parameters die de $q(h)$ relatie beschrijven zijn geschat uit gegevens gepresenteerd door Hopmans & Stricker (1989): $A = -0.5 \text{ cm d}^{-1}$ en $B = -0.035 \text{ cm}^{-1}$.

3 Resultaat

3.1 Waterbalans

Voor de zes uitgevoerde simulaties is de waterbalans voor het groeiseizoen (25-04-2018 - 15-10-2018) gegeven in Tabel 2, uitgesplitst naar input (neerslag, irrigatie) en output (bodemverdamping, gewasverdamping, afvoer aan onderzijde). De gerealiseerde aanvoer via druppelirrigatie was in alle gevallen vrijwel hetzelfde (122-128 mm; Tabel 2), zodat de totale aanvoer (neerslag + irrigatie) in de geïrrigeerde situaties vrijwel hetzelfde was. Ondergrondse druppelirrigatie had geen effect op de actuele bodemverdamping: deze was in alle gevallen, inclusief de niet-geïrrigeerde situatie, 206-208 mm. Er is wel enige reductie in bodemverdamping opgetreden (potentiële, opgelegde bodemverdamping was 229 mm), maar blijkbaar is de reductie in bodemverdamping in alle gevallen hetzelfde geweest.

Ondergrondse druppelirrigatie had wel invloed op de gerealiseerde wateropname door het gewas: deze nam toe van 233 mm (niet geïrrigeerd) tot maximaal 284 mm in de situatie met de meest ondiepe druppelaar. Deze maximale toename van 61 mm was geringer dan de irrigatiegift (124 mm). Dat betekent dat de overige 63 mm niet ten goede is gekomen aan het gewas. Voor de casussen 1-4 neemt het percentage van de irrigatie dat ten goede komt aan transpiratie af met, respectievelijk, 49%, 34%, 25%, 17% (efficiëntie = $100\% \cdot (\text{Tact} - \text{Tact}_{\text{ref}}) / \text{irrigatie}$). Er was een geringe toename van de wegzijging aan de onderzijde, en verder een toename in de berging in het bodemprofiel.

De casus waarbij op 22.5 cm diepte vaker kleine beetjes water werd gegeven leidde tot een iets geringere Tact dan in geval er minder vaak werd geïrrigeerd.

De situatie met beregenen van bovenaf leidde tot de grootste actuele transpiratie en daarmee de grootste efficiëntie (60%).

Tabel 2. Waterbalanstermen (mm) voor de periode 25-04-2018 tot en met 15-10-2018 voor de referentiesituatie (geen ondergrondse druppelirrigatie) en de vier casussen en casus 2 met hoogfrequente irrigatiegiften.

Casus	In Neerslag [#]	Irrigatie	Uit Tact [§]	Eact [@]	Onderrand	In - Uit	Efficiëntie (%)
Geen	224	0	223	208	28	-235	
1	224	124	284	207	30	-173	49
2	224	122	265	208	32	-158	34
3	224	125	255	208	34	-148	25
4	224	128	245	208	34	-135	17
2_HF	224	123	258	208	31	-150	28
Beregenen	224	126 [*]	298	206	27	-181	60

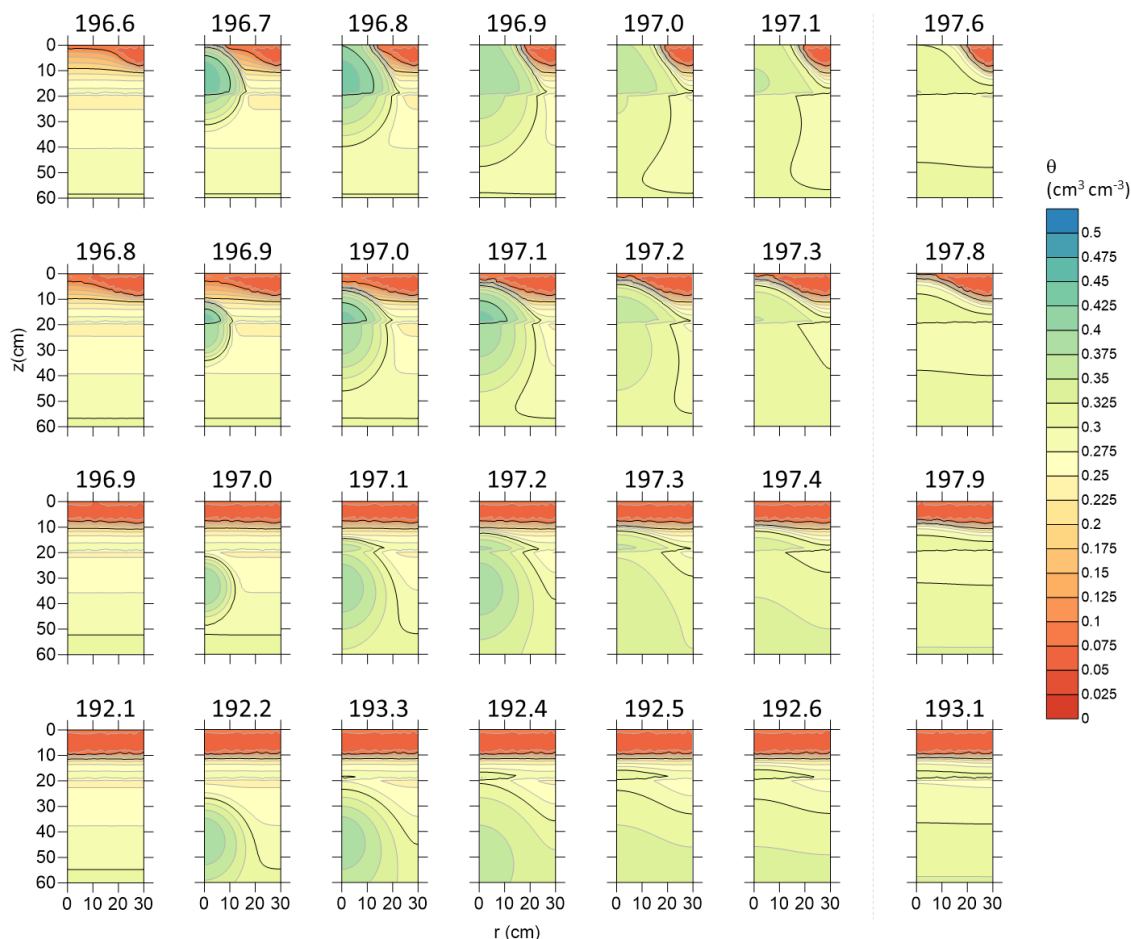
[#]: Infiltratie als netto neerslag = bruto neerslag minus oppervlakkige afvoer, de laatste was nihil; [§]: Tpot = 314 mm; [@]: Epot = 236 mm; ^{*}: als additionele neerslag ingevoerd en Hydrus houdt geen rekening met gewasinterceptie.

