

KWR 2021.029 | Maart 2021

# Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren

Ontwerp en monitoring van vijf  
veldproeven met (automatisch gestuurde)  
regelbare drainage met subirrigatie en  
slimme stuw in Stegeren (2017-2020)



## Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren

Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020)

KWR 2021.029 | Maart 2021

### Opdrachtnummer

402088 (WiCe), 402287 (Lumbricus)

### Projectmanager

Klaasjan Raat

### Opdrachtgever

Programma Lumbricus

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

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

### Auteurs

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

### Kwaliteitsborger

Dr. ir. Gijsbert Cirkel

### Verzonden naar

Betrokkenen bij Programma Lumbricus en WiCE

Dit rapport is openbaar.

### Keywords

droogte, wateroverlast, landbouw, klimaatadaptatie, subirrigatie

Jaar van publicatie  
2021

### Meer informatie

J.A. (Janine) de Wit  
T 030-6069651  
E [janine.de.wit@kwrwater.nl](mailto:janine.de.wit@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



# KWR

Maart 2021 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden veelevoudigd, 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.

# Dankwoord

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

Cruciaal voor de proeven in Stegeren waren de agrariërs, die actief meededen en meedoen, meedenken en meewerken: Evert Kremer, Maarten Paarhuis, Robert Geertman, Hendrikus Spoelman, Herman en Gerald Hemstede. Zonder hen hadden we geen proefvelden en hadden we geen proeven kunnen doen. De samenwerking met landeigenaren, waterschappen en onderzoekers vanuit verschillende disciplines is heel waardevol gebleken.

# Samenvatting

**Belang:** Klimaatverandering leidt naar verwachting tot toenemende droogteschade aan landbouw en natuur, en druk op waterbeschikbaarheid voor hoogwaardige toepassingen, zoals de productie van drinkwater. In de afgelopen jaren (2018, 2019 en het voorjaar 2020) was het extreem droog, waar alle sectoren de gevolgen van hebben ondervonden. Naast deze perioden van droogte komen ook steeds meer piekbuien voor, die direct tot wateroverlast leiden. Een veerkrachtiger, robuustere zoetwatervoorziening is nodig om risico's van droogte en wateroverlast beheersbaar te maken voor verschillende sectoren. Dat kan bereikt worden door water vast te houden en aan te vullen wanneer nodig. Als wateroverlast dreigt, moet er tijdig ruimte worden gemaakt om juist water af te voeren.

Twee specifieke praktijktoepassingen voor het actief beheer van het vasthouden, gebruik en aanvullen van grondwater op perceelniveau zijn regelbare drainage met subirrigatie en de slimme stuw (Slimme Adaptieve Waterbeheer eXtender: SAWAX). Regelbare drainage met subirrigatie ('omgekeerde drainage') en de slimme stuw SAWAX beogen een bijdrage te kunnen leveren aan het beperken van de effecten van watertekorten, maar ook aan het voorkómen van wateroverlast. Dit doen ze door water zoveel mogelijk vast te houden, aan te vullen waar het kan en afvoeren als het moet. De regelbare drainage met subirrigatie wordt specifiek op perceelniveau toegepast. Het doel van subirrigatie is om via een stijging van het grondwaterniveau de vochtbeschikbaarheid van het gewas te verbeteren. De SAWAX heeft als doel het peil in kavelsloten automatisch naar boven toe (hoger peil) mee te laten bewegen met het door het waterschap gevoerde peil in de hoofdwatgangen. Zo wordt de drainagebasis in de haarvaten verhoogd ten tijde van hogere peilen en waterafvoer, om (meer) water (langer) vast te houden en te bergen in de haarvaten. Om in de zomerperiode water aan te kunnen voeren naar de haarvaten en een peilverschil te realiseren, kan water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden gepompt, bij voorkeur op zonne-energie.

**Aanpak:** Binnen het programma Lumbricus zijn in Stegeren (Overijssel) vijf percelen ingericht met klimaatadaptieve watermaatregelen. Op twee percelen heeft uitgebreide monitoring plaatsgevonden. Bij vier percelen gaat het om systemen met regelbare drainage met subirrigatie (waarvan één met KAD) en bij één kavelsloot is een SAWAX-stuw aangelegd, waarbij we op één perceel de effecten ervan gemeten hebben. Dit rapport bevat de technische beschrijving van de opzet van de proeven en de belangrijkste meetresultaten voor de periode juli 2018 tot en met maart 2020. Hierbij is ook specifiek gekeken naar de mogelijkheden voor het automatisch sturen van de systemen met een KAD-management-algoritme.

Naast deze technische rapportage voor Stegeren, zijn er technische rapportages verschenen van drie andere veldproeven/locaties met regelbare drainage met subirrigatie. Deze veldproeven zijn samengebracht in een overkoepelende (model)analyse en rapportage (De Wit et al., 2021). Hierin wordt voor de hogere zandgronden ingegaan op de betekenis van de onderzochte watermaatregelen op de watervoorziening van het gewas, verschillende componenten van de waterbalans op lokale en regionale schaal en beleidsmatige aspecten. Deze aspecten zijn dan ook geen onderdeel van deze rapportage.

**Resultaten en conclusies:** Alle drainagesystemen voor de veldproeven in Stegeren zijn inclusief de nieuwe technieken aangelegd gedurende de looptijd van het Programma Lumbricus. Tijdens het eerste jaar van de proeven (2019) traden er dan ook kinderziektes op in de nieuwe, geïnstalleerde apparatuur, wat een aantal leerpunten opleverde. Dit betreft met name de pompen voor de aanvoer van water voor subirrigatie en het gebruik van zonnepanelen en accu's voor de energievoorziening. De veldproeven dragen dan ook bij aan het leren van praktische zaken, waardoor systemen beter ingesteld kunnen worden op de praktijkomstandigheden.

Uit de veldproeven blijkt dat het grondwaterniveau kan worden verhoogd met behulp van een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie vanuit het oppervlaktewater. Op het perceel met KAD zijn naast de grondwaterstand ook de waterniveaus in de regelput en afvoerput, bodemvochtgehaltes in de wortelzone en aanvoerdebieten vanuit het oppervlaktewater gemeten. Uit deze metingen volgt dat de verhoging van het grondwaterniveau tot een verhoging van het bodemvochtgehalte leidt. Zo steeg op dit perceel in april 2019 het bodemvochtgehalte (tussen de drains, op 40 cm-mv) van 0.24 naar 0.31, als gevolg van subirrigatie. Hoewel er niet op volledige capaciteit water is aangevoerd in 2019, is er toch 515 mm water via subirrigatie aangevoerd. De resultaten laten zien dat hiermee in 2019 een stijging van het grondwaterniveau van maximaal 20 cm gerealiseerd kon worden.

Uit de bevindingen met de watermaatregel slimme SAWAX-stuw blijkt dat in de winterperiode, i.e. periode van neerslagoverschot, de SAWAX zorgt voor een hoger oppervlaktewaterpeil bovenstrooms van de stuw vergeleken met benedenstrooms, zoals van een beweegbare stuw verwacht mag worden. Het is gelukt om water bovenstrooms vast te houden op een hoger peil in een water-afvoer-situatie. We hebben de proef met de SAWAX ook doorgezet tijdens een water-aanvoer-situatie. In dezelfde veldproef tijdens een zeer droge zomer is het niet gelukt een structureel peilverschil te realiseren tussen bovenstrooms (hoger peil) en benedenstrooms (lager peil) van de SAWAX. Dit werd veroorzaakt door de combinatie van een te lage pompcapaciteit én een hoge wegzijging in het bovenstroomse deel van de watergang. In andere situaties in andere delen van het zandgebied van Nederland is dit zeker wel mogelijk.

Voor één proefperceel is het KAD-management-algoritme verder uitgewerkt en operationeel gemaakt met als doel het drainageniveau van het regelbare drainagesysteem automatisch te sturen. Het is gelukt een geautomatiseerde connectie te maken voor het dagelijks online aansturen van het aanbevolen drainageniveau in het KAD-systeem gebaseerd op het rekenalgoritme. Door de extreem droge weersomstandigheden in 2019, en een onvoldoende stijging van de grondwaterstand bij de gegeven wateraanvoer, is het niet gelukt om het effect van de automatische sturing op de vochtcondities voor het gewas onder droge condities te testen.

De verschillende agrariërs zijn actief betrokken geweest bij het project door, onder andere, ook zelf handmetingen te verrichten (Breman et al., 2019). Dit heeft een positief effect op het onderzoek door zowel meer beschikbare handmetingen als het vergroten van het begrip en inzicht van het bodem-watersysteem. Het actieve contact zorgde er ook voor dat er snel kon worden geanticipeerd op eventuele technische storingen van het systeem, waardoor dit sneller opgelost kon worden. Dit kwam de samenwerking tussen agrariërs, waterschap en onderzoekers en het slagen van de proeven ten goede.

# Inhoudsopgave

Dankwoord	2
Samenvatting	3
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1 Aanleiding	6
1.2 Afbakening onderzoek	7
1.3 Programma Lumbricus	7
1.4 Leeswijzer	8
<b>2 Achtergrond</b>	<b>9</b>
2.1 Regelbare drainage met subirrigatie	9
2.2 Aansturing KAD: management-algoritme	9
2.3 SAWAX slimme stuw	10
<b>3 Opzet veldproeven</b>	<b>12</b>
3.1 Gebiedsomschrijving Stegeren	12
3.1.1 Bodemkundige beschrijving	12
3.1.2 Hydrologische beschrijving	13
3.2 Bodemopbouw proefpercelen	14
3.3 Inrichting proefpercelen met innovatieve watermaatregelen	17
3.4 Meetopstelling proefpercelen	22
<b>4 Automatisch aansturing KAD-systeem</b>	<b>25</b>
4.1 Achtergrond agrohydrologisch 1D-SWAP model	25
4.2 Achtergrond KAD-management-algoritme	26
4.3 Modelopzet 1D-SWAP proefperceel Kremer	27
4.4 Automatisch aansturing drainageniveau proefperceel Stegeren	29
<b>5 Resultaten</b>	<b>30</b>
5.1 Veldmetingen subirrigatieproeven	30
5.1.1 Wateraanvoer en waterafvoer	30
5.1.2 Grondwaterniveau	31
5.1.3 Bodemvocht	33
5.1.4 Gewasopbrengst	34
5.2 Automatische aansturing drainageniveau	35
5.3 Veldmetingen slimme SAWAX-stuw	37
<b>6 Discussie en conclusie</b>	<b>39</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>42</b>
<b>I Meetopstelling per locatie</b>	<b>44</b>
<b>II SWAP-PEST kalibratie</b>	<b>45</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

### *Klimaatverandering in de landbouw en beschikbaarheid zoetwater*

Klimaatverandering leidt naar verwachting tot toenemende droogteschade aan landbouw en natuur, en druk op waterbeschikbaarheid voor hoogwaardige toepassingen, zoals de productie van drinkwater. In de afgelopen jaren (2018, 2019 en het voorjaar 2020) was het extreem droog, waar alle sectoren de gevolgen van hebben ondervonden. Grondwaterstanden zakten bijvoorbeeld diep uit en hebben minimaal tijd gehad om te herstellen (van den Eertwegh et al., 2020a). Naast deze langere perioden van droogte komen ook steeds meer piekbuien voor, die direct tot wateroverlast leiden. Een veerkrachtiger, robuustere zoetwatervoorziening is nodig om risico's van droogte en wateroverlast beheersbaar te maken voor verschillende sectoren. Dat kan bereikt worden door water vast te houden en aan te vullen wanneer nodig. Als wateroverlast dreigt, moet er tijdig ruimte worden gemaakt om juist water af te voeren.

Gewasopbrengsten zijn in belangrijke mate afhankelijk van de bodemvochtcondities in de wortelzone. Zowel droogte, maar ook natheid in de wortelzone beperkt de gewasopbrengst. 's Zomers is er vaak een gebrek aan bodemvocht, waardoor er beregend moet worden om te voorkomen dat landbouwopbrengsten teruglopen. Agrariërs in Nederland hebben hun land gedraineerd om snel van overtollig water af te komen (Ritzema et al., 2006). Hoewel natschade hiermee wordt beperkt, neemt de droogteschade toe, aangezien er minder water beschikbaar is in drogere periodes. Zonder verandering in het waterbeheer, kan de droogteschade in het veranderende klimaat oplopen tot 140 miljoen euro per jaar (Klijn et al., 2011). Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte en natheid én op andere functies als natuur en drinkwater te beperken zijn dus van groot economisch belang. Waterbeheerders en agrariërs hebben oplossingen nodig om de risico's in gewasopbrengst te beperken door te anticiperen op het waterbeheer op perceelschaal en regionale schaal.

### *Watermaatregelen regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw*

Watermaatregelen kunnen (op perceelschaal) worden toegepast om te anticiperen op hydro-meteorologische risico's. Allereerst is in dit rapport de watermaatregel regelbare drainage met subirrigatie toegepast. Regelbare drainage met subirrigatie is ontwikkeld om water te kunnen afvoeren, vasthouden en aanvullen. Dit systeem maakt het mogelijk om piekafvoeren te verminderen en heeft het voordeel dat het grondwaterniveau en de bodemvochtcondities actief gestuurd kunnen worden (Ayars et al., 2006). Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) is een regelbaar drainagesysteem waarin het drainageniveau via telemetrie op afstand bestuurd kan worden (van den Eertwegh et al., 2013), nader toegelicht in Hoofdstuk 2. Met behulp van een KAD-management-algoritme kan de agrariër tijdig anticiperen op te droge of te natte groeicondities, waardoor het bodemvochtregime op perceelschaal actief beheerd kan worden (Bartholomeus et al., 2015). Door optimalere vochtcondities in de wortelzone, heeft een gewas minder last van zuurstofstress (te nat), droogtestress (te droog) of hittestress (te heet). Als tweede watermaatregel is de slimme SAWAX stuw toegepast (van den Eertwegh et al., 2018). Deze stuw heeft als doel het peilbeheer in kavelsloten mee te laten stijgen en dalen met het door het waterschap gevoerde peil in de benedenstroomse hoofdwatergangen. De SAWAX kan automatisch/mechanisch tot een 0.5 m hoger waterpeil in de bovenstrooms gelegen kavelsloten realiseren ten opzichte van de waterstand aan de benedenstroomse zijde. Een SAWAX-stuw kan worden gecombineerd met een pomp op zonne-energie. Hiermee kan water van

benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden aangevoerd om ook in de zomerperiode het gewenste peilverschil te realiseren (van Bakel et al., 2019).

## 1.2 Afbakening onderzoek

Slim bodem- en waterbeheer is noodzakelijk bij een veranderd klimaat waarin langere, drogere perioden met daarnaast af en toe extreme neerslag zullen overheersen. Praktijktoeepassingen van klimaatadaptieve maatregelen op de hoge zandgronden in Oost- en Zuid-Nederland zijn tot nu toe beperkt, terwijl juist daar droogtegevoelige gebieden liggen. Om beter inzicht te krijgen in maatregelen voor een klimaat-robust watergebruik op perceelniveau zijn er, binnen het programma Lumbricus, in Stegeren (Overijssel) diverse percelen ingericht met klimaat adaptieve maatregelen zoals automatisch KAD-sturing en een Slimme Adaptieve WATERbeheer eXtender (SAWAX)-stuw.

Dit rapport is een technische rapportage van de watermaatregelen in Stegeren van vijf veldproeven (2017-2020). De metingen tot 31 maart 2020 zijn in deze rapportage opgenomen. De metingen vanaf 1 april 2020 bij de agrariërs Kremer en Paarhuis worden gerapporteerd binnen het vervolgproject KLIMAP. Daarnaast richt deze rapportage zich op het vastleggen van de technische aspecten van elke veldproef in Stegeren, en het gebruik van metingen en modellen om vanuit veldmetingen KAD-systemen automatisch aan te sturen, anticiperend op de weersverwachting.

Naast deze technische rapportage voor Stegeren, zijn er technische rapportages verschenen van drie andere veldproeven/locaties met regelbare drainage met subirrigatie (Bartholomeus et al., 2018a; Bartholomeus et al., 2017; Bartholomeus et al., 2016; Bartholomeus et al., 2018b). Uniek is dat op deze vier locaties in Nederland regelbare drainage met subirrigatie is toegepast, maar elk met een verschillende wateraanvoerbron (oppervlaktewater, gezuiverd industrieel restwater, gezuiverd afvalwater en grondwater) en een variatie aan bodemcondities en hydrologische randvoorwaarden. De betekenis van deze watermaatregelen voor de hogere zandgronden (watervoorziening gewas, componenten van de waterbalans op lokale en regionale schaal, beleidsmatige aspecten), is samengebracht in De Wit et al. (2021).

## 1.3 Programma Lumbricus

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



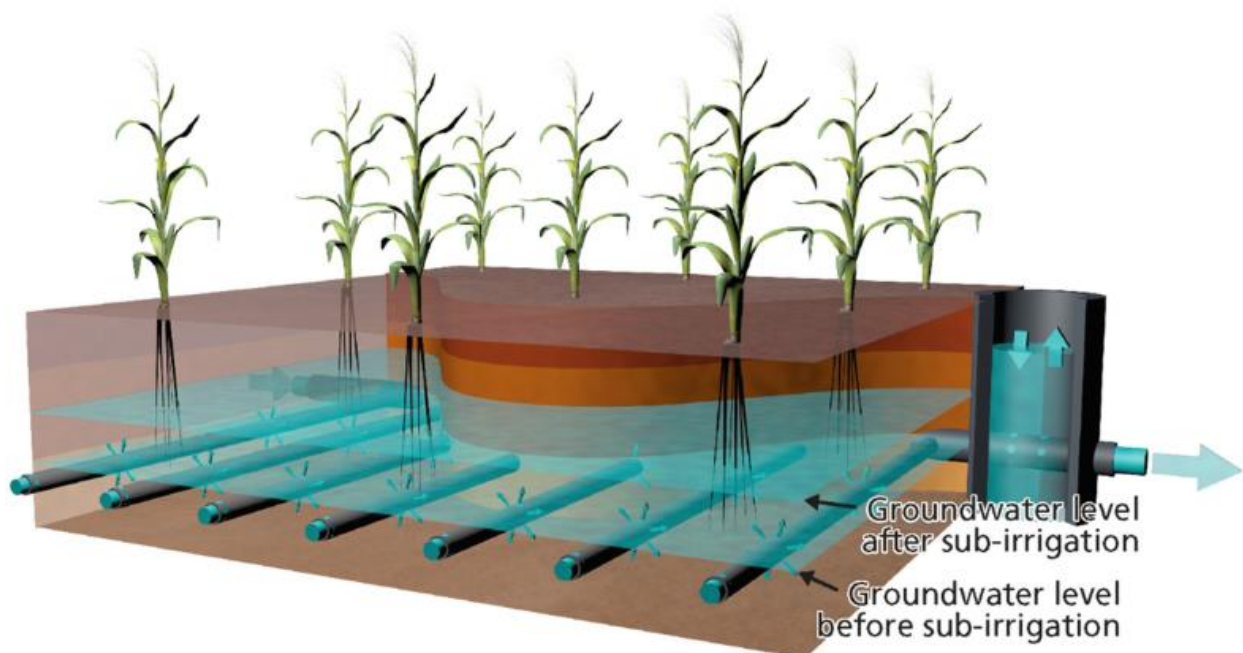
## 1.4 Leeswijzer

Dit rapport bevat de technische aspecten, de meetresultaten en enkele bevindingen van de subirrigatieproeven van juli 2018 tot en met maart 2020 op meerdere percelen in het gebied rondom Stegeren. Daarnaast worden de resultaten van de proef met de slimme SAWAX-stuw weergegeven. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de in deze studie onderzochte maatregelen: (automatisch aangestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en de slimme stuw. In Hoofdstuk 3 is een gebiedsomschrijving van Stegeren beschreven, en de veldexperimenten en monitoringstechnieken. In Hoofdstuk 4 is een beschrijving gegeven van de automatische sturing van regelbare (klimaatadaptieve) drainage, gebruikmakend van zowel veldmetingen als modelsimulaties. De resultaten van de veldmetingen en automatische sturing zijn beschreven in Hoofdstuk 5 gevolgd door de discussie en conclusie (Hoofdstuk 6).

