



KWR



Ondergronds Beregenen op Proefboerderij Rusthoeve

Praktijkproef regelbare drainage met subirrigatie
2020-2022

Wilco Terink, Janine de Wit, Dion van Deijl,
Ruud Bartholomeus en Gé van den Eertwegh

Eindrapport

Datum: 26 juni 2023

Opdrachtgevers: Provincie Zeeland, Waterschap Scheldestromen,
Gemeente Noord-Beveland

Colofon

Titel:

Ondergronds beregenen op Proefboerderij Rusthoeve: Praktijkproef regelbare drainage met subirrigatie 2020-2022

Datum:

26 juni 2023

Opdrachtgevers-financiers:

Provincie Zeeland, Gemeente Noord-Beveland en Waterschap Scheldestromen; met bijdragen uit het Deltafonds en in-kind bijdragen van KWR, KnowH2O en AIKC Rusthoeve

Projectteam

Gé van den Eertwegh (trekker), Dion van Deijl, Wilco Terink (KnowH2O)
Ruud Bartholomeus en Janine de Wit (KWR)
Eelco Boot (AIKC Rusthoeve)

Rapportage m.m.v. Charlotte van Sluijs-Poppe en Eelco Boot (AIKC Rusthoeve)

Kader:

Dit rapport maakt deel uit van het Zeeuwse onderzoeksprogramma 'Proeftuin Zoet Water' en is mede uitgevoerd in het kader van het 'Deltaprogramma Zoetwater'



Samenvatting

De zomers en grote delen van de groeiseizoenen van 2018, 2019 en 2020 waren droog en de gewasproductie in de zuidwestelijke delta van Nederland had daar zwaar onder te lijden. Door veranderingen in het klimaat zal het weer in Nederland verder veranderen; ook de provincie Zeeland zal in de toekomst (vaker) te maken krijgen met extremere weersituaties. Perioden van droogte zullen vaker voorkomen en ook langer aanhouden. Daarnaast worden meer en intensievere buien verwacht. Zowel te droge als te natte condities beperken de gewasopbrengst.

Door drogere weerscondities neemt de vraag naar voldoende zoet water toe. Voldoende zoetwaterbeschikbaarheid is in de regio, en op Proefboerderij Rusthoeve niet vanzelfsprekend. De zoetwatervoorziening staat onder druk vanwege een beperkte voorraad daarvan en vanwege beperkte wateraanvoer naar de regio. Zo kan het voorkomen dat het grondwater in de wortelzone 'te zout' is voor optimale gewasgroei. Daarnaast is het oppervlaktewater in Zeeland vaak brak, waardoor het vaak niet benut kan worden voor irrigatie van gewassen. Berekening is in de regio vaak geen optie.

Er is een praktijkproef opgezet met subirrigatie via het regelbare drainagesysteem op twee gescheiden blokken binnen een veldkavel van AIKC Rusthoeve. De freatische grondwaterstanden kunnen via ondergrondse aanvoer van water op het perceel verhoogd worden. Door de capillaire werking van de klei-zavel-bodems kan bodemvocht de wortelzone bereiken en gewassen van water voorzien in droge tijden. In de periode 2020 t/m 2022 is op een proefblok mét subirrigatie ('proefblok') en op een referentieblok zonder subirrigatie de opbrengst (droge stof) van de gewassen cichorei, wintertarwe, aardappel en zaaiui bepaald. Er is een hydrologisch meetprogramma uitgevoerd met online sensoren, waarbij bodemvochtgehalten in verticale profielen, freatische en diepe grondwaterstanden (incl. elektrisch geleidingsvermogen en temperatuur) en aan- en afvoerdebieten continu zijn gemeten. Metingen van de drukhoogte (zuigspanning) van bodemvocht in de onverzadigde zone zijn ook uitgevoerd en zeer nuttig gebleken. Er is praktische ervaring opgedaan met de bediening en management van het systeem, waarbij ook in perioden van neerslagoverschot water is vastgehouden door de drainage te remmen. Samen met opbrengstcijfers van de gewassen (droge-stof) zijn de werking en effecten van regelbare drainage met subirrigatie zowel qua veldmetingen als ook modelmatig geanalyseerd en geduid. Hierbij is gebruik gemaakt van een combinatie van SWAP en SUTRA, om werkelijke gewasverdamping, waterbalansen, stroming van water en invloed van zout grondwater op zoetwaterbeschikbaarheid te kunnen berekenen.

Voorafgaand aan de veldproef is een inspectie en controle uitgevoerd van het regelbare drainagesysteem, dat in 2010 is aangelegd. Zoetwateraanvoer is in de proefperiode gerealiseerd door AIKC Rusthoeve via een regenwaterbassin en externe aanvoer. Bodem- en gewasmanagement zijn uitgevoerd door medewerkers van de proefboerderij. Ook zijn de gewasopbrengsten door hen bepaald. De bediening van het systeem is gedaan door Eelco Boot, bedrijfsleider bij AIKC Rusthoeve.

De seizoenen in de proef waren qua weer normaal tot nat, maar er zijn ook droge groeiseizoenen opgetreden. Met name 2021 was nat, 2022 was deels erg droog. Na de start van de proef is de timing en niveau van subirrigatie, door instelling van het gewenste waterpeil in de regelput met een vlotter, steeds beter afgesteld op de behoefte van het gewas. De waterbehoefte en wateraanvoer was aanzienlijk en varieerde van 175 tot 200 mm per groeiseizoen. Een combinatie van water vasthouden in perioden met neerslagoverschot met aansluitend een periode met subirrigatie is

waardevol, omdat zo bespaard kan worden op externe wateraanvoer. Met name in de winter van 2021/2022 is het goed gelukt om deze combinatie te maken.

De monitoring van de proef is goed geslaagd. Voor de neerslaghoeveelheden is een combinatie gebruikt van lokale metingen met KNMI-radardata en -stationsdata. De online sensoren hebben goed gefunctioneerd, zo ook de debietmeters bij de aan- en afvoerpunten van het systeem. De effecten van subirrigatie op verhoging van de freatische grondwaterstanden zijn goed in beeld gekomen, alsmede de invloed daarvan op het bodemvocht hoger in het profiel. De metingen van de drukhoogte (zuigspanning) van bodemvocht in de onverzadigde zone geven belangrijke informatie te zien om het effect van subirrigatie op droogteschade aan gewassen te duiden. Meten van alleen het bodemvochtgehalte is daarvoor onvoldoende.

Met de vele veldmetingen zijn we in staat geweest een SWAP-model te bouwen en te kalibreren. Het SWAP model is met name ingezet ter analyse van het bodemvocht en de werkelijke verdamping van de geteelde gewassen. Deze verdamping is een maat voor de droge-stof-opbrengst van gewassen. Ook levert SWAP een berekende waterbalans op van de bodemkolom van proefblok en referentieblok. Met de via SWAP berekende verdampingstermen (interceptiewater, bodem, gewas) is een SUTRA-model doorgerekend waarmee we de stroming van water naar en vanuit de drainbuizen en naar de leggerwatergang hebben kunnen uitrekenen. Daarbij wordt rekening gehouden met dichtheidseffecten van zout grondwater op de grondwaterstroming.

Door wateraanvoer via het regelbare drainagesysteem ten behoeve van subirrigatie is de grondwaterstand in het groeiseizoen verhoogd en de capillaire opstijging naar de wortelzone bevorderd. Met name in droge zomers heeft subirrigatie een positief effect op de waterbeschikbaarheid voor het gewas. In nattere zomers niet, omdat er dan sprake was van voldoende regenval. De watervraag voor subirrigatie in droge tijden is aanzienlijk: in de drie groeiseizoenen is per seizoen 175 à 200 mm water aangevoerd. Deze watervraag vergt bronnen van zoet water van voldoende omvang, om het systeem te laten functioneren. Water vasthouden via de regelbare drainage in tijden van neerslagoverschot is daarom nuttig, ter vermindering van de wateraanvoer-behoefte. De aanwezige leggerwatergang nabij het proefblok heeft een drainerende werking, waardoor water na subirrigatie verloren is gegaan. Het peilbeheer rondom percelen met subirrigatie moet zoveel mogelijk afgestemd zijn op verhoogde grondwaterstanden in de zomer, om onnodig waterverlies vanuit het perceel te voorkomen.

In dit project zijn in twee van de drie groeiseizoenen verschillen gemeten in de gewasopbrengst (droge-stof) ten gevolge van subirrigatie. Vooral in het drogere jaar 2022 bij de uien was er sprake van een hogere opbrengst door toepassing van subirrigatie. Het is echter de vraag of de subirrigatie daarmee akkerbouwkundig gezien voldoende is om de door droogte verminderde opbrengst te compenseren. De gemodelleerde positieve effecten op de gewasverdamping i.c. droge-stof productie is lager dan op basis van de veldmetingen. Kortom, de veldresultaten zijn gunstiger dan door het model berekend, met name in droge seizoenen.

De subirrigatie blijkt in de praktijk het zout weg te houden uit de wortelzone. Er komt geen zout water in de wortelzone van de gewassen, noch in de metingen, noch in de modelberekeningen, die dus overeenkomen met de veldsituatie.

De bediening van het systeem biedt de mogelijkheid te draineren, water vast te houden en water aan te voeren. Water vasthouden ondersteunt de vergroting van de lokale voorraad aan zoet grondwater. Hoe eerder in het seizoen aansluitend op water vasthouden gestart wordt met subirrigatie, des te minder aanvoerwater nodig is.

Deling van kennis en kunde ten aanzien van het regelbare drainagesysteem met subirrigatie (ontwerp en aanleg) en van de bediening ervan (hoogte waterniveau in regelput en timing van draineren, water vasthouden en water aanvoeren) is nuttig en noodzakelijk. Actieve communicatie en educatie is ondersteunend aan een succesvolle toepassing. Regelbare drainage met subirrigatie kan effectief werken, maar is niet dé universele oplossing voor de landbouw-zoetwatervoorziening. Het kan niet overal toegepast worden in de zuidwestelijke delta van Nederland, omdat de bodem en hydrologie niet overal geschikt zijn. De beschikbaarheid van voldoende water om dit systeem te kunnen voeden is een randvoorwaarde. Waterbeheer in afwateringsgebieden moet afgestemd worden op de toepassing van de systemen op percelen, als deze technisch gezien geschikt zijn.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding.....	7
1.1 Aanleiding.....	7
1.2 Doelstelling project.....	7
1.3 Beoogd resultaat	8
Achtergrond regelbare drainage met subirrigatie.....	8
Conventionele drainage	8
Regelbare drainage met subirrigatie	8
2 Onderzoeksgebied.....	11
2.1 Topografie en maaiveld.....	11
2.2 Bodemopbouw	12
2.2.1 Diepe bodemopbouw	12
2.2.2 Ondiepe bodemopbouw.....	13
2.3 Watersysteem	15
2.4 Aanwezigheid drainagesysteem.....	16
3 Methode	18
3.1 Veldproef.....	18
3.1.1 Regelbare drainage met subirrigatie.....	18
3.1.2 Meetopstelling	19
3.1.3 Metingen.....	22
3.1.4 Bouwplan gewas	24
3.2 Modelling van onverzadigde en verzadigde zone met SWAP (1D).....	25
3.2.1 Achtergrond agro-hydrologisch 1D-SWAP model	25
3.2.2 Modelinvoer agro-hydrologisch 1D-SWAP model	25
3.3 Modelling 2D dichtheidsstroming (zoet-zout).....	28
3.3.1 Inleiding.....	28
3.3.2 Samenvatting SUTRA-modelconceptualisatie	28
3.3.3 Modelsimulaties	30
4 Resultaten en discussie	31
4.1 Veldmetingen	31
4.1.1 Wateraanvoer en waterafvoer	32
4.1.2 Stijghoogte, bodemvochtgehalte en drukhoogte – overzicht.....	32
4.1.3 Stijghoogte, bodemvochtgehalte, drukhoogte en elektrisch geleidingsvermogen - details	35
4.1.4 Gewasobservatie	44
4.2 Modelling onverzadigde en verzadigde zone	46
4.2.1 Modelling in de proefperiode	46
4.2.2 Modelling scenario's.....	53
4.3 2D modellering met dichtheidsstroming (zoet-zout).....	56
4.3.1 Grondwaterstanden	56
4.3.2 Zoutconcentraties	57
4.3.3 Water- en zoutbalans voor totale modeldomein.....	59
4.4 Discussie	61
4.4.1 Veldproef	61
4.4.2 Modelling onverzadigde/verzadigde zone op perceelschaal	63

5	Conclusies	67
6	Doorkijk en aanbevelingen	71
6.1	<i>Regionale geschiktheid regelbare drainage met subirrigatie</i>	<i>71</i>
6.1.1	Geschiktheid	71
6.1.2	Droogtegevoeligheid.....	73
6.2	<i>Subirrigatie met brak water tijdens perioden van waterschaarste.....</i>	<i>73</i>
7	Bibliografie	75
Bijlage A – Details metingen.....		79
	Coördinaten sensoren	79
	Bladvochtigheid.....	79
	Straling80	
Bijlage B – 1D SWAP modellering		83
	<i>Bodemprofiel SWAP.....</i>	<i>83</i>
	<i>Resultaten kalibratie van proefblok.....</i>	<i>84</i>
	<i>Scenario's</i>	<i>86</i>
Bijlage C – SUTRA modelbeschrijving en conceptualisatie.....		94
	<i>Introductie SUTRA</i>	<i>94</i>
	<i>Conceptualisatie</i>	<i>94</i>
	Randvoorwaarden en discretisatie	95
	Bodemfysische hydraulische eigenschappen	97
	Vloeistof- en bodemmatrix eigenschappen.....	98
	Initiële condities.....	98
	Regelbare drainage met subirrigatie	101
	<i>Kalibratie huidige situatie regelbare drainage met subirrigatie</i>	<i>104</i>
	Grondwaterstanden.....	104
	Zoutconcentraties.....	105
	Water- en zoutbalans voor totale modeldomein	107
Bijlage D – Kaarten voor regionale geschiktheid regelbare drainage met subirrigatie		110

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Klimaatverandering heeft effecten op het weer in Nederland. Perioden van droogte zullen vaker voorkomen, en ook langer aanhouden. Daarnaast worden meer intensievere buien verwacht (Klein Tank et al., 2014). De gewasopbrengst is voor een groot deel afhankelijk van het vochtgehalte in de wortelzone (Mulder et al., 2018). Zowel te droge als te natte condities beperken de gewasopbrengst. Eerder is berekend dat onder het droge en warme klimaatscenario W+ (Klein Tank et al., 2014) de droogteschade in de landbouw landelijk gezien met 10% zal toenemen ten opzichte van het huidige klimaat (Klijn et al., 2011).

Ook Zeeland zal te maken krijgen met extremere klimaatsituaties. De laatste jaren was in het zuidwesten van Nederland, en ook op Proefboerderij Rusthoeve, er sprake van hoosbuien. Deze hebben plasvorming op de overwegend kleiige bodem veroorzaakt, hetgeen vervolgens leidde tot verstikking van de pas gezaaide en gepote gewassen. Dit gebeurde bijvoorbeeld in het voorjaar van 2018. Hierna volgde een extreem droge periode: de zomer van 2018 was met een herhalingstijd van eens in de 30 jaar uitzonderlijk droog (Sluijter et al., 2018). De langdurige droogte van 2018 in combinatie met zeer hoge luchttemperaturen zorgde na de hevige neerslag voor een slechte situatie voor de gewasproductie. Na 2018 volgden meer droge zomers, omstandigheden die wel eens het nieuwe referentiekader kunnen zijn (Rakovec et al., 2022).

Door de steeds drogere weerscondities neemt de vraag naar voldoende zoet water toe. Voldoende zoetwaterbeschikbaarheid is in de regio, en op Proefboerderij Rusthoeve niet vanzelfsprekend. Zo kan het voorkomen dat het grondwater in de wortelzone 'te zout' is voor optimale gewasgroei. Een te hoge concentratie aan opgeloste zouten in de wortelzone veroorzaakt stress bij veel landbouwgewassen (van Bakel et al., 2009; van Dam et al., 1997): de vochtopname via de wortelzone stopt dan deels of volledig. Daarnaast is het oppervlaktewater in Zeeland vaak brak, waardoor het vaak niet benut kan worden voor irrigatie van gewassen. Berekening is in de regio dus vaak geen optie.

Gezien de huidige omstandigheden is een goede zoetwatervoorziening in een gebied zoals Proefboerderij Rusthoeve belangrijk, en wordt dit in de toekomst alleen nog maar belangrijker. Hierbij zal zowel gestuurd moeten worden op het zoveel mogelijk bufferen en vasthouden van zoet water om periodes van droog weer te overbruggen, als het tijdig afvoeren van water om wateroverlast te voorkomen. Ook moeten de zoetwaterbronnen die wel beschikbaar zijn zo efficiënt mogelijk worden benut.

1.2 Doelstelling project

Om te onderzoeken hoe een goede zoetwatervoorziening en waterhuishouding eruit kan zien voor een gebied waar Proefboerderij Rusthoeve onderdeel van is, wordt op de proefboerderij ingezet op praktijkonderzoek gericht op het beter voorbereid zijn op lange droge perioden. De kennis die wordt opgedaan op de proefboerderij biedt handvatten voor andere telers in de gebieden. Het doel van het onderzoek dat beschreven is in dit rapport, is via praktijkonderzoek op perceelschaal testen of en hoe regelbare drainage met subirrigatie de beschikbaarheid van zoet grondwater voor de gewassen kan verhogen.

De werking van een maatregel hangt vaak af van de specifieke kenmerken van een locatie; de resultaten van dit onderzoek kunnen daarom niet 1:1 worden vertaald naar de gehele zuidwestelijke delta van Nederland. Er zal altijd sprake blijven van maatwerk. Wel moeten de resultaten inzicht geven in de processen die een rol spelen bij het wel/niet succesvol toepassen van de maatregel,

waarmee ook voor andere locaties handvatten worden geboden en er een beter beeld verkregen kan worden van de effectiviteit van deze maatregel op andere percelen en bij toepassing op grotere ruimtelijke schaal.

De doelen van dit project zijn:

1. Via een praktijkproef testen en monitoren of het systeem van regelbare drainage met subirrigatie op Proefboerderij Rusthoeve (als voorbeeld voor akkerbouwgebieden met een vergelijkbare bodemstructuur), gebruikt kan worden als watervoorziening in periodes van droogte door het beschikbaar komen van water aan de plant via capillaire opstijging vanuit het grondwater.
2. Via modelberekeningen, getoetst op de praktijkproef, een doorvertaling te maken van de werking van het systeem op andere condities.
3. Actief kennis te delen over bovenstaande met betrokkenen in de streek.

1.3 Beoogd resultaat

Met deze studie willen we een antwoord krijgen op de vraag of en zo ja, in welke mate het systeem van regelbare drainage met subirrigatie ingezet kan worden als zoetwatervoorziening op de gronden van Proefboerderij Rusthoeve en omgeving. Hiervoor worden metingen gedaan op een blok met regelbare drainage, waarbij subirrigatie plaatsvindt (proefblok of subirrigatieblok) en op een referentieblok zonder subirrigatie. Hierbij moeten de effecten van de toepassing van de maatregel regelbare drainage met subirrigatie merkbaar en meetbaar zijn in verschillen in

Achtergrond regelbare drainage met subirrigatie

Alvorens we ingaan op de gebiedsbeschrijving en de methodiek, geven we hieronder een beknopte beschrijving van de verschillen tussen een conventioneel drainagesysteem, het systeem dat aanwezig is in het referentieblok, en het systeem van regelbare drainage met subirrigatie dat aanwezig is op het proefblok.

Conventionele drainage

Bij conventionele drainage liggen de drains op een vaste diepte en is het uitstroomniveau hieraan gelijk. Deze traditionele vorm van drainage heeft met name als doel om het water boven drainniveau zo snel mogelijk af te voeren zodat de bouwvoor niet 'te nat' wordt. Doordat het uitstroomniveau vast ligt, kan dit type drainagesysteem niet ingezet worden om grondwater te bufferen.

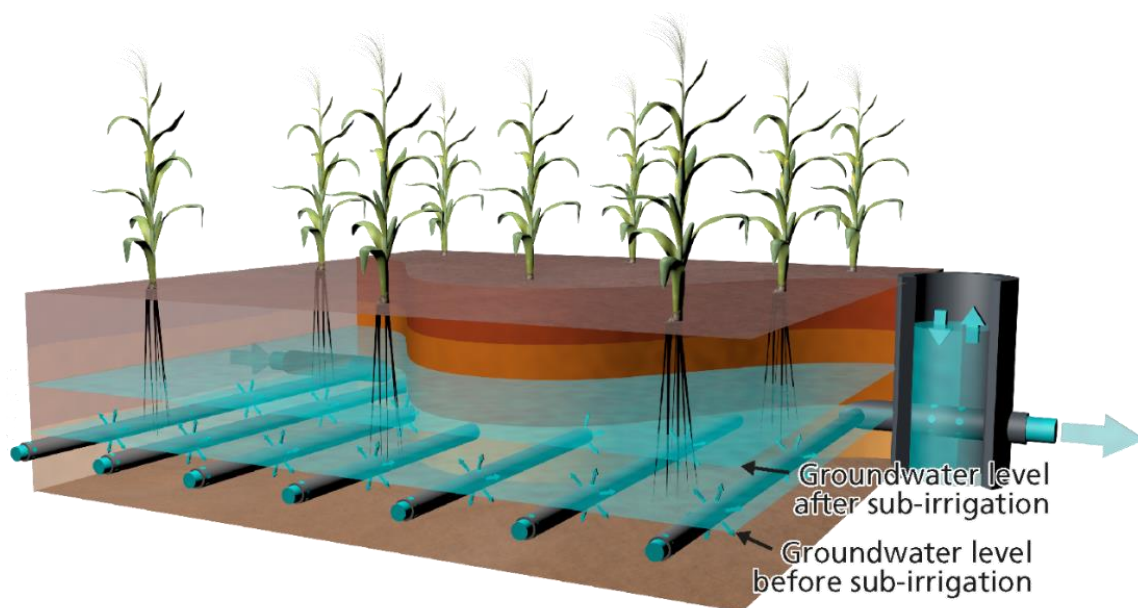
Regelbare drainage met subirrigatie¹

Regelbare drainage is ontwikkeld om zowel water te kunnen afvoeren als vasthouden. 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; de Wit et al., 2021). Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) is een samengesteld regelbaar drainagesysteem, waarin het drainageniveau in de regelput via telemetrie op afstand bestuurd kan worden (van Bakel et al., 2013; van den Eertwegh et al., 2013). Met behulp van een KAD-management-algoritme kan er geautomatiseerd tijdig geanticipeerd worden op te droge of natte groeicondities (Bartholomeus et al., 2015). Een goed werkend systeem zorgt voor optimalere vochtcondities in de wortelzone; een gewas heeft minder last van zuurstofstress (te nat, te weinig zuurstof) of droogtestress (te droog, te weinig water).

grondwaterstanden, waterbeschikbaarheid in de wortelzone en de opbrengsten van de geteelde gewassen.

Door het combineren van een regelbaar drainagesysteem met subirrigatie (populair gezegd: 'ondergronds beregenen' of 'omgekeerde drainage') kan gestuurd worden op verbeterde condities voor het gewas en kan een agrariër het bodemvochtgehalte op zijn perceel actief beheren. Bij subirrigatie wordt actief water aangevoerd via het drainagesysteem om het grondwatersysteem aan te vullen. Het doel is om de grondwaterstand te verhogen en hiermee ook het vochtgehalte in de wortelzone van de plant, via capillaire nalevering. Dit leidt tot een lagere beregeningsbehoefte. De effectiviteit van subirrigatie voor de gewasopbrengst hangt af van het gewas, bodemopbouw, bodemtype, de lokale hydrologie en het regionale grondwatersysteem (Bartholomeus et al., 2019; de Wit et al., 2022).

Doordat bij subirrigatie meer water beschikbaar is in de wortelzone van de plant, kan droogtestress worden beperkt en stijgt de werkelijke verdamping. In tegenstelling tot beregening, treedt bij subirrigatie geen waterverlies op door bodemverdamping en interceptieverdamping. Doordat er meer water beschikbaar is in het systeem, kan de drainage naar het oppervlaktewater ook toenemen. Echter afvoer, als er ook wordt aangevoerd, is niet wenselijk en dit zal met behulp van het regelbare drainagesysteem en oppervlaktewaterbeheer gestuurd moeten worden. De mate van afvoer naar het oppervlaktewater en wegzijging naar het diepere grondwater is voor een groot deel bepalend voor de hoeveelheid water die aangevoerd moet worden. Voor het actief aanvullen van het watersysteem (subirrigatie) kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen van water, zoals oppervlaktewater, grondwater en gezuiverd restwater (de Wit et al., 2021). De keuze voor de bron hangt af van de waterbeschikbaarheid, maar ook de kwaliteit van het water moet beschouwd worden.



Figuur 1 Systeem voor regelbare drainage met subirrigatie (bron: Narain-Ford et al. (2020)).

2 Onderzoeksgebied

Voor het begrijpen van het systeem regelbare drainage met subirrigatie, en de interpretatie van de metingen is de bodemkundige en hydrologische situatie van de proefboerderij en het omliggende gebied van belang.

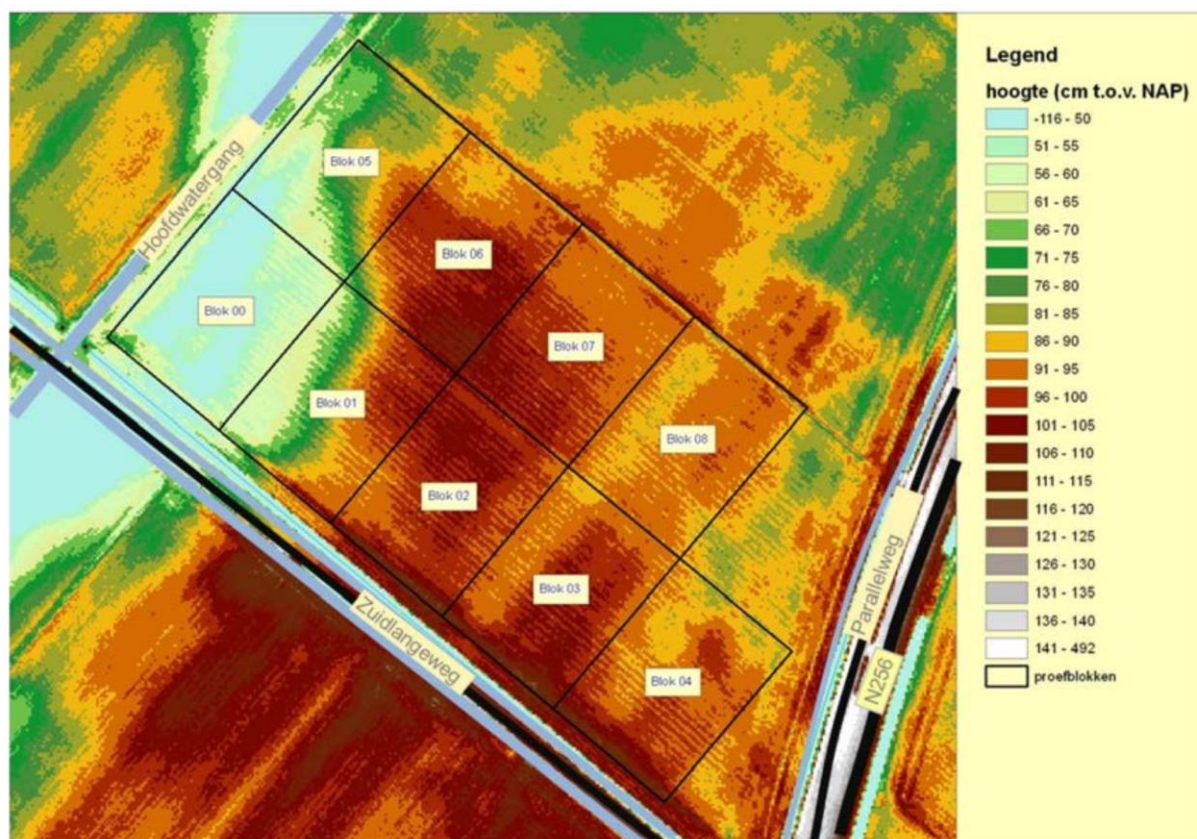
2.1 Topografie en maaiveld

Proefboerderij Rusthoeve is gelegen (Figuur 2) ten zuiden van Colijnsplaat en ten westen van Kats, aan de Noordlangeweg te Colijnsplaat op Noord-Beveland. Het proefveld is gelegen aan de Zuidlangeweg. Aan de oostkant van de proefboerderij loopt de Parallelweg (N256). De boerderij is te bereiken via de Zeelandbrug die over de Oosterschelde loopt en de N255 ten zuidoosten van de proefboerderij.



Figuur 2 Ligging van Proefboerderij Rusthoeve in Zeeland.

In de periode 2010-2014 heeft Alterra op deze proefboerderij een praktijkproef met regelbare drainage uitgevoerd (Schipper et al., 2015). Daarbij is een perceel op deze proefboerderij opgedeeld in negen blokken (Figuur 3). Meer details over de al aanwezige drainage die is gebruikt bij de Alterra-proef is weergegeven in Sectie 2.4. Deze studie richt zich op de blok 01, hierop volgend aangeduid als **proefblok (regelbare drainage met subirrigatie)**, en blok 06, hierop volgend aangeduid als **referentieblok (regelbare drainage zonder subirrigatie)**. De maaiveldhoogte binnen deze negen blokken is weergegeven in Figuur 3, en varieert van ca. 0,2 m+NAP in het westen tot ca. 1,0 m+NAP in het zuiden. Met een gemiddelde maaiveldhoogte van 0,95 m+NAP voor het referentieblok, ligt deze gemiddeld hoger dan het proefblok (gemiddelde maaiveldhoogte 0,77 m+NAP). De maaiveldhoogte op het referentieblok is homogener dan bij het proefblok.



Figuur 3 Hoogteligging proefblok (blok 01) en referentieblok (blok 06) te Rusthoeve (Zuidlangeweg, Colijnsplaat). Figuur is overgenomen uit Schipper et al. (2015).

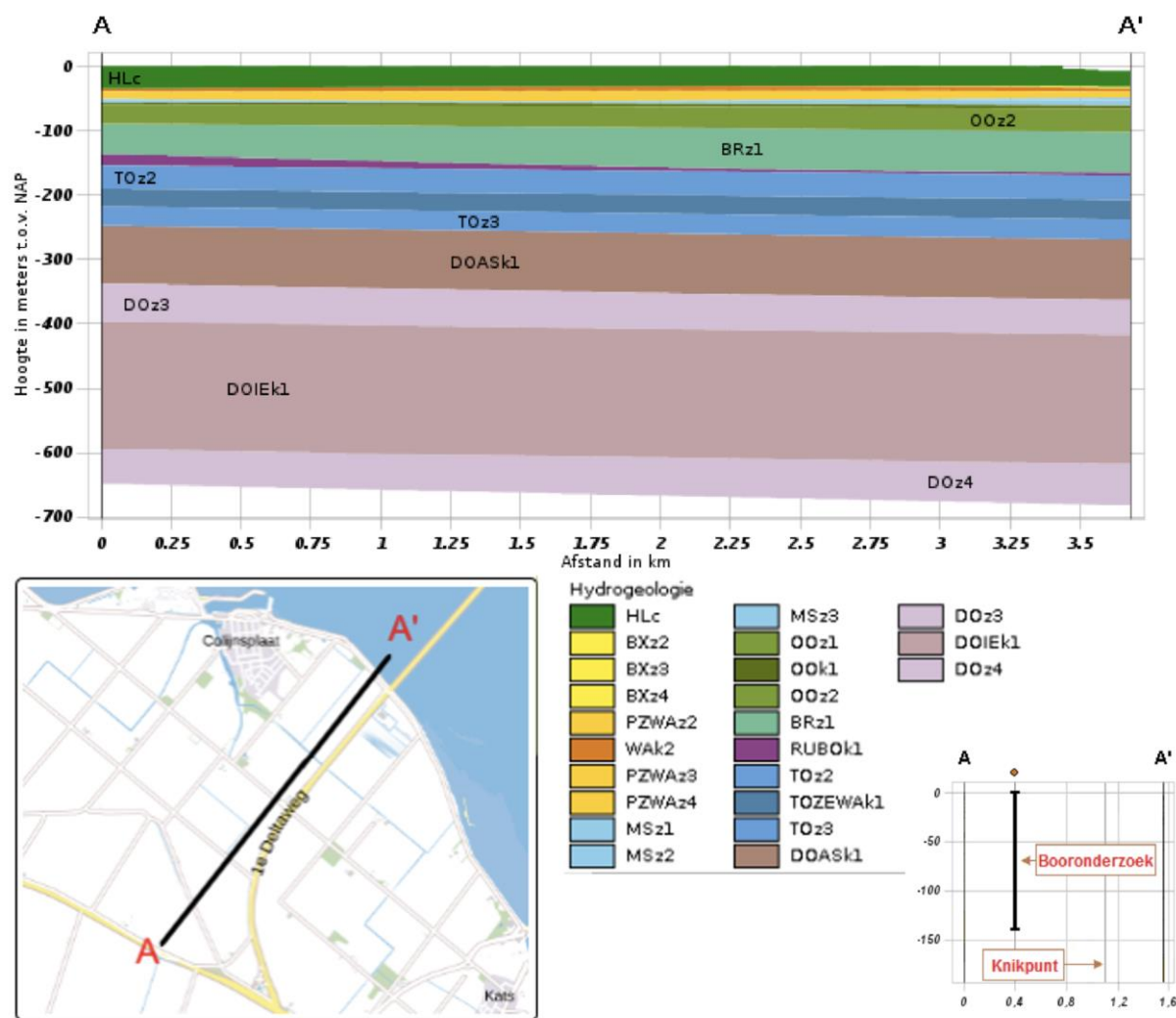
2.2 Bodemopbouw

2.2.1 Diepe bodemopbouw

Met behulp van het hydrogeologische model BRO REGIS II (Hummelman et al., 2019) is er een geologische doorsnede gemaakt van het gebied rondom het proef- en referentieblok (Figuur 4). Op basis hiervan kunnen we een geologische beschrijving maken van de ondergrond.

De toplaag wordt gevormd door Holocene afzettingen (0-35 m-NAP), gevolgd door de Formatie van Peize/ Waalre (klei, 35-40 m-NAP), Formatie van Peize (zand, 40-55 m-NAP), Formatie van Maassluis (zand, 55-60 m-NAP), Formatie van Oosterhout (klei, 60-65 m-NAP), Formatie van Oosterhout (zand, 65-85 m-NAP), Formatie van Breda (zand 85-155 m-NAP), Rupel formatie (klei, 155-160 m-NAP), Formatie van Tongeren (zand 160-195 m-NAP), Formatie van Tongeren (klei, 195-230 m-NAP), Formatie van Tongeren (zand, 230-250 m-NAP), Formatie van Dongen (klei, 250-340 m-NAP), Formatie pakket van Dongen (zand, 340-400 m-NAP), Formatie van Dongen (klei, 400-600 m-NAP), en de Formatie van Dongen (zand, 600-650 m-NAP).

Over het algemeen zijn de zandige formaties goed doorlatende bodemlagen (watervoerende pakketten), waar veel grondwaterstroming plaatsvindt. Grondwater stroomt minder goed in de kleiige formaties, de slecht doorlatende pakketten.



Figuur 4 Geologische doorsnede van het gebied rondom het proefblok. Het proefblok bevindt zich op ongeveer 1 tot 1,5 kilometer in de doorsnede (Bron: BRO REGIS II v2.21 (Hummelman et al., 2019)).

2.2.2 Ondiepe bodemopbouw²

Bij de praktijkproef die is uitgevoerd door Alterra (Schipper et al., 2015) is een beschrijving gemaakt van de ondiepe bodemopbouw. Daarin staat de volgende ondiepe bodemopbouw beschreven.

De bodemopbouw is ontstaan door geleidelijke opslibbing onder invloed van eb- en vloedbeweging. Hierbij is een gelaagdheid ontstaan die typerend is voor gronden in op- en aanwas- polders die in Zeeland veel voorkomen. Kalkrijke, kleiige en zandige lagen wisselen elkaar af.

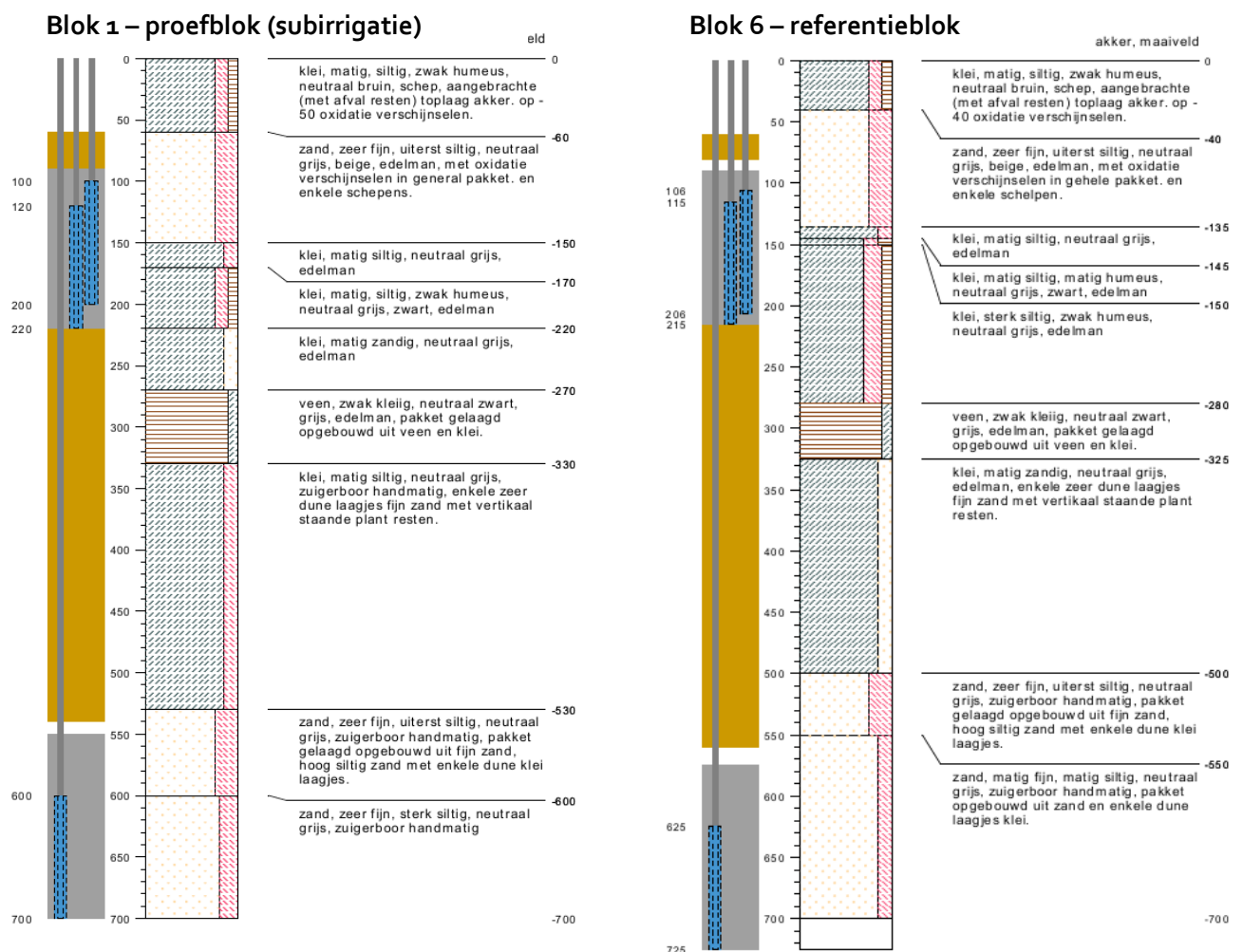
De toplaag voornamelijk bestaat uit matig lichte zavel (12-17,5% lutum) en zware zavel (17,5-25% lutum). Op draindiepte (1,20 m-mv) is het kleigehalte iets lager en varieert van zeer lichte zavel (8-12% lutum) tot zware zavel (17,5-25% lutum). Bij een aantal boringen begint de slappe (niet volledig gerijpte) ondergrond al binnen 1,5 m-mv. Het watervoerende (zand)pakket begint op een diepte van 5,0 tot 5,5 m onder maaiveld. De zuidelijk gelegen proefblokken 1-4 (waaronder het proefblok) hebben een lichtere profielopbouw dan de noordelijk gelegen velden 5-8 (waaronder het referentieblok). Wel komen in meerdere boringen in de zuidelijke proefblokken dieper dan 1 m lagen voor met 5 tot 20% organische stof (humeus tot weinig). Uit de diepe boringen blijkt dat onder het

¹ <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>

² Een deel van de tekst in deze sectie is overgenomen uit Schipper et al. (2015).

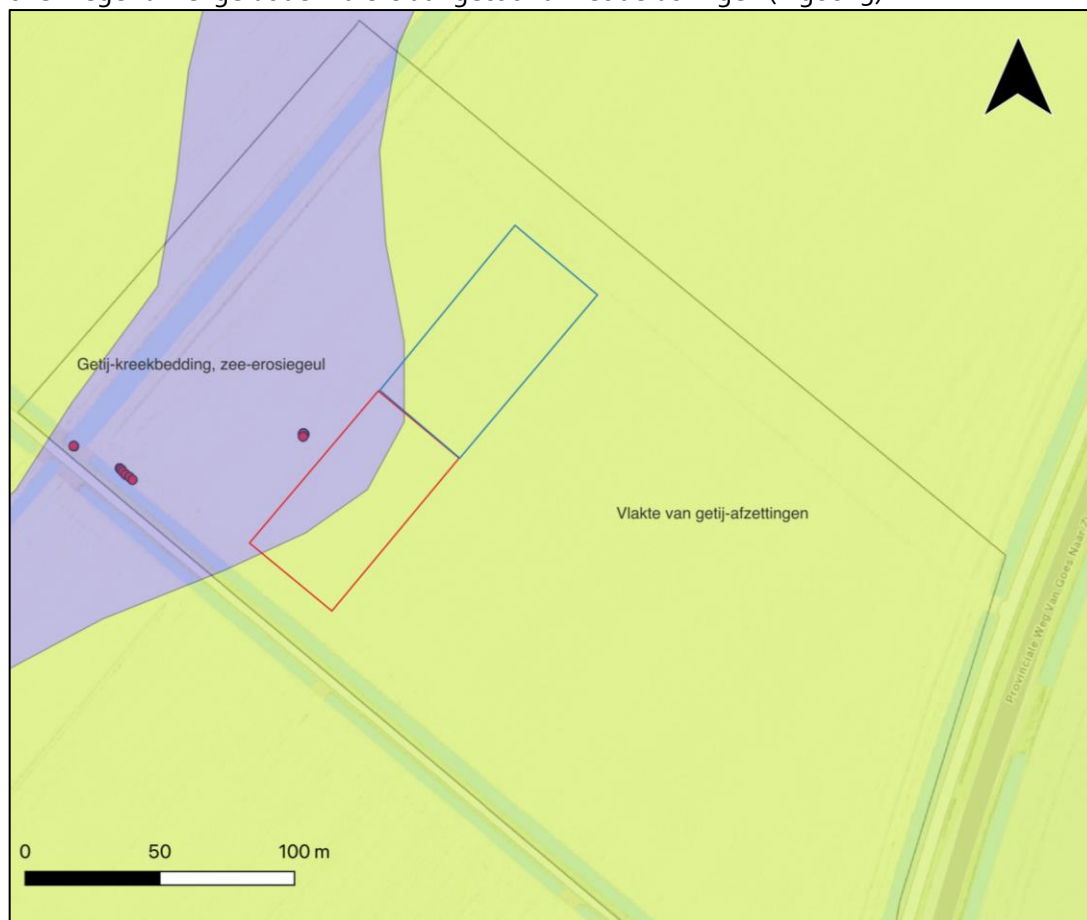
gelaagde pakket met kalkrijke afzettingen op 2,5 à 3 m diepte een veenlaag voorkomt die bestaat uit rietveen of rietzeggeveen. Deze veenlaag heeft een dikte van ongeveer 40 cm.

Naast de informatie uit het Alterra-rapport zijn ook voor deze proef plaatselijke boringen tot ongeveer 7 m-mv uitgevoerd, op de plekken waar de peilbuizen zijn geplaatst (Figuur 5). Hierin zien we ook de gelaagdheid terugkomen zoals beschreven in het Alterra-rapport. Op zowel het proefblok als het referentieblok zijn vergelijkbare bodemlagen waargenomen. De toplaag bestaat uit een matig kleiige, zwak humeuze laag die vrij siltig is (50 cm dik). Deze laag wordt gevolgd door een bijna 1 m dikke fijn-zandige laag en uiterst siltig. Tussen 1,5 m-mv en 5 m-mv is een kleipakket aangetroffen, die minder kleiig is dan de toplaag. Het dikke kleipakket wordt op 3 m-mv onderbroken door een 20 cm dik veenpakket. De veenlaag is mogelijk ontstaan door slibhoudend water aangevoerd door de zee. De onderste laag is het watervoerend pakket en bestaat uit zeer fijn zand, die sterk siltig is. Daarnaast blijkt dat de zuidelijke helft van het blok (locatie proefblok) een lichtere profielopbouw heeft dan de noordelijke helft van het blok (locatie referentieblok).



