

KWR 2019.059 | Oktober 2019

Efficiëntie van beregening en subirrigatie uit grondwater

Modelmatige analyses met SWAP en
Hydrus-2D



Efficiëntie van beregening en subirrigatie uit grondwater

Modelmatige analyses met SWAP en Hydrus-2D

KWR 2019.059 | Oktober 2019

Opdrachtnummer

401185

Projectmanager

Arnaut van Loon

Opdrachtgever

Waterschap Limburg, i.s.m.:

- Provincie Limburg
- NMF Limburg
- LLTB
- Programma Lumbricus
Het kennisprogramma Lumbricus (www.programmalumbricus.nl) is een consortium bestaande uit STOWA, Deltares, KnowH2O, KWR Watercycle 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

Kwaliteitsborger

dr.ir. Gijsbert Cirkel

Auteurs

dr.ir. Ruud Bartholomeus, dr.ir. Marjolein van Huijgevoort, dr.ir. Gé van den Eertwegh (KnowH2O), Dion van Deijl MSc. (KnowH2O)

Verzonden naar

Myrjam de Graaf, Waterschap Limburg



Jaar van publicatie

2019

Meer informatie

dr.ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

T 030-6069530

E ruud.bartholomeus@kwrwater.nl

Postbus 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

KWR 2019.059 | Oktober 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, 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.

Samenvatting

Gewasopbrengsten in de landbouw zijn in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de wortelzone. 's Zomers is er door een neerslagtekort vaak een gebrek aan bodemvocht waardoor opbrengsten zonder beregening terug kunnen lopen. Zonder adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte te beperken zullen watertekorten als gevolg van het veranderende klimaat vaker voorkomen.

Waterschap Limburg wil inzicht in de haalbaarheid en efficiëntie van subirrigatie als adaptieve maatregel, waarbij het lokale grondwater op een diepte van bijv. 10 m-mv, gebruikt wordt als bron van water voor agrariërs. Subirrigatie kan dan een alternatief zijn voor beregening. Om inzicht krijgen in het effect van deze vorm van subirrigatie op waterverbruik, bodemvocht en grondwaterstanden is eerder nabij de Mariapeel een veldproef ingericht en gemonitord. In aanvulling op deze veldproef is in deze studie de efficiëntie van subirrigatie met ondiep onttrokken grondwater ten opzichte van haspelberegening modelmatig onderzocht.

Dit rapport beschrijft de bevindingen van modelanalyses met SWAP waarmee de efficiëntie van subirrigatie en haspelberegening is onderzocht voor verschillende gewassen, bodemtypen en hydrologische randvoorwaarden. Met Hydrus-2D is nader inzicht verschaft in de stromingspatronen naar het gewas, ontwateringsmiddelen en de ondergrond bij subirrigatie. De efficiëntie voor zowel subirrigatie als beregening is voor het groeiseizoen uitgedrukt in de vorm van toegenomen transpiratie van het gewas per eenheid van netto aangewende waterhoeveelheid. Opgepompt en aangewend grondwater dat weer naar de ondergrond stroomt wordt daarbij *niet* als verlies beschouwd, uit het oogpunt van de grondwatervoorraad. Extra afvoer naar het oppervlaktewater is wel een verliespost.

Uit de modelanalyses volgt dat als er enige weerstand is tegen wegzijging en de grondwaterstand in de uitgangssituatie niet te diep zit, dat dan de grondwaterstand met subirrigatie gedurende het groeiseizoen dusdanig kan worden verhoogd dat de werkelijke transpiratie (gewasverdamping) nagenoeg gelijk wordt aan de potentiële transpiratie. Droogtestress wordt daarmee opgeheven voor bodems met een goede capillaire nalevering, zoals zwak lemig fijn zand. Voor grof zand wordt droogtestress niet volledig opgeheven. Uit de simulaties volgt verder dat een verschil in grondwaterstand en stijghoogte van zo'n 20 cm al duidt op voldoende weerstand tegen wegzijging. De grondwaterstand in de uitgangssituatie zonder subirrigatie mag gegeven de bovenstaande condities in de zomer best tot 2 m-m.v. dalen; bij diepere grondwaterstanden in de uitgangssituatie zal met subirrigatie de grondwaterstand niet dusdanig kunnen worden verhoogd, dat deze ook leidt tot een betere waterbeschikbaarheid voor het gewas. Met beregening kan droogtestress ook worden opgeheven, maar beregening kan, praktisch gezien, niet ongelimiteerd plaatsvinden. Daardoor is de werkelijke transpiratie bij beregening veelal lager dan bij subirrigatie. Ondanks dat voor subirrigatie gedurende het groeiseizoen *bruto* meer water wordt aangevoerd/aangewend dan voor beregening, is het verschil voor de *netto* wateraanvoer tussen subirrigatie en beregening klein. Bij een te hoge wegzijging kan niet voldoende water aangevoerd worden via subirrigatie om de wegzijging te compenseren. Bij een te grote wegzijging is beregening daarom efficiënter dan subirrigatie.

De combinatie van SWAP met Hydrus-2D is van belang om verschillen in grondwaterstroming binnen een perceel inzichtelijk te maken. De fysieke schematisatie van het rekendomein en de ontwateringsmiddelen (watergang en drainagebuis) in Hydrus-2D maakt het mogelijk grondwaterstroming naar watergangen en het effect van peilvoering expliciet in beeld te brengen. Modeluitkomsten laten zien dat er afvoer van water tijdens subirrigatie kan plaatsvinden naar de kavelsloot, als zomerpeilen in de kavelsloot niet kunnen worden gerealiseerd. Ook de ligging van de eerste drainagebuis ten opzichte van de kavelsloot speelt een rol inzake afvoer van subirrigatie-water naar het oppervlaktewater. Passende stuwpeilen en aanleg van het drainagesysteem zijn belangrijk

hierin. Met Hydrus-2D is ook gekeken naar de tijd die het duurt voor subirrigatie-water om via neerwaartse stroming het grondwatersysteem te bereiken. Als een lokale onttrekkingsput met een filter op 10 m-mv wordt geplaatst, dan duurt het met de proefopzet zoals hier toegepast ongeveer 4 à 5 jaar voordat subirrigatie-water de diepte van het filter bereikt.

Op basis van deze studie zijn aanvullende inzichten verkregen, met name over benodigde stijghoogteverschillen in de uitgangssituatie en te compenseren wegzijging, om de in 2016 vervaardigde kansenskaart voor subirrigatie van Waterschap Limburg (destijds Waterschap Peel en Maasvallei) aan te scherpen en te concretiseren.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Onderzoeksvragen	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Methode	3
2.1	SWAP simulaties	3
2.2	Hydrus	6
3	Resultaten en discussie	9
3.1	SWAP	9
3.2	Hydrus	18
4	Conclusies en aanbevelingen	25
4.1	Antwoorden op onderzoeksvragen	25
4.2	Aanscherpen kansenkaart voor subirrigatie	27
5	Referenties	29
Bijlage I Overzicht variabelen en grafieken		31
	Aardappel	35
	Groente	38
	Mais	41
	Gras	46

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Landbouwopbrengsten zijn in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de wortelzone. 's Zomers is er vaak een gebrek aan bodemvocht waardoor landbouwopbrengsten teruglopen. Gemiddeld gaat het om een jaarlijkse schadepost van €50 miljoen voor het zuidelijk zandgebied in Nederland. Als het waterbeheer niet verandert, zullen watertekorten nog verder toenemen. De droogteschade kan daarmee oplopen tot €140 miljoen per jaar Klijn et al. (2011). Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte te beperken zijn dus van groot economisch belang.

Waterschap Limburg heeft via modelberekeningen op lokale en regionale schaal onderzocht of het haalbaar en effectief is om subirrigatie in het beheergebied te gaan toepassen via bestaande regelbare drainagesystemen. Hierbij zou het lokale ondiepe grondwater op bijv. 10 m-mv een bron van water kunnen zijn voor agrariërs, op te pompen vanuit een eigen put. De door het waterschap in 2016 uitgevoerde modelberekeningen op lokale en regionale schaal laten geen duidelijk beeld zien van de geschiktheid en haalbaarheid van subirrigatie. Om hier meer inzicht in te krijgen, is een analyse uitgevoerd van beschikbare informatie uit karteringen en modelberekeningen bij het toenmalige Waterschap Peel en Maasvallei (WPM), nu Waterschap Limburg (WL), aangevuld met expertkennis (Van den Eertwegh et al. 2016). Vervolgens is om beter inzicht in de geschiktheid en haalbaarheid van subirrigatie te krijgen begin 2017 nabij de Mariapeel ('Hoeve de Hei' melkveebedrijf Nabben te America) een proefperceel ingericht, waar veldmetingen zijn uitgevoerd (Bartholomeus et al. 2018). In deze proef wordt grondwater onttrokken op 8 à 10 m-mv en vervolgens via subirrigatie met behulp van samengestelde, regelbare drainage toegediend.

De veldproef bij Nabben in America in 2017 gaf een eerste indruk van mogelijkheden en effecten van subirrigatie met ondiep onttrokken grondwater. Voor deze locatie zijn verkennende modelanalyses uitgevoerd met SWAP en Hydrus-2D uitgevoerd om inzicht te krijgen in de verschillende componenten van de waterbalans. De efficiëntie van subirrigatie met ondiep onttrokken grondwater ten opzichte van haspelberegening blijft echter nog onderdeel van discussie. Belangrijk daarbij is dat onvoldoende duidelijk is wat de netto onttrokken hoeveelheid grondwater is voor subirrigatie en haspelberegening; een deel van het onttrokken grondwater (gebruikt voor subirrigatie of voor haspelberegening) vloeit immers via wegzijging weer terug naar de ondergrond en wordt niet als verliespost gezien. Extra afvoer van water naar het oppervlaktewater is wel een verliespost.

In de studie beschreven in dit rapport is de efficiëntie van subirrigatie ten opzichte beregening modelmatig onderzocht. Deze efficiëntie drukken we voor het groeiseizoen voor zowel subirrigatie als beregening uit in de vorm van toegenomen transpiratie van het gewas T_a [mm] per eenheid van netto aangewende waterhoeveelheid $Q_{in,netto}$ [mm].

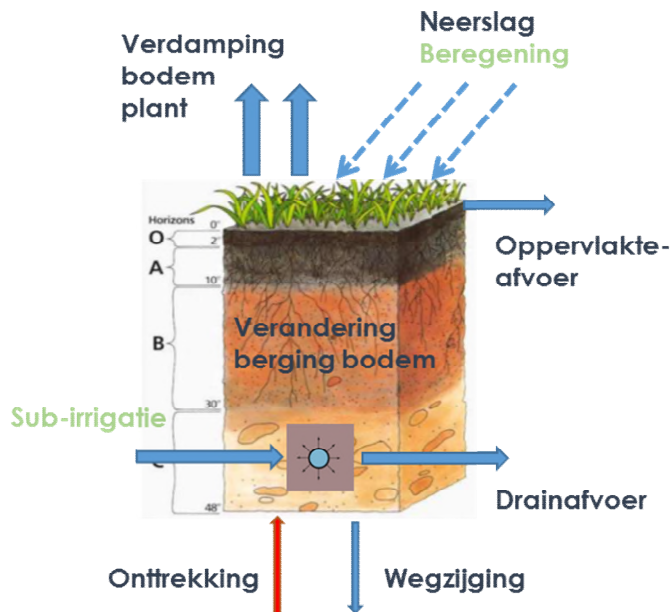
1.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoek beschreven in dit rapport is om met behulp van hydrologische modellering met SWAP (1D, Kroes et al. (2017)) aangevuld met enkele detailanalyses met Hydrus (2D, Šimůnek and Šejna (2018)) inzicht te krijgen in de efficiëntie van subirrigatie ten opzichte van haspelberegening, met het lokale ondiepe grondwater als bron. Hierbij vergelijken we steeds de situatie met beregening en met subirrigatie voor een specifieke bodem en gewas.

De efficiëntie van subirrigatie ten opzichte van beregening met een haspel met lokaal grondwater is kwantitatief gezien onvoldoende duidelijk (Figuur 1). Belangrijkste variabelen hierin zijn de werkelijke

verdamping van het gewas (transpiratie T_a) en het netto watergebruik. Per netto hoeveelheid aangevoerde en aangewende hoeveelheid water is het doel een zo groot mogelijk verschil te maken in T_a dan in een situatie zonder wateraanvoer.

Deze studie richt zich op het gebruik van irrigatie voor het verhogen van de gewasverdamping (transpiratie). We gaan niet in op beregening met als doel zaaisel te laten kiemen, of verdroging van jonge kiemplanten te voorkomen.



Figuur 1: Schematische bodemkolom met drainagebuis en situatie bij subirrigatie; blauwe pijlen geven de componenten van de waterbalans weer; rode pijl geeft de onttrekking weer uit het lokale grondwater.

1.3 Onderzoeksvragen

Met de modellering proberen we de volgende vragen te beantwoorden:

- Onder welke condities en in welke mate leidt subirrigatie tot een verandering van de werkelijke transpiratie t.o.v. die bij beregening?
- Wat is het verschil in beregening en subirrigatie in termen van efficiënt gebruik van aangevoerd/aangewend water?
- Wat is het effect van gewas, bodemtype, bodemopbouw en het regionale grondwatersysteem op de efficiëntie van subirrigatie?
- Welke condities leiden onder welke omstandigheden tot de meest efficiënte toepassing van subirrigatie?
- Zijn de aannames (i.e. modelconcept, 1D) bij het gebruik van SWAP voor deze analyse (voldoende) geldig?
- Wat is de meerwaarde van het doen van 2D-berekeningen in de analyse ten opzichte van 1D SWAP-berekeningen?

1.4 Leeswijzer

De methode is uitgewerkt in Hoofdstuk 2. Hierbij wordt nader ingegaan op de definitie en berekening van de efficiëntie en worden de modelschematisaties beschreven. Hoofdstuk 3 geeft de resultaten, de interpretatie ervan en bijbehorende discussie. Gezien het grote aantal modelruns is gekozen om in de hoofdtekst een selectie van de resultaten te behandelen, gericht op het droge jaar 2003. Andere resultaten zijn opgenomen in de bijlage. Conclusies en aanbevelingen zijn beschreven in hoofdstuk 4.

2 Methode

De efficiëntie van subirrigatie ten opzichte van beregening met een haspel met lokaal grondwater is kwantitatief gezien onvoldoende duidelijk. Belangrijkste variabelen hierbij zijn de werkelijke verdamping van het gewas (transpiratie T_a) en het netto watergebruik. Per m³ netto aangevoerd en aangewend water willen we een zo groot mogelijke toename in transpiratie realiseren ten opzichte van een situatie zonder wateraanvoer. Afvoer van geïrrigeerd water uit een perceel anders dan via transpiratie is ongewenst.

Op basis van modelsimulaties wordt inzicht verschaft in de hydrologische efficiëntie van subirrigatie ten opzichte van beregening. Deze efficiëntie drukken we voor het groeiseizoen voor zowel subirrigatie als beregening uit in de vorm van toegenomen transpiratie van het gewas T_a [mm] per eenheid van netto aangewende waterhoeveelheid $Q_{in,netto}$ [mm]. We hebben hiervoor met SWAP modelsimulaties uitgevoerd voor duizenden combinaties van bodemtype, gewas, hydrologische onderrandvoorwaarde¹ en de aanwezigheid van een drainerende kavelsloot met slootpeil en drainageweerstand. Op basis van de uitkomsten van SWAP zijn voor een selectie van deze combinaties aanvullende simulaties uitgevoerd met Hydrus-2D.

2.1 SWAP simulaties

Het SWAP model, Soil-Water-Atmosphere-Plant (Van Dam et al. 2008, Kroes et al. 2017), simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en, zij het schematisch, de verzadigde zone. SWAP wordt internationaal gezien als het standaardmodel voor het bepalen van de actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens gecombineerd met gewas en bodemgegevens op veldschaal (Feddes and Raats 2004).

De reductie in actuele transpiratie als functie van beschikbaar vocht in de bodem wordt weergegeven door de zogenaamde wortelonttrekkingsfunctie. Zowel te droge als te natte omstandigheden leiden tot een niet optimale verdamping, omdat plantenwortels dan respectievelijk onvoldoende water of onvoldoende zuurstof kunnen opnemen. SWAP beschrijft elk van de factoren die deel uitmaken van de verdamping: evaporatie van de bodem, transpiratie en interceptieverdamping. Zowel de potentiële als actuele evaporatie en transpiratie worden berekend.

Om het effect van bodemtype, bodemopbouw en wegzijging op de efficiëntie van subirrigatie en beregening in beeld te brengen, is een groot aantal modelschematisaties doorgerekend (Figuur 2). Door de hydrologische randvoorwaarden in SWAP te variëren, wordt een brede range aan grondwaterstanden en fluxen verkregen. Dit is gedaan met behulp van een R script (R Development Core Team 2012), (Bartholomeus and Witte 2013, Delsman et al. 2016), waarmee SWAP een zeer groot aantal keer wordt aangeroepen met:

- verschillende hydrologische randvoorwaarden;
- verschillende bodemtypen (bodemfysische eenheden volgens Wösten et al. (2001));
- verschillende gewassen met diepe en ondiepe beworteling;
- verschillende typen irrigatie: geen irrigatie, (haspel)beregening, samengestelde regelbare drainage, samengestelde regelbare drainage met wateraanvoer (subirrigatie). Regelbare drainage/subirrigatie wordt geschematiseerd via de 'extended drainage' optie van SWAP.

Er zijn simulaties gedaan voor vier verschillende gewassen in combinatie met vier verschillende bodemtypes. Voor de hydrologische onderrandvoorwaarde zijn tien verschillende systeemweerstand gebruikt en drie verschillende stijghoogtes in het diepe watervoerende pakket. De verschillende randvoorwaarden en bodemtype/gewascombinaties van alle modelsimulaties zijn weergegeven in

¹ combinatie van stijghoogte in diepe watervoerende pakket en de weerstand van het regionale geohydrologische systeem, aangeduid als 'systeemweerstand'; samen met de grondwaterstand bepalen zij de kwel/wegzijging

Figuur 2. Samen met de grondwaterstand bepaalt de onderrandvoorwaarde de wegzijging én de mate waarin het mogelijk is de grondwaterstand met subirrigatie dusdanig te verhogen dat het water ten goede komt aan de gewasverdamping T_a .