3.2 Watergehalte (r, z) profielen

In Figuur 2 is het verloop van de (r, z)-verdeling van het watergehalte rondom een druppelbeurt getoond. Per casus (1-4) is eerst de situatie vlak voor de start van irrigatie gegeven, en vervolgens is per 0.1 d de situatie getoond; het laatste panel per casus geeft de toestand 1 d na start irrigatie. Steeds is mooi te zien hoe het watergehalte vooral lokaal rondom het druppelpunt sterk toeneemt, maar ook dat al na 1 dag deze lokale toename voor een groot deel weer is vereffend.

Het betreft in de meeste gevallen de 3e druppelbeurt (casus 4: 2e druppelbeurt), die ongeveer steeds op hetzelfde moment tijdens het groeiseizoen heeft plaatsgevonden: 15 juli 2018 (DOY = 196; casus 1-3) en 11 juli 2018 (DOY 192; casus 4). De manier waarop ondergrondse druppelirrigatie in Hydrus wordt aangestuurd leidt tot willekeurige startmomenten. Dat maakt een gedetailleerde vergelijking (ook in termen van waterbalans) niet mogelijk. Ter informatie: alle tijdstippen van irrigatie zijn gegeven in Bijlage A.

Opvallend zijn de droge bovenlagen: voor casus 1 en 2 zien we die vooral in de rechter bovenhoek ($(r, z) = (30, 0)$) en voor de casussen met dieper gelegen druppelaars is de gehele bovenlaag droog. Dat beperkt de bodemverdamping, hetgeen gunstig is, maar wanneer deze laag lang droog blijft beperkt dat de wateropname door de wortels die zich daar bevinden.



Figuur 2. Ruimtelijke verdeling van het gesimuleerde watergehalte rondom een druppelirrigatie-event voor casussen 1-4 (rijen van boven naar beneden). Van links naar rechts geeft het eerste diagram de toestand vlak voor start irrigatie, daarna volgen 5 opeenvolgende situaties elk 0.1 d later, en het laatste diagram geeft de situatie 1 dag na start irrigatie. De waarden boven elk diagram geeft de tijd in dagen sinds begin 2018.

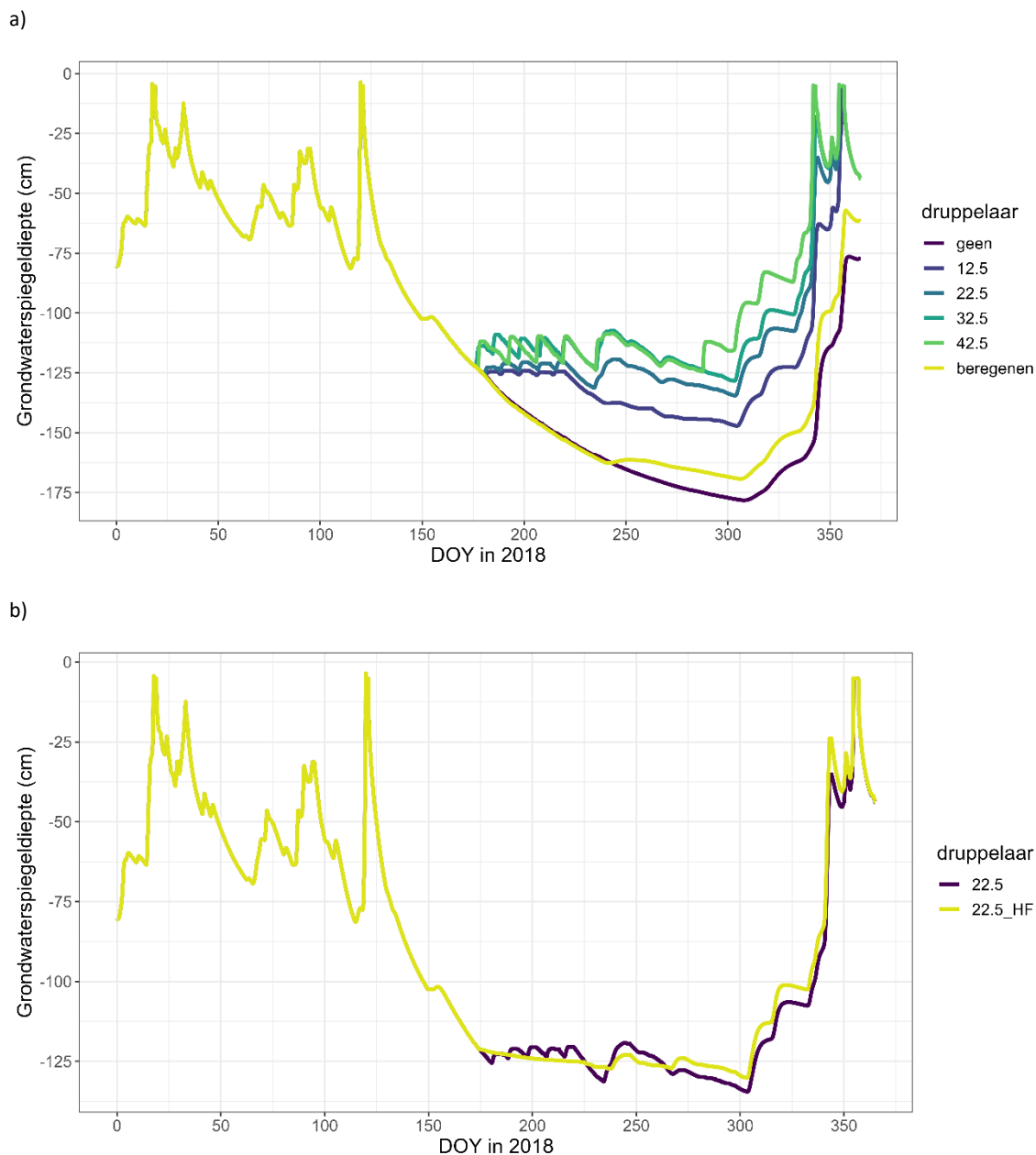
3.3 Grondwaterspiegeldiepte

Zoals hierboven al geconcludeerd komt niet al het geïrrigeerde water ten goede aan gewasverdamping. In de watergehalteprofielen valt op te maken dat een deel van het water uitzakt naar beneden. Dit blijkt effect te hebben op de gesimuleerde grondwaterstand (Figuur 3). Hiervoor is de gesimuleerde drukhoogte op 300 cm vertaald naar een grondwaterspiegeldiepte in de veronderstelling van hydrostatisch evenwicht in de verzadigde zone.