Figuur 5 Bodemopbouw bij de peilbuizen op het proefblok (links) en het referentieblok (rechts) onder maaiveld. Gemiddelde maaiveldhoogte van het proefblok is 0,77 m+NAP, en de gemiddelde maaiveldhoogte van het referentieblok is 0,95 m+NAP. Links van de bodemopbouw is de opstelling van de peilbuizen te zien. Van links naar rechts: diep (7 meter), ondiep tussen de drains en ondiep direct naast de drain (2 meter). Het blauwe gedeelte van de peilbuis geeft het filter weer.

Tot slot is op basis van de geomorfologische kaart (BRO Geomorfologie 2019) vastgesteld dat er zich op zowel het proef- als het referentieblok tot op een diepte van maximaal 5 m-mv een zee-erosiegeul bevindt (Figuur 6). Dit is typisch een zandbaan met een hogere doorlatendheid dan de overwegend kleiige bodem die is aangetoond met de boringen (Figuur 5).



Figuur 6 Aanwezigheid van zee-erosiegeul op proeflocatie (Bron: BRO Geomorfologie 2019³). Het proefblok is weergegeven met een rood kader en het referentieblok is weergegeven met een blauw kader.

2.3 Watersysteem⁴

De proeflocatie is aan drie zijden omringd door een sloot. De hoofdwatergang (legger) ten westen heeft een streefpeil in de zomer van NAP $-0,7$ m en in de winter van NAP $-1,0$ m. In de praktijk treden in perioden met veel neerslag tijdelijk hogere waterpeilen op. In droge perioden zakken de peilen uit. De zuidelijke kavelsloot heeft een bodemhoogte rond NAP $-0,7$ m en is niet permanent watervoerend. De oostelijke sloot ligt nog iets hoger en voert alleen in natte omstandigheden water af. De westelijke en zuidelijke sloot hebben een afwaterende functie. De gemiddelde drooglegging, dit is de afstand van maaiveldhoogte tot waterpeil in de sloten, van de proefblokken bedraagt $1,6$ m-mv, hetgeen een grote drooglegging is.

Op basis van boorprofielen en gerichte opnamen is een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) bepaald van $0,6$ tot $0,8$ m-mv. De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) varieert van $1,5$ tot $1,9$ m-mv.

Om een indruk te krijgen van de aanwezigheid van zoute kwel is tijdens de bodemkartering in elk boorgat tot een diepte van $2,3$ m het elektrisch geleidingsvermogen gemeten (EGV). De gemeten

³ <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>

⁴ De tekst in deze sectie is grotendeels overgenomen uit Schipper et al. (2015).

EGV-waarden lopen uiteen van 1,84 tot 31,50 mS/cm, waarbij de hoogste waarden zijn gemeten aan de zuidrand bij o.a. het proefblok (blok 1). Op alle locaties is dus sprake van beïnvloeding door zoute kwel, maar de beïnvloeding is aan de zuidrand groter dan in het noordelijk deel van het blok.

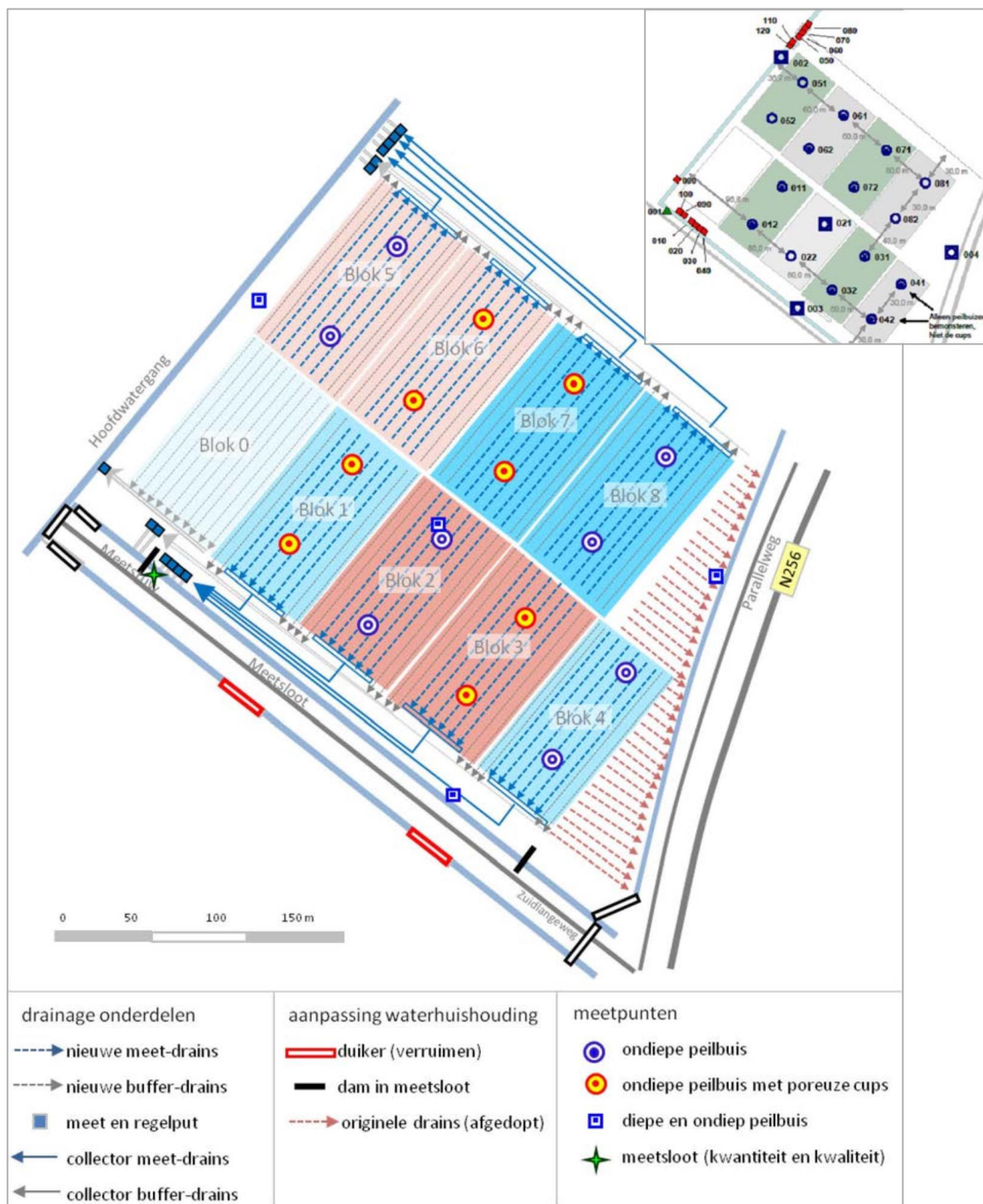
2.4 Aanwezigheid drainagesysteem

De praktijkproef van Alterra (Schipper et al., 2015), die is uitgevoerd tussen 2010 en 2014, bestond uit 8 blokken (80 x 60 m) met 4 typen samengestelde drainage: conventionele drainage (blok 5 & 6), peilgestuurde drainage (blok 1 & 4), diepe drainage (blok 2 & 3), en peilgestuurde diepe drainage (blok 7 & 8) (zie overzicht Figuur 7). In blok 0 (nul) ligt een niet-samengesteld drainagesysteem.

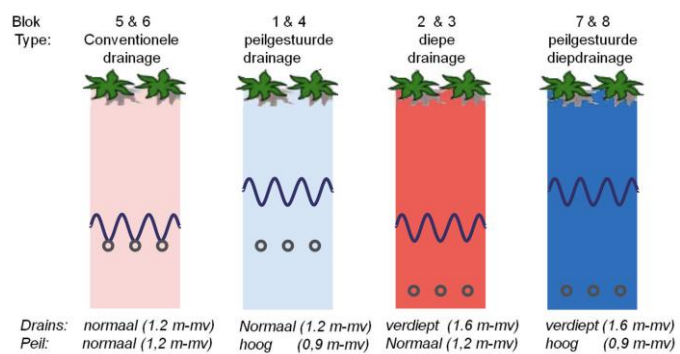
Figuur 8 geeft een overzicht van de drainagevarianten die gebruikt zijn bij de proef van Alterra. Omdat blok 1 al samengesteld en peilgestuurd is en dicht bij de wateraanvoer ligt, is ervoor gekozen om voor deze studie dit blok in te richten met de maatregel regelbare drainage met subirrigatie (c.q. het proefblok voor testen maatregel regelbare drainage met subirrigatie). Mede omdat de buizen van de samengestelde drainage in blok 6 op dezelfde diepte (1,2 m-mv) liggen als in blok 1, is blok 6 geselecteerd als referentieblok.

Elk van de blokken die weergegeven zijn in Figuur 7 zijn 36 m breed en 80 m lang. In elk blok liggen 6 drains met een onderlinge afstand van 6 m. Daarnaast is er rondom elk proefblok een bufferzone van 12 m gehanteerd (2 drains). De bufferdrains van de blokken zijn onderling verbonden met een collectordrain. Met de bufferzone is dus elk proefblok $36 + 12 + 12 = 60$ m breed.

Na de proef van Alterra (Schipper et al., 2015) is er weinig tot niets aan het regelbare drainagesysteem gedaan, waardoor de huidige staat van de drainagebuizen in 2020 onbekend was. Daarom is in opdracht van AIKC Rusthoeve een inspectie uitgevoerd door Barth Drainage BV (april/mei 2020) van de systemen in de blokken 1 en 6. Er zijn destijds geen onregelmatigheden vastgesteld. In Sectie 3.1.1 wordt beschreven welke aanpassingen wij hebben gedaan aan de blokken 1 en 6 om ze geschikt te maken als respectievelijk het proef- en referentieblok voor deze studie.



Figuur 7 Ligging blokken en meetlocaties van de praktijkproef uitgevoerd door Alterra (uit Schipper et al., (2015).

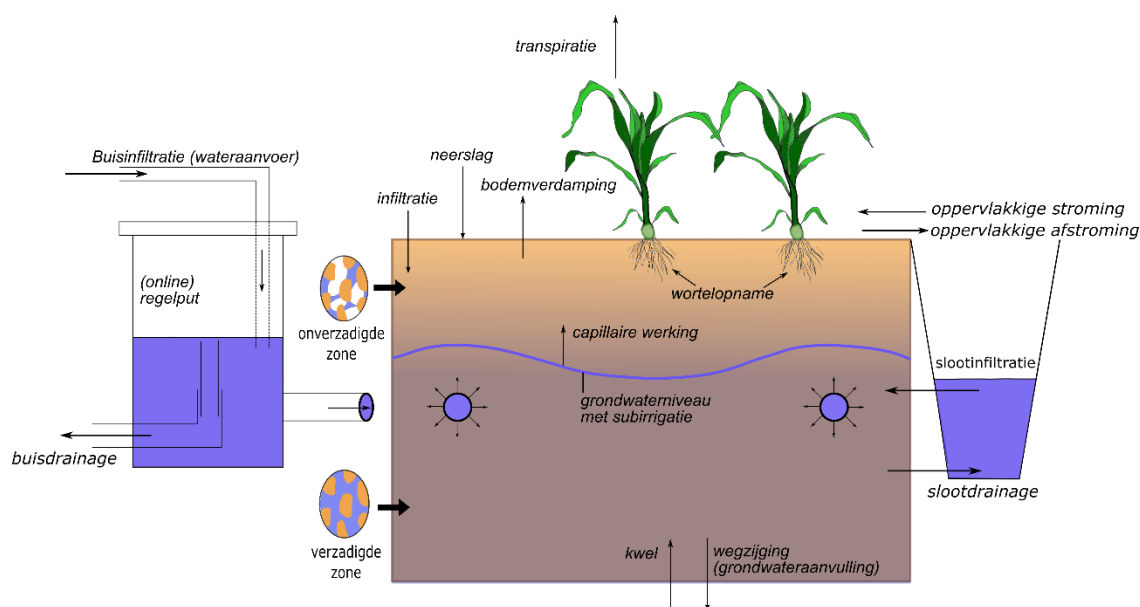


Figuur 8 Drainagevarianten gebruikt in de praktijkproef van Alterra (uit Schipper et al., (2015).

3 Methode

Om de effectiviteit van de maatregel regelbare drainage met subirrigatie te testen zijn i) metingen verricht op zowel het proef- als het referentieblok, is ii) 1-dimensionaal de onverzadigde-verzadigde zone gemodelleerd met behulp van het Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) model (van Dam et al., 1997; Kroes et al., 2017), en is iii) gebruik gemaakt van het SUTRA-model (Provost & Voss, 2019; Voss & Provost, 2010) om inzicht te krijgen in de 2D dichtheidsstroming (interactie zoet-zout).

Zoals beschreven in Sectie o heeft regelbare drainage met subirrigatie als doel de grondwaterstand te verhogen en zo de waterbeschikbaarheid in de wortelzone van de plant te verbeteren. Subirrigatie heeft invloed op verschillende componenten van de waterbalans en bijvoorbeeld de mate van stroming van water naar een waterloop of wegzijging naar het diepere grondwater, beïnvloedt het effect van subirrigatie (Figuur 9). Om het effect van subirrigatie te kunnen duiden, zijn enkele waterbalanscomponenten direct in het veld gemeten, zijn grond- en oppervlaktewaterstanden gemeten en zijn o.a. bodemvochtgehaltes en drukhoogte (zuigspanning) in de wortelzone gemeten (Sectie 3.1). Op basis van de metingen zijn modellen opgesteld (SWAP en SUTRA) om het effect van subirrigatie op alle componenten van de waterbalans inzichtelijk te maken (Secties o en o).



Figuur 9 De bodemwaterkolom op veldschaal met bijbehorende waterbalanscomponenten (de Wit et al., 2022).

3.1 Veldproef

3.1.1 Regelbare drainage met subirrigatie

Op het proefblok (blok 1) is samengestelde regelbare drainage aanwezig: zes drainagebuizen zijn aan elkaar gekoppeld en komen samen via een verzamelleiding in een betonnen regelput (Figuur 10). De drainagebuizen in het proefblok liggen evenals bij het referentieblok op 1,2 m-mv en op 6 m afstand van elkaar. Vanuit de betonnen put is de waterafvoer naar de sloot geregeld. Er ligt een regelbaar drainagesysteem: een aaneengesloten systeem met een verzamelbuis, waarin het drainageniveau, dat op verschillende hoogtes kan worden ingesteld, via de regelput actief geregeld kan worden. Met deze regelbare drainage kunnen we dus daadwerkelijk water dat aanwezig is afvoeren of vasthouden en in de bodem bufferen.



Figuur 10 Betonnen regelput op het proefblok op Proefboerderij Rusthoeve.

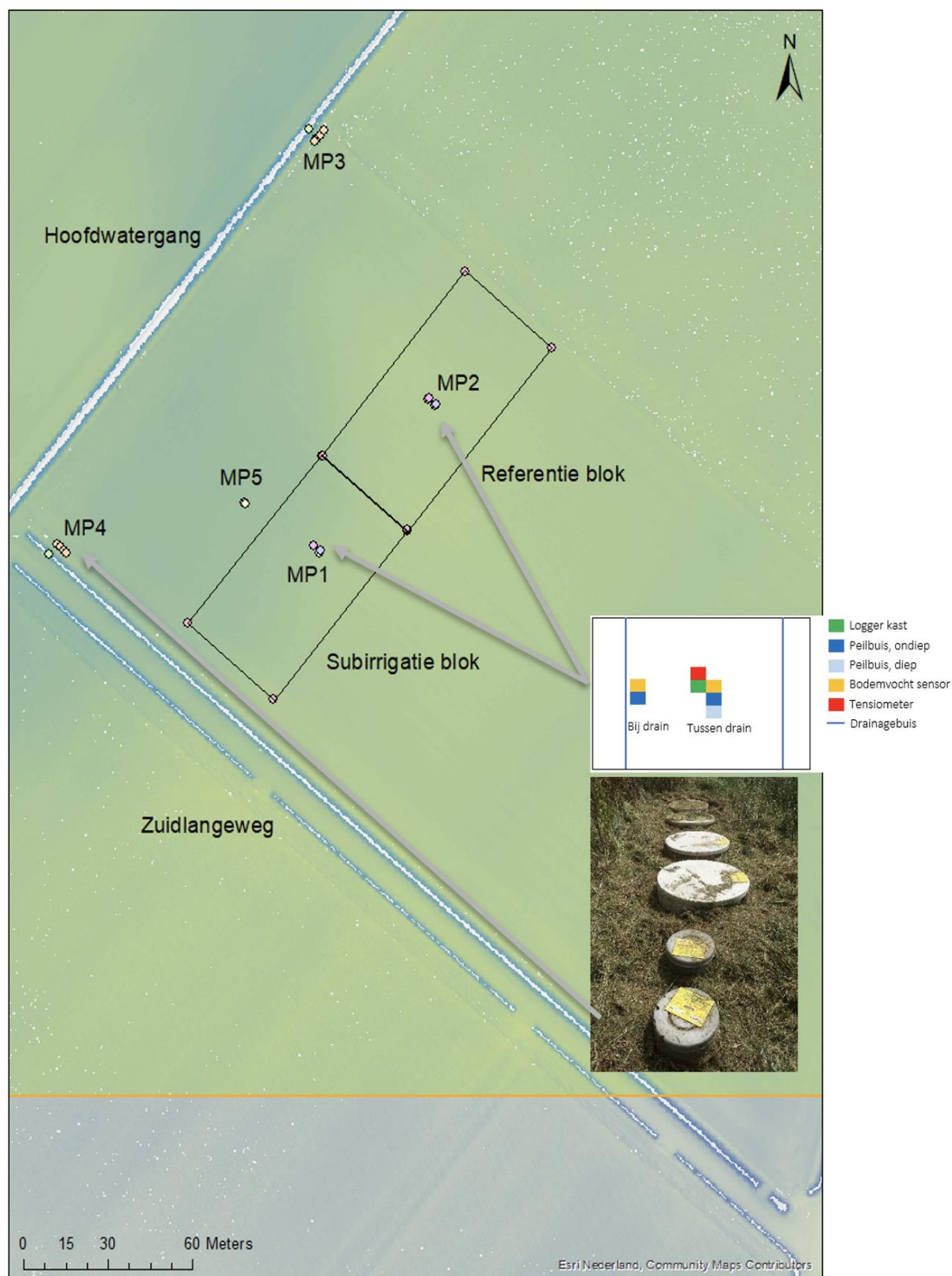
Het systeem kan ook benut worden om d.m.v. subirrigatie het grondwater actief aan te vullen. Door de regelput met water te vullen tot een niveau dat hoger is dan de grondwaterstand in het blok, en de afvoer van de regelput naar de sloot te sluiten, zal het aangevoerde water via de drains het grondwater aanvullen, met als doel de grondwaterstand dusdanig te verhogen, dat het via capillaire opstijging ter beschikking komt aan de plantenwortels.

Op Proefboerderij Rusthoeve wordt regenwater van daken opgevangen in een bassin en via een trekker met watertank (2020 en 2021) of leidingsysteem en extern aangevoerd oppervlaktewater (2022) naar een container nabij het proefblok getransporteerd. De container voorziet de regelput vervolgens van water. De hoofdzoetwaterbron voor subirrigatie in de proef is dus regenwater.

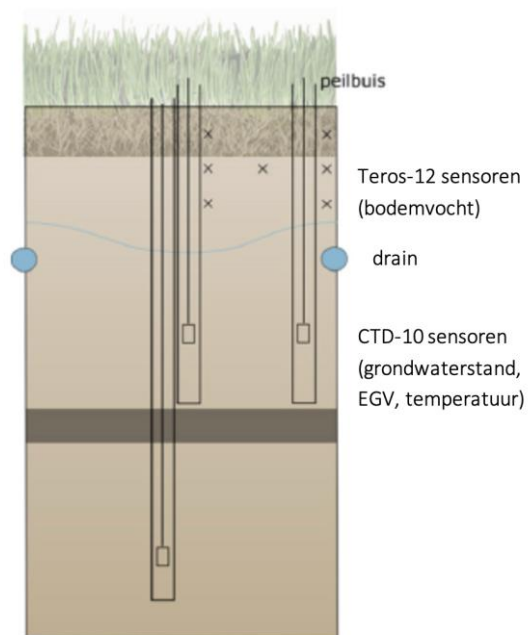
3.1.2 Meetopstelling

Op 2 augustus 2019 is een klein meetnetwerk ingericht, voor een eerste verkennende meetserie. Op 24 juni 2020 is het grootste gedeelte van het meetnet voor de veldproef ingericht: grondwatersensoren, bodemvochtsensoren, tensiometers, regenmeter, waterpeilen in de regelputten, de kavelsloot en de leggerwatergang. Op 21 augustus 2020 is het meetnet bij wijze van experiment uitgebreid met een 'Leaf Wetness Sensor', 'Soil Water Potential' en stralingsmeter (inkomend en uitgaand). Een overzicht van de meetopstelling is weergegeven in Figuur 11.

In het proefblok (blok 1) en referentieblok (blok 6) zijn 3 peilbuizen geplaatst. Eén peilbuis direct naast de drain (ondiep), één peilbuis tussen twee drains (ondiep) en nog één peilbuis tussen twee drains (diep). In het proef- en referentieblok zijn zowel tussen de drains, als direct naast de drain een set van 3 bodemvochtsensoren geplaatst op 25 cm, 50 cm en 75 cm onder maaiveld (Figuur 12). De drukhoogte wordt op zowel het proef- als het referentieblok tussen de drains op 50 cm diepte gemeten en op het proefblok ook op 25 cm-mv. De bladvochtigheid van het gewas wordt gemeten op het referentieblok, tussen de drains. De inkomende zonnestraling en straling vanuit de bodem en het gewas wordt ook op het referentieblok, tussen de drains, gemeten.



Figuur 11 Overzicht meetopstelling Rusthoeve met 5 meetpunten. De meetopstelling bij MP1 en MP2 is hetzelfde geïnstalleerd (bij drain: bodemvochtsensoren op 25, 50 en 75 cm-mv en een ondiepe peilbuis, tussen drain: peilbuis diep en ondiep, bodemvochtsensoren 25, 50 en 75 cm-mv, tensiometer op 50 cm-mv en de loggerkast). Een regenmeter is geïnstalleerd bij MP3. Waterpeilen zijn gemeten bij MP3 en MP4.



Figuur 12 Schematische opstelling van sensoren op het proef- en referentieblok. Peilbuizen ondiep zijn geplaatst boven de kleilaag, peilbuizen diep zijn geplaatst onder de kleilaag.



Figuur 13 Meetapparatuur aanwezig op het proefblok. Logger kast met regenmeter (linksboven), TEROS-32 tensiometer (midden boven), drukhoogte sensor TEROS-21 (rechtsboven), peilbuizen met CTD-10 drukopnemers (midden links), TEROS-12 bodemvochtsensor (midden), time lapse camera gewasgroei (midden rechts), leaf wetness sensor PHYTOS 31 (linksonder), Spectral Reflectance Sensor (SRS) (midden onder) en het voorraadreservoir ter plekke van de kavel (rechtsonder).

3.1.3 Metingen

Voor de monitoring en analyse van de effecten van subirrigatie zijn neerslag, slootpeilen, aanvoer- en afvoerdebieten, grondwaterstanden, bodemvochtgehalten, drukhoogten (zuigspanning) en grondwatersamenstelling in de vorm van de temperatuur en elektrisch geleidingsvermogen (EGV of in het Engels EC) gemeten. De coördinaten van de exacte meetopstellingen zijn weergegeven in Bijlage A.

Neerslag wordt continu geregistreerd door een neerslagmeter ('tipping bucket': elke 0,2 mm neerslag wordt geteld). Daarnaast wordt er gebruikt gemaakt van KNMI-radargegevens (composietbeelden). Deze beelden komen tot stand door radargegevens in Nederland, België en Duitsland te combineren en vervolgens te corrigeren met neerslagmeters aan de grond bij KNMI-stations. De brondata wordt gepubliceerd op het data platform van het KNMI (<https://dataplatform.knmi.nl/dataset/nl-rdr-data-rtcor-5m-1-0>). De neerslag op de proeflocatie is vervolgens bepaald met een GIS-tool. Voor de kalibratie van zowel het SWAP-model als het SUTRA-model voor de veldproef, is gebruikt gemaakt van deze KNMI-radar composietbeelden. Voor de SWAP-modellering van scenario's zijn meteorologische gegevens (dagwaarden) van het dichtstbijzijnde automatische weerstation (AWS) van het KNMI (Wilhelminadorp, nummer 323) gebruikt.

De **hoeveelheid water**, die naar het subirrigatie blok wordt aangevoerd (debiet IN), wordt continu gemeten met een debietmeter. De hoeveelheid aanvoer van water is gelijk aan de hoeveel water die in de bodem stroomt via de drainagebuizen, zolang er geen water wordt afgevoerd. De wateraanvoer stopt als het gewenste grondwaterpeil is bereikt via een vlotter in de regelput, die de aanvoer dan dichtzet. Zodra het grondwaterpeil door een optredend neerslagoverschot groter is dan de drainagehoogte, is er sprake van afvoer en draait de stroomrichting om. De afvoer van het subirrigatie- en referentieblok wordt gemeten met een MULTICAL 21/ flowIQ meter. Volgens de handleiding⁵ is de minimaal meetbare afvoer 32 l/uur. Op een blok van 6 x 6 x 80 m is dit 0,26 mm/dag. 16 maart 2023 om 12:22 uur kan hiervoor als voorbeeld gebruikt worden: we maten handmatig 32,4 l/uur terwijl dit niet door de debietmeter werd geregistreerd.

Het **waterpeil** in aangrenzende sloten wordt gemeten met CTD-10 sensoren. Het waterpeil in de regelput wordt ook gemeten met CTD-10 sensoren (CTD: Conductivity, Temperature, Depth).

Grondwaterstanden worden op verschillende locaties geautomatiseerd (met CTD-10 sensoren) en handmatig (ten behoeve van de controle/correctie van de automatische gegevens) gemeten. De automatische metingen worden elke 15 minuten geregistreerd. Grondwaterstanden worden tussen twee drains en direct naast een drain gemeten, om inzicht te geven in hoeverre subirrigatie doorwerkt in het 2D-transect tussen twee drains. De ondiepe peilbuizen zijn geplaatst in de klei. Het bovenste gedeelte van het filter (1,0-1,5 m-mv) bevindt zich in het zand, het onderste gedeelte van het filter (1,5-2,0 m-mv) in de klei. De diepe peilbuis is geplaatst onder de dikke kleilaag veroorzaakt. Door de heterogeniteit van het blok bevindt deze laag zich op het proefblok tot 5,30 m-mv, op het referentieblok tot 5,0 m-mv. Door dit verschil is het filter in de diepe peilbuis op het referentieblok dieper geplaatst dan op het proefblok.

De CTD-sensoren meten naast de grondwaterstand ook het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) en temperatuur van het water. Met deze sensoren kan een indicatie gemaakt worden van het soort water dat ter plekke in de bodem aanwezig is (neerslagoverschot, aangevoerd water, mengvorm, brak tot zout kwelwater, etc.).

⁵ <https://www.kamstrup.com/en-en/water-solutions/meters-devices/meters/flowiq-3100/documents>, type DN80 031-YY-CoN-8XX

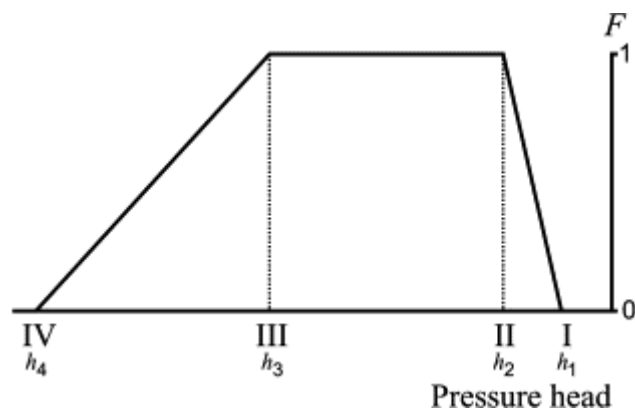
Bodemvochtgehalte, oftewel de volumefractie water dat zich in de poriën tussen de bodemdeeltjes bevindt boven de grondwaterstand, is zowel op het proef- als referentieblok, op drie diepten in de wortelzone gemeten: op 25, 50 en 75 cm-mv. Dit wordt op deze drie dieptes gemeten m.b.v. Teros-12 sensoren in het midden van het blok en tussen twee drains (Figuur 12). Elke 15 minuten wordt een waarneming geregistreerd en de waarnemingen worden dagelijks geautomatiseerd uitgelezen via een telemetrieservice. Waarnemingen geven weer of en in welke mate het bodemvocht in de wortelzone verhoogd wordt als gevolg van subirrigatie.

Drukhoogte

Naast de bodemvochtmetingen is er een Teros-32 tensiometer geïnstalleerd tussen de drains op 50 cm diepte, zowel op het proefblok als het referentieblok. De tensiometer meet direct de drukhoogte en is een directere maat voor de waterbeschikbaarheid voor het gewas dan een bodemvochtgehalte. De drukhoogte kan via de pF-curve van een bodem gerelateerd worden aan het bodemvochtgehalte. Met behulp van deze drukhoogtemetingen kan direct bepaald worden in welke condities het dan geteelde gewas verkeert op het vlak van wateropname door de wortels om te kunnen verdampen (transpiratie).

De zogenaamde 'Feddes-curve' (Figuur 14) geeft per gewas specifiek aan bij welke drukhoogte h_x het gewas goed water op kan nemen (tussen h_2 en h_3 in figuur), bij welke drukhoogte de plant last heeft van een tekort aan water en de wateropname afneemt (tussen h_3 en h_4) en bij welke drukhoogte de plant last heeft van te weinig zuurstof/te natte bodemcondities en de wateropname afneemt (tussen h_2 en h_1). h_4 is drukhoogte waarbij gewassen niet meer in staat zijn om water uit de bodem op te nemen.

De drukhoogte in de onverzadigde bodem wordt tegelijkertijd bepaald door een eventueel percolerend neerslagoverschot na regenval, via onttrekking van water door verdamping van bodem en plant, door de freatische grondwaterstand en door de capillaire nalevering vanuit het grondwater.



Figuur 14 Feddes-curve met de relatieve wateropname (F) als functie van de drukhoogte (h).

De **gewasopbrengst** (droge stof in kg/ha) wordt jaarlijks handmatig bepaald. Deze informatie is aangevuld met informatie uit remote sensing beelden. De waarnemingen aan de grond zijn hierbij als controle gebruikt.

Extra metingen:

- Vochtigheid van het blad van het gewas
- Gewastoestand

De **vochtigheid van het blad van het gewas** wordt gemeten met de 'leaf wetness potential' (Phytos-31). De sensor lijkt op een gewasblad en is tussen het gewas geplaatst. De sensor meet per ingesteld meetinterval, in deze proef 15 minuten, hoe vochtig het bladoppervlak is. De sensor is compleet droog bij 435 'raw counts', ook wel de vochtigheidsdrempel (Engels: 'wetness threshold') genoemd. Allereerst meet de sensor cumulatief hoeveel minuten het blad nat is per meetinterval. Als tweede wordt gemeten hoeveel minuten het blad nat is per meetinterval met een hogere vochtigheidsdrempel. Deze metingen kunnen worden gebruikt als de sensor vies blijkt te zijn door opgewaarde grond, of bijvoorbeeld vogelpoep. Als laatste meet de sensor op de laatste minuut van het meetinterval de ruwe tellingen (Engels: 'raw counts'). De ruwe tellingen geeft informatie over de waterfase en de hoeveelheid water.

De **gewastoeestand** wordt ook gemonitord met de 'Spectral Reflectance Sensor (SRS)', die de straling in de lucht en de bodem meet, en de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). De straling wordt gemeten met een golflengte van 650 nm (zichtbaar licht) en 810 nm (bijna infrarood). Vegetatie reflecteert licht verschillend in het zichtbare spectrum (400 tot 700 nm) t.o.v. het 'near-infrared' (> 700 nm). Groene bladeren absorberen licht voornamelijk in het zichtbare spectrum, op rode golflengtes (600-700 nm), en reflecteren voornamelijk in het 'near-infrared'. Het verschil in reflecteerbaarheid van kale grond, gewasstam, takjes en andere elementen die geen fotosynthese hebben, is minimaal tussen het zichtbare spectrum en het 'near-infrared'. Het verschil in metingen tussen het zichtbare spectrum en het near-infrared heeft dus enkel te maken met de hoeveelheid groene vegetatie aanwezig in het veld (Royo & Villegas, 2011).

De NDVI is een indirecte meting, die correleert met verschillende parameters zoals LAI, biomassa en bladproductiviteit. Een grote variabiliteit komt vaak voor in de NDVI-data, door verandering van de omgevingsfactoren en observatiecondities. Voor een plausibele data-interpretatie zijn de NDVI-metingen tussen 12:00u-16:00u gemiddeld.

3.1.4 Bouwplan gewas

Het proef- en referentieblok hebben hetzelfde managementplan gezien de bewerking van het blok. De gewassen verschillen jaarlijks (Tabel 1). AIKC Rusthoeve doet het bodem- en gewasbeheer en voert de opbrengstbepaling uit.

Tabel 1 Overzicht geteelde gewassen op het proef- en referentieblok.

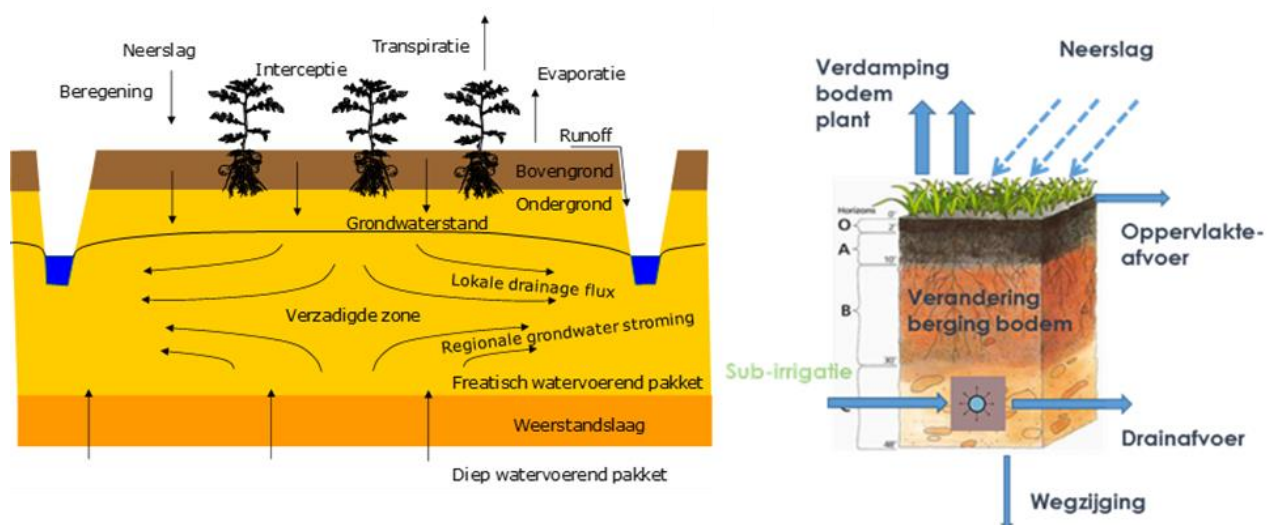
Groeiseizoen	Gewas	Startdatum (zaai, poot)	Einddatum (oogst)
2020	Braakliggend bouwland	1 januari 2020	3 mei 2020
	Cichorei	4 mei 2020	12 november 2020
2021	Wintertarwe	13 november 2020	21 augustus 2021
	Aardappelen (en tarwe)	28 april 2021	15 oktober 2021
2022	Braakliggend bouwland	16 oktober 2021	24 maart 2022
	Zaaiui	25 maart 2022	22 september 2022

3.2 Modellering van onverzadigde en verzadigde zone met SWAP (1D)

3.2.1 Achtergrond agro-hydrologisch 1D-SWAP model

Modelberekeningen voor regelbare drainage met subirrigatie zijn uitgevoerd met SWAP, een dynamisch model voor de onverzadigde zone en plant-atmosfeer interacties (SWAP: 1D Soil Water Atmosphere Plant model; Kroes et al., 2017). Dit model is gebruikt om voor het proefblok bij de Rusthoeve de hydrologische situatie en de vochtvoorziening van het gewas te simuleren.

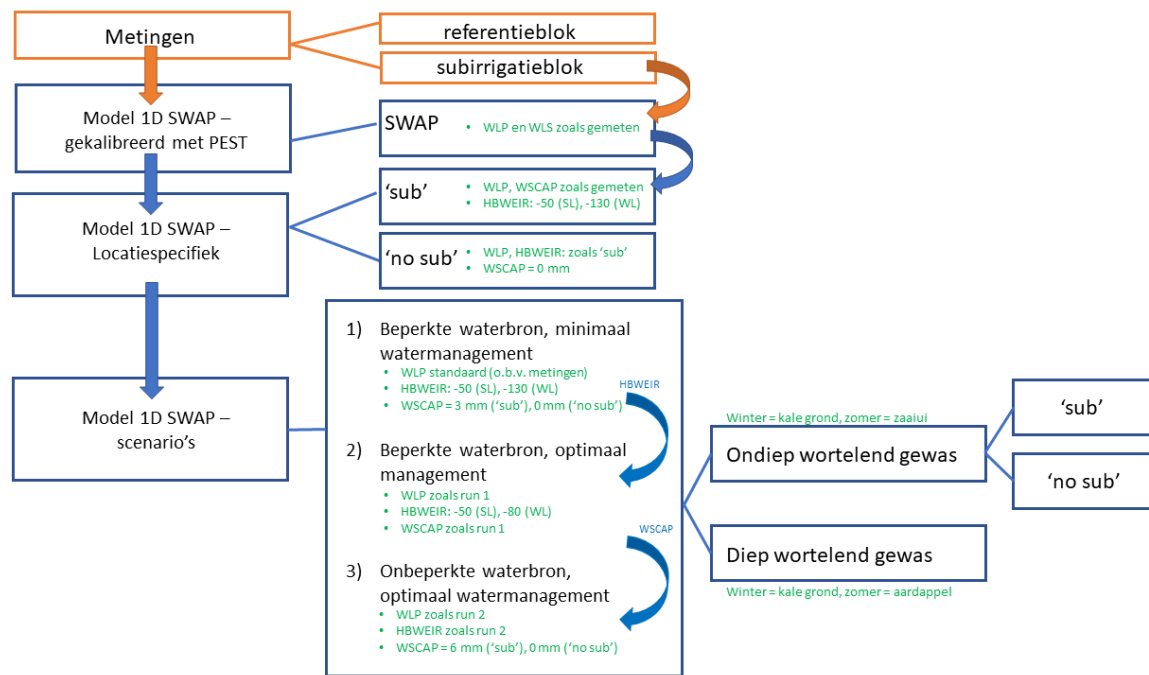
Het SWAP modeldomein is een doorsnede van de bodem midden op het blok waarbij de belangrijkste hydrologische processen worden gemodelleerd (Figuur 15). SWAP simuleert hoofdzakelijk het verticale transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde zone (drainage wordt horizontaal gesimuleerd). Als invoer worden meteorologische condities, bodemfysische parameters volgens Van Genuchten (Van Genuchten, 1980), een hydrologische onderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gewaseigenschappen gebruikt (Kroes et al., 2017). Als uitvoer geeft het model op dagbasis onder meer de grondwaterstand, bodemvochtgehalte bodemtemperatuur (op meerdere dieptes), en de afname in gewasverdamping (transpiratiereductie). Deze transpiratiereductie is het verschil tussen potentiële en werkelijke transpiratie, veroorzaakt door te natte of te droge omstandigheden in de wortelzone met als gevolg zuurstofstress (te natte condities) of droogtestress (te droge condities). Daarnaast geeft SWAP uitvoergegevens over alle componenten van de waterbalans zoals weergegeven in Figuur 15. Een gedetailleerde beschrijving over SWAP in combinatie met regelbare drainage met subirrigatie is beschreven in de Wit et al. (2021).



Figuur 15 SWAP modeldomein met belangrijke hydrologische processen (links, figuur ontleend aan Kroes et al. 2017). Schematische bodemkolom met drainagebuis en situatie bij subirrigatie (rechts); blauwe pijlen geven de componenten van de waterbalans weer..

3.2.2 Modelinvoer agro-hydrologisch 1D-SWAP model

De werking van regelbare drainage met subirrigatie op perceelschaal kan met SWAP gemodelleerd worden. Zowel de waterbalans op perceelschaal als bijbehorende waterfluxen worden hiermee inzichtelijk gemaakt.



Figuur 16 Opzet methode modellering op perceelschaal met het agrohydrologisch 1D-SWAP model in combinatie met veldwaarnemingen.

Om de parameters in het SWAP model zo goed mogelijk te laten aansluiten op de omstandigheden van de veldproef is het SWAP model gekalibreerd met hulp van het algoritme PEST (Doherty et al., 2010). De modellering kunnen we opdelen in 4 stappen:

1. Invoergegevens van de modelkalibratie zijn i) het gemeten freatisch grondwaterniveau, ii) de gemeten bodemvochtgehalten op drie dieptes (25 cm, 50 cm, en 75 cm), iii) de neerslag volgens de KNMI-radar (Sectie 3.1.3), iv) het gemeten slootpeil in de leggerwatergang en v) de gemeten stijghoogte in de diepe peilbuis. De metingen over de tijdperiode 01 juli 2020 – 24 september 2022 van het proefblok zijn gebruikt. Daarnaast zijn de werkelijke condities uit de proef gebruikt, zoals het opgelegde drainageniveau in de regelput.
2. De kalibratie is erop gericht om een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen, de drainage- en infiltratieweerstand te maken. De invoergegevens die verder zijn gebruikt voor de SWAP modelberekening zijn in tabelvorm weergegeven (Tabel 2).
3. Met behulp van het gekalibreerde SWAP model is een locatie-specifiek model gemaakt. De invoergegevens van het SWAP model zijn gelijk aan de invoergegevens van het model gekalibreerd met PEST, zoals beschreven in Tabel 2.
4. Het locatie-specifieke model is gebruikt om een drietal scenario's te modelleren. De scenario's geven inzicht in de effecten van verschillend beheer van het systeem en verschillende waterbeschikbaarheid:
 - a. Beperkte waterbron, minimaal watermanagement -> er kan maximaal 3 mm/d water worden aangevoerd in de periode 1 april – 30 september. 's Zomers wordt er water vastgehouden, 's winters wordt er gedraineerd.
 - b. Beperkte waterbron, optimaal management -> zoals (a), maar 's winters wordt er water vastgehouden.
 - c. 'Onbeperkte' waterbron, optimaal watermanagement -> zoals (b), maar er is 6 mm/d water beschikbaar.

De drie scenario's zijn allen uitgevoerd voor een dieper (aardappel) en ondieper wortelend (zaaiui) gewas. Naast de scenario's met subirrigatie zoals hierboven beschreven, zijn ze ook

gesimuleerd zonder wateraanvoer (dus zonder subirrigatie), maar met de specifieke variant voor water vasthouden.

Tabel 2 Model invoer voor het 1D-SWAP model voor het subirrigatieblok te Rusthoeve.

Invoer	Opmerking
Meteorologie	Meteorologische gegevens van het KNMI AWS station Wilhelminadorp (nr. 323) zijn gebruikt, behalve voor neerslag. Dagelijkse neerslaggegevens zijn afkomstig van de KNMI-radar (Sectie 3.1.3, metingen).
Gewas-input	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 de gewasopbouw gebaseerd op de werkelijke toepassing (Sectie 3.1.4, bouwplan). In 2021 stond een combinatie van wintertarwe en aardappels. In het model is één gewas tegelijk mogelijk. De wintertarwe groeit daarom tot 27 april 2021, vanaf 28 april 2021 groeit de aardappel. Droogtestress is berekend volgens Feddes et al. (1978) (Tabel 3).
Referentieniveau	Het referentieniveau van het maaiveld is 0,77 m+NAP, dit is het maaiveldhoogte op het proefblok tussen de drains.
Bodemopbouw	De bodem is ingedeeld in een toplaag van matig, lichte zavel o – 60 cm (B8 uit de Staringreeks), gevolgd door een zwaar zavelige laag op 60 tot 150 cm (O10), gevolgd door een matig lichte zavellaag van 150 tot 270 cm (O9), gevolgd door een meso- en eutrofe veenlaag van 270-330 cm (O17), een matig lichte zavellaag van 330-530 cm (O9) en een onderste laag van zware zavel (O10) volgens de Staringreeks 2018. De bodemparameters van de eerste 2 bodemlagen worden gekalibreerd met PEST. De schematisatie is weergegeven in Bijlage B – 1D SWAP modellering.
Drainage-eigenschappen	Twee drainageniveaus, bestaande uit de waterschapssloot (leggerwatergang) en het buizensysteem behorend bij het drainage-subirrigatiesysteem. De eigenschappen van deze systemen zijn geschat op basis van de werkelijke condities. De drainage- en infiltratieweerstand worden gekalibreerd met PEST. Op basis van de veldcondities wordt aangenomen dat de sloot niet infiltreert. De gemeten slootpeilen zijn als invoer gebruikt in SWAP. Voor de modelkalibratie is het gemeten peil in de regelput als invoer gebruikt in SWAP. In de modeltoepassing is het peil in de regelput dynamisch gemodelleerd.
Onderrandvoorwaarde	De onderrand van het model is gebaseerd op de gemeten stijghoogte in de diepe peilbuis. De weerstaand van de scheidende laag (RIMLAY) wordt gekalibreerd met PEST.