## 2 Achtergrond

### 2.1 Regelbare drainage met subirrigatie

Regelbare drainage met subirrigatie bestaat uit een pomp, wateraanvoerput, (bestaand) drainagesysteem en een waterafvoerput (Figuur 2-1 en Figuur 2-2). Het drainagebuissysteem kan al bestaan of wordt nieuw aangelegd. De drainagebuizen worden veelal op ongeveer 6 meter afstand parallel aangelegd op een diepte van 1.2 meter. Het begin van het drainagebuizenstelsel komt uit op een verzamelleiding, loodrecht op het drainagebuizensysteem. De verzamelleiding is verbonden met een voorraadreservoir. Het voorraadreservoir wordt continu op peil gehouden door water van de gebruikte externe bron erin te pompen (voor Stegeren is dit oppervlaktewater uit de watergang naast het perceel). Het einde van de drainagebuizen komt uit op een verzamelleiding, die is verbonden met de eindput/regelput. Het peil in de eindput bepaalt het drainageniveau van het perceel, los van de omliggende sloot. Indien te hoge grondwaterstanden worden gerealiseerd als gevolg van overmatige neerslag, werkt het peil in de eindput als drainagebasis van het perceel. Het peil (oftewel: drainageniveau) in de eindput kan handmatig worden ingesteld, of geautomatiseerd door middel van een KAD-management-algoritme.



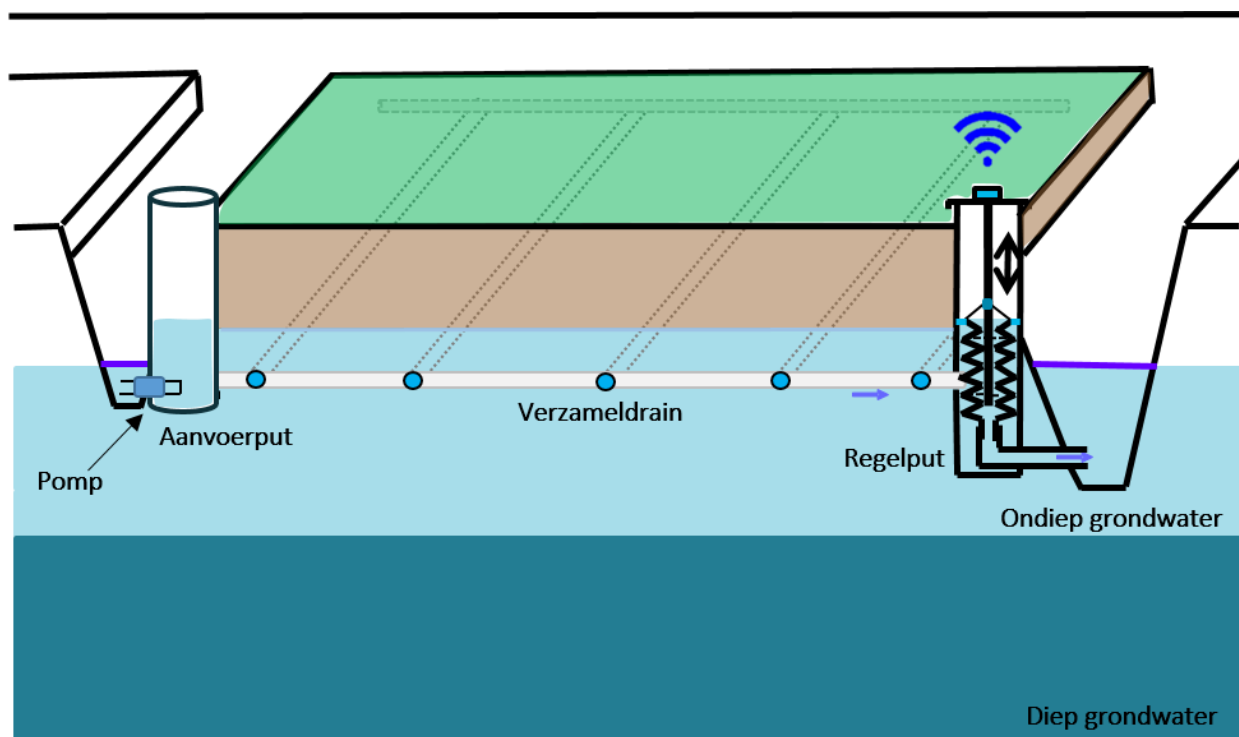
Figuur 2-1: Opstelling subirrigatie systeem: pomp, regelput, en drainagesysteem (verzamelleiding gekoppeld aan losse drainagebuizen). Overgenomen van Narain-Ford et al. (2020).

### 2.2 Aansturing KAD: management-algoritme

Het peil in de eindput van een Klimaat Adaptief Drainage-systeem kan automatisch worden beheerd met behulp van een KAD-management-algoritme (Bartholomeus et al., 2015). Het ontwikkelde KAD-management-algoritme (zie

ook Hoofdstuk 4) combineert veldmetingen, weersvoorspellingen en SWAP-modelsimulaties, waarvoor de modelparameters worden gekalibreerd aan veldmetingen met het programma PEST (Doherty, 2010), met als resultaat een aanbevolen drainageniveau in het KAD-systeem. Het aanbevolen drainageniveau kan via de open source statistische software R via de TMX TWIN-webservice ingesteld worden. Via de functie SetSetPoints van de service vindt de instelling automatisch dagelijks plaats (TMX, 2018). De weersvoorspellingen (neerslag, temperatuur, windsnelheid, straling, en luchtvochtigheid) komen uit een dataset van het NOAA Physical Sciences Laboratory, de Reforecast V2 dataset (Hamill et al., 2013). Deze voorspellingen zijn gebaseerd op het gemiddelde van 11 verschillende modelruns en zijn beschikbaar op een resolutie van ongeveer 50 km voor de komende 8 dagen.

Het KAD-systeem kan zowel op zonne-energie als op netspanning werken. Het aanbevolen KAD-niveau voorkomt zowel zuurstofstress als onnodige drainage. Met behulp van een KAD-management-algoritme kan er tijdig geanticipeerd worden op te droge of natte groeicondities om de gewasgroei te optimaliseren. Doel van het KAD-management-algoritme is ook om piekafvoeren te reduceren en een grotere mate van zelfvoorziening te behalen.



Figuur 2-2: Schematische weergave van klimaat adaptieve drainage met oppervlaktewater als wateraanvoer bron. Gebaseerd op figuur 2.1 uit van den Eertwegh et al. (2013)

### 2.3 SAWAX slimme stuw

Een Smart Adaptive Waterlevel eXtender (SAWAX, Figuur 2-3) slimme stuw heeft als doel het waterpeil in kavelsloten mee te laten stijgen en dalen met het door het waterschap gevoerde peil in de benedenstroomse hoofdwatgangen (van Bakel et al., 2019; van Bakel et al., 2020; van den Eertwegh et al., 2018; van den Eertwegh et al., 2020b). Zo wordt het bereik van het door het waterschap gevoerde peilbeheer over een veel grotere

oppervlakte uitgebreid en effectief ('extender'), in vlakke gebieden tot een bepaalde mate van hellend. Door toepassing van de SAWAX bewegen de waterpeilen in de haarvaten i.c. kavelsloten op een hoger peilniveau mee. De bovenstroomse peilverhoging heeft als doel water vast te houden en daarmee de grondwaterstand in bovenstrooms aangrenzende percelen te verhogen. In de veldproef in deze rapportage is gebruikt gemaakt van de SAWAX 2.0, gemonteerd in een standaard duiker ( $\varnothing$  400 mm).

De SAWAX 2.0 kan automatisch/mechanisch tot een 0,5 m hoger waterpeil in de bovenstrooms gelegen kavelsloten realiseren dan de waterstand aan de benedenstroomse zijde. Een SAWAX-stuw kan worden gecombineerd met een waterpomp op zonne-energie. Hiermee kan water van benedenstrooms naar bovenstrooms van de stuw worden aangevoerd om in de zomerperiode wateraanvoer en een gewenst peilverschil te realiseren (van Bakel et al., 2019).



*Figuur 2-3: SAWAX-stuw (2.0) bij dhr. Paarhuis te Stegeren. De stuw kan het peilbeheer in kavelsloten mee laten stijgen en dalen met het door het waterschap gevoerde peil in de benedenstroomse hoofdwatergang. Foto's: Gé van den Eertwegh.*

## 3 Opzet veldproeven

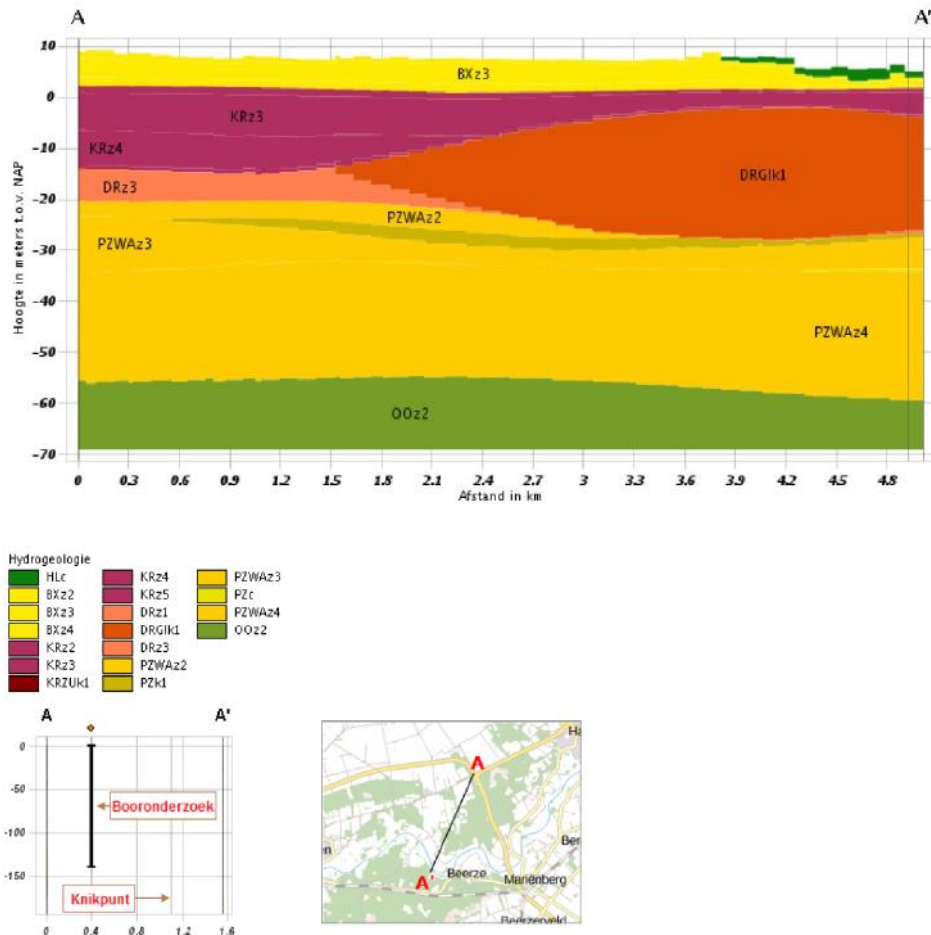
### 3.1 Gebiedsomschrijving Stegeren

Voor het ontwerp van het subirrigatiesysteem en de interpretatie van de metingen is de bodemkundige en hydrologische situatie van de proefpercelen en het omliggende gebied van belang. Een gedetailleerde beschrijving is gegeven in Heinen (Red.) (2019). De belangrijkste delen uit die rapportage zijn hieronder samengevat.

#### 3.1.1 Bodemkundige beschrijving

Alle proefpercelen zijn in Stegeren gelegen, ten westen van Hardenberg, ten noorden van De Vecht en ten oosten van Ommen. Het gebied rondom Stegeren (656 ha) is geologisch gezien een heterogeen gebied. In het gebied waarin de proefpercelen liggen, zijn vier watervoerende pakketten aanwezig (Figuur 3-1). De toplaag wordt gevormd door de zandige Formatie van Boxtel (BX, ongeveer 7/ 8 m+NAP tot ongeveer 0 m+NAP) met daaronder de grind met grofzandige Formatie van Kreftenheye (KR, ongeveer 0 m+NAP tot 10 m-NAP). Deze laag heeft een hoge doorlatendheid en is dichtbij De Vecht enkele meters dik; verder noordelijk neemt de dikte van het pakket toe tot 15 m (Figuur 3-1). Deze twee lagen worden gevolgd door de Formatie van Drenthe (DR), bestaande uit keileem. Deze formatie verschilt ook in dikte (20 m dik bij De Vecht, meer noordelijk maar enkele meters dik). Hieronder ligt de 35 m dikke Formatie van Peize/ Waalre (PZWA). Deze formatie is voornamelijk een zandig, watervoerend pakket. Er komen lokaal ook keileem en/ of kleilagen voor. De onderste laag, op ca. 55-60 m-NAP, is de Formatie van Oosterhout (OO).

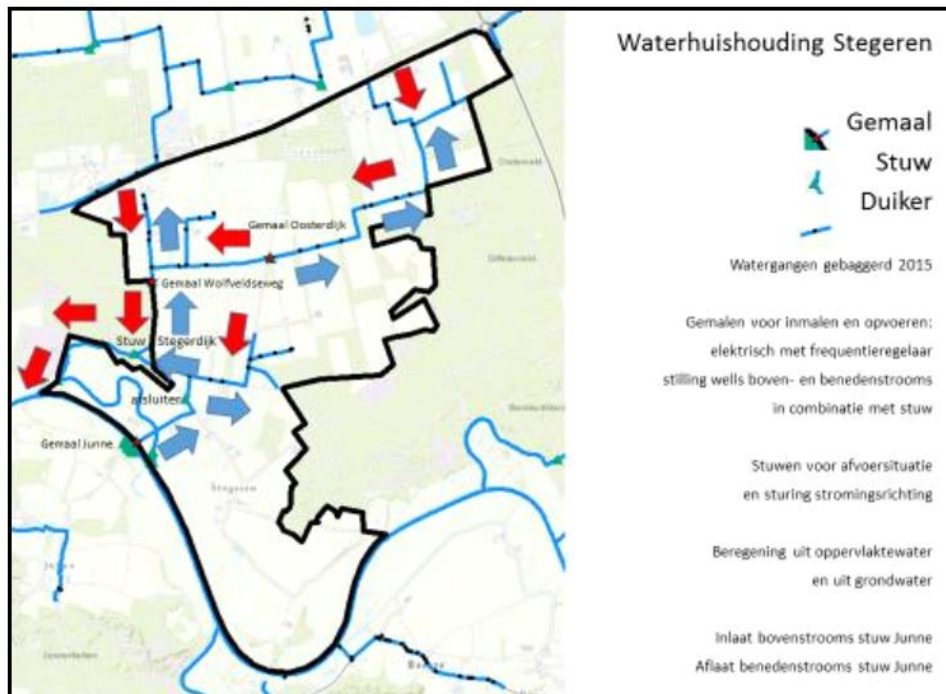
## Verticale Doorsnede REGIS II v2.2



Figuur 3-1: Geohydrologische raai van noordoost naar zuidwest over proeftuin Stegeren. Overgenomen uit Heinen (Red.) (2019)

### 3.1.2 Hydrologische beschrijving

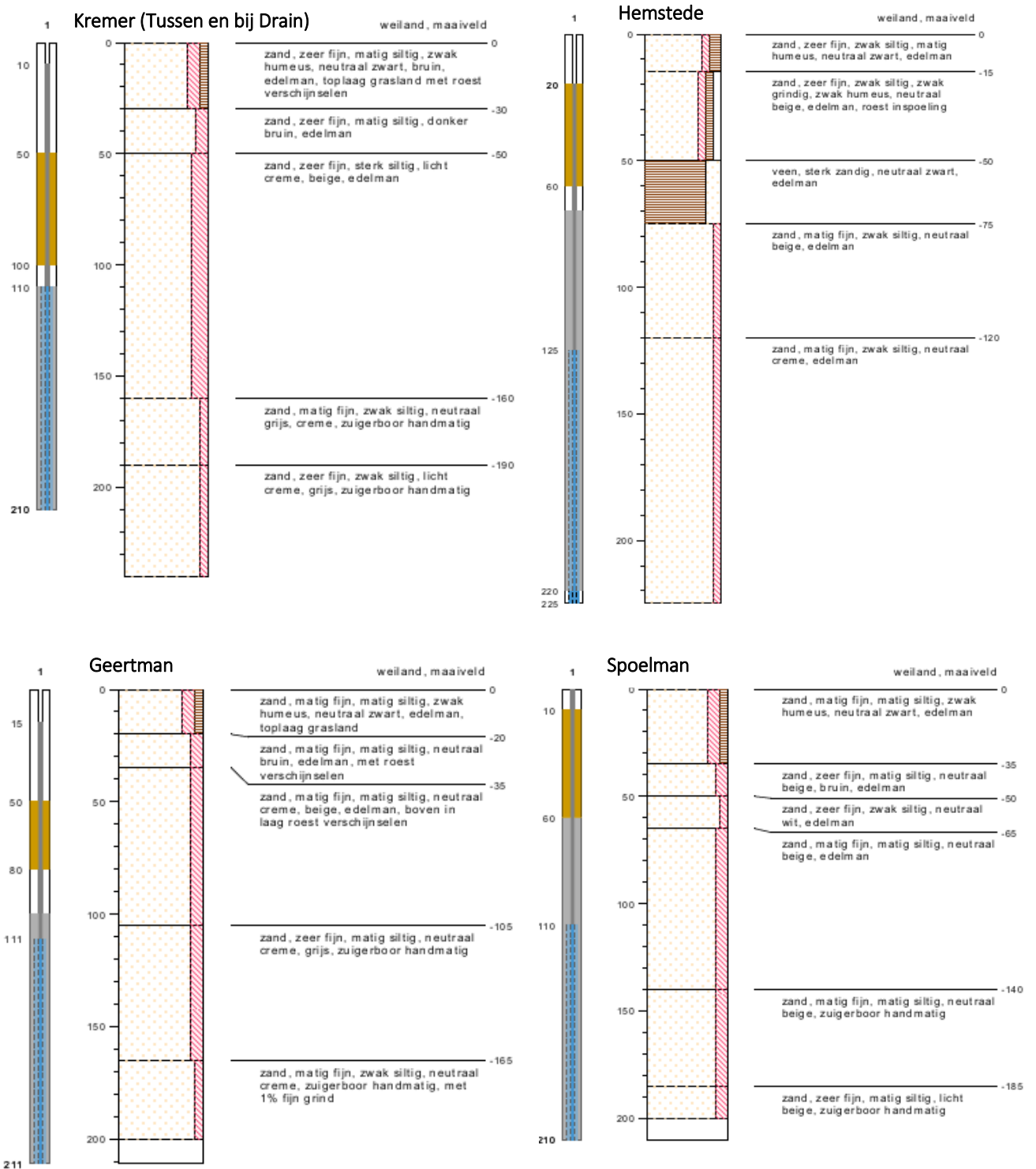
De proefpercelen zijn gelegen in het stroomgebied van de Vecht, in het beheergebied van Waterschap Vechtstromen. Het gebied watert aan de zuidwestkant via een gemaal af op de Vecht (Figuur 3-2). In het zuiden van het gebied (net bovenstrooms van de stuw bij Junne) is er inlaat van Vechtwater mogelijk via een opvoergemaal. Binnen het gebied staan nog twee gemalen, waarmee het inlaatwater naar hoger gelegen gebied (noordelijke deel) gebracht kan worden. 's Zomers wordt er water aangevoerd vanuit de Vecht om de oppervlaktewatervlaks op peil te houden. Hoeveel water er wordt aangevoerd vanuit de Vecht het gebied Stegeren in, is niet bekend bij Waterschap Vechtstromen. Daarnaast is er nog aanvullende wateraanvoer doordat het noordoostelijk van Stegeren gelegen gebied Rhezerveen afwatert op het gebied Stegeren. Ook hiervan is niet bekend om hoeveel water dit gaat.