Tot aan het moment van de eerste irrigatie is het gesimuleerde verloop van de grondwaterspiegeldiepte uiteraard identiek voor de referentie en geïrrigeerde casussen. Vanaf dag 177, wanneer de eerste irrigaties zijn gesimuleerd, zien we dat de grondwaterspiegeldiepte van de referentie (niet-geïrrigeerde) situatie blijft toenemen. Voor de ondergronds geïrrigeerde situaties blijft deze dan op een relatief constant niveau en zelfs na irrigaties neemt deze iets af. Een deel van het geïrrigeerde water zorgt dus voor een zodanige vernatting van de zone tussen druppelaar en grondwater dat de grondwaterspiegeldiepte afneemt. Het geïrrigeerde water dat niet direct ten goede is gekomen aan het gewas is daarmee niet verloren voor het grondwatersysteem.

De casus 2_HF leidt tot minder dynamiek in de grondwaterspiegeldiepte, maar gemiddeld is het niveau vergelijkbaar met casus 2.

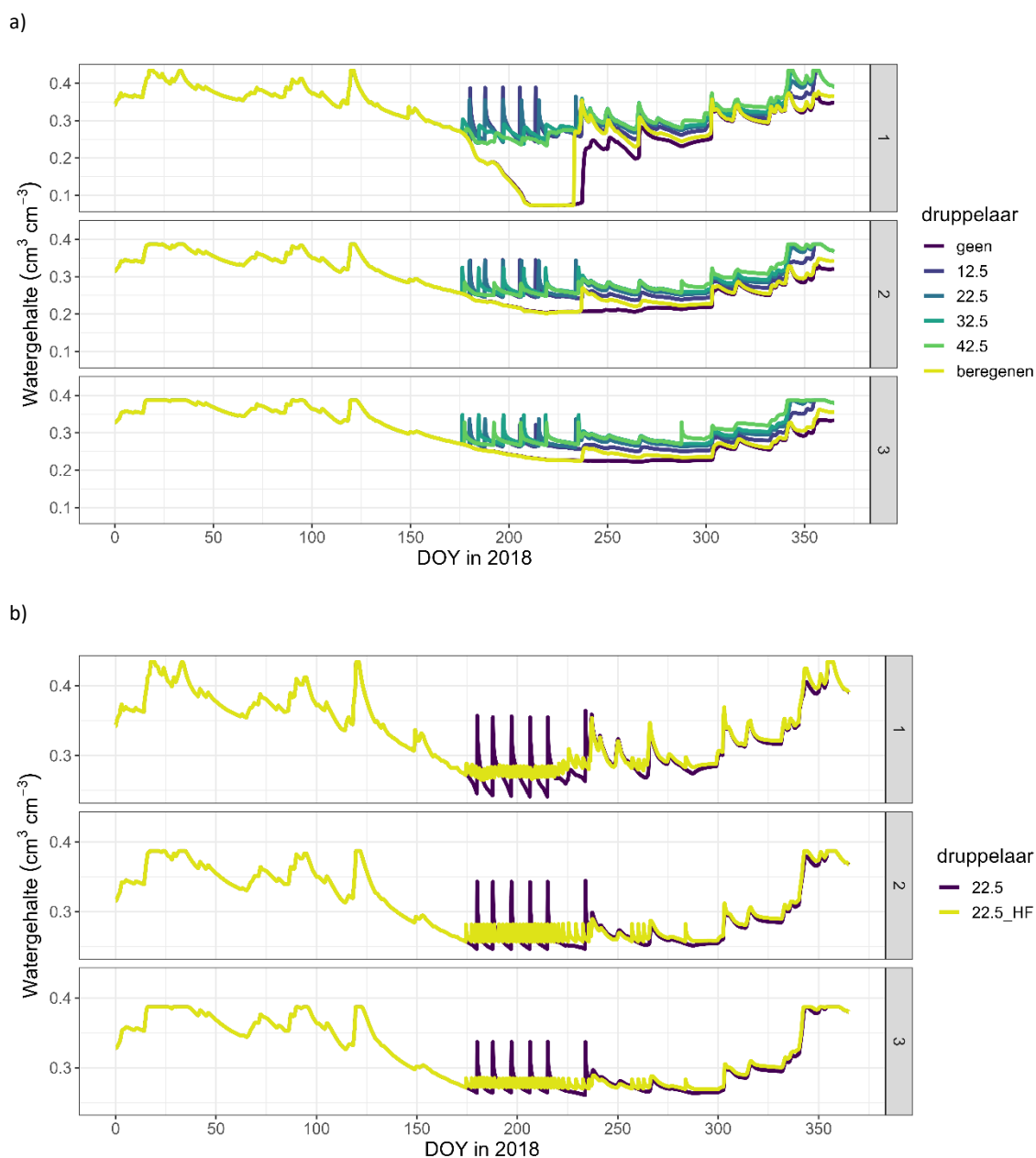
Ook in geval van beregenen van bovenaf zien we een geringe afvlakking van de daling in grondwaterspiegeldiepte na dag 233 waarop de laatste berekening heeft plaatsgevonden. Blijkbaar is de bodem bovenin zodanig nat dat de daaropvolgende neerslagmomenten leiden tot een reactie in de grondwaterspiegeldiepte.



Figuur 3. Gesimuleerd verloop van de grondwaterspiegeldiepte: a) voor de referentiesituatie en de vier casussen van ondergrondse druppelirrigatie, en b) voor casus 2 en 2_HF.