Figuur 2: Overzicht van de uitgevoerde modelsimulaties met SWAP; alle combinaties zijn doorerekend.

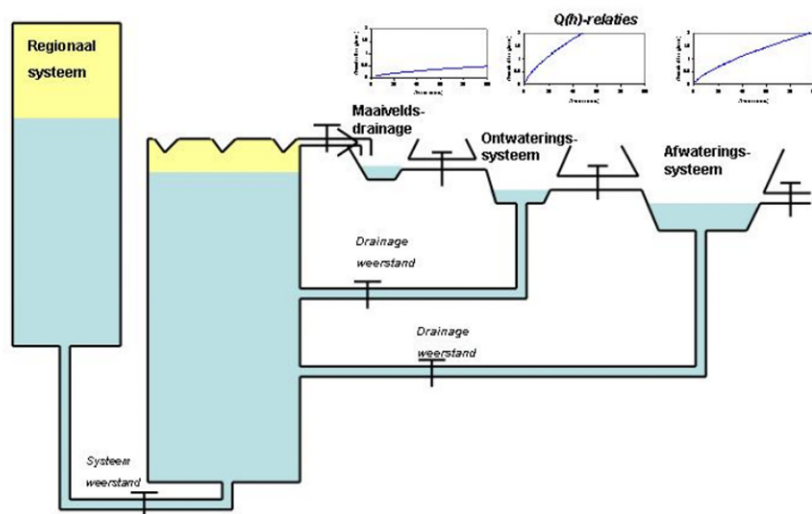
De systeemweerstanden zijn gevarieerd van 100 tot 1000 dagen. Het betreft hier de weerstand van het regionale systeem gaat (Figuur 3). Hier wordt dus niet alleen de weerstand van eventueel aanwezige klei- of leemlagen mee bedoeld, maar de weerstand van het hele geohydrologische systeem (Van der Gaast et al. 2006). Voor het bepalen van de systeemweerstand is de aanwezige kwel/wegzijging op regionaal niveau en het verschil in stijghoogte van belang. Uit de inschatting van Van der Gaast et al. (2006) blijkt dat in het algemeen de wegzijging voor het regionale systeem maximaal rond de 1 mm/d ligt.

Voor de link met regionale hydrologische modellen is van belang dat de systeemweerstand, samen met de in SWAP expliciet meegenomen drainageweerstanden naar de buisdrainage en de sloten, de zogenaamde voedingsweerstand vormt. De voedingsweerstand omvat alle weerstand tussen de drainagemiddelen en waterlopen en de top van het bovenste regionale watervoerende pakket (De Lange 1997); ofwel het is de weerstand die ondervonden wordt door grondwater tijdens stroming naar de ontwateringsmiddelen. Voor poldergebieden geldt veelal dat de voedingsweerstand gelijk is aan de weerstand van een scheidende laag in combinatie met verticale weerstand binnen het watervoerend pakket. Voor infiltratiegebieden geldt dat door grote afstanden tussen oppervlaktewateren de voedingsweerstand zeer groot wordt (ordegrootte 500 — >1500 dagen) (De Lange 1997, Van der Gaast and Massop 2003).

Ter illustratie voor de interpretatie van de systeemweerstand geven we enkele voorbeelden van 'referentiewaarden': voor het proefperceel Nabben met subirrigatie is een SWAP-model opgezet met een systeemweerstand van 275 dagen. Bij lagere weerstanden kan de gemeten stijging van de grondwaterstand als gevolg van subirrigatie voor dit perceel niet goed gerepresenteerd worden. Voor een andere subirrigatie pilot bij de Bavaria brouwerij was de weerstand na kalibratie van het model 1800 dagen (Bartholomeus et al. 2018). Van der Gaast et al. (2006) komen voor verschillende systemen op systeemweerstanden tussen 200-2400 dagen. De gekozen laagste systeemweerstand van 100 dagen voor deze studie is dus zeer laag. De systeemweerstand in SWAP kan gedefinieerd worden als (Van der Gaast et al. 2006):

$$S = \frac{\Delta h}{q_z} \quad (1)$$

waar S de systeemweerstand (d) aangeeft, Δh het stijghoogteverschil tussen de freatische stijghoogte (grondwaterstand) en de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket (m) en q_z de verticale fluxdichtheid (m/d).



Figuur 3: Schematische weergave van de verschillende weerstanden in SWAP en de koppeling tussen de verschillende systemen (Van der Gaast et al. 2006). In deze studie wordt de hydrologische onderrand van het systeem gegeven door een stijghoogte in het diepere watervoerende pakket en een systeemweerstand. Drainage naar het oppervlaktewater wordt mede bepaald door de drainageweerstand.

Alle modelruns lopen van 2001 tot en met 2017, waarbij de eerste twee jaar gebruikt worden om het model in te stellen. Vanaf 2003 worden de resultaten geanalyseerd. Op deze manier kunnen we zowel de gemiddelde efficiëntie over deze periode als de efficiëntie tijdens de relatief droge periode in 2003 goed vergelijken. De situatie met alleen peilgestuurde drainage en geen subirrigatie of beregening geldt als de referentiesituatie.

Subirrigatie wordt toegepast van 1 april tot en met 30 september met een maximale aanvoer van 5 mm/dag. Het toegepaste peil in de wateropvoerput voor subirrigatie is afhankelijk van de worteldiepte van het gewas en wordt ingesteld op 10 cm onder de maximale worteldiepte (Figuur 2). Beregening vindt plaats gedurende het groeiseizoen gebaseerd op het vochtgehalte in de bodem. In afstemming met de LLTB (Limburgse Land- en Tuinbouwbond) is, om aan te sluiten bij de gangbare beregeningspraktijk, aangenomen dat er minimaal 20 dagen tussen de beregeningsmomenten zitten en er per keer maximaal 20 mm water wordt aangevoerd. Voor de vergelijking van de efficiëntie wordt bij beregening rekening gehouden met een verwaaiingsverlies van 10%. De slootpeilen zijn ook afhankelijk van het gewas en zijn gebaseerd op de streefpeilen, zoals aangeleverd door het waterschap.

Uit de modelsimulaties worden de verschillen in actuele transpiratie T_a afgeleid tussen de referentiesituatie en de situatie met subirrigatie of met beregening. Daarnaast wordt de netto wateraanvoer ($Q_{in, netto}$) over het groeiseizoen als volgt berekend:

$$Q_{in, netto} = Q_{in, gross} - Q_{bot} - \Delta S + regen \quad (2)$$

waar $Q_{in,gross}$ de totale wateraanvoer via irrigatie weergeeft, Q_{bot} de wegzijging naar het diepe watervoerende pakket en ΔS het verschil in waterberging in de bodem. Het groeiseizoen is afhankelijk van het gewas: voor gras het hele jaar, voor aardappel en groente 10 mei t/m 29 september, voor mais 1 mei t/m 15 oktober.

De efficiëntie van de irrigatie (E_{irr}) wordt berekend door:

$$E_{irr} = \Delta T_{act} / Q_{in,netto} \quad (3)$$

waar ΔT_{act} het verschil in gemiddelde transpiratie over het groeiseizoen tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie weergeeft.

Op deze wijze wordt steeds de efficiëntie van subirrigatie vergeleken met beregening voor een specifieke bodem-gewas combinatie.

Benadrukt moet worden dat ongewenste verliesposten, zoals afvoer van aangevoerd water naar het oppervlaktewater en bodem- en interceptieverdamping expliciet in deze definitie worden meegenomen. Zijn deze posten immers groot, dan zal dit doorwerken in afname van met name Q_{bot} .

2.2 Hydrus

Met de Hydrus3D software kunnen 2D- of 3D-modellen worden gemaakt om het transport van water, stoffen en warmte dynamisch door te rekenen in de onverzadigde/verzadigde zone (Šimůnek and Šejna 2018). Het gehele bodem-grondwater-systeem wordt daarmee als rekendomein afgedekt. De gebruikte theorie en gemodelleerde processen zijn veelal identiek/liken veel op 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-2D een watergang en/of drainagebuis als ontwateringsmiddel fysiek kan worden geschematiseerd en in het modeldomein opgenomen kan worden, inclusief bijbehorende randvoorwaarden.

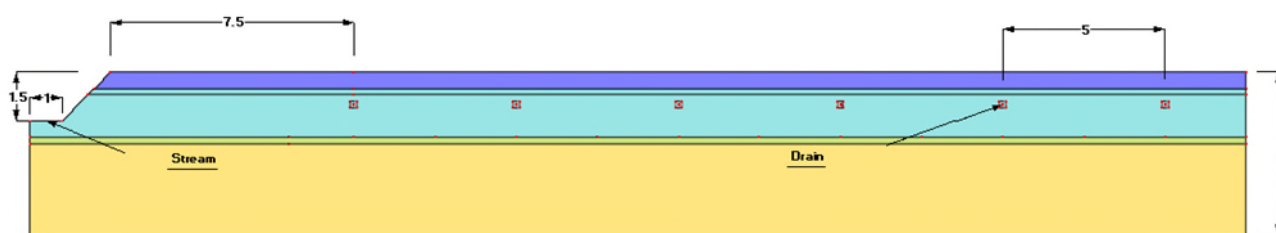
In overleg met het waterschap zijn Hydrus 2D-modellen opgezet om de werking van subirrigatie beter te kunnen duiden en inzicht te krijgen in de stromingspatronen. In de XZ-dimensie kunnen de vragen en uitkomsten voldoende duidelijk in beeld kunnen worden gebracht; een 3D-model is niet nodig. Ook is het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

In Hydrus zijn de gewas- en bodemschematisatie en -parametrisatie van een specifiek SWAP model overgenomen. De volgende modeleigenschappen zijn gelijk aan de SWAP-simulatie:

- Gewas: mais
- Bodemopbouw, 4 bodemlagen, profiel voor 'enkeerdgronden in zwak lemig fijn zand'
- Worteldiepte, 0.7 m
- Waterpeil oppervlaktewater, winterpeil - 1.0 m en zomerpeil -0.8 m t.o.v. maaiveld (voor scenario twee is een ander zomerpeil gebruikt)

Het geschematiseerde Hydrus-2D-modeldomein is weergegeven in Figuur 4. De 2D-modellen zijn op dagbasis doorgerekend voor de periode 1 april 2001 t/m 31 december 2017. De volgende modeleigenschappen worden in SWAP conceptueel benaderd, maar zijn fysiek geschematiseerd in Hydrus-2D:

- Rekendomein, 35 m lang (X) en 5 m diep (Z)
- Aantal drains, 6 m
- Drain, afstand 5 m, diepte 1 m t.o.v. maaiveld
- Watergang, bodem 1 m breed op 1.5 m t.o.v. maaiveld met 1:1 talud
- Afstand eerste drain tot insteek watergang, 7.5 m



Figuur 4: Schematisatie van Hydrus-2D-modellen

De bovenrandvoorwaarden (neerslag, evaporatie en transpiratie, verdamping van interceptiewater) zijn overgenomen uit SWAP of gelijkelijk berekend. De gemiddelde wateraanvoer naar de drainagebuizen is gelijk gesteld voor de SWAP- en Hydrus-modellen door modelparameters (i.c. de verzadigde doorlatendheid K_{sat}) rondom de drainagebuizen in het 2D-model enigszins te ijken/kalibreren. De randvoorwaarde in Hydrus voor de drainagebuizen wisselt namelijk tussen een druk-randvoorwaarde tijdens subirrigatie (bijv. +0,5 m peilopzet in aanvoerput) en een 'seepage face' randvoorwaarde tijdens drainage. Bij deze laatste randvoorwaarde stroomt grondwater de drainbuis in als de drukhoogte in de bodem op die plek groter is dan de atmosferische (tegen)druk.

De onderrand in de 2D-modellen kent geen speciale systeemweerstand, maar de bodemparameters die op die diepte (-5 m) gelden. Dat heeft tot gevolg gehad dat we als onderrandvoorwaarde een sinusvormige drukhoogte hebben ingevoerd die gemiddeld over de tijd gelijk is aan de randvoorwaarde binnen SWAP. Zonder dit te doen krijgen geeft Hydrus-2D geen fluctuerende grondwaterstanden. De berekende onderrandflux wijkt daardoor af van die van SWAP. De systeemweerstand binnen SWAP is daarmee vertaald in de 2D onderrand-randvoorwaarde met als resultante een onderrandflux.

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 dimensies hiervan zijn overgenomen uit gegevens van het waterschap (peilen variëren per gewas).

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 (veelal Ø 60 mm). Dat heeft te maken met de omrekening van de werkelijke diameter naar de effectieve diameter, omdat de werkelijke draingebuis 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 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. Initële berekeningen lieten zien dat naarmate de eerste drainbuis dicht bij de watergang ligt er meer water via deze drainbuis wordt aangevoerd dan via de buizen verderop in het perceel (zie resultaten in hoofdstuk 3). 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. Vanwege het geringe verschil tussen de werking van de tweede, derde en volgende drainagebuizen is een beperkt aantal i.c. zes drainagebuizen geschematiseerd. De eerste drainagebuis is opgeschoven van 5 m naar 7.5 m uit de watergang (Figuur 4).

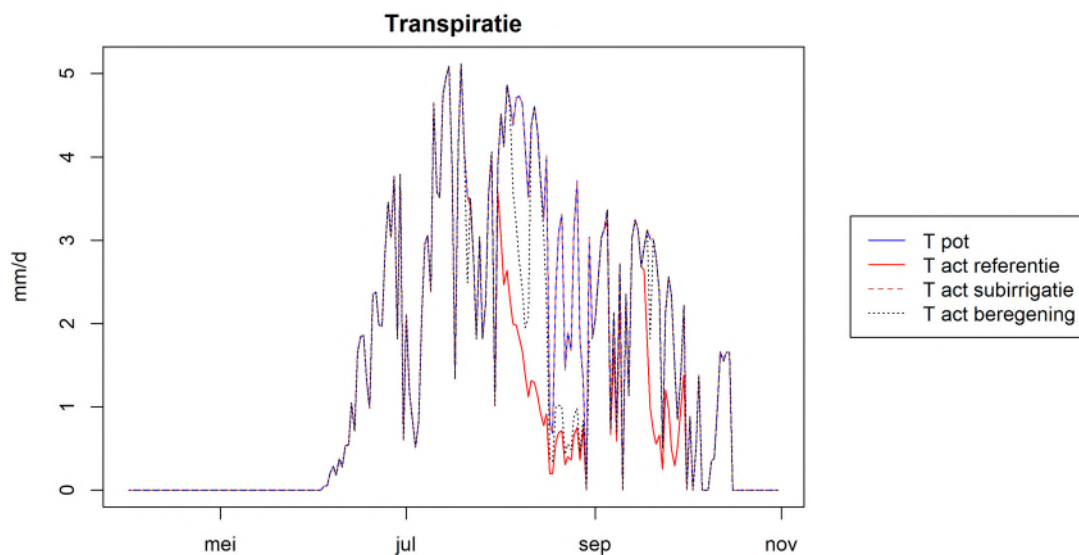
3 Resultaten en discussie

3.1 SWAP

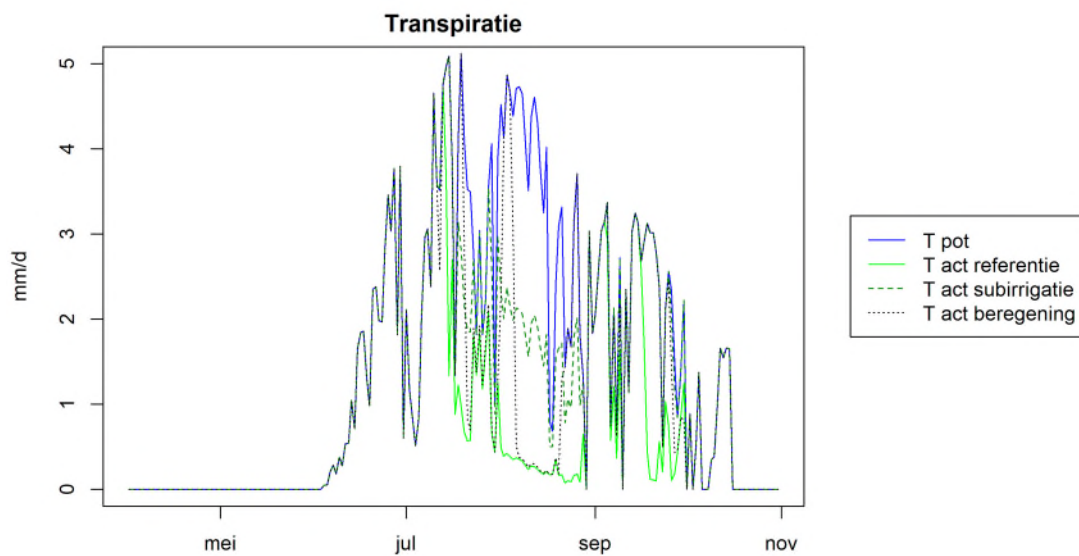
In deze paragraaf beschrijven we stap voor stap de verbanden die volgen uit de modelsimulaties, en hoe deze opbouwen tot een relatie tussen systeemweerstand en de efficiëntie van subirrigatie vs. beregening. We gebruiken hiervoor de systeemweerstand als verklarende variabele, maar maken aan het eind de link van systeemweerstand naar een combinatie van grondwaterstand en stijghoogteverschil. Als voorbeeld worden hier de resultaten getoond van de modelsimulaties voor mais met twee verschillende bodemtypes en een stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket van -2.5 m+mv. De gekozen bodemtypes, gebaseerd op de verschillen in vochtvasthoudend vermogen, zijn podzolgronden in zwaklemig, fijn zand (zwaklemig fijn zand) en podzolgronden in grof zand (grof zand). In de hoofdtekst wordt alleen de situatie in het droge jaar 2003 weergegeven. Dit drogere jaar geeft een goed beeld voor meer extremere situaties, die in de toekomst vaker voor zullen komen. Resultaten voor de andere gewassen, bodemtypen, randvoorwaarden en gemiddeld over de hele periode zijn gegeven in 0.