Tabel 3 Parametrisatie van de Feddes-parameters voor de verschillende gewassen (Figuur 14). Voor cichorei is geen literatuur over kritische drukhoogten beschikbaar en zijn de waarden voor gras gebruikt.

Groeiseizoen	Gewas	Startdatum	Einddatum	SWAPfile	HLIM3H [cm]	HLIM3L [cm]	HLIM4 [cm]
2020	Braakliggend bouwland	1-jan-20	3-mei-20	BareSoil	-600	-600	-6000
	Cichorei	4-mei-20	12-nov-20	Chichorei	-200	-800	-8000
2021	Wintertarwe	13-nov-20	27-apr-21	Wintertarwe	-320	-600	-8000
	Aardappelen (en tarwe)	28-apr-21	15-okt-21	PotatoesS	-300	-500	-10000
2022	Braakliggend bouwland	16-okt-21	24-mrt-22	BareSoil	-600	-600	-6000
	Zaaiui	25-mrt-22	22-sep-22	zaaiuien	-450	-550	-8000
	Braakliggend bouwland	23-sep-22	31-dec-22	BareSoil	-600	-600	-6000

3.3 Modellerings 2D dichtheidsstroming (zoet-zout)

3.3.1 Inleiding

De studie van Alterra (Schipper et al., 2015) heeft aangetoond dat er op Proefboerderij Rusthoeve sprake is van zoute kwel. Dit is ook beschreven in Sectie 2.3 van dit rapport, en is tevens aangetoond bij de zoutmetingen in deze studie (Sectie 4.1.3.3). Als het grondwater 'te zout' is dan heeft dit nadelige gevolgen voor de gewasgroei. Gewassen ondervinden namelijk stress wanneer de watervoorziening van de plantenwortels een te hoge concentratie aan opgeloste zouten bevat (van Bakel et al., 2009; van Dam et al., 1997): de vochtopname via de wortelzone stopt dan deels of volledig door zoutstress.

Bij de toepassing van regelbare drainage met subirrigatie is het dus van belang om ervoor te zorgen dat de zoetwaterbel voldoende groot is zodat deze als het ware het 'zoute' grondwater naar beneden kan drukken, c.q. voldoende laag kan houden, zodat dit 'zoute' water de wortelzone van het gewas niet bereikt.

Vanwege het risico dat het zoute grondwater de wortelzone bereikt, willen we met behulp van een 2D dichtheidsstromingsmodel het volgende onderzoeken:

Is het mogelijk om d.m.v. subirrigatie met zoet regenwater het 'zoute' grondwater voldoende laag te houden zodat de zoutconcentratie in de wortelzone laag blijft en geen stress oplevert voor het gewas?

Voor bovenstaande onderzoeksvraag speelt de interactie tussen zoet- en zout-waterstroming een belangrijke rol. Het is daarom van belang een model te kiezen dat de dichtheidsstroming in 2D kan simuleren: zout water heeft immers een andere dichtheid dan zoet water. In deze studie is er daarom voor gekozen om gebruik te maken van het "Saturated-Unsaturated TRANsport" (SUTRA) model (Provost & Voss, 2019; Voss & Provost, 2010), dat een 2D-dichtheidsstromingsmodel is.

Een gedetailleerde beschrijving van SUTRA, de conceptualisering daarvan voor toepassing in de huidige studie, en de kalibratie van het model voor het proefblok, zijn beschreven in Appendix C. Sectie 3.3.2 is een samenvatting van deze gedetailleerde beschrijving. De 2D simulaties die met SUTRA zijn uitgevoerd om een antwoord te krijgen op bovenstaande onderzoeksvraag zijn beschreven in Sectie 3.3.3.

3.3.2 Samenvatting SUTRA-modelconceptualisatie

In deze studie wordt voor zowel het proef- als het referentieblok gebruik gemaakt van dezelfde modelschematisatie, met als enig verschil de wijze waarop de drain/ regelbare drainage met subirrigatie wordt geschematiseerd. De verschillen in modelschematisatie tussen beide percelen is beschreven in Appendix C. SUTRA maakt gebruik van absolute waarden voor de hoogte van het profiel, dus er wordt niet gerekend met waarden in m+NAP. Omdat de profielboringen tot 7 m diep zijn, heeft het 2D-modeldomein een dikte van 7 m gekregen. Nul m correspondeert dan met de onderkant van het profiel en 7 m correspondeert dan met het maaiveld. Het SUTRA 2D-modeldomein heeft de volgende eigenschappen:

- Breedte: 53 m
- Dikte: 7 m
- Tijdstap: 1 dag
- Horizontale discretisatie:
 - 0,10 m voor $x = 0$ t/m 3 m
 - 1,0 m voor $x = 3$ t/m 47 m
 - 0,10 m voor $x = 47$ t/m 53 m
- Verticale discretisatie: 0,05 m
- Locatie drain: $x = 50$ m, $y = 5,8$ m

De gekozen randvoorwaarden en bijbehorende zoutconcentraties zijn weergegeven in respectievelijk Tabel 4 en Tabel 5.

Tabel 4 Gekozen SUTRA-randvoorwaarden m.b.t. druk en stroming. Deze gelden voor zowel het proef- als het referentieblok en zijn gebruikt voor alle SUTRA-modelsimulaties.

Locatie randvoorwaarde	Type randvoorwaarde	Tijdsafhankelijk?	Modelknopen (x en y in m)	Bron invoerdata
Boven	Flux	Ja	x: 47 t/m 53 y: 7	Neerslag – verdamping (SWAP)
Links	Druk	Ja	x: 0 y: 0 t/m 7	Waterpeil leggerwatergang
Rechts	Zero-flux	Nee	x: 53 y: 0 t/m 7	N.v.t.
Onder	Druk	Ja	x: 47 t/m 53 y: 0	Stijghoogte diepe peilbuis tussen drains
Drain *	General-Pressure	Ja	x: 50 y: 5,8	Waterpeil regelput

** Voor het proefblok (regelbare drainage met subirrigatie) is deze randvoorwaarde dusdanig ingesteld dat zowel subirrigatie als drainage kan plaatsvinden. Voor het referentieblok kan er alleen drainage plaatsvinden.*

Tabel 5 Gekozen zoutconcentraties behorende bij SUTRA-randvoorwaarden van Tabel 4. Deze gelden voor zowel het proef- als het referentieblok en zijn gebruikt voor alle SUTRA-modelsimulaties. De zoutconcentratie voor de drain van 0 (nul) mS/cm geldt alleen voor de huidige situatie met subirrigatie (zoet water).

Locatie randvoorwaarde	Zoutconcentratie	Tijdsafhankelijk?
Boven	0 mS/cm	Nee
Links	Zoutconcentratie leggerwatergang	Ja
Rechts	n.v.t.	n.v.t.
Onder	23 mS/cm	Nee
Drain *	0 mS/cm	Nee

** Voor het proefblok (regelbare drainage met subirrigatie) is deze randvoorwaarde dusdanig ingesteld dat zowel subirrigatie als drainage kan plaatsvinden. Voor het referentieblok kan er alleen drainage plaatsvinden.*

Alvorens SUTRA gebruikt kan worden voor het doorrekenen van de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022 moet er sprake zijn van een evenwichtssituatie die gebruikt kan worden als beginsituatie voor deze run. De evenwichtssituatie is gecreëerd door het model stationair door te rekenen met gemeten condities op 1 juli 2020. De hiervoor gebruikte waardes zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Gekozen initiële condities voor stijghoogtes en zoutconcentraties voor de stationaire SUTRA-modelsimulatie. Deze zijn gebruikt om een evenwichtssituatie te simuleren voor de start van de niet-stationaire modelsimulatie voor de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022.

Locatie initiële conditie	Stijghoogte (m)	Zoutconcentratie (mS/cm)	Bron
Linker zijrand	5,39	24,9	Leggerwatergang
Onderrand	5,83	23,0	Diepe peilbuis tussen drain
Bodem (y = 5,8 m)	5,86		Ondiepe peilbuis bij drain
Bodem (y = 0,0 m)		23,0	Diepe peilbuis tussen drain
Bodem (y = 5,75 m)		11,30	Ondiepe peilbuis tussen drain
Bodem (y = 6,25 m)		2,09	EC-sensor op 75 cm-mv
Bodem (y = 6,75 m)		2,17	EC-sensor op 25 cm-mv
Bodem (y = 7,0 m)		0,0	Aanname

3.3.3 Modelsimulaties

Om een antwoord te vinden op onderzoeksvraag zoals geformuleerd in Sectie 3.3.1 zijn de volgende twee SUTRA-modelsimulaties gedaan:

1. Huidige situatie regelbare drainage met subirrigatie (zoet water) (modelkalibratie) (Sim 1)
2. Scenario conventionele drainage (Sim 2)

Sim 1)

In deze run is het model gekalibreerd op de metingen van het proefblok voor de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. Deze simulatie is dus representatief voor de huidige situatie voor regelbare drainage met subirrigatie waar zoet water gebruikt is als bron voor subirrigatie. Het doel van deze run is om te onderzoeken in welke mate regelbare drainage met subirrigatie de zoutconcentratie in de eerste paar meter van de bodem kan beïnvloeden. Dit wordt gedaan door de resultaten van deze run te vergelijken met die van Sim 2. De kalibratieresultaten voor het proefblok zijn weergegeven in de paragraaf "Kalibratie huidige situatie regelbare drainage met subirrigatie" van Bijlage C.

Sim 2)

Het gekalibreerde model van Sim 1 wordt hier ingezet om een situatie zonder regelbare drainage met subirrigatie te simuleren. Het systeem van regelbare drainage met subirrigatie wordt daarvoor uitgeschakeld. Deze run is dus representatief voor een situatie op het referentieblok, waar een systeem van regelbare drainage ligt, maar die niet wordt gebruikt voor subirrigatie.

4 Resultaten en discussie

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de veldmetingen vanaf half juni 2020 tot en met 31 augustus 2022 en aanvullende modellering. Voor een goede interpretatie van de resultaten is van belang een overzicht te hebben van de verschillende instellingen van de regelbare drainage en de periodes van subirrigatie tijdens de veldproef. Deze zijn hieronder weergegeven.

Instelling van de regelbare drainage in de regelputten:

- Referentieblok: gehele tijd vrije drainage, regelput-drempel laag, geen regeling
- Proefblok: eind september/begin oktober 2020 t/m begin/medio juni 2021: vrije drainage, regelput-drempel laag, geen regeling; om ervaring op te doen met systeem in drainage-situatie (geen risico op nat bodemprofiel in eerste winter)
- Proefblok: begin oktober 2021 t/m half mei 2022: gestuwde/geregelde drainage, regelput-drempel rond 0,1 m-NAP

Periodes van subirrigatie op proefblok:

- Eind juli t/m eind september 2020
- Begin/medio juni 2021 t/m september 2021
- Half mei 2022 t/m begin september 2022

4.1 Veldmetingen

In deze sectie worden de resultaten van de veldmetingen gepresenteerd en besproken.

Achtereenvolgens komende de volgende onderdelen aan bod:

- Wateraanvoer voor subirrigatie en waterafvoer via het drainagesysteem
- Grondwaterstanden en stijghoogte
- Bodemvochtgehaltes en drukhoogte in de onverzadigde zone
- Elektrisch geleidingsvermogen van het grondwater en oppervlaktewater
- Gewasopbrengst

Aanvullend zijn enkele veldmetingen verricht aan bladvochtigheid en straling. Deze metingen waren met name bedoeld om ervaring op te doen met deze sensoren en de aanvullende waarde ervan te beoordelen. Deze metingen worden alleen beknopt beschreven (meetreeksen in de bijlagen). Actuele metingen van grondwaterstanden, stijghoogte en bodemvochtgehaltes op het blok zijn dagelijkse ontsloten via een interactieve web viewer⁶ (Figuur 17).

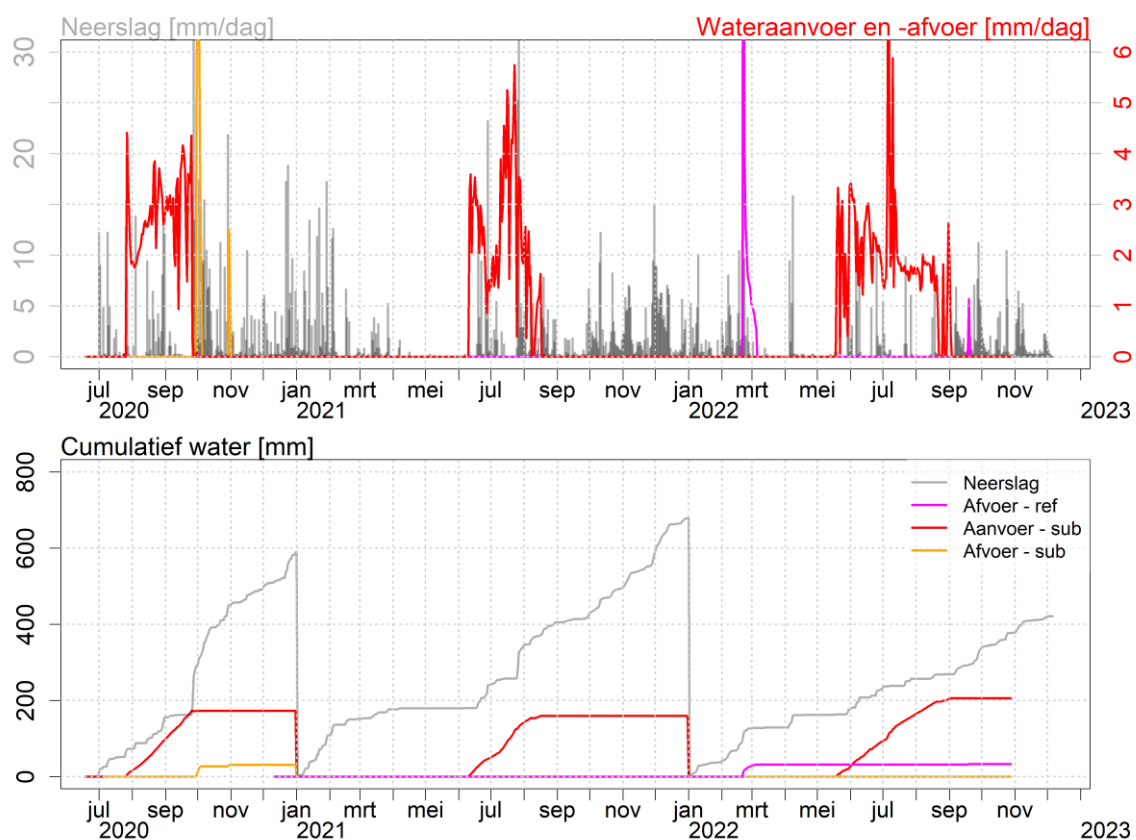


Figuur 17 Opgezet online dataportal voor de Rusthoeve en een aanpalende proef bij 'Meulwaeter', waarin dagelijks actuele meetgegevens worden ontsloten.

⁶ <http://drainagemetsubirrigatie.kwrwater.nl/zeeland>

4.1.1 Wateraanvoer en waterafvoer

De neerslag, wateraanvoer voor subirrigatie en waterafvoer zijn gegeven in Figuur 18. Wateraanvoer heeft plaatsgevonden vanaf half juli 2020. Het aanvoerdebiet varieert tussen 1 en 3 mm/d. Tot oktober is in de verschillende jaren steeds zo'n 200 mm water aangevoerd. In 2022 is gedurende de langste periode water aangevoerd: vanaf half mei tot oktober. Na het stoppen van de subirrigatie is er in enkele periodes water afgevoerd via het drainagesysteem. Duidelijke afvoer is gemeten na het stoppen van subirrigatie in 2020, waarbij ook de overstorthoogte in de regelput is verlaagd. In de andere jaren is dit niet gebeurd, waardoor afvoer beperkt bleef, zowel in het referentieblok als in het proefblok. Opgemerkt moet worden dat afvoeren lager dan 0,26 mm/d niet worden geregistreerd (zie 3.1.3). Gegeven de gemeten grondwaterstanden in relatie tot de drempelhoogte van de regelput en de waterstand in de put, is er meer drainage zijn geweest dan is geregistreerd. De niet-gemeten drainage is gering en doet niet af aan de analyse en bevindingen.



Figuur 18 Neerslag, wateraanvoer voor subirrigatie en waterafvoer, zoals gemeten in het veld. Boven: dagwaarden. Onder: cumulatieve waarden.

4.1.2 Stijghoogte, bodemvochtgehalte en drukhoogte – overzicht

In Figuur 19 zijn de drie toestandsvariabelen stijghoogte, bodemvochtgehalte en drukhoogte samengevoegd om de gemeten effecten van regelbare drainage met subirrigatie over de jaren 2020, 2021 en 2022 te bespreken. Om het overzichtelijk te houden, wordt hier een selectie van de metingen getoond. In de volgende paragraaf zijn alle metingen opgenomen.

Over het algemeen geldt dat door subirrigatie de grondwaterstand wordt verhoogd: daar waar de grondwaterstand in het referentieblok gedurende het groeiseizoen dieper wegzakt, blijft deze op het blok met subirrigatie steeds op een hoger niveau. Dit resulteert ook in een hoger bodemvochtgehalte en hogere drukhoogte in de onverzadigde zone, die droogtestress beperkt.

Uitgewerkt voor specifieke periodes zien we het volgende:

1. Groeiseizoen 2020:

Subirrigatie heeft een positief effect op de vochtvoorziening van het gewas gehad in deze periode. Bij aanvang van de subirrigatie is het grondwatervniveau op zowel het subirrigatie- als referentieblok 0,45 m-NAP (0,9 m-mv). Als gevolg van subirrigatie is de grondwaterstand rond ditzelfde niveau gebleven. Fluctuaties in de grondwaterstand op het subirrigatieblok hangen samen met de wateraanvoer op dat moment (Figuur 18) en het hieraan gerelateerde watervniveau in de regelput. Daar waar het grondwatervniveau op peil blijft bij subirrigatie, is het grondwatervniveau op het referentieblok gedaald. Het gewas, cichorei, is in juni gezaaid. Door wateropname van het gewas en zonder subirrigatie om deze opname weer aan te vullen, daalt het grondwatervniveau op het referentieblok tot -1,0 m-NAP eind september (Figuur 19 A) en het bodemvochtgehalte op 50 cm-mv (Figuur 19 B). Ook de drukhoogte (zuigspanning) op 50 cm-mv daalt in september tot ongeveer -750 hPa, hetgeen erop duidt dat er tot op deze diepte invloed is van wateropname door de wortels. Voor veel gewassen geldt dat bij een dergelijk lage drukhoogte het gewas niet optimaal meer van water kan worden voorzien en er droogtestress optreedt (Kroes et al., 2017).

Op het subirrigatieblok is de drukhoogte op peil gebleven; het door de plant onttrokken bodemvocht is door subirrigatie vanuit het grondwater steeds aangevuld. Eind september is er in beide percelen een duidelijke respons op (extreme) neerslag te zien in zowel het grondwatervniveau, bodemvochtgehalte, en drukhoogte. Hierdoor is de grondwaterstand op beide percelen bij het ingaan van het najaar weer nagenoeg gelijk geworden, onder invloed van het neerslagoverschot.

2. Najaar 2020 – winter 2020-2021:

Beide percelen zijn op dezelfde manier behandeld: er heeft geen wateraanvoer plaatsgevonden én het ingestelde drainageniveau (in de regelput) is op beide percelen gelijk ingesteld (een laag drainageniveau/vlotterniveau waardoor er water is afgevoerd). Hierdoor, en door de nagenoeg gelijke condities aan het einde van het groeiseizoen (zie punt 1), zijn er maar kleine verschillen tussen beide percelen wat betreft grondwatervniveau, bodemvochtgehalte en drukhoogte (Figuur 19 A en C) aan het einde van de winter. Daarmee starten de percelen 'gelijkwaardig' met het groeiseizoen 2021. Het bodemvochtgehalte in het referentieblok is iets lager dan in het proefblok. Dit kan komen door een net wat andere bodemstructuur. Opgemerkt moet worden dat de bodemvochtsensoren niet zijn gekalibreerd voor het plaats-specifieke bodemtype.

3. Groeiseizoen 2021:

In de winter van 2020-2021 is dus geen water vastgehouden en in de maanden april-juni was er geen neerslag en ook geen subirrigatie. Hierdoor is de grondwaterstand bij aanvang van de subirrigatie (half juni) gedaald tot zo'n 0,9 m-NAP (N.B. dit is een diep niveau; door het beheer aan te passen is het mogelijk de grondwaterstand minder diep weg te laten zakken – zie punt 4). Het grondwatervniveau op het subirrigatieblok is direct gestegen als gevolg van wateraanvoer (vanaf half juni 2021). Opgemerkt moet worden dat het ingesteld waterpeil in de regelput aan het begin van de subirrigatie zo'n 25 cm lager is dan in 2020; medio juli stijgt dit niveau. Het grondwatervniveau op het referentieblok daalt tot 1,0 m-NAP eind juli en stijgt daarna als gevolg van neerslag. Begin september is de grondwaterstand op beide percelen weer nagenoeg gelijk.

De drukhoogte is op het referentieblok lager dan op het subirrigatieblok. Medio juli lijkt het verschil groter te worden, maar wordt het ook weer opgeheven door neerslag. Wel indiceert de daling van de drukhoogte in het referentieblok dat er tot op 0,5 m-mv effect is van wateropname door de plantenwortels. In het blok met subirrigatie blijft de drukhoogte op deze

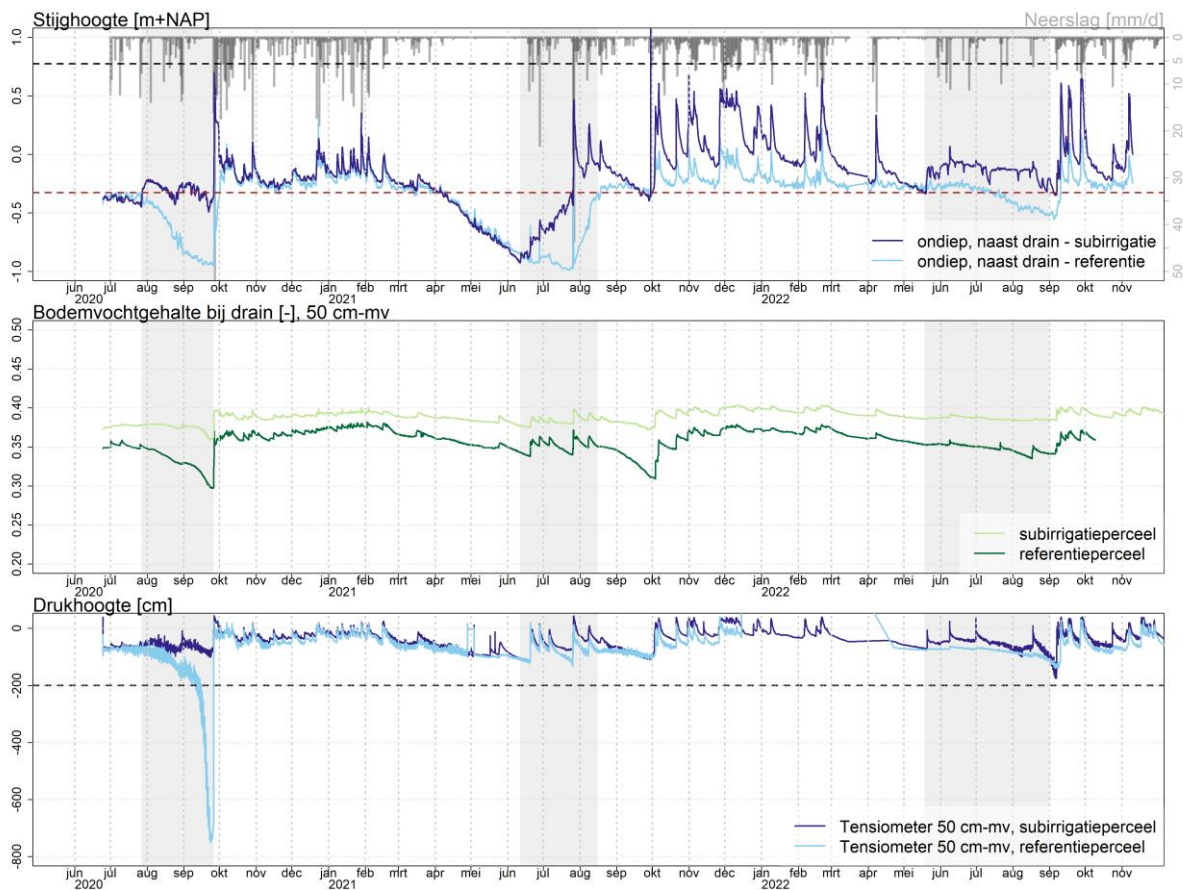
diepte op peil. Medio september, na het stoppen van subirrigatie, zijn de grondwaterstand en drukhoogte in beide percelen nagenoeg gelijk.

4. Najaar 2021, winter 2021-2022:

In de winter van 2021-2022 is het drainagesysteem in het proefblok gebruikt om water vast te houden (in tegenstelling tot de winter van 2020-2021). De vlotter in de regelput van het proefblok is 'hoog' blijven staan, waardoor afvoer van grondwater is voorkomen. Dit resulteert in een hoog waterniveau in de regelput van het proefblok (rode lijn in Figuur 21) en een grondwaterniveau dat ongeveer 25 cm hoger is dan op het referentieblok.

5. Groeiseizoen 2022:

De grondwaterstand in het proefblok stijgt als gevolg van subirrigatie en is bijna gelijk aan het waterniveau in de regelput. Opvallend is dat de grondwaterstand in het referentieblok ondanks de beperkte hoeveelheid neerslag maar weinig daalt, terwijl dat in de voorgaande jaren wel gebeurde. Dit duidt op een lage gewasverdamping, hetgeen wordt bevestigd door de nagenoeg constante drukhoogte: er wordt op 0,5 m-mv diepte geen bodemvocht onttrokken. In het proefblok wordt de drukhoogte door de hogere grondwaterstand wel hoger dan in het referentieblok: de waterbeschikbaarheid op deze diepte wordt vergroot. Op een diepte van 0,25 m is sprake van een lage drukhoogte, dat resulteert in droogtestress bij het gewas. Deze condities duiden op een ondiepe worteling van de ui (< 30 cm-mv). Deze ondiepe beworteling volgt ook uit literatuur; PPO (2003) geeft aan dat 90% van de wortels van zaaiui zich in de bovenste 18 cm bevindt en huidmondjes bij relatieve hoge (dus minder negatieve) drukhoogtes sluiten om droogteschade te voorkomen. Subirrigatie kan weliswaar de grondwaterstand verhogen, maar draagt voor dit ondiep-wortelende gewas niet bij aan de waterbeschikbaarheid. Opvallend is het grote verschil in drukhoogte op 0,25 en 0,5 m-mv en het beperkte effect van subirrigatie op 0,25 m-mv. Capillaire nalevering lijkt hier te worden beperkt; hierop wordt later teruggekomen.



Figuur 19 Stijghoogte (A), bodemvochtgehalte (B), drukhoogte (C) voor het blok met subirrigatie en het referentieblok. De grijs gearceerde perioden geven periodes met subirrigatie aan. In deze figuur is een selectie van de metingen opgenomen.

4.1.3 Stijghoogte, bodemvochtgehalte, drukhoogte en elektrisch geleidingsvermogen - details

Figuur 19 geeft een selectie van de metingen. In deze paragraaf worden alle metingen gepresenteerd en bevindingen puntsgewijs geduid.

4.1.3.1 Stijghoogtes

Enkele sensoren zijn bijna een jaar voordat de proef startte (augustus 2019) geplaatst. Het merendeel van de sensoren levert veldmetingen vanaf 24 juni 2020 (Figuur 21). De laatst geïnstalleerde sensoren bevatten metingen vanaf 21 augustus 2020. Een aantal observaties uit de stijghoogtemetingen zijn hieronder opgesomd:

- De ondiepe, freatische, stijghoogte was vergelijkbaar bij aanvang van de proef op het proefblok en het referentieblok (Figuur 21). Dit betekent dat het grondwatervniveau vrij vlak is in het hele blok. Wateraanvoer voor subirrigatie (27 juli 2020) resulteert direct in een ongeveer 20 cm hogere freatische grondwaterstand, zowel bij als tussen de drains. Als gevolg van subirrigatie wordt de grondwaterstand dus verhoogd, zowel bij als tussen de drains. Het stijghoogteverschil bij en tussen drains is maar enkele centimeters. Zowel bij als tussen drains heeft subirrigatie dus effect.
- Het verschil tussen het niveau in de regelput en de grondwaterstand geeft aan dat er sprake is van subirrigatie of drainage. Als het watervniveau in de regelput hoger is dan de grondwaterstand én hoger dan de diepteligging van de drainagebuizen, is er sprake van subirrigatie. Of het lukt om voldoende (snel) water aan te voeren via de drains, hangt af van de weerstand die het water ondervindt om het grondwater aan te vullen.

Als er meer water voor subirrigatie wordt aangevoerd dan kan infiltreren in de bodem, stijgt het niveau in de regelput tot de ingestelde drempelwaarde; dit is het geval in 2020 en 2022 waarin het niveau in de regelput nagenoeg direct na het starten van de aanvoer op het maximum zit en op een relatief constant niveau blijft. In 2021 stijgt het niveau in de regelput geleidelijk.

Over de hele periode juli 2020 – einde subirrigatie 2020, is de grondwaterstand in het proefblok maar enkele centimeters gedaald. De grondwaterstand bij en tussen de drains is nagenoeg gelijk. De grondwaterstand op het referentieblok, daarentegen, is in de zomer 2020 continu gedaald, vanaf augustus tot eind september. Het verschil tussen beide velden laat zien dat subirrigatie de daling van de grondwaterstand die zonder subirrigatie zou plaatsvinden, kan compenseren.

- De stijghoogte in het diepe pakket (ongeveer op 6 m-mv = 5,3 m-NAP) stijgt niet mee met de stijging van de grondwaterstand als gevolg subirrigatie. Dit is duidelijk te zien bij de start van de subirrigatie in 2020: als gevolg van subirrigatie wordt het stijghoogteverschil tussen freatisch en diep grondwater groter (Figuur 21). Deze diepe stijghoogte wordt dan ook mede en meer bepaald door de omgeving waarin de kavel ligt; het niveau ervan reageert op een groter ruimtelijk schaalniveau. Het verloop van de diepe stijghoogte op het proefperceel laat eenzelfde verloop zien als andere buizen in de omgeving (Figuur 23). De diepe stijghoogte reageert ook op neerslagoverschot (Figuur 21). De stijghoogte in de diepere ondergrond is bijvoorbeeld in de periode februari – augustus 2021 hoger dan de grondwaterstand en leidt dan tot opwaartse stroming (kwel). Door subirrigatie in combinatie met een lagere stijghoogte in de diepere ondergrond tijdens droogte kan dit ook andersom zijn, zoals in 2020 en 2022. Er treedt dan wegzijging op.

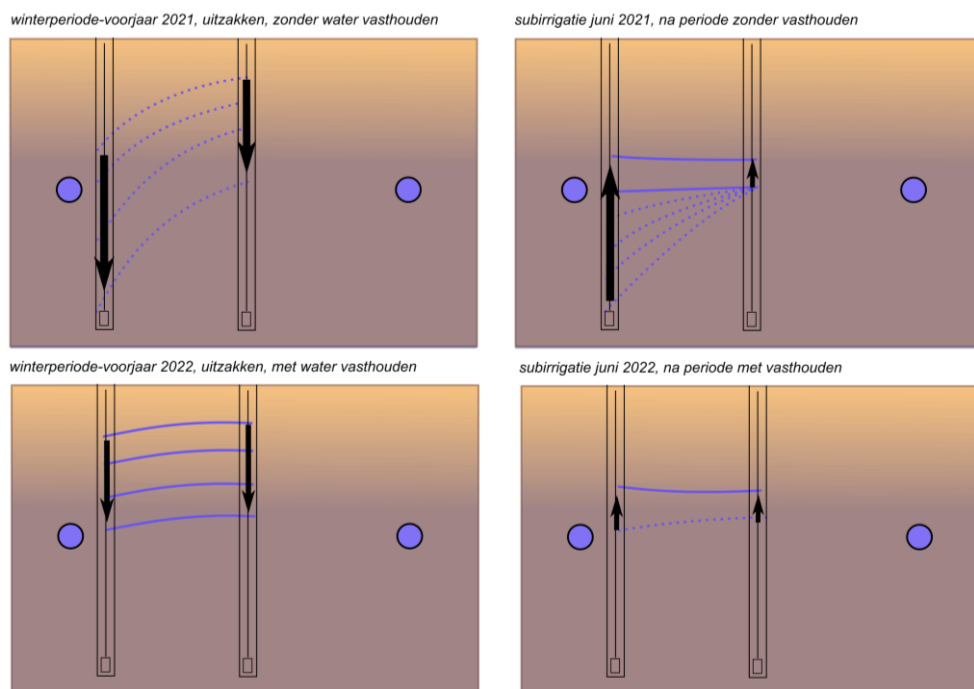
N.B. De kortstondige pieken in de stijghoogte van grondwater in het diepe pakket tijdens en na neerslag zijn veroorzaakt door een kortsluitstroming van regenwater in de peilbuis na plasvorming bij/via het maaiveld bij de (licht verdiept aangelegde) peilbuis; deze kortstondige verhoging ebt daarna snel weg.

- In het proefblok is er buiten de periodes met subirrigatie en bij neerslag sprake van een (aanzienlijk) hogere grondwaterstand tussen de drains dan bij de drains. Er is dus sprake van een duidelijke opbolling en dientengevolge waterstroming naar de drains, met drainage tot gevolg (afhankelijk van het ingestelde drainageniveau in de regelput). In het referentieblok zijn de verschillen tussen de grondwaterstand bij de drains en midden tussen twee drains minder groot. Als er bij een neerslagoverschot een grotere opbolling is op het proefblok dan in het referentieblok, dan is de weerstand voor de stroming van water naar de drains in het proefblok groter (zwaarder bodemtype). Op het referentieblok is dan ook sprake van een wat andere, beter doorlatende bodem.

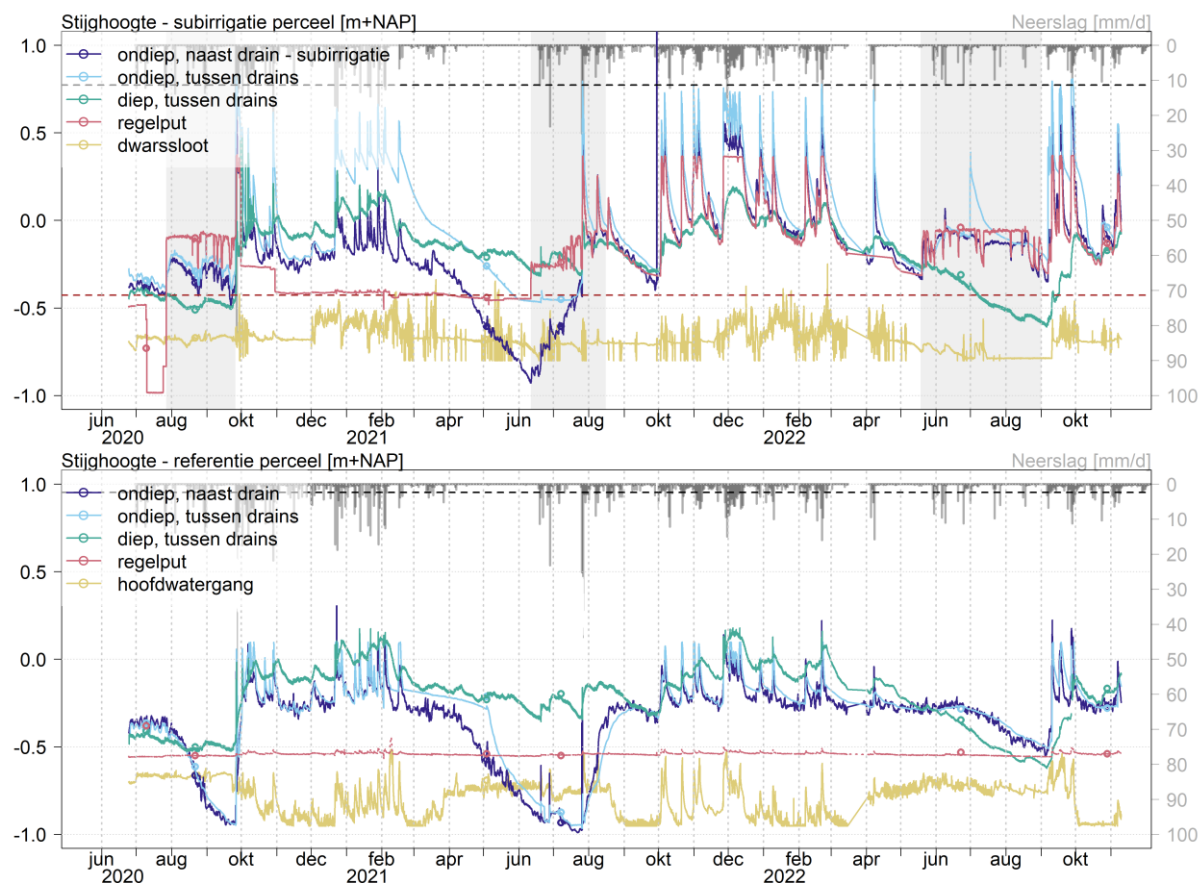
- De grondwaterstand bij de drain zakt in zowel het referentieblok als het proefblok weg in de periode tot begin juni 2021 voorafgaand aan subirrigatie in 2021 (schematisch weergegeven in Figuur 20, linksboven). Zodra deze begin/medio mei 2021 onder het niveau van de drains komt en verder daalt, vindt er afvoer van water plaats naar het (regionale) grondwater en/of de leggerwatergang. De dwarssloot kan in deze situatie licht infiltreren. Voor het referentieblok volgt de grondwaterstand tussen de drains dit verloop. Voor het proefblok geldt dat er sprake is van stijgende grondwaterstanden bij de drains en een niet-dalende grondwaterstand tussen de drains, zodra de subirrigatie start. Het grondwaterniveau tussen drains is bij aanvang van de wateraanvoer voor subirrigatie 0,4 m hoger dan bij de drains.

Na het starten van subirrigatie stijgt de grondwaterstand bij de drain geleidelijk, maar er is nog geen effect in de grondwaterstand tussen de drains. Tussen de drains daalt de grondwaterstand niet verder en stijgt zodra de grondwaterstand bij de drain op hetzelfde niveau is gekomen (schematisch weergegeven in Figuur 20, rechtsboven). Dit is het geval in de tweede helft van juli 2021, een aantal dagen voorafgaand aan de neerslag. Dit proces is zoals het verwacht mag worden en komt dus ook tot uiting in de metingen.

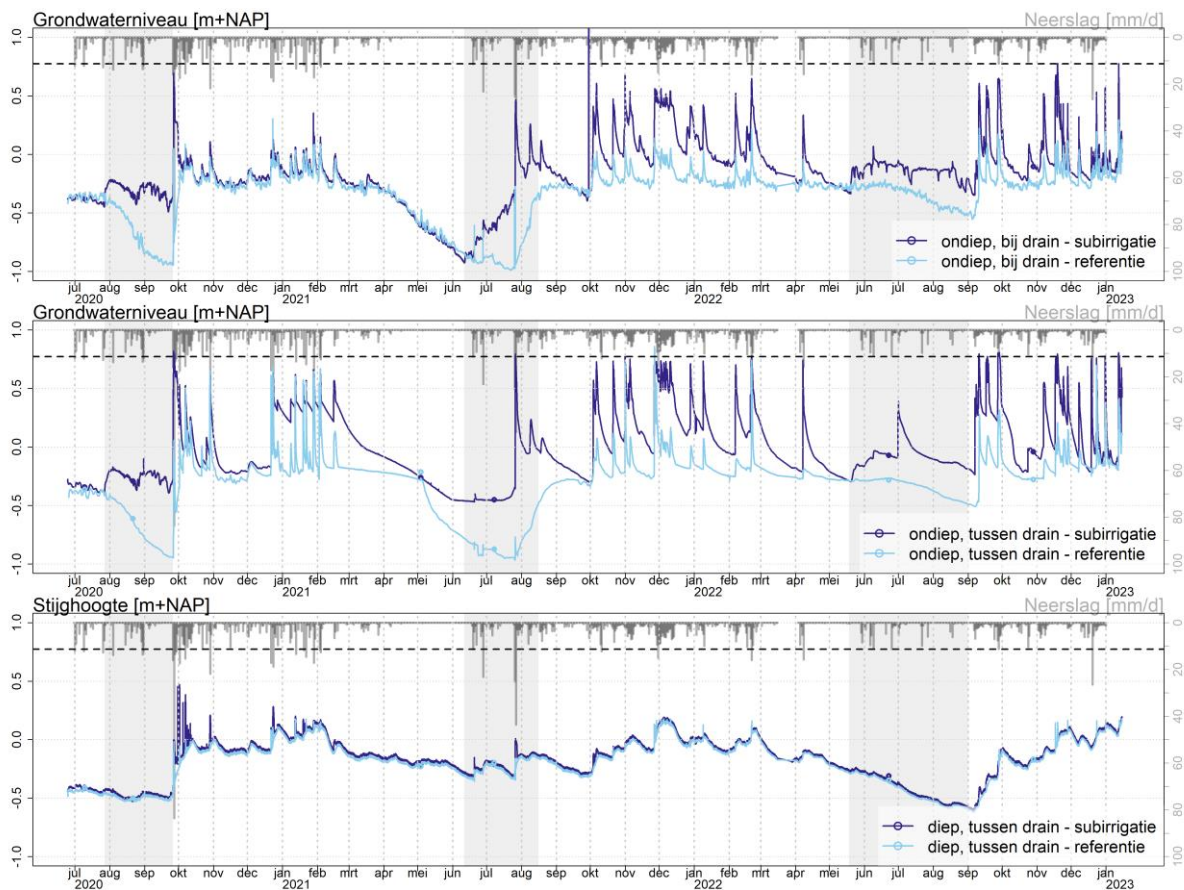
- In het referentieblok (dus geen wateraanvoer) zakt de grondwaterstand tussen drains duidelijk weg vanaf mei 2021. De regelput op het proefblok staat ook droog; ook daar is dan nog geen wateraanvoer. Ook de grondwaterstand tussen de drains op het proefblok zakt. In de loop van mei 2021 zakt de grondwaterstand in beide blokken onder het niveau van de drains. Nogmaals: controle van het grondwaterpeil door de regelbare drainage ('water vasthouden') was er niet (beide systemen stonden op vrije drainage).
- Van 'water vasthouden' is duidelijk sprake in de winter-voorjaar van 2021-2022, waar het niveau in de regelput in het proefblok steeds hoger is dan de diepteligging van de drains (schematisch weergegeven in Figuur 20, linksonder). Als de drain 'verdrinkt' tijdens opbolling, wordt de drainage geremd/gestuurd/geregeld via de regelput van het samengestelde drainagesysteem.
- Afvoer via de ondergrond vindt niet plaats door wegzijging. Het stijghoogteverschil (Figuur 21) is zeer gering tot nul, of er is zelfs sprake van kwel (diepe stijghoogte > freatische grondwaterstand). Afvoer van water vindt plaats naar de drainerende leggerwatergang. NB: de situatie in mei-juli 2021 is in dat licht vreemd (geen nadere verklaring gevonden).



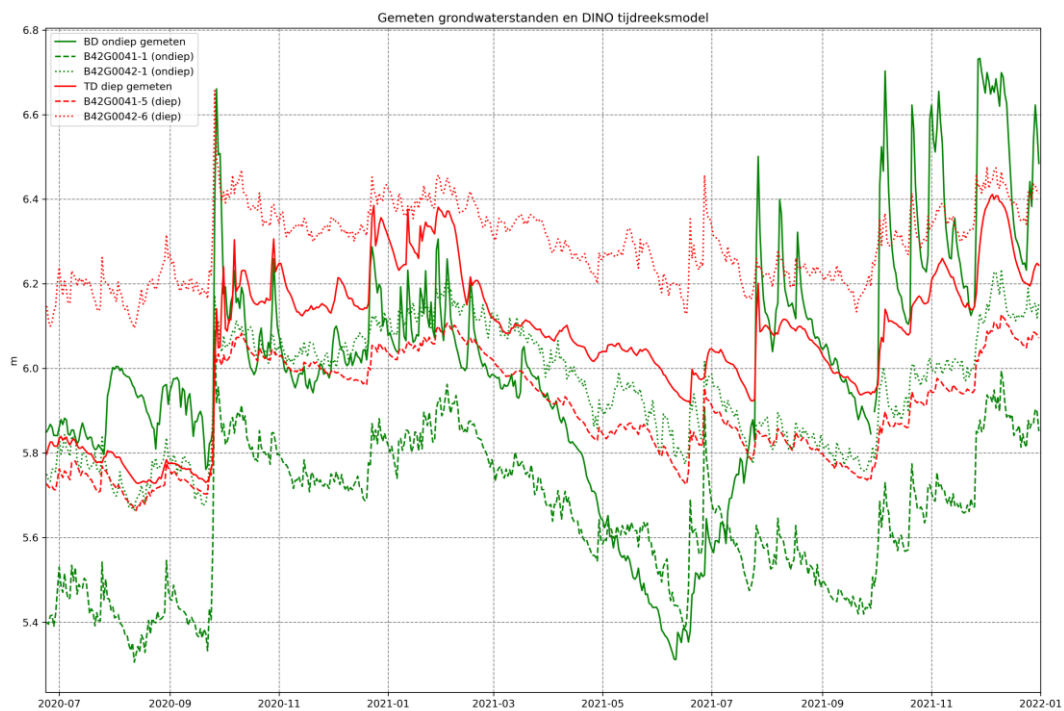
Figuur 20 Schematische weergave van de gemeten freatische grondwaterstand voor vier periodes gedurende de veldproef.