3.4 Watergehaltedynamiek op sensorlocatie

Hierboven zagen dat een deel van het toegediende irrigatiewater leidt tot minder diepe grondwaterspiegeldieptes. Het overige deel zorgt voor dynamiek in de bovengrond. In Figuur 4 zijn tijdsverlopen voor de bovenste drie sensorlocaties gegeven. Op sensorlocatie 1, midden in de wortelzone, zien we in de niet-geïrrigeerde situatie dat het watergehalte blijft dalen in de zomer. Echter, wanneer druppelirrigatie wordt toegepast dan geldt dat het watergehalte in die periode hoger blijft, ook voor de situaties waarbij irrigatie op grotere diepte plaatsvindt. De grootste dynamiek vindt plaats op de diepte waar het water wordt toegediend, en neemt de dynamiek af bij toenemende afstand tot de druppelaar. Uiteraard is de dynamiek voor casus 2_HF veel geringer dan voor casus 2 (Figuur 4b). De bijbehorende figuren voor de drukhoogte op de sensorlocaties is te vinden in Bijlage B.



Figuur 4. Gesimuleerd verloop van de watergehalten op dieptes 12.5 (1), 22.5 (2) en 32.5 (3): a) voor de referentiesituatie en de vier casussen van ondergrondse druppelirrigatie, en b) voor casus 2 en 2_HF.

Het valt op dat voor de situatie met beregenen van bovenaf er geen reacties op de eerst vijf beregeningen te zien is op diepte 12.5 cm (Figuur 4a,1). Dat zou betekenen dat al het water in de bovenste paar cm wordt geborgen en er geen transport naar beneden plaatsvindt; dicht aan maaiveld zien we wel reacties van het watergehalte op elke beregening (niet getoond). Dit zien we ook bij een SWAP-WOFOST simulatie: er ontstaat een hele droge zone op 10-20 cm diepte die niet wordt opgevuld door de beregening; dat zou dus geen goede plek zijn om een sensor te installeren voor aansturing of controle op beregening. De laatste beregening leidt wel tot een verhoging van het watergehalte op diepte 12.5 cm, en de dynamiek daarna is het gevolg van de reactie op de natuurlijke neerslag.

4 Discussie

Aan de hand van eerste, verkennende modelsimulaties is nagegaan of het toegediende water via ondergrondse druppelirrigatie op een zandgrond beschikbaar blijft in de wortelzone voor gewasopname of dat een deel naar de diepere ondergrond stroomt en eventueel terecht komt in het grondwater. Uit de resultaten is gebleken dat het toegediende water voor een deel beschikbaar is voor wateropname door de plantenwortels, maar dat het overige deel wegzakt tot beneden de wortelzone en leidt tot aanvulling van het grondwater. Hoe ondieper de ligging van de ondergronds druppelaar des te efficiënter is de irrigatie voor wateropname.

De resultaten zijn verkregen door radiaal-symmetrische 2D/3D simulaties uit te voeren met Hydrus. Hiermee kan de ruimtelijke verspreiding rondom een druppelpunt worden beschouwd. Zoiets kan niet met 1D simulatiemodellen, zoals SWAP-WOFOST, omdat dan die ruimtelijke spreiding in horizontale richting niet meegenomen kan worden. Met SWAP-WOFOST kun je wel wateraanvoer meenemen in de simulaties, maar dit betekent dat je dan de hele laag in een keer nat maakt. Ter illustratie zijn SWAP-WOFOST simulaties voor dergelijke vergelijkbare situaties gepresenteerd in Bijlage C.

Volgens de simulatieresultaten met Hydrus had de diepte van ondergrondse druppelirrigatie geen invloed op de reductie in bodemverdamping. Dat zou kunnen betekenen dat een simulatie waarbij druppelirrigatie net onder of op maaiveld eveneens geen invloed heeft op de bodemverdamping. In dat geval mag verwacht worden dat druppelirrigatie net zo goed aan maaiveld kan plaatsvinden, waarbij de hoogste efficiëntie verwacht mag worden. Echter, dit hangt sterk af van de constatering dat druppelirrigatie geen invloed heeft op de bodemverdamping. In Bijlage C zijn simulatieresultaten getoond waarbij SWAP-WOFOST is gebruikt. In SWAP-WOFOST wordt een andere manier van reductie bodemverdamping gehanteerd dan in Hydrus. De SWAP-WOFOST resultaten laten zien dat de diepte van ondergrondse toediening van water wel een geringe invloed heeft op de bodemverdamping, maar vooral ook dat volgens SWAP-WOFOST in totaal veel minder bodemverdamping optreedt.

Aan het eind van het gesimuleerde jaar was de toestand in de bodem (watergehalte, drukhoogte, grondwaterspiegeldiepte) vrijwel gelijk voor alle beschouwde situaties. Dus, ondanks het feit dat gedurende de zomermaanden de toestand in de gesimuleerde bodemkolom natter was voor de druppelirrigatie situaties en onderling verschillend voor de beschouwde druppelirrigatiedieptes, is dit nauwelijks meer van invloed op de toestand aan het einde van het jaar. Toch zou het beter zijn om dit type studie te herhalen voor meerdere jaren om na te gaan of de aanvulling van het grondwater via ondergrondse druppelirrigatie op de lange termijn steeds weer nivelleert.

Hulshof et al. (2019) rapporteerden een andere wijze van berekenen van de effectiviteit van irrigeren ($100\% \cdot \text{Tact} / (\text{neerslag} + \text{irrigatie})$). Omdat op deze manier geen inzicht wordt verkregen wat de toegevoegde waarde is ten opzichte van een niet-geïrrigeerde situatie (die ontbrak in hun rapportage) zijn de efficiënties dus onderling niet te vergelijken. Wanneer we de huidige resultaten omrekenen naar hun definitie voor watergeefficiëntie dan zijn die qua orde grootte vergelijkbaar. Wel dient opgemerkt te worden dat de "watergeefficiëntie" voor onze referentie dan als beste uit de bus komt (99.5%).