3.1.1 Transpiratie

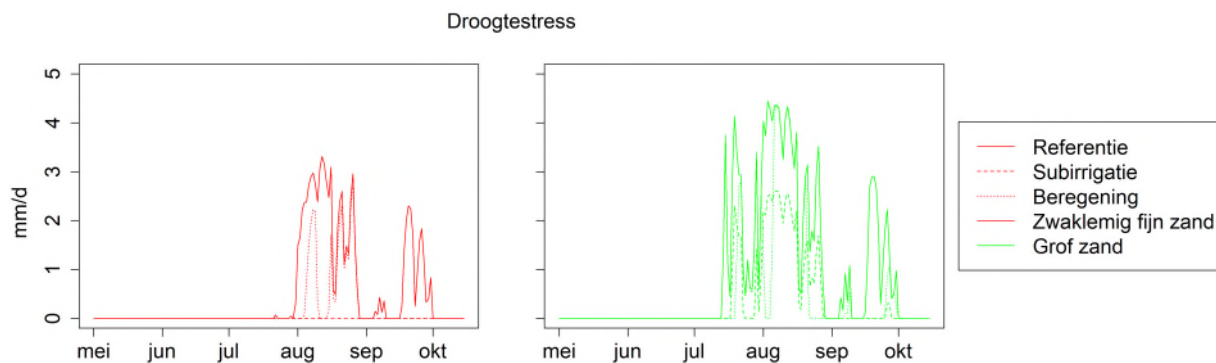
Het SWAP model berekent voor elke modelsimulatie de actuele transpiratie van het gewas. De potentiële en actuele transpiratie over het groeiseizoen in het jaar 2003 voor twee verschillende bodemtypen met een systeemweerstand van 500 dagen is weergegeven in Figuur 5 en Figuur 6. Het verschil tussen potentiële transpiratie en actuele transpiratie wordt veroorzaakt door droogtestress (Figuur 7). In het verloop van de transpiratie is goed te zien dat beide vormen van irrigatie, zoals te verwachten, tot een toename in transpiratie en een afname van de droogtestress leiden. Daarnaast is er een verschil tussen de bodemtypen, waarbij het gewas op grof zand meer droogtestress vertoont en beide vormen van irrigatie een lagere toename in actuele transpiratie behalen dan bij zwaklemig fijn zand. Voor het bodemtype zwak lemig fijn zand wordt met subirrigatie voldoende water aangevoerd om de droogtestress van het gewas volledig op te heffen, terwijl dit door beregening niet bereikt wordt (Figuur 5 en Figuur 7). Bij beregening is het effect van de minimale periode van 20 dagen tussen de irrigatiegiften zichtbaar; droogtestress wordt tijdelijk opgeheven, maar niet gedurende de hele periode. Bij een bodem met grof zand kan via subirrigatie onvoldoende water worden aangevoerd om droogtestress voor het gewas volledig te voorkomen, de droogtestress is echter lager dan bij beregening (Figuur 6 en Figuur 7).



Figuur 5: Potentiële (T pot) en actuele (T act) transpiratie voor mais over het groeiseizoen in 2003 voor de referentiesituatie, situatie met subirrigatie en situatie met beregening voor modelsimulaties met het bodemtype zwaklemig, fijn zand.



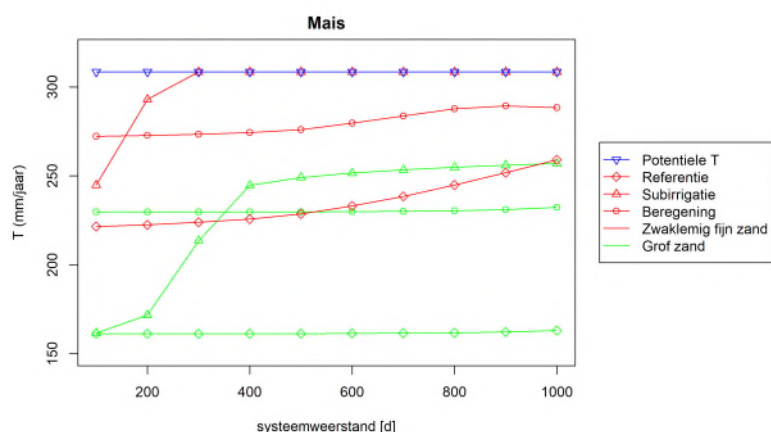
Figuur 6: Potentiële (T pot) en actuele (T act) transpiratie voor mais over het groeiseizoen in 2003 voor de referentiesituatie (alleen peilgestuurde drainage en geen subirrigatie of beregening), situatie met subirrigatie en situatie met beregening voor modelsimulaties met het bodemtype grof zand.



Figuur 7: Berekende droogtestress gedurende het groeiseizoen in 2003 voor twee bodemtypen voor de referentiesituatie en de situaties met wateraanvoer.

In Figuur 8 zijn de actuele en potentiële transpiratie gegeven voor mais bij een stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket van -2.5 m+mv voor alle systeemweerstanden. Uit de figuur volgt:

- Voor lage systeemweerstand (100-150 dagen) zorgt subirrigatie niet voor de gewenste stijging van de transpiratie. Er geldt dan voor deze bodem-gewas combinatie: transpiratie door beregening > subirrigatie. Zoals in hoofdstuk 2 al aangegeven zijn dit zeer lage weerstanden voor infiltratiegebieden.
- Voor hogere weerstanden wordt de potentiële transpiratie gehaald bij het bodemtype zwaklemig fijn zand voor subirrigatie en niet voor beregening. Er geldt dan: transpiratie door beregening < subirrigatie.

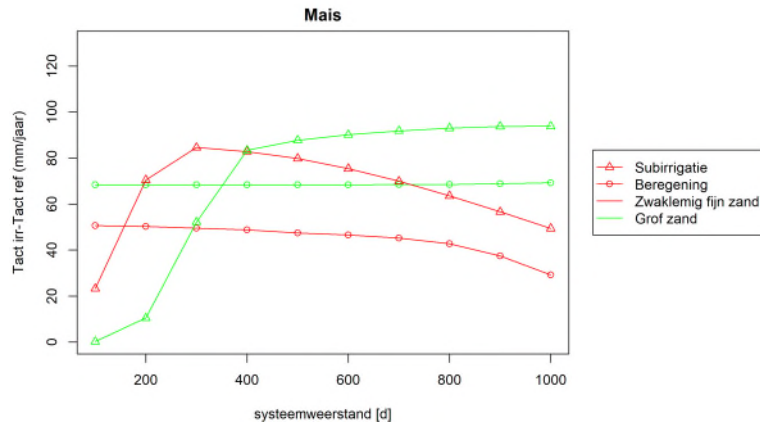


Figuur 8: Potentiële en actuele transpiratie voor de referentiesituatie, de situatie met subirrigatie en de situatie met beregening in het groeiseizoen van 2003 voor twee verschillende bodemtypes en de 10 verschillende systeemweerstand.

3.1.2 Verschil transpiratie

Om de efficiëntie van de subirrigatie en beregening te bepalen is gekeken naar het verschil in actuele transpiratie (zie vergelijking 3) tussen de referentiesituatie en de situaties met subirrigatie of beregening. Het verschil tussen de actuele transpiratie met en zonder irrigatie is weergegeven in Figuur 9. Dit verschil is het grootst bij systeemweerstand tussen de 200 en 500 dagen bij het bodemtype zwaklemig fijn zand en bij systeemweerstand vanaf 400 dagen bij het bodemtype grof zand. Bij lage systeemweerstand is het verschil in transpiratie bij subirrigatie kleiner door wegzijging, waardoor de grondwaterstand onvoldoende stijgt. Bij hoge systeemweerstand neemt het verschil ook weer af bij zowel subirrigatie als beregening, omdat in deze situatie al een relatief hoge transpiratie gehaald wordt in de referentiesituatie. Het verschil tussen de actuele transpiratie (T_{act}) en potentiële transpiratie (T_{pot}) is in deze situaties kleiner (Figuur 8).

Dit heeft invloed op de interpretatie van de efficiëntie, zoals gedefinieerd in deze studie: de efficiëntie kan toenemen als irrigatie leidt tot een grote toename in actuele transpiratie. Echter, als de actuele transpiratie in de uitgangssituatie al vrij hoog is, kan de toename ook maar beperkt zijn (de actuele transpiratie is immers altijd lager of gelijk aan de potentiële transpiratie). Daardoor kan bij een hogere systeemweerstand de efficiëntie beperkt zijn.

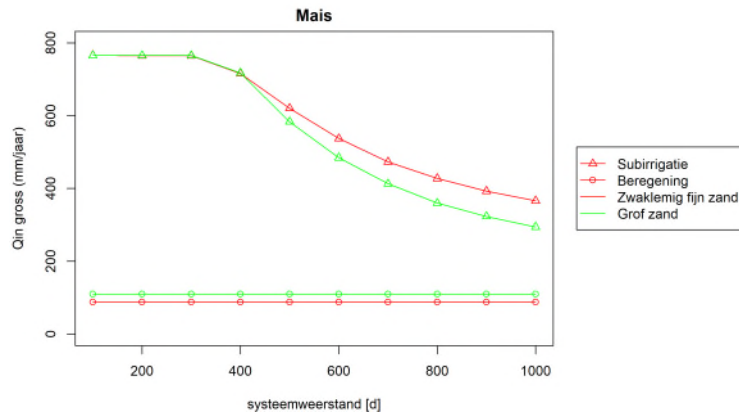


Figuur 9: Verschil in gemiddelde transpiratie (Tact) tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor het groeiseizoen van 2003.

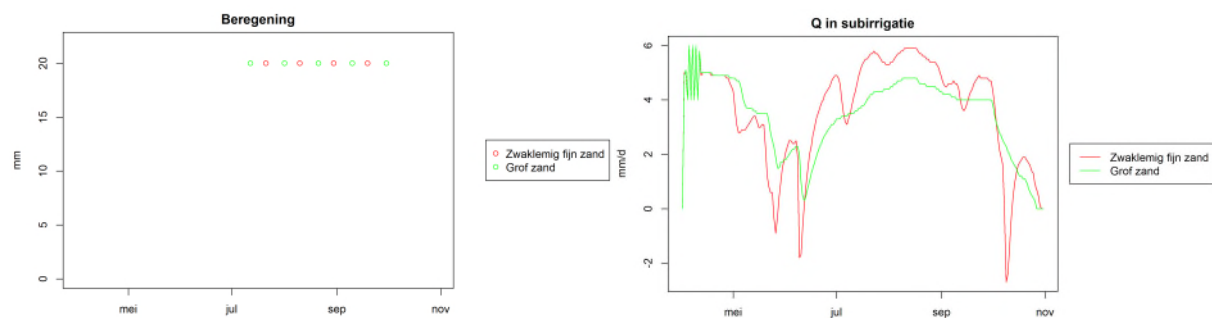
3.1.3 Wateraanvoer

De wateraanvoer via beregening en subirrigatie is hier gegeven voor de verschillende weerstanden (Figuur 10). De wateraanvoer gedurende 2003 uit een modelsimulatie met een systeemweerstand van 500 dagen geeft de verschillen tussen het modelleren van de irrigatiemethoden weer (Figuur 11). Via subirrigatie wordt over het hele seizoen meer water aangevoerd dan via beregening; dit geldt voor alle systeemweerstand (Figuur 10). De totale wateraanvoer via subirrigatie neemt wel af met de systeemweerstand, omdat er minder wegzijging is bij hogere systeemweerstand; er is in een nattere uitgangssituatie dus minder water nodig. Ook zit er een maximum aan de aanvoer (5mm/d, zie Hoofdstuk 2), waardoor de figuur bij lage weerstanden afvlakt. Bij het bodemtype zwak lemig fijn zand vindt minder wegzijging plaats, maar is de transpiratie van het gewas hoger dan bij het bodemtype grof zand. Hierdoor is de totale wateraanvoer via subirrigatie bij zwaklemig fijn zand hoger.

Vanwege de keuzes die gemaakt zijn bij het modelleren van beregening (minimum periode tussen irrigatiegiften van 20 dagen en maximaal 20 mm per gift) is de totale wateraanvoer bij beregening laag. Vanaf het moment dat droogtestress bij het gewas optreedt (Figuur 7) begint de beregening en in totaal wordt mais vier maal (zwak lemig fijn zand) of vijf maal (grof zand) beregend tijdens het groeiseizoen in 2003 (Figuur 11). Bij subirrigatie is de hoeveelheid water die via het drainagesysteem infiltreert constanter met de hoogste infiltratie bij de start van de subirrigatie (april) en tijdens de maanden met de meeste droogtestress (juli, augustus, september) (Figuur 11). Opgemerkt moet worden dat infiltratie via het drainagesysteem niet beperkt is tot de periode met actieve wateraanvoer; infiltratie vindt altijd plaats als het waterniveau in het drainagesysteem hoger is dan de grondwaterstand. Hierdoor kan de met SWAP berekende wateraanvoer voor gras, waarbij het hele jaar wordt beschouwd enigszins overschat worden.



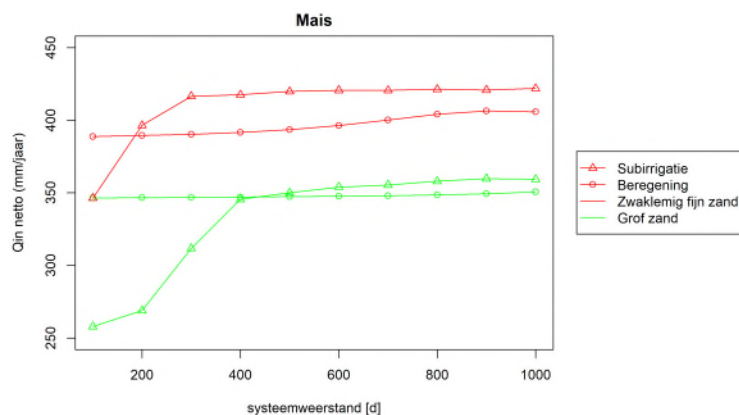
Figuur 10: Bruto wateraanvoer via subirrigatie en beregening voor 2003.



Figuur 11: Beregeningshoeveelheid (links) en infiltratie/drainageflux voor het subirrigatiesysteem (rechts) gedurende het jaar 2003.

3.1.4 Netto wateraanvoer

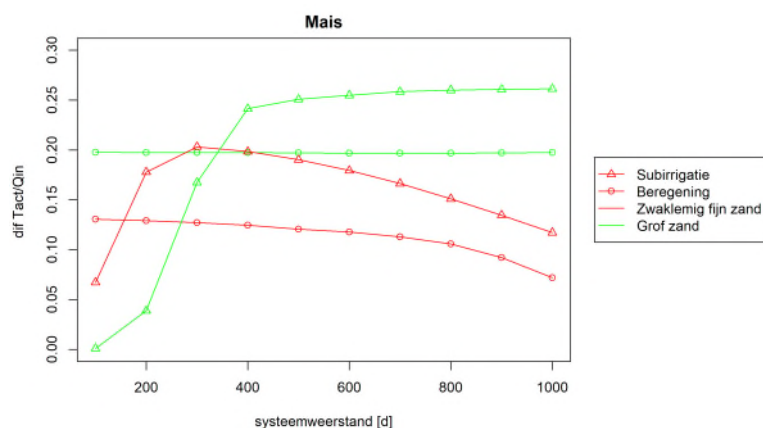
De netto wateraanvoer geeft de hoeveelheid water aan die effectief gebruikt wordt voor de toename in actuele transpiratie (vergelijking 2). Hierbij wordt de wegzijging naar de ondergrond niet als verlies meegenomen; dit water blijft immers in het grondwatersysteem aanwezig. Afvoer via het oppervlaktewater wordt wel gezien als verlies, evenals verdamping van interceptiewater. De netto wateraanvoer is lager voor subirrigatie bij lage systeemweerstand (Figuur 12), omdat dan onvoldoende water aangevoerd kan worden om de grondwaterstand op peil te houden. Het water wordt dus niet gebruikt voor transpiratie, maar het gaat het ook niet verloren voor het watersysteem.



Figuur 12: Netto wateraanvoer over 2003 voor subirrigatie en beregening

3.1.5 Efficiëntie

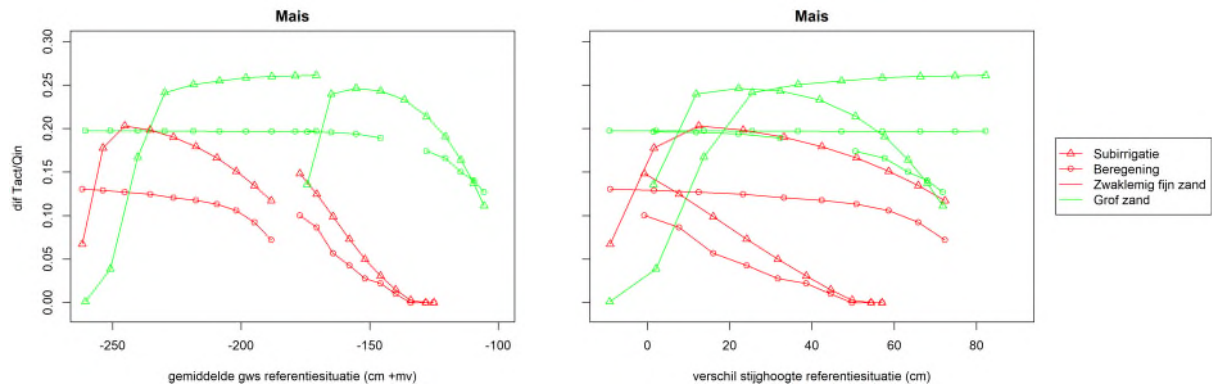
Door alle bovenstaande termen mee te nemen, kan de efficiëntie van subirrigatie en beregening bepaald worden (vergelijking 3). Subirrigatie heeft een lagere efficiëntie bij lage systeemweerstand (Figuur 13) door de grotere wegzijging en daardoor lagere toename/verschil in transpiratie. Efficiëntie van zowel beregening als subirrigatie neemt af bij hogere systeemweerstand door de kleinere toename in actuele transpiratie ten opzichte van de referentiesituatie (Figuur 8). Verschillen tussen beregening en subirrigatie zijn afhankelijk van het bodemtype en de systeemweerstand. Bij bodems met een beperkte capillaire nalevering/beperkt vochtvasthoudend vermogen (bijvoorbeeld grof zand) is het verschil tussen beregening en subirrigatie over het algemeen groter dan bij bodems met een hogere capillaire nalevering.