Figuur 3-2: Waterhuishouding in het gebied Stegeren. Blauwe peilen geven wateraanvoer weer, rode peilen geven waterafvoer weer (Rozemeijer et al., 2018)

### 3.2 Bodemopbouw proefpercelen

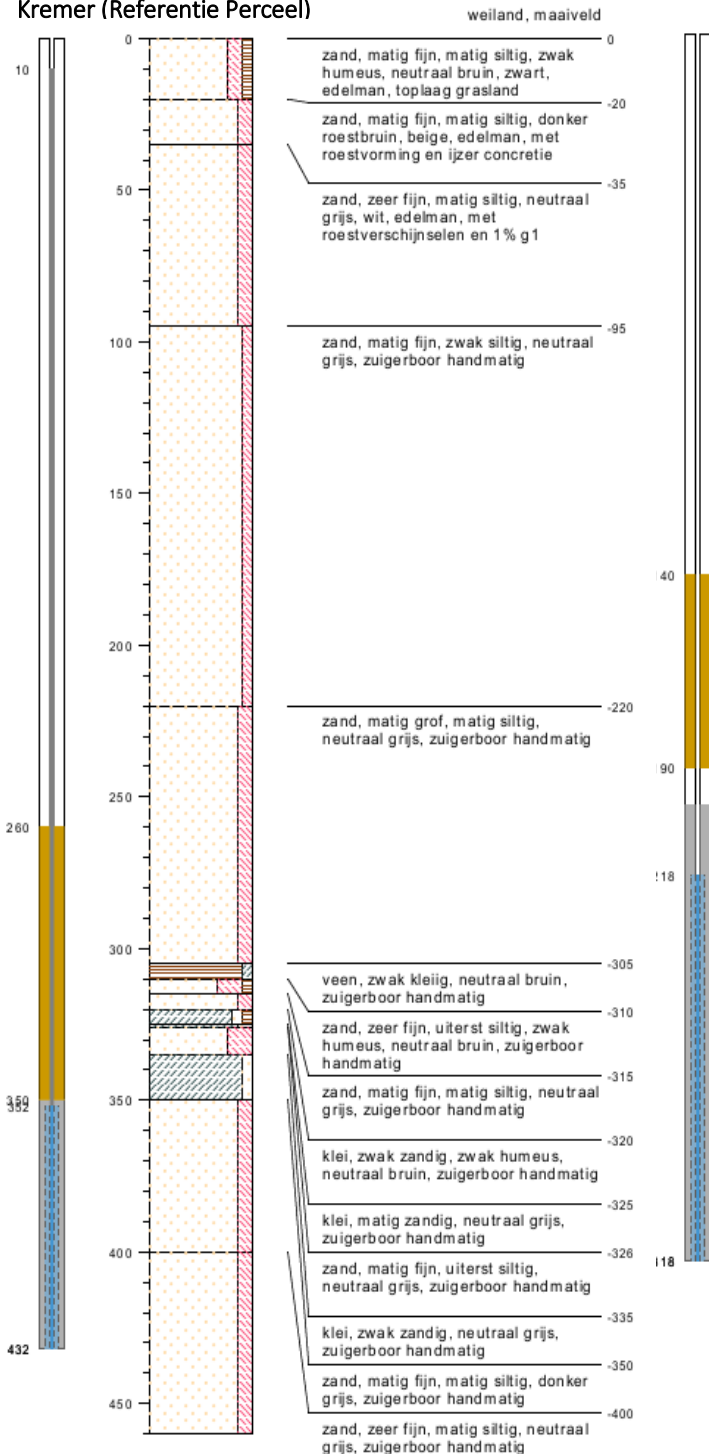
Naast de informatie over de geologische ondergrond is er lokale informatie over de bodemopbouw verzameld via handboringen tot  $\pm 5$  m diepte op de proefpercelen. De bodemopbouw in de verschillende proefpercelen lijkt sterk op elkaar (Figuur 3-3 en Figuur 3-4). De eerste 20 – 30 cm van de bodem bestaat hoofdzakelijk uit matig, fijn, zwak humeus zand. De toplaag wordt gevolgd door fijn tot matig grof zand. Vanaf ongeveer 3 m-mv is er klei in de bodem waargenomen (Figuur 3-3 en Figuur 3-4). De bodemopbouw op het referentieperceel bij Kremer laat een kleine veenlaag op 3 meter zien (Figuur 3-4). Als laatste is de bodemopbouw op het perceel bij Hemstede iets afwijkend: er is een veenlaag van ongeveer 25 cm op 50 cm diepte aanwezig (Figuur 3-3).



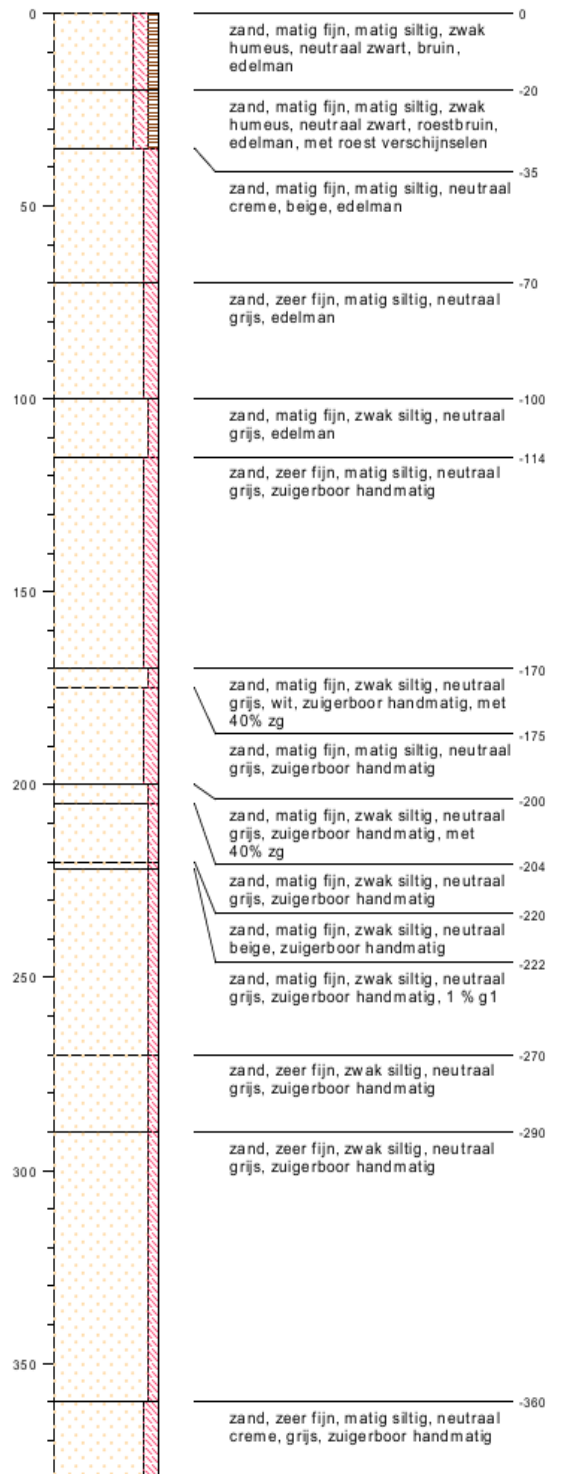
Figuur 3-3: Bodemopbouw bij de peilbuizen bij Kremer (subirrigatieperceel), Geertman, Spoelman en Hemstede. Boorbeschrijvingen zijn aangeleverd door Avallo Advies (Kremer, Geertman, Spoelman: d.d. 10-11-2018, Hemstede: d.d. 18-11-2018).



**Kremer (Referentie Perceel)**



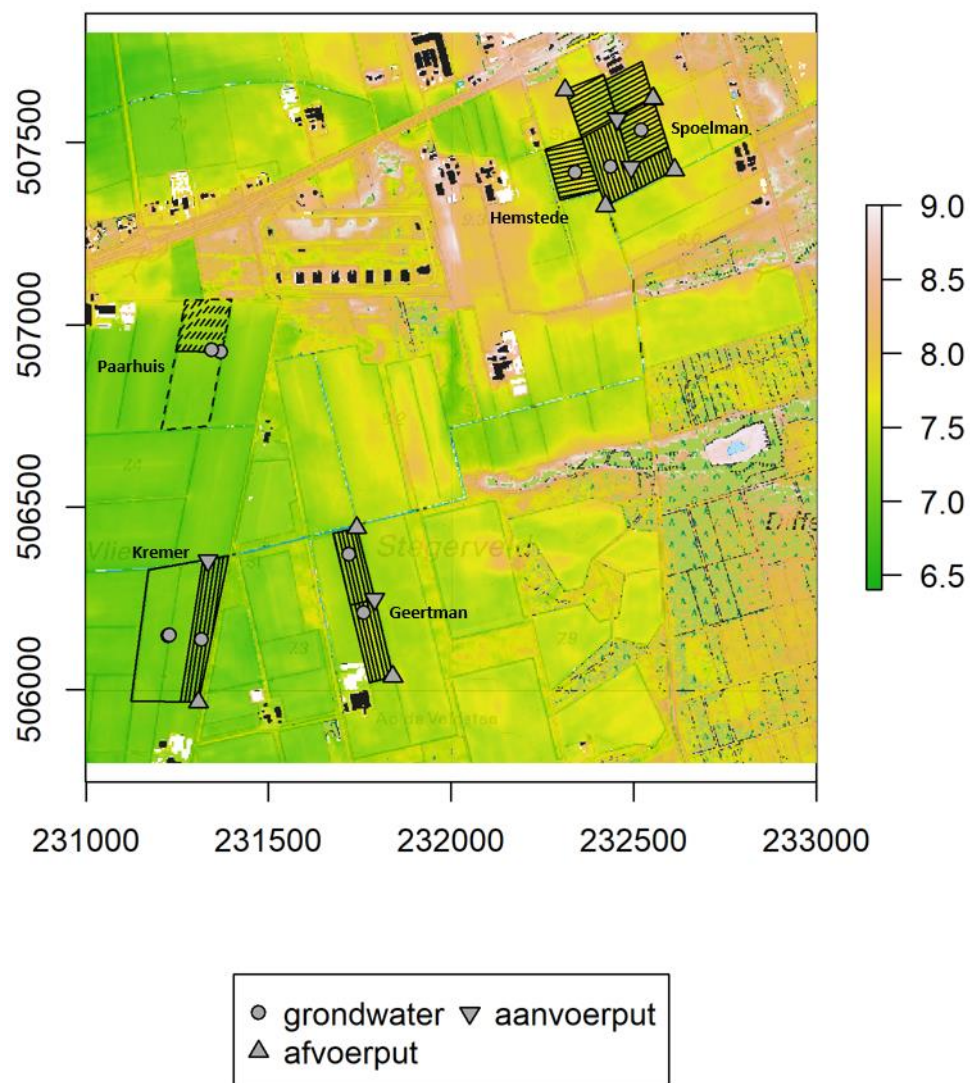
**Paarhuis**



Figuur 3-4: Bodemopbouw bij de peilbuizen bij Kremer (referentieperceel) en Paarhuis. Boorbeschrijvingen zijn aangeleverd door Avallo Advies (Kremer: d.d. 10-11-2018, Paarhuis: d.d. 13-07-2018).

### 3.3 Inrichting proefpercelen met innovatieve watermaatregelen

Ten behoeve van de veldexperimenten zijn er bij vijf agrariërs rondom Stegeren watermaatregelen toegepast voor een klimaatrobustere zoetwatervoorziening (Figuur 3-5). Eén van de doelen van de innovatieve maatregelen is om door wateraanvoer het grondwaterniveau in het voorjaar en de zomer zo lang mogelijk op peil te houden, zodat het bodemvochtgehalte hoger is en het gewas optimaler kan transpireren. De regelbare drainagesystemen zijn bij vier agrariërs aangelegd in 2018 onder leiding van Ecogroen in opdracht van Waterschap Vechtstromen. De proefopstellingen worden hieronder kort per agrariër toegelicht. De verschillende percelen zijn gedetailleerd uitgewerkt in Bijlage I.



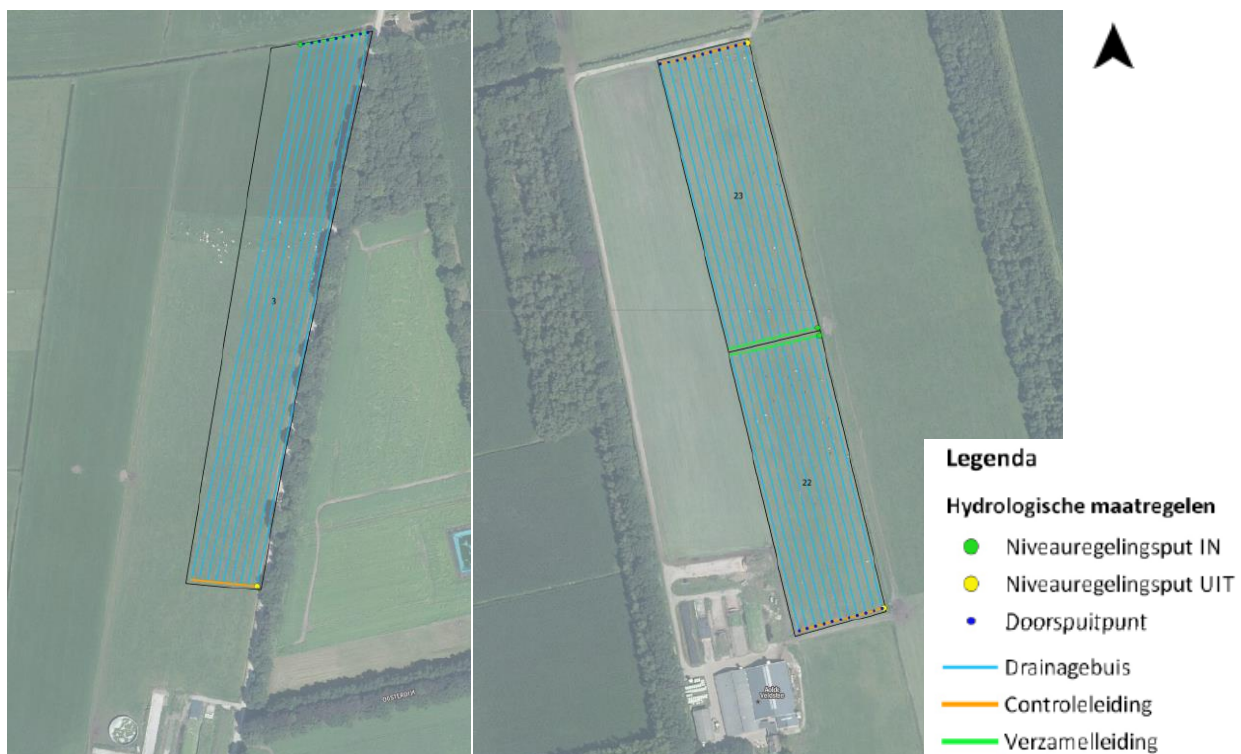
Figuur 3-5: Overzicht ingerichte percelen met klimaat adaptieve maatregelen bij vijf agrariërs te Stegeren. De doorgetrokken lijnen geven de ligging van de drainagebuizen weer. Bij dhr. Paarhuis is het gestreepte perceel noordelijk gelegen van de SAWAX-stuw, het omliggende perceel is zuidelijk gelegen van de SAWAX-stuw.

### Agrariër dhr. Kremer

Op het proefperceel bij agrariër dhr. Kremer is een grasperceel van  $\pm 5.5$  ha ingericht. Het perceel is gedeeltelijk klimaatadaptief gedraineerd ( $\pm 2.49$  ha). De drains, verzamelleiding en controleleiding liggen op 6.05m+NAP (Tabel 3-1, Figuur 3-6). Oppervlaktewater, uit de ten noorden van het proefperceel gelegen watergang, wordt het proefperceel ingepompt. De pomp werkt continu en wordt gevoed door een geplaatst zonnepaneel met accu. De aanvoer wordt continu gemeten (Flow-meter; zie sectie 0 voor een omschrijving van de toegepaste apparatuur). Het streven is om de aanvoer automatisch te kunnen sturen. Het peil in de watergang en de aanvoerput wordt automatisch gemonitord. De stijghoogten (CTD-10 sensoren) en bodemvochtcondities (5TE sensoren) worden in het perceel zowel direct naast als tussen twee drains gemonitord. Het drainageniveau wordt continu automatisch gestuurd in de eindput met behulp van een KAD-management-algoritme (Hoofdstuk 4). In de eindput wordt het debiet (hoeveelheid afvoer van water) gemonitord (Flow-meter) en het waterpeil in de put (Keller-drukopnemer & TMX-sensor). Daarnaast wordt het westelijke gelegen grasperceel naast het proefperceel gemonitord als referentieperceel. De stijghoogte- (CTD-10 sensoren) en bodemvochtmetingen (5TE sensoren) op dit perceel geven inzicht in de situatie zonder subirrigatie. Ook is er een neerslagmeter geïnstalleerd op dit perceel.

Tabel 3-1: Overzicht aangelegd drainagesysteem bij Kremer. Informatie is aangeleverd door Ecogroen (26-06-2018)

	Diameter [mm]	Lengte [m]	Hoeveelheid [-]
Drainagebuis	60	3665	9
Verzamelleiding	160	50	1
Controleleiding	160	50	1
Niveauregelingsput	500	-	2 (in en uit)



Figuur 3-6: Gedetailleerde weergaven van het geïnstalleerd drainagesysteem bij dhr. Kremer (links) en bij dhr. Geertman (rechts). Kaarten zijn aangeleverd door Ecogroen (d.d. 26-06-2018).

*Agrariër dhr. Geertman*

Bij agrariër dhr. Geertman is één graslandperceel (totaal ± 2.8 ha) ingericht met twee drainagesystemen. Het oppervlak van het noordelijke perceel (G2) is ± 1.42 ha, het zuidelijke perceel (G1) is ± 1.39 ha. Elk drainagesysteem is geïnstalleerd met een aanvoerput, afvoerput, controleleiding en verzamelleiding (Tabel 3-2, Figuur 3-6). Eén pomp, aangesloten op een zonnepaneel met accu, voert het oppervlaktewater voor beide systemen aan.

Het zuidelijke gedeelte van het perceel is ongeveer 10 cm hoger gelegen dan het noordelijke stuk van het perceel. Hierdoor ondervindt de agrariër sneller natschade op het noordelijke gedeelte dan op het zuidelijke gedeelte. Met behulp van twee drainagesystemen kan de agrariër zelf bepalen hoe de aangevoerde hoeveelheid water wordt verdeeld tussen beide percelen. Ook wordt door het combineren van de twee drainagesystemen het water in het perceel verdeeld: water vanuit het natte deel komt ten goede aan het drogere deel ('interne vereffening'). Het grondwaterniveau (Keller-drukopnemer) wordt bij beide drainagesystemen op het midden van het perceel gemonitord.

Tabel 3-2: Overzicht aangelegd drainagesysteem bij Geertman. Informatie is aangeleverd door Ecogroen (d.d. 26-06-2018)

	Diameter [mm]	Lengte [m]	Hoeveelheid [-]
<b>Subirrigatie perceel noord (G2)</b>			
Drainagebuis	60	2300	11
Verzamelleiding	160	64	1
Controleleiding	160	64	1
Niveauregelingsput	500	-	2 (in & out)
<b>Subirrigatie perceel zuid (G1)</b>			
Drainagebuis	60	2210	11
Verzamelleiding	160	64	1
Controleleiding	160	64	1
Niveauregelingsput	500	-	2 (in & out)

*Agrariër dhr. Spoelman*

Er zijn twee verschillende proefpercelen ingericht bij agrariër dhr. Spoelman (Tabel 3-3, Figuur 3-7). Het oostelijk maisperceel is opgedeeld in drie verschillende drainagesystemen. In het noordelijk systeem (± 1.15 ha) en het middelste systeem (± 1.50 ha) liggen de buizen oost-west. In het meest zuidelijke systeem (± 0.79 ha) zijn de drainagebuizen noord-zuid aangelegd. Het grondwaterniveau wordt midden op het perceel gemeten met een Keller-drukopnemer. Het tweede graslandperceel ligt westelijk van het maisperceel en is opgesplitst in twee drainagesystemen. In het noordelijke gedeelte (± 1.3 ha) liggen de drainagebuizen oost-west, op het zuidelijke gedeelte (± 2.0 ha) zijn de drainagebuizen noord-zuid aangelegd. Het grondwaterniveau wordt op het zuidelijke gedeelte gemeten (Keller-drukopnemer). Vier van de vijf aanvoerputten zijn aangesloten op een pomp, gevoed door twee zonnepanelen (300 Wp/stuk). De agrariër kan handmatig beslissen hoe het water tussen de vier aanvoerputten verdeeld wordt.

Tabel 3-3: Overzicht aangelegd drainagesysteem bij Spoelman. Informatie is aangeleverd door Ecogroen (d.d. 26-06-2018). De percelen zijn weergegeven in Figuur 3-7.