Aanvulling grondwater is ook het principe bij sub-irrigatie via drainagebuizen, maar dan is het toegediende water alleen beschikbaar indien het via capillaire opstijging vanuit het grondwater naar de wortelzone wordt getransporteerd. Via ondergrondse druppelirrigatie wordt het water in eerste instantie in of net onder de wortelzone gegeven waardoor de transportroute van druppelaar naar de plantenwortels toe veel korter is. De Wit et al. (2021) hebben op basis van SWAP-WOFOST simulaties zonder en met subirrigatie via drainagebuizen laten zien dat in een droog jaar (2018) de toename in transpiratie voor drie van de door hen onderzochte situaties zeer gering was en voor een vierde locatie was dit wel substantieel. De efficiënties waren voor de locaties Stegeren, Haaksbergen, America en Lieshout, respectievelijk, 3%, 5%, 9%, en 56%. In veel gevallen is dit dus veel geringer dan de efficiënties die in het huidige onderzoek zijn verkregen voor ondergrondse druppelirrigatie. Wel moet opgemerkt worden dat subirrigatie plaatsvindt via (veelal bestaande) drainagesystemen, die zo naast het afvoeren van overtollig water, ook benut kunnen worden voor het vasthouden en aanvullen van water.

Beregenen aan maaiveld geeft, in deze studie, de hoogste efficiënties. Wel dient hierbij opgemerkt te worden dat is verondersteld dat al het gegeven water ook aan maaiveld infiltreert. Er is dus geen rekening gehouden met de klassieke nadelen die genoemd worden met beregenen van bovenaf, zoals lekkage, verdamping, verwaaiing, gewasinterceptie (van Bakel en Mulder, 2019).

De in dit rapport gerapporteerde modelsimulaties zijn eerste ervaringen met het gebruik van Hydrus voor het onderwerp van ondergrondse druppelirrigatie in een Nederlandse zandbodem. Hoewel efficiënties van watergebruik worden vermeld voor verschillende situaties en deze worden vergeleken met waarden voor subirrigatie mag het niet zo zijn dat deze als definitieve getallen gebruikt worden: het blijven indicatieve waarden. Het onderzoek is niet bedoeld geweest om optimale strategieën af te leiden voor ondergrondse druppelirrigatie. In deze studie was het nodig om handmatig diverse parameterinstellingen zodanig te kiezen dat er realistische irrigatiemomenten werden gebruikt die voor de vier gehanteerde dieptes ook ongeveer dezelfde hoeveelheid water gaven. Ook de keuze op welke afstand van de druppelaar een sensor moet worden geïnstalleerd en bij welke grenswaarde van de sensor meetwaarde irrigatie aangestuurd kan worden vraagt om aanvullend onderzoek. Wanneer als alternatief voor een sensoraansturing gekozen wordt voor een alternatieve aansturing waarbij berekende (gesimuleerde) of verwachte gewasverdamping (bijvoorbeeld op basis van meteorologische gegevens of eventueel simulatiemodellen) wordt aangevuld, dan ook zal beter bekend moeten zijn hoe efficiënt het systeem is; immers, er zal meer aangevoerd moeten worden dan er in werkelijkheid (is) verdampt.

Modelleren is altijd een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In deze studie hebben we een feitelijk 3D systeem benaderd met een radiaal-symmetrisch bodemcilinder. De feitelijke kleine puntbron is benaderd met een kleine lijnbron. En ook de instelling van de (lijn)bronparameters zijn mogelijk niet reëel genoeg voor de werkelijkheid. Gedetailleerde veldstudies, waarbij bijvoorbeeld sensoren op diverse afstanden van de druppelaar worden geïnstalleerd moeten laten zien of de hier gevonden patronen in verdeling van water rondom een druppelpunt daarmee vergelijkbaar zijn (validatie).

Literatuur

- de Wit, J., M. van Huijgevoort, D. van Deijl, G. van den Eertwegh, R. Bartholomeus. 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. KWR 2021.028, KWR, Nieuwegein.
[http://api.kwrwater.nl/uploads/2021/06/KWR-2021.028-Regelbare-drainage-met-subirrigatie-en-slimme-stuwen.-Veldproeven-en-modelanalyses-in-het-zandgebied-van-Nederland-voor-een-meer-robuste-waterhuishouding-op-lokale-en-regionale-schaal-\(OP-1.pdf](http://api.kwrwater.nl/uploads/2021/06/KWR-2021.028-Regelbare-drainage-met-subirrigatie-en-slimme-stuwen.-Veldproeven-en-modelanalyses-in-het-zandgebied-van-Nederland-voor-een-meer-robuste-waterhuishouding-op-lokale-en-regionale-schaal-(OP-1.pdf)
- Heinen, M., G. Bakker, J.H.M. Wösten. 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Update 2018. Report 2987, Wageningen Environmental Research, Wageningen, <https://doi.org/10.18174/512761>
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling, D. Walvoort, 2021. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. WENR rapport 3056, Wageningen Environmental Research.
<https://edepot.wur.nl/541544>
- Heinen, M. H.M. Mulder, G. Bakker, J.H.M. Wösten, F. Brouwer, K. Teuling, D.J.J. Walvoort. 2022. The Dutch soil physical units map: BOFEK. Geoderma 427, 116123, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116123>
- Hopmans, J.W., J.N.M. Stricker. 1989. Stochastic analysis of soil water regime in a watershed. Journal of Hydrology 105: 57-84. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90096-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90096-6)
- Hulshof, M., Gonzalez, B. de L.L., Meijeren, S. van, Velstra, J., Waterloo, M., Wildt, S. de, 2019. Zuinig met zoetwater: Druppel- en subirrigatie. Technische rapportage 2016-2018. Achtergrondinformatie behorende bij hoofdrapport. Acacia Institute, Gouda. http://m.spaarwater.com/content/27227/download/clnt/87226_SW2-03-19-technische_rapportage_zuinig_met_zoetwater_12_3_19.pdf
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. <https://edepot.wur.nl/416321>
- Šejna, M., J. Šimůnek, M. Th. van Genuchten. 2020. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. User Manual, Version 3.03. PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, M. Šejna. 2020. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual, Version 3.03. PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Van Bakel, J. en Mulder, M. 2019. Efficiëntie van berekening. Presentatie Symposium STOWA “Berekening, telt elke druppel?” 9 mei 2019, Amersfoort.
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/AGENDA/Agenda%202019/20190509%20Beregeningsmiddag/20190509%20Presentatie%20Efficientie%20van%20berekening%2C%20Jan%20van%20Bakel.pdf>

Bijlage A Tijdstippen irrigatie

Tijden in dagen sinds 01-01-2018 00:00.