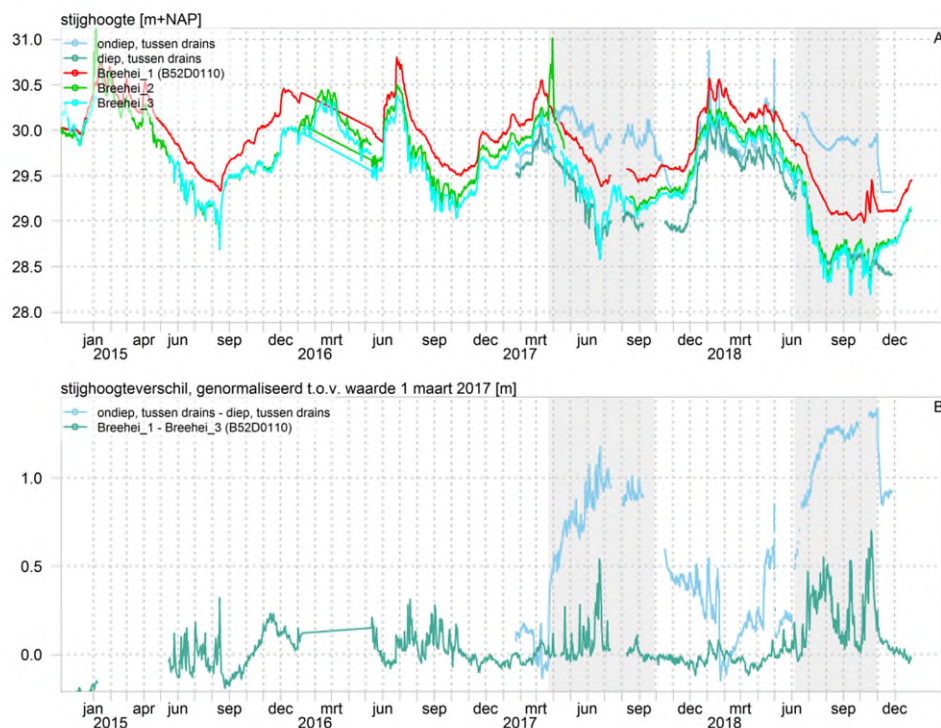
Figuur 13: Efficiëntie van subirrigatie en beregening voor de verschillende systeemweerstand voor 2003.

De efficiëntie van subirrigatie is sterk afhankelijk van de mate waarin de grondwaterstand tot op het gewenste peil gebracht kan worden. Dit lukt niet als er teveel water wegzijgt naar de ondergrond. Deze weerstand tegen wegzijging is in SWAP geschematiseerd via een stijghoogte in het diepere watervoerende pakket en de systeemweerstand (zie hoofdstuk 2). De systeemweerstand is lastig in te schatten vanuit veldwaarnemingen. De systeemweerstand is afhankelijk van de wegzijging/kwel en het verschil in stijghoogte (zie hoofdstuk 2). Daarom is de efficiëntie hier uitgezet tegen het verschil in stijghoogte tussen het freatisch grondwater en het diepere watervoerende pakket in de referentiesituatie (of uitgangssituatie) (Figuur 14). De efficiëntie is gegeven voor mais voor stijghoogtes in het diepe watervoerende pakket van -1.75 m en van -2.50 m. Hierbij wordt duidelijk dat de efficiëntie niet alleen afhankelijk is van het stijghoogteverschil in de uitgangssituatie; een klein stijghoogteverschil in combinatie met een diepe gemiddelde grondwaterstand in de referentiesituatie (ofwel uitgangssituatie) leidt tot een lage efficiëntie. Bij een hogere gemiddelde grondwaterstand in de uitgangssituatie is dit alleen het geval voor grof zand; voor zwak lemig fijn zand is bij een ondiepe gemiddelde grondwaterstand in de uitgangssituatie subirrigatie efficiënter dan beregening. Hiervoor is geen groot stijghoogteverschil in de uitgangssituatie nodig.

Voor de interpretatie van het benodigde stijghoogteverschil dat nodig is in de uitgangssituatie om voldoende stijging in de grondwaterstand te krijgen schetsen we de situatie bij de subirrigatieproef bij Nabben (Bartholomeus et al. 2018). Voor deze proef zijn stijghoogteverschillen in de uitgangssituatie afgeleid van een meetpunt in het proefperceel (met subirrigatie) en in de nabije omgeving (zonder subirrigatie, i.e. referentiesituatie) (Figuur 15). In de referentiesituatie is het stijghoogteverschil tussen de freatische grondwaterstand en de diepere filters 2 en 3 zo'n 20 cm met pieken tot 50 cm (afhankelijk van de tijd in het jaar en grondwateronttrekkingen in de omgeving). Door subirrigatie wordt een stijghoogteverschil van 100 cm in 2017 en bijna 140 cm in 2018 gerealiseerd. Een relatief klein stijghoogteverschil blijkt dus maar nodig om een significante stijging van de grondwaterstand door subirrigatie te realiseren.



Figuur 14: Efficiëntie van subirrigatie en beregening in 2003 uitgezet tegen de gemiddelde grondwaterstand (links) en het verschil in stijghoogte (rechts). Zowel de resultaten voor een stijghoogte in het diepe watervoerende pakket van -175 cm +mv en -250 cm +mv zijn in de figuur opgenomen.



Figuur 15: A: Stijghoogtes in het proefperceel bij Nabben (America), gemeten boven (ondiep) en onder de leemlaag (diep) en van een peilbuis in de nabije omgeving met filters op drie dieptes. B: stijghoogteverschil tussen ondiepe en diepe filters, genormaliseerd naar het stijghoogteverschil op de betreffende locatie op 1 maart 2017 (d.w.z. het verschil is 0 op 1 maart). Het grijze vlak geeft de periode met wateraanvoer via subirrigatie. Het gerealiseerde stijghoogteverschil door subirrigatie is in 2018 groter dan in 2017. Figuur naar Bartholomeus et al. (2018), aangevuld met metingen van 2018.

3.1.6 Overzicht van alle parameters

In Tabel 1 worden alle waarden gegeven over het groeiseizoen van 2003 voor de verschillende gewassen en bodemtypes met een stijghoogte in het diepe watervoerende pakket van -250 cm +mv en een systeemweerstand van 500 dagen. Met subirrigatie wordt in alle bodem-gewascombinaties, met uitzondering van de combinatie gras op grof zand, een hogere efficiëntie bereikt dan met beregening. Met uitzondering van gras op grof zand geldt een hogere actuele transpiratie in de situatie met subirrigatie ten opzichte van de situatie met beregening, terwijl de netto wateraanvoer minder toeneemt voor subirrigatie ten opzichte van beregening. In alle situaties neemt de actuele transpiratie van het gewas toe in de situaties met wateraanvoer ten opzichte van de referentiesituatie.

De bruto wateraanvoer is in alle gevallen veel hoger bij subirrigatie dan bij beregening. Het extra aangevoerde water verdwijnt naar de ondergrond, dit veroorzaakt de hogere waarden van de Q_{bot} flux bij subirrigatie. Aangezien het water dat naar de ondergrond gaat volgens de definitie niet als verlies wordt beschouwd, maar in het grondwatersysteem blijft, leidt de hogere bruto wateraanvoer niet tot een veel hogere netto wateraanvoer bij subirrigatie ten opzichte van beregening. De lagere waarden voor wateraanvoer bij beregening worden veroorzaakt door de wijze van modellering, waarbij, op basis van praktijkinformatie, een minimum van 20 dagen tussen de irrigatiegiften is genomen. De negatieve bergingsverandering bij subirrigatie voor gras wordt veroorzaakt doordat het hele jaar wordt beschouwd.

Opgemerkt moet worden dat er voor dit onderzoek uit is gegaan van specifieke randvoorwaarden voor de schematisatie en parametrisatie van subirrigatie en beregening. Een gevoeligheidsanalyse van de gemodelleerde efficiëntie voor gekozen modelparameters was geen onderdeel van het onderzoek. Echter, voor de parametrisatie van beregening geldt bijvoorbeeld dat ondanks dat deze is gebaseerd op praktijkervaringen, de berekende efficiëntie afhankelijk zal zijn van de beregeningsfrequentie en -gift. Bij het gebruik van de resultaten moet hier rekening mee worden gehouden.

Tabel 1: Efficiëntie (dT_a/Q_{in}) van subirrigatie vs. oppervlakte-beregening ten aanzien van de gewasverdamping (transpiratie T_a) in het groeiseizoen. Bron van aanvoerwater is lokaal ondiep grondwater. Efficiëntie is gebaseerd op de waarden over het groeiseizoen voor 2003. Waarden worden gegeven voor een systeemweerstand van 500 dagen en een randvoorwaarde voor de stijghoogte van -250 cm +mv.

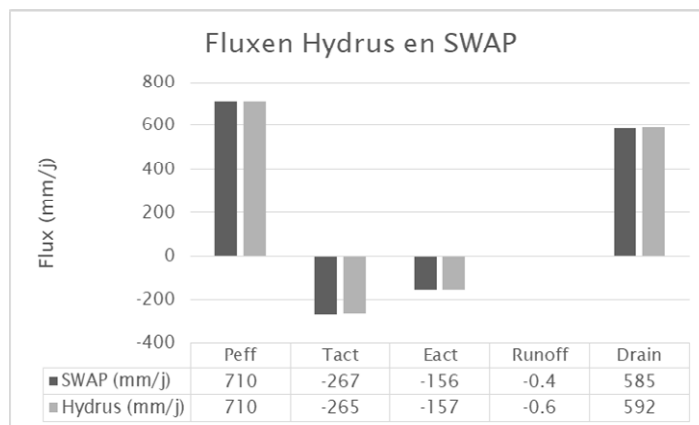
Gewas	Bodemtype	Neerslag [mm]	Geen aanvoer		Beregening					Subirrigatie					
			T_a [mm]	$Q_{in\ irr}^1$ [mm]	Q_{bot} [mm]	$dStorage$ [mm]	Q_{netto} [mm]	T_a [mm]	dT_a/Q_{in} [-]	$Q_{in\ irr}$ [mm]	Q_{bot} [mm]	$dStorage$ [mm]	Q_{netto} [mm]	T_a [mm]	dT_a/Q_{in} [-]
Aardappel	Stuifzand	223	146	88	154	-127	284	189	0.154	622	476	30	339	244	0.289
	Zwaklemig fijn zand	223	197	88	144	-162	329	225	0.088	590	457	17	339	244	0.139
	Enkeerdgrond	223	202	88	142	-163	331	229	0.082	590	458	17	339	244	0.124
	Grof zand	223	137	88	158	-134	287	185	0.167	586	472	19	318	229	0.291
Groente	Stuifzand	223	105	66	165	-115	239	134	0.118	574	497	31	268	165	0.223
	Zwaklemig fijn zand	223	143	66	155	-139	272	156	0.048	549	486	17	268	165	0.082
	Enkeerdgrond	223	145	66	154	-138	273	157	0.045	549	486	18	267	165	0.076
	Grof zand	223	107	66	164	-127	251	140	0.133	562	490	28	267	165	0.219
Mais	Stuifzand	300	181	88	165	-126	349	240	0.171	666	512	38	416	309	0.307
	Zwaklemig fijn zand	300	229	88	154	-159	393	276	0.12	620	487	14	420	309	0.19
	Enkeerdgrond	300	247	88	150	-163	401	284	0.093	615	489	8	418	309	0.146
	Grof zand	300	161	110	179	-116	347	230	0.197	583	506	28	350	249	0.251
Gras	Stuifzand	616	395	154	280	-74	564	486	0.161	930	1023	-133	657	592	0.300
	Zwaklemig fijn zand	616	467	132	232	-109	625	549	0.131	972	1020	-100	668	603	0.203
	Enkeerdgrond	616	480	132	227	-109	630	554	0.117	973	1021	-99	668	603	0.183
	Grof zand	616	398	132	266	-96	578	502	0.18	946	1096	-88	554	488	0.163

¹Totale wateraanvoer*verwaaiingsfactor (1.1)

3.2 Hydrus

De ruimtelijke aspecten van de grondwaterstromingen in een perceel met subirrigatie zijn inzichtelijk gemaakt door middel van Hydrus-2D XZ-transect simulaties. Deze 2D-simulaties geven inzicht in de stroming, verspreiding en verblijftijden van het aangevoerde grondwater, i.c. van het geïnfiltreerde water via het subirrigatie-systeem in de ondergrond van het perceel. De randvoorwaarden en parameters van de eerder genoemde SWAP modelsimulatie 'zwak lemig fijn zand' zijn gebruikt voor de Hydrus-schematisatie en -kalibratie. Door Hydrus-2D te gebruiken en de ontwateringsmiddelen zoals watergang en drainagebuizen expliciet te schematiseren, kunnen we zien en vaststellen of de totstandkoming van fluxen plausibel is. Dominante fluxen van Hydrus zijn identiek aan die uit de SWAP-simulaties, zie Tabel 2, wat belangrijk is om de werking en effecten van subirrigatie voor beide modelconcepten te kunnen vergelijken.

Tabel 2 Vergelijking fluxen Hydrus en SWAP, gemiddeld per jaar voor de rekenperiode 2001 t/m 2017 [mm/j]. Peff is neerslag minus verdamping van interceptiewater. Runoff is surface runoff zonder berging van water op het maaiveld. Drain-flux is netto inwaarts.



Twee scenario's zijn doorgerekend. In het eerste scenario zijn de oppervlaktewaterpeilen gelijk aan het ingestelde peil bij de SWAP-simulatie (winterpeil - 1.0 m en zomerpeil -0.8 m t.o.v maaiveld). In scenario twee wordt tijdens de periode van subirrigatie een droge situatie in de watergang gesimuleerd door middel van een lager zomerpeil (winterpeil gehandhaafd). Het ingestelde zomerpeil is gelijk aan de stijghoogte op de onderrand van het 2D-model. Daarmee valt de watergang in de modelberekening niet helemaal droog. Dit vereist een toelichting: bij de 2D-berekeningen moeten de fluxen en waterbalans (nagenoeg) overeen komen met de SWAP-berekeningen om de berekeningen onderling te kunnen vergelijken. Dit resulteert voor de situatie van scenario één in een onderrand-drukhoogte-randvoorwaarde in het 2D-model, die vergelijkbare fluxen en grondwaterstanden oplevert met die in het SWAP model. Deze onderrand wordt ook toegepast in scenario twee; deze verandert immers niet in scenario twee t.o.v. scenario één. De drukhoogte op de onderrand komt qua niveau echter boven de bodem van de watergang uit. Als een zomerpeil in de watergang ingesteld wordt (i.c. drukhoogte-randvoorwaarde) die lager is dan de slootbodem en daarmee lager is dan de drukhoogte op de onderrand, wordt een kwelstroom naar de sloot gemodelleerd. Dat wordt voorkómen, door de drukhoogte in de watergang ten opzichte van maaiveld gelijk te stellen aan die op de onderrand. Daardoor verloopt het waterpeil in de watergang in scenario twee van ongeveer winterpeil bij aanvang van de subirrigatie van -1.0 m+mv naar ongeveer -1.3 m+mv

tegen het einde van de periode met subirrigatie. Dit is 0.5 m lager dan het zomerpeil in scenario één.

Ter illustratie van de resultaten van de Hydrus-2D-simulaties wordt hierna getoond:

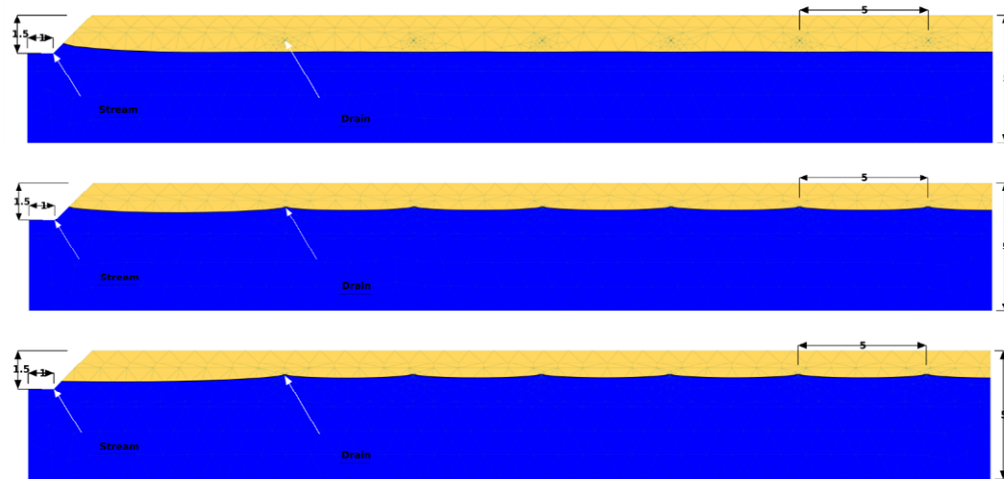
- een aantal figuren in zomer- en wintersituatie, met en zonder subirrigatie, om een beeld te geven van de vorm van de 2D-grondwaterspiegel (Figuur 16);
- idem van de 2D-grondwaterstroming op bepaalde dagen (Figuur 17);
- verdeling van berekende flux van subirrigatie, in dit geval wateraanvoer via de afzonderlijke drainagebuizen (Figuur 18);
- stroming van deeltjes, die met de grondwaterstroming meegevoerd worden door de bodem, waaruit we verblijftijden afleiden vanaf de drainagebuis naar de onderrand op -5 m+mv (Figuur 19).