	Diameter [mm]	Lengte [m]	Hoeveelheid [-]	Oppervlakte [ha]
<b>Subirrigatie perceel (oostelijk perceel – noordelijk systeem (6))</b>				1.15
Drainagebuis	60	1930	17	
Verzamelleiding	160	100	1	
Controleleiding	160	100	1	
Niveauregelingsput	500	-	3 (1x in, 2x uit)	
<b>Subirrigatie perceel oost (oostelijk perceel – midden systeem (7))</b>				1.50
Drainagebuis	60	2470	22	
Verzamelleiding	160	125	1	
Controleleiding	160	135	1	
Niveauregelingsput	500	-	2 (in en uit)	
<b>Subirrigatie perceel (oostelijk perceel – zuidelijk systeem (8))</b>				0.79
Drainagebuis	60	1250	19	
Verzamelleiding	160	110	1	
Controleleiding	160	110	1	
Niveauregelingsput	500	-	1 (in & uit)	
<b>Subirrigatie perceel (westelijk perceel – noordelijk systeem (5N))</b>				2.2
Drainagebuis	60	2160	20	
Verzamelleiding	160	120	1	
Controleleiding	160	115	1	
Niveauregelingsput	500	-	2 (in & uit)	
<b>Subirrigatie perceel west (westelijk perceel – zuidelijk systeem (5Z))</b>				2.0
Drainagebuis	60	3250	16	
Verzamelleiding	160	95	1	
Controleleiding	160	95	1	
Niveauregelingsput	500	-	2 (in en uit)	

#### Agrariër dhr. Hemstede

Het laatste proefperceel is ingericht op het perceel ( $\pm 1.52$  ha) van agrariër dhr. Hemstede. In 2018 en 2020 was het gewas gras, in 2019 stond er maïs. Het drainagesysteem is in oost-westelijke richting aangelegd (Figuur 3-7). Het grondwaterniveau in dit proefperceel wordt niet bepaald door het drainageniveau in een put, maar door het oppervlaktewaterpeil in de watergang ten westen van het proefperceel. Er zijn 25 drainagebuizen aangelegd met een totale lengte van 2690 m. Het grondwaterniveau wordt midden in het perceel gemeten (Keller-drukopnemer).



Figuur 3-7: Gedetailleerd geïnstalleerd drainagesysteem bij dhr. Hemstede (links, blok 11) en bij dhr. Spoelman (rechts, blokken 5N, 5Z, 6, 7 en 8). Kaart is aangeleverd door Ecogroen (d.d. 26-06-2018)

#### Agrariër dhr. Paarhuis

Op het proefperceel bij agrariër dhr. Paarhuis ( $\pm 4.3$  ha) is geen drainagesysteem aangelegd. Aan de oostkant van het graslandperceel ligt een watergang die niet in het beheer is van het waterschap. In deze watergang is een SAWAX-stuw aangelegd (van Bakel et al., 2019; van den Eertwegh et al., 2020b). Een gedetailleerd bovenaanzicht van het perceel is weergegeven in Bijlage I. Bij de stuw is een pomp aangesloten op een zonnepaneel met als doel ook in perioden zonder afvoer het waterpeil bovenstrooms van de stuw te verhogen tot aan stuwniveau. Op dit proefperceel worden het grondwaterniveau (CTD-10 sensor) en het bodemvochtgehalte (5TE sensor) in het perceel bovenstrooms gemeten. Daarnaast wordt het waterpeil bovenstrooms (CTD-10 sensor), het waterpeil benedenstrooms (TMX-sensor) en het debiet dat naar de bovenstroomse waterloop wordt gepompt (Flow-meter) gemeten.

### 3.4 Meetopstelling proefpercelen

Voor de monitoring en analyse van de effecten van de maatregelen die in november 2018 zijn gestart is een half jaar voordat de proef begon (juli 2018) een meetnet ingericht voor de eerste metingen. Tijdens de veldexperimenten zijn de neerslag, slootpeilen, aanvoer- en afvoerdebieten, grondwaterstanden en bodemvochtgehalten gemeten (Figuur 3-8). Bijna alle meetsensoren staan via telemetrie in verbinding met de webservice ZentraCloud. Deze metingen worden dagelijks met behulp van de open source statistische software R gedownload en ontsloten via een dataportaal (Figuur 3-9). Hieronder wordt de geïnstalleerde meetapparatuur kort beschreven.

Neerslag wordt elke 15 minuten geregistreerd door een neerslagmeter op het referentieperceel bij dhr. Kremer.

De hoeveelheid water, die naar de proefpercelen wordt aangevoerd (debiet), wordt continu gemeten door een flowmeter MULTICAL 21/ flowIQ. De afvoer uit de eindput wordt ook gemeten met een MULTICAL 21/ flowIQ meter. Het water wordt aangevoerd door een pomp, die een maximale pompcapaciteit heeft van 6-9 m<sup>3</sup> per uur, afhankelijk van de opvoerhoogte van de drainagebasis. De pomp wordt gevoed door zonnepanelen, één zonnepaneel levert 300 Wp per zonnepaneel. De netto infiltratiehoeveelheid is gelijk aan de gemeten aanvoer minus de afvoer.

Grondwaterstanden worden op verschillende locaties zowel geautomatiseerd (met Keller-drukopnemers en CTD-10 sensoren) als handmatig (ten behoeve van de correctie van de automatische gegevens) gemeten. De Keller-drukopnemers registreren elke 60 minuten het waterniveau. De automatische CTD-sensoren (Conductivity, Temperature, Depth) meten elke 15 minuten de grondwaterstand, elektrisch geleidingsvermogen (EGV) en temperatuur van het water. Met deze sensoren kan een indicatie gemaakt worden van het soort water dat ter plekke in de bodem aanwezig is (neerslagoverschot, aangevoerd water, mengvorm). De CTD-sensoren zijn verbonden met telemetrie, waardoor deze automatisch (via ZentraCloud en de statische open source software R) uitgelezen en ontsloten worden. De handmetingen worden door de agrariërs zelf verricht en genoteerd. Deze participatieve monitoring draagt bij aan meer handmetingen, waardoor de geautomatiseerde metingen beter gecontroleerd kunnen worden.

Grondwaterstanden worden bij Kremer op een referentieperceel en tussen twee drains en direct naast een drain op het proefperceel gemeten. Op de overige proeflocaties wordt de grondwaterstand alleen tussen twee drains gemeten. De waarnemingen direct naast de drain geven inzicht in welke mate de grondwaterstand wordt verhoogd als gevolg van subirrigatie. De waarneming tussen twee drains geeft inzicht in welke mate een vlakke grondwaterstand gerealiseerd kan worden.

Daarnaast worden de metingen van de peilbuis B22D0237, die 500 m van het proefperceel van Kremer staat, gebruikt om inzicht te krijgen in de stijghoogten van afgelopen jaren. De filterstelling is van 3.23 m-mv tot 4.23 m-mv (maaiveldhoogte = 7.19 m+NAP).

Het waterpeil in aangrenzende sloten worden geautomatiseerd (CTD-10 sensoren en TMX-sensoren) en handmatig gemeten bij Kremer en Paarhuis om de relatie tussen het slootpeil en grondwaterstand in het perceel te monitoren.

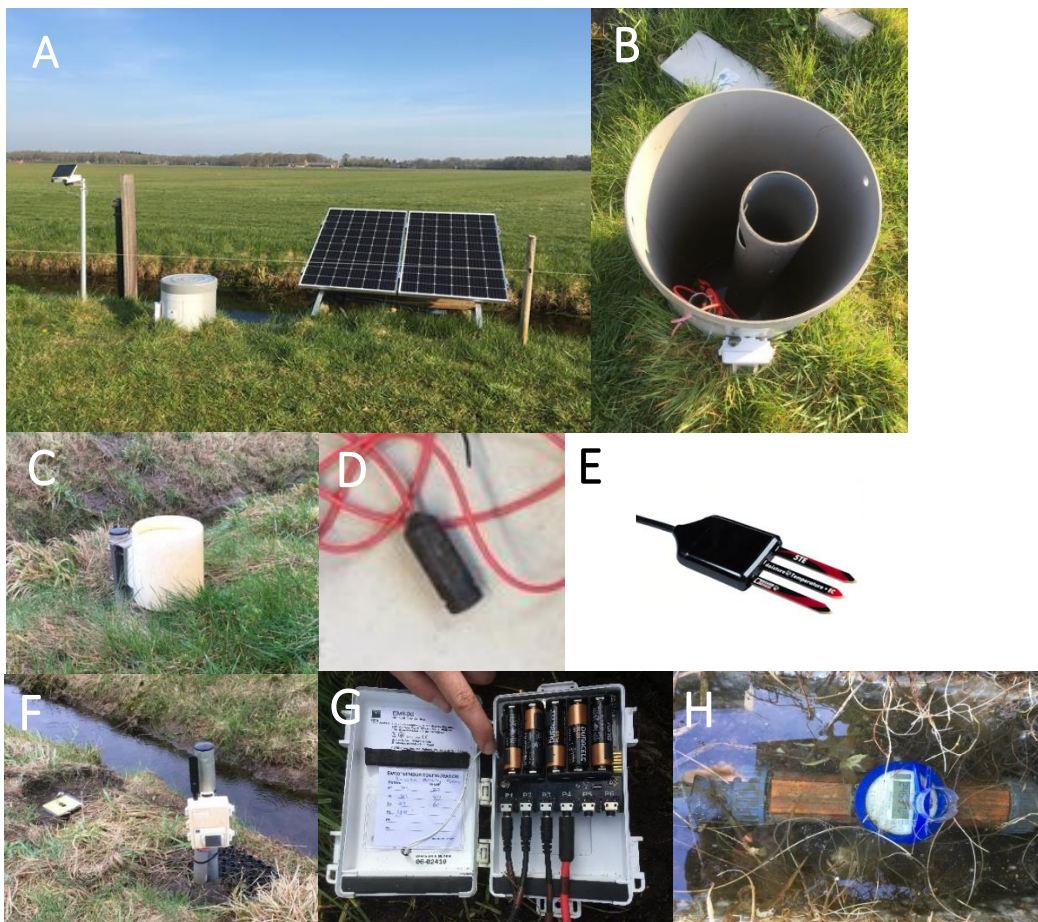
Het drainageniveau wordt bepaald door het waterniveau in de afvoerput. Het waterniveau in de afvoerput wordt ingesteld aan de hand van de hoogte van de aanwezige balg in de afvoerput. Het KAD-management-algoritme (toegepast bij Kremer) berekent aan de hand van veldmetingen, weersvoorspellingen en op processen gebaseerde

modelsimulaties een aanbevolen drainageniveau. Dit niveau wordt via automatische TMX-telemetrie ingesteld als hoogte van de balg van het KAD-systeem, waardoor water kan worden vasthouden en er tijdig waterafvoer kan plaatsvinden bij een dreigend te natte bodem.

Bodemvochtgehalten worden gemeten met 5TE sensoren. Deze zijn in het midden van het perceel met subirrigatie bij Kremer op 20 cm, 40 cm en 60 cm diepte tussen twee drains en direct naast een drain geïnstalleerd. Bij Paarhuis (SAWAX) zijn deze op dezelfde diepte in het perceel geïnstalleerd. Elke 15 minuten wordt een waarneming geregistreerd en deze worden dagelijks geautomatiseerd uitgelezen en ontsloten via een telemetrie service (ZentraCloud, i.c.m. R). Waarnemingen geven weer of en in welke mate het bodemvocht in de wortelzone verhoogd wordt als gevolg van de toegepaste maatregelen.

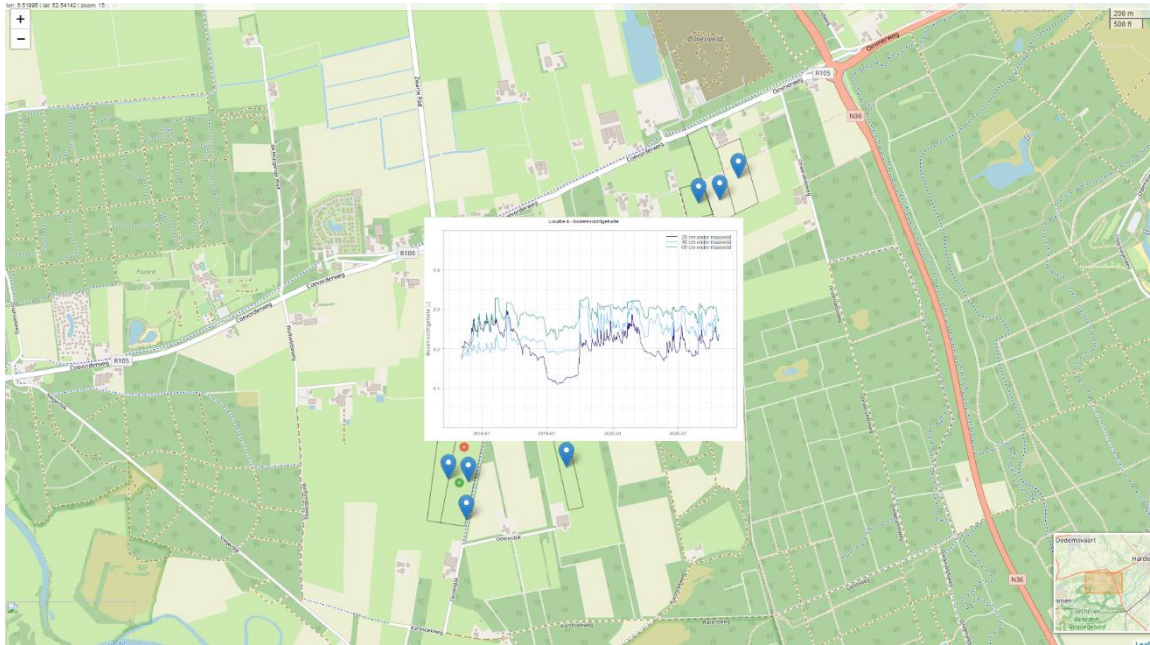
De meteorologische gegevens van het KNMI automatische weerstation (AWS) in Heino (nr. 278) worden gebruikt als invoer voor de modellering van het veldexperiment. Dit station staat ongeveer 30 km van de proefpercelen vandaan. De gemeten luchtdruk wordt gebruikt van het automatische weerstation Hooogeveen (nr. 279).

De coördinaten en hoogten van de meetopstelling zijn ingemeten met een RTK-GPS.



*Figuur 3-8: Meetapparatuur aanwezig op de verschillende proefpercelen. De timelapse camera (wit) met aanvoerput (grijs) en zonnepaneel (A), de binnenkant van de aanvoerput (B), de regenmeter (C), de CTD-10 drukopnemer voor de grondwaterstand (D), bodemvochtsensor 5TE (E), peilbuis put (links) en de datalogger (rechts) (F), de binnenkant van het datalogger kastje (G) en de MULTICAL 21 flowmeter (H). Foto's: Janine de Wit*





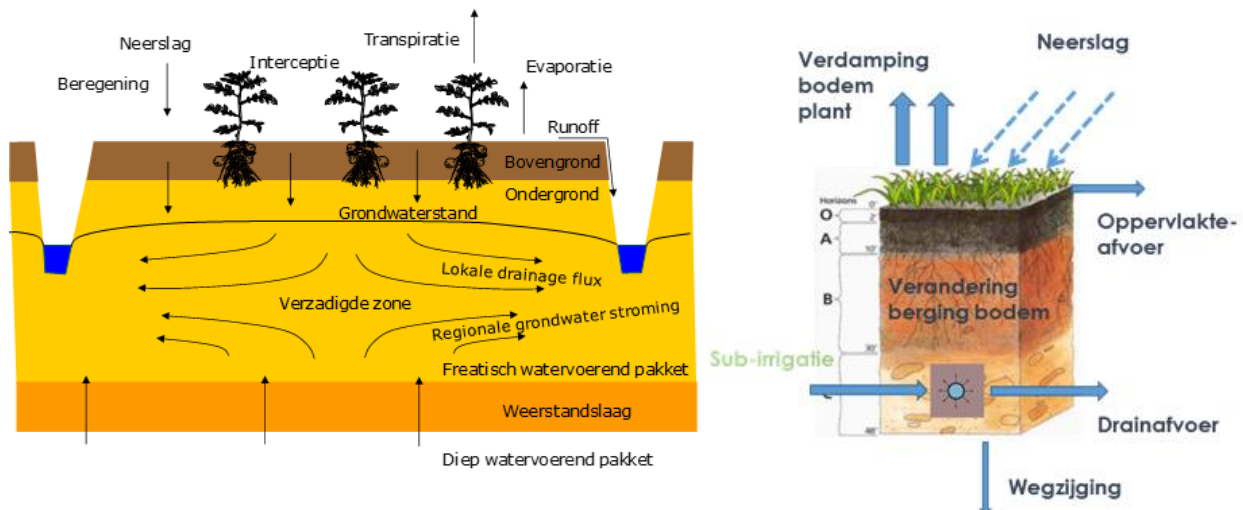
*Figuur 3-9: In dit project opgezet online dataportaal voor Stegeren, waarin dagelijks de actuele meetgegevens worden ontsloten.*

## 4 Automatisch aansturing KAD-systeem

### 4.1 Achtergrond agrohydrologisch 1D-SWAP model

Modelberekeningen voor regelbare drainage met subirrigatie zijn uitgevoerd met een dynamisch model voor de onverzadigde zone en plant-atmosfeer interacties (1D Soil, Water, Atmosphere, Plant (SWAP) model (Kroes et al., 2017)). Dit model is gebruikt om de hydrologische situatie in het proefperceel bij dhr. Kremer te simuleren, en de vochtvoorziening van het gewas. De resultaten hiervan zijn beschreven in De Wit et al. (2021). Daarnaast wordt SWAP gebruikt voor de automatische aansturing van KAD, zoals toegepast op het proefperceel bij dhr. Kremer.

Het SWAP modeldomein is een doorsnede van de bodem midden op het perceel waarbij de belangrijkste hydrologische processen worden gemodelleerd (Figuur 4-1). SWAP simuleert hoofdzakelijk het verticale transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde zone (drainage wordt horizontaal gesimuleerd). Als invoer worden meteorologische condities, bodemfysische parameters volgens Van Genuchten (van Genuchten, 1980), een hydrologische onderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gewaseigenschappen gebruikt (Tabel 4-1). Voor de KAD-sturing wordt gebruik gemaakt van de eenvoudige gewasmodule van SWAP. Uitvoergegevens zijn op dagbasis en zijn onder meer grondwaterstand, bodemvochtgehalte, bodemtemperatuur en de afname in gewasverdamping (transpiratiereductie). De transpiratiereductie is het verschil tussen potentiële en werkelijke transpiratie, veroorzaakt door te natte of te droge omstandigheden in de wortelzone met als gevolg zuurstofstress (natte condities) of droogtestress (droge condities). Daarnaast geeft SWAP uitvoergegevens over alle componenten van de waterbalans (Figuur 4-1).



Figuur 4-1: SWAP modeldomein met belangrijke hydrologische processen (links). Schematische bodemkolom met drainagebuis en situatie bij subirrigatie (rechts); blauwe pijlen geven de componenten van de waterbalans weer. Figuren overgenomen van Kroes et al. (2017). De waterbron van subirrigatie is in Stegeren oppervlaktewater.

## 4.2 Achtergrond KAD-management-algoritme

Het KAD-systeem is erop gericht om water vast te kunnen houden in de bodem van landbouwpercelen tijdens perioden van neerslagoverschot en aanvulling met aanvoerwater in tijden van neerslagtekort, voor zover nodig/gewenst. Als er wateroverlast dreigt, zorgt het KAD-systeem voor het tijdig ruimte maken door water af te voeren. Hierbij wordt een bandbreedte gehanteerd waarin de onzekerheidsmarge van de neerslagvoorspelling wordt meegenomen. De kans dat een voorspelde bui al dan niet lokaal zal voorkomen wordt vooralsnog niet meegewogen. In het KAD-systeem wordt het drainageniveau bepaald door de hoogte van de balg, die handmatig of automatisch ingesteld kan worden (Figuur 4-2). Traditioneel is regelbare drainage gericht op het instellen van een bepaalde grondwaterstand. Die grondwaterstand heeft echter een indirect effect op het de bodemvochtcondities in de wortelzone en hiermee de water- en zuurstofbeschikbaarheid voor plantenwortels. Droogte- en natschade wordt ook bepaald door factoren als neerslag, verdamping, temperatuur en planteigenschappen. Het KAD-systeem richt zich daarom niet op het instellen van een optimale grondwaterstand, maar op het minimaliseren van de droogte- en zuurstofstress (nat) voor het gewas (Bartholomeus et al., 2015). Door deze stress centraal te stellen, via integratie van de processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem, sturen we directer op de optimale groeicondities van het gewas.