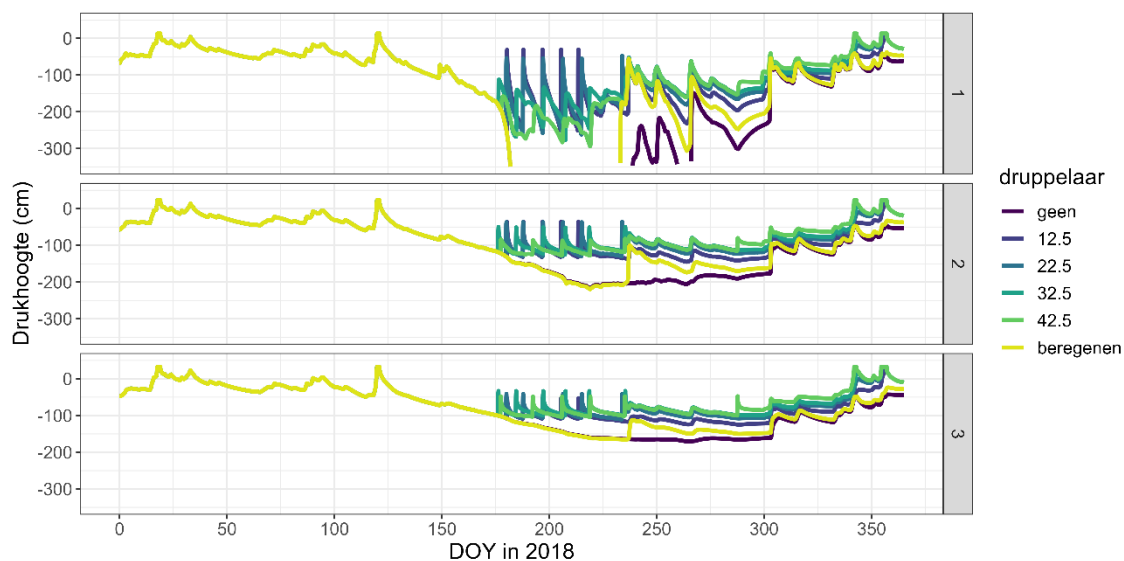
Irrigatiemoment	1	2	3	4
1	180.111	179.804	176.110	177.199
2	187.675	187.600	184.375	192.125
3	196.625	196.875	196.975	205.725
4	205.275	206.150	207.300	218.850
5	213.300	214.900	218.400	234.953
6	n.v.t.	233.675	235.114	287.400

De 37 tijdstippen van irrigatie voor casus 2_HF waren:

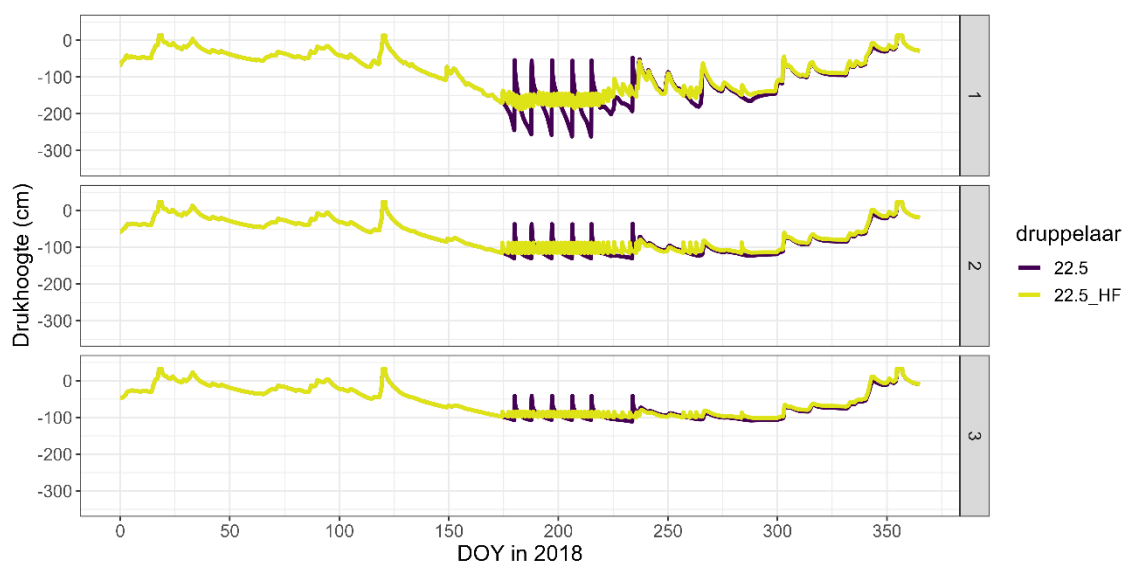
174.333, 177.108, 179.060, 180.612, 181.888, 183.240, 184.864, 186.704, 188.460, 190.756, 192.736, 194.524, 196.092, 197.700, 199.464, 201.156, 202.836, 204.464, 206.056, 207.252, 208.686, 210.276, 211.896, 213.532, 215.052, 216.784, 218.292, 220.413, 222.617, 225.365, 229.105, 232.508, 235.529, 256.944, 260.104, 262.802, 283.604

Bijlage B Drukhoogtedynamiek op sensorlocaties

a)



b)



Gesimuleerd verloop van de drukhoogtes op dieptes 12.5 (1), 22.5 (2) en 32.5 (3): a) voor de referentiesituatie en de vier casussen van ondergrondse druppelirrigatie, en b) voor casus 2 en 2_HF.

Bijlage C Resultaat simulaties met SWAP-WOFOST

Ter illustratie zijn ook 1D SWAP-WOFOST simulaties uitgevoerd met ondergrondse aanvoer van water. Hiervoor is in SWAP een optie toegevoegd waarbij de mogelijkheid aanwezig is om in 1 of meerdere rekenlagen een bronterm in de Richards vergelijking te beschouwen. Deze optie is ingebouwd voor een vergelijkbare studie in het kader van een ESG Investeringsproject getiteld "*Coping with Dutch droughts through smart soil-water management*" (Heinen en Van Dam, 2021. Activity 3b – Example of Subsurface drip irrigation in SWAP. ESG internal report). In SWAP kan dan ondergronds druppelirrigatie beschouwd worden door deze bronterm te gebruiken, waarbij verschillende opties beschikbaar zijn om de start en duur van zo'n event te regelen. In de hier uitgevoerde simulaties zijn de brontermen beschouwd op dezelfde dieptes als beschreven in de hoofdttekst (casussen 1-4). Start van ondergrondse druppelirrigatie vond steeds plaats wanneer de drukhoogte op diepte 12.5 cm lager werd dan -500 cm (aan het begin van de dag werd gecontroleerd of irrigatie moest worden uitgevoerd).