Grondwaterspiegel

In Figuur 16 is te zien dat bij winterpeil zonder subirrigatie de grondwaterstanden onder de drainagebuizen liggen. Deze voeren in de tijd gezien niet vaak water af. Water in de watergang infiltreert bij dat peil (lateraal en verticaal) in de bodem. Dit laatste wordt mede veroorzaakt door de drukhoogte op de onderrand, die als randvoorwaarde is opgelegd.

Wanneer er onder scenario één subirrigatie plaatsvindt bij zomerpeil, dan komt de grondwaterstand omhoog. Het water in de drains voedt het grondwater en de grondwaterspiegel tussen de drains is hol. De sloot infiltreert bij zomerpeil. Bij een (vrijwel) droogvallende watergang in de zomer tijdens subirrigatie is de situatie rondom de drains identiek aan de situatie bij zomerpeil. Rondom de watergang is de grondwaterstand ter plekke vrijwel gelijk aan de waterstand in de watergang. De stroming van of naar de watergang is vrijwel nul. Dit is mede te zien in de grondwaterstroming op dag 147 (Figuur 17).

De berekende grondwaterspiegel ziet er plausibel uit en het gemiddelde ervan stemt overeen met de SWAP-berekeningen. 2D berekeningen laten zien dat de grondwaterspiegel niet vlak is. We zien voorts in de berekeningen effecten van de watergang en de gevoerde peilen. Het gekozen winterpeil (standaard peilen van WL) is aan de hoge kant vergeleken met de onderrand-stijghoogte, waardoor de watergang 's winters infiltreert. Dit zal in de praktijk meestal niet zo zijn; we verwachten dan een drainerende watergang. Qua gevoerd zomerpeil was één van de vragen of subirrigatie tot afvoer via de watergang zou kunnen leiden. Indien dat gebeurt zou de watergang hoger moeten worden gestuwd, waardoor afvoer wordt voorkomen. Bij het standaard zomerpeil, dit zou als 'gestuwd' opgevat kunnen worden, infiltreert de watergang en vindt er geen afvoer plaats vanuit het perceel. Als we het zomerpeil laten zakken, dan komt er een moment dat de watergang gaat draineren.



Figuur 16: Grondwaterspiegel bij: (boven) winterpeil zonder subirrigatie, (midden, scenario 1) zomerpeil tijdens subirrigatie en (onder, scenario 2) droogvallende watergang in zomer tijdens subirrigatie.

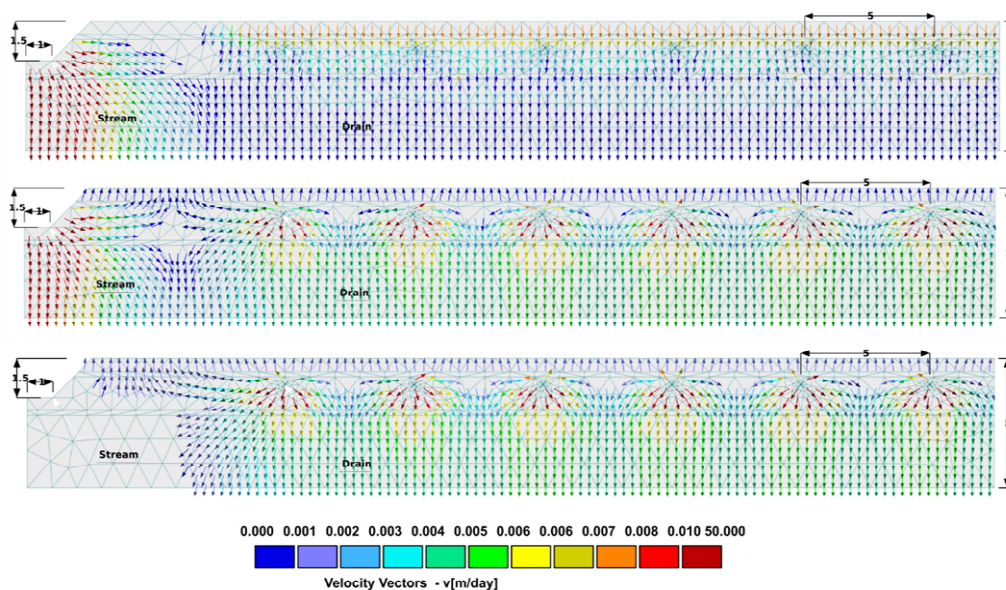
Grondwaterstroming

Bij winterpeilen zonder subirrigatie geeft Figuur 17 (boven) te zien dat water uit de watergang infiltreert, lateraal en verticaal, en dat er neerwaarts transport van water plaatsvindt in de onverzadigde zone. De drainagebuizen liggen in de onverzadigde zone en voeren in de situatie van het figuur geen water af, maar doen dit wel na regenbuien van voldoende omvang. Het grondwatersysteem wordt gevoed en er is (verticale) grondwaterstroming over de onderrand van het modeldomein.

Bij zomerpeil en subirrigatie in de tweede helft van augustus (Figuur 17 midden) ziet het beeld er anders uit. Water uit de sloot infiltreert verticaal en lateraal en bedient de wortelzone in de zone 3 à 4 m uit de oever. Dan treedt bij de eerste drain op 7.5 m afstand van de watergang subirrigatie op, waarbij de onverzadigde zone wordt gevoed, maar vooral ook water neerwaarts zich verspreid ('uitwaaiert'). Deze drain kent een iets grotere in-flux aan subirrigatie. Alle volgende drains geven een vrijwel identieke stromingssituatie weer, bij een kleine flux vergeleken met de eerste drain bij de watergang.

De stromingssituatie bij de droogvallende watergang in de zomer in scenario 2 (Figuur 17 onder) laat een duidelijk afwijkend beeld zien bij de watergang. Er vindt daar nauwelijks tot geen stroming plaats van of naar de watergang. Wel is er voeding via opwaartse stroming naar de wortelzone bij de watergang.

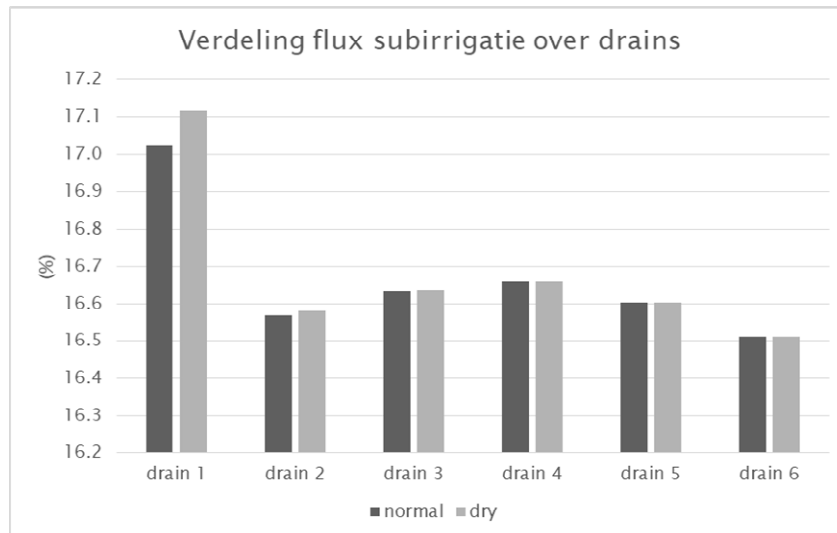
Met de 2D-berekeningen kan dan dag tot dag bekeken worden hoe de stromingssituatie is en wat de effecten zijn van watergang inclusief gevoerde peilen en de werking van de drainagebuizen.



Figuur 17: Grondwaterstroming bij: (boven) winterpeil zonder subirrigatie op dag 245 (1 december), (midden, scenario 1) zomerpeil tijdens subirrigatie op dag 147 (25 augustus) en (onder, scenario 2) droogvallende watergang in zomer tijdens subirrigatie op dag 147 (25 augustus).

Verdeling van de flux van subirrigatie over de drainagebuizen

Zoals eerder gemeld is na een eerste berekening de eerste drainagebuis bij de watergang verder weg gelegd dan de drainafstand van 5 m. Deze eerste drain kent ook na verplaatsing een iets grotere in-flux aan subirrigatie dan de volgende drains. Het voordeel van het verplaatsen van de eerste drain verder weg van de watergang is dat er minder risico bestaat dat een groter deel van de subirrigatie-flux afgevoerd wordt naar de watergang. De eerste drain moet vervolgens ook weer niet te ver van de watergang liggen, want dan ontstaat er een zone die niet profiteert van subirrigatie.



Figuur 18: Grondwater – flux subirrigatie – verdeling over drains. Drain 1 ligt links in domein bij de watergang en drain 6 uiterst rechts. NB schaal loopt van 16,2 naar 17,2%.

Stroming van deeltjes met de grondwaterstroming mee

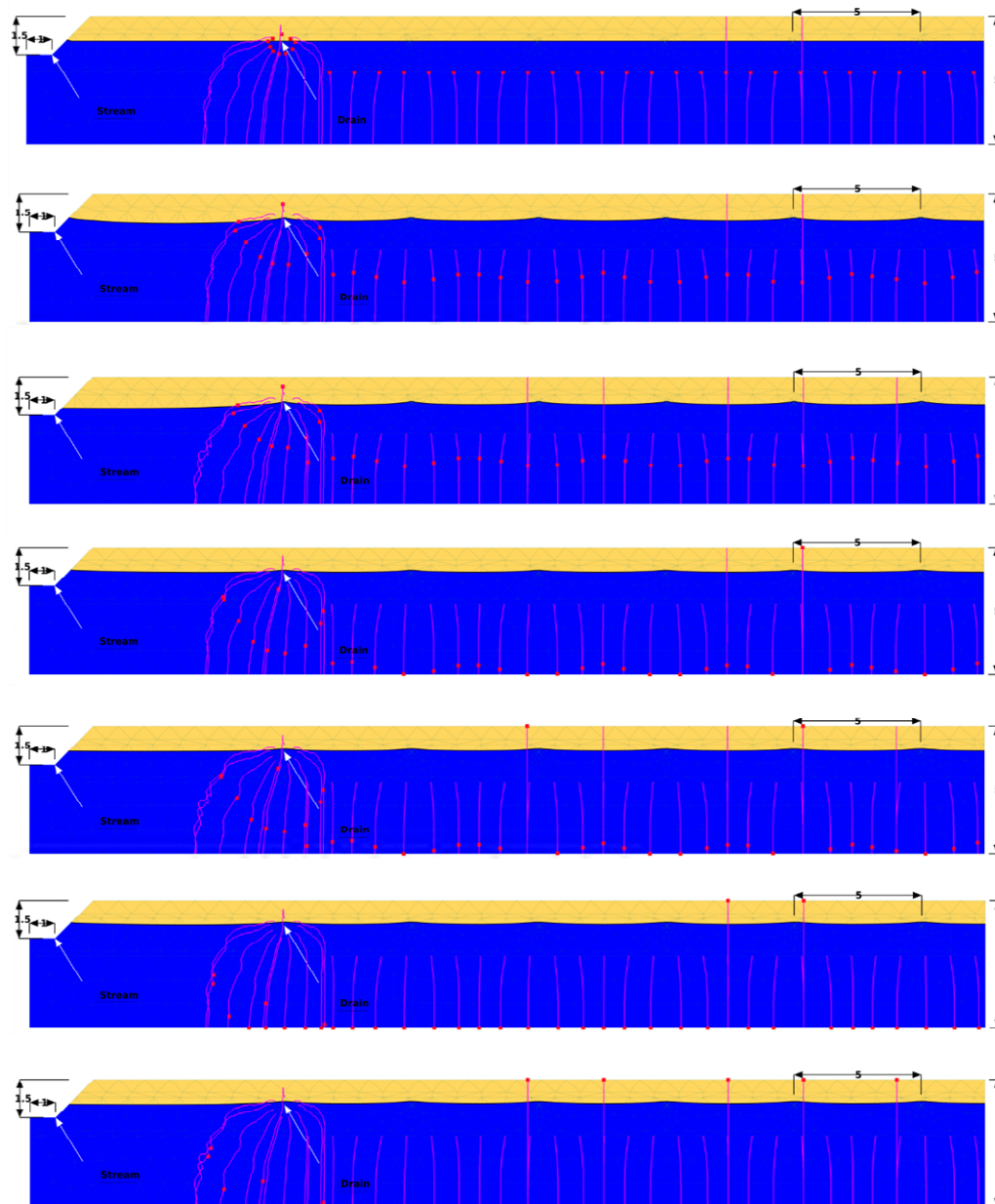
Bij zogenaamde 'particle tracking' stromen denkbeeldige modelmatige deeltjes/stoffen mee met het bodemvocht en grondwater. We hebben een aantal deeltjes rondom de eerste drainagebuis geplaatst en een aantal verderop in het modeldomein. Vanwege rekensnelheden van de 2D-modellen hebben we een aantal deeltjes in de permanent verzadigde zone geplaatst op -2 m t.o.v. maaiveld. De flux van subirrigatie is gemiddeld 590 mm/jaar voor de rekenperiode. Het modeldomein is 5 m in de verticaal. (NB niet alle deeltjes worden correct afgehandeld, we zijn in contact met de Hydrus-makers hierover).

Na bijna 150 dagen subirrigatie in het eerste jaar is te zien dat de deeltjes rondom de eerste drainbuis zich als een waaier verspreiden over een afstand van 1 à 1.5 m. Er gaan deeltjes naar boven, richting de wortelzone. De meeste deeltjes gaan neerwaarts richting de onderrand. De deeltjes in de verzadigde zone verplaatsen zich ongeveer 1 m naar beneden. Er is iets verschil in laterale beweging bij de watergang tussen scenario 1 en 2 (meer lateraal). Deeltjes aan de kant van de watergang blijven daar qua diepteligging achter.

Na het eerste jaar van subirrigatie tijdens het eerste seizoen en bij de start van seizoen twee, zijn de deeltjes 2.5 tot 3 m verder gestroomd. Dit is een combinatie van het effect van de stroming van het subirrigatiewater en het neerslagoverschot in de winter. Een aantal deeltjes in de permanent verzadigde zone bereikt zowat de onderrand.

Na een tweede jaar van subirrigatie zijn bijna alle deeltjes bij/over de onderrand, behalve die aan de kant van de watergang naast de eerste drainbuis.

Overall komt het erop neer dat met de toegepaste subirrigatie flux van gemiddeld 590 mm/jaar (ruim 3.2 mm/dag) de verblijftijd van water dat niet naar de wortelzone stroomt vanaf de drainagebuis op -1 m naar de model-onderrand op -5 m t.o.v. maaiveld ongeveer twee jaar is. De verticale afstand die dan overbrugd wordt is ongeveer 2 m/jaar. Grof geschat betekent dit dat als het filter van een beregeningsput op -10 m ligt, dat lokaal opgepompt grondwater binnen 4 à 5 jaar terug kan zijn op de diepte waar het putfilter zich bevindt.



Figuur 19: Strooming van deeltjes, die met de grondwaterstroming meegevoerd worden door de bodem, voor verschillende scenarios en tijdstippen.

4 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is om via hydrologische modellering met SWAP aangevuld met enkele detailanalyses met Hydrus-2D inzicht te krijgen in de efficiëntie van subirrigatie ten opzichte van haspelberegening, met het lokale ondiepe grondwater als bron.

4.1 Antwoorden op onderzoeksvragen

Op basis van de modelanalyses zijn de volgende antwoorden op de onderzoeksvragen geformuleerd:

Onder welke condities en in welke mate leidt subirrigatie tot een verandering van de werkelijke transpiratie t.o.v. die bij beregening?

Als er enige weerstand is tegen wegzijging, af te leiden uit het stijghoogteverschil tussen de freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket, en de grondwaterstand in de uitgangssituatie niet te diep zit (ondieper dan 2m-mv), kan de grondwaterstand met subirrigatie gedurende het groeiseizoen dusdanig worden verhoogd dat de werkelijke transpiratie nagenoeg gelijk is aan de potentiële transpiratie. Droogtestress wordt daarmee opgeheven voor bodems met een goede capillaire nalevering, zoals zwak lemig fijn zand. Voor grof zand wordt droogtestress niet volledig opgeheven. Uit de simulaties volgt dat een verschil in grondwaterstand en stijghoogte van zo'n 20 cm al duidt op voldoende weerstand tegen wegzijging.

Met beregening kan droogtestress ook worden opgeheven, maar beregening kan, praktisch gezien, niet continu plaatsvinden. Op basis van praktijkervaringen is immers aangenomen dat er minimaal 20 dagen tussen twee beregeningsbeurten zit. Zo ontstaan er toch periodes met droogtestress, met een lagere transpiratie tot gevolg. De weerstand tegen wegzijging is voor beregening van minder belang; de werkelijke transpiratie neemt iets toe bij een grotere weerstand, maar de verschillen zijn beperkt.

Wat is het verschil in beregening en subirrigatie in termen van efficiënt gebruik van aangevoerd/aangewend water?

Voor subirrigatie wordt gedurende het groeiseizoen *bruto* meer water aangevoerd/aangewend dan voor beregening; hoeveel meer hangt af van diverse factoren, waaronder het gewas, bodemtype en de diepte van de grondwaterstand in de uitgangssituatie. Naarmate de wegzijging kleiner is, is er (vanzelfsprekend) minder water nodig voor subirrigatie. Aanbevolen wordt om de opgebouwde buffer ook in de winter vast te houden en niet via het oppervlaktewater af te voeren. Hierop dient het peilbeheer van de kavelslo(o)t(en) aangepast te worden. Daarnaast dienen ook de energiekosten van subirrigatie en beregening meegenomen te worden in de verdere beschouwingen. Verschillende benodigde waterhoeveelheid, opvoerhoogte en druk zijn hierbij van belang om subirrigatie en beregening te vergelijken.