Het KAD-management-algoritme bestaat dagelijks uit drie opeenvolgende stappen (Bartholomeus et al. 2015):

1. Er vindt kalibratie en data-assimilatie van SWAP aan metingen plaats, gebruikmakend van PEST (Doherty 2010). Deze eerste stap bestaat uit drie onderdelen: offline kalibratie, online kalibratie en vervolgens online data-assimilatie. De offline kalibratie is gebaseerd op alle beschikbare gemeten grondwaterstand en bodemvochtgehalten, die resulteert in een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen en de drainageweerstand. De online kalibratie is gebaseerd op alleen metingen van de laatste 31 dagen voorafgaand aan de voorspelling, op basis van Visser et al. (2006). Deze kalibratiestap heeft als doel om een optimale schatting van de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket als onderrandvoorwaarde voor SWAP in deze periode te hebben. Met deze stap wordt de seizoenfluctuatie in de stijghoogte meegenomen. De online data-assimilatie is gebaseerd op alleen metingen van de laatste dag. Hiermee worden de vochtcondities van de laatste dag voor de voorspelling zo goed mogelijk gereproduceerd.
2. Er wordt een voorspelling gemaakt van de toekomstige hydrologische condities en plantstress met SWAP. In de voorspellingsstap wordt het drainageniveau gesimuleerd op basis van een gegeven ingesteld niveau in de KAD-put (KAD-niveau). Gebruikmakend van de gekalibreerde parameters, de huidige gesimuleerde vochtconditie als beginconditie en dagwaarden van weersvoorspellingen als modelinvoer, worden drainageniveau, grondwaterstand, bodemvochtgehalte, drainageflux en zuurstofstress voor de toekomstige  $n$  dagen voorspeld.
3. Als laatste wordt het optimale KAD-niveau bepaald. Op basis van de gesimuleerde zuurstofstress en de drainageflux voor de voorspelling, wordt de optimalisatieroutine aangeroepen en wordt het aanbevolen en in te stellen KAD-niveau bepaald. Het aanbevolen KAD-niveau hangt af van de beslisregels:
  1. Indien zuurstofstress: verlaag het KAD-niveau om water af te voeren via drainage.
  2. Indien drainage en geen zuurstofstress: verhoog het KAD-niveau om meer water vast te houden.
  3. Juiste condities: KAD-niveau blijft gelijk, er gebeurt niets.

De mate waarin het KAD-niveau moet worden bijgesteld wordt bepaald via een iteratieve procedure. Allereerst wordt aan de gesimuleerde voorspelde zuurstofstress voor  $n$  dagen een gewicht gegeven via een sigmoïde weegfunctie (minder gewicht aan dagen verder in de toekomst). Verder hangt de iteratieve procedure af van de 'winst' (beperking zuurstofstress of onnodige drainage) die met het bijstellen van het niveau kan worden gehaald. Het uitgangspunt is dat het KAD-niveau zo lang zo hoog mogelijk blijft om zoveel mogelijk water in het systeem vast te houden, zonder zuurstofstress en daarmee natschade voor de plant te veroorzaken.



*Figuur 4-2: KAD-opstelling bij dhr. Kremer. Op de linker foto staat links het zonnepaneel waarmee de balg wordt gevoed, in het midden het kastje voor de handmatige sturing van de balg, en rechts de regelput waar de balg in zit. Op de rechter foto is de balg weergegeven. Foto's: Gé van den Eertwegh.*

### 4.3 Modelopzet 1D-SWAP proefperceel Kremer

De invoergegevens die zijn gebruikt om de SWAP-modelberekening voor automatische sturing van het KAD-systeem bij dhr. Kremer uit te voeren, zijn in tabelvorm weergegeven (Tabel 4-1).

De kalibratie is uitgevoerd op basis van de veldmetingen van het freatisch grondwaterniveau en bodemvochtgehalten op 20 cm, 40 cm, en 60 cm, voor de tijdsperiode 1 januari 2018 – 31 december 2019, bij dhr. Kremer. De kalibratie is in twee uitstappen uitgevoerd en gedetailleerd beschreven in Bijlage II.

Tabel 4-1: Toelichting input SWAP model voor automatische KAD-sturing bij dhr. Kremer (Stegeren)

	Input
<b>Bodemopbouw</b>	De bodem is ingedeeld in een toplaag van 0 – 30 cm en daaronder (30 – 500 cm) zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2/B2 volgens de Staringreeks 2018 (Heinen et al., 2020). Met behulp van de kalibratie met SWAP-PEST zijn deze parameters locatiespecifieker gemaakt (Tabel II-2).
<b>Meteorologie</b>	KNMI AWS station nummer 278 (Heino voor de SWAP-PEST kalibratie). Dagelijkse regengegevens met daarbij de duur van de bui zijn meegenomen in SWAP.
<b>Onderrandvoorwaarde</b>	De onderrand van het model is in beginsel gebaseerd op een hydrologische onderrand waar een gemiddelde stijghoogte van 125 cm –mv is opgelegd (gebaseerd op peilbuis ondiep filter), met een amplitude van 50 cm. De weerstand van de scheidende laag (RIMLAY) is 500 dagen. Deze drie waarden zijn vervolgens gekalibreerd (Tabel II-2).
<b>Drainageweerstand</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>De zijkant van het model heeft een drainageweerstand (RDRAIN1) die in beginsel is geschat volgens slootafstand * factorL = 140 * 1.7 dm<sup>-1</sup> (van der Gaast, 2006). De zijkant van het model heeft als infiltratieweerstand (RINF1) dezelfde waarde als de drainageweerstand.</li> <li>De drainage- en infiltratieweerstand van het drainagesysteem zijn in beginsel geschat op 50 dm<sup>-1</sup>.</li> </ol> <p>Alle vier deze parameters zijn vervolgens gekalibreerd met SWAP-PEST (Tabel II-2).</p>
<b>Referentieniveau</b>	Het referentieniveau van het maaiveld is 7.35m+NAP, dit is de maaiveldhoogte tussen de drain bij dhr. Kremer (Stegeren)
<b>Gewas-input</b>	De bewortelbare diepte, de diepte tot welke plantenwortels maximaal in de grond kunnen doordringen, hangt samen met het bodemtype en het landgebruik. In het model is aangenomen dat de worteldiepte van gras 30 cm is in de gehele groeiperiode (van der Gaast, 2006).
<b>Stuwparameters</b>	<p>De werking van de balg, in SWAP, wordt o.a. bepaald door de hoogte van de balg (cm), de afvoercoëfficiënt <math>\alpha_{input}</math> (m<sup>3</sup>-<math>\beta</math> s<sup>-1</sup>) en de afvoere exponent <math>\beta</math> (-) (Kroes et al., 2017). Voor de afvoercoëfficiënt en –exponent zijn in beginsel de standaardwaarden uit SWAP gebruikt.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hoogte balg: metingen bij Kremer</li> <li>Afvoercoëfficiënt <math>\alpha_{input}</math>: 3.0 m<sup>3</sup>-<math>\beta</math> s<sup>-1</sup></li> <li>Afvoere exponent <math>\beta</math>: 1.4765</li> </ul> <p>De afvoercoëfficiënt en de afvoere exponent zijn vervolgens in SWAP-PEST gekalibreerd (Tabel II-2).</p>
<b>Slootpeilen</b>	De slootpeilen (WLP) zijn gebaseerd op de metingen zoals gemeten in de aangrenzende perceelsloot bij Kremer.
<b>Wateraanvoer</b>	De aangevoerde hoeveelheid water (WSCAP) is zoals gemeten bij de pomp bij Kremer.
<b>Gewasgroei</b>	De SWAP simulaties zijn met het simpel gras model uitgevoerd.

#### 4.4 Automatisch aansturing drainageniveau proefperceel Stegeren

Op basis van het KAD-management-algoritme geeft SWAP een verwachting voor het gewenste drainageniveau (hoogte van de balg) waarbij het perceel de optimale vochtcondities voor het gewas heeft. Dit drainageniveau wordt weergegeven in cm onder maaiveld. Echter, het online besturingssysteem (TWIN systeem, Hoofdstuk 2.2) gekoppeld aan de balg (Figuur 4-2), verstelt de balg in procenten. Het verwachte balgniveau onder maaiveld is daarom omgerekend naar het verwachte balgniveau in procenten:

$$balg\_NAP_{verwacht} = Referentiehoogte_{perceel} + \frac{balg\_SWAP_{verwacht}}{100}$$

De procentuele hoogte van de balg is te berekenen met:

$$balg\_procentueel_{verwacht} = \frac{balg\_NAP_{verwacht} - hoogte\_balg\_0procent}{0.60071}$$

In het model is een gemiddelde maaiveldhoogte van 7.35m+NAP aangenomen voor het gehele perceel bij Kremer.

## 5 Resultaten

### 5.1 Veldmetingen subirrigatieproeven

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de veldmetingen vanaf juli 2018 tot en met 31 maart 2020. In deze periode hebben in totaal in 2019 zes veldbezoeken plaatsgevonden (5 februari, 13 maart, 25 april, 5 juni, 23 juli, 15 augustus en 18 november) en nog één in 2020 (13 februari). Tijdens deze veldbezoeken zijn ook handmetingen verricht. Eerst zijn de resultaten van de verschillende proeven met regelbare drainage met subirrigatie beschreven, onderverdeeld in wateraanvoer en -afvoer, grondwaterniveau, bodemvochtgehalte en gewasopbrengst. Vervolgens wordt de aansturing van het drainageniveau in het klimaatadaptieve drainagesysteem met subirrigatie bij dhr. Kremer beschreven. Als laatste worden de resultaten van de veldmetingen van de SAWAX-stuw beschreven.

Over het algemeen geldt dat de lengte van de meetperiode nog te beperkt is om goede duiding te geven aan de resultaten, ook omdat we bij het opstarten van de metingen te kampen hadden met diverse kinderziektes van de systemen. Desalniettemin is het van belang de metingen en onder welke omstandigheden deze tot stand zijn gekomen hierbij wel vast te leggen en waar mogelijk te onderwerpen aan een eerste interpretatie.

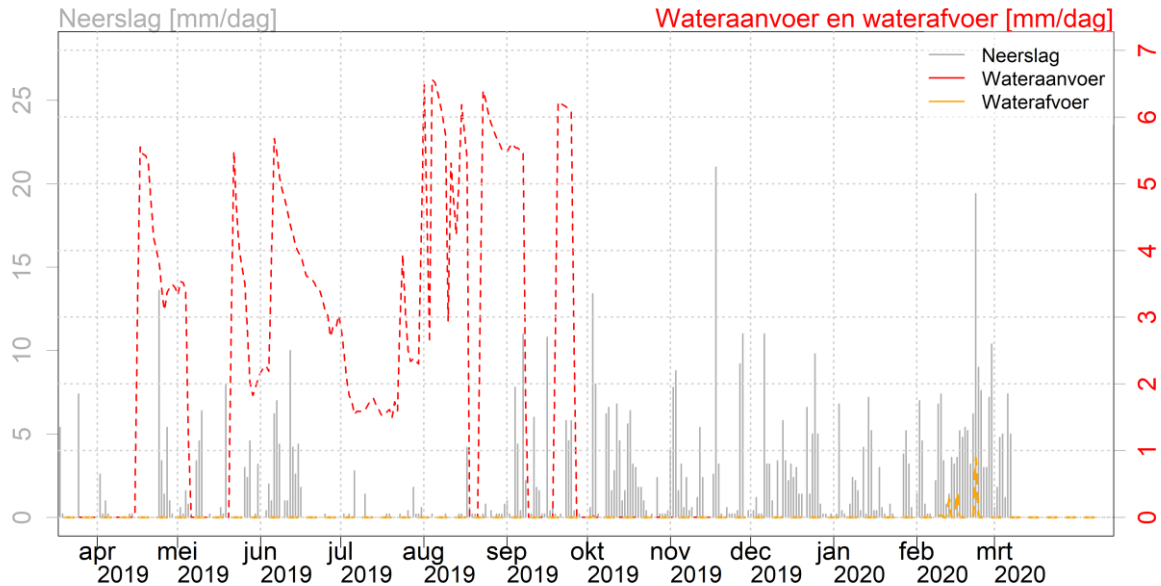
#### 5.1.1 Wateraanvoer en waterafvoer

Wateraanvoer heeft actief plaatsgevonden bij alle agrariërs. Een debietmeter is alleen geïnstalleerd bij dhr. Kremer en dhr. Paarhuis, bij de overige agrariërs is het debiet dat het perceel in is gepompt niet actief gemonitord. Daarnaast is de afvoer bij dhr. Kremer ook actief gemonitord.

In 2019 is er bij Kremer 12933 m<sup>3</sup> water aangevoerd voor subirrigatie. Dit subirrigatie-perceel is 2.51 ha, dus dit betekent dat er 515 mm wateraanvoer is geweest. De pomp heeft 135 dagen aangestaan tussen 16 april en 26 september. Door technische redenen heeft de pomp niet constant op volledige capaciteit kunnen draaien en de pomp heeft op sommige momenten uitgestaan. De pomp wordt gevoed door het zonnepaneel, dat zit aangesloten op de accumonitor. Deze zorgt ervoor dat het systeem automatisch uitschakelt als de accu's te leeg dreigen te raken en schakelt weer in als de accu's voldoende vol zijn (t.b.v. de levensduur van de accu's). Ook is er tijdens de proef sloopvuil in het filter van de pomp gekomen, waardoor de pomp soms niet op volledige capaciteit water kon aanvoeren (Figuur 5-1). Gemiddeld is er 3.8 mm water per dag het perceel ingepompt, met een minimum van 1 mm en maximum van 6.8 mm per dag (Figuur 5-2). In totaal heeft er 48 m<sup>3</sup> waterafvoer plaatsgevonden over de hele periode, wat neerkomt op 1.93 mm. Afvoer heeft enkel plaatsgevonden eind februari 2020, toen er meerdere buien zijn gevallen. In de zomer 2019 heeft er geen afvoer plaatsgevonden; dit was dan ook een extreem droog jaar op de hoge zandgronden (van den Eertwegh et al., 2020a).



Figuur 5-1: Sloopvuil in het filter van de pomp. Foto: Janine de Wit



Figuur 5-2: Gemeten water aan- en afvoer, en neerslag bij dhr. Kremer in 2019 en begin 2020. Afvoer heeft enkel plaatsgevonden in februari 2020.

### 5.1.2 Grondwaterniveau

De grondwaterstand aan het begin van de veldproeven was waarschijnlijk, als gevolg van de droge zomer in 2018, lager dan in een gemiddeld jaar. In de wintermaanden zijn duidelijke pieken te zien in het grondwaterniveau, in dezelfde periode als er hevige buien waren (Figuur 5-3). Op 11 april 2019 is het zomerpeil ingesteld. Voor de proef bij Kremer geldt dat, zowel op het subirrigatieperceel als op het referentieperceel, het grondwaterniveau hierdoor is gestegen (Figuur 5-3). Op 16 april is het grondwaterniveau op het subirrigatieperceel opnieuw gestegen met  $\pm 20$  cm, als gevolg van de start van wateraanvoer (Figuur 5-3). Het grondwaterniveau op het referentieperceel is op dit tijdstip niet gestegen, wat weergeeft dat de wateraanvoer voor subirrigatie hier weinig invloed heeft op het grondwaterniveau van het referentieperceel. Hoewel de aanvoer pomp nog niet optimaal functioneerde in de eerste paar maanden door technische problemen (Figuur 5-3), is toch te zien dat het grondwaterniveau in het subirrigatieperceel is gestegen ten opzichte van het referentieperceel (Figuur 5-3). Tot begin augustus is het verschil tussen het subirrigatieperceel en het referentieperceel te zien. Na augustus worden de verschillen in stijghoogten tussen beide percelen minder groot.

Op het referentieperceel bij Kremer vindt geen wateraanvoer plaats, maar wel beregening als dit nodig is. De zomer van 2019 was zeer droog, waardoor er drie beregeningsbeurten op het referentieperceel zijn geweest (8 juli 2019, 18 juli 2019 en 29 juli 2019). Als gevolg hiervan is een stijging in het freatisch grondwaterniveau op het referentieperceel waargenomen (Figuur 5-3). Echter, de stijghoogte in de diepe peilbuis (ook op het referentieperceel) laat een minder duidelijk stijging zijn als gevolg van de beregeningsbeurten. Dit wijst erop dat de beregening vooral invloed heeft op het freatisch grondwaterniveau en waarschijnlijk de gewasverdamping, en minder op de stijghoogte in het diepe pakket. Daarnaast is er op de tijdstippen van beregening ook een stijging in het freatisch grondwaterniveau op het subirrigatieperceel te zien, terwijl het niet heeft geregend. Dit komt waarschijnlijk omdat een deel van de beregening ook op het subirrigatieperceel is gevallen (mondelinge mededeling, agrariër Kremer). Verder blijkt uit Figuur 5-3 dat op het referentieperceel de ondiepe stijghoogte hoger is dan de diepe stijghoogte, oftewel er treedt wegzijging op. Op 27 september 2019 is de pomp uitgezet, maar tegelijkertijd zijn er meerdere buien geweest, waardoor het grondwaterniveau is gestegen. Half oktober is het

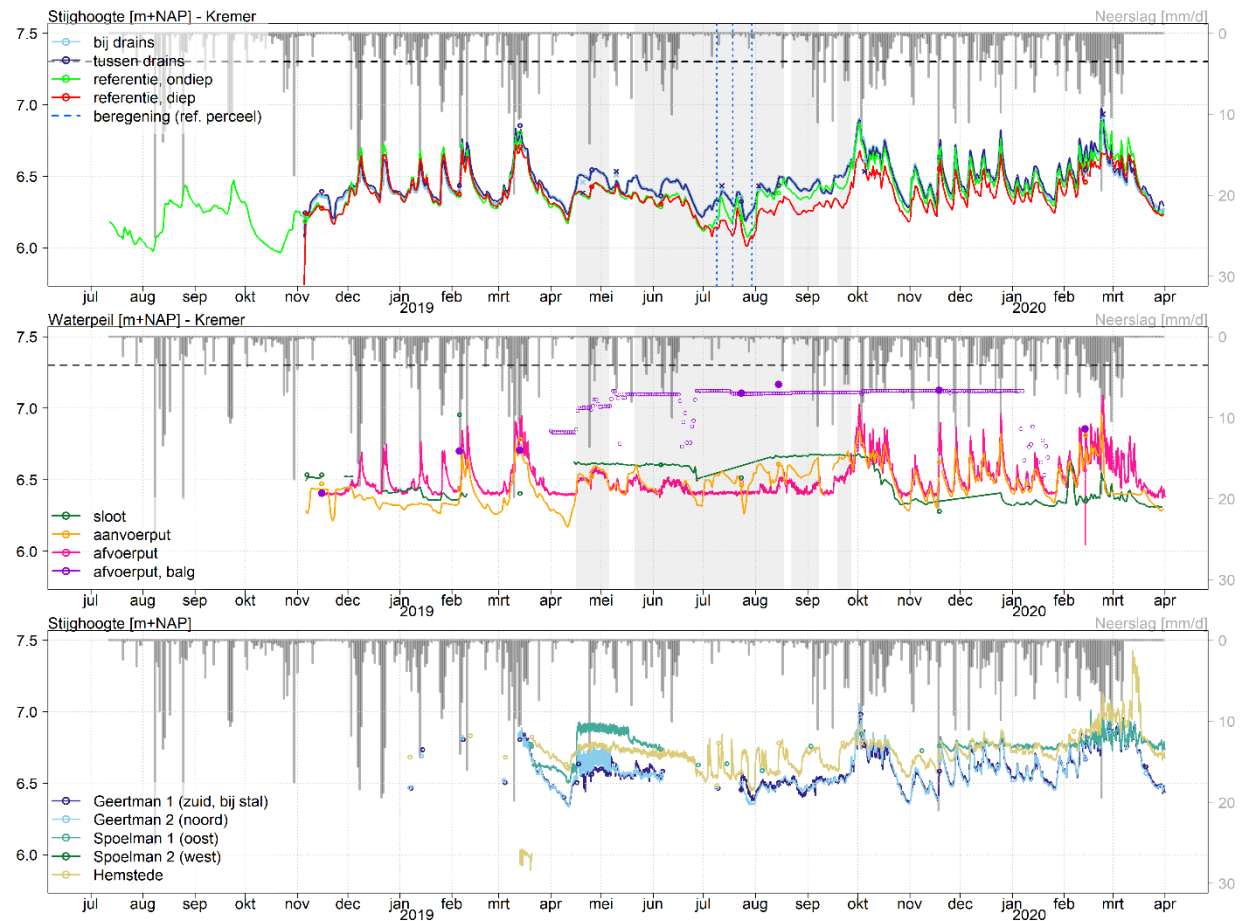


winterslootpeil ingesteld, waardoor het grondwaterniveau is gedaald. In de winter 2019-2020 zijn er meerdere buien geweest, waardoor het grondwaterniveau fluctuerend is. Aan het einde van de winter 2020 is er vrijwel geen neerslag meer gevallen, waardoor het grondwaterniveau opnieuw is gedaald.