In dit onderzoek zijn twee basis SWAP configuraties beschouwd:

- a) er is een set SWAP invoerbestanden uit Waterwijzer Landbouw opgevraagd behorende bij BOFEK eenheid 3015 en Gt VI, waarbij een geringe kwelflux aan de onderzijde (op 600 cm) en drie drainagemiddelen zijn beschouwd (WWL maatwerk);
- b) de SWAP invoer uit a) is aangepast: bodemkolom 300 cm, $q(h)$ onderrandvoorwaarde net zoals gebruikt bij Hydrus (zie hoofdttekst) en geen overige drainagemiddelen.

In onderstaande tabel zijn de waterbalanstermen voor beide configuratie gegeven waarbij ook de resultaten van de Hydrus simulaties zijn gegeven.

Hierbij vallen diverse zaken of verschillen op:

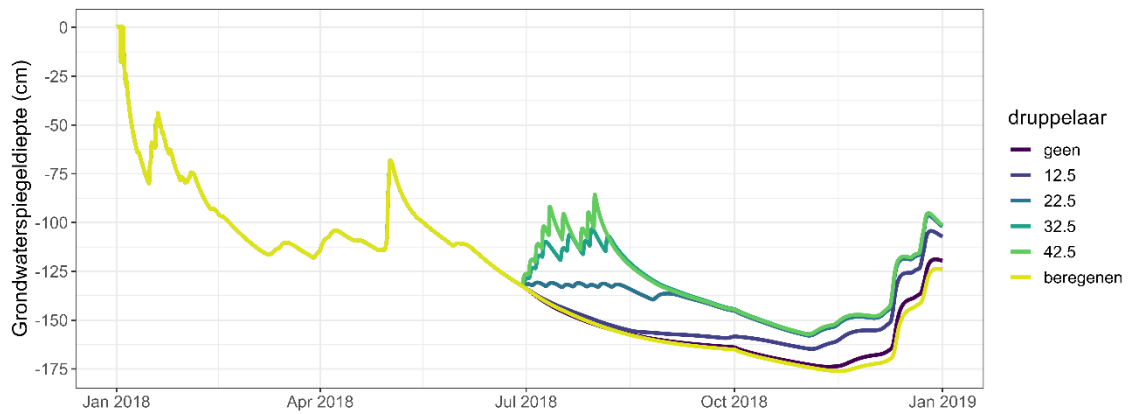
- SWAP kent een lagere netto neerslag, omdat een deel van de bruto neerslag als interceptie verdampt.
- SWAP laat meer irrigatiemomenten zien.
- SWAP simuleert een veel lagere bodemverdamping dan Hydrus: de concepten om reductie in bodemverdamping te simuleren zijn duidelijk sterk verschillend. Ter informatie: in SWAP wordt meestal bodemverdampingreductie volgens het concept Boesten-Stroosnijder beschouwd; indien dit veranderd wordt naar reductie volgens Darcy-fluxen dan treedt in SWAP meer bodemverdamping op (bijv. factor 1.5), maar nog steeds veel minder dan volgens Hydrus.
- SWAP simuleert meer gewastranspiratie dan Hydrus: hoewel in beide gevallen Feddes transpiratie reductie wordt beschouwd, zal door de dynamische gewasgroeimodellering in SWAP de tijdreeks voor potentiële verdamping afwijken van die aan Hydrus is opgegeven, zeker in geval van de situaties met irrigatie. Uiteraard heeft de feitelijke verdeling van water ook invloed op de gesimuleerde wateropname.
- Volgens SWAP verdwijnt er meer water aan de onderzijde van de gesimuleerde bodemkolom.
- Voor SWAP configuratie a) wordt in geval van de referentie en de casussen 1 en 2 netto aanvoer van water via de drainagemiddelen (i.c. drainagemiddel 1) gesimuleerd (subirrigatie).
- Duidelijke verschillen worden waargenomen tussen SWAP configuraties a) en b): bij b) treedt meer uitdroging van het hele bodemprofiel op, minder verliezen aan de onderzijde, iets minder efficiëntie voor irrigatie, en opvallenderwijs meer Tact voor de referentieberekening.
- De efficiëntie ($100\% \cdot (Tact - Tact_{ref}) / irrigatie$) is volgens SWAP hoger dan volgens Hydrus.

De verschillen in gedrag van grondwaterspiegeldiepte en watergehalten op dieptes 12.5, 22.5 en 32.5 zijn in onderstaande twee figuren weergegeven. De figuren spreken voor zich. Wat onder meer opvalt is dat voor de twee diepste irrigatie casussen (3, 4) de SWAP simulaties aangeven dat het grondwaterspiegeldiepte in juli kleiner is dan zoals gesimuleerd met Hydrus. Ook zijn er aan het eind van het jaar soms grote verschillen in de grondwaterspiegeldiepte tussen de SWAP simulaties en de Hydrus simulatie.

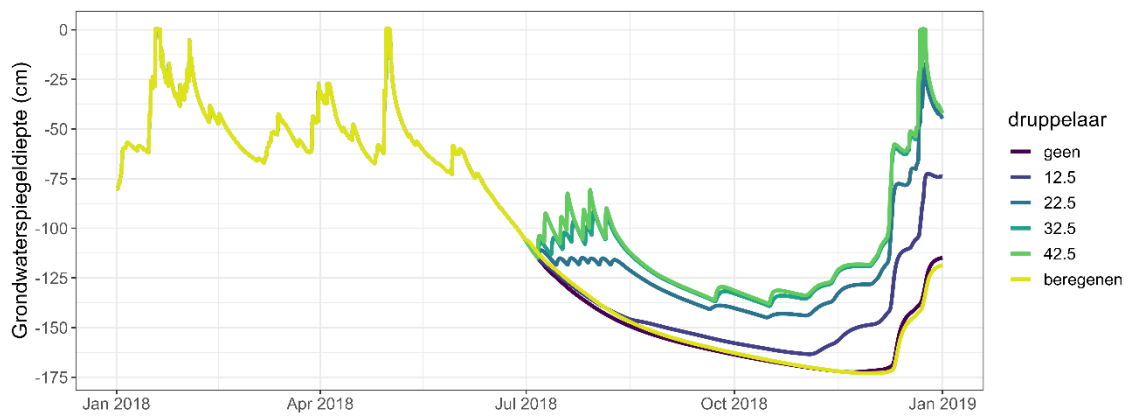
Casus	In Netto neerslag ¹	Irrigatie ²	Uit Tact	Eact	Onderrand	Drainage	In - Uit	Efficiëntie (%)
Configuratie a)								
Geen	217	0	207	90	87	-36	-131	
1	208	180	349	81	87	-30	-99	79
2	211	180	304	84	87	-2	-82	54
3	213	180	284	86	87	15	-79	43
4	213	180	275	87	87	24	-79	38
Beregenen	231	126	317	101	87	-37	-111	87
Configuratie b)								
Geen	196	0	262	87	49	0	-202	
1	182	180	393	74	49	0	-154	73
2	187	180	354	78	52	0	-117	51
3	189	160	336	81	54	0	-122	46
4	189	160	333	81	56	0	-120	44
Beregenen	231	126	367	91	49	0	-150	83
Hydrus								
Geen	224	0	223	208	28	0	-235	
1	224	124	284	207	30	0	-173	49
2	224	122	265	208	32	0	-158	34
3	224	125	255	208	34	0	-148	25
4	224	128	245	208	34	0	-135	17
Beregenen	224	126	298	206	27	0	-181	60