Om de resultaten van de berekeningen te duiden, is het van belang te weten dat het opgepompte en aangewende grondwater dat bij subirrigatie weer naar de ondergrond stroomt *niet* als verlies wordt beschouwd, uit het oogpunt van de grondwatervoorraad.

Daardoor is het verschil voor de *netto* wateraanvoer tussen subirrigatie en beregening klein.

Bij een te hoge wegzijging kan niet voldoende water aangevoerd worden via subirrigatie om de wegzijging te compenseren. Bij een te grote wegzijging is beregening efficiënter dan subirrigatie. Bij zeer lage weerstanden en grote wegzijging is subirrigatie zelfs niet effectief voor gewastranspiratie; de benodigde stijging van de grondwaterstand kan dan simpelweg niet worden gerealiseerd.

De gekozen definitie voor de efficiëntie van subirrigatie en beregening maakt vergelijking tussen subirrigatie en beregening voor een bepaalde bodem-gewas combinatie mogelijk. Echter, vergelijking tussen verschillende gewassen is niet zondermeer mogelijk, omdat het groeiseizoen en de potentiële transpiratie van gewassen verschilt.

Wat is het effect van gewas, bodemtype, bodemopbouw en het regionale grondwatersysteem op de efficiëntie van subirrigatie?

Met subirrigatie wordt in alle bodem-gewascombinaties, met uitzondering van de combinatie gras op grof zand, een hogere efficiëntie bereikt dan met beregening. Voor subirrigatie is de capillaire nalevering van de bodem van belang, met name wanneer de grondwaterstand niet tot een voldoende hoog niveau kan worden gebracht. Daardoor is er voor de combinatie gras op grof zand sprake van een lagere efficiëntie voor subirrigatie dan voor beregening bij een lage weerstand tegen wegzijging.

Welke condities leiden onder welke omstandigheden tot de meest efficiënte toepassing van subirrigatie?

Capillaire nalevering bevordert de werking van subirrigatie. Is de capillaire nalevering beperkt en is er ook sprake van een lage weerstand tegen wegzijging van het geïnfiltreerde water, dan is subirrigatie niet efficiënt. Als aanwezige leemlagen en dergelijke in de uitgangssituatie leiden tot een stijghoogteverschil van ten minste 20 cm, dan kan subirrigatie efficiënt zijn. Al met al kan geconcludeerd worden dat subirrigatie het meest geschikt is voor bodems die in staat zijn om enige capillaire nalevering te realiseren. De grondwaterstand in de uitgangssituatie mag gegeven de bovenstaande condities best in de zomer tot 2 m-m.v. dalen.

Zijn de aannames (i.e. modelconcept, 1D) bij het gebruik van SWAP voor deze analyse (voldoende) geldig? En wat is de meerwaarde van het doen van 2D-berekeningen in de analyse ten opzichte van 1D SWAP-berekeningen?

De aannames bij het gebruik van SWAP voor berekeningen in dit project geven geen aanleiding tot twijfel aan de juistheid van de conclusies in dit rapport. Desalniettemin moet benadrukt worden dat het hier gaat om modelanalyses die de werkelijkheid op een vereenvoudigde wijze beschrijven en dus zullen afwijken van de werkelijke situatie in het veld. Daarnaast gaat het om fictieve profielen, die niet gekoppeld zijn aan een specifieke locatie. Voor meer gerichte analyses voor specifieke locaties dient de modelparametrisatie aangepast te worden. Ook is geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

SWAP is een 1D-model. Via de zogenaamde 'extended drainage' module is peilgestuurde drainage en subirrigatie met wateraanvoer gesimuleerd. Waterstroming van en naar een watergang wordt gesimuleerd en via de systeemweerstand en een stijghoogte in het diepe watervoerende pakket (regionaal systeem) wordt de wegzijging

uit een perceel gesimuleerd. SWAP rekent snel, waardoor een groot aantal combinaties van modelparameters kan worden doorgerekend.

Berekeningen met SWAP en Hydrus-2D zijn goed op elkaar afgestemd qua waterbalans en fluxen. De combinatie met Hydrus-2D voor enkele casussen geeft belangrijke aanvullende inzichten. Zo is het met een 2D-model mogelijk de stroming van en naar ontwateringsmiddelen expliciet meerdimensionaal in beeld te brengen. De fysieke schematisatie van het rekendomein en de ontwateringsmiddelen, waarbij de werking van watergang én drainagebuizen tegelijkertijd worden beschouwd, is een voordeel dat inzicht verschaft. Verschillen binnen een perceel worden inzichtelijk gemaakt. Er hoeft in het 2D-model geen gebruik te worden gemaakt van een (regionale) systeemweerstand, want er is een directe koppeling met veldmetingen van stijghoogte als onderrand van het model. Dit maakt de interpretatie eenvoudiger. Bovendien kan met Hydrus-2D een koppeling gemaakt worden met stoftransport in een perceel. In Hydrus-2D kunnen de rekenresultaten grafisch worden weergegeven in het 2D-vlak. Het biedt daarmee ook een ondersteuning van het ontwerp en de analyse van veldproeven, waarin de watergangen, peilvoering en het drainagesysteem expliciet in model gebracht kunnen worden. Hydrus-2D heeft langere reketijden dan SWAP door de vele detailinformatie.

De 2D-berekeningen laten zien dat er afvoer van subirrigatiewater kan plaatsvinden naar de kavelsloot, als de gewenste zomerpeilen in de kavelsloot niet kunnen worden gerealiseerd. Ook de ligging van de eerste drainagebuis die ingezet wordt voor subirrigatie ten opzichte van de kavelsloot speelt een rol inzake afvoer van subirrigatiewater naar het oppervlaktewater. Met Hydrus-2D is ook gekeken naar de tijd die het duurt voor subirrigatiewater om via neerwaartse stroming het grondwatersysteem te bereiken. Als een lokale onttrekkingsput met een filter op 10 m-mv wordt geplaatst, dan duurt het met de proefopzet zoals hier toegepast ongeveer 4 à 5 jaar voordat subirrigatiewater de diepte van het filter bereikt. Met de 2D-berekeningen maken we aldus inzichtelijk hoe de kavelsloot en het drainagesysteem werkt, hetgeen a priori relevant is voor het peilbeheer van de kavelsloot en de inrichting/aanleg van het drainagesysteem. Zo kunnen we met 2D-berekeningen qua ontwerp en inrichting komen tot passende stuwpeilen, aanleg van het drainagesysteem en de ligging en diepte van de onttrekkingsput.

4.2 Aanscherpen kansenkaart voor subirrigatie

De efficiëntie van subirrigatie uit grondwater en die van beregening op een locatie wordt bepaald door complexe interacties tussen de grondwaterstanden, wegzijging en verdamping op lokale én regionale schaal. De resultaten van dit onderzoek dragen bij aan de benodigde inzichten, maar kunnen niet voor de bepaling van de *regionale effecten* van subirrigatie uit grondwater en/of beregening uit grondwater gebruikt worden. Voor een kwantitatieve inschatting van toepassing en effecten van subirrigatie uit ondiep onttrokken grondwater op het grondwatersysteem op regionale schaal is nader onderzoek nodig.

Echter, op basis van deze studie zijn aanvullende inzichten verkregen om de kansenkaart van WPM (oktober 2016) voor subirrigatie (Van den Eertwegh et al. 2016) verder aan te scherpen en te concretiseren. Onderdeel daarvan is om op basis van de modelresultaten de grenswaarde voor de 'te compenseren infiltratie' (wegzijging) aan te passen. Daarnaast dienen aspecten als watervraag, bestaande infrastructuur, aanwezigheid leemlagen nog eens tegen het licht gehouden te worden.

We zien in een vervolgfase van dit project een actieve interactie voor ons met Ibrahim-berekeningen. Uitgaande van de lokale standplaatsen binnen dat regionale model, zijnde bodemtypes, laagopbouw, landgebruik en dergelijke, en de specifieke SWAP-kolommen kunnen we stijghoogteverschillen en berekende fluxen gaan vergelijken en onderling bijstellen (NB waterbalansen). Zo kunnen iteratief lokale en regionale modelberekeningen gebruikt worden om een regionaal vlakdekkend beeld te maken.

Het hebben van veldwaarnemingen in de uitgangssituatie en een situatie met subirrigatie is zeer waardevol voor de analyse en duiding van resultaten. Daarbij zijn fluxen, grondwaterstanden en vochtgehalten cruciaal.

5 Referenties

- Bartholomeus, R. P., G. A. P. H. Van den Eertwegh and M. Van Huijgevoort (2018). Subirrigatie met grondwater - Monitoring veldproef America, Waterschap Limburg. KWR 2018.029. Nieuwegein, KWR.
- Bartholomeus, R. P., A. H. Van Loon and M. H. J. Van Huijgevoort (2018). Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw - Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria. KWR 2018.089. Nieuwegein, KWR.
- Bartholomeus, R. P. and J. P. M. Witte (2013). Ecohydrological Stress - Groundwater To Stress Transfer; Theory and manual version 2.0. KWR 2013.088. Nieuwegein.
- De Lange, W. (1997). Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of drainageweerstand in de randvoorwaarde van een grondwatermodel. Deel 1: De basis voor het modelconcept. *Stromingen* (3) 4: 17-28.
- Delsman, J., F. Schasfoort, E. Van Boekel, M. Mulder, S. Reinhard, N. Polman, A. Van Loon, R. Bartholomeus, T. Te Winkel and L. Tolk (2016). Functioneel ontwerp Instrument opschalen lokale zoetwatermaatregelen - versie 1.0. Utrecht, Deltares.
- Feddes, R. A. and P. A. C. Raats (2004). Parameterizing the soil-water-plant root system. *Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges, Applications* R. A. Feddes, G. H. d. Rooij and J. C. Van Dam. Wageningen, Wageningen UR Frontis Series 6: 95-141.
- Klijn, F., J. ter Maat, E. Van Velzen, J. Hunink, N. Goorden, N. Kielen, W. Werkman, G. Baarse, V. Beumer and J. Delsman (2011). Zoetwatervoorziening in Nederland: Landelijke analyse knelpunten in de 21e eeuw, Deltares.
- 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. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- R Development Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Šimůnek, J. and M. Šejna (2018). Technical manual Hydrus version 3. Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. . Prague, Czech Republic, PC Progress.
- Skaggs, R. and Y. Tang (1979). Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. *Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers]*.
- Van Dam, J. C., P. Groenendijk, R. F. A. Hendriks and J. G. Kroes (2008). Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal* 7(2): 640-653.

Van den Eertwegh, G., A. Van Loon and R. Bartholomeus (2016). Kanskaart voor sub-irrigatie van landbouwgrond in het beheergebied van Waterschap Peel en Maasvallei - Achtergronddocument.

Van der Gaast, J. and H. T. L. Massop (2003). Spreidingslengte voor het beheergebied van Waterschap Veluwe, Alterra-rapport.

Van der Gaast, J., H. T. L. Massop, H. Vroon and I. Staritsky (2006). Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken, Alterra.

Wösten, J. H. M., G. J. Veerman, W. J. M. de Groot and J. Stolte (2001). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001 [Water retention and permeability characteristics of top and sub soils in the Netherlands: the Staring series. Renewed edition 2001]. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte.

Bijlage I Overzicht variabelen en grafieken

Tabel 1 Efficiëntie (dT_a/Q_{in}) van subirrigatie vs. oppervlakte-beregening ten aanzien van de gewasverdamping (transpiratie T_a) in het groeiseizoen. Bron van aanvoerwater is lokaal ondiep grondwater. Effectiviteit is gebaseerd op gemiddelde waarden over het groeiseizoen voor de periode 2003-2017. De range is gebaseerd op de minimum en maximum waarden die voorkomen binnen de modelsimulaties.

Gewas	Bodemtype	Hydrologie	Neerslag [mm/jaar]	Geen aanvoer		Beregening					Subirrigatie					
				T_a [mm/jaar]	Q_{in} irr [mm/jaar]	Q_{bot} [mm/jaar]	$dStorage$ [mm/jaar]	Q_{netto} [mm/jaar]	T_a [mm/jaar]	dT_a/Q_{in} [-]	Q_{in} irr [mm/jaar]	Q_{bot} [mm/jaar]	$dStorage$ [mm/jaar]	Q_{netto} [mm/jaar]	T_a [mm/jaar]	dT_a/Q_{in} [-]
Aardappel	Stuifzand	-100 cm	331	204-206	0-3	52 - 114	-43 - -20	307 - 354	204-206	0 - 0.001	30-376	56 - 398	-6 - 0	364 - 366	204-205	-0.004 - -0.002
		-175 cm	331	182-206	0-40	109 - 131	-88 - -36	321 - 358	198-206	0 - 0.045	132-713	159 - 728	-6 - 50	354 - 365	202-206	-0.005 - 0.058
		-250 cm	331	177-188	29-43	127 - 149	-83 - -49	350 - 355	196-200	0.036 - 0.053	234-715	261 - 773	-6 - 114	325 - 365	179-206	0.006 - 0.074
	Zwaklemig fijn zand	-100 cm	331	204-205	0	50 - 112	-40 - -17	302 - 353	204-205	0	29-300	55 - 328	-7 - -6	365 - 367	204	-0.004 - -0.001
		-175 cm	331	201-206	0-23	101 - 126	-93 - -52	314 - 363	204-206	-0.001 - 0.008	127-697	154 - 703	-7 - 26	363 - 366	204-206	-0.005 - 0.012
		-250 cm	331	198-203	16-28	127 - 141	-97 - -74	361 - 363	203-205	0.005 - 0.015	225-715	253 - 763	-16 - 84	355 - 365	201-205	0.002 - 0.018
	Enkeerdgrond	-100 cm	331	204-205	0	50 - 113	-41 - -18	303 - 354	204-205	0	28-299	55 - 328	-7	364 - 367	204	-0.003 - -0.001
		-175 cm	331	202-206	0-21	99 - 126	-92 - -52	314 - 363	204-205	-0.001 - 0.007	126-696	154 - 712	-7 - 25	362 - 366	204-206	-0.005 - 0.01
		-250 cm	331	199-203	18-28	126 - 141	-95 - -74	362 - 363	204-205	0.005 - 0.012	225-715	253 - 762	-16 - 70	355 - 365	201-206	0.002 - 0.016
	Grof zand	-100 cm	331	188-204	0-26	53 - 127	-48 - -30	314 - 364	200-204	0 - 0.033	21-327	56 - 360	-14 - -9	362 - 365	205	0.001 - 0.043
		-175 cm	331	178-196	15-34	120 - 142	-81 - -55	323 - 357	196-202	0.02 - 0.051	120-705	156 - 737	-14 - 47	337 - 364	184-205	0.02 - 0.07
		-250 cm	331	178-179	34	130 - 151	-85 - -63	353 - 356	196-197	0.05 - 0.051	220-715	257 - 787	-15 - 106	329 - 363	178-205	0 - 0.072
Groente	Stuifzand	-100 cm	331	136-140	0	78 - 135	-35 - -8	272 - 316	136-140	0	23-479	82 - 526	-3 - 19	321 - 330	134-138	-0.012 - -0.005
		-175 cm	331	126-140	0-26	134 - 149	-67 - -29	280 - 313	134-140	0 - 0.027	123-713	184 - 764	-3 - 55	311 - 329	135-140	-0.013 - 0.04
		-250 cm	331	124-131	21-32	144 - 162	-61 - -33	307 - 309	134-136	0.016 - 0.033	226-715	286 - 797	-2 - 125	289 - 327	125-140	0.004 - 0.048
	Zwaklemig fijn zand	-100 cm	331	138-139	0	76 - 135	-33 - -8	270 - 318	138-139	0	20-401	79 - 456	-4 - 7	323 - 331	137-138	-0.005 - -0.001
		-175 cm	331	138-140	0-16	127 - 145	-71 - -28	275 - 319	139-140	0 - 0.004	117-689	178 - 733	-4 - 31	319 - 329	137-140	-0.006 - 0.005