Het subirrigatiesysteem is een gesloten systeem, waardoor het peil in de aanvoerput vrijwel gelijk is aan de afvoerput als de pomp aanstaat (Figuur 5-3). Een opvallende piek is in februari 2020 te zien, op het moment dat de balg van het KAD-systeem werd getest. Over het algemeen is in de wintermaanden het peil in de afvoerput iets hoger dan in de aanvoerput (Figuur 5-3). Met behulp van het KAD-systeem kan de afvoer gestuurd worden. Echter was het jaar 2019 zo droog dat draineren niet nodig was en de balg constant op 100% (7.10 m+NAP) heeft gestaan. Rond 22 juli 2019 is een duidelijke tijdelijke daling te zien in het slootpeil, in de aanvoerput en de grondwaterstand. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het korven van de watergangen, waardoor de sloot relatief breder is geworden en het waterpeil is gezakt. Begin augustus is dit weer hersteld, waarschijnlijk doordat er een hoger peil op de watergang is gezet, als gevolg van de zeer droge periode. Het slootpeil heeft in de zomer 2019 hoger gestaan dan het peil in de aanvoerput. Dit is een onwenselijk effect; het doel van subirrigatie is immers om een hoger waterniveau dan het slootpeil in de put te realiseren. Hoewel er wel 515 mm water het perceel in is gepompt in 2019, is er maar een relatief klein stijghoogteverschil gecreëerd tussen het subirrigatieperceel en het referentieperceel ( $\pm 20$  cm). Dit kan betekenen dat er relatief veel water weggaat via de ondergrond (wegzijging). Mogelijk kan dit verklaard worden doordat er geen leemlaag is aangetroffen bij de plaatselijke boringen, en er te weinig weerstand in de bodem aanwezig is om met het beschikbare pompdebiet voor subirrigatie voldoende water aan te voeren. In 2020 is er een extra pomp geplaatst om het freatisch grondwaterniveau in de zomer van 2020 te verhogen. De resultaten hiervan zijn niet opgenomen in deze rapportage, maar worden gerapporteerd binnen het vervolgproject KLIMAP.

De percelen van de verschillende agrariërs liggen relatief dicht bij elkaar, maar hebben wel verschillende oppervlaktewaterpeilen. Het zomer- en winterpeil bij Hemstede en Spoelman is 6.75m m+NAP, bij Geertman is het zomerpeil 6.75m+NAP en winterpeil 6.35m+NAP, en bij Kremer en Paarhuis is het zomerpeil 6.45 m+NAP en het winterpeil 6.05 m+NAP. De grondwaterniveaus bij Geertman, Spoelman en Hemstede laten een soortgelijk verloop zien als bij Kremer. Het grondwaterniveau bij Hemstede reageert ook in de zomer sterk op een aantal kleine buien (Figuur 5-3). Daarnaast reageert het grondwaterniveau op alle locaties sterk op het inzetten van het winterpeil (oktober 2019) en de verschillende buien in de winter 2019-2020. Ook reageert het grondwaterniveau sterk op de aanvoer van water. Dit is niet aangegeven in de Figuur 5-3 omdat de pomp bij elke agrariër op een andere datum is aangegaan en uitgezet. Grofweg heeft elke pomp tussen half april 2019 en half oktober 2019 aangestaan. Door technische redenen zijn enkele stijghoogte-reeksen niet volledig, in deze perioden zijn wel handmetingen verricht.

Het perceel bij Geertman is ingericht met twee drainagebuissystemen op het graslandperceel, zodat de agrariër zelf kan bepalen hoe de aangevoerde hoeveelheid water wordt verdeeld tussen beide percelen. In de praktijk is 2019 een zeer droog jaar geweest, waardoor er geen sprake was van verwachte natschade op het noordelijke deel van het perceel. Hierdoor is het in 2019 niet nodig geweest om een verschil te maken in de aangevoerde hoeveelheid water op het noordelijke en zuidelijke gedeelte van het perceel.



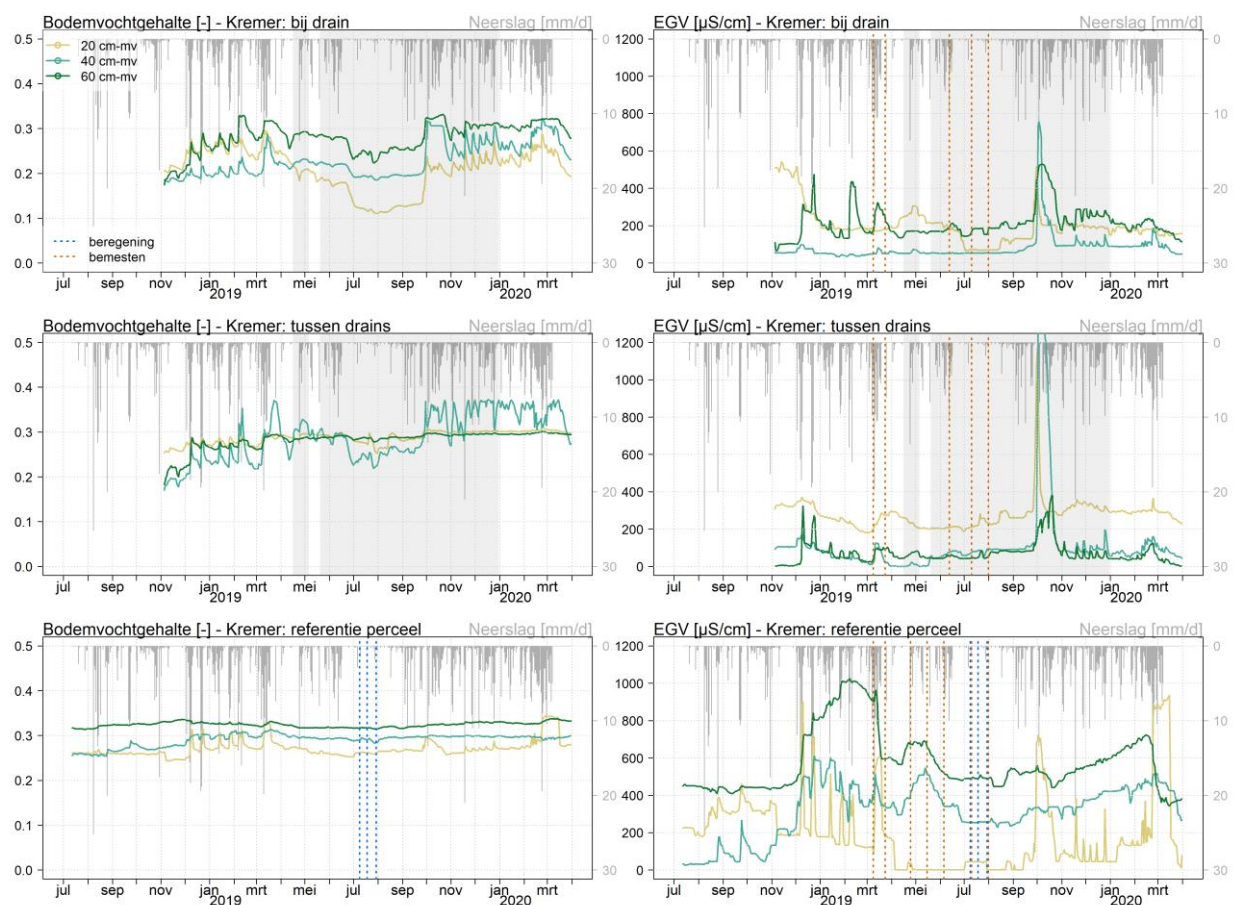
Figuur 5-3: Boven: gemeten stijghoogten bij dhr Kremer. Midden: het gemeten sloop-, aanvoerput-, en afvoerput-peil en de hoogte van de balg bij dhr. Kremer. Onder: gemeten stijghoogte bij agrariërs Geertman, Spoelman en Hemstede. De zwarte stippellijn in de bovenste grafiek geeft de maaiveldhoogte aan.

### 5.1.3 Bodemvocht

Het bodemvochtgehalte is op drie plekken bij Kremer gemeten (Figuur 5-4). Het vochtgehalte bij de drain neemt toe met de diepte. Ten eerste stijgt het bodemvochtgehalte na het instellen van het zomerpeil en het starten van subirrigatie half april; hierbij is het effect eerst zichtbaar in de diepere meetpunten en daarna ook in de ondiepe. Dit is zoals verwacht mag worden: een verhoging van de grondwaterstand leidt via capillaire nalevering tot een hoger vochtgehalte in de wortelzone.

Daarnaast stijgt het bodemvochtgehalte sterk als gevolg van buien (oktober 2019). Tijdens het opzetten van het zomerpeil (begin april 2019), het korven van de watergang (22 juli 2019) en het opzetten van het winterpeil (half oktober 2019), zijn duidelijke fluctuaties in het bodemvochtgehalte op 60 cm bij de drain en tussen de drain te zien (Figuur 5-4). Op het referentieperceel zijn deze fluctuaties vrijwel niet te zien. Dit zou kunnen betekenen dat er meer laterale stroming (op diepte) plaatsvindt vanaf de sloop het subirrigatie-perceel in dan vanaf de sloop het referentieperceel in. Het bodemvochtgehalte 'tussen de drains' op 20 cm en 40 cm diepte laat weinig fluctuaties zien, net zoals het bodemvochtgehalte op het referentieperceel op 40 cm en 60 cm diepte. Het zou ook kunnen zijn dat deze sensoren de fluctuaties niet correct meten. Het bodemvochtgehalte op 40 cm bij de drain is een fractie hoger dan het bodemvochtgehalte op 40 cm tussen de drains (Figuur 5-4).

Naast het bodemvochtgehalte is met dezelfde sensoren ook het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) bij de drain, tussen de drain en op het referentieperceel bij Kremer gemeten. Het EGV kan een indicatie geven van het soort water dat ter plekke aanwezig is in de bodem (neerslag, aangevoerd water, mengvorm), maar ook de activiteiten van de boer (o.a. bemesten) kunnen invloed hebben. Het EGV van subirrigatiewater (oppervlaktewater) is hoger dan het oorspronkelijke water aanwezig in de bodem. Het EGV bij de drain op 20 cm diepte stijgt iets op het moment dat de pomp wordt aangezet. Tussen de drain is deze EGV-verhoging vrijwel niet te zien. Er zijn wel duidelijke pieken in het EGV op het moment dat het regent (begin oktober 2019). Bemesting vindt plaats op zowel het subirrigatie-perceel als op het referentieperceel. Deze momenten zijn niet goed terug te zien in de EGV-metingen (Figuur 5-4).



Figuur 5-4: Gemeten bodemvochtgehalte en EGV bij dhr. Kremer, bij drain (boven), tussen drains (midden) en op het referentieperceel (onder). De bodemvochtmetingen op 40 cm en 60 cm tussen de drains geven weinig fluctuaties gedurende het jaar, waardoor deze resultaten als niet betrouwbaar zijn geïnterpreteerd.

#### 5.1.4 Gewasopbrengst

De gewasopbrengst is in 2018 en 2019 bijgehouden door agrariër Kremer op het subirrigatie- en referentieperceel (Tabel 5-1). In 2019 was de gewasopbrengst op beide percelen lager dan in 2018. Echter zijn de resultaten tussen beide percelen en tussen de jaren moeilijk met elkaar te vergelijken. Allereerst was het subirrigatiesysteem in 2019 pas in werking, dus dit perceel is in 2018 beregend. Daarnaast is het referentieperceel in 2018 en 2019 beregend. Als derde is na de aanleg van het subirrigatiesysteem dit perceel opnieuw ingezaaid, waardoor hier begin 2019 een

gehele nieuwe grasmat lag. Als vierde verschil is dat het subirrigatieperceel in 2019 op verschillende momenten en met verschillende hoeveelheden (725 ton) bemest is t.o.v. het referentieperceel (670 ton). Als laatste is het grasmanagement van beide percelen verschillend doordat beweiding op verschillende tijdstippen heeft plaatsgevonden. Al met al zijn deze resultaten niet geschikt voor duiding van de effecten van subirrigatie op de gewasopbrengst in 2019.

*Tabel 5-1: gewasopbrengst gemeten bij dhr. Kremer op het subirrigatie- en referentieperceel (gegevens aangeleverd door agrariër Kremer, d.d. 20-01-2020). Het gras op het subirrigatie- en referentieperceel groeiden in 2018 onder vergelijkbare condities. Begin 2019 is het subirrigatieperceel opnieuw ingezaaid, waardoor de gewasopbrengst van het subirrigatieperceel niet kan worden vergeleken met de gewasopbrengst op het referentieperceel.*

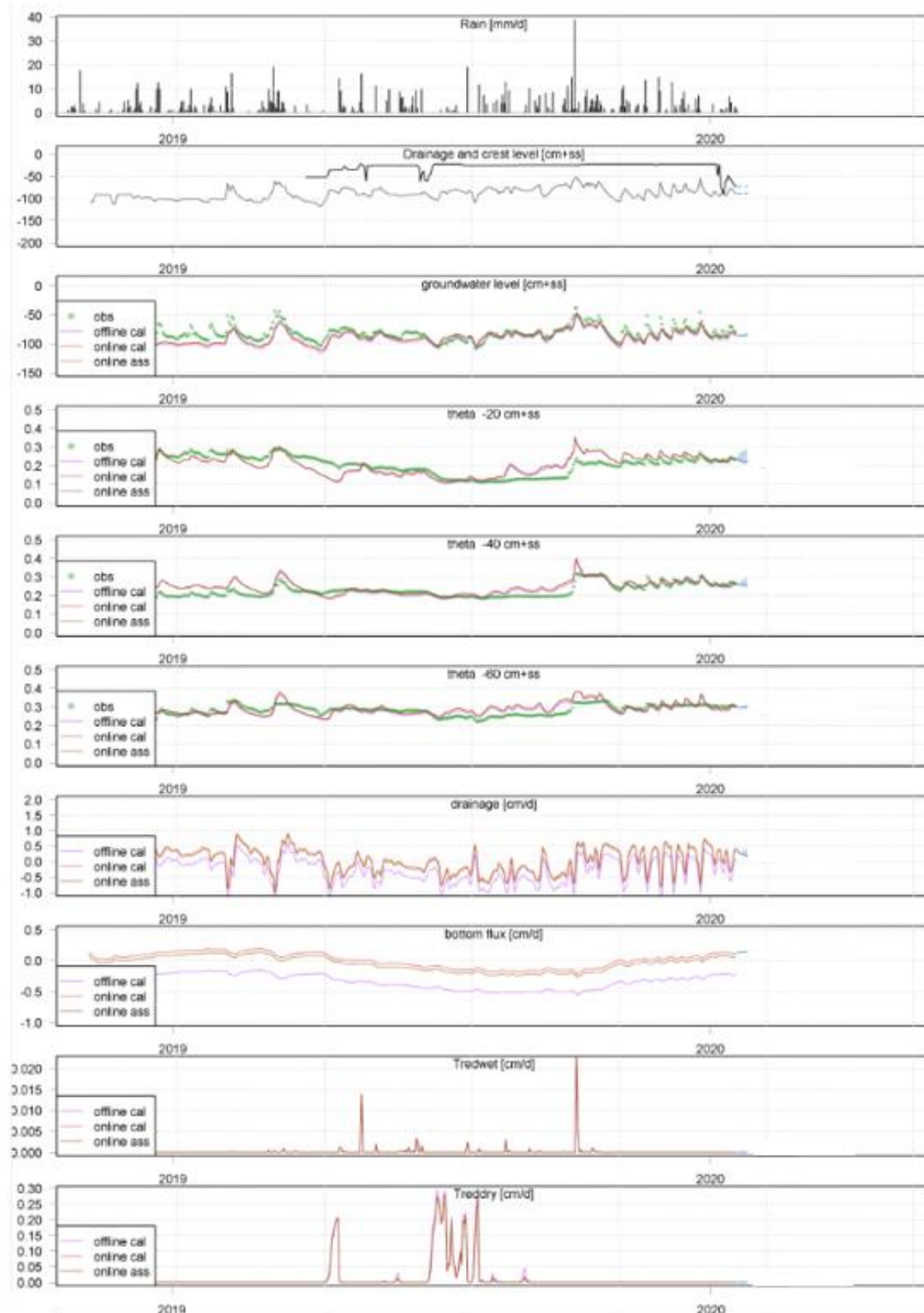
Jaar	Subirrigatieperceel [kgDS]	Referentieperceel [kgDS]
2018	10350 (geen subirrigatie)	10500
2019	8750	10000

## 5.2 Automatische aansturing drainageniveau

Het KAD-systeem is erop gericht om water vast te kunnen houden in de bodem van landbouwpercelen tijdens perioden van neerslagoverschot en aanvulling met aanvoerwater in tijden van neerslagtekort, voor zover nodig/gewenst. Als er wateroverlast dreigt, zorgt het KAD-systeem voor het tijdig vergroten van de bergingscapaciteit door ruimte maken door water te draineren. Het gesimuleerde grondwaterniveau met het KAD-management-algoritme is gelijk aan het gemeten grondwaterniveau bij de drains op het perceel van Kremer (Figuur 5-5). Ook de gesimuleerde bodemvochtgehalten op 20 cm, 40 cm en op 60 cm zijn vrijwel gelijk aan de observaties. Dit geeft voldoende vertrouwen in het model.

Het jaar 2018 was een zeer droog jaar, met ook een droge winter (2018-2019). De grondwaterstanden waren begin 2019 in het oosten van Nederland nog niet hersteld (van den Eertwegh et al., 2020a). Doordat het jaar 2019 vervolgens ook een droog jaar was, heeft de balg het hele groeiseizoen op 100% gestaan. Hoewel er op deze manier zo veel mogelijk water in het bodemsysteem vast werd gehouden (er was nauwelijks sprake van afvoer), is er toch droogtestress ( $\pm 3 \text{ mm d}^{-1}$ ) gemodelleerd in de zomermaanden. Het model heeft, zoals verwacht, nauwelijks natschade gemodelleerd ( $\pm 0.02 \text{ mm d}^{-1}$ ). Pas na alle buien in november en december 2019 voorspelde SWAP begin januari 2020 een lagere stand dan 100% van de balg, oftewel: water afvoeren (Figuur 5-5). Dit geeft weer dat het KAD-management-algoritme werkt. Vervolgens was de zomer van 2020, voor de derde maal op rij, weer zeer droog, waardoor de balg constant op 100% heeft gestaan, oftewel: zoveel mogelijk water werd vastgehouden. Het doel van het KAD-management-algoritme om ook natschade te voorkomen kon dus in de periode van dit project (2018-2020) niet getest worden.

Het geoptimaliseerde (gekalibreerde) SWAP-PEST model, gebruikt voor de aansturing van het drainageniveau, is ook gebruikt om inzicht te krijgen in de effecten van regelbare drainage met subirrigatie op de hydrologische situatie, waterbalanscomponenten, en gewasvoorziening op het proefperceel bij dhr. Kremer. Deze resultaten staan beschreven in De Wit et al. (2021).



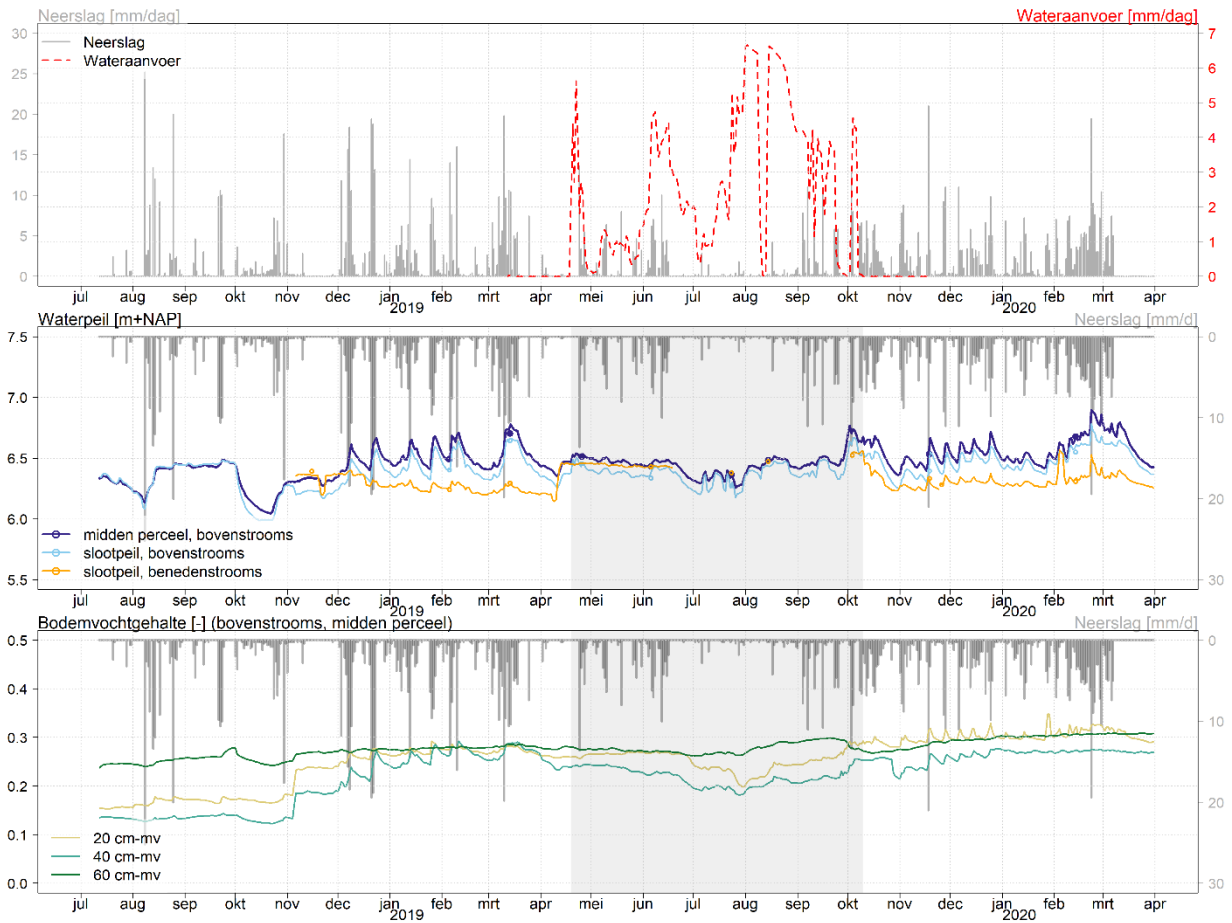
Figuur 5-5: Resultaten KAD-algoritme met gecombineerde model SWAP-PEST voor de aansturing van de balg om de optimale drainagehoogte in te stellen voor een optimale gewasvoorziening. De kalibratie heeft plaatsgevonden op de metingen tussen 5 november 2018 en 20 januari 2020.