¹: netto neerslag = bruto neerslag - runoff - interceptie; ²: 20 mm per irrigatiebeurt voor de SWAP simulaties

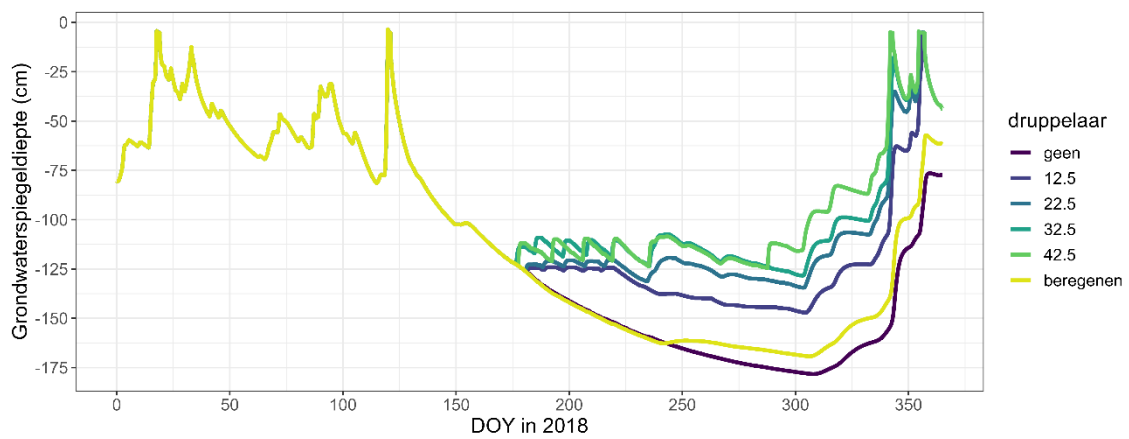
a) SWAP configuratie b)



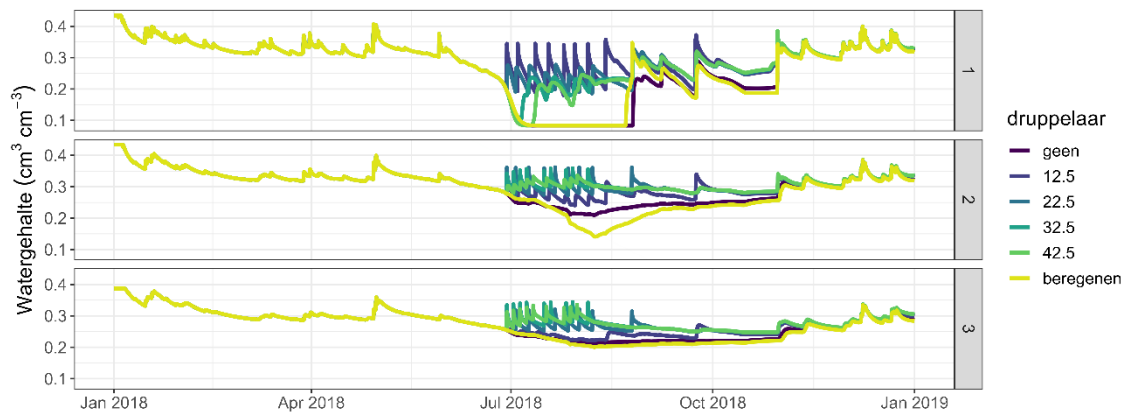
b) SWAP configuratie b)



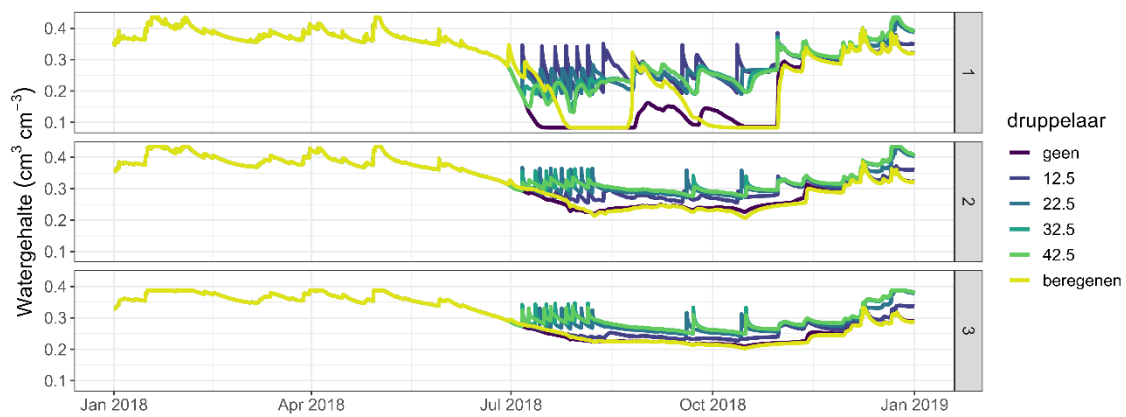
c) Hydrus



a) SWAP configuratie b)



b) SWAP configuratie b)



c) Hydrus