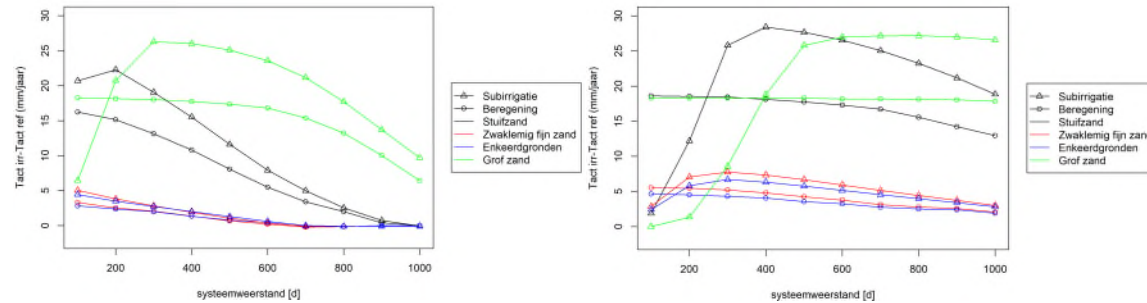
KWR

Mais	Enkeerdgrond	-250 cm	331	136-139	7-19	144 - 155	-77 - -57	319 - 320	139-140	0.001 - 0.009	216-715	277 - 789	-3 - 90	313 - 327	138-140	-0.005 - 0.011
		-100 cm	331	138-139	0	76 - 135	-34 - -8	271 - 318	138-139	0	20-401	79 - 456	-4 - 7	324 - 331	137-138	-0.005 - -0.001
		-175 cm	331	138-140	0-13	126 - 145	-70 - -29	275 - 319	139-140	0 - 0.004	117-688	178 - 741	-4 - 31	318 - 329	137-139	-0.006 - 0.005
	Grof zand	-250 cm	331	136-139	7-19	143 - 155	-76 - -57	319 - 319	139-140	0.001 - 0.007	216-715	277 - 790	-3 - 77	314 - 327	138-140	-0.004 - 0.01
		-100 cm	331	131-139	0	77 - 145	-43 - -14	281 - 322	138-140	0 - 0.021	14-449	80 - 490	-7 - 25	320 - 326	137-139	-0.005 - 0.022
		-175 cm	331	126-137	9-23	139 - 156	-64 - -37	289 - 317	136-139	0.007 - 0.03	113-699	181 - 758	-7 - 53	302 - 325	129-139	0.003 - 0.038
		-250 cm	331	126-127	23	145 - 161	-67 - -50	315 - 316	135-136	0.027 - 0.03	215-715	282 - 806	-4 - 112	299 - 323	126-139	0 - 0.04
	Stuifzand	-100 cm	386	266	0	25 - 68	-46 - -34	364 - 404	266	0	28-247	37 - 262	-8 - -5	380 - 382	266	-0.001 - 0
		-175 cm	386	236-265	3-38	104 - 133	-106 - -43	363 - 374	255-265	0 - 0.051	145-766	157 - 802	-18 - 35	369 - 381	263-266	0.004 - 0.072
		-250 cm	386	228-241	34-44	138 - 160	-97 - -67	359 - 366	251-258	0.043 - 0.064	263-767	277 - 867	-47 - 97	333 - 380	231--266	0.013 - 0.096
		-100 cm	386	265	0	22 - 58	-41 - -33	368 - 405	265-266	0	26-201	36 - 214	-7 - -5	380 - 382	265	-0.002 - -0.001
		-175 cm	386	257-266	0-25	99 - 123	-109 - -63	372 - 379	264-266	0 - 0.017	140-760	152 - 778	-8 - 11	376 - 380	265-266	-0.003 - 0.021
	Enkeerdgrond	-250 cm	386	251-260	21-32	139 - 149	-112 - -94	373 - 376	262-265	0.012 - 0.029	255-767	269 - 853	-64 - 74	364 - 380	257-266	0.012 - 0.037
		-100 cm	386	265	0	22 - 59	-41 - -33	367 - 404	265-266	0	26-200	36 - 214	-7 - -6	379 - 382	265	-0.002 - -0.001
		-175 cm	386	260-266	1-22	94 - 121	-108 - -62	371 - 379	264-266	0 - 0.012	140-759	152 - 787	-18 - 7	376 - 380	265-266	-0.002 - 0.015
		-250 cm	386	254-262	19-31	137 - 148	-113 - -95	374 - 376	263-265	0.008 - 0.022	254-767	269 - 850	-63 - 61	367 - 379	259-266	0.008 - 0.027
	Grof zand	-100 cm	386	243-252	6-28	32 - 100	-47 - -37	355 - 397	255-257	0.007 - 0.035	6-200	37 - 237	-17 - -13	366 - 369		0.01 - 0.032
		-175 cm	386	224-243	25-43	129 - 152	-93 - -61	355 - 366		0.033 - 0.065	120-764	155 - 826	-21 - 23	345 - 367	238-255	0.033 - 0.075
		-250 cm	386	224-226	43	145 - 165	-96 - -75	359 - 362	247-248	0.063 - 0.066	235-767	273 - 894	-69 - 94	329 - 365	224-254	0.001 - 0.08
Gras	Stuifzand	-100 cm	745	416 - 536	0 - 12	120 - 150	-1 - 0	492 - 629	525 - 536	0 - 0.01	78 - 848	175 - 973	0	620 - 647	535 - 536	-0.001 - 0.028
		-175 cm	745	519 - 536	53 - 101	200 - 272	-3 - 0	607 - 624	484 - 514	0.054 - 0.114	330 - 912	434 - 1107	-1 - 0	548 - 640	469 - 536	0.084 - 0.166
		-250 cm	745	419 - 482	101 - 103	271 - 285	-1 - 0	574 - 600	476 - 486	0.118 - 0.127	574 - 911	687 - 1171	-1 - 1	484 - 631	408 - 536	0.006 - 0.204
	Zwaklemig fijn zand	-100 cm	745	405 - 419	0 - 7	119 - 135	0	562 - 575	536 - 536	0 - 0.004	72 - 749	170 - 870	0	624 - 647	536 - 536	-0.001 - 0.005

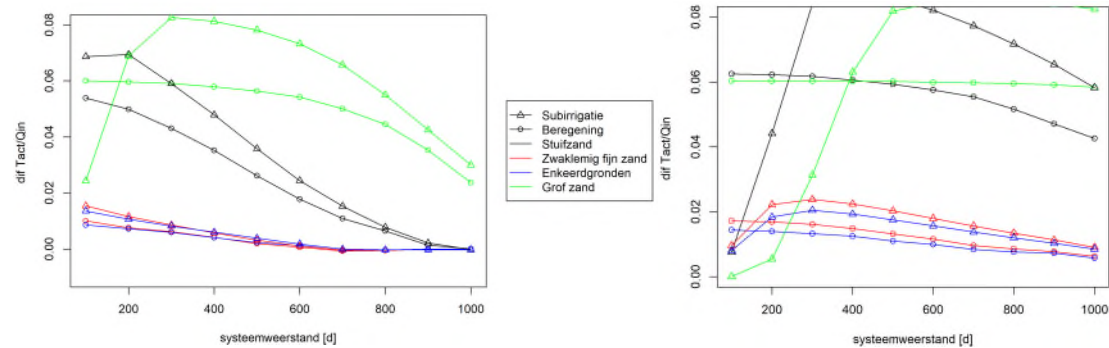
KWR

Enkeerdgrond	-175 cm	745	533 - 536	31 - 69	163 - 208	-1 - 0	615 - 625	520 - 532	0.022 - 0.058	318 - 910	421 - 1050	-1 - 0	605 - 641	526 - 536	0.027 - 0.073
	-250 cm	745	485 - 518	69 - 82	214 - 231	-3 - 0	606 - 614	513 - 518	0.066 - 0.077	555 - 913	667 - 1104	-1 - 1	551 - 632	475 - 536	0.016 - 0.105
	-100 cm	745	466 - 479	0 - 12	120 - 140	0	596 - 603	535 - 536	0 - 0.006	72 - 750	170 - 871	0	624 - 647	536 - 536	-0.001 - 0.008
Grof zand	-175 cm	745	531 - 536	31 - 67	163 - 205	-1 - 0	615 - 624	522 - 531	0.022 - 0.052	318 - 910	421 - 1052	-1 - 0	603 - 641	524 - 536	0.029 - 0.065
	-250 cm	745	490 - 517	67 - 81	210 - 227	-3 - 0	607 - 614	515 - 520	0.059 - 0.071	555 - 913	667 - 1096	-1 - 1	558 - 632	482 - 536	0.017 - 0.094
	-100 cm	745	473 - 484	10 - 88	131 - 238	-1 - 0	599 - 605	504 - 531	0.009 - 0.098	71 - 805	173 - 938	0	612 - 643	528 - 536	0.016 - 0.133
	-175 cm	745	446 - 526	89 - 95	245 - 266	-1 - 0	596 - 623	485 - 499	0.11 - 0.121	320 - 910	428 - 1151	-1 - 1	503 - 637	424 - 536	0.017 - 0.185
	-250 cm	745	416 - 434	95	268 - 270	-1 - 0	574 - 590	484 - 485	0.121 - 0.121	562 - 910	678 - 1162	-1 - 1	620 - 647	416 - 536	0 - 0.189

Aardappel

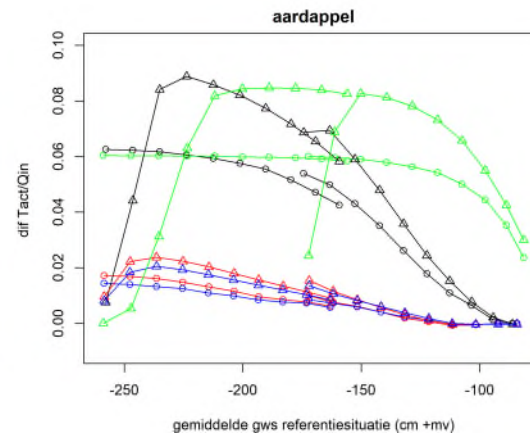
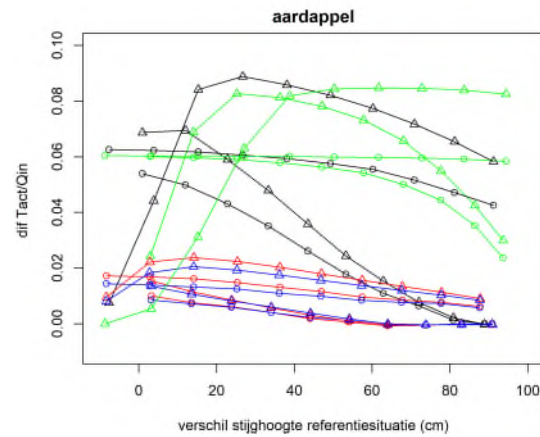


Verskil in gemiddelde transpiratie tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

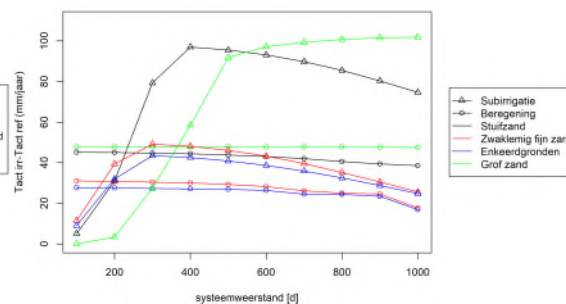
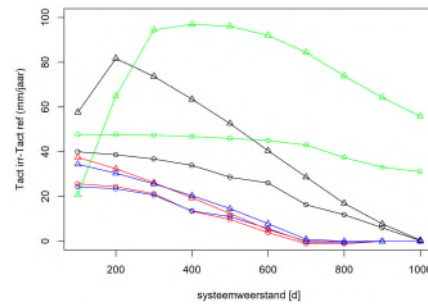


Efficiëntie van de irrigatie voor gemiddelde waarden over het groeiseizoen voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR

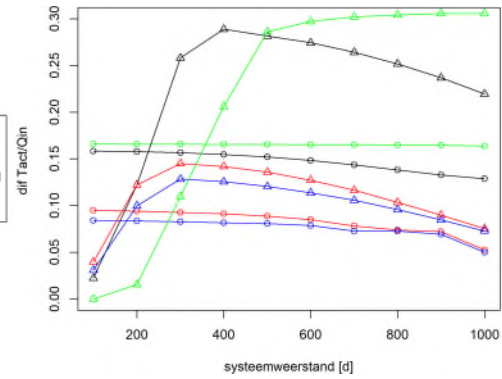
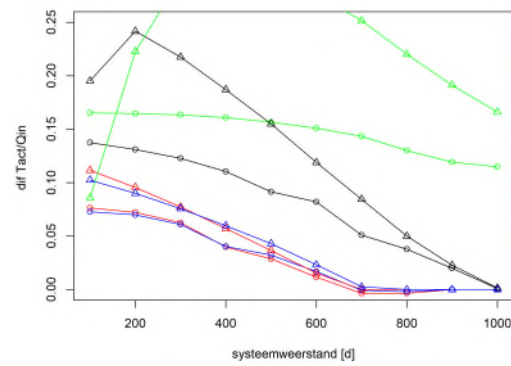


Efficiëntie van de irrigatie voor een stijghoogte van -175 cm en -250 cm uitgezet tegen het verschil in stijghoogte (links) en de gemiddelde grondwaterstand (rechts), legenda is gelijk aan de vorige figuren.



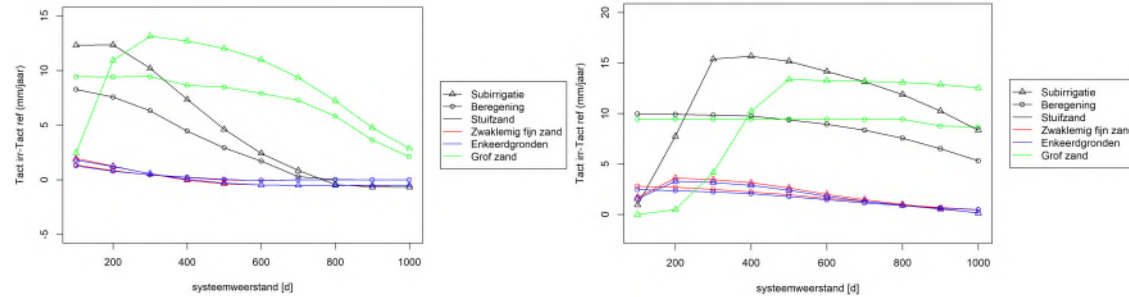
Verschied in transpiratie in 2003 tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR

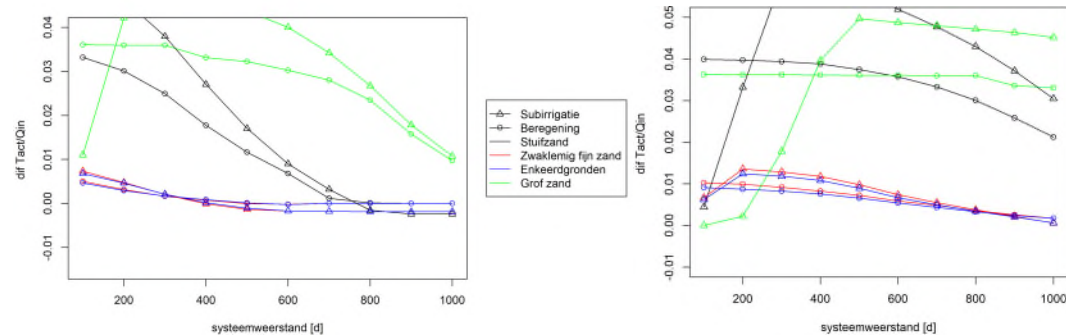


Efficiëntie van de irrigatie voor 2003 voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

Groente

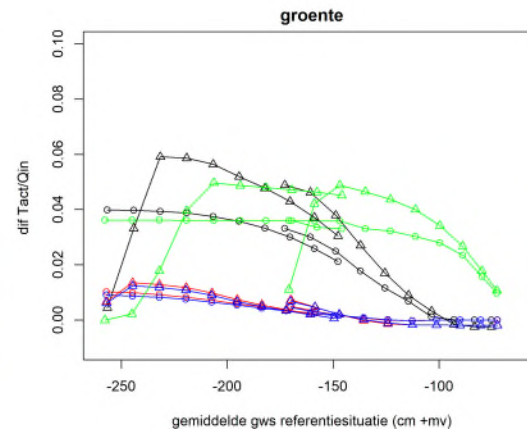
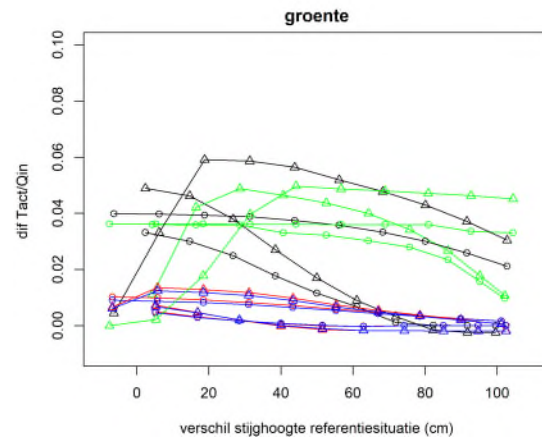


Verskil in gemiddelde transpiratie tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).



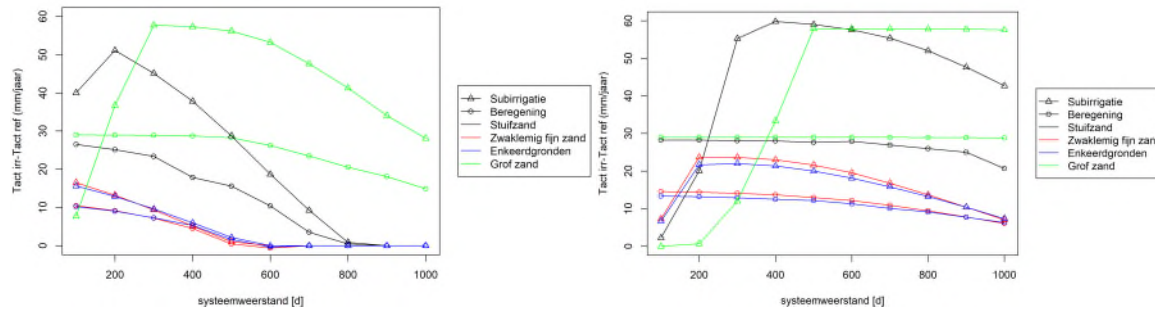
Efficiëntie van de irrigatie voor gemiddelde waarden voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR

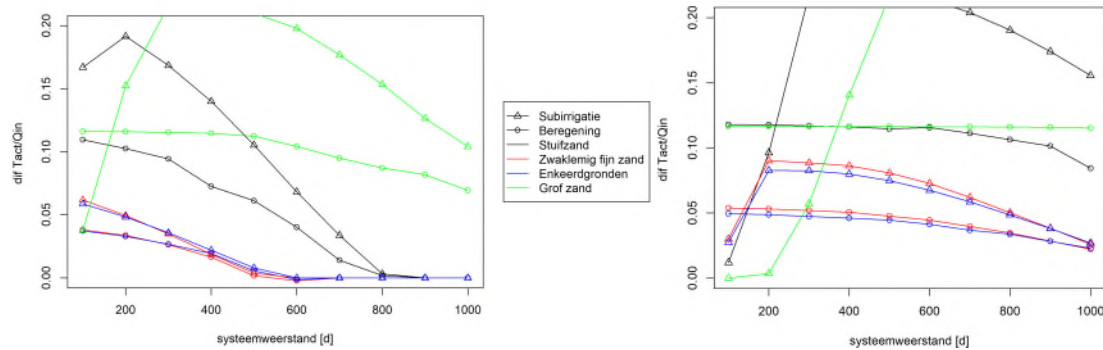


Efficiëntie van de irrigatie voor een stijghoogte van -175 cm en -250 cm uitgezet tegen het verschil in stijghoogte (links) en de gemiddelde grondwaterstand (rechts), legenda is gelijk aan de vorige figuren.