### 5.3 Veldmetingen slimme SAWAX-stuw

Het doel van de maatregel SAWAX-stuw is om automatisch/mechanisch, dus zonder centrale sturing, een tot 0.5 m hoger waterpeil in de perceelwatergang te realiseren dan aan de benedenstroomse zijde van de stuw. Dit heeft als gevolg dat de percelen aan de bovenstroomse zijde een relatief hogere drainagebasis krijgen dan zonder een SAWAX-stuw. In de winter van 2018-2019 was het bovenstroomse oppervlaktewaterpeil hoger dan het benedenstrooms oppervlaktewaterpeil (Figuur 5-6); er is immers sprake van afvoer en de stuw doet zijn werk. Vanaf het moment dat het zomerpeil is ingesteld (april 2019) is het gelukt om enige wateraanvoer te realiseren voor het bovenstroomse gebied. Wat onvoldoende is gelukt is het structureel verhogen van het waterpeil bovenstrooms in vergelijking met het peil benedenstrooms. Dit kwam door een te kleine pompcapaciteit in combinatie met wegzijging van water uit het bovenstroomse gebied. In de winter 2019-2020 was het oppervlaktepeil bovenstrooms logischerwijs weer hoger dan benedenstrooms.

In de periode 19 april 2019 tot 10 oktober 2019 heeft de pomp aangestaan om water van benedenstrooms naar bovenstrooms te pompen. Er is in deze tijd 11.765 m<sup>3</sup> water gepompt, wat neerkomt op ongeveer 468 mm water (uitgaande van 2.51 ha). Door technische redenen heeft de pomp soms niet op volledige capaciteit kunnen draaien, waardoor er in de praktijk tussen de 0 – 7 mm water per dag het perceel is ingepompt (Figuur 5-6).

Het bodemvochtgehalte is bovenstrooms op het perceel gemeten op 20 cm, 40 cm en 60 cm diepte. Het is opvallend dat het bodemvochtgehalte op 20 cm hoger is dan op 40 cm, mogelijk werkt de sensor op 20 cm niet goed. Zoals hiervoor aangegeven is het niet gelukt om in de zomerperiode bovenstrooms een hoger oppervlaktewaterniveau te realiseren dan benedenstrooms. Er is dan ook geen effect te zien in het bodemvochtgehalte in het perceel. Verschillende regenbuien en het opzetten van zomer- en winterpeil zijn wel terug te zien in het bodemvochtgehalte (Figuur 5-6).



Figuur 5-6: Gemeten neerslag en wateraanvoer (boven), gemeten waterpeilen en gemeten bodemvochtgehalte bovenstrooms bij dhr. Paarhuis.

## 6 Discussie en conclusie

Om beter inzicht te krijgen in effecten van maatregelen voor een klimaat-robust watergebruik op perceelniveau zijn er, binnen het programma Lumbricus, in Stegeren (Overijssel) diverse percelen ingericht met klimaat adaptieve maatregelen zoals regelbare drainage met subirrigatie, met oppervlaktewater als bron, en de slimme SAWAX-stuw. De veldexperimenten in Stegeren zijn uitgevoerd om watermaatregelen in de landbouw op het niveau van perceel en kavelsloot te testen, toe te passen, systemen te vernieuwen en de agrariërs actief te betrekken. Via beheermaatregelen zijn stappen gezet richting actief grondwaterbeheer. In het geval van KAD met subirrigatie is een online automatisch beheersysteem geïmplementeerd. We hebben een tweede versie van de SAWAX ontworpen, gebouwd en getest.

Het doel van de watermaatregelen, zoals vormgegeven in Stegeren, was problemen op te lossen die in 2016/2017 samen met de agrariërs en onderzoekers zijn geconstateerd, zoals te droge en te natte delen van percelen. Daarnaast wilden we kunnen anticiperen op hydro-meteorologische situaties en risico's en het beschikbare zoet water verantwoord benutten. Door de weersomstandigheden binnen de looptijd is qua veldproeven de nadruk komen te liggen op anticiperen op droog weer via wateraanvoer en subirrigatie. Een natte periode, eventueel met kans op wateroverlast, heeft zich niet of nauwelijks voorgedaan binnen de doorlooptijd van de proeven. Daardoor hebben we onvoldoende kans gezien om in de praktijk te testen en effecten te zien van water vasthouden.

Alle regelbare drainagesystemen in de veldproeven zijn in het Programma Lumbricus nieuw aangelegd en er zijn nieuwe technieken in de proeven toegepast. De aanleg van drainagesystemen verdient zorg en nauwgezet werken tijdens de aanleg. Te droge en te natte omstandigheden moeten bij de aanleg gemeden worden, alsmede te snel werken in veld. Er zijn kinderziekten opgetreden bij de toegepaste technische apparatuur. Het is zaak om kinderziektes steeds op korte termijn aan te pakken en te verhelpen. Dat verdient zorg en tijdige actie. Hoe korter de periode van storing en/of falen van apparatuur of sensoren duurt, des te groter de kans van slagen van de proef en van latere analyse. Het eerste jaar van de proef (2019) waren er leerpunten ten behoeve van de nieuwe, geïnstalleerde apparatuur, bijvoorbeeld het pompsysteem. In de proeven is gewerkt met oppervlaktewater als aanvoerbron. Echter, in de zomerperiode heeft slootvuil in het filter voor de pomp geleid tot een verminderde aanvoer van water naar de pomp. Er wordt aanbevolen om in vervolgprojecten aandacht te geven aan het bepalen van een robuuste methode om het filter schoner te houden. Het tweede punt is dat de pompsystemen worden gevoed door zonne-energie. Op minder zonnige dagen schakelt een accumonitor het systeem automatisch uit als de accu's te leeg dreigen te raken. Het systeem schakelt weer automatisch in als de accu's voldoende vol zijn. Echter gebeurt dit ook op momenten dat het wel gewenst was dat de pomp aanstond, maar er dus onvoldoende energie beschikbaar was om de pomp te laten draaien. Als laatste bleek de pompcapaciteit bij aanvang van de proef te laag, waarna de pompcapaciteit en de energievoorziening zijn uitgebreid (2020). Deze veldproeven dragen aldus bij aan het ontwikkelen van systemen en leren van praktische zaken, waardoor systemen beter ingesteld kunnen worden op de praktijk.

Veldmetingen waren erop gericht om inzicht te krijgen in de effecten van de onderzochte maatregelen op verschillende componenten van het watersysteem: neerslag, debiet van wateraanvoer en -afvoer van en naar de systemen, waterniveaus in oppervlaktewater en in regelputten, grondwaterstand en stijghoogte, en bodemvochtgehalten. De sensoren en handmetingen hebben hun vruchten afgeworpen en tot veel feitelijke



informatie geleid over de toestand van systemen, de hydrologie en de effecten van de watermaatregelen. Lokale meting van neerslag vraagt zorg en aandacht voor de regenmeter. Een alternatief is gebruik van de gevalideerde data van de KNMI-radar<sup>1</sup>. De metingen van bodemvocht zijn veelal geslaagd. Door kalibratie van sensoren worden deze preciezer, maar dit is een kostbaar en tijdrovend karwei. Ook zonder kalibratie geven de bodemvochtmetingen al duidelijk inzicht in het effect van maatregelen op de vochtvoorziening van gewassen. Metingen van grondwaterstanden en stijghoogten zijn geslaagd en nuttig gebleken om indicaties te krijgen van wegzijging en kwantitatieve informatie te genereren over de effecten van subirrigatie en drainage. Debietmetingen van aanvoer en afvoer zijn nodig om de toch al schaarse metingen van fluxen van de waterbalanstermen beschikbaar te maken voor analyse. Door de metingen via telemetrie en een online portaal te ontsluiten kan continu inzicht worden verkregen in het effect van het weer, een aanpassing in de instellingen van een systeem (agrariër) of een aanpassing aan het oppervlaktewaterbeheer (waterschap) op de grondwaterstand en bodemvochtcondities in het perceel. Onderzoekers en agrariërs hebben zo'n portaal en participatieve monitoring opgezet en ook op dit spoor samengewerkt. Het leverde niet alleen meer informatie op, maar ook systeembegrip, inzicht in handelen en effecten ervan. De combinatie van veldmetingen met sensoren en participatieve monitoring draagt bij aan het leren omgaan met de systemen, zowel ter voorkoming van watertekort als wateroverlast.

Werkelijke verdamping meten is complex en kostbaar, net zoals het bepalen van de drogestofopbrengst van gewassen op de percelen. Deze zijn dan ook niet gemeten in dit onderzoek. Voor een deel kan remote sensing informatie soelaas bieden, op een kwalitatieve manier in ieder geval. Grasland- en bodemmanagement verdient op voorhand meer aandacht en registratie van handelingen, net zoals beregening. Dit verdient aandacht in vervolgonderzoek.

De experimenten in Stegeren hebben tot nog toe een zeer korte doorlooptijd: ruim één jaar aan data is geanalyseerd, waarin zowel kennis over de inrichting en het beheer van de systemen is opgebouwd (met bijbehorende kinderziektes en problemen), als meetgegevens van de effecten van de systemen op verschillende componenten van de waterbalans, zijn verzameld. Een verkenning van het effect van het subirrigatiesysteem op korte termijn op deze proeflocaties is hiermee gerealiseerd. Het is echter van belang om metingen voort te zetten en zo gedurende langere tijd ervaring op te doen met de systemen en tegelijkertijd meetgegevens voor de werking en effecten van de systemen te verzamelen en interpreteren.

De grondwaterstand is in de proeven niet meer dan 20 cm gestegen als gevolg van het regelbare drainagesysteem met subirrigatie. Allereerst heeft dit te maken met een lagere pompcapaciteit in de praktijk dan was ontworpen. Als tweede vond er veel wegzijging en voeding van het regionale grondwater plaats. Door het ontbreken van een duidelijke weerstandbiedende laag is een minder groot stijghoogteverschil gerealiseerd dan gewenst. Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat een weerstandbiedende laag voldoende weerstand kan geven om een groter stijghoogteverschil te creëren, met minder wegzijging tot gevolg (Bartholomeus et al., 2018a; Bartholomeus et al., 2017; Bartholomeus et al., 2018b). Als laatste is bij het ontwerp van de systemen niet uitgegaan van zulke extreme droogtes als in 2018 en 2019, waardoor de benodigde wateraanvoer wellicht onderschat is. Door de droogte is het niet gelukt om voldoende te testen of de optimale sturing van het KAD systeem ook optimale condities in het veld tot gevolg had.

Uit de veldproeven blijkt dat het grondwaterniveau wordt verhoogd als gevolg van toepassing van subirrigatie in een regelbaar drainagesysteem met oppervlaktewater als bron. De verhoging van het grondwaterniveau laat ook

---

<sup>1</sup> <https://dataplatform.knmi.nl/catalog/index.html>

een verhoging van het bodemvochtgehalte zien, wat positief is voor de vochtvoorziening van het gewas. Hoewel er niet op volledige capaciteit water is aangevoerd in 2019, is er toch 515 mm water via subirrigatie aangevoerd. De resultaten laten zien dat deze hoeveelheid in 2019 onvoldoende was om het grondwaterniveau meer dan 20 cm te laten stijgen. Uit de bevindingen met de watermaatregel slimme SAWAX-stuw blijkt dat het gelukt is om het slootpeil bovenstrooms nagenoeg gelijk te houden aan het slootpeil benedenstrooms. Het is niet gelukt om het slootpeil bovenstrooms hoger te krijgen dan het slootpeil benedenstrooms, mogelijk vanwege beperkte pompcapaciteit en infiltratie vanuit de bovenstroomse kavelsloot naar het grondwater. Met de SAWAX-stuw is in tijden van neerslagoverschot en afvoer het bovenstroomse peil duidelijk hoger geweest dan het benedenstroomse, waarmee water bovenstrooms geborgen is en waarschijnlijk de ontwatering van het perceel beperkt is geweest.

In één van de veldproeven is het KAD-management-algoritme (Bartholomeus et al., 2015) verder uitgewerkt met als doel het beheer van het regelbare drainagesysteem automatisch te sturen via aanpassing van de drainagebasis. Het is gelukt een geautomatiseerde connectie te maken via de TMX TWIN-webservice voor het dagelijks aansturen van het aanbevolen drainageniveau in het KAD-systeem op afstand. Dit betekent: het downloaden van veldmetingen, weersvoorspellingen en SWAP-modelsimulaties (incl. kalibratie en data-assimilatie) voor een aanbevolen drainageniveau in het KAD-systeem. Echter, de veldproef in 2019 vond plaats tijdens een extreem droog jaar. Hierdoor is het niet gelukt om het KAD-systeem te testen om optimale vochtcondities in het perceel te bereiken.

De verschillende agrariërs zijn actief betrokken geweest bij het project door, onder andere, ook zelf handmetingen te verrichten (Breman et al., 2019). Dit heeft een positief effect op zowel meer beschikbare handmetingen als het vergroten van het begrip en inzicht van het bodem-watersysteem. Het actieve contact zorgde er ook voor dat er snel kon worden geanticipeerd op eventueel technische storingen van het systeem, waardoor dit sneller opgelost kon worden. Dit kwam de samenwerking tussen agrariërs, waterschap en onderzoekers en het slagen van de proeven ten goede.

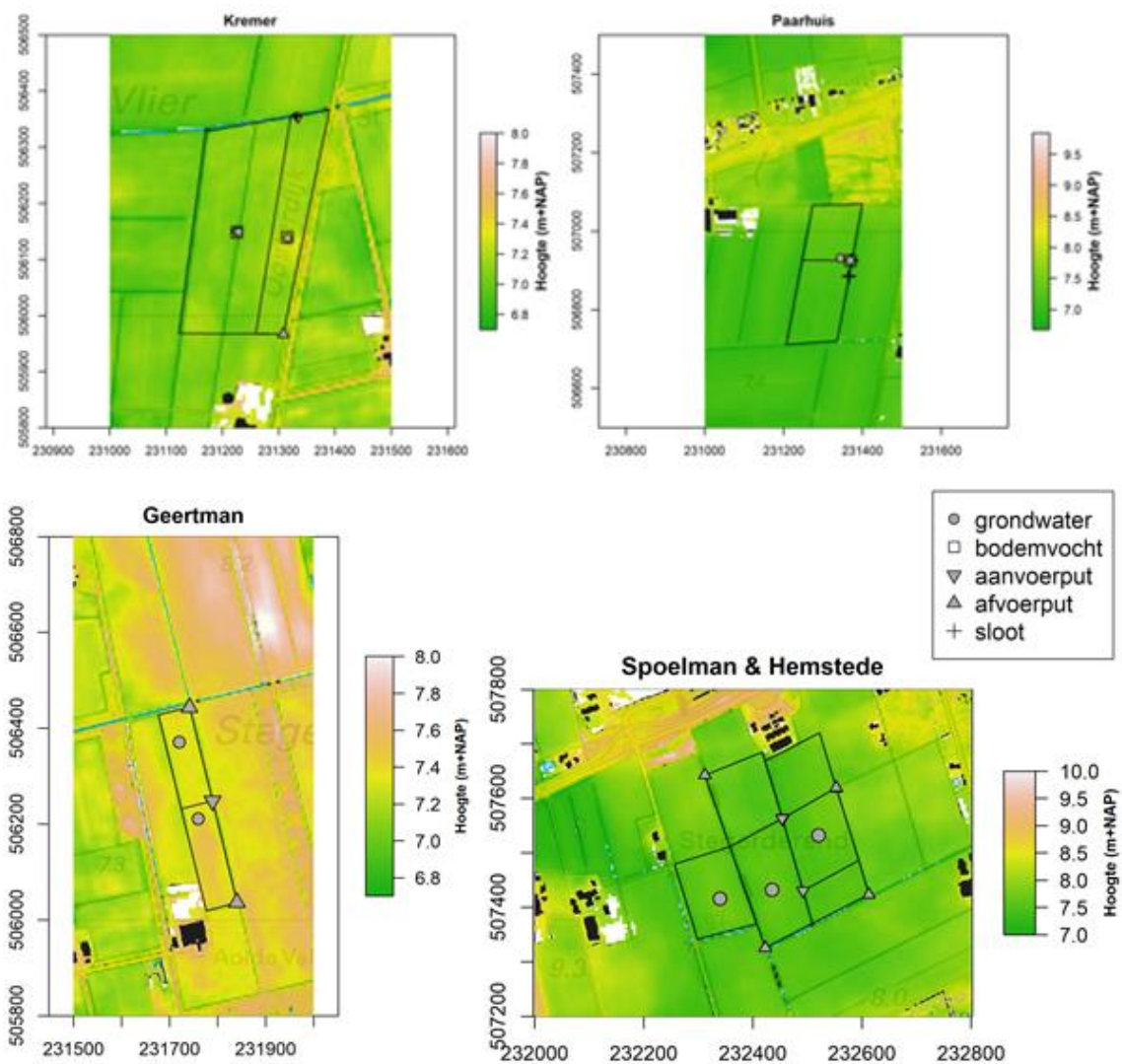
## 7 Referenties

- Ayars J.E., Christen E.W., Hornbuckle J.W. (2006) Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 86:128-139. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.07.004.
- Bartholomeus R., van den Eertwegh G., van Huijgevoort M. (2018a) Subirrigatie met grondwater - Monitoring veldproef America, Waterschap Limburg. KWR 2018.029, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Simons G.W.H., van den Eertwegh G.A.P.H. (2015) Anticipating on amplifying water stress: Optimal crop production supported by climate-adaptive water management. KWR 2015.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., Stofberg S.F., van den Eertwegh G.A.P.H., Cirkel D.G. (2017) Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen - 2016. BTO 2017.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., van den Eertwegh G.A.P.H., Cirkel D.G. (2016) Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen. BTO 2016.050, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., van Loon A.H., van Huijgevoort M.H.J. (2018b) Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw - Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria. KWR 2018.089, KWR, Nieuwegein.
- Breman B.C., Kuindersma W., Meijerink S., Ellen G.J., Wassink W., Brugmans B., Bolt F.J.E.v.d. (2019) Participatieve monitoring in Lumbricus : Een brug tussen innovatie en implementatie. *Water Governance*:46-49.
- De Wit J.A., Van Huijgevoort M.H.J., Van Deijl D., Van den Eertwegh G.A.P.H., Bartholomeus R.P. (2021) Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen - Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een robuustere waterhuishouding op lokale en regionale schaal. KWR 2021.028, KWR, Nieuwegein.
- Doherty J. (2010) PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer. Comput., Brisbane, Queensland, Australia.
- Hamill T.M., Whitaker J.S., Bates G.T., Murray D.R., Fiorino M., Galarneau Jr T.J., Zhu Y., Lapenta W. (2013) NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94:1553-1565. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00014.1.
- Heinen (Red.) M. (2019) Rapportage Fase 1 gebiedsanalyse, proeftuin Oost (Stegeren). Programma Lumbricus – Bewuste Bodem, Cluster 2, Wageningen Environmental Research - WUR, Wageningen.
- Heinen M., Bakker G., Wösten J.H.M. (2020) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Klijn F., ter Maat J., van Velzen E., Hunink J., Goorden N., Kielen N., Werkman W., Barse G., Beumer V., Delsman J. (2011) Zoetwatervoorziening in Nederland: Landelijke analyse knelpunten in de 21e eeuw, Deltares.
- Kroes J.G., van Dam J.C., Bartholomeus R.P., Groenendijk P., Heinen M., Hendriks R.F.A., Mulder H.M., Supit I., van Walsum P.E.V. (2017) SWAP version 4 : theory description and user manual Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Narain-Ford D.M., Bartholomeus R.P., Dekker S.C., van Wezel A.P. (2020) Natural Purification Through Soils: Risks and Opportunities of Sewage Effluent Reuse in Sub-surface Irrigation, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews)*, Springer International Publishing, Cham. pp. 1-33.
- Ritzema H.P., Nijland H.J., Croon F.W. (2006) Subsurface drainage practices: from manual installation to large-scale implementation. *Agricultural Water Management* 86:60-71.