Figuur 21 Gemeten stijghoogten op het proefblok en het referentieblok (boven). Metingen zijn direct naast de drain en tussen twee drains, in de regelput, in kavelsloot en hoofdwatgang. De grijze vlakken in het bovenste figuur geven de periodes met subirrigatie. Maaiveldhoogte van het proefblok is 0,77 m+NAP, de maaiveldhoogte van het referentieblok is 0,95 m+NAP. De neerslag is gemeten op het perceel. De zwarte stippellijn geeft het maaiveld, de rode geeft de ligging van de drainagebuizen (zie tekst boven Figuur 20).



Figuur 22 Gemeten stijghoogtes in het freatisch direct bij (bovenste paneel) en tussen twee drains (middelste paneel) op zowel het referentieblok als het proefblok. Het onderste paneel geeft de gemeten stijghoogte in de diepe peilbuizen op beide percelen. Zie ook Figuur 19 en 21. Deels identieke data.



Figuur 23 Vergelijking grondwaterstanden Rusthoeve met grondwaterstanden elders in het gebied (regionale vergelijking).

4.1.3.2 Bodemvochtgehalte en drukhoogte

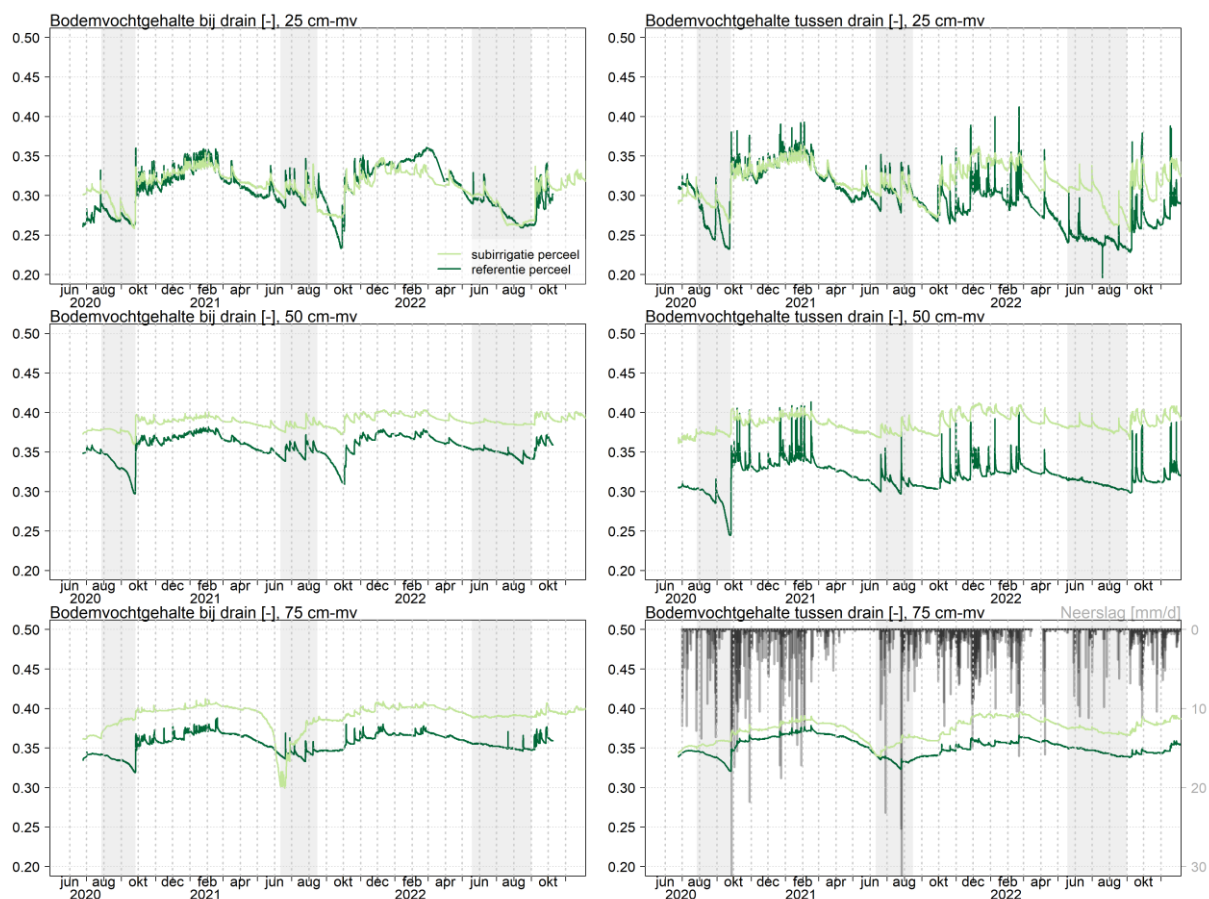
Bodemvochtgehalte

In de voorgaande sectie is aangegeven dat de grondwaterstand bij het starten van subirrigatie op 27 juli 2020 met zo'n 20 cm stijgt en tot een niveau van ongeveer 1 m-mv komt. Daar waar het bodemvochtgehalte op het referentieblok een dalende lijn laat zien, leidt de stijging van de grondwaterstand op het proefblok tot een stijging van het bodemvochtgehalte op 75 cm-mv (zowel bij als tussen de drains) en een gelijkblijvend of iets stijgend vochtgehalte op 50 cm-mv (respectievelijk bij en tussen drains) (Figuur 24). Op een diepte van 25 cm-mv is bij de start van de subirrigatie geen effect zichtbaar. Gedurende de zomer van 2020 blijven de bodemvochtgehalten in het proefblok op 50 en 75 cm-mv op peil, of stijgen deze, terwijl ze geleidelijk dalen op het referentieblok. In de metingen van de drukhoogte worden de verschillen nog duidelijker zichtbaar (Figuur 25). De drukhoogte op 50 cm-mv bereikt op het referentieblok waarden van bijna -800 cm (een waarde waarbij sprake kan zijn van droogtestress); op het proefblok blijft deze gedurende het groeiseizoen zo'n -100 cm (pF 2, 'veldcapaciteit'). Op 25 cm-mv is er op beide blokken een daling van het vochtgehalte, maar is deze op het referentieblok groter.

September 2020 was een zeer droge maand, met in de eerste drie weken vrijwel geen neerslag. In deze periode daalt op het referentieblok het bodemvochtgehalte op elke meetdiepte. Alleen op 75 cm-mv in het proefblok blijft het vochtgehalte nagenoeg gelijk. De bodemvochtgehalten zijn in het proefblok wel hoger dan in het referentieblok en de daling is kleiner in het proefblok. De daling van het vochtgehalte op 25 cm-mv in het referentieblok is dusdanig, dat het drukhoogte daalt tot waarden lager dan -800 cm (voorbij de as van de grafiek); dit duidt op droogtestress voor de wortels op deze diepte. Op 50 cm-mv leidt de daling in het bodemvochtgehalte ook tot een lage drukhoogte (-750 cm), terwijl deze in het proefblok rond -100 cm blijft. N.B. De gemeten bodemvochtgehalten op 25 cm-mv tonen in de tijd gezien meer variatie dan op 50 en 75 cm-mv vanwege de directere respons op neerslag en verdamping.

De metingen laten dus zien dat de verhoging van de grondwaterstand door subirrigatie ervoor zorgt dat het bodemvochtgehalte in/nabij de wortelzone op niveau blijft en de beschikbaarheid van water voor het gewas wordt vergroot.

In de andere jaren zijn de verschillen voor de bodemvochtgehalten vergelijkbaar met hiervoor beschreven. De verschillen bij en tussen de drains zijn voor het proefblok kleiner dan voor het referentieblok. Op dit laatste blok zijn de bodemvochtgehalten bij de drains veelal iets hoger, waarschijnlijk omdat de bodem ter plekke meer kleideeltjes bevat (pF-curve is variabel binnen en tussen de blokken; zie ook Fig. 6).



Figuur 24 Gemeten bodemvochtgehalte op het proefblok en referentieblok. De metingen zijn op beide percelen direct bij de drain en tussen de drain gemeten, op 25 cm-mv, op 50 cm-mv en op 75 cm-mv.

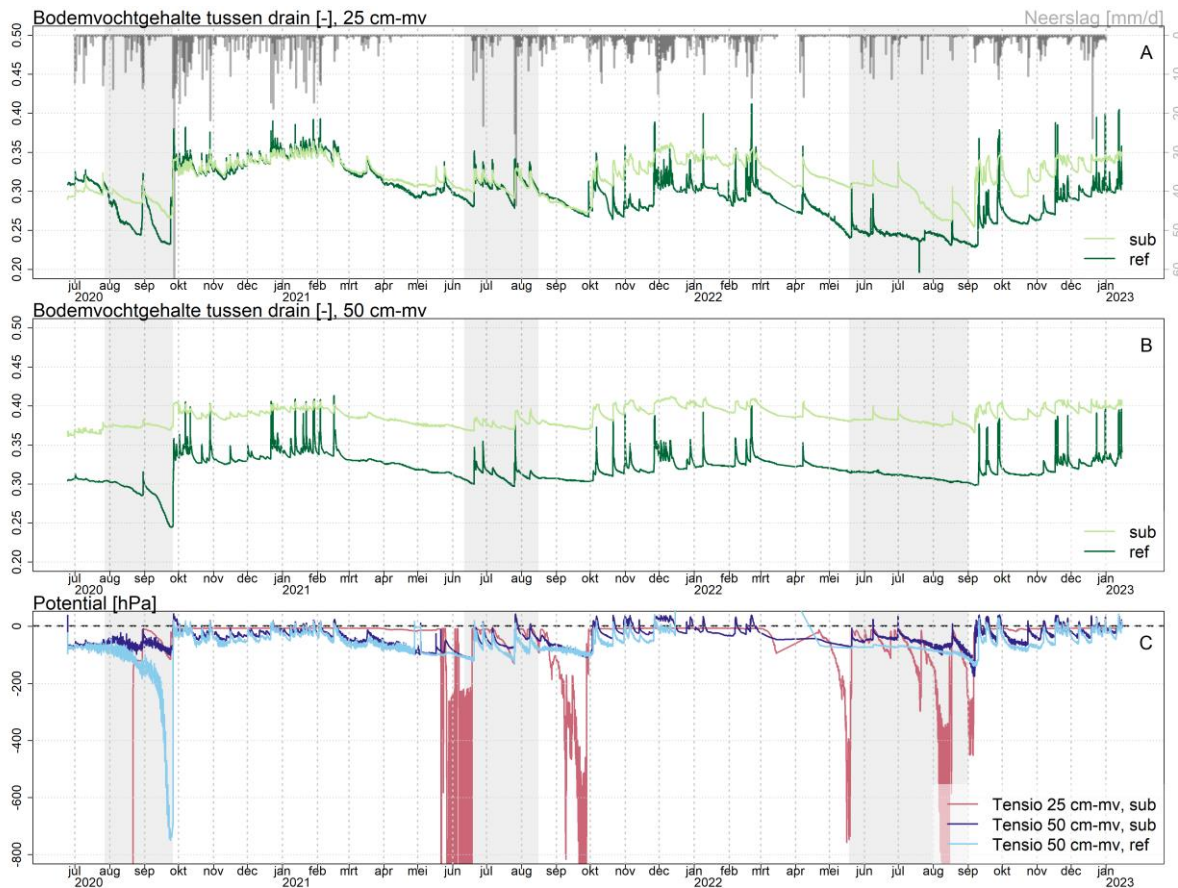
In mei en juni 2021 (droge periode-geen neerslag; leggerwatergang op zomerpeil) zien we, voordat de subirrigatie startte, op het proefblok dalingen in het bodemvochtgehalte op 75 cm-mv (met name) bij en (in mindere mate) tussen de drains. Op 25 en 50 cm-mv zijn deze dalingen minder tot niet duidelijk te zien. Op het referentieblok zijn deze dalingen duidelijk minder te zien. In mei en juni 2021 daalden de grondwaterstanden bij de drain en tussen de drains ook op beide blokken, op het referentieblok tussen de drains dieper. De oorzaak van de daling van het vochtgehalte op 75 cm-mv hangt naast de daling van de grondwaterstand waarschijnlijk samen met het bodemtype; de bovenste 60 cm bestaat uit klei met daaronder zand.

Drukhoogte

De gemeten drukhoogte op 25 cm-mv vond plaats op het proefblok met de Teros-21 eenvoudige tensiometer met een meetbereik van -30 tot -800 cm (volgens opgave fabrikant). Deze meting diende als test, omdat we deze sensor eerder niet in zavel/kleigrond hebben toegepast. Op 50 cm-mv maten we met Teros-32 tensiometers op beide blokken met een positief en negatief bereik tot -850 cm. De metingen van de drukhoogte tonen een positief effect van subirrigatie op 50 cm-mv, met name in 2020. In 2021 is de verhoging van de drukhoogte door subirrigatie wat minder vanwege het effect van de neerslag dat de drukhoogte verhoogt. In 2022 is het effect van subirrigatie weer duidelijker positief (+20 tot +30 cm). Uit de metingen is af te lezen dat op 50 cm-mv op het referentieblok, lage waarden alleen ontstonden in september 2020. Op alle andere momenten was de drukhoogte op beide blokken > -150 cm. Op die diepte zouden plantenwortels geen droogtestress hebben ervaren in de gehele periode op beide blokken.

Op 25 cm-mv zijn op het proefblok meer en sterkere momenten met lage drukhoogte en eventuele stress voor aanwezige planten. In mei en juni 2021 treedt dit op vóór het begin van subirrigatie, die

aldus toen laat is opgestart. In september 2021 (weinig neerslag en na het stoppen van subirrigatie) trad ook een lage drukhoogte op. In mei 2022 was er tijdens de start van subirrigatie een lage drukhoogte, die opgeheven werd direct na de start van de subirrigatie. Later in 2022, in met name augustus, was ook tijdens subirrigatie de drukhoogte op 25 cm-mv laag. Blijkbaar heeft subirrigatie te laat en/of te weinig doorwerking op de drukhoogtecondities in de wortelzone en bouwvoor op 25 cm-mv.



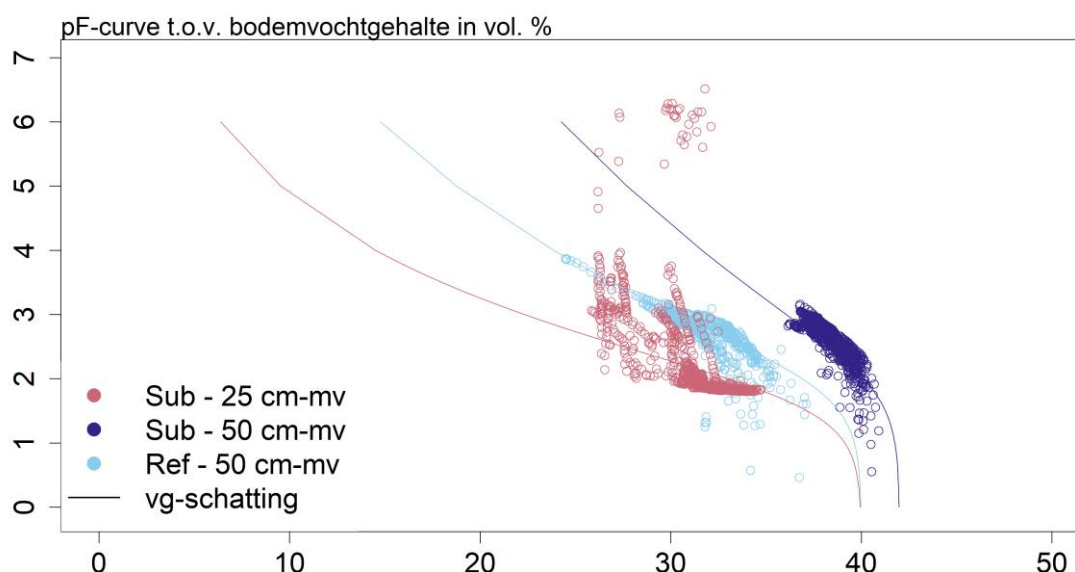
Figuur 25 Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (A) en 50 cm-mv, en drukhoogte (C) voor het proefblok met subirrigatie en het referentieblok. De grijs gearceerde perioden geven periodes met subirrigatie aan.

Vergelijking van met name de dalen in de reeks van de drukhoogte met het bodemvochtgehalte laat zien dat drukhoogtemetingen belangrijke aanvullende informatie geven ten opzichte van bodemvochtmetingen:

- 50 cm-mv referentieblok: in september 2020 dalen beide variabelen, ze geven beide een duidelijk signaal: bodemvochtgehalte daalt van $>0,30$ naar $<0,25$, drukhoogte daalt van -150 naar <-700 cm (sterker signaal).
- 25 cm-mv proefblok: bodemvochtgehalte blijft $>0,25$, terwijl drukhoogte in juni en september 2021 duidelijk daalt, evenals in mei en augustus 2022. De drukhoogte geeft een sterker signaal richting droogtestress ondieper in het profiel.
- De drukhoogte op 50 cm-mv op het referentieblok komt dicht bij het reductiepunt van de wateropname en daardoor transpiratiereductie van het gewas dan op het proefblok.

Het meten van zowel vochtgehaltes als drukhoogtes, maakt het mogelijk een indicatie te geven van de waterretentiecurves: de relatie tussen de drukhoogte (in termen van $pF = \log(|h|)$); als voorbeeld: $pF=2,0$ bij een drukhoogte van -100 cm) en het vochtgehalte van de bodem. Voor kleibodems is sprake van een steil verloop: een kleine verandering in het vochtgehalte resulteert in een grote

verandering van de pF en hiermee de beschikbaarheid van water voor de plant. Dit aspect komt terug in sectie 4.2.1. De curves die volgen uit de veldmetingen zijn gegeven in Figuur 26.



Figuur 26 Gemeten pF (logaritme van de drukhoogte) als functie van gemeten bodemvochtgehalte voor 25 cm-mv en 50 cm-mv op het proefblok ('sub')- en referentieblok ('ref'). De doorgetrokken lijnen zijn een schatting van de Van Genuchten functies die de pF curves beschrijven. Op de x-as is het procentuele bodemvochtgehalte weergegeven, op de y-as is de logfunctie van de drukhoogte weergegeven. Het water beschikbaar tussen het verwelkingspunt ($pF_{4.2}$) en veldcapaciteit (pF_2) is het water dat beschikbaar is voor het gewas. Het verwelkingspunt is het punt dat het gewas geen water meer kan opnemen door onvoldoende beschikbaarheid van water. Veldcapaciteit treedt op als de bodem een maximaal hoeveelheid aan water bevat wat de bodem kan vasthouden.

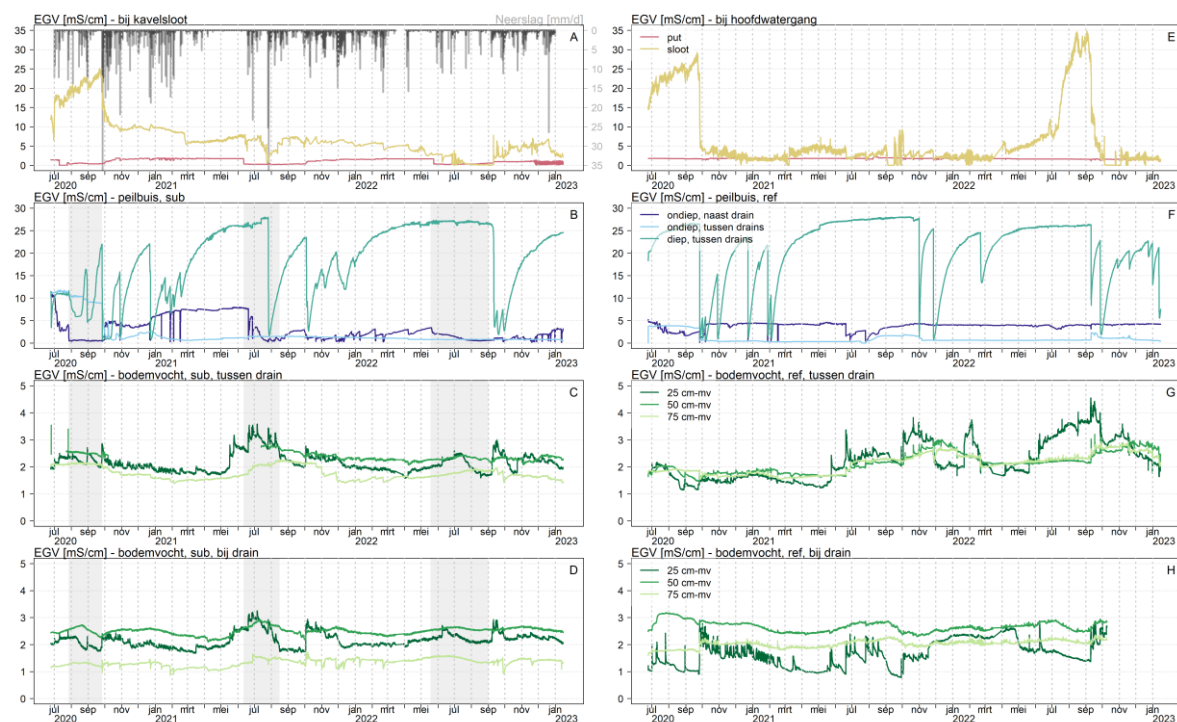
4.1.3.3 Elektrisch geleidingsvermogen (EGV)

Het zoutgehalte in het grondwater varieert in Zeeland en op de locatie van AIKC Rusthoeve van zoet tot brak/zout. Een maat voor het zoutgehalte is EGV. Onder andere het seizoen en de afstand tot een eventueel zoet water inlaatpunt is hierbij belangrijk. Als er zoet water wordt ingelaten in een gebied en via watergangen naar de 'achterste' landbouwgronden wordt geleid, wordt het water meestal zouter. Zeewater heeft een EGV van 54 mS/cm. In drinkwater zijn van nature ionen opgelost en hierdoor heeft drinkwater een elektrisch geleidingsvermogen dat meestal ligt tussen 300 en 800 μ S/cm. De EGV wordt meestal weergegeven bij een temperatuur van 25 °C.

Water met een EGV tot 5 mS/cm wordt vaak gezien als zoet water, als een EGV hoger is dan 5 à 10 mS/cm, dan kan dat water schadelijk zijn voor gewassen (zoutschade). Echter, de gevoeligheid van gewassen voor zout is per gewas verschillend (bijv. Stuyt et al., 2016).

Aanvoer in de proef voor alle jaren betreft zoet water. De EGV is op het subirrigatie- en referentieblok, zowel in het grondwater, als in het bodemvocht, de sloot en in de regelput gemeten (Figuur 27). Hieruit volgt:

- EGV in de diepere bodem laat een duidelijke respons zien op neerslag, omdat dan zoeter water van boven het zoutere water beneden verdringt (naar beneden).
- EGV in het bodemvochtgehalte is zowel op het subirrigatie- als referentieblok weinig veranderd als gevolg van subirrigatie of neerslag en blijft laag ('zoet'); zout water komt niet in de wortelzone van de gewassen.
- EGV in de hoofdwatgang neemt gedurende de zomer toe en daalt weer in het najaar als er sprake is van een neerslagoverschot (meestal september/oktober). De hoofdwatgang ten westen van de veldkavel met het proef- en referentieblok is zoeter dan het water in de kavelsloot (tussen de weg en de veldkavel).



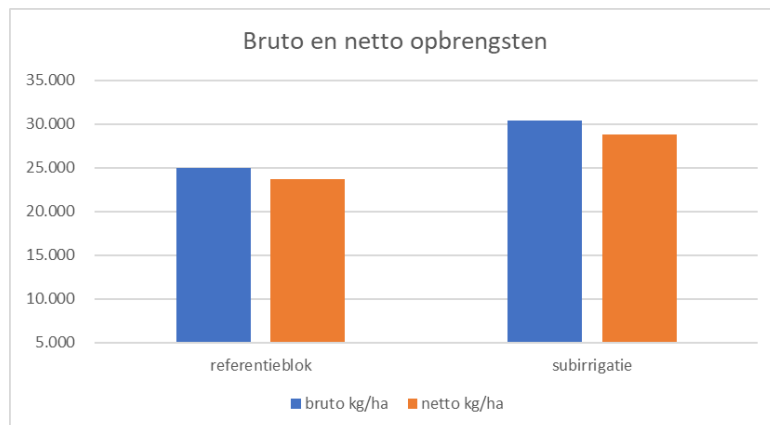
Figuur 27 Gemeten elektrisch geleidingsvermogen (EGV) in de regelputten en de sloten (A, E), het grondwater (B, F), in het bodemvocht op het proefblok (C, D), en in het bodemvocht op het referentieblok (G, H). Het grijze vlak geeft de periode van wateraanvoer weer. EGV in grondwater (peilbuis): ondiep betreft freatisch grondwater, diep betreft water in zandpakket onder de deklaag.

4.1.4 Gewasobservatie

Metingen aan de gewasopbrengsten tonen een beperkt hogere gewasopbrengst (droge stof, d.s.) op het proefblok dan op andere percelen van AIKC Rusthoeve. De meeropbrengsten per seizoen en per gewas van het proefblok ten opzichte van het referentieblok zijn als volgt:

- 2020 met cichorei: +7% kg/ha d.s.; +10% inuline/ha (Figuur 29)
- 2021 met gewas wintertarwe: +4% kg/ha d.s.
- 2021 met gewas aardappel: +2% kg/ha d.s.
- 2022 met gewas zaaiui: +18% kg/ha d.s. (Figuur 28)

De zomers van 2020 en 2022 waren droog, die van 2021 was normaal tot nat. In droge seizoenen verwachtten we meer verschil in d.s. dan in normale tot natte zomers. Die verwachting komt tot uiting in de cijfers. Ondiep wortelende gewassen hebben zoals eerder vermeld een kleinere kans om in met name droge zomers te profiteren van effecten van subirrigatie. De zaaiuien in 2022 hebben op het proefblok een positief resultaat laten zien.



Figuur 28 Gemeten d.s. opbrengsten zaaiuien voor 2022, voor het proefblok met subirrigatie (rechts) en het referentieblok (links).

In het groeiseizoen van 2022 was er sprake van een lange droge periode, met opbrengstdalingen tot gevolg, vooral bij ondiep-wortelende teelten zoals zaaiuien. Andere akkerbouwteelten zoals suikerbieten, tarwe en aardappelen hebben in 2022 op de proefboerderij redelijk tot normale opbrengsten laten zien (mondeling mededeling Van Sluijs, AIKC Rusthoeve).

De verwachting is dat gewassen die dieper wortelen, zoals suikerbieten, granen en aardappelen, beter gebruik kunnen maken van de capillaire werking vanuit verhoogde grondwaterstanden bij toepassing van subirrigatie. Echter, ook bij deze teelten is het de vraag of meerkosten van de subirrigatie met een systeem van regelbare drainage goedgeмаakt worden door de eventuele meeropbrengst van gewassen en andere baten.

De uienteelt is voor de akkerbouwer in de regio een kostbare teelt, zo is zaaizaad kostbaar. Tegelijkertijd zijn de uien een van de hoogrenderende gewassen, waarbij naast de d.s. opbrengst met name marktprijzen een belangrijke rol spelen. Het belang van het slagen van de uienteelt is daarmee voor een akkerbouwer erg belangrijk. Dit systeem, enkelvoudig toegepast, levert voor de uienteelt wellicht niet voldoende voordeel. Ter vergelijking, andere irrigatiesystemen zorgen voor opbrengstverschillen van meer dan 100% (mondeling mededeling Van Sluijs, AIKC Rusthoeve). Nader vergelijkingsonderzoek tussen systemen van watervoorziening en in combinatie met (regelbare) drainage is nodig om een compleet beeld te vormen voor nu en in de nabije toekomst. Daarbij moet dan rekening gehouden worden met de kwantitatieve (m^3) beschikbaarheid van zoet water voor aanvoer en (sub)irrigatie.

Hoewel er dus wel sprake is van een meeropbrengst van afgerond <5 tot 20% door toepassing van subirrigatie in deze praktijkproef, lijkt deze d.s. meeropbrengst an sich niet zonder meer voldoende voor het genereren van baten voor het economisch perspectief voor een akkerbouwer. Om echter tot een complete analyse van de kosten en baten van regelbare drainage met subirrigatie te komen, spelen meerdere aspecten een rol. Een financiële analyse betreft ook zaken als inzet van werktijd/arbeid, baten van de regelbare drainage zelf (op vlak van drainage en water vasthouden, zoute kwel wegdrukken, grondwatervoorraad creëren), kosten van onderhoud van het systeem e.d. Een voorbeeld van een niet-compleet beeld van kosten van dit soort systemen is Van der Burgt en Verstand (2021): een betere en meer complete analyse van kosten én baten in het licht van economisch perspectief is gewenst, zeker met het oog op verdere veranderingen van het klimaat in de zuidwestelijke delta van Nederland. Van der Burgt en Verstand (2021) bevelen aan een opvolgende analyse uit te voeren incl. meeropbrengsten van gewassen. Een aanvulling hierop zou zijn de kosten/batenanalyse van Van den Eertwegh en Droogers (2013) te herzien met de kennis van nu en aspecten mee te nemen als water vasthouden voor zoet grondwaterbeheer en om zoute kwel weg te drukken.

De genoemde d.s. opbrengst-getallen zijn tot stand gekomen binnen dit project, waarin geëxperimenteerd en geleerd is door AIKC Rusthoeve in samenwerking met de rest van het projectteam inzake de omgang met en het management van regelbare drainage met subirrigatie. Tijdig stoppen met draineren, langer en meer water vasthouden en hogere grondwaterstanden realiseren, eerder starten met subirrigatie zijn voorbeelden van management-praktijken die in toenemende mate binnen het project zijn geprobeerd in het leerproces. Er zit ruimte in verdere verbetering van het management van regelbare drainage met subirrigatie. Hierdoor is een grotere meeropbrengst en -waarde mogelijk, zo is de verwachting. Zeker als het waterschap op haar beurt het peilbeheer in de leggerwatergangen beter kan afstemmen op de praktijk van regelbare drainage met subirrigatie.



Figuur 29 Gewas cichorei op de veldkavel met de beide blokken in het project. Foto's boven zijn genomen op 24 juni 2020. Foto's onder zijn genomen op 21 augustus 2020.

4.2 Modellering onverzadigde en verzadigde zone

4.2.1 Modellering in de proefperiode

De resultaten met het gekalibreerde SWAP model (zie ook Bijlage B) worden in enkele grafieken getoond. Figuur 31 geeft tijdreeksen van simulaties voor de periode juni 2020 – september 2022 (gelijk aan de veldproef). Invoer van het model, zoals neerslag, maximale wateraanvoer en de hoogte van de vlotter zijn gebaseerd op de veldmetingen. In deze paragraaf gaan we eerst in op tijdreeksen en daarna op jaarwaarden van waterbalanscomponenten, steeds voor de situatie met en zonder subirrigatie.

Tijdreeksen

Voor Figuur 31 geldt (per grafiek A t/m I, grafieken A en B zijn invoer, C t/m I zijn modelresultaten):

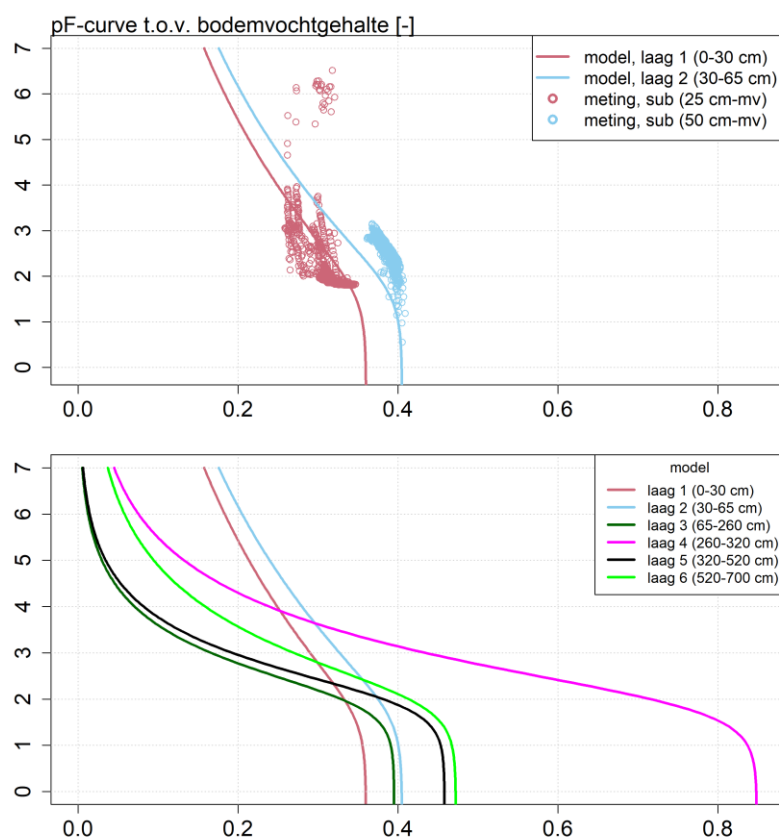
- A: gemeten neerslag op dagbasis, invoer voor het model
- B: gemeten wateraanvoer, invoer voor het model
- C: waterniveau in de regelput. Het waterniveau in de regelput is afhankelijk van de wateraanvoer (het niveau stijgt bij wateraanvoer, zie effect B op C), maar ook van neerslag. Als door (veel) neerslag de grondwaterstand stijgt dan stijgt het waterniveau in de regelput

mee, tot de drainagedrempel is bereikt. Dit is zichtbaar in september 2020. Het waterniveau in de regelput is tijdens subirrigatie zo'n 75 cm hoger bij subirrigatie dan zonder subirrigatie.

- D: grondwaterstand. De grondwaterstand wordt uiteraard beïnvloed door de weerscondities, maar ook door de drainagedrempel en het waterniveau in de regelput. De grondwaterstand is 30-50 cm hoger bij subirrigatie dan zonder subirrigatie.
- E-F: bodemvochtgehalte op resp. 25 en 50 cm-mv. De hogere grondwaterstand (D) bij subirrigatie zorgt ook voor een hoger bodemvochtgehalte. De verhoging van het vochtgehalte is groter op 50 cm-mv dan op 25 cm-mv: 0,04 versus 0,01. De verschillen zijn klein.
- G-H: drukhoogte op resp. 25 en 50 cm-mv. De hogere bodemvochtgehalten (E-F) voor de situatie met subirrigatie resulteren in hogere (minder negatieve) drukhoogtes. Door de steile vorm van de pF-curves (zie kader hierna) levert een kleine verandering in het vochtgehalte een grote verandering op in de drukhoogte. De drukhoogtes zijn voor zowel de situatie met als zonder subirrigatie dusdanig laag dat er droogtestress optreedt, zichtbaar in de transpiratiereductie (I). Let op de verschillen in schaal voor de verticale as voor 25 cm-mv en 50 cm-mv: voor 25cm-mv worden veel lagere drukhoogtes berekend.
- I: transpiratie (gewasverdamping), cumulatief per jaar. Zowel de potentiële transpiratie, als de werkelijke (actuele) transpiratie T_{act} zijn getoond. Het verschil geeft de transpiratiereductie als gevolg van suboptimale waterbeschikbaarheid voor het gewas. Ook geeft de figuur de bewortelingsdiepte van de gewassen; deze zijn niet dynamisch gemodelleerd, maar als vaste eigenschappen opgelegd aan de gewasbestanden. De modelresultaten voor de veldproef geven geen verschillen in werkelijke transpiratie voor de situatie met en zonder subirrigatie. Voor beide situaties geldt dat de transpiratiereductie per jaar ongeveer 150 mm is.

Kader: waterretentiecurve (pF-curve) – relatie tussen vochtgehalte en drukhoogte (waterbeschikbaarheid voor gewas)

Figuur 30, bovenste paneel, toont de 'gemeten' pF-curve (zie ook sectie 3.1.3) en de pF-curves in het gekalibreerde SWAP-model. Het onderste paneel toont de pF-curves van alle modellagen. Lagen 1 en 2 zijn kleibodems, 3, 5 en 6 zandige bodems en laag 4 is een veenlaag. Dit is zoals waargenomen in het veld (zie sectie 2.2). Het is van belang op te merken dat de pF-curves van de ondiepe bodemlagen (laag 1 en 2) steil verlopen; een kleine verandering in het bodemvochtgehalte leidt daardoor tot een grote verandering in drukhoogte en hiermee het al dan niet optreden van droogtestress bij het gewas.



Figuur 30 Gemeten drukhoogten (Y-as) en bodemvochtgehalte (X-as) oftewel de pF-curve in de ondiepe ondergrond op het proefblok (bovenste paneel). De pF-curves van verschillende bodemlagen zoals gebruikt in het gekalibreerde SWAP model (onderste paneel).

De modelresultaten geven eenzelfde inzicht als de metingen voor zover het gaat over effecten op de grondwaterstand tussen de drains en bodemvochtgehaltes. Het model geeft extra inzicht in de processen in de wortelzone en het effect op wateropname door de plant, transpiratie en hiermee gewasgroei. De modelresultaten geven lagere drukhoogtes in de wortelzone dan in het veld zijn waargenomen, voor zowel de situatie met als zonder subirrigatie. De gesimuleerde droogtestress wordt daardoor overschat. Dit is gerelateerd aan de bodemfysica: een kleine aanpassing in bodemfysische eigenschappen heeft een groot verschil tot gevolg in effecten op het gewas (zie kader). Dit is een bekend probleem bij modellering van droogtestress in kleibodems, ook bij bekende tools als Waterwijzer Landbouw (referentie nog toevoegen), dat gebruik maakt van SWAP, en bij het Landelijk Hydrologisch Model (referentie nog toevoegen). Veelal wordt dit 'opgelost' door

de bodemfysische eigenschappen aan te passen. Echter, dat vinden wij hier niet opportuun, omdat deze eigenschappen zijn verkregen uit de modelkalibratie. Overigens vinden er onderzoeken plaats om dit fundamentele probleem in de modelconcepten op te lossen. Ten tijde van dit onderzoek is een oplossing helaas nog niet voorhanden.

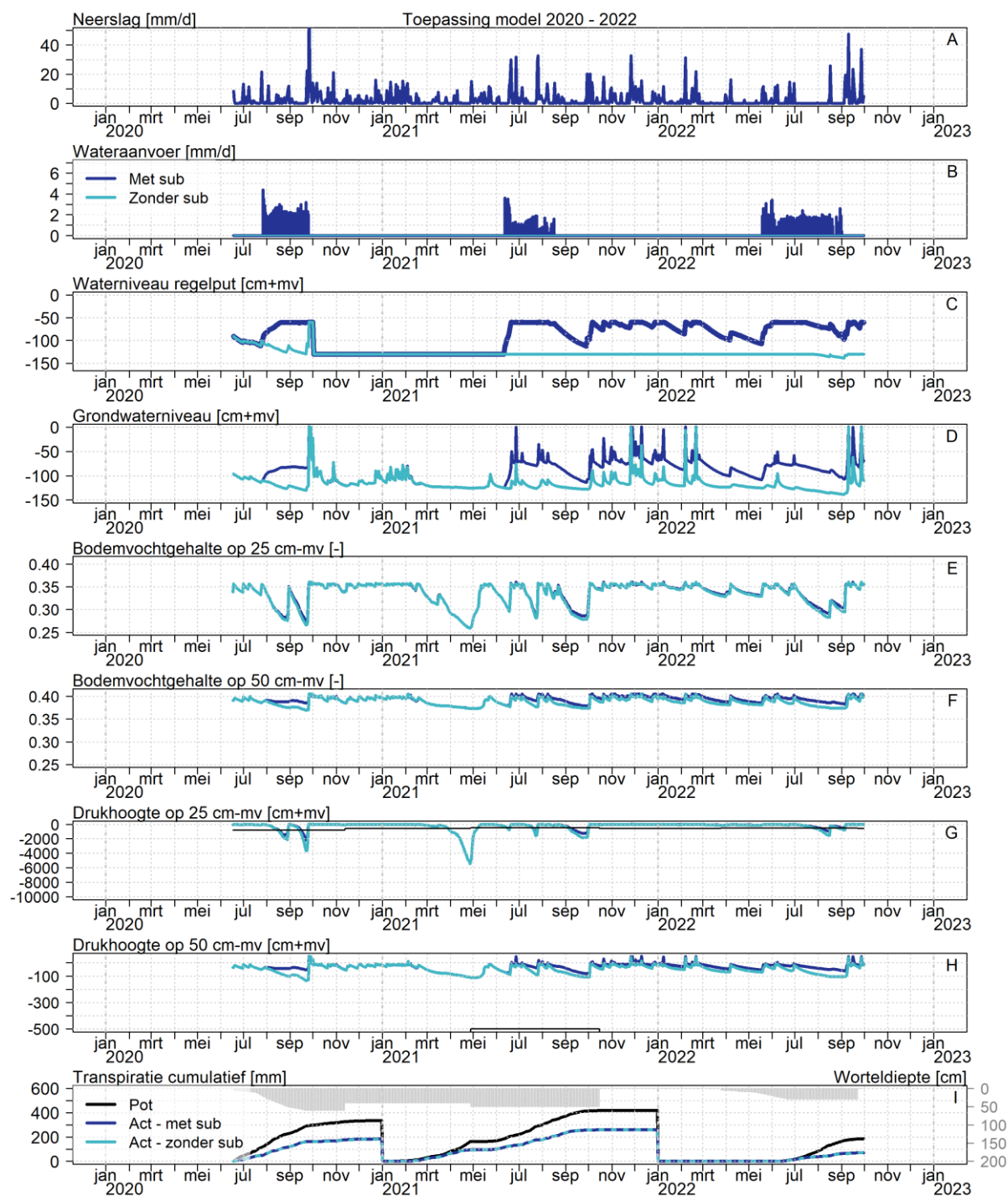
We moeten aldus terughoudend zijn met het trekken van conclusies over het gemodelleerde effect van subirrigatie op de werkelijke transpiratie T_{act} ; de modelresultaten zullen een overschatting van de droogtestress te zien geven. Toch zijn de modelleringen zeker bruikbaar voor toetsing en interpretatie van de veldmetingen.

De modelresultaten bevestigen de effecten van subirrigatie zoals die ook in de veldmetingen naar voren kwamen. Uit verschilfiguren voor de bovenste 70 cm van het bodemprofiel (Figuur 32) blijkt dat door subirrigatie:

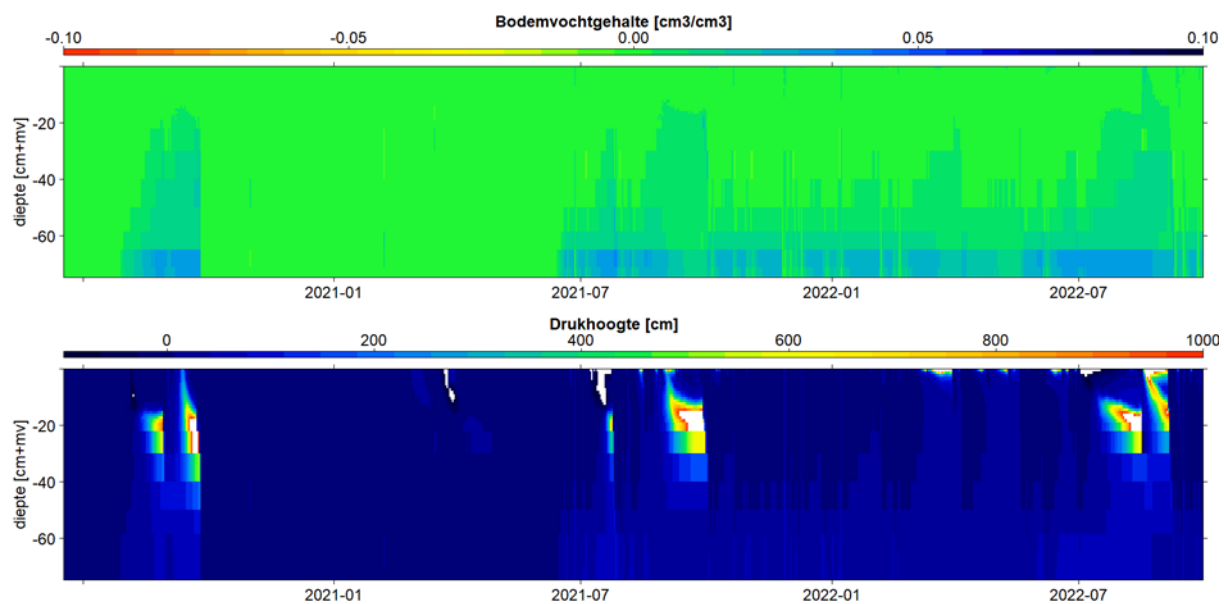
- het vochtgehalte in de wortelzone wordt verhoogd (Figuur 32 – eerste paneel). De toename is het hoogst onderin het profiel en neemt af richting maaiveld.
- de drukhoogte wordt verhoogd (Figuur 32 – tweede paneel). Dit effect werkt door tot ondiep in het profiel, waar nog verhogingen van meer dan 1000 cm worden gemodelleerd. Deze verhoging is echter niet voldoende om drukhoogtes te bereiken waarbij geen reductie in wateropname door de wortels optreedt. Ook zijn de verhogingen zeer ondiep in het wortelprofiel (de zone met de grootste worteldichtheid in het model) beperkt.