KWR

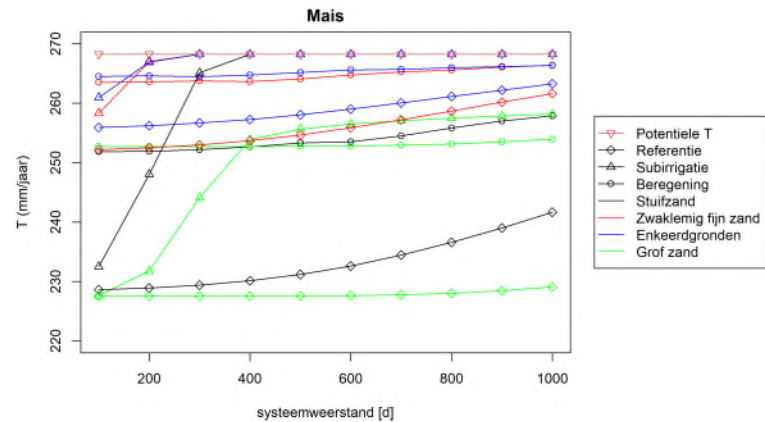


Verskil in transpiratie in 2003 tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

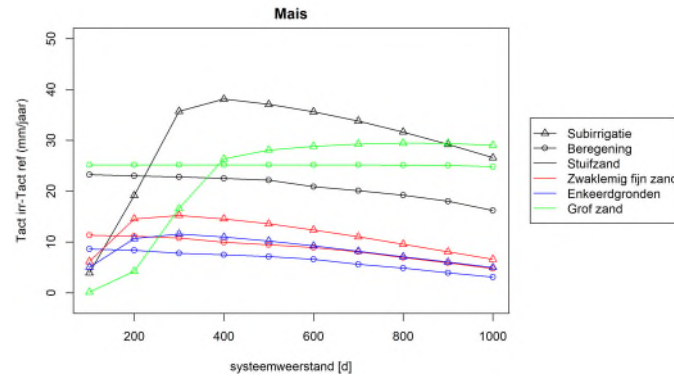
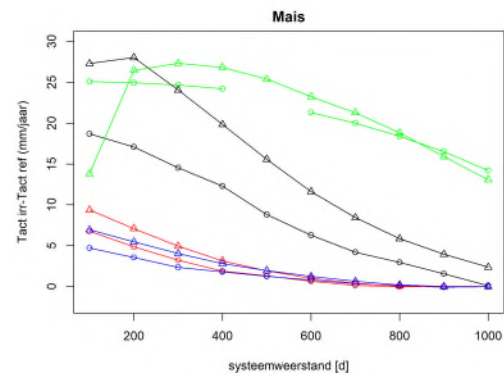


Efficiëntie van de irrigatie voor 2003 voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

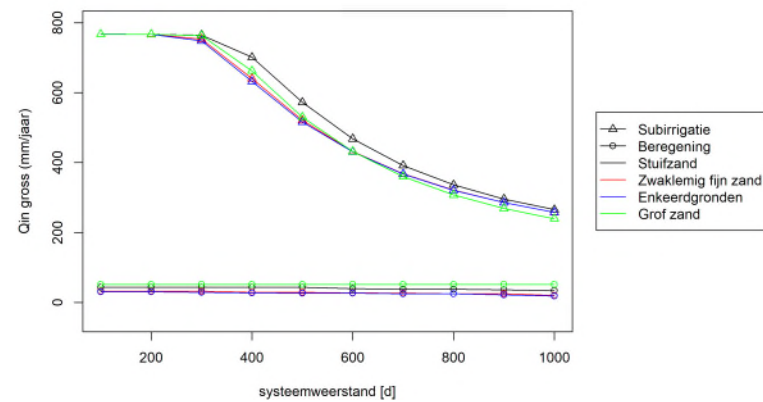
Mais



Gemiddelde potentiële en actuele transpiratie voor de referentiesituatie, situatie met beregening en situatie met subirrigatie voor een stijghoogte van - 250 cm.

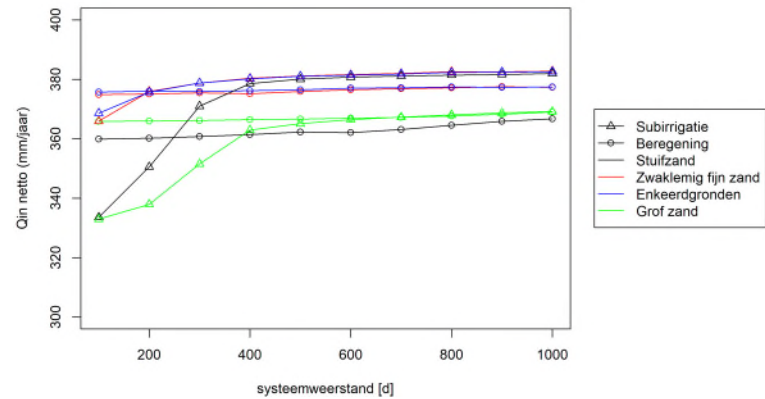


Verskil in gemiddelde transpiratie tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

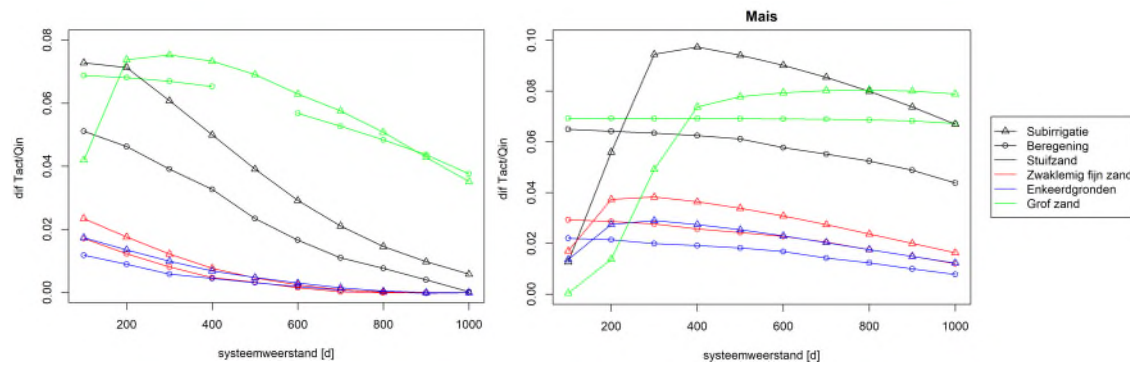


Bruto gemiddelde wateraanvoer voor de situatie met beregning en met subirrigatie voor een stijghoogte van -250 cm.

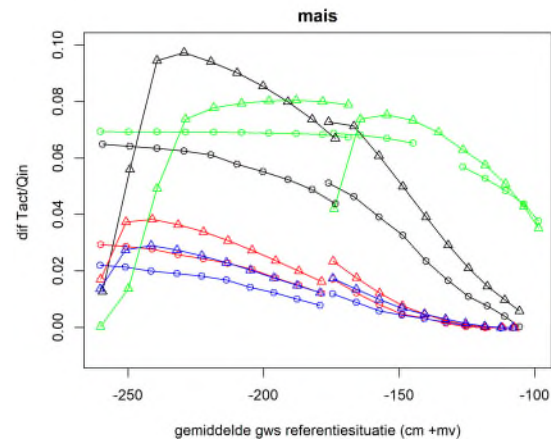
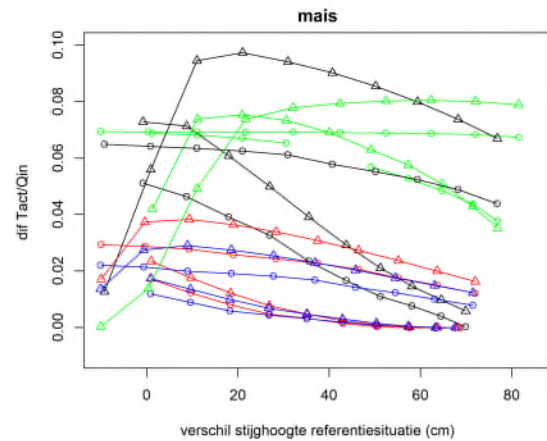
KWR



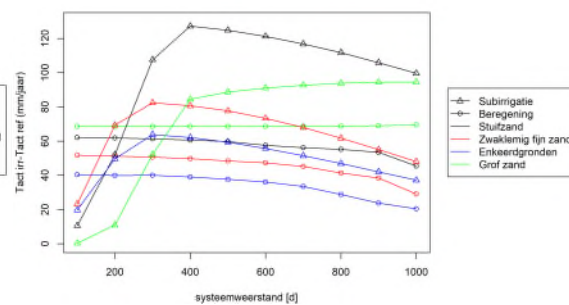
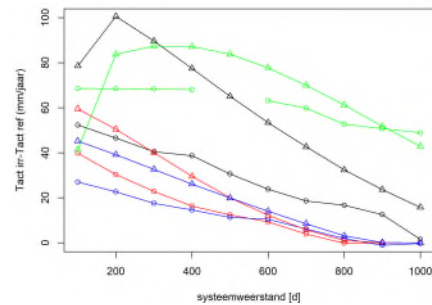
Netto gemiddelde wateraanvoer voor de situatie met berekening en subirrigatie voor een stijghoogte van -250 cm.



Efficiëntie van de irrigatie voor gemiddelde waarden voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

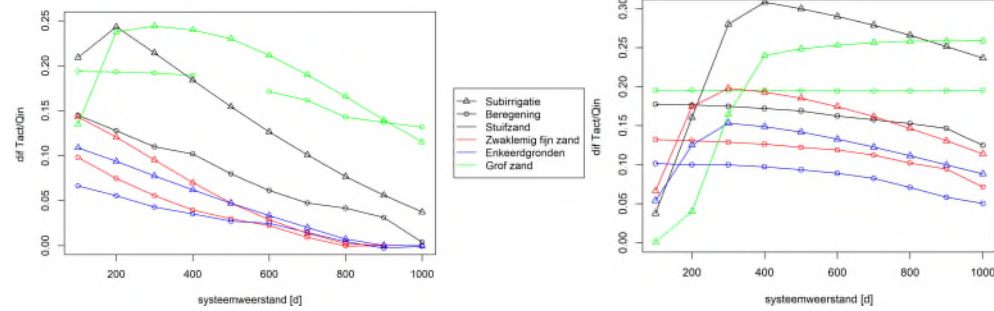


Efficiëntie van de irrigatie voor een stijghoogte van -175 cm en -250 cm uitgezet tegen het verschil in stijghoogte (links) en de gemiddelde grondwaterstand (rechts), legenda is gelijk aan de vorige figuren.



Verskil in transpiratie in 2003 tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

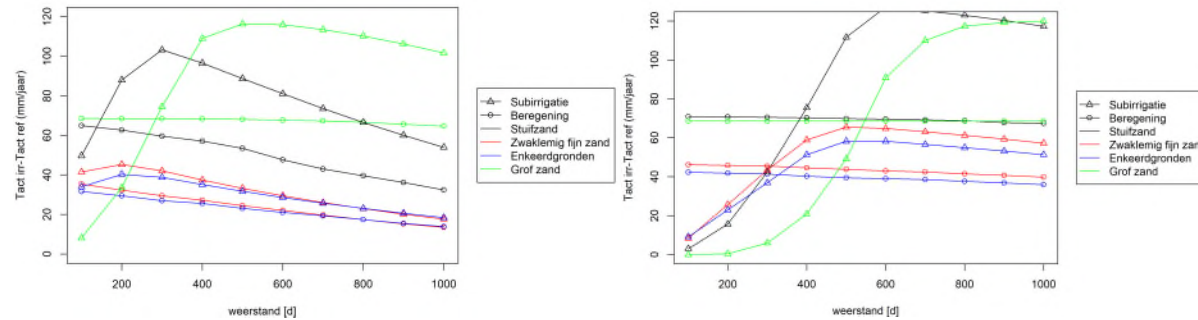
KWR



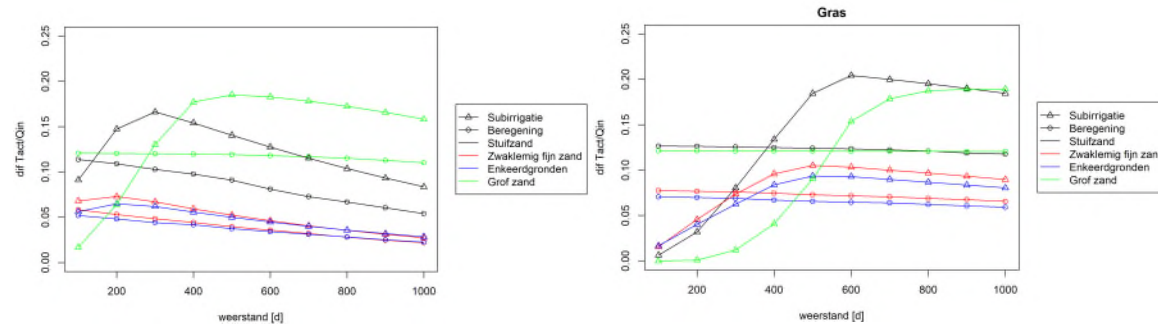
Efficiëntie van de irrigatie voor 2003 voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR

Gras

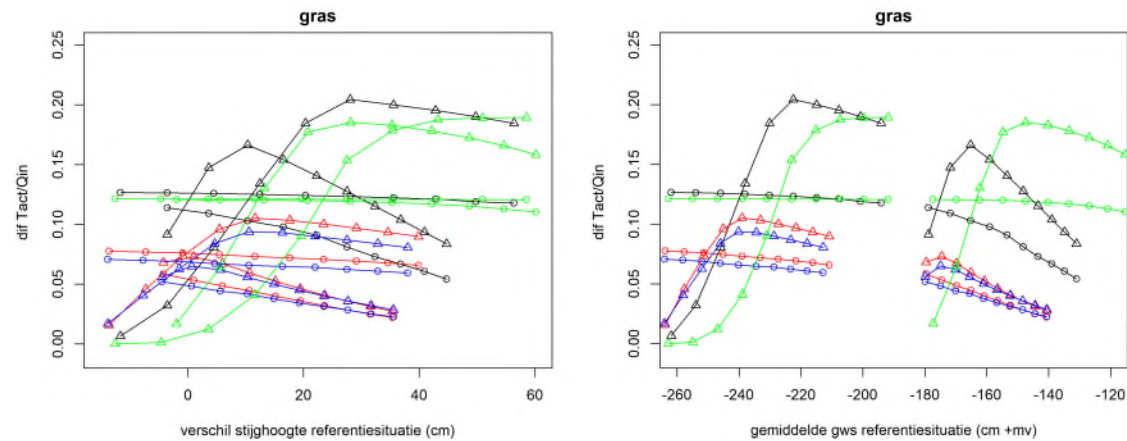


Verskil in gemiddelde transpiratie tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

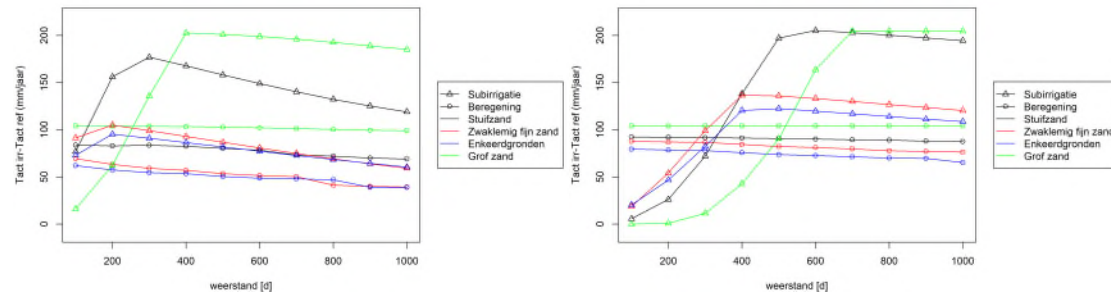


Efficiëntie van de irrigatie voor gemiddelde waarden voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR

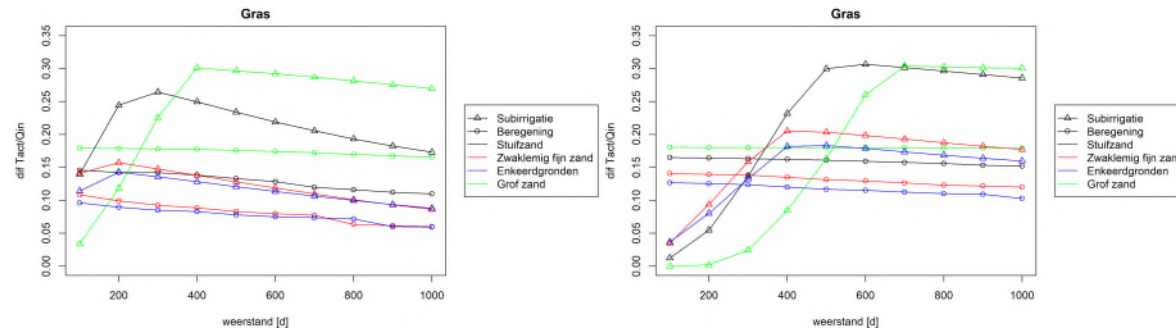


Efficiëntie van de irrigatie voor een stijghoogte van -175 cm en -250 cm uitgezet tegen het verschil in stijghoogte (links) en de gemiddelde grondwaterstand (rechts), legenda is gelijk aan de vorige figuren.



Verskil in transpiratie in 2003 tussen de situatie met irrigatie en de referentiesituatie voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).

KWR



Efficiëntie van de irrigatie voor 2003 voor een stijghoogte van -175 cm (links) en -250 cm (rechts).