- Rozemeijer J., van den Eertwegh G., Roelofsen F., van der Toorn L., van der Scheer J., Klein J., Hooijboer A., de Louw P., van der Grift B., Worm B. (2018) Lumbricus stofstromenanalyse: routes van nutriënten uit metingen, Deltares, [Delft].
- TMX. (2018) Gebruikershandleiding TMX TWIN V2 API voor het realiseren van koppelingen met TMX, Kuipers Electronic Engineering B.V., Zwijndrecht.
- van Bakel J., van den Eertwegh G., Worm B., Mensink J. (2019) Slim peilbeheer in haarvaten van watersystemen met SAWAX-stuw, *Stromingen : vakblad voor hydrologen* 25 (2): 5 - 16, 2019.
- van Bakel J., van den Eertwegh G.A.P.H., van Deijl D., Mensink J. (2020) SAWAX - slimme stuw voor optimaal waterbeheer. Verslag van veldproef te Arriën 2015-2019. Eindrapport.
- van den Eertwegh G., Bartholomeus R., de Louw P., Witte F., van Dam J., van Deijl D., Hoefsloot P., van Huijgevoort M., Hunink J., America I., Pouwels J., de Wit J. (2020a) Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland : het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen, KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G., van Bakel J., Mensink J. (2018) SAWAX - slimme stuw voor optimaal waterbeheer. Verslag van veldproef te Arriën 2015-2017, KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G., van Bakel J., van Deijl D., Mensink J. (2020b) SAWAX – Slimme stuw voor optimaal waterbeheer., KnowH2O, Berg en Dal.
- van den Eertwegh G.A.P.H., van Bakel P.J.T., Stuyt L., van Iersel A., Kuipers L., Talsma M., Droogers P. (2013) KlimaatAdaptieve Drainage - Een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen - Samenvatting resultaten Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling', FutureWater, Wageningen.
- van der Gaast J.W.J. (2006) Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken Alterra, Wageningen.
- van Genuchten M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal* 44:892-898.
- Visser A., Stuurman R., Bierkens M.F.P. (2006) Real-time forecasting of water table depth and soil moisture profiles. *Advances in water resources* 29:692-706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.07.011>.

# I Meetopstelling per locatie

In deze bijlagen is de meetopstelling voor de vijf proefpercelen in Stegeren gegeven.



Figuur I-1: Overzicht meetopstellingen per agrariër te Stegeren.

## II SWAP-PEST kalibratie

In deze bijlagen is een gedetailleerde beschrijving geven van de kalibratie van het dynamisch model voor de onverzadigde zone en plant-atmosfeer interacties (1D Soil, Water, Atmosphere, Plant (SWAP)) met PEST. Dit kalibratie is uitgevoerd om de modelparameters zo goed mogelijk aan te laten sluiten met de werkelijke situatie.

### Modelopzet kalibratie SWAP-PEST

Het SWAP-model is gekalibreerd met PEST (Doherty, 2010) op basis van de veldmetingen van het grondwaterniveau en bodemvochtgehalten op 20 cm, 40 cm, en 60 cm, voor de tijdperiode 1 januari 2018 – 31 december 2019. Twee kalibraties zijn uitgevoerd (Tabel II-1) om de modelparameters (Tabel II-2) beter op de werkelijkheid aan te laten sluiten. Een schets van de SWAP-PEST input is gegeven in (Figuur II-1).

#### Kalibratie 1

De eerste kalibratie is erop gericht om de modelparameters beter op de werkelijke situatie aan te laten sluiten. Dit betekent dat een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen, de drainageweerstand en de weerstand van de diepe weerstandslaag wordt gemaakt. De kalibratie vindt plaats op het gemeten grondwaterniveau en het gemeten bodemvocht op 20 cm, 40 cm, en 60 cm bij dhr. Kremer (bij de drain).

De kalibratie is uitgevoerd voor parameters van de sinusfunctie van de stijghoogte in het diepe pakket (AQAVE, AQAMP), de bodemparameters (KSAT, KSATEXM, ALFA, NPAR), drainage parameters (drainageweerstand van het primaire systeem en drainageweerstand van het subirrigatiesysteem) en de weerstandslaag (RIMLAY). Hierbij is aangenomen dat KSAT en KSATEXM gelijke kalibratiewaarden krijgen. De initiële waarden (Tabel 4-1) van de kalibratieparameters zijn als volgt bepaald:

- de sinusfunctie van de stijghoogte in het diepe pakket is gebaseerd op de grondwaterniveaumetingen bij dhr. Kremer (Stegeren),
- de bodemparameters zijn gebaseerd op de Staringreeks 2018 (B2 [0-30cm] /O2 [30-500cm]),
- de drainageparameters zijn geschat met de formule slootafstand \* factorL (van der Gaast, 2006),
- de weerstand biedende laag is geschat.

Tabel II-1: SWAP instellingen in de twee verschillende kalibraties. Alle observaties zijn gemeten bij dhr. Kremer in Stegeren.

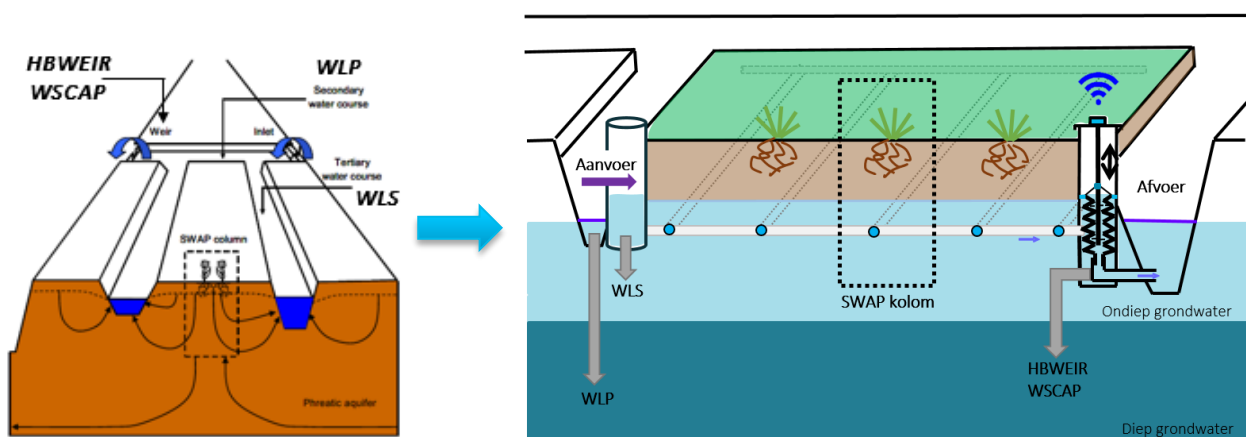
		Kalibratie 1	Kalibratie 2
<b>WLP</b>	Water level in the primary system	SWSRF = 3 Slootpeil observaties	SWSRF = 3 Slootpeil observaties
<b>WLS</b>	Water level in secondary course	SWSEC = 1 Aanvoerput observaties	SWSEC = 2 Geen input, wordt gesimuleerd
<b>HBWEIR</b>	Weir crest	-	Balghoogte observaties
<b>WSCAP</b>	Surface water supply	-	Aanvoer observaties

#### Kalibratie 2

De tweede kalibratie is bedoeld om de juiste peilen in de KAD-put te kunnen simuleren. De balg in de KAD-put kan gezien worden als stuw. Als de balg laag staat, zal er waterafvoer zijn. Als de balg hoger staat, is er geen waterafvoer, maar wordt het water vastgehouden in het perceel. Om de waterafvoer goed te kunnen modelleren in SWAP, zijn de stuwparameters ALPHAW en BETAW in de afvoerformule, belangrijk (Kroes et al., 2017). Echter, deze parameters zijn moeilijk te meten en daarvoor gekalibreerd. Als de stuwparameters worden gekalibreerd, moet modelmatig gezien ook de gemiddelde stijghoogte in het diepe pakket worden gekalibreerd (AQAVE). Aangezien deze in kalibratie 1 gekalibreerd is, heeft deze parameter in kalibratie 2 een relatieve kleine kalibratierange. De kalibratie vindt plaats op het gemeten grondwatervniveau tussen de drain, het gemeten bodemvocht bij de drain op 20 cm, 40 cm, en 60 cm, en het gemeten oppervlaktewater peil bij dhr. Kremer. Tijdens de kalibratie heeft het grondwatervniveau gewicht 1, het bodemvochtgehalte heeft gewicht 500, het oppervlaktewaterpeil heeft gewicht 1.

Tabel II-2: SWAP-PEST kalibratie waarden met bijbehorende kalibratie range. Stap 1 is de kalibratie op sinusfunctie stijghoogte diepe pakket, bodem- en drainage parameters. Ook de waarde van de verticale weerstand is gekalibreerd.

	Laagste band	Initiële waarde	Hoogste band	Kalibratie waarde	Sensitiviteit
<b>Kalibratie 1</b>					
AQAVEp	90	100	110	110.000	5.712302E-03
AQAMPp	10	30	50	25.3455	8.402150E-03
KSATp1	73.2416	83.2416	93.2416	93.2416	0.444312
KSATEXMp1	166.4833	176.4833	186.483	186.483	0.444312
ALFAP1	0.0116	0.0216	0.0316	1.941506E-02	33.2099
NPARp1	1.1	1.3488	2.3488	2.29759	0.835894
NPARp2	1.1	1.5244	2.5244	2.52440	0.212630
RDRAINp1	135	235	335	335.000	3.818685E-04
RDRAINp2	10	50	140	19.2920	1.535991E-02
RIMLAYp	100	500	2000	100.000	3.110722E-03
<b>Kalibratie 2</b>					
AQAVEp	108.0	110.0	112.0	112.000	1.644763E-02
ALPHAWp	0.10	3.00	50.0	3.0000	0.000
BETAWp	0.50	1.4765	3.00	1.47650	0.000



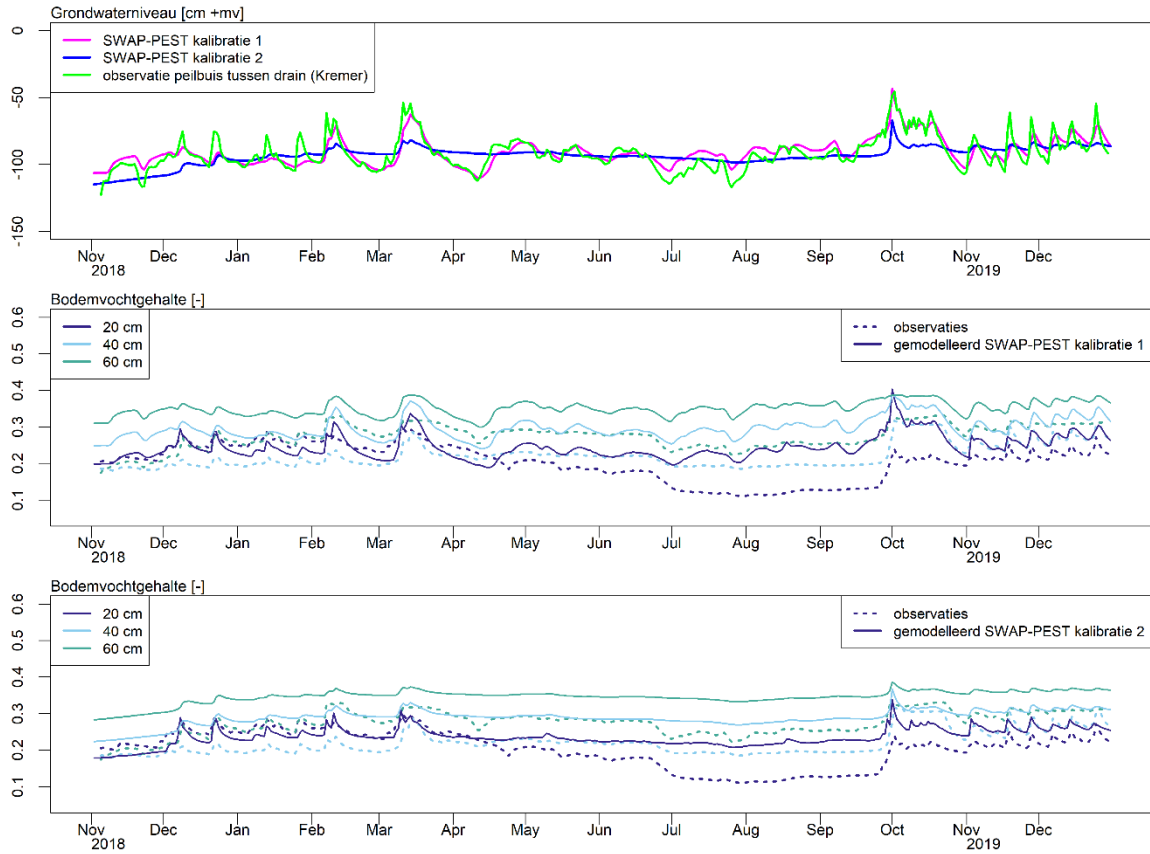
Figuur II-1: Schematisatie van het oppervlakte water systeem in SWAP (links). Linker figuur is ontleend aan Kroes et al. (2017). Rechts het oppervlaktewatersysteem in SWAP in een situatie met subirrigatie.

### Resultaten kalibratie SWAP-PEST

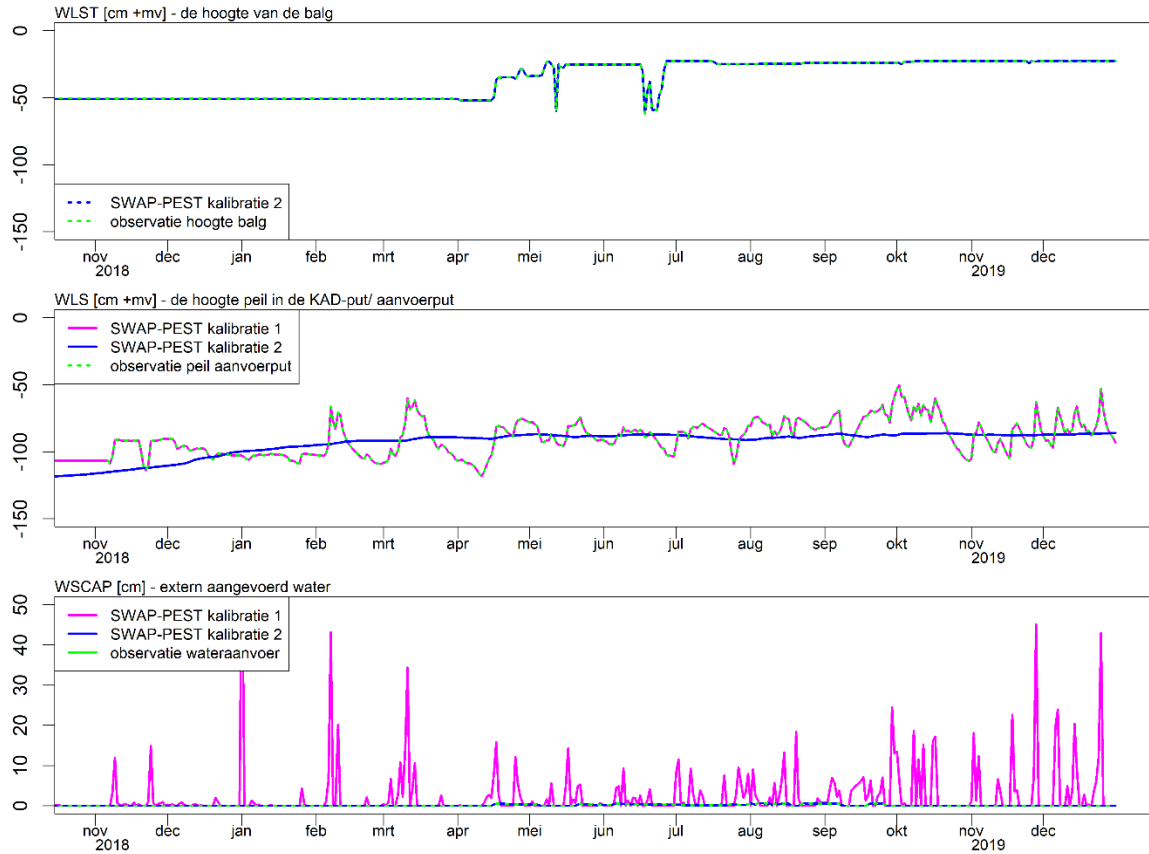
De eerste SWAP-PEST kalibratie is erop gericht een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen, de drainageweerstand en de weerstand van de diepe weerstandslaag te verkrijgen. Het gesimuleerde grondwaterniveau komt met name tussen februari en juni overeen met de geobserveerde grondwaterstand (Figuur 5-3). In de zomermaanden juli tot september is het grondwaterniveau hoger dan geobserveerd. Dit betekent dat het model in de zomermaanden natter is dan de werkelijkheid. Dit is ook terug te zien in het bodemvocht, het geobserveerde bodemvocht is lager dan het gemodelleerde bodemvocht (Figuur II-2). In het najaar komt het gesimuleerde grondwaterniveau ongeveer overeen met het geobserveerde grondwaterniveau. De reacties op de neerslagpieken in november worden minder extreem gesimuleerd dan de aanwezige reactie in de observaties. Het zou kunnen dat de extreme neerslag pieken niet meegenomen worden in het model, omdat gegevens van een nabijgelegen weerstation gebruikt worden en niet de gegevens van de regenmeter op het perceel. Daarnaast beïnvloedt ook de combinatie van de drainageparameters het grondwaterniveau aanzienlijk. De gemodelleerde hoogte in de aanvoerput is gelijk aan het geobserveerde peil in de aanvoerput. Dit komt doordat de aanvoerput observaties als invoer gebruikt worden in kalibratie 1. De gemodelleerde wateraanvoer (WSCAP) is hoger dan de geobserveerde wateraanvoer (Figuur II-3).

De tweede kalibratie is bedoeld om de juiste peilen in de KAD-put te kunnen simuleren. Het gemodelleerde grondwaterniveau ligt in dezelfde range als het gemeten grondwaterniveau. De dynamiek in het gemodelleerde grondwaterniveau is verminderd t.o.v. de eerste kalibratie (Figuur II-2). Het gemodelleerde bodemvochtgehalte (Figuur II-2) is vrijwel gelijk aan het gemodelleerde bodemvochtgehalte in kalibratie 1, dit betekent dat het model vanaf 20 cm diepte natter is dan waargenomen in de observaties. Naast het grondwaterniveau en het bodemvochtgehalte is ook de dynamiek in het gemodelleerde peil in de KAD-put minder dan in het geobserveerde peil (Figuur II-3). Daarnaast zijn de kalibratiewaarden van ALFAW en BETAW gelijk aan de initiële waarden. Dit betekent dat het model de stuwparameters (in dit model de parameters van de KAD-put) niet kan optimaliseren. Dit komt waarschijnlijk doordat er in de kalibratieperiode overstort plaatsvindt. De kalibratie vindt plaats op observaties van 2019, een droog jaar, waarin vrijwel geen afvoer is geobserveerd. Het jaar 2019 was mogelijk een te droog jaar om het peil in de KAD-put te sturen. In werkelijkheid heeft het peil in de KAD-put het hele jaar op 100% gestaan, om het water dat aanwezig was zoveel mogelijk vast te houden. Echter is het water geen enkel moment in de buurt van de 100%-hoogte gekomen. Als 2020 een natter jaar wordt dan 2019, kan deze kalibratie opnieuw plaatsvinden en kunnen de stuwparameters mogelijk wel correct gekalibreerd worden. Aangezien het gemodelleerde grondwaterniveau in de tweede kalibratie wel in dezelfde range ligt als de gemeten waarden, maar de dynamiek ontbreekt, zijn de resultaten van de tweede kalibratie gebruikt.





Figuur II-2: Geobserveerde en gesimuleerde grondwaterniveau door SWAP-PEST in twee kalibraties (boven), het gemodelleerde bodemvocht na kalibratie 1 en gemeten bodemvocht (midden), het gemodelleerde bodemvocht na kalibratie 2 en gemeten bodemvocht (onder).



Figuur II-3: De gemodelleerde en geobserveerde hoogte van de balg (boven), gekalibreerde en geobserveerde hoogte in de aanvoerput (midden) en gemodelleerde en geobserveerde wateraanvoer (onder).