Gerelateerd aan de bodemopbouw (klei tot 60 cm-mv met daaronder zand) laat Figuur 33 een aspect zien dat de effecten van subirrigatie kan beïnvloeden:

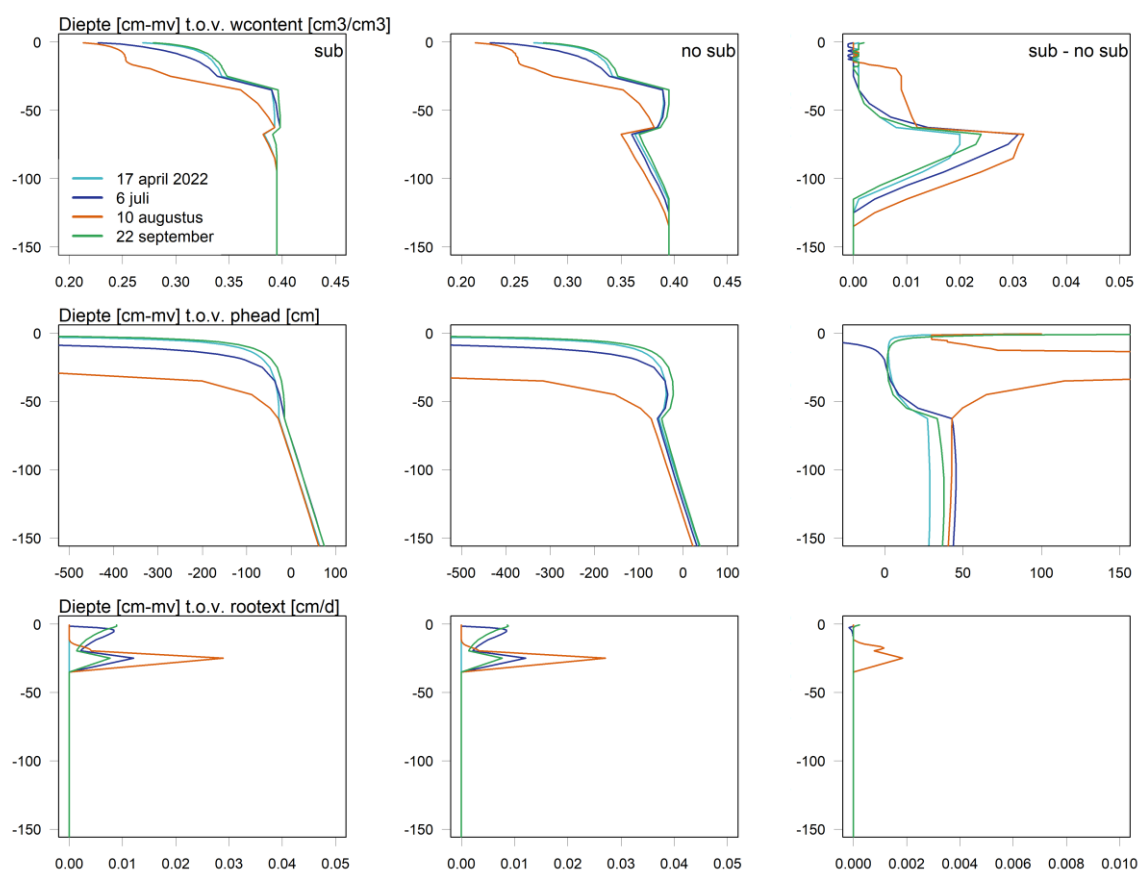
- In de zone 60 – 150 cm-mv zijn het bodemvochtgehalte en de drukhoogte hoger bij subirrigatie. Daarboven zit een textuursprong. Er vindt verzadiging plaats boven deze overgang in bodemlagen; dit effect is te zien op dagen na een periode van neerslag. De drukhoogte neemt toe in de laag 60 tot 25 cm-mv en neemt daarna richting het maaiveld scherp af. De wateropname door de wortels ('rootext', onderste paneel) vindt dan ook met name plaats in de zone beneden 25cm-mv. Voor zowel de situatie met als zonder subirrigatie geldt dat ondiep in het wortelprofiel negatieve drukhoogtes worden bereikt, die resulteren in transpiratiereductie.
- In/na een periode zonder neerslag, zoals situatie 10 augustus 2022, wordt door subirrigatie de drukhoogte tot in de wortelzone verhoogd. Boven in de wortelzone is nog steeds sprake van droogtestress. Opgemerkt moet worden dat er met een vast wortelprofiel wordt gerekend. Binnen Waterwijzer Landbouw wordt een module ontwikkeld voor dynamische wortelontwikkeling, waarbij wortelgroei (en wateropname) plaatsvindt in de zone waar vocht beschikbaar is. Deze module is echter nog niet beschikbaar ten tijde van dit onderzoek.
- De positieve effecten van subirrigatie op de drukhoogte zijn zichtbaar in periodes zonder neerslag en zeer beperkt in periodes met neerslag. De resultaten laten zien dat dit samen kan hangen met het effect van de textuursprong, waardoor regenwater stagneert en langer voor de gewassen beschikbaar blijft.



Figuur 31 Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (E), 50 cm-mv (F) en drukhoogte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (G), 50 cm-mv (H) en transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met 'sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). De maximale wateraanvoer in het model is gebaseerd op de gemeten wateraanvoer. Let op: de y-assen voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



Figuur 32 Gemodelleerde verschillen in bodemvochtgehalte (boven) en drukhoogte (onder) voor de situatie met en zonder subirrigatie. Positieve getallen betekenen een hoger vochtgehalte of drukhoogte voor de situatie met subirrigatie.



Figuur 33 Gemodelleerde diepteprofielen voor vochtgehalte (boven), drukhoogte (midden) en wateropname door de wortels (onder) voor de situatie met subirrigatie (links), zonder subirrigatie (midden), en het verschil tussen met en zonder subirrigatie (rechts).

Waterbalans 2020-2022

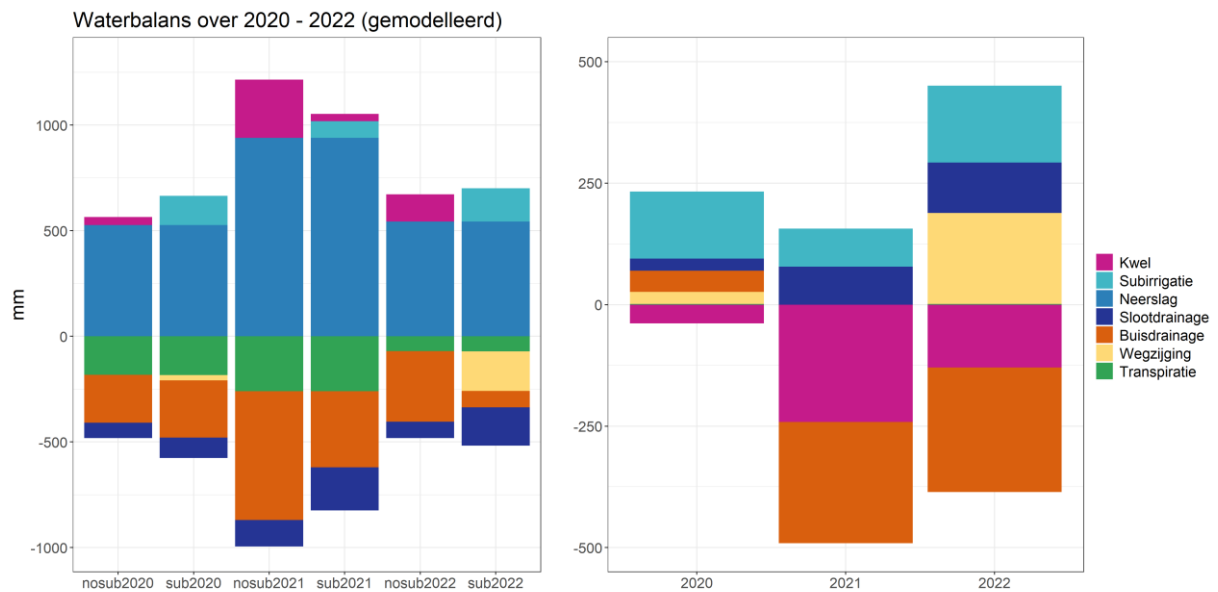
Subirrigatie beïnvloedt verschillende componenten van de waterbalans (Figuur 34). Door de stijging van de freatische grondwaterstand bij subirrigatie, neemt de kwelintensiteit af en er ontstaat er een situatie met wegzijging. Ook de laterale drainage naar de (legger)watergang en sloot neemt toe (rechtstreeks vanuit de bodem). De afvoer via de drainagebuizen neemt af.

Tussen de jaren 2020 – 2022 zijn er duidelijk verschillen in de waterbalanscomponenten, met name in de verschilgrafiek zijn er in 2020 kleinere verschillen gemodelleerd dan in 2021 en 2022. Het belangrijkste verschil is dat er in 2020 geen water is vastgehouden, terwijl dit in 2021 en 2022 wel is gebeurd. Hierdoor is in 2020 bij subirrigatie sprake van een toename van de buisdrainage: door het verlagen van de balg/buishoogte in de regelput treedt drainage op.

Kwel neemt iets af in de simulatie met subirrigatie. Kwel komt voor als de diepe stijghoogte ondieper is dan de freatische grondwaterstand. Over het algemeen stijgt de grondwaterstand door subirrigatie, waardoor de freatische grondwaterstand ondieper is dan de diepe stijghoogte, en kwel wegvalt. In droge jaren neemt *wegzijging* naar het diepere grondwater toe bij subirrigatie.

Buisdrainage treedt op als het grondwaterniveau zich boven de drainagebuis bevindt én de drempel voor de afvoer in de regelput lager is dan het niveau van de drainagebuis. In 2020 is de buisdrainage toegenomen, door de drainageperiode in de winter 2020-2021. In 2021 en 2022 neemt de buisdrainage af in de situatie met subirrigatie ten opzichte van de situatie zonder subirrigatie. Dit komt doordat het drainageniveau en het niveau van de drempel in de regelput in deze jaren hoger was dan zonder subirrigatie, waardoor water is vastgehouden en er dus bewust minder water is gedraineerd. Water vasthouden in het winterseizoen met regelbare drainage kan tot een betere uitgangspositie leiden voor het positieve effect van subirrigatie. De subirrigatie kan dan meteen opgestart worden als de grondwaterstand dreigt te gaan dalen.

Slootdrainage vindt plaats als het grondwaterniveau hoger is dan het slootpeil. Het grondwaterniveau stijgt als gevolg van subirrigatie. Bij gelijke slootpeilen in een situatie met en zonder subirrigatie, wordt in de situatie met subirrigatie het verschil tussen het gecreëerde (hogere) grondwaterniveau en het slootpeil groter, waardoor de drainage naar de sloot groter wordt. Om (ongewenste) drainage naar het oppervlaktewater te voorkomen, is het dus belangrijk om ook de slootpeilen te verhogen tijdens subirrigatie. In de proefperiode is het voorgekomen dat het waterpeil van de leggerwatergang in de zomer lager was dan de grondwaterstand. Deze watergang heeft grondwater gedraineerd, hetgeen leidde tot een verlaging van de grondwaterstand op het proefblok.



Figuur 34: Gesimuleerde waterbalans voor de Rusthoeve gebaseerd op de meetperiode 2020-2022 (links). Verschil waterbalans (rechts) is berekend als: component waterbalans met subirrigatie ('sub') – component waterbalans zonder subirrigatie ('no sub'). Let op: in 2020 zijn de waarden berekend over 18-06-2020 tot en met 31-12-2020. In 2022 zijn de waarden berekend over 01-01-2022 tot en met 30-09-2022.

4.2.2 Modellering scenario's

Verschillende scenario's zijn doorgerekend om inzicht te krijgen in de effecten van verschillend beheer van het systeem en verschillende hoeveelheden wateraanvoer op de stijghoogtes, vochtcondities en waterbalans in het perceel. De gemodelleerde scenario's zijn (zie ook sectie 3.2.2):

1. Beperkte waterbron, minimaal beheer -> er kan maximaal 3 mm/d water worden aangevoerd in de periode 1 april – 30 september. 's Zomers wordt er water vastgehouden, 's winters wordt er gedraineerd.
2. Beperkte waterbron, optimaal beheer -> zoals 1, maar 's winters wordt er water vastgehouden.
3. 'Onbeperkte' waterbron, optimaal beheer -> zoals 2, maar er is 6 mm/d water beschikbaar.

De drie scenario's zijn uitgevoerd met een dieper wortelend gewas (aardappel) en ondiep wortelend gewas (zaaiui) en steeds voor een situatie met en zonder subirrigatie. Als voorbeeld zijn hier figuren opgenomen voor scenario 2 en een diep wortelend gewas. De figuren van de andere simulaties zijn opgenomen in de Bijlage B.

Voor alle simulaties geldt dat de grondwaterstand en drukhoogte in de wortelzone worden verhoogd bij subirrigatie. Doordat de periode waarin water wordt aangevoerd en de hoeveelheid wateraanvoer hoger is dan in de veldproef, geldt voor elk van de simulaties dat:

- Het waterniveau in de regelput op het gewenste niveau (50 cm-mv) kan worden gehouden;
- De grondwaterstand stijgt tot een niveau van ongeveer 25 cm beneden het niveau in de regelput;
- Het bodemvochtgehalte en de drukhoogte worden verhoogd, maar boven in het wortelprofiel blijft nog sprake van droogtestress.

Meer in detail zien we het volgende.

Wateraanvoer en niveau regelput: de wateraanvoer is maximaal bij de start van de subirrigatie omdat de watervoorraad in het bodemsysteem opgevuld wordt. Zodra het waterniveau in de regelput op

het gewenste niveau is en daarmee de grondwaterstand op het proefblok, vermindert de wateraanvoer tot ongeveer 2 à 3 mm/d, door de kleinere hydraulische gradiënt tussen het waterniveau in de regelput en de grondwaterstand op het proefblok. Voor alle doorgerkende scenario's geldt dat er voldoende wateraanvoer is om het waterniveau in de regelput op het gewenste niveau te houden.

De periode met maximale wateraanvoer (watervraag vanuit blok) kan worden verkort door grondwater op een hoger niveau vast te houden in de winter (scenario 2) of de aanvoercapaciteit en hydraulische gradiënt te vergroten (scenario 3).

De wateraanvoer neemt af in periodes met neerslag en toe in droge perioden. De wateraanvoer voor subirrigatie is dan ook het laagst in seizoen 2021. In 2020 was er weinig neerslag aan het begin van het groeiseizoen (april en mei), terwijl in 2022 juist bij het begin van de subirrigatie in april ook neerslag was. Ook dit beïnvloedt benodigde wateraanvoer: in combinatie met neerslag is er minder aanvoer nodig om het gewenste niveau in de regelput te bereiken.

Voor scenario 1 duurt het in 2020 bijna een maand om het gewenste waterniveau in de regelput te bereiken, t.o.v. ongeveer twee weken in 2022. Bij een aanvoercapaciteit van 6 mm/d (scenario 3) duurt dit nog maar een paar dagen.

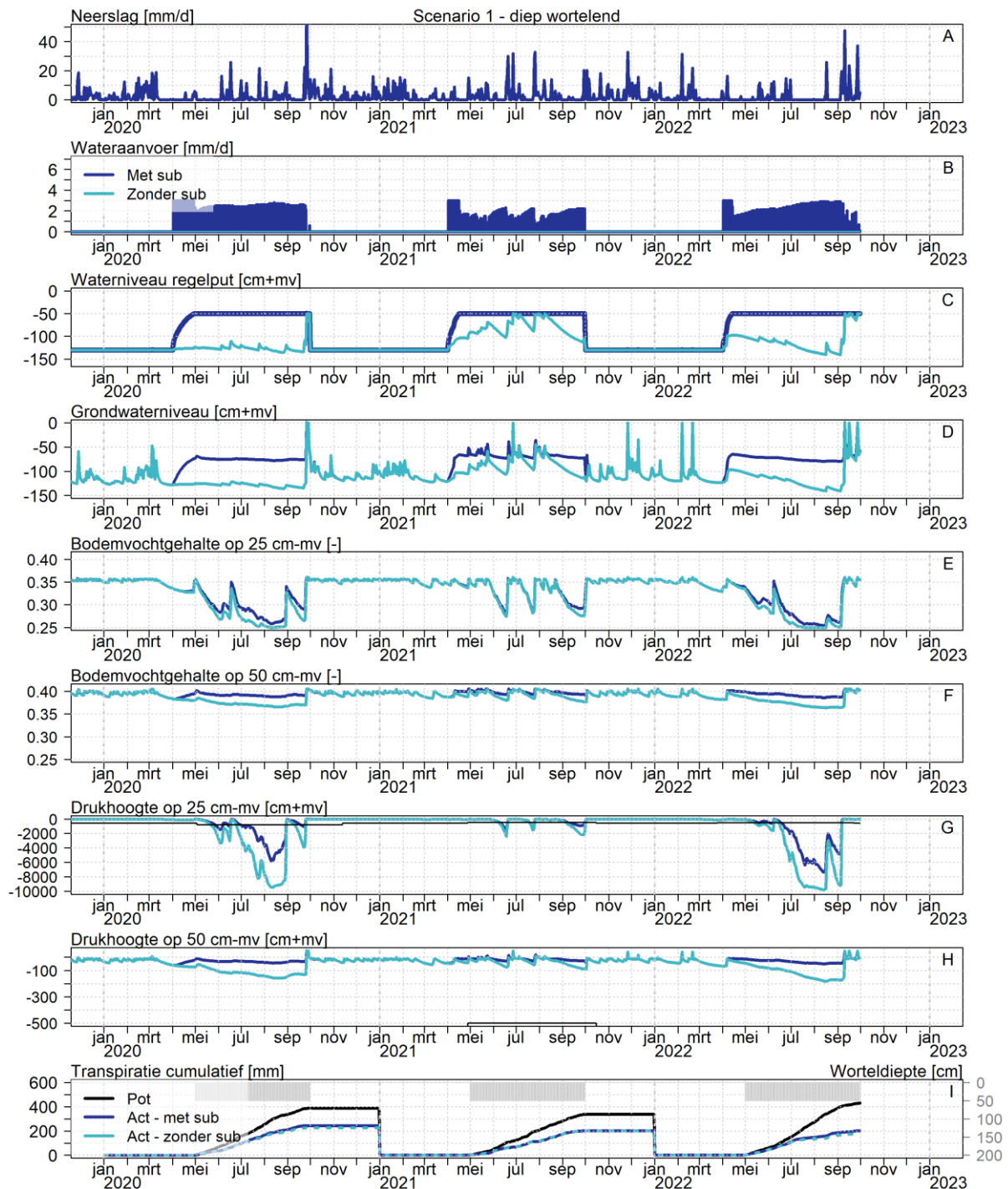
Ten slotte zijn er verschillen in het gerealiseerde waterniveau in de regelput (management) en de effecten daarvan voor ondiepe en dieper-wortelende gewassen. Het management van de afvoer drempel en het waterniveau in de regelput is belangrijk, zowel voor de natte kant (draineren of water vasthouden) als de droge kant (water aanvoeren). Voor een ondiep wortelend gewas schommelt het waterniveau in de regelput zonder wateraanvoer in seizoen 2020 rond 100 cm-mv, terwijl dit niveau in 2021 als gevolg van neerslag en 'water vasthouden' tussen de 50-100 cm-mv fluctueert. Voor een diep wortelend gewas is het niveau in de regelput tot 25 cm lager in de situatie zonder subirrigatie, hetgeen samenhangt met de grondwaterstand en de verdamping van het gewas (zie hierna).

Voor alle scenario's geldt dat de benodigde wateraanvoer voor subirrigatie groot is. Indien echter op tijd in het jaar, bij ondiepe grondwaterstanden aan het einde van de winter, gestart wordt, is er minder water nodig om het niveau op peil te houden. Natuurlijk moet hierbij rekening gehouden worden met de berijdbaarheid en bewerkbaarheid van percelen (planning perceelmanagement).

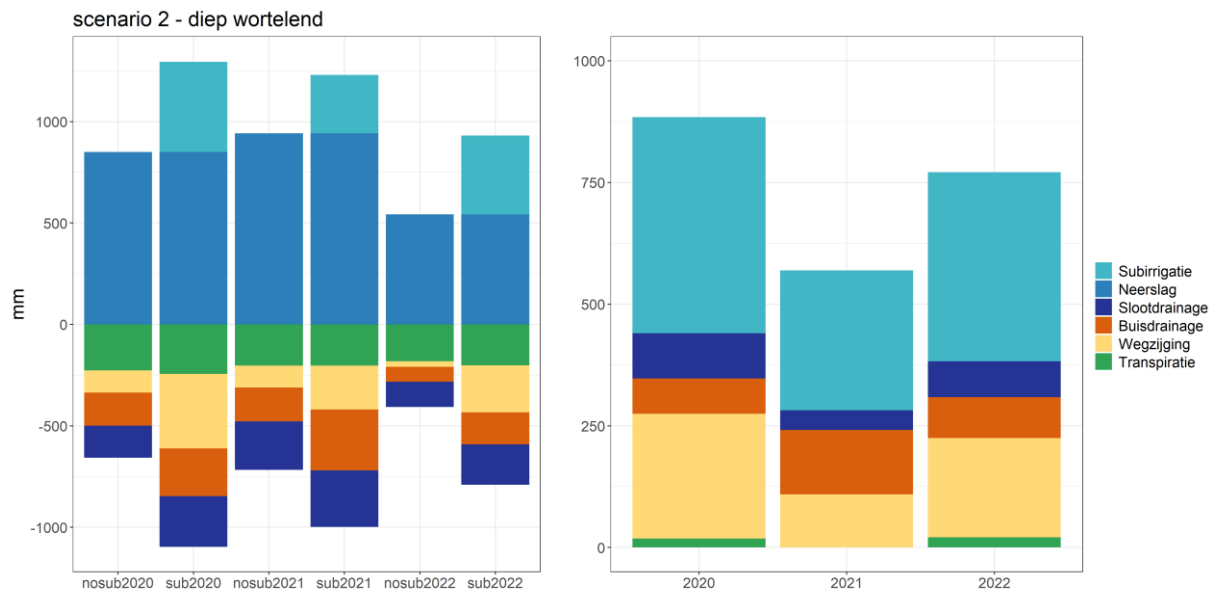
Grondwaterniveau: in de situatie zonder subirrigatie is in de droge jaren 2020 en 2022 de grondwaterstand lager bij een diep wortelend gewas dan bij een ondiep wortelend gewas. Het diep wortelend gewas haalt uit een dieper bodemprofiel water voor transpiratie. Een ondieper wortelend gewas kan dat in mindere mate en krijgt dan eerder last van droogtestress, waarna de grondwaterstand minder diep wegzakt. De grondwaterstand stijgt bij subirrigatie tot een niveau van ongeveer 25 cm beneden het ingestelde niveau in de regelput. Het is niet helemaal gelukt om de grondwaterstand bij een diep wortelend gewas op peil te houden. De watervraag is bij een diep-wortelend gewas hoger dan bij een ondiep wortelend gewas, omdat het dieper wortelende gewas langer en meer water blijft onttrekken voor verdamping. Een ondieper wortelend gewas heeft echter een ondiepere grondwaterstand nodig om bij het water te komen om juist te kunnen blijven verdampen.

Bodemvochtgehalte, drukhoogte en transpiratie: de potentiële transpiratie van zaaiui is aanzienlijk kleiner dan die van aardappel (resp. ongeveer 200 en 400 mm/jaar). Voor zaaiui blijft de drukhoogte op een diepte van 50 cm-mv boven het niveau van -100 cm. Op 25 cm-mv daalt deze drukhoogte in met name 2022 tot lagere waarden (-800 cm). Voor aardappel geldt dat op 25 cm-mv sprake is van zeer lage drukhoogtes, resulterend in aanzienlijke droogtestress voor het gewas. Voor de droge

groeiseizoenen in 2020 en 2022 is de drukhoogte lager dan in 2021. Het verschil in de totale werkelijke transpiratie is echter klein, doordat ook in 2021 drukhoogtes bovenin het wortelprofiel nog te laag zijn voor optimale wateropname. Door subirrigatie worden de drukhoogtes aanzienlijk verhoogd, een positief effect. Voor 2020 en 2022 neemt de transpiratie enigszins toe voor een dieper wortelend gewas. Er is daarbij geen verschil tussen de drie scenario's, doordat de gerealiseerde waterstand in de regelput en grondwaterstand nauwelijks verschillen tussen de scenario's.



Figuur 35 Resultaten voor 'scenario 2 – diep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Alleen voor een situatie met subirrigatie ('met sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-assen voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



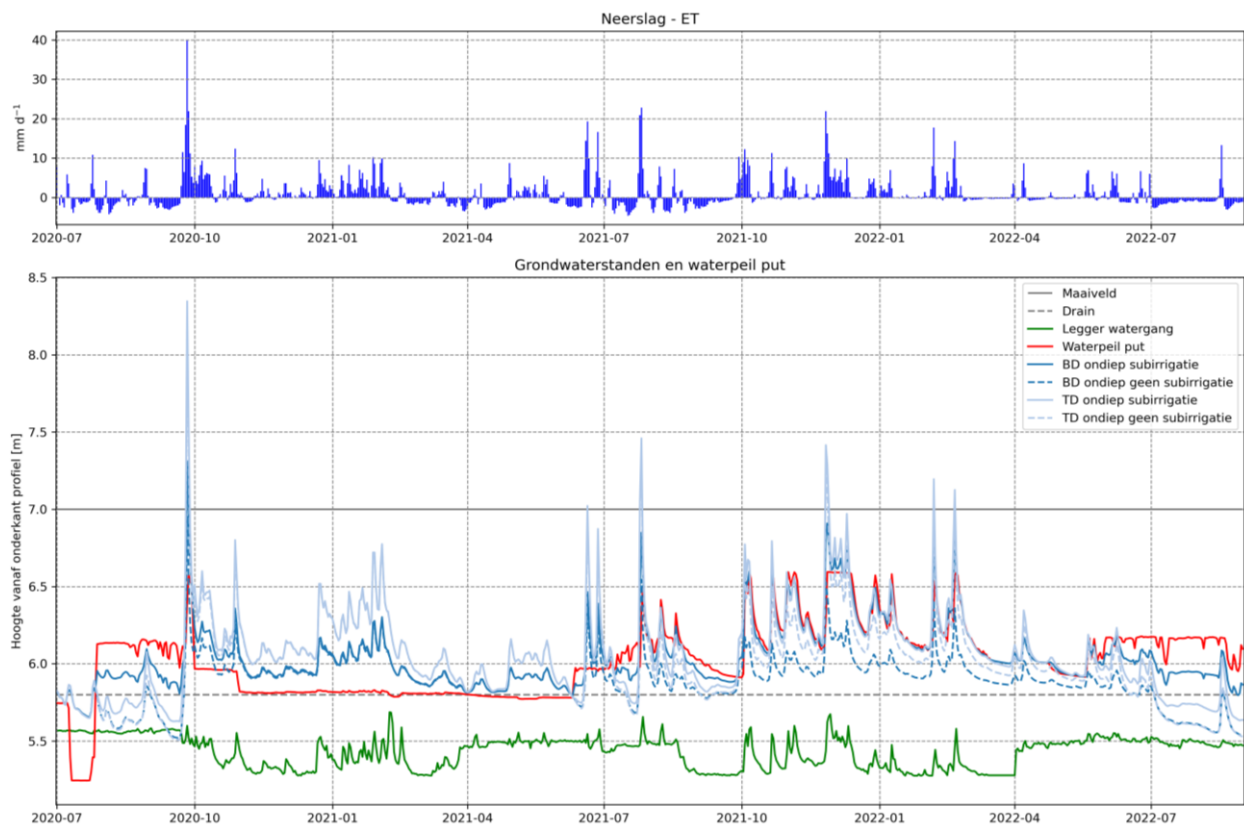
Figuur 36 Links: Gesimuleerde waterbalans voor de Rusthoeve in 2020 – 2022 met een diep wortelend gewas, gebaseerd op scenario 2, uitgelegd in 'methode, sectie 3.2'. Rechts: verschil waterbalans berekend door: waterbalans met subirrigatie ('sub') – waterbalans zonder subirrigatie ('no sub'). Let op: in 2022 zijn de waarden berekend over 01-01-2022 tot en met 30-09-2022.

4.3 2D modellering met dichtheidsstroming (zoet-zout)

In deze sectie wordt een vergelijking gemaakt tussen de huidige situatie – het systeem van regelbare drainage met subirrigatie (proefblok) – en een situatie zonder subirrigatie (referentieblok). Hierbij wordt zowel gekeken naar de veranderingen in de grondwaterstand als verschillen in zoutgehaltes in het bodemvocht en grondwater.

4.3.1 Grondwaterstanden

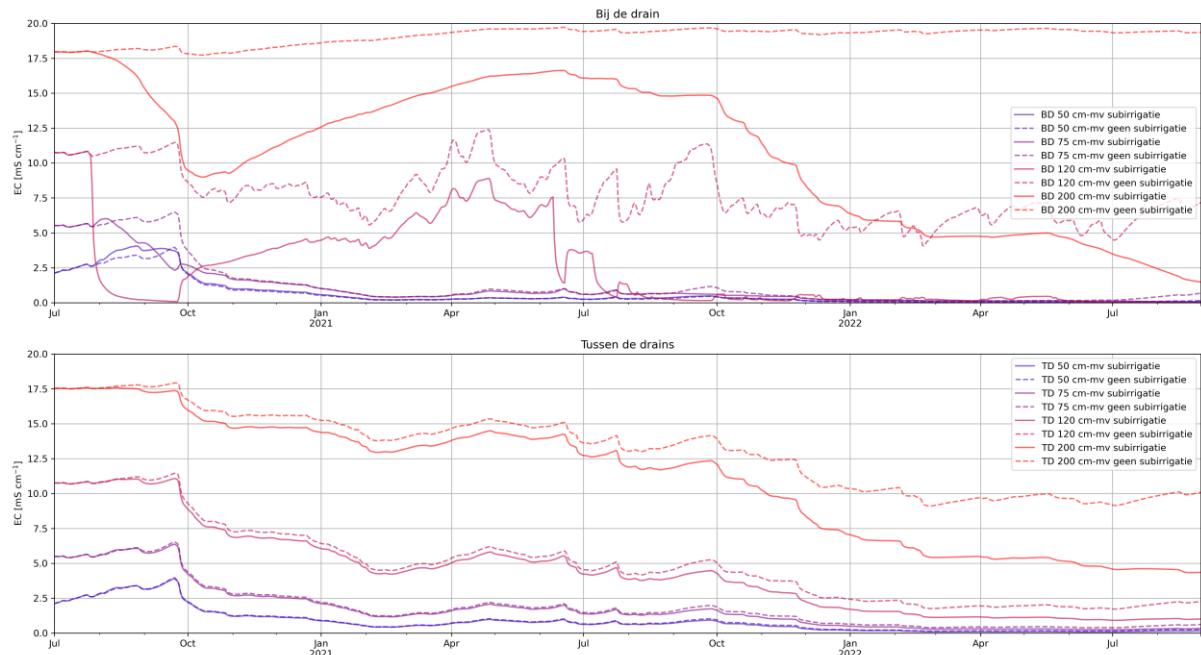
Figuur 37 laat de verschillende in gesimuleerde grondwaterstanden zien voor de situatie met subirrigatie en zonder subirrigatie. Zoals verwacht leidt subirrigatie tot hogere grondwaterstanden (ca. 20-30 cm) op momenten waarin duidelijk subirrigatie plaatsvindt (augustus t/m september 2020 en juni t/m augustus 2022). Op momenten waar overwegend sprake is van drainage (november 2020 t/m mei 2021) zien we geen verschillen in grondwaterstanden tussen beide systemen. In het systeem zonder subirrigatie is er altijd sprake van opbolling: de grondwaterstand tussen de drains is hoger dan die bij de drains. Deze opbolling zien we niet terug in juli-september 2020 en juli-augustus 2022. Dit kan verklaard worden doordat er gedurende deze periodes met name verdamping plaatsvindt en er nauwelijks aanvulling plaatsvindt via neerslag. In het systeem met subirrigatie zien we een opbolling tijdens perioden van drainage, en juist een hogere grondwaterstand bij de drain dan tussen de drains tijdens perioden van subirrigatie.



Figuur 37 Boven: Neerslag – verdamping (ET). Onder: gesimuleerde grondwaterstanden bij de drain (BD) en tussen de drain (TD) voor de huidige situatie met subirrigatie en het scenario zonder subirrigatie.

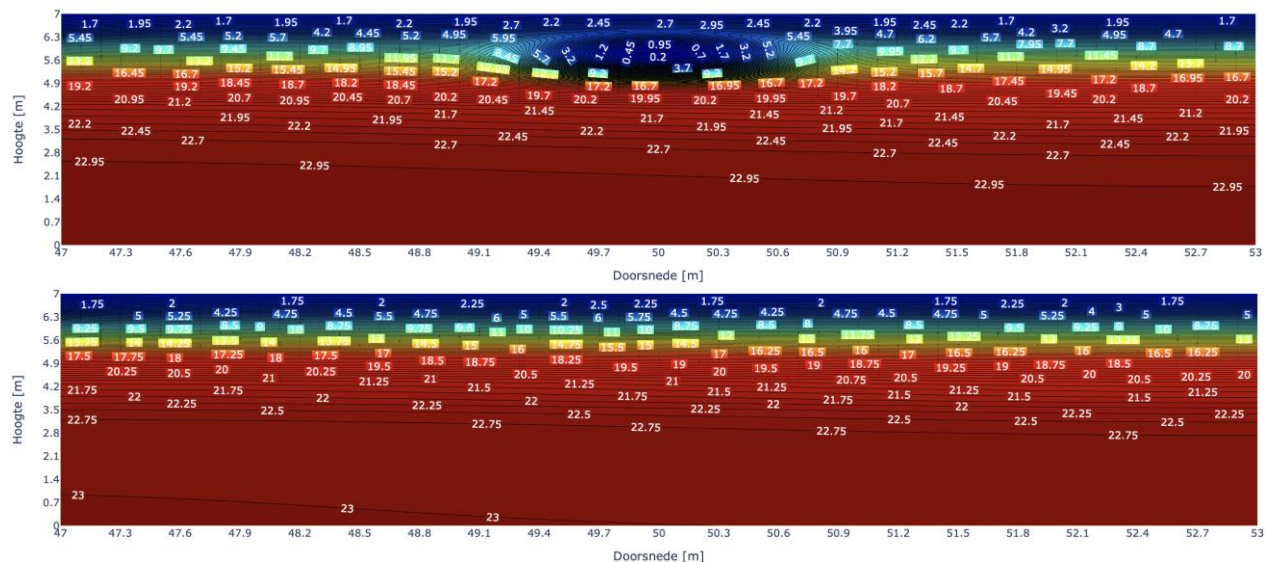
4.3.2 Zoutconcentraties

Het verschil in gesimuleerde zoutconcentraties op verschillende dieptes bij en tussen de drains voor de situatie met subirrigatie en de situatie zonder subirrigatie is weergegeven in Figuur 38. Op basis van deze resultaten kunnen we concluderen dat subirrigatie niet of nauwelijks tot verzoeting leidt op dieptes van 75 cm-mv en ondieper. We zien wel verzoeting optreden op 120 cm-mv en dieper voor de situatie met subirrigatie. De subirrigatie lijkt de zoute kwel terug te drukken, iets dat niet gebeurt bij de situatie zonder subirrigatie. Tussen de drains zien we het effect van subirrigatie alleen terug op een diepte van 200 cm-mv. Voor de overige dieptes zijn de verschillen minimaal.



Figuur 38 Boven: verschil in gesimuleerde zoutconcentraties bij de drain op verschillende dieptes tussen de huidige situatie (subirrigatie) en het scenario zonder subirrigatie. Onder: idem, maar tussen de drains.

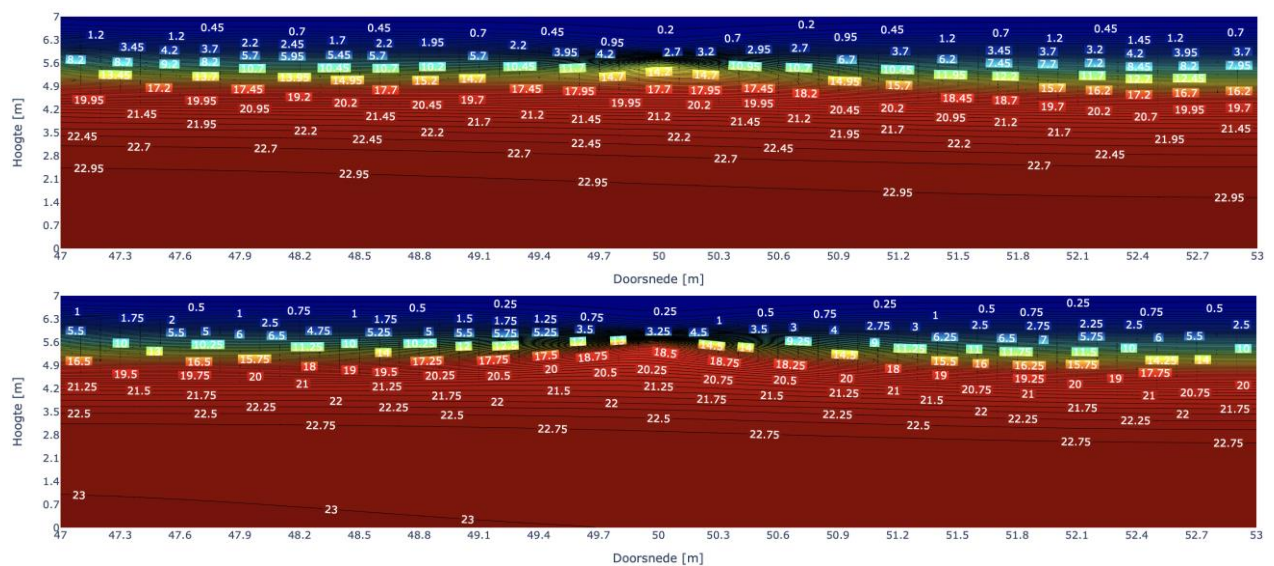
Naast de simulatieresultaten op puntlocaties (Figuur 38) is het interessant om de gesimuleerde zoutgehaltes over de gehele diepte en breedte (2D) van het profiel te bekijken. Figuur 39, Figuur 40, en Figuur 41 laten de gesimuleerde zoutconcentraties zien in 2D voor het interessegebied ($x=47$ t/m $x=53$ m en $y=0$ t/m $y=7$ m) voor de situatie met subirrigatie (bovenste panelen) en zonder subirrigatie (onderste panelen) voor respectievelijk 19 september 2020 (na een periode van subirrigatie), 27 mei 2021 (na een periode van drainage), en 30 augustus 2022 (na een periode van subirrigatie en einde simulatie). De drain ligt op $x=50$ m en $y=5,8$ m ($=1,2$ m-mv).



Figuur 39 Boven: gesimuleerde zoutconcentraties [mS/cm] op 19 september 2020 voor de huidige situatie (subirrigatie). Dit is na een periode waarin subirrigatie heeft plaatsgevonden. Onder: idem, maar nu voor de situatie zonder subirrigatie.

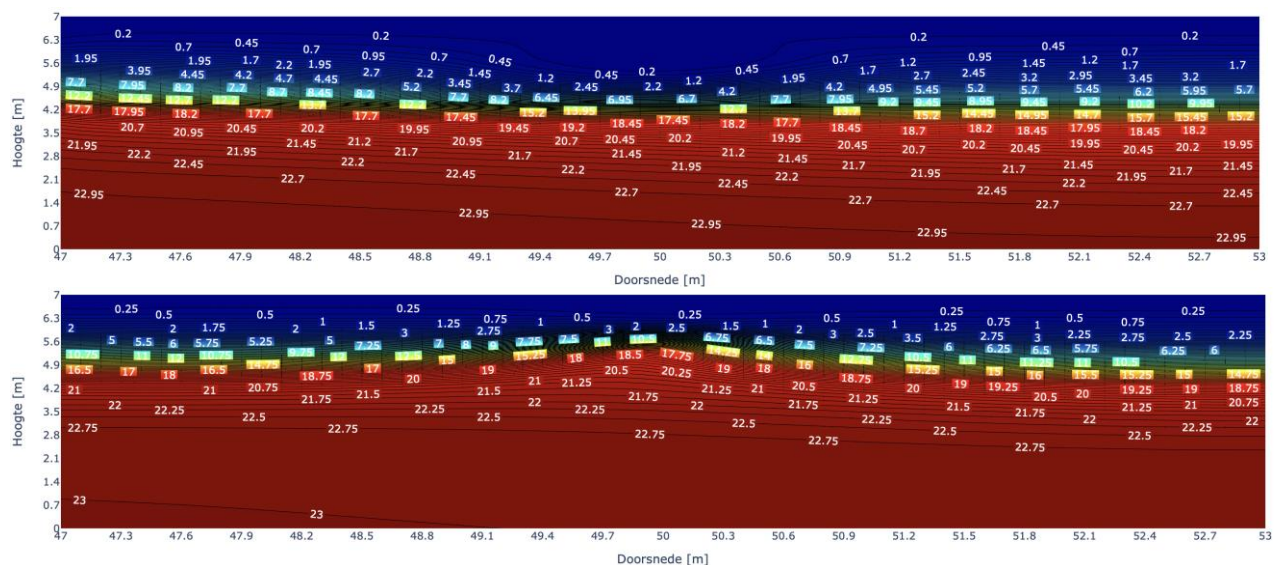
Na een periode van subirrigatie (Figuur 39) zien we een zoetwaterbel ontstaan in het gebied rondom de drain. Vervolgens treedt er een periode van met name drainage op en neemt de zoetwaterbel af (Figuur 40). De zoutconcentraties in het gebied rondom de drain blijven echter wel lager in vergelijking met de situatie zonder subirrigatie. Ook onder de drain tot een diepte van ca. 2 m-mv

blijven de verzoetende effecten van subirrigatie zichtbaar (dit was eerder al aangetoond in Figuur 38). De situatie zonder subirrigatie laat duidelijk het effect van zoute kwel zien onder de drain: we zien hier een hogere zoutconcentratie dan op dezelfde diepte tussen de drains.



Figuur 40 Boven: gesimuleerde zoutconcentraties [mS/cm] op 27 mei 2021 voor de huidige situatie (subirrigatie). Dit is na een periode van drainage. Onder: idem, maar nu voor de situatie zonder subirrigatie.

Tot slot zien we dat er aan het einde van de simulatieperiode en na een periode van subirrigatie een zoeter profiel overblijft dan bij de situatie zonder subirrigatie. Dit manifesteert zich met name in het gebied rondom de drain en in mindere mate tussen de drains. Wederom zien we de effecten van zoute kwel goed terug bij de drain in de situatie zonder subirrigatie.



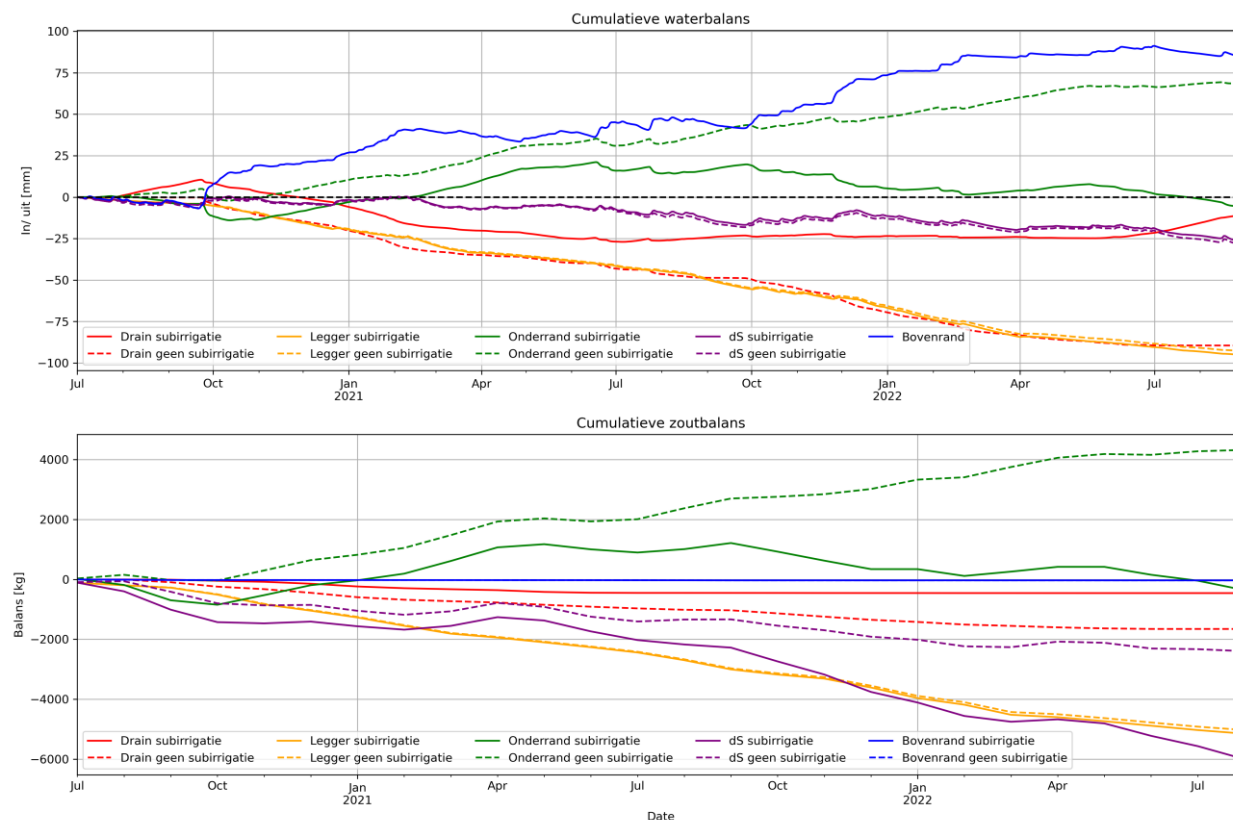
Figuur 41 Boven: gesimuleerde zoutconcentraties [mS cm⁻¹] op 30 augustus 2022 voor de huidige situatie (subirrigatie). Dit is het einde van de simulatieperiode en na een periode waarin subirrigatie heeft plaatsgevonden. Onder: idem, maar nu voor de situatie zonder subirrigatie.

4.3.3 Water- en zoutbalans voor totale modeldomein

De cumulatieve water- en zoutbalans over de simulatieperiode voor de situatie met- en zonder subirrigatie is weergegeven in Figuur 42. De verschillen in zowel de water- als de zoutbalans treden met name op via de drain en de onderrand. In de situatie zonder subirrigatie verlaat meer water het

profiel via de drain en komt er meer water via de onderrand (zoute kwel) het profiel binnen. Dit resulteert in een zoutinstroom van +4.000 kg via de onderrand, terwijl in de situatie met subirrigatie er netto meer zout het profiel verlaat dan dat er binnenkomt via de onderrand.

Tabel 7 vat de water- en zoutbalans voor de maanden juli 2020 t/m juni 2021 en juli 2021 t/m juni 2022 samen voor de situatie met- en zonder subirrigatie.



Figuur 42 Boven: verschil in gesimuleerde cumulatieve waterbalansen termen voor het gehele model domein voor de huidige situatie (subirrigatie) en het scenario zonder subirrigatie. Onder: verschil in gesimuleerde cumulatieve zoutbalansen termen voor het gehele model domein voor de huidige situatie (subirrigatie) en het scenario zonder subirrigatie.

Tabel 7 Water- en zoutbalans over de randen voor de maanden juli t/m juni voor de seizoenen 2020/2021 en 2021/2022 voor de situatie met en zonder subirrigatie. dS geeft de totale verandering over het gehele model domein weer.

Simulatie	Balans	juli-juni	Bovenrand	Legger	Onderrand	Drain	dS
Subirrigatie	Water [mm]	20/21	+45	-41	+16	-27	-7
Geen Subirrigatie	Water [mm]	20/21	+45	-41	+31	-43	-8
Subirrigatie	Zout [kg]	20/21	-27	-2264	+1002	-446	-1736
Geen subirrigatie	Zout [kg]	20/21	-27	-2240	+1934	-912	-1245
Subirrigatie	Water [mm]	21/22	+41	-52	-17	11	-16
Geen subirrigatie	Water [mm]	21/22	+41	-50	+37	-46	-18
Subirrigatie	Zout [kg]	21/22	-6	-2766	-1047	-12	-3830
Geen subirrigatie	Zout [kg]	21/22	-6	-2676	+2341	-743	-1085

4.4 Discussie

4.4.1 Veldproef

Proefperiode

Binnen de proefperiode en de groeiseizoenen van 2020, 2021 en 2022 is sprake geweest van i) zeer droge jaren (2020 en 2022) en een nat jaar (2021), ii) verschillend beheer van de regelbare drainage met subirrigatie tussen jaren, en iii) verschillende gewasteelten tussen jaren. Deze laatste betreft o.a. een variatie in de worteldiepte, die relevant is vanwege de capillaire opstijging bij toepassing van subirrigatie.

In relatief natte groeiseizoenen draagt subirrigatie weinig bij, er is dan immers ook in de situatie zonder subirrigatie voldoende water beschikbaar voor het gewas. In droge seizoenen kan subirrigatie de effecten van droog weer beperken, maar droogteschade niet volledig opheffen. Dit laatste wordt sterker, naarmate het droger wordt.

De verschillende condities zijn van belang om de werking en het effect van regelbare drainage met subirrigatie onder verschillende weercondities en verschillend beheer te onderzoeken. Uit het onderzoek blijkt dat het effect van subirrigatie op gewasopbrengst en de meerwaarde ervan tussen de jaren groot kan zijn. Dit toont aan dat het van belang is om een dergelijke veldproef over voldoende jaren met voldoende variatie in weer en gewasteelten uit te voeren. Ondanks dat we met dit rapport dit project afronden, raden we aan om de meetopstelling in de lucht te houden om een langere meetreeks op te bouwen. Eventueel vervolgonderzoek kan hiervan profiteren.

Metingen

We hebben in dit project sterk ingezet op quasi-continue hydrologische metingen: aanvoer- en afvoerdebiet, bodemvochtgehalte, drukhoogte/zuigspanning en grondwaterstand. Zowel het blok met subirrigatie als het referentieblok zijn uitgerust met een set aan sensoren, die inzicht geven in i) de mogelijkheid om met regelbare drainage met subirrigatie hydrologische randvoorwaarden te creëren in het drainagesysteem, waardoor het grondwater wordt aangevuld ii) de mate waarin de grondwaterstand kan worden verhoogd, zowel direct bij als midden tussen twee buizen en ten opzichte van de stijghoogte in het diepere grondwater en iii) de mate waarin een verhoogde grondwaterstand leidt tot een verbeterde waterbeschikbaarheid in de wortelzone.

De metingen zijn ontsloten via het internet waardoor continu inzicht is gegeven in de toestand van het systeem. Ook zijn metingen met hoge frequentie verzameld, in ieder geval op uurbasis. Dit blijkt in het bijzonder van belang om inzicht te krijgen in de werking van regelbare drainage met subirrigatie, omdat het bodem-grondwater-systeem snel reageert op neerslagoverschot en wateraanvoer.

Naast continuumetingen zijn waterstanden op enkele momenten handmatig opgenomen. De afwijking tussen de handmetingen en automatische metingen zijn klein. Dit betekent dat de drukopnemers goed functioneren. Metingen van bodemvochtgehaltes zijn meer onzeker. Ten eerste zijn de sensoren niet specifiek gekalibreerd voor de bodemtypes in het perceel, maar zijn de 'standaardkalibraties' vanuit de leverancier gebruikt. De absolute waardes van de bodemvochtgehaltes op een bepaald moment kunnen daarmee wat afwijken van de werkelijkheid. De variatie in de tijd, als gevolg van neerslag, capillaire nalevering vanuit het grondwater en wateropname door de wortels, kan echter goed worden bepaald en geeft belangrijk inzicht. Cruciaal bleek de keuze om naast bodemvochtgehaltes ook de drukhoogte in de wortelzone te meten (zuigspanning). De gemeten drukhoogte geeft een directe indicatie van een eventueel vochttekort voor het gewas, want de wortels van de gewassen kunnen via een verschil in drukhoogte met het bodemwater het vocht opnemen. Voor de drukhoogte zijn sensoren (twee typen tensiometers) gebruikt die belangrijk aanvullend inzicht gaven in het effect van subirrigatie op de waterbeschikbaarheid voor de plant dan bodemvochtgehaltes alleen. De pF-curve in de veldsituatie,

die is verkregen door (de logaritme van) gemeten drukhoogtes af te zetten tegen gemeten bodemvochtgehaltes, komt goed overeen met die van kleibodems zoals gegeven in de literatuur (Staringreeks). Dit geeft vertrouwen in de kwaliteit van de metingen. Aangezien de drukhoogtemetingen i) met sensoren kunnen worden gedaan, ii) deze op hetzelfde online-systeem kunnen worden aangesloten, en iii) belangrijke aanvullende informatie geven bovenop grondwaterstanden en bodemvochtgehaltes, bevelen we aan om deze op te nemen in een 'standaardprotocol' om inzicht te krijgen in de effecten van hydrologische maatregelen op de vochtvoorziening voor gewassen. Het meten van bodemvochtgehaltes alleen geeft onvoldoende inzicht in effecten van regelbare drainage met subirrigatie op gewasproductie.

Ten slotte: de meetopstelling genereert via de data inzicht in de belangrijkste hydrologische randvoorwaarden die het effect van regelbare drainage met subirrigatie bepalen, zoals het slootpeil, stijghoogte in de diepere ondergrond, debiet van wateraanvoer en waterafvoer, en het waterniveau in de regelput. Deze set aan metingen maakt het mogelijk om hydrologische perceelmodellen op te stellen en te kalibreren en om de situatie in het veld te begrijpen en te duiden.

Beheer

Regelbare drainage met subirrigatie maakt het mogelijk om sturing te geven aan de waterhuishouding van een perceel. Door beheer kan draineren, water vasthouden en aanvoer gestuurd worden naar gelang doel en behoefte. De waterhuishouding van een perceel wordt gelijktijdig ook beïnvloed door het watersysteem in de omgeving en het grondwater en door de bodem ter plekke.

Wateraanvoer: het realiseren van de benodigde zoet wateraanvoer bleek niet gemakkelijk, maar is toch goed gelukt. De inspanning van AIKC Rusthoeve was groot, omdat zoet water getransporteerd moest worden vanuit de boerderij naar het proefveld. Binnen de proef is in de eerste winter 2020-2021 geen water vastgehouden (vrije drainage). Daarmee startte het seizoen 2021 met lagere (normale) grondwaterstanden, die tot een grotere watervraag leidden. Daarnaast is de wateraanvoer voor subirrigatie met name in de eerste twee jaar in het groeiseizoen later gestart dan wenselijk was voor optimaal beheer van regelbare drainage met subirrigatie en het tijdig realiseren van een voldoende hoge grondwaterstand.

De watervraag voor subirrigatie is aanzienlijk (175 à 200 mm per groeiseizoen), maar kan verkleind worden door goed beheer van i) het systeem zélf door tijdig water vast te houden en ii) verhoging van oppervlaktewaterpeilen door het waterschap, waardoor verliezen naar de omgeving worden beperkt. Daarnaast voedt een groot deel van het aangevoerde water het grondwater en blijft daarmee behouden in en voor het bodem-water-systeem.

Water draineren of vasthouden: voor het beheer van regelbare drainage is het van belang dat water zoveel mogelijk wordt vastgehouden en drainage alleen plaatsvindt als het echt nodig is. Zo wordt onnodige drainage voorkomen en zoet water vastgehouden/ gebufferd in de ondergrond. Dat dit mogelijk is, en ook belangrijk is, is aangetoond in de veldproef, door in de winter van 2020-2021 de drainagebasis in de regelput laag te houden en in de winter van 2021-2022 hoog. Ten eerste is het zo mogelijk om met een hogere grondwaterstand het groeiseizoen in te gaan, ook in de situatie zonder subirrigatie. Ten tweede is de gewenste grondwaterstand bij subirrigatie sneller gerealiseerd en is minder wateraanvoer nodig, als met een voldoende hoge grondwaterstand wordt gestart. In een nat seizoen, zoals in 2021, was er geen sprake van te natte omstandigheden of wateroverlast. Het regelbare drainagesysteem was in staat om het overvloedige grondwater tijdig af te voeren. Blijft wel het punt van de constatering tijdens de proefperiode van plassen op het land tijdens en na buien, zowel in de winter als tijdens de zomer, terwijl de grondwaterstanden beneden draindiepte waren en er geen drainafvoer was. Plasvorming is afhankelijk van de doorlatendheid van de toplaag en staat blijkbaar los van de regelbare drainage. Water in de bovengrond was onvoldoende snel in staat

verticaal te percoleren. De regelbare drainage kan het risico op natschade niet of nauwelijks beïnvloeden, zolang de toplaag tot plasvorming leidt.

De hoogte van de drainagebasis (stand van de overstort in de regelput) is in de verschillende groeiseizoenen gelijk gehouden, onafhankelijk van het geteelde gewas en de weerscondities. Meer mogelijkheden voor (geautomatiseerd) adaptief beheer van het systeem ontstaan wanneer de drainagebasis flexibel kan worden ingesteld, zoals met KlimaatAdaptieve Drainage (KAD). Gecombineerd met metingen zoals hierboven geschetst, biedt dit ook de mogelijkheid om, gebruikmakend van de weersverwachting, bijvoorbeeld op dagbasis het systeem zo in te stellen dat de vochtcondities in de wortelzone optimaal zijn voor het gewas (Bartholomeus et al., 2015; Terink et al., 2022). Een dergelijke geautomatiseerde aansturing van het systeem is operationeel in een proefveld in Stegeren (Overijssel).

Waterbeheer in directe omgeving: het peil van de leggerwatergang is niet veranderd ten opzichte van het standaard peilbeheer van het waterschap. Doordat bij subirrigatie de grondwaterstand wordt verhoogd, neemt het stijghoogteverschil met het waterpeil toe en wordt drainage naar de watergang vergroot. Zo gaat er grondwater verloren naar het oppervlaktewater. Dit 'waterverlies' draagt ook bij aan de hoeveelheid water die nodig is voor subirrigatie. De subirrigatie wordt effectiever als het peil van de watergangen in de directe omgeving mee omhoog beweegt. Er is dan absoluut gezien (m^3) minder aanvoerwater nodig. Als het beheer van het oppervlaktewaterpeil door het waterschap wordt afgestemd op het actieve grondwaterbeheer in het proefblok, wordt de hoeveelheid water die nodig is voor subirrigatie kleiner. Van belang is dus dat er goede afstemming plaatsvindt tussen landeigenaren en de waterbeheerder om de effectiviteit van perceelmaatregelen te vergroten.

Bodembeheer: tijdens de praktijkproef is tijdens en na buien geconstateerd dat er sprake was van plasvorming en een natte bouwvoor, bij afwezigheid van afvoer via de drainbuizen en dus verhoogde grondwaterstanden. Er leek mogelijk sprake te zijn van verdichting van de ondergrond en/of een ploegzool. Na een locatie-onderzoek leek hier niet duidelijk sprake van te zijn. Uit de hydrologische modellering bleek wel dat de overgang van klei naar zand transport van water belemmert. De effectiviteit van regelbare drainage met subirrigatie hangt mede af van de fysische bodemkwaliteit. Neerwaarts én opwaarts transport van water in de bodem zijn beide belangrijk.

4.4.2 Modellering onverzadigde/verzadigde zone op perceelschaal

Voor de modelmatig analyse hebben we gekozen voor een combinatie van 1D en 2D modellen, die samen inzicht verschaffen in de waterbalans van het perceel en in de waterstroming in de bodem. Deze aanpak biedt de mogelijkheid om effecten van regelbare drainage met subirrigatie in relatie tot het regionale grondwater en waterlopen ter plekke te duiden. Voor het 2D model hebben we gekozen voor een modelcode die het mogelijk maakt om zouttransport en effecten van dichtheidsstroming te berekenen. De combinatie van deze modellen maakt het mogelijk effecten van regelbare drainage met subirrigatie op de waterhuishouding te duiden.

Het 1D model SWAP is gebruikt om het effect van subirrigatie op 'standplaatscondities' te reproduceren zoals gemeten in het veld en ook om het effect op verschillende componenten van de waterbalans in te schatten. De eerste en meest belangrijke component is de verdamping van het gewas onder invloed van de bodem, het weer en de regelbare drainage met subirrigatie. In de modellering hebben we voort kunnen bouwen op ervaringen die zijn opgedaan via de literatuur en voor studies op de zandgronden (de Wit et al. 2021). De metingen tonen aan dat de waterstand in de regelput niet constant is en het gewenste peil in de regelput ook niet instantaan gerealiseerd kan worden; het niveau hangt af van de wisselwerking tussen grondwaterstand, neerslag en wateraanvoer. Met SWAP zijn we in staat om deze dynamiek mee te nemen in de simulaties. Modelresultaten geven aan dat de overgang van klei (0-60 cm-mv) naar zand een belangrijke barrière vormt tegen neerwaartse stroming van water: deze stagneert op deze laag, waardoor in

periodes van neerslag de bodem daarboven, ook in de situatie zonder subirrigatie, vochtig tot nat blijft. De verschillen tussen wel/geen subirrigatie zijn daardoor in de modelsimulaties klein. De structuurovergang zal ook effect hebben op de mate van capillaire opstijging vanuit het grondwater. In een meer uniforme bodem en zonder stagnatie van neerslag ondiep in het bodemprofiel, zullen de verschillen tussen wel en geen subirrigatie groter zijn.

De bodemfysische eigenschappen waarmee is gerekend (na kalibratie), komen overeen met pF-curves die typisch zijn voor kleigronden. De curves zijn wel steil, waardoor een kleine verandering in vochtgehalte tot een grote verandering in drukhoogte kan leiden. Echter, het zijn deze drukhoogtes die bepalen of er voldoende water voor het gewas beschikbaar is om te transpireren. In de modellering, zowel voor situaties met als zonder subirrigatie, worden er in het model dusdanig lage drukhoogtes gemodelleerd dat in beide situaties sprake is van droogtestress. De drukhoogtes zijn lager dan gemeten. Mogelijk wordt de droogtestress in het model dus overschat en de verschillen tussen wel/geen subirrigatie onderschat. NB: er is modelmatig geen rekening gehouden met zwel/krimp van de zavel/kleigrond ter plekke en de effecten hiervan.

Modelresultaten geven aan dat een deel van het aangevoerde water ten goede komt aan verhoogde transpiratie van het gewas, dat een deel naar de sloot wordt afgevoerd, en een deel het diepere grondwater voedt. Afvoer naar de sloot kan worden gereguleerd door het peilregime aan te passen aan de grondwaterstanden in het perceel. Aanvulling van het grondwater hoeft niet als verlies gezien te worden, als zo zoet water in het grondwatersysteem behouden blijft. De modelopzet geeft de mogelijkheid om bij ontwerp van regelbare drainage (met of zonder subirrigatie) vooraf in te schatten welke grondwaterstanden gecreëerd kunnen worden, hoeveel water hiervoor nodig is, waar het water naartoe stroomt, en hoe het beheer geoptimaliseerd kan worden. Het opgezette model voor het proefblok kan als basis dienen voor verkenningen voor het effect van regelbare drainage met subirrigatie op andere plaatsen, en voor mogelijke optimalisaties in de aansturing van de systemen.

De 1D SWAP modellering geeft geen inzicht in de dichtheidsstroming (zoet-zout) rondom de drains en tussen de drains. Vanwege de aanwezigheid van zoute kwel in het studiegebied, die kan leiden tot (te) hoge zoutconcentraties in de wortelzone, is een 2D SUTRA modellering ingezet om inzicht te krijgen in de dichtheidsstroming (zoet-zout) bij en tussen de drains, en op verschillende dieptes.

De SUTRA 2D modelresultaten tonen aan dat het met subirrigatie mogelijk is om zoute kwel uit de ondergrond terug te dringen en dat daarmee 'verzouting' van het profiel wordt tegengegaan. Dit gebeurt met name op draindiepte (1,20 m-mv) en dieper en niet of nauwelijks op dieptes van 75 cm-mv en ondieper. Het is belangrijk te beseffen dat deze simulatieresultaten horen bij het beheer zoals dat heeft plaatsgevonden gedurende de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. Het is bijvoorbeeld bekend dat de wateraanvoer met name in het eerste jaar later in het groeiseizoen gestart is dan voor optimaal beheer van regelbare drainage met subirrigatie wenselijk was. Dit beïnvloedt de mate waarin verzoeting van het profiel kan plaatsvinden: was er eerder begonnen met wateraanvoer voor subirrigatie, dan hadden we mogelijk wel verzoeting gesimuleerd dichter (ondieper) bij maaiveld. Hetzelfde geldt voor de periode november 2020 t/m mei 2021, een periode waar in het model met name drainage plaatsvindt. Hiervoor geldt dat er meer zoute kwel naar de drains stroomt i.p.v. dat de zoute kwel wordt teruggedrongen. Dit beperkt de mogelijkheden tot het creëren van een ondiepe zoetwaterlens. Achteraf bleek dat er in de praktijk tijdens deze periode een opzetstuk in de regelput is geplaatst waardoor de drainagebasis tijdelijk is verhoogd. Hierdoor is er in de praktijk gedurende deze periode meer water vastgehouden en dus minder afgevoerd dan gesimuleerd door de modellen. In de praktijk heeft dus mogelijk meer verzoeting plaatsgevonden tijdens deze periode van "water vasthouden" omdat de zoute kwel hierdoor minder de kans heeft gekregen. De crux van bovenstaande is dat het optimaal sturen van het waterpeil in de regelput, wat niet altijd optimaal gebeurd is tijdens de proef (leerproces), cruciaal is voor het bereiken van de gewenste resultaten zoals verzoeting ondieper in het profiel.

Lokale boringen, alsmede de geomorfologische kaart, tonen aan dat er veel variatie is in de bodem van het studiegebied. De geomorfologische kaart toont bijvoorbeeld aan dat er erosiegeulen door de percelen lopen die lokaal zorgen voor een hogere doorlatendheid. Daarnaast kan de ondiepe klei gaan scheuren tijdens perioden van droogte. In de praktijk is de bodem dus vele malen complexer dan hoe deze in SUTRA is gemodelleerd. In SUTRA is namelijk aangenomen dat de bodem alleen varieert in de diepte (op basis van de profielboringen), maar niet in horizontale richting. Dit brengt enige onzekerheid in de modelresultaten met zich mee.

Naast de complexe bodemopbouw beïnvloeden de gekozen modelparameters de modelresultaten. Met name de "dispersivity" (dispersiviteit) beïnvloedt in sterke mate hoe een stof zich verspreidt in de bodem in horizontale en verticale richting. In SUTRA wordt onderscheid gemaakt tussen de "longitudinal dispersivity" (spreiding langs de maximale stromingsrichting) en de "transverse dispersivity" (spreiding loodrecht op de maximale stromingsrichting). Volgens Gelhar et al. (1992) is de "transverse dispersivity" typisch een factor kleiner dan de "longitudinal dispersivity"; in onze modelleringen hebben we hiervoor een factor 10 aangehouden. De maximale stroming in het perceel is doorgaans in verticale richting; simpel gezegd betekent dit dat in de modelleringen een stof in oplossing zich in de verticale richting 10x sneller verspreidt dan in de horizontale richting.

Ondanks de onzekerheden in bodemopbouw en gekozen modelparameters is de SUTRA modelexercitie nuttig geweest om inzicht te krijgen in hoeverre subirrigatie kan bijdragen aan verzoeting van het grondwater in het bodemprofiel en het terugdringen van zoute kwel. De modelonzekerheden kunnen verkleind worden door op meerdere locaties (in de ruimte en in de diepte) zoutmetingen te verrichten, en in de ruimte meer profielboringen te doen. Voor vervolgonderzoek is het interessant om te onderzoeken in hoeverre het "optimaal" beheren van de regelput kan bijdragen aan verzoeting ondieper in de bodem, ondersteund door een combinatie van SUTRA modelleerwerk en lokale metingen.

5 Conclusies

Met betrekking op de drie doelstellingen van het project kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

Doelstelling 1. Via een praktijkproef testen of het systeem van regelbare drainage met subirrigatie op Proefboerderij AIKC Rusthoeve (als voorbeeld voor akkerbouwgebieden met een vergelijkbare bodemstructuur), gebruikt kan worden als watervoorziening in periodes van droogte door het beschikbaar komen van water voor de planten via verhoogde freatische grondwaterstanden door capillaire opstijging vanuit het grondwater.

- De praktijkproef is technisch gelukt: de bestaande regelbare drainage is gecontroleerd en uitgebreid met subirrigatie met zoet water. Er is praktijkervaring opgedaan met de bediening van de subirrigatie en met water vasthouden in de winter en voorjaar. Het gebruikte systeem werkt naar behoren.
- De monitoring van hydrologie en gewasopbrengst is gelukt. Er waren enige storingen in de apparatuur, maar in het algemeen zijn de waarnemingen geslaagd en bruikbaar. Het is de moeite waard gebleken om nauwgezet en continu te meten aan de hydrologie van een (proef)blok.
- Op de aanwezige zavel-/kleigronden is het mogelijk met subirrigatie de grondwaterstand dusdanig te verhogen dat via capillaire opstijging de vochtbeschikbaarheid voor het gewas wordt vergroot.
- Door wateraanvoer via het regelbare drainagesysteem (subirrigatie) hebben we de grondwaterstand in het groeiseizoen kunnen verhogen en de capillaire opstijging naar de wortelzone kunnen bevorderen. Met name in droge zomers heeft subirrigatie een positief effect. In nattere zomers niet, bij aanwezigheid van voldoende regenval.
- In droge jaren kan subirrigatie de effecten van droogte en minder d.s. opbrengst van gewassen weliswaar beperken; de meeropbrengst met subirrigatie lijkt echter vanuit de akkerbouwmatige kant gezien niet beter kostendekkend of rendabel op basis van de cijfers in dit project: vergelijking met andere (recente) bronnen van cijfers is nodig.
- De watervraag voor subirrigatie is aanzienlijk, en daarmee een belemmering voor gebieden zoals rondom AIKC Rusthoeve waar weinig tot geen zoet water beschikbaar is. De watervraag kan wel verkleind worden. i) door goed beheer van het systeem zelf door tijdig water vast te houden, en ii) door oppervlaktewaterpeilen te verhogen, waardoor verliezen naar de omgeving worden beperkt. Overigens voedt een groot deel van het aangevoerde water het grondwater en blijft daarmee behouden in het systeem.
- De praktijkervaring die is opgedaan met het management van het regelbare drainagesysteem kan verder geoptimaliseerd worden door meer en langer water vast te houden en eerder in het seizoen te starten met subirrigatie.
- Om de effectiviteit van regelbare drainage met subirrigatie te vergroten kan meer aandacht gegeven worden aan fysische bodemkwaliteit. Neerwaarts én opwaarts transport van water in de bodem zijn beide belangrijk. Tijdens de praktijkproef was er bij regenbuien herhaaldelijk sprake van plassen op het land, bij afwezigheid van drainafvoer. Aanwezigheid van eventuele verdichting van de ondergrond kon niet worden aangetoond met een veldonderzoek. Uit modelanalyses volgde wel het stagnerende effect van de laagovergang tussen klei en zand.

***Doelstelling 2.** Via modelberekeningen, getoetst op de praktijkproef, doorvertaling maken van de werking van het systeem op andere condities.*

- Met het 1D model SWAP is het mogelijk de complexiteit van de werking van regelbare drainage met subirrigatie te vatten en ook (niet bemeten) componenten van de waterbalans te kwantificeren. Dit laatste betreft met name de transpiratie van het gewas onder invloed van subirrigatie. Modelresultaten geven handvatten voor toepassing van systemen op andere locaties, maar ook tot optimaliseren van het gebruik op een specifieke locatie. Het lukt modelmatig in voldoende mate om de metingen tijdens de praktijkproef te representeren en te benaderen. Goede en intensieve hydrologische metingen blijken zeer waardevol voor het modelwerk.
- Met het 1D SWAP model is de werkelijke verdamping van het gewas uitgerekend. De transpiratie wordt modelmatig positief beïnvloed door subirrigatie, al is het effect modelmatig zeer beperkt. Dit hangt samen met dusdanig lage gesimuleerde drukhoogtes in de wortelzone, voor zowel de situatie met als zonder subirrigatie, dat voor beide situaties een hoge transpiratiereductie wordt gesimuleerd. De gesimuleerde transpiratiereductie is zeer gevoelig voor kleine veranderingen in vochtgehalte, door de steile waterretentiecurve. De gesimuleerde drukhoogtes zijn lager dan gemeten in het veld. De gesimuleerde transpiratiereductie wordt daardoor waarschijnlijk overschat.
- Met het 2D model SUTRA is het mogelijk om de stroming van water en zout en de effecten van regelbare drainage met subirrigatie ook ruimtelijk (in een 2D-transect) binnen een perceel te bekijken. De stroming van water en transport van zout in de bodem van en naar de wortelzone, drainagebuizen en waterlopen kan berekend worden. In vergelijking tot SWAP zijn met dit model concessies gedaan in het detail waarmee het waterniveau in de regelput en gewasontwikkeling kunnen worden gemodelleerd, maar een belangrijke meerwaarde is het inzichtelijk maken van het effect van regelbare drainage met/zonder subirrigatie op het zoet-zout grensvlak.
- Het gebruik van zoet water voor subirrigatie heeft als resultaat dat de zoute kwel wordt teruggedrongen. Hierdoor treedt verzoeting van het profiel op. Dit gebeurt met name rondom draindiepte (1,2 m-mv) en dieper. Op een diepte van 0,75 m-mv en ondieper is dit verzoetingseffect nauwelijks zichtbaar. Het verzoetingseffect gebeurt met name in de verticaal, en in mindere mate horizontaal tussen de drains. Er treedt geen zoutschade op in de wortelzone van gewassen door toepassing van subirrigatie.
- De leggerwatergang en het peilbeheer hiervan is van duidelijke invloed op de hydrologie van de bemeten percelen. Er vindt drainage van zoet water plaats naar deze watergang, in de winter en in de zomer. Daardoor is de subirrigatie minder effectief op het proefblok.
- De combinatie van SWAP- en SUTRA-modellen is waardevol gebleken bij de analyse van de metingen in de praktijkproef.

***Doelstelling 3.** Actief kennis te delen over bovenstaande met betrokkenen in de streek.*

In meerdere bijeenkomsten, zowel fysiek bij Rusthoeve in het veld als via webinars, is kennis gedeeld. Dit varieert van een veldbezoek in 2020 van minister Van Nieuwenhuizen (MinlenW) tot kennismiddagen/avonden met agrariërs, webinars en het delen van kennis met betrokkenen in Vlaanderen (B) op het vlak van water, bodem en landbouw. Een aantal zaken komt in deze sessies naar voren:

- Het is belangrijk om metingen, feiten, kennis en ervaring uit te wisselen tussen onderzoekers, adviseurs, agrariërs uit de praktijk en beleidsmakers inzake regelbare drainage met subirrigatie. Dit lukt onvoldoende met alleen rapportages: bijeenkomsten zijn nuttig.
- Er is meer begrip gekomen voor de relevante processen in de wisselwerking tussen bodem-water-plant-atmosfeer en hoe regelbare drainage met subirrigatie, maar ook andere maatregelen zoals druppelirrigatie de waterbeschikbaarheid voor gewassen kunnen

beïnvloeden. Door de opzet van de veldproef, met goede monitoring, spreken metingen in plaats van modelresultaten. Metingen zijn overtuigend en de modellen geven nuttige aanvullende inzichten.

- Regelbare drainage met subirrigatie vereist passend beheer: water draineren, vasthouden en aanvoeren vormt één geheel qua management van de waterhuishouding van een perceel. Daarnaast is een goed werkende en stuurbare regelbare drainage met subirrigatie mede afhankelijk van een bodemprofiel, dat fysisch in een goede staat bevindt. Ook is het lokale effect van subirrigatie mede afhankelijk van de lokale drainagesituatie, die mede bepaald wordt door peilbeheer in watergangen in de nabijheid, die in beheer zijn van het waterschap. Als deze watergangen een lager peil hebben in het seizoen dan de verhoogde grondwaterstand ter plekke, dan stroomt er grondwater naar deze watergangen; dit betekent waterverlies voor het blok met subirrigatie.
- Subirrigatie is niet dé oplossing, maar kan in gevallen wel een bijdrage leveren om zoet water te bufferen en gewasverdamping te ondersteunen. Het is daarmee één van de ingrediënten die beschouwd kunnen worden in het werken aan de klimaatrobustheid van de provincie Zeeland.
- Aandacht wordt gevraagd voor de bron van zoet water voor subirrigatie (ook nodig bij andere vormen van irrigatie). Op Rusthoeve is daarvoor regenwater opgevangen in een bassin, maar op andere locaties worden ook andere bronnen benut, zoals ondergronds gebufferd drainagewater. Aanbevolen wordt om te onderzoeken welke bronnen benut kunnen worden. Te denken valt aan opslag van overtollig regenwater, of drainagewater in watervoerende pakketten onder een (semi-)afsluitende kleilaag (voorbeeld-project DrainStore Meulwaeter, Kruiningen; Van Dooren et al., 2021) of gebruik van zoet oppervlaktewater om in de winter en voorjaar grondwater actief te voeden (voorbeeld Kreekruginfiltratie in de Waterhouderij Walcheren), of brak water via subirrigatie toe te dienen om het zoete water in de wortelzone te houden (zie H6.2). Aanvullende analyses zijn nodig om zowel de beschikbare bronnen verder in beeld te brengen, als het effect van het gebruik van die bronnen op de zoetwaterbeschikbaarheid in de wortelzone van gewassen. Er zullen gebieden zijn waar een bron van zoet water van voldoende omvang 'eenvoudig' niet beschikbaar is. Op deze plekken is subirrigatie dan ook geen passende maatregel.
- Een analyse van kosten en baten van subirrigatie en vergelijking met die van andere irrigatiemethoden moet gebaseerd zijn op onderling vergelijkbare kosten en batenanalyses.
- Ervaringen uit de zuidwestelijke delta van Nederland op het vlak van regelbare drainage met subirrigatie zijn belangrijk om te delen met andere landsdelen en met Vlaanderen (B), en vice versa.

6 Doorkijk en aanbevelingen

6.1 Regionale geschiktheid regelbare drainage met subirrigatie

6.1.1 Geschiktheid

Voor verdere uitwerking is het van belang om een doorvertaling te maken van de geschiktheid van het systeem van regelbare drainage met subirrigatie naar de regio Zeeland.

In 2012 is in opdracht van de provincie Zeeland een regionale kaart gemaakt voor gebieden die geschikt zijn voor regelbare drainage (van Bakel et al., 2013; Eertwegh et al., 2012). Eén van de criteria die daarvoor gebruikt is, is de aanwezigheid van klei op draindiepte. Door de aanwezigheid van klei op draindiepte kunnen de drains eerder verstopt raken, waardoor het systeem van regelbare drainage hiervoor minder geschikt is. Hetzelfde criterium is ook toepasbaar voor het systeem van regelbare drainage met subirrigatie. Deze kaart is weergegeven in Figuur 72 in Bijlage D. De gebieden die hier zijn aangegeven als zijnde geschikt zijn de gebieden zonder de aanwezigheid van klei op draindiepte.

Naast de aanwezigheid van klei op draindiepte zijn er voor dit project de volgende drie criteria toegevoegd om de regionale geschiktheid voor een systeem van regelbare drainage met subirrigatie te toetsen:

1. GLG gelijk aan of ondieper dan 160 cm-mv
2. Zoute kwel < 1,25 mm/dag
3. Wegzijging < 0,50 mm/dag

GLG gelijk aan of ondieper dan 160 cm-mv:

Bij subirrigatie wordt de grondwaterstand omhoog gebracht zodat er eerder en vaker capillaire nalevering kan plaatsvinden. De grondwaterstand mag hiervoor niet te laag zijn omdat er anders te veel water nodig is voor subirrigatie om de grondwaterstand voldoende omhoog te brengen, en de beschikbaarheid van zoet water in Zeeland is al schaars. Voor dit criterium hebben we gekeken naar de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG). Hiervoor is aangenomen dat het systeem van regelbare drainage met subirrigatie ongeschikt is als de GLG dieper is dan 160 cm-mv.

Voor de GLG is in dit project gebruik gemaakt van het Grondwaterspiegeldieptemodel (WDM) (de Gruijter et al., 2004; Hoogland et al., 2014). Dit model geeft de GLG, GVG, en GHG weer op een ruimtelijke resolutie van 50 bij 50 m, en maakt gebruik van metingen en daarmee samenhangende informatie, zoals statistische fluctuaties van de grondwaterspiegeldiepte in Nederland. De GLG voor de Provincie Zeeland op basis van het WDM is weergegeven in Figuur 73 in Bijlage D. De geschiktheid op basis van het criterium "GLG gelijk aan of ondieper dan 160 cm-mv" is weergegeven in Figuur 74 in Bijlage D.

Zoute kwel < 1,25 mm/dag en wegzijging < 0,50 mm/dag:

De laatste twee criteria zijn hier gecombineerd omdat ze in deze studie gebaseerd zijn op de "Waterkansenkaart: Infiltratie-kwel"⁷ van de Provincie Zeeland. Deze kaart is weergegeven in Figuur 75 in Bijlage D.

Regelbare drainage met subirrigatie is niet geschikt als er te veel wegzijging plaatsvindt of als er sprake is van te veel zoute kwel. Bij te veel wegzijging loopt een deel van het via subirrigatie

⁷ <https://dataportaal.zeeland.nl/dataportaal/srv/dut/catalog.search#/metadata/ebc21ae3-55c8-4c41-aba8-b638a3d629d2>

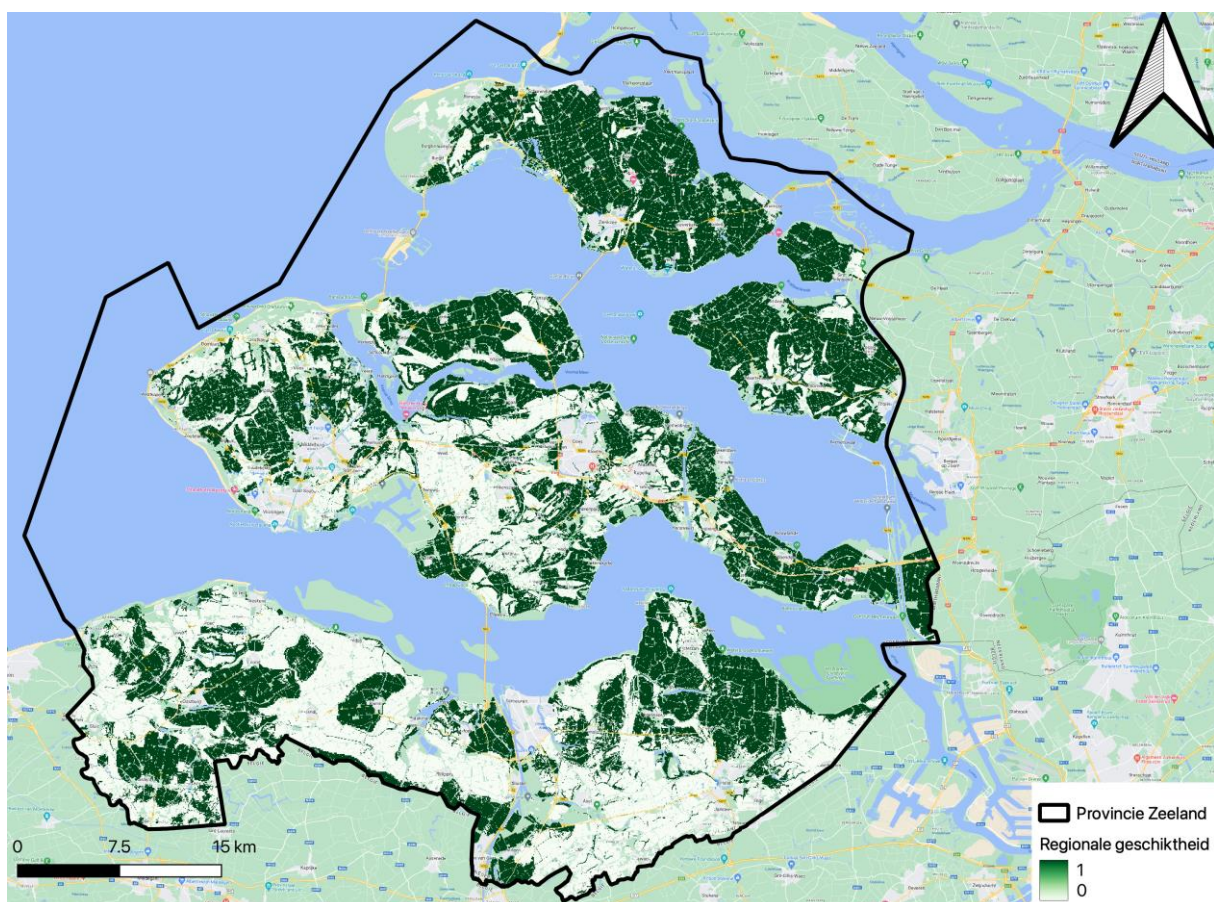
ingebrachte water weg naar de diepere ondergrond en resulteert daardoor niet in een (directe) grondwaterstandstijging. Voor wegzijging houden we in deze studie hetzelfde criterium aan van 0,5 mm/dag (geringe belvorming) als in de studie van FutureWater (van Bakel et al., 2013): gebieden met een wegzijging kleiner dan 0,5 mm/dag zijn geschikt voor een systeem van regelbare drainage met subirrigatie.

Een teveel aan zoute kwel kan leiden tot te hoge zoutconcentraties in de wortelzone, die op hun beurt vervolgens kunnen resulteren in zoutstress voor de gewassen waardoor de vochtopname via de wortelzone deels of volledig stopt (van Bakel et al., 2009; van Dam et al., 1997). Deze studie heeft aangetoond dat subirrigatie deels in staat is om zoute kwel terug te dringen. Als criterium hebben we aangenomen dat zoute kwel tot 1,25 mm/dag tegengehouden/teruggedrongen kan worden met een systeem van regelbare drainage met subirrigatie.

De geschiktheid op basis van de criteria wegzijging < 0,50 mm/dag en zoute kwel < 1,25 mm/dag resulteert in de geschiktheidskaart zoals weergegeven in Figuur 76 in Bijlage D.

De uiteindelijke geschiktheid voor een systeem van regelbare drainage met subirrigatie in de Provincie Zeeland is gebaseerd op een combinatie van de hierboven genoemde kaarten, en is weergegeven in Figuur 43. De “geschikte” gebieden zijn dus gebieden waar:

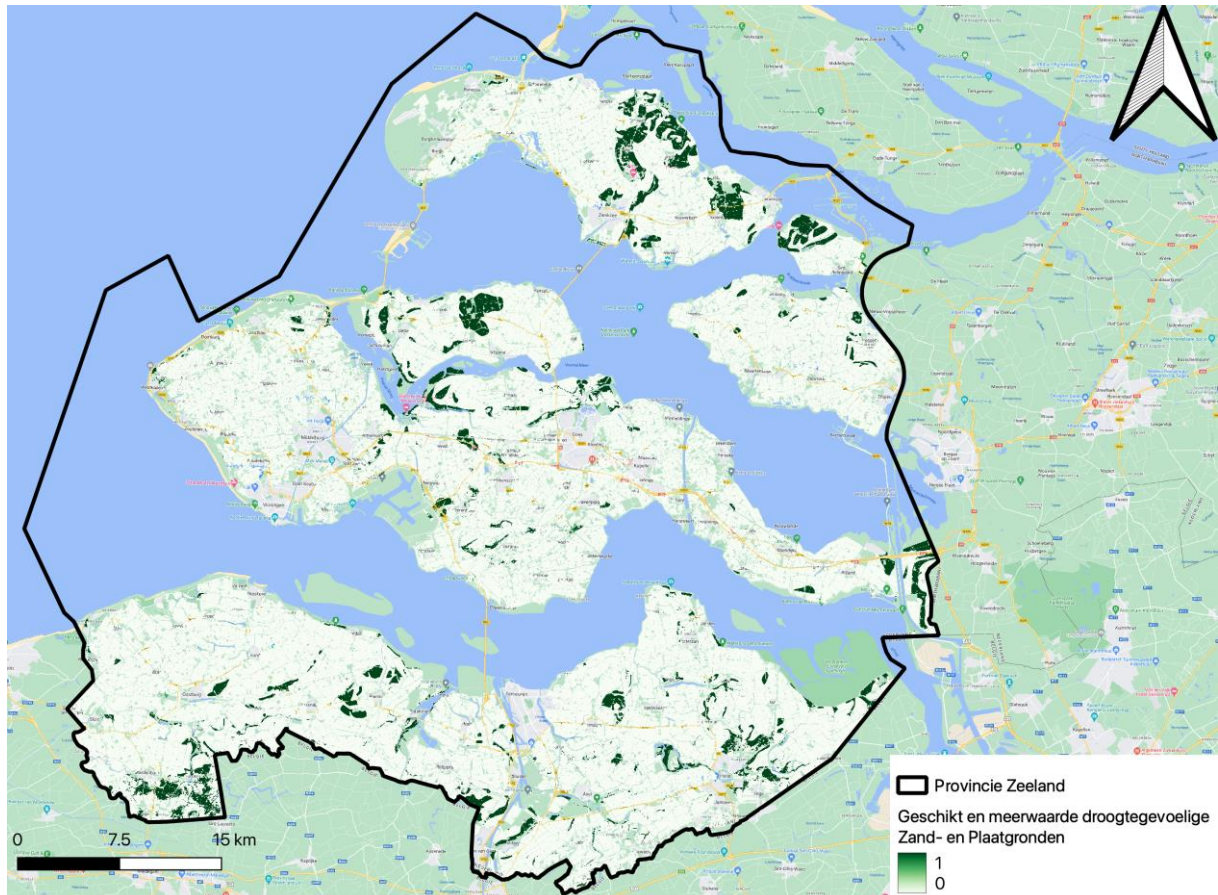
1. Geen kleilaag aanwezig is op draindiepte.
2. De GLG ondieper is dan 160 cm-mv.
3. De wegzijging kleiner is dan 0,50 mm/dag.
4. De zoute kwel kleiner is dan 1,25 mm/dag.



Figuur 43 Regionale geschiktheid regelbare drainage met subirrigatie.

6.1.2 Droogtegevoeligheid

In relatie tot de vochtvoorziening heeft een systeem van regelbare drainage met subirrigatie name een toegevoegde waarde op droogtegevoelige gronden. In de Provincie Zeeland zijn dit de Zand- en Plaatgronden (zie Figuur 77 en Figuur 78 in Bijlage D). Door de kaart met de ligging van Zand- en Plaatgronden te combineren met de regionale geschiktheidskaart van Figuur 43 kunnen we zien waar het systeem zowel hydrologisch gezien mogelijk is, als waar het de hoogste meerwaarde heeft in relatie tot de vochtvoorziening van droogtegevoelige gronden (Figuur 44).



Figuur 44 Regionale geschiktheid en meerwaarde voor droogtegevoelige Zand- en Plaatgronden.

6.2 Subirrigatie met brak water tijdens perioden van waterschaarste

De 2D SUTRA modelsimulaties hebben aangetoond dat subirrigatie met zoet water de zoute kwel kan beperken. Al hoewel dit tot verzoeting leidt op draindiepte en dieper, vindt er nauwelijks verzoeting plaats op dieptes van 75 cm-mv en ondieper. Omdat i) subirrigatie met zoet water nauwelijks tot verzoeting in deze zone leidt, en ii) de enige bron van zoet water lokaal opgevangen regenwater is wat niet altijd in voldoende mate aanwezig is, is het interessant om te onderzoeken of brak water voor subirrigatie gebruikt kan worden tijdens perioden van zoetwaterschaarste. Hiervoor dient getoetst te worden of, en in welke mate, het ondiepe bodemprofiel zouter wordt bij het gebruik van brak water i.p.v. zoet water voor subirrigatie.

De leggerwatergang is altijd watervoerend en is daarmee de enige lokale bron van oppervlaktewater dat mogelijk ingezet kan worden voor subirrigatie tijdens perioden van zoetwaterschaarste. Figuur 62 in Bijlage C laat de gemeten zoutconcentratie in deze watergang zien. We zien dat de zoutconcentratie hierin sterk varieert en dat deze in veel gevallen te hoog is om te gebruiken voor subirrigatie. Echter, er zijn periodes waar het zoutgehalte lager is en fluctueert tussen de 5 en 10 mS/cm.

Om te toetsen of het brakke water uit de leggerwatergang gebruikt kan worden tijdens perioden van zoetwaterschaarste hebben we een eerste verkennende SUTRA modelsimulatie gedaan waarin we dezelfde stand in de regelput hanteren als in de huidige situatie voor het proefblok, maar waarbij we de zoutconcentratie hebben verhoogd van 0 naar 5 mS/cm. Dit betekent dat zodra er subirrigatie plaatsvindt, dat dit altijd gebeurt met een zoutconcentratie van 5 mS/cm. Deze simulatie is hierdoor conservatief omdat i) het waterpeil in de put tijdens de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022 niet optimaal geregeld is, en ii) er in werkelijkheid alleen subirrigatie met brak water zal plaatsvinden zodra er sprake is van zoetwaterschaarste.

Figuur 45 laat de gesimuleerde zoutconcentraties zien tussen de 50 en 120 cm-mv voor de huidige situatie (regelbare drainage met subirrigatie, proefblok) en voor het scenario waarin subirrigatie plaatsvindt met een zoutconcentratie van 5 mS/cm. We zien dat op draindiepte (120 cm-mv) de zoutconcentratie bij de drain ca. 5 mS/cm hoger is bij dit scenario. Tijdens perioden waar voornamelijk subirrigatie plaatsvindt (augustus t/m september 2020 en juni t/m augustus 2022) is de zoutconcentratie met dit scenario op 75 cm-mv maximaal ca. 3,5 mS/cm hoger, en op 50 cm-mv maximaal 1,5 mS/cm hoger. Tussen de drains zien we geen verschillen met dit scenario.



Figuur 45 Boven: verschil in gesimuleerde zoutconcentraties bij de drain op verschillende dieptes tussen de huidige situatie (subirrigatie) en het scenario subirrigatie met een zoutconcentratie van 5 mS/cm. Onder: idem, maar tussen de drains.

Op basis van bovenstaande analyse kunnen we concluderen dat het gebruik van water met een zoutconcentratie van 5 mS/cm voor subirrigatie niet resulteert in een sterke stijging van de zoutconcentratie op dieptes ondieper dan 75 cm-mv. Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat 5 mS/cm niet "erg" zout is en ongeveer van dezelfde waarde is als de beginconcentraties op deze dieptes. Voor een vervolgonderzoek bevelen we daarom op het gebied van dichtheidsstroming (zoet-zout) het volgende aan:

- Testen van hogere zoutconcentraties voor gebruik met subirrigatie
- Testen van management scenario waarin optimaal gestuurd wordt met het waterpeil in de put, waarbij slim gebruik gemaakt wordt van zowel zoet als brak water.

7 Bibliografie

- 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(1–2), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.004>
- van Bakel, J., van den Eertwegh, G., Massop, H., & Brandsma, J. (2013). *Klimaat Adaptieve Drainage – landelijke geschiktheid van conventionele samengestelde peilgestuurde en klimaatadaptieve drainage*. Wageningen.
- van Bakel, P. J. T., Kselik, R. A. L., Roest, C. W. J., & Smit, A. A. M. F. R. (2009). *Review of crop salt tolerance in the Netherlands*. Wageningen.
- Bartholomeus, R., Simons, G. W. H., & van den Eertwegh, G. (2015). *Anticipating on amplifying water stress: Optimal crop production supported by climate-adaptive water management*. Nieuwegein. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/545467>
- Bartholomeus, R., van Huijgevoort, M., van den Eertwegh, G., & van Deijl, D. (2019). *Efficiëntie van berekening en subirrigatie uit grondwater*. Nieuwegein.
- van der Bok, N. E. (2022). *Profielbeoordeling. Rusthoeve kavel 10*. Wageningen.
- van der Burgt, E., en D. Verstand (2021) WUR rapport WPR-900.
- van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., van Walsum, P. E. v, et al. (1997). *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*.
- Doherty, J. E., Hunt, R. J., & Tonkin, M. J. (2010). *Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Model-Parameter and Predictive-Uncertainty Analysis*. Scientific Investigations Report 2010–5211. Reston.
- van Dooren, T.C.G.W., Ros, S.E.M., Van der Schans, M.L., 2021. DrainStore: vergroten van zoetwaterbeschikbaarheid voor irrigatie door koppeling van peilgestuurde drainage en ondergrondse waterberging. Evaluatie praktijkproef Meulwaeter, Kruiningen. KWR 2021.114. <https://library.kwrwater.nl/publication/68255195/>
- van den Eertwegh, G. A. P. H., van Bakel, J., Stuyt, L., & van der Schans, M. L. (2012). *Drainagegeschiktheidskaarten en handvaten voor opschaling. Onderzoek naar waterkwaliteitseffecten van peilgestuurde diepe drainage in Zeeland*. De Bilt.
- van den Eertwegh, G., van Bakel, J., Stuyt, L., van Iersel, A., Kuipers, L., Talsma, M., & Droogers, P. (2013). *Klimaat Adaptieve Drainage - Een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen - Samenvatting resultaten Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling.'* Wageningen.
- van den Eertwegh, G., & Droogers, P. (2013). *Klimaat Adaptieve Drainage - Een analyse van kosten en baten voor waterbeheerder en agrariër*. FutureWater rapport 120. Wageningen.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs* (Pudoc). Wageningen University.
- Gelhar, L. W., Welty, C., & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, 28(7), 1955–1974. <https://doi.org/10.1029/92WR00607>
- Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- de Grijter, J., van der Horst, J., Heuvelink, G., Knotters, M., & Hoogland, T. (2004). *Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwater- standsinformatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat*. Wageningen.
- Heinen, M., Bakker, G., & Wösten, J. H. M. (2018). *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Wageningen.
- Hoogland, T., Knotters, M., Pleijter, M., & Walvoort, D. J. J. (2014). *Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland. Resultaten van het veldonderzoek*. Wageningen.

- Hummelman, J., Maljers, D., Menkovic, A., Reindersma, R., Vernes, R., & Stafleu, J. (2019). *Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch Model (REGIS II)*. Utrecht. Retrieved from <https://www.broloket.nl/sites/default/files/Totstandkomingsrapport-REGIS-II.pdf>
- Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., van den Hurk, B., & Lenderink, G. (2014). *KNMI'14. Klimaatscenario's voor Nederland. Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*. De Bilt.
- Klijn, F., ter Maat, J., van Velzen, E., Baarse, G., Beumer, V., Delsman, J., et al. (2011). *Zoetwatervoorziening in Nederland - landelijke analyse knelpunten in de 21e eeuw*. Deltares.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Kroes, J. G., van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., et al. (2017). *SWAP version 4. Theory description and user manual*. Wageningen.
- Mulder, M., Hack-ten Broeke, M., Bartholomeus, R., van Dam, J., Heinen, M., van Bakel, J., et al. (2018). *Waterwijzer landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie*. Amersfoort. Retrieved from [https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties 2018/STOWA 2018-48 WWL defversie.pdf](https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%2018/STOWA%2018-48%20WWL%20defversie.pdf)
- 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. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 85–117). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/398_2020_49
- PPO (2003). *Teelthandleiding zaaiuien*. Lelystad.
- Provost, A. M., & Voss, C. I. (2019). SUTRA, a Model for Saturated-Unsaturated, Variable- Density Groundwater Flow with Solute or Energy Transport—Documentation of Generalized Boundary Conditions, a Modified Implementation of Specified Pressures and Concentrations or Temperatures, and the Lake Capability. In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6*. (pp. 1–62). Reston: U.S. Geological Survey.
- Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., et al. (2022). The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth's Future*, 10(3). <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- Royo, C., & Villegas, D. (2011). Field Measurements of Canopy Spectra for Biomass Assessment of Small-Grain Cereals. In *Biomass - Detection, Production and Usage*. InTech. <https://doi.org/10.5772/17745>
- Schipper, P. N. M., Heinen, M., Jansen, P., Stuyt, L., & Dik, P. (2015). *Praktijkproef Regelbare Drainage proefbedrijf Rusthoeve 2010-2014. Eindverslag praktijkproef naar de effecten van regelbare en verdiept aangelegde drains op klei in Zeeland*. Wageningen.
- Sluijter, R., Plieger, M., van Oldenborgh, G. J., Beersma, J., & de Vries, H. (2018). *De droogte van 2018. Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort*. De Bilt. Retrieved from https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/155645/20181129_de_droogte_van_2018_-_een_analyse_op_basis_van_het_potentiele_neerslagtekort.pdf
- Stuyt, L.C.P.M., M. Blom-Zandstra en R.A.L. Kselink (2016). Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. WUR-WEnR, Rapport 2739, ISSN 1566-7197.
- Terink, W., Deijl, D. van, & van den Eertwegh, G. (2022). *Watervraag en watervoorziening in aanvoergebied Stegeren*. Nijmegen.
- Voss, C. I., & Provost, A. M. (2010). *SUTRA. A model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport. Version 2.2*. Reston.
- de Wit, J. A., Ritsema, C. J., van Dam, J. C., van den Eertwegh, G. A. P. H., & Bartholomeus, R. P. (2022). Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge. *Agricultural Water Management*, 269, 107677. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107677>
- de Wit, J., van Huijgevoort, M., van Deijl, D., van den Eertwegh, G., & Bartholomeus, R. (2021). *Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen - Veldproeven en modelanalyses in het*

zandgebied van Nederland voor een meer robuuste waterhuishouding op lokale en regionale schaal. Nieuwegein.

de Wit, Janine, van Huijgevoort, M., van den Eertwegh, G., van Deijl, D., & Bartholomeus, R. (2021). *Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren. Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020). Nieuwegein.*

Bijlage A – Details metingen

Coördinaten sensoren

Tabel 8 Coördinaten en peilbuisgegevens (meet) opstelling.

Omschrijving device	x	y	Z	Lengte buis [m]	Onderkant peilbuis t.o.v. maaiveld	Filteropstelling t.o.v. maaiveld
SUB_BDR_BKB	400184.03	48239.53	0.39	2.00	2.38	1.00-2.00
SUB_BDR_MV	400184.19	48239.70	0.77			
SUB_BDTHETA_MV	400184.37	48239.62	0.74			
SUB_TDR_BKB	400181.80	48241.74	0.41	2.20	2.59	1.20-2.20
SUB_TDR_MV	400181.86	48241.48	0.80			
SUB_TDDIEP_BKB	400181.96	48241.91	0.39	7.00	7.42	6.00-7.00
SUB_TDDIEP_MV	400181.72	48242.20	0.81			
SUB_TDTHETA_MV	400182.47	48242.29	0.70			
SUB_TDTENSIO_MV	400182.78	48241.98	0.89			
SUB_TDLOGGER_MV	400182.77	48242.05	0.86			
REF_BD_BKB	400232.98	48280.37	0.51	2.15	2.57	1.15-2.15
REF_BD_MV	400233.75	48279.95	0.93			
REF_BDTHETA_MV	400233.57	48280.78	0.93			
REF_TD_BKB	400230.85	48282.69	0.56	1.06	1.45	1.06-2.06
REF_TD_MV	400230.51	48282.57	0.95			
REF_TDDIEP_BKB	400231.05	48282.84	0.59	7.25	7.63	6.25-7.25
REF_TDDIEP_MV	400230.98	48283.70	0.97			
REF_TDTHETA_MV	400231.31	48283.29	0.97			
REF_TDTENSIO_MV	400231.49	48283.12	1.06			
REF_TDLOGGER_MV	400231.33	48283.12	1.06			
REGENMETER	400320.10	48240.52	1.13			
REF_SLOOT_BKB	400323.53	48238.22	-0.16			
REF_PUT_BKP	400320.32	48240.96	0.94			
SUB_SLOOT_BKB	400181.48	48145.64	0.27			
SUB_PUT_BKP	400184.69	48148.35	0.76			

*SUB = subirrigatieblok, REF = referentieblok, BKB = bovenkant buis, BKP = bovenkant put, MV = maaiveld, BD(R)= Bij drain, TD(R)= Tussen drain.

Bladvochtigheid

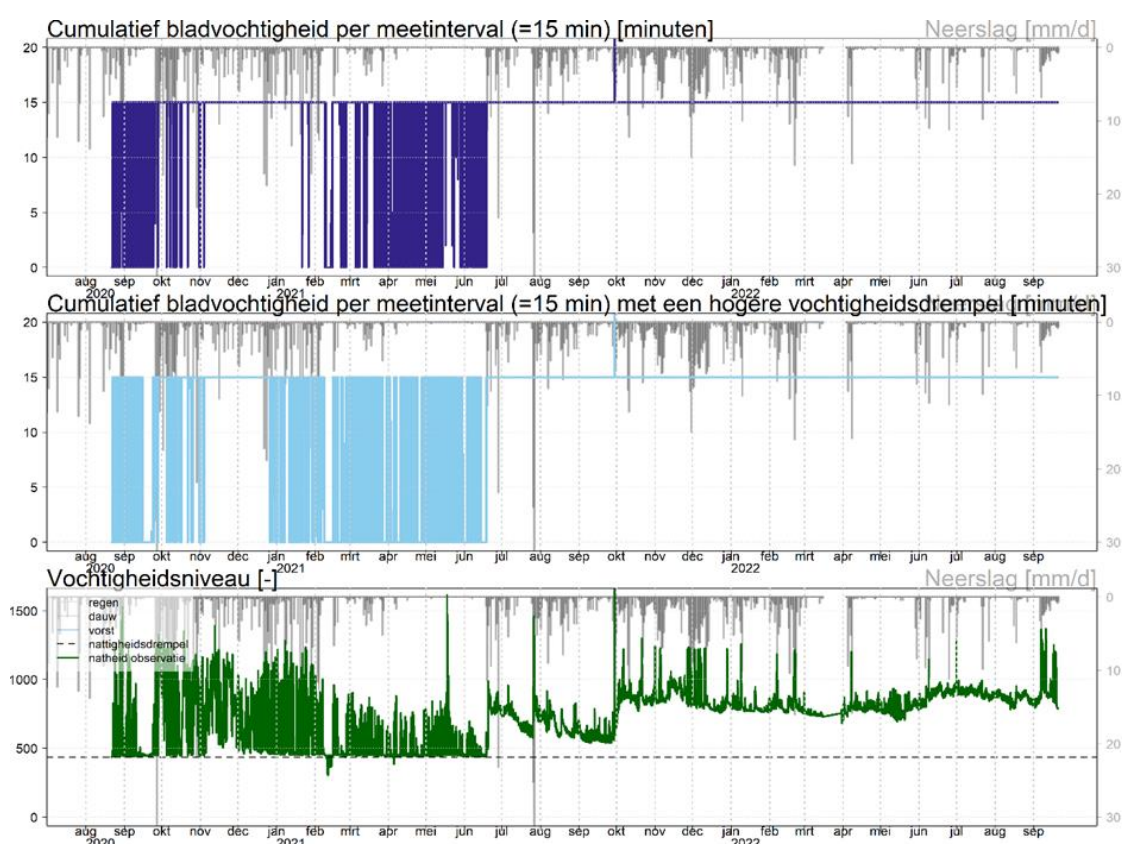
De bladvochtigheidssensor geeft informatie over de toestand van het blad en dus de gewastoestand. De bladvochtigheidssensor is op 21 augustus 2020 geïnstalleerd. De sensor meet het vochtigheidsniveau in 'raw counts', oftewel hoeveel druppeltjes zich op de sensor bevinden, uitgedrukt in i) het 'cumulatief bladvochtigheid' en ii) 'het cumulatief bladvochtigheid met een hogere vochtigheidsdrempel dan in het eerste geval. Als het cumulatief bladvochtigheid gelijk is aan het cumulatieve bladvochtigheid met een hogere vochtigheidsdrempel, betekent dit dat de sensor schoon was in de meetperiode.

Uit de eerste resultaten van het vochtigheidsniveau blijkt (Figuur 46):

- In de zomerperiode is, logischerwijs, voornamelijk regen gemeten.
- Eind september (in de drogere periode) was er geen water aanwezig.
- In het najaar 2020 (oktober – januari) is afwisselend regen en droge dagen te zien.
- Half februari 2021 is een duidelijke vorst- en sneeuwperiode te zien.

Tabel 9 Gemeten waarden met de bladvochtigheidssensor gekoppeld aan de interpretatie volgens de fabrieksinstellingen⁸

Vochtigheidsniveau	Opmerking/ toestand
400 or <400	Bladvochtigheid (Wetness threshold)
435	Dry plant
435-500	Vorst (Frost) - Ijs heeft een lager dielectrisch vermogen dan vloeibaar water.
700	Dauw
1100	Sensor is helemaal nat (hevig regen)

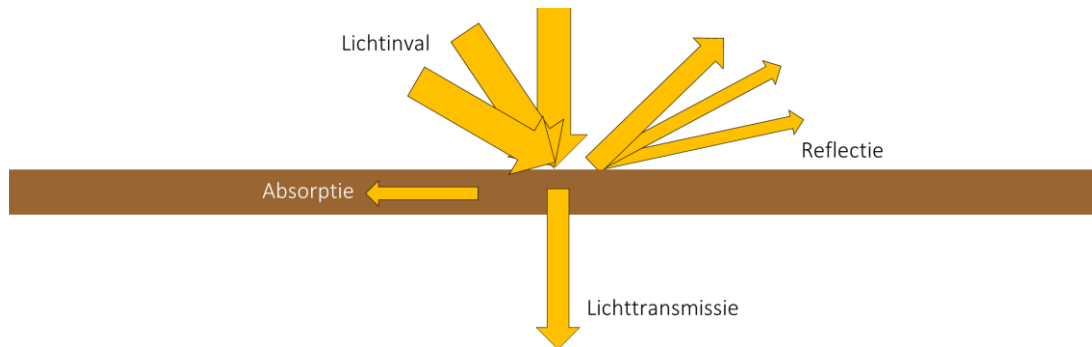


Figuur 46 Gemeten blad natheid met de 'leaf wetness sensor'. Weergegeven is het cumulatief blad natheid per meetinterval van 15 minuten (boven). De middelste grafiek geeft het cumulatief blad natheid per meetinterval weer met een hogere nattigheidsdrempel. De onderste grafiek geeft weer in welke fase het water zich bevond dat op het blad ligt. De neerslag is op het proefblok gemeten met de regenmeter.

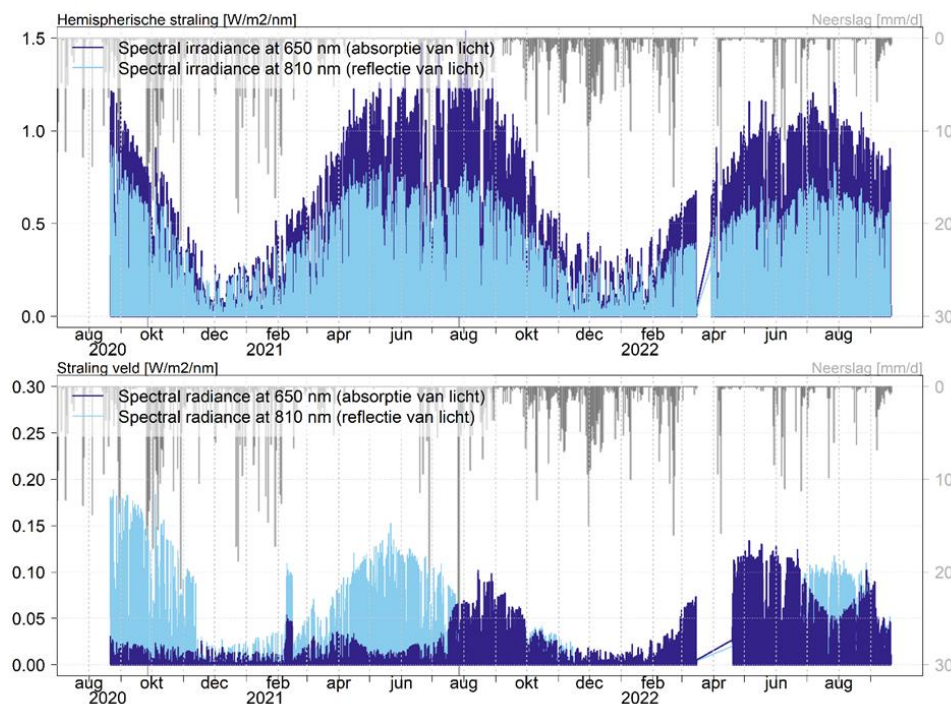
Straling

De straling gericht op de lucht (hemisferisch) en het perceel is gemeten. Het licht dat wordt geabsorbeerd door de plant, is licht dat plant gebruikt bij fotosynthese. Het reflecterende licht wordt als verlies van licht gezien, omdat dit weer direct de lucht in gaat en dus niet gebruikt door de plant (Figuur 47). Er is een duidelijk dagelijks patroon zichtbaar in lichtstraling (Figuur 48). 's Nachts is het donker, waardoor de straling 0 is. Rond het middaguur is de straling op het hoogtepunt.

⁸ <https://www.metergroup.com/environment/products/phytos-31-leaf-wetness-sensor/>

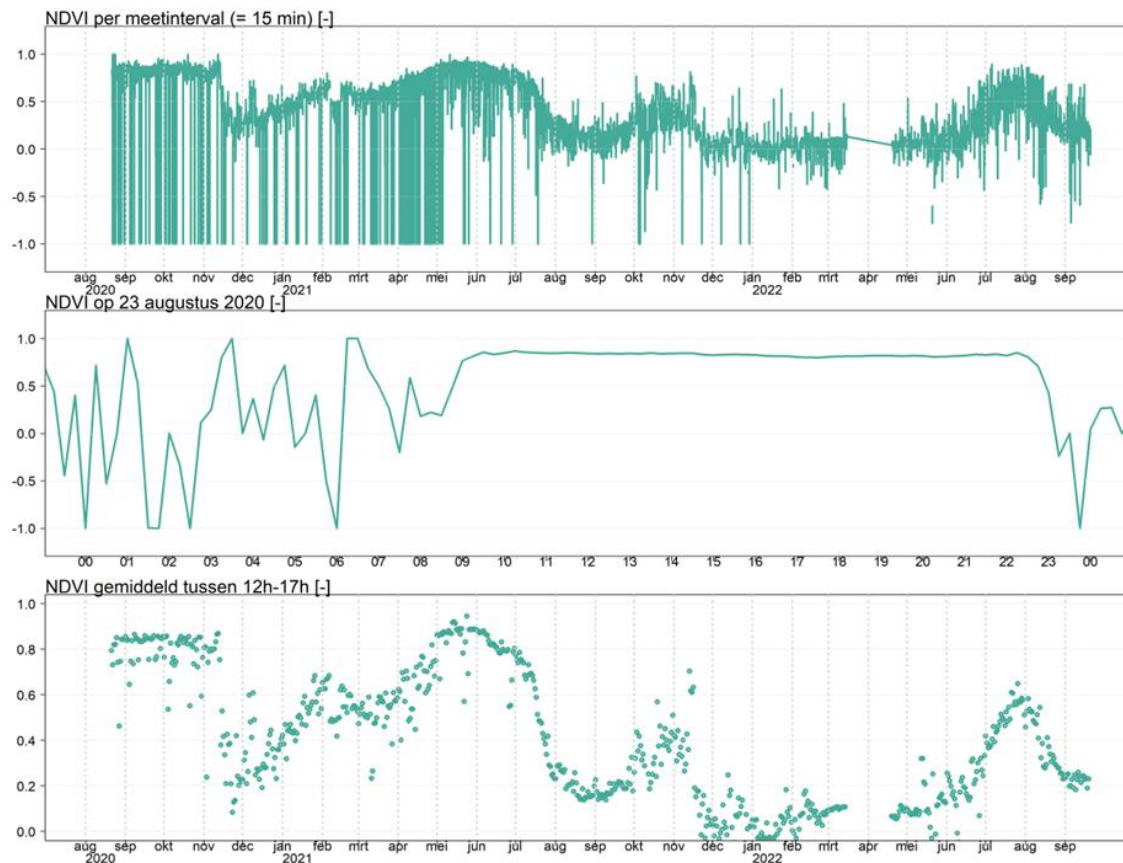


Figuur 47 Beschrijving van lichtinval dat zich verdeelt in i) reflectie, ii) absorptie, en iii) lichttransmissie.



Figuur 48 Gemeten straling met de 'Spectral Reflectance Sensor'. Hemisferische straling (boven) en straling op het veld (beneden). De neerslag is gemeten op het proefveld

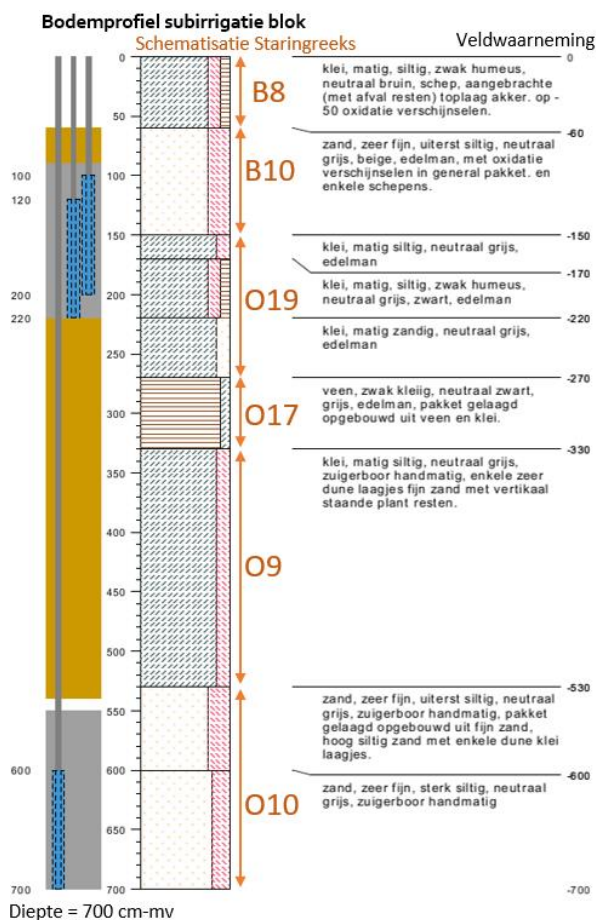
De dagelijkse variabiliteit in de NDVI metingen is groot (Figuur 49). De NDVI die 's middags is gemeten is het meest interessant, omdat dit het moment is dat de plant de huidmondjes open heeft, en voornamelijk verdampt. De NDVI is daarom gemiddeld tussen 12 uur – 17 uur.



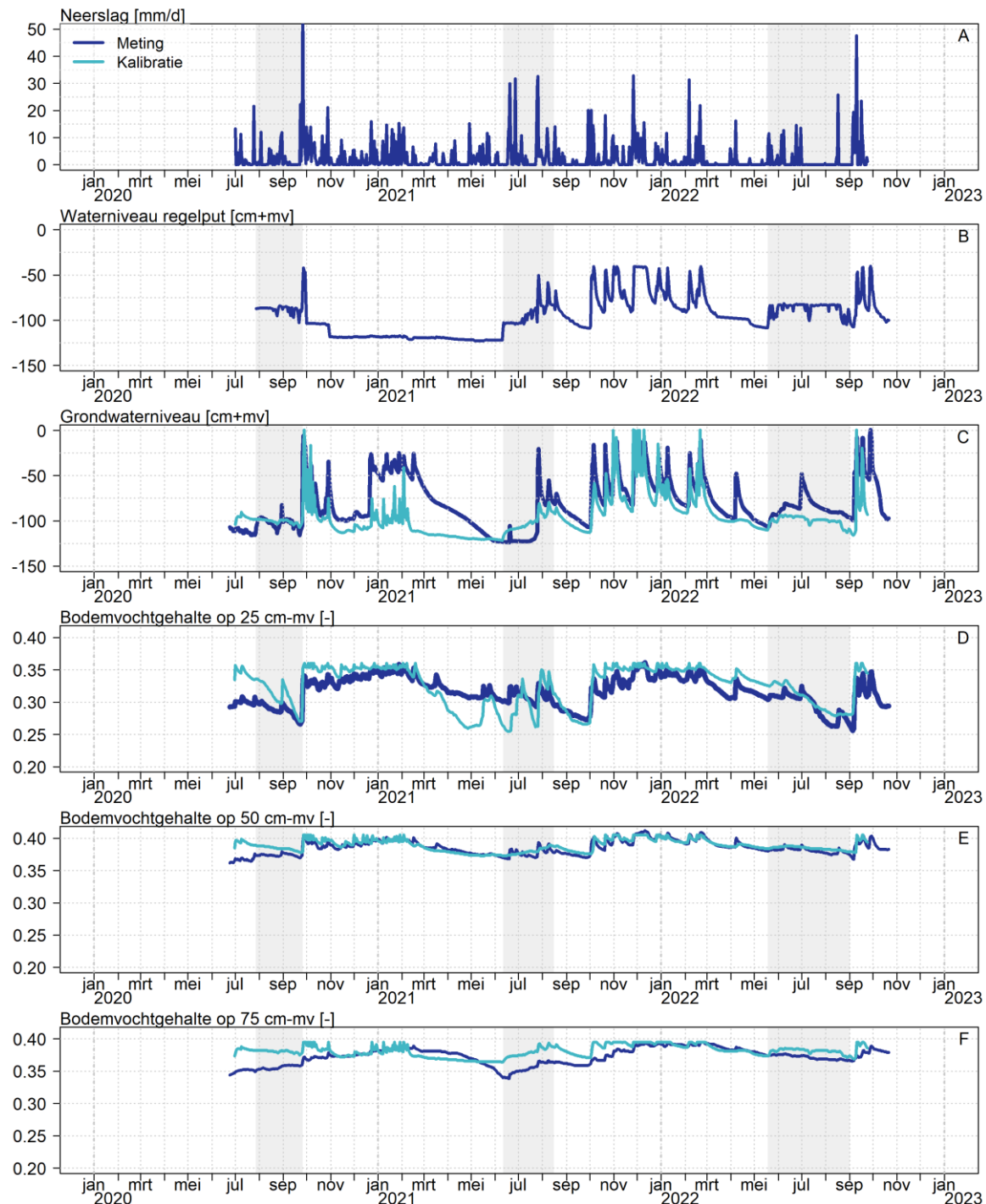
Figuur 49 Gemeten NDVI per meetinterval (= 15 minuten) (boven). Gemeten Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) op 23 augustus 2020, meetinterval is 15 minuten. Het patroon is kenmerkend voor dagelijkse NDVI metingen door het continu veranderen van de hoogte van de zon en de hoek van inkomende zonnestraling (midden). Gemiddeld NDVI in de middag, tussen 12 uur en 17 uur (onder)

Bijlage B – 1D SWAP modellering

Bodemprofiel SWAP



Resultaten kalibratie van proefblok



Figuur 50 Gemeten neerslag (A) en waterniveau in de regelput (B) op het proefblok. Gemeten en gekalibreerde grondwaterniveau (C) en bodemvochtgehalten op 25 cm-mv (D), 50 cm-mv (E) en 75 cm-mv (F). De grijze blokken geven de periode van wateraanvoer weer.

- Het SWAP-model is gekalibreerd aan het gemeten grondwaterniveau (Figuur 50 C) en bodemvochtgehalten op 25, 50 en 75 cm-mv (Figuur 50 D, E, F). Het gekalibreerde grondwaterniveau volgt de metingen, maar wordt met name in de winterperiode 2020-2021 een lagere grondwaterstand gemodelleerd dan is gemeten. In de sectie 'metingen' was al opgemerkt dat er hier sprake is van een groot verschil in gemeten grondwaterstand tussen en bij de drain. Het lukt niet om dit verloop te reproduceren met het model; mogelijk mist er

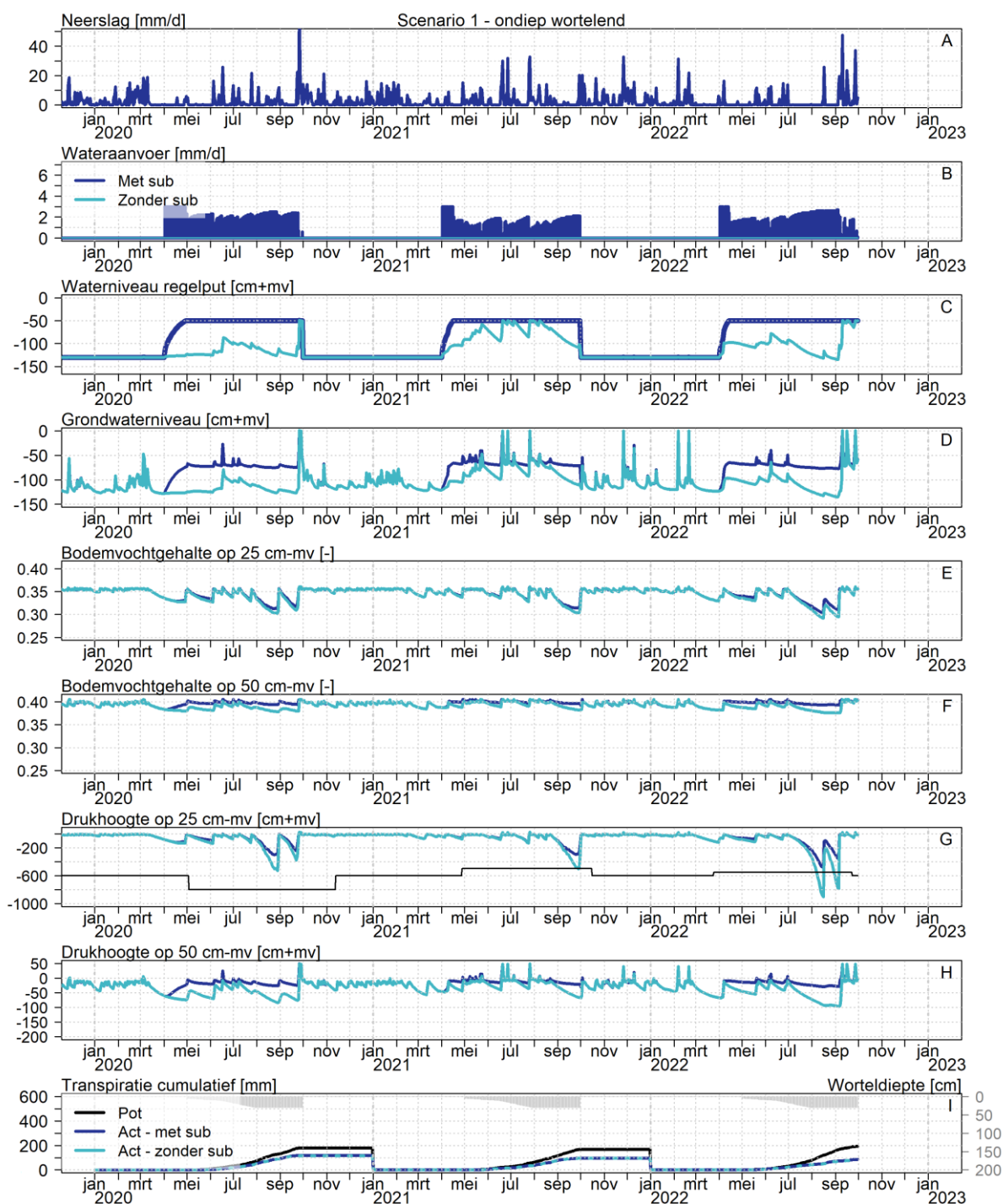
procesinformatie, of is er toch sprake van een onnauwkeurigheid in de meting. Neerslagpieken zijn zowel in de kalibratie als in de meting duidelijk zichtbaar. Als laatste stijgt het grondwaterniveau in het model in juni 2021 als gevolg van het starten van subirrigatie, terwijl de gemeten grondwaterstand tussen de drains pas stijgt als de grondwaterstand bij de drain voldoende is gestegen. Dit toont de beperkingen van een ééndimensionale modelbenadering

- Het gekalibreerde bodemvocht op 25 cm-mv is met name in de winterperioden vrijwel gelijk aan het gemeten bodemvochtgehalte. Het gemeten bodemvochtgehalte in het voorjaar 2021 is hoger dan het gekalibreerde bodemvochtgehalte op 25 cm-mv. Dit betekent dat het model op 25 cm diepte in 2020 iets natter begint ten opzichte van de metingen, terwijl het model in 2021 iets droger t.o.v. de metingen.
- Het gekalibreerde bodemvochtgehalte op 50 cm-mv komt vrijwel overeen met de metingen in de hele meetperiode. Dit betekent dat het vochtgehalte op 50 cm-mv in het model representatief is ten opzichte van de metingen.
- Het gekalibreerde bodemvochtgehalte op 75 cm-mv is in de periode van subirrigatie iets hoger ten opzichte van de metingen, in de winter komt de kalibratie en meting overeen. Dit betekent dat het model in de subirrigatieperiode iets te nat is ten opzichte van de werkelijke situatie.

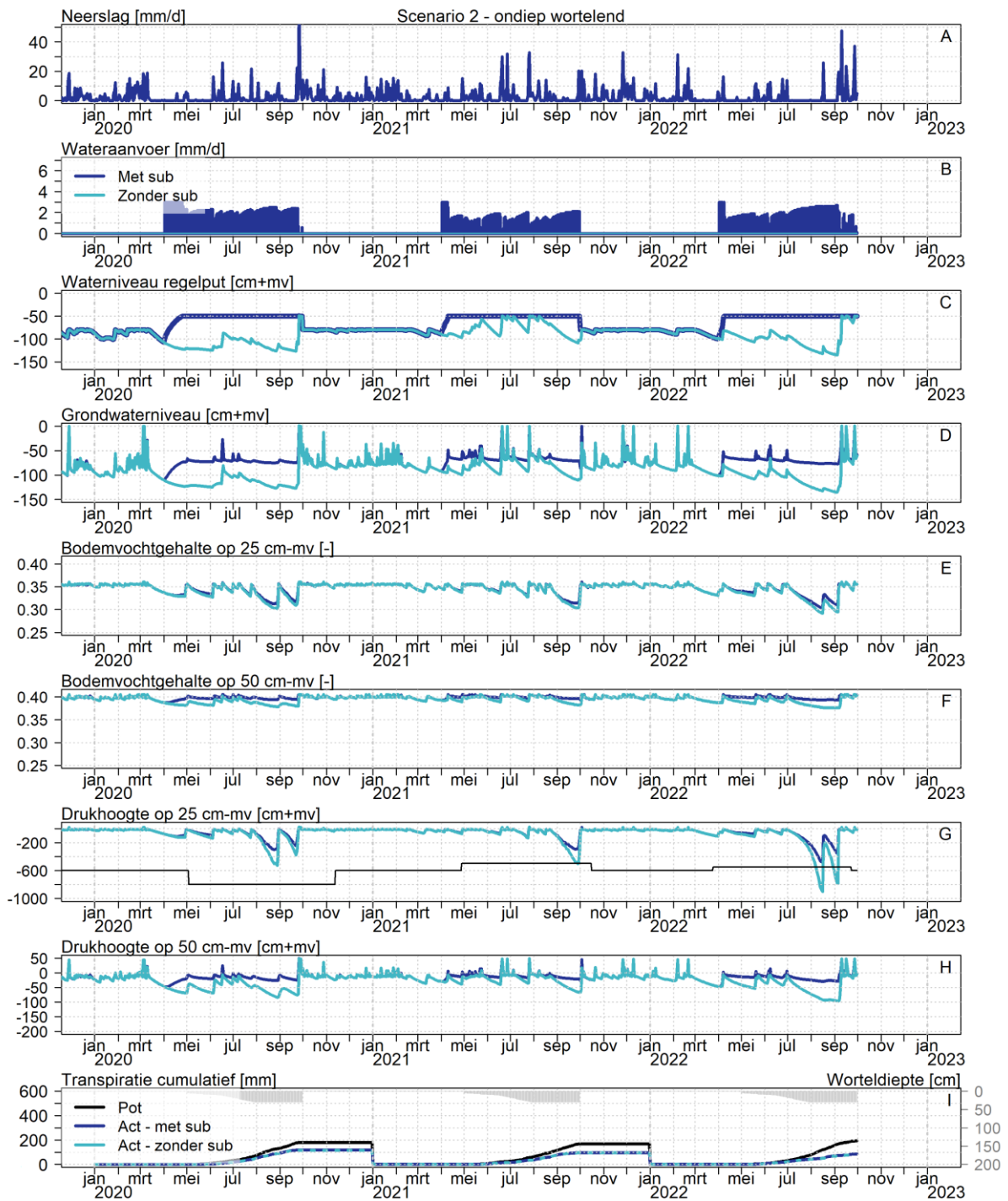
Tabel 10 Berekende statistieken gekalibreerde SWAP model: root mean square error (RMSE), standaard deviatie observaties (STDEVobs), standaard deviatie SWAP simulaties (STDEVsim), RMSE-observations standard deviation ratio (RSE), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) en Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Knoben et al., 2019).

	RMSE	STDEVobs	STDEVsim	RSE	NSE	KGE
GWL	18.29	26.804	21.301	0.682	0.276	0.698
Theta-25	0.022	0.023	0.03	0.933	0.13	0.652
Theta-50	0.008	0.011	0.009	0.714	0.49	0.698
Theta-75	0.016	0.013	0.008	1.218	-0.484	0.42
Theta-all	0.016	0.036	0.034	0.46	0.788	0.919

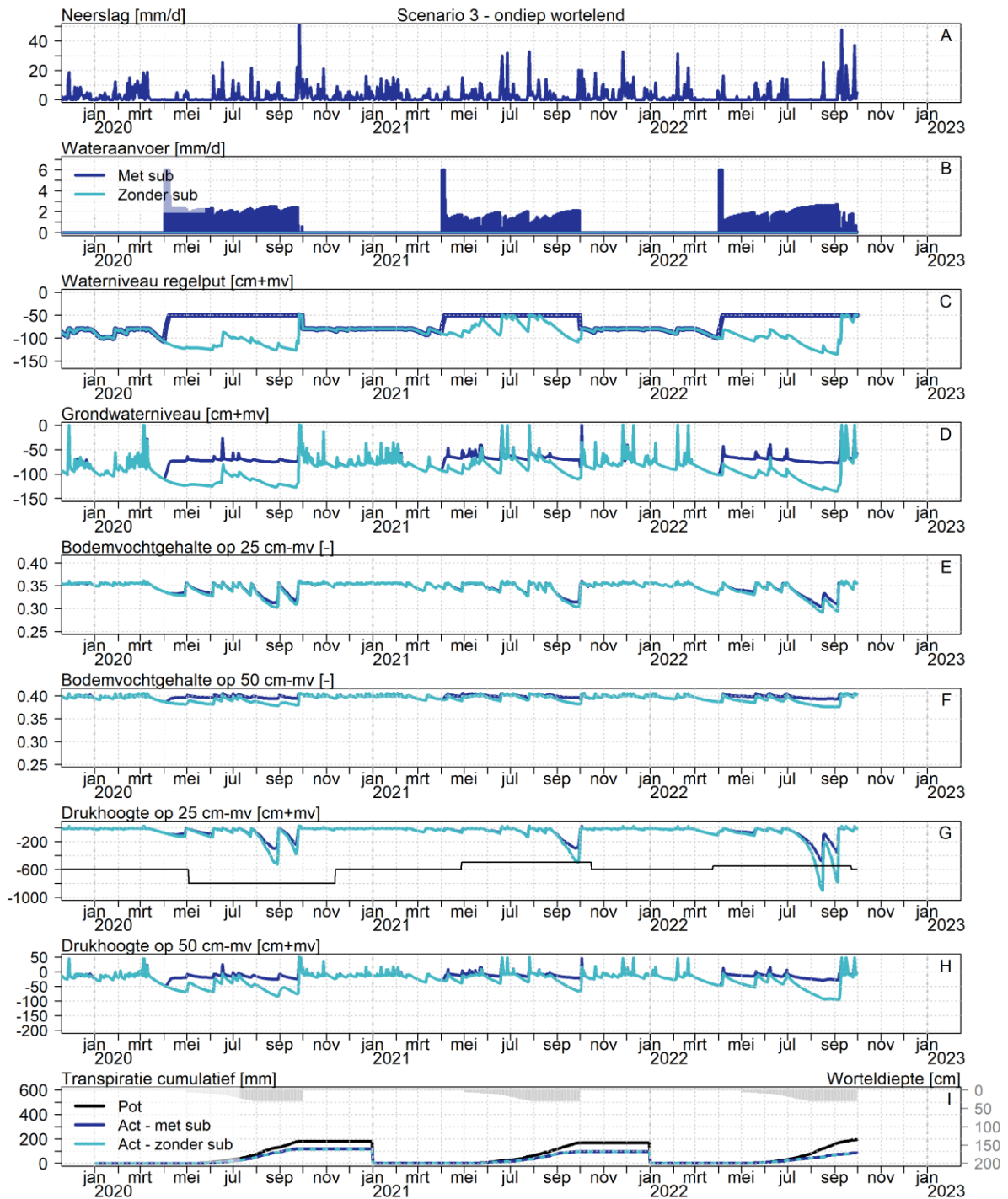
Scenario's



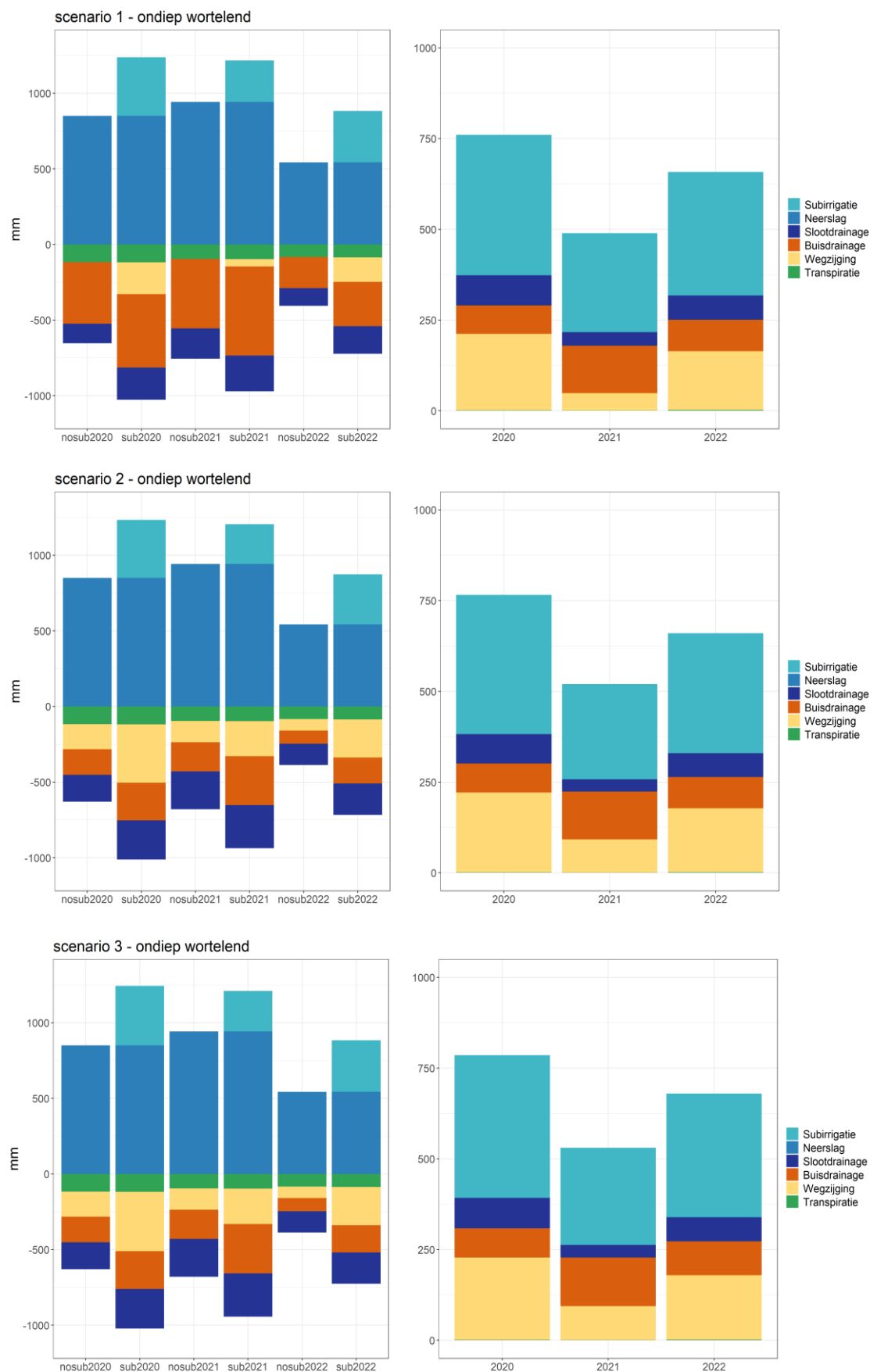
Figuur 51 Resultaten voor 'scenario 1 – ondiep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met 'sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



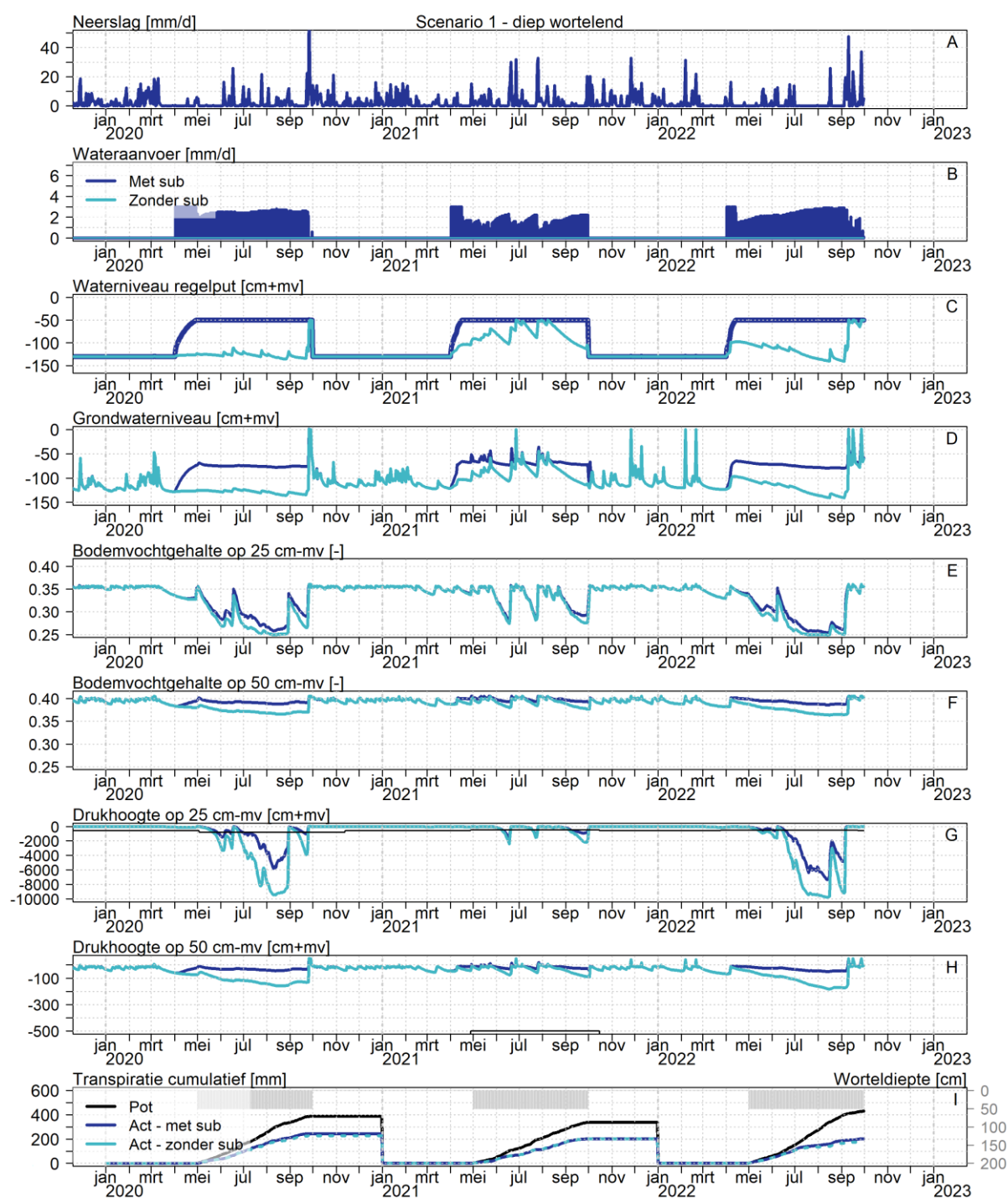
Figuur 52 Resultaten voor 'scenario 2 – ondiep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



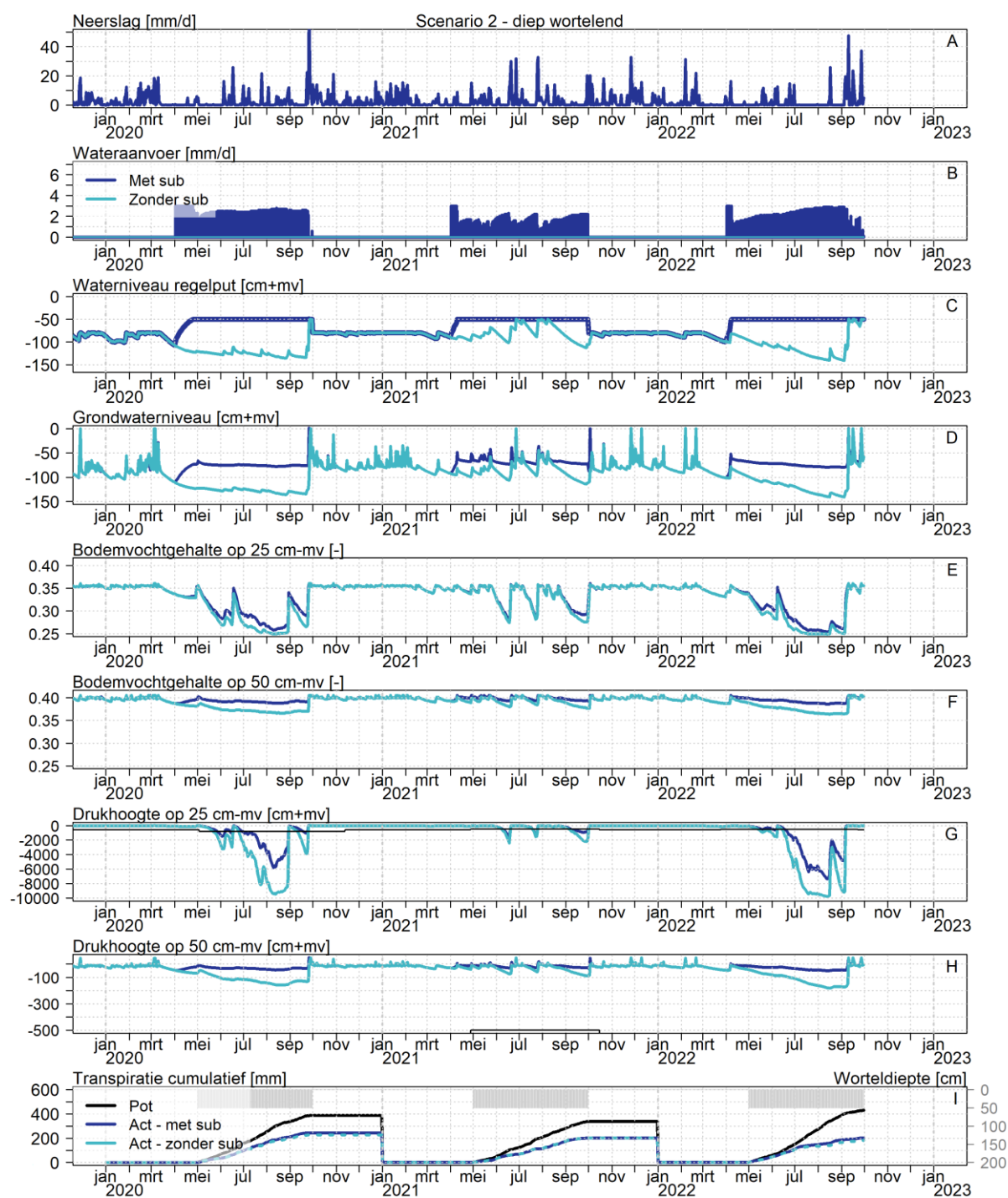
Figuur 53 Resultaten voor 'scenario 3 – ondiep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



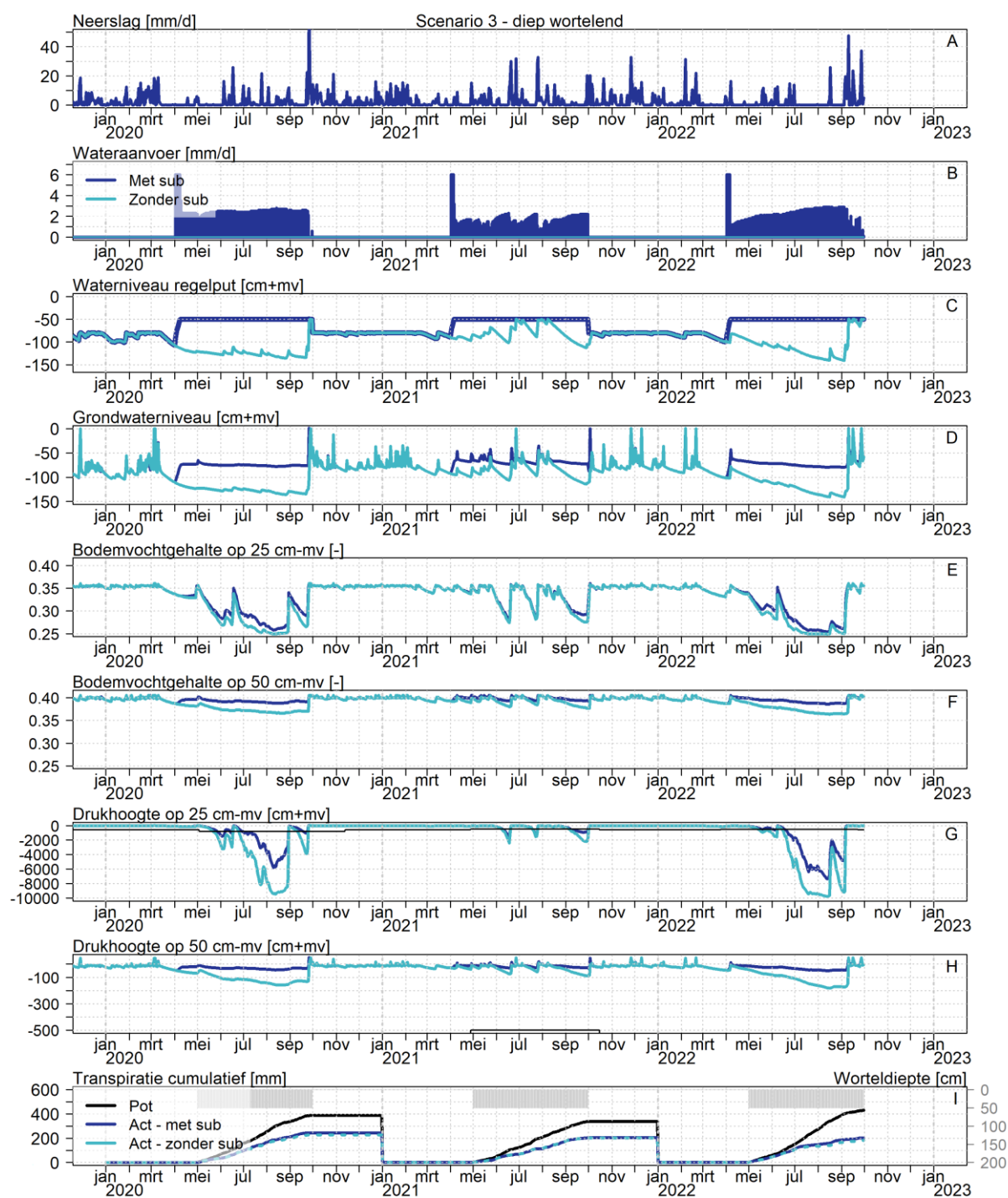
Figuur 54 Gesimuleerde waterbalans voor de Rusthoeve in 2020 – 2022 met een ondiep wortelend gewas, gebaseerd op 3 scenario's, uitgelegd in 'methode'. Verschil waterbalans is berekend door: waterbalans met subirrigatie ('sub') – waterbalans zonder subirrigatie ('no sub'). Let op: in 2022 zijn de waarden berekend over 01-01-2022 tot en met 30-09-2022.



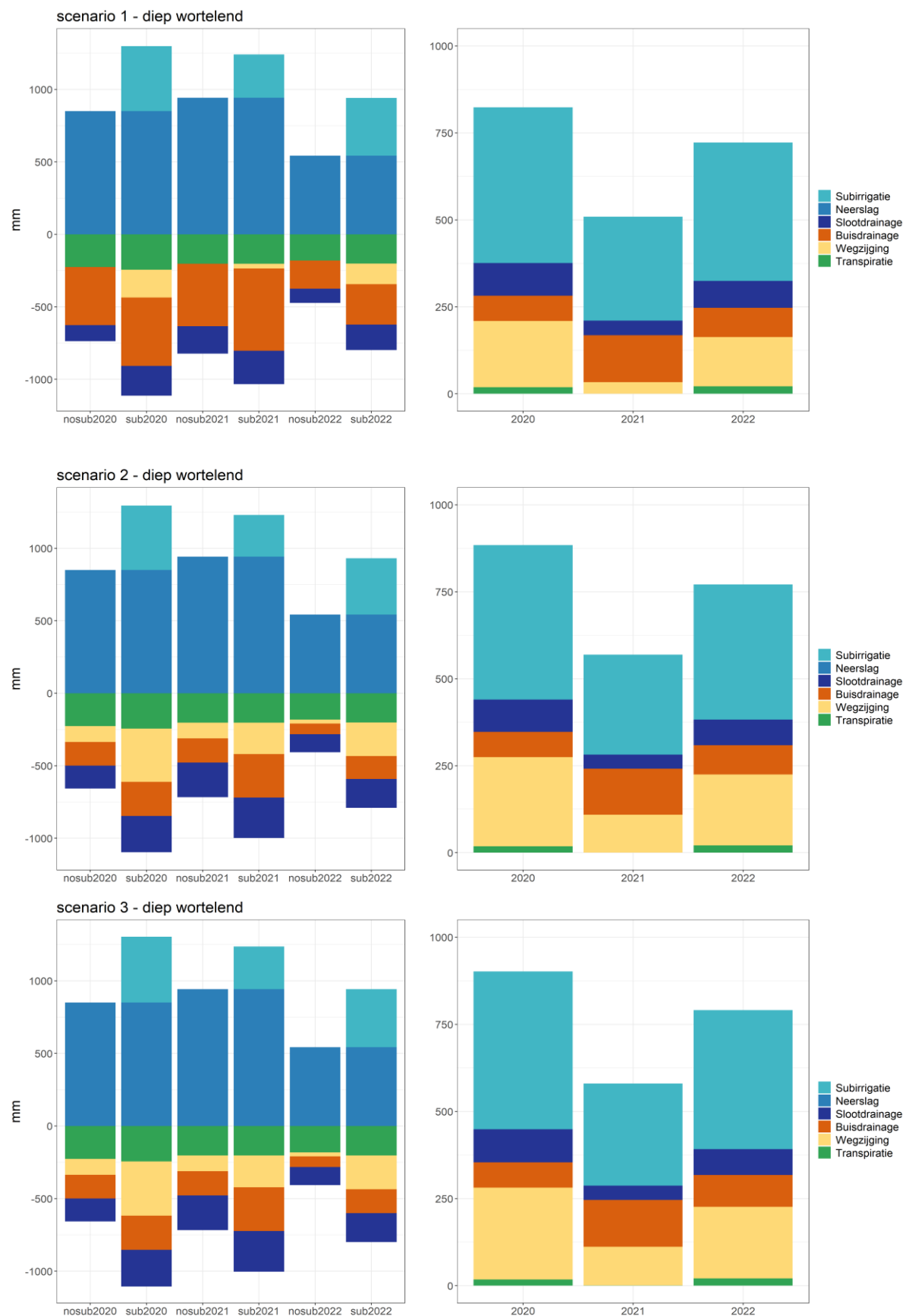
Figuur 55 Resultaten voor 'scenario 1 – diep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



Figuur 56 Resultaten voor 'scenario 2 – diep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwatervniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



Figuur 57 Resultaten voor 'scenario 3 – diep wortelend gewas'. Gemeten neerslag (A), gemodelleerde wateraanvoer (B), waterniveau in de regelput (C), grondwaterniveau (D), Bodemvochtgehalte op 25 cm-mv (E), 50 cm-mv (F), drukhoogte op 25 cm-mv, met daarin de kritische drukhoogte voor wateropname (zwarte lijn) (G), en 50 cm-mv (H), transpiratie en worteldiepte (I). Allen voor een situatie met subirrigatie ('met 'sub') en zonder subirrigatie ('zonder sub'). Let op: de y-as voor drukhoogte op 25 cm-mv en 50 cm-mv verschillen.



Figuur 58 Gesimuleerde waterbalans voor de Rusthoeve in 2020 – 2022 met een ondiep wortelend gewas, gebaseerd op 3 scenario's, uitgelegd in 'methode'. Verschil waterbalans is berekend door: waterbalans met subirrigatie ('sub') – waterbalans zonder subirrigatie ('no sub'). Let op: in 2022 zijn de waarden berekend over 01-01-2022 tot en met 30-09-2022.

Bijlage C – SUTRA modelbeschrijving en conceptualisatie

Introductie SUTRA

In deze studie is ervoor gekozen om de zoet-zout stromingen in 2D te simuleren zodat we kunnen onderzoeken hoe het zoute- en zoete water zich zowel verticaal als horizontaal door het proef- en het referentieblok verplaatst. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van SUTRA versie 3.0 (Provost & Voss, 2019).

Het “Saturated-Unsaturated TRAnsport” (SUTRA) model (Provost & Voss, 2019; Voss & Provost, 2010) is een 2D dichtheidsstromingsmodel. SUTRA maakt gebruik van een 2D- of 3D eindige-elementen- en eindige-verschilmethode om de geldende vergelijkingen te benaderen die de twee onderling afhankelijke processen beschrijven die worden gesimuleerd:

1. Vloeistofdichtheidsafhankelijke verzadigde of onverzadigde grondwaterstroming; en
2. Of:
 - a. Transport van een opgeloste stof in het grondwater, waarbij de opgeloste stof onderhevig kan zijn aan: evenwichtsadsorptie op de poreuze matrix, en zowel eerste-orde als nulde-orde productie of verval; of
 - b. Transport van thermische energie in het grondwater en de vaste matrix van de watervoerende laag.

Als het primaire berekende resultaat biedt SUTRA overal in het gesimuleerde ondergrondse systeem stijghoogtes en ofwel concentraties van opgeloste stoffen of temperaturen. SUTRA-stromingssimulatie kan worden gebruikt voor tweedimensionale (2D) gebieds-, dwarsdoorsnede- en driedimensionale (3D) modellering van verzadigde grondwaterstromingssystemen, en voor dwarsdoorsnede- en 3D-modellering van onverzadigde zonestroming. Simulatie van opgeloste stoffen met behulp van SUTRA kan worden gebruikt om natuurlijk of door de mens veroorzaakt transport van chemische soorten te modelleren, inclusief processen van sorptie, productie en verval van opgeloste stoffen. Het kan bijvoorbeeld worden toegepast voor het analyseren van transportproblemen van grondwaterverontreinigingen en ontwerpen voor het herstel van watervoerende lagen. Bovendien kan simulatie van het transport van opgeloste stoffen met SUTRA worden gebruikt voor het modelleren van percolatie bewegingen met variabele dichtheid, en voor modellering in dwarsdoorsnede van het binnendringen van zout water in watervoerende lagen op nabije of regionale schaal, met verspreide of relatief scherpe overgangszones tussen zoet water en zout water.

Conceptualisatie

Voor een 2D SUTRA-modelsimulatie wordt de bodem ingedeeld in bodemlagen (evenals bij het SWAP-model), maar ook in kolommen. Het te modelleren domein heeft dus een bepaalde hoogte (diepte profiel) en breedte. Voor SUTRA moeten de volgende eigenschappen worden toegekend:

- Ruimtelijke en temporele discretisatie
- Randvoorwaarden:
 - Bovenrand
 - Linker zijrand
 - Rechter zijrand
 - Onderrand
- Beginvoorwaarden (initiële condities)
- Bodemfysische eigenschappen
- Vloeistof- en bodemmatrix eigenschappen
- Drainage-/ subirrigatie eigenschappen

Randvoorwaarden en discretisatie

Sectie 2.4 geeft een overzicht van de locatie van het proef- en het referentieblok.

Het proef- en referentieblok zijn beide 36 m breed en 80 m lang. In beide percelen liggen 6 drains op 1,20 m-mv op een onderlinge afstand van 6 m. Daarnaast liggen er aan zowel de linker- als rechterzijde van het proef- en referentieblok 2 bufferdrains op 6 m afstand van elkaar. Dit maakt elk van beide percelen $36 + 2 \times 6 \times 2 = 60$ m breed.

Omdat we i) uitgaan van homogene bodemeigenschappen in de horizontale richting (Sectie 2.2.2) en ii) de drainafstand tussen de drains altijd 6 m is, kunnen we gebruik maken van symmetrie: de stroming op 3 m rechts van de drain is hetzelfde als de stroming op 3 m links van de drain vanwege de waterscheiding die op 3 m afstand van elke drain ligt (helft van de drainafstand van 6 m). Het te modelleren interessegebied is daarmee 6 m breed met één drain in het midden.

Op 3 m rechts van de drain ligt de waterscheiding met de volgende drain, welke we niet expliciet modelleren. Dit is de rechter zijrand van ons model en is een zero-flux (geen stroming) randvoorwaarde (SUTRA Dataset nr. 17). Dit is dus eigenlijk een symmetrievlak waar in de eerste 6 m aan de rechterkant dezelfde stroming plaatsvindt (die we NIET expliciet modelleren) als in de 6 m links van deze randvoorwaarde (die we WEL expliciet modelleren). Door deze keuzes kunnen we efficiënter het model doorrekenen omdat het doorrekenen van een kleiner modeldomein (minder rekencellen) sneller gaat dan het doorrekenen van een groot modeldomein (veel rekencellen).

Op ca. 100 m ten westen van het proef- en referentieblok ligt een hoofdwatgang (leggerwatgang) waar een zomer- en winterpeil wordt gehanteerd. Tussen het proef-/referentieblok en de leggerwatgang ligt nog een blok van 60 m breed met de oude drainopstelling (conventionele drainage) van de Alterra proef (Schipper et al., 2015). Aan de zuidzijde ligt een kavelsloot. De leggerwatgang is altijd watervoerend, terwijl de zuidelijke kavelsloot alleen watervoerend is onder natte veldomstandigheden. Omdat i) de westelijke leggerwatgang altijd watervoerend is, en ii) deze een dieper ontwateringsniveau heeft dan de zuidelijke kavelsloot, is de leggerwatgang gekozen als linker randvoorwaarde. Het gemeten waterpeil (tijdsafhankelijk) in de leggerwatgang wordt hiervoor gebruikt als druk randvoorwaarde (SUTRA Dataset nr. 19). Hierdoor wordt aangenomen dat de leggerwatgang randvoorwaarde deels kan zorgen voor ontwatering van het perceel. Dit is een plausibele aanname omdat dit ook is waargenomen in de boringen op het proef- en referentieblok door Delphy (van der Bok, 2022) op 8 november 2022 (van der Bok, 2022) en ook is aangetoond bij de Alterra proef (Schipper et al., 2015).

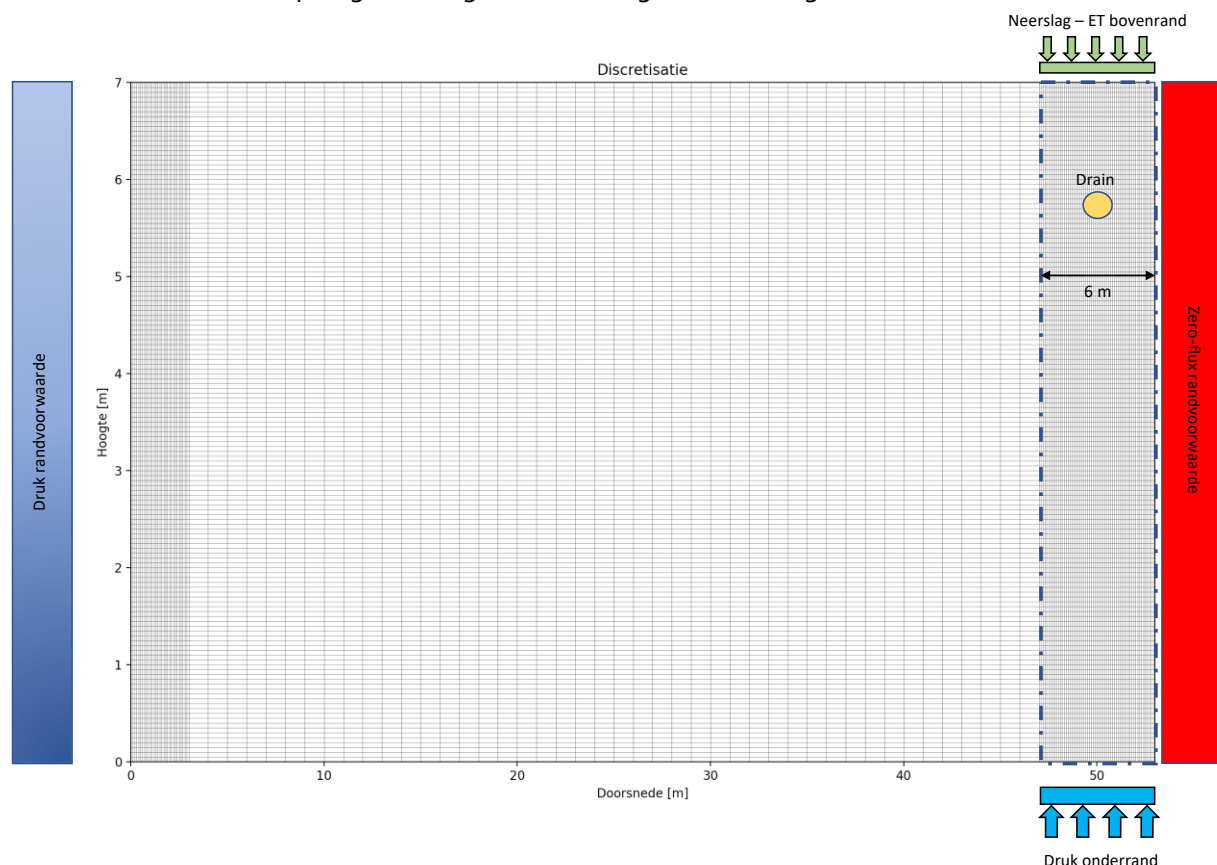
Al hoewel de conventionele drainage (Alterra proef) tussen het proef-/referentieblok en de leggerwatgang een rol spelen in de ontwatering van de desbetreffende percelen hoeven en willen we deze drains niet expliciet modelleren: het gaat immers om de zoet-zout stroming rondom de drains in het referentie- vs. het proefblok. Omdat deze drains wel voor wat afvoer kunnen zorgen hebben we ervoor gekozen om de legger watgang zijrand niet op 100 m van het interessegebied te leggen, maar op 47 m. Hierdoor verkleinen we als het ware de weerstand in de bodem voor afvoer: de linker zijrand op 47 m is dus eigenlijk een conditie die zowel voor de ontwatering via de leggerwatgang als voor de ontwatering via de oude drains zorgt.

Neerslag en verdamping (ET) zijn respectievelijk de in- en uitgaande fluxen aan de bovenrand van het perceel. Het verschil tussen neerslag en verdamping wordt daarom als bovenrand op het modeldomein gezet (flux randvoorwaarde; SUTRA Dataset nr. 17). Deze bovenrand wordt alleen toegepast op het deel van $x=47$ m t/m $x=53$ m. Het deel van $x=0$ m t/m $x=47$ m wordt dichtgezet omdat dit niet het interessegebied is. Voor de neerslag is gebruik gemaakt van KNMI-radarneerslag die gecorrigeerd is met neerslag grondwaarnemingen (Sectie 3.1.3). Voor de verdamping is gebruik

gemaakt van de gesimuleerde verdamping van het SWAP model (som van interceptieverdamping, bodemverdamping, en gewastranspiratie). SUTRA blijkt erg gevoelig te zijn voor fluctuaties in neerslag – verdamping (d.w.z. sterke afwisseling in positieve (neerslag>verdamping) en negatieve (verdamping>neerslag) waarden) op de bovenrand. Het direct opleggen van de tijdreeks neerslag – verdamping resulteerde dan ook in een numeriek instabiel model. Dit is opgevangen door deze tijdreeks te “smoothen” met een 1D Gaussian filter ($\sigma=0,7$). Hiermee worden als het ware de pieken en dalen uitgesmeerd over een paar dagen, maar blijft de totale som van neerslag – verdamping over de periode wel gelijk.

Op de onderrand wordt de stijghoogte (druk randvoorwaarde; SUTRA Dataset nr. 19) van de diepe peilbuis gebruikt. Ook hiervoor geldt dat deze alleen wordt toegepast op het deel van $x=47$ m t/m $x=53$ m. Zowel de neerslag min ET op de bovenrand als de drukhoogte op de onderrand variëren met de tijd.

Voor de verticale discretisatie is een resolutie van 0,05 m gekozen voor het gehele modeldomein. Voor de eerste 3 m van het domein (naast leggerwatergang) en de laatste 6 m van het domein (interessegebied) is een fijnere horizontale resolutie van 0,10 m gekozen t.o.v. een horizontale resolutie van 1,0 m voor de rest van het domein. Figuur 59 geeft de SUTRA modelschematisatie weer voor zowel het proef- als het referentieblok. Het enige verschil in de 2D modellering van het proef- en het referentieblok is de wijze waarop de drain c.q. subirrigatie gesimuleerd wordt. Dit is nader beschreven in de paragraaf “Regelbare drainage met subirrigatie”.



Figuur 59 Schematisatie van SUTRA 2D eindige elementen mesh voor Proefboerderij Rusthoeve proef- en referentieblok. Totale modeldomein is 53 m breed en 7 m hoog. Interessegebied is het rechterdeel van $x=47$ m t/m $x=53$ m. Drain (gele cirkel) ligt op $y=5,8$ m (1,20 m-mv) en $x=50$ m. Horizontale resolutie van mesh is 0,10 m voor $x=0$ m t/m $x=3$ m, 1,0 m voor $x=3$ t/m $x=47$ m, en 0,10 m voor $x=47$ m t/m $x=53$ m. Verticale resolutie van mesh is 0,05 m over het gehele domein. Interessegebied is omgeven door stippellijn.

De temporele discretisatie (model tijdstap) van het model bepaalt de numerieke stabiliteit en de rekentijd van het model. Een model dat numeriek instabiel is resulteert in onbetrouwbare en onrealistische uitkomsten. Over het algemeen geldt dat een kleinere model tijdstap zorgt voor een “numeriek stabiel” model. Echter, te kleine tijdstappen zorgen weer voor ellenlange rekentijden wat ook niet gewenst is. Uit een aantal test simulaties is gebleken dat een model tijdstap van 1 dag resulteert in een numeriek stabiel model en werkbare rekentijden. Voor deze studie is dus voor SUTRA een model tijdstap gekozen van 1 dag.

Bodemfysische hydraulische eigenschappen

De bodemfysische hydraulische eigenschappen (porositeit, doorlatendheid) die moeten worden opgegeven kunnen in principe per rekenelement worden opgegeven, maar door de aanname dat de bodem in horizontale richting homogeen is, is dat in deze studie alleen op laag niveau gedaan.

De boringen op het proef- en het referentieblok zijn gedaan tot een diepte van 7 m-mv (Sectie 2.2.2 en Figuur 5). Omdat de boorprofielen op beide percelen vrijwel identiek zijn qua bodemopbouw hebben we ervoor gekozen om de bodemopbouw van het proefblok te gebruiken voor de modellering van zowel het proef- als het referentieblok. M.b.v. de Staringreeks (Heinen et al., 2018) hebben we de zes bodemlagen in het boorprofiel van het proefblok geclassificeerd en zijn daar vervolgens bodemfysische eigenschappen aan toegekend die nodig zijn voor SUTRA. De bodemeigenschappen die de stroming in de verzadigde zone beïnvloeden zijn de porositeit en de “permeability”.

Voor SUTRA moet de permeability opgegeven worden in horizontale richting (PMAX) en in verticale richting (PMIN). Voor deze studie is aangenomen dat deze aan elkaar gelijk zijn. De “permeability” is afgeleid uit de verzadigde doorlatendheid (Ksat) middels onderstaande vergelijking waarin we gebruik maken van een viscositeit (μ) van $0,001308 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (is bij een aangenomen temperatuur van 10°C), een vloeistofdichtheid (ρ) van 1000 kg m^{-3} en een valsnelheid (g) van $9,81 \text{ m s}^{-2}$. De initiële waarden voor de porositeit en de “permeability” zijn vastgesteld op basis van de boorprofielen (Sectie 2.2.2) en de daarbij behorende Staringreeks waarden (Heinen et al., 2018).

$$k = \frac{K\mu}{\rho g}$$

Het model bleek niet erg gevoelig voor aanpassingen van de porositeit. Deze waarden zijn daarom rechtstreeks overgenomen uit Heinen et al. (2018). SUTRA leek wel erg gevoelig voor de waarden voor “permeability”. De parameterwaarden voor de “permeability” zijn gedurende een aantal modelsimulaties handmatig geoptimaliseerd aan de hand van de gemeten ondiepe grondwaterstand bij- en tussen de drain op het proefblok voor de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. De resultaten hiervan zijn weergegeven in de paragraaf “Kalibratie huidige situatie regelbare drainage met subirrigatie” van deze bijlage. De geoptimaliseerde bodemfysische eigenschappen zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 Bodemfysische eigenschappen toegekend aan de zes bodemlagen voor de SUTRA-modellering van zowel het referentie- als het proefblok.

Laagdiepte [cm-mv]	Staringreeks	Porositeit [-]	Ksat geoptimaliseerd [cm d ⁻¹]	Permeability geoptimaliseerd [m ²]
0-60	B8	0,433	5,0	7,71605 E-14
60-150	O10	0,472	5,0	7,71605 E-14
150-270	O9	0,458	5,0	7,71605 E-14
270-330	O17	0,849	3,402	5,25031 E-14
330-530	O9	0,458	5,0	7,71605 E-14
530-700	O10	0,472	15,0	2,3148 1 ^E -13

Vloeistof- en bodemmatrix eigenschappen

Naast de porositeit en de "permeability" moeten er nog een aantal vloeistof- en bodemmatrix eigenschappen worden toegekend. De waardes die we hiervoor gekozen hebben staan in Tabel 12 en zijn gebaseerd op aanbevolen waardes uit de SUTRA versie 2.2 handleiding (Voss & Provost, 2010). Voor meer details over deze parameters verwijzen we daarom naar deze handleiding.

Tabel 12 Vloeistof- en bodemmatrix eigenschappen gebruikt voor de SUTRA-modellering van zowel het referentie- als het proefblok.

SUTRA-parameter	Beschrijving	Waarde	Eenheid
COMPFL	Fluid compressibility	4,47 E-10	$\text{m s}^2 \text{kg}^{-1}$
SIGMAW	Fluid diffusivity	1,0 E-9	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
RHOWO	Base density of fluid	1000	kg m^{-3}
URHOWO	Base value of solute concentration of fluid at which base fluid density, RHOWO, is specified	0,0	-
DRWDU	Coefficient of fluid density change with concentration	700	$\text{kg}^2 \text{m}^{-3} \text{kg}^{-1}$
VISCO	Fluid viscosity	0,001308	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
COMPMA	Solid matrix compressibility	1,0 E-7	$\text{m s}^{-2} \text{kg}^{-1}$
RHOS	Density of solid grain	2660	kg m^{-3}

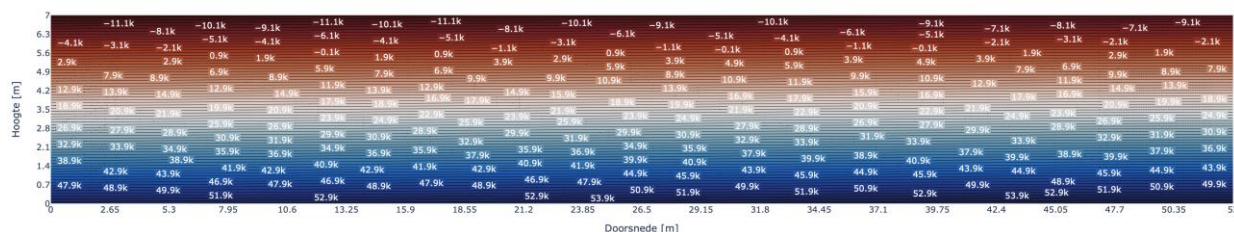
In bovenstaande tabel is "fluid diffusivity" (diffusie) opgenomen, waarbij diffusie een proces is waarbij de moleculen zich verplaatsen van een hoge naar een lage concentratie. Een moeilijker te begrijpen proces is dispersie. Dispersie is een proces waarbij de vloeistofdeeltjes mixen als ze zich door de bodemmatrix verplaatsen, maar waarbij dit gebeurt met verschillende reissnelheden dan de gemiddelde reissnelheid (Voss & Provost, 2010). SUTRA maakt gebruik van het "Fickian" dispersiemodel waarbij aangenomen wordt dat het analoog is aan diffusie (Voss & Provost, 2010). In werkelijkheid is dit proces veel gecompliceerder, en daarom zijn de dispersieparameters veelal kalibratieparameters. Voor SUTRA moeten we een "longitudinal dispersivity" en een "transverse dispersivity" opgeven, waar bij de eerstgenoemde de dispersie in de richting van de stroming is en de laatste de dispersie loodrecht op de stroomrichting is. Een studie van Gelhar et al. (1992) heeft onderzocht dat "longitudinal dispersivities" uiteenlopen van 10^{-2} tot 10^4 voor ruimtelijke schalen variërend van 10^{-1} tot 10^5 m. Omdat het domein in deze studie 53 m breed is hebben we een waarde van 0,1 gekozen voor de "longitudinal dispersivity". Volgens Gelhar et al. (1992) is de "transverse dispersivity" typisch een factor kleiner dan de "longitudinal dispersivity". Daarom hebben voor de "transverse dispersivity" een waarde van 0,01 gekozen. Voor zowel de "longitudinal dispersivity" als de "transverse dispersivity" kan ervoor gekozen worden om deze te variëren in de maximale doorlatendheidsrichting en de minimale doorlatendheidsrichting. Omdat deze parameter al erg onzeker is hebben we ervoor gekozen om zowel de "longitudinal dispersivity" als de "transverse dispersivity" hetzelfde te houden in de maximale en minimale doorlatendheidsrichting.

Initiële condities

Voor SUTRA zijn voor elke modelknoop initiële condities nodig van de stijghoogte en het zoutgehalte. Omdat we maar op een beperkt aantal punten meten weten we deze waardes niet voor elke modelknoop, en kunnen we deze dus niet hard opleggen. Om toch een initiële stijghoogte en zoutconcentratie voor elke modelknoop te krijgen hebben we het model stationair doorgerekend waarbij gebruik gemaakt wordt van de gemeten ondiepe en diepe stijghoogte tussen de drain. Door stationair te rekenen wordt een evenwichtssituatie uitgerekend die past bij de gemeten stijghoogtes en zoutconcentraties. De berekende stijghoogtes en zoutconcentraties voor elke modelknoop worden vervolgens gebruikt als initiële condities voor de niet-stationaire modelsimulatie. Figuur 61

laat de initiële stijghoogtes zien voor de niet-stationaire modelsimulatie als resultaat van de stationaire simulatie met opgelegde gemeten initiële condities.

De gemeten stijghoogtes en zoutconcentraties in het proefblok worden gebruikt als initiële condities voor de modelkalibratie. Het gekalibreerde proefblok wordt later gebruikt om een situatie zonder subirrigatie (c.q. het referentieblok) te simuleren. Daarom is alleen gebruik gemaakt van de gemeten stijghoogtes en zoutgehalten op het proefblok, zodat voor beide simulaties gebruik wordt gemaakt van dezelfde beginwaarden.



Figuur 60 Initiële stijghoogtes ($\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s}^2)$) voor niet-stationaire run na stationair doorrekenen met opgelegde initiële condities. Om de locatie van de grondwaterstand (druk = 0) aan te geven is de onverzadigde zone blank weergegeven.

Zoutconcentraties

Figuur 61 laat de gemeten zoutconcentraties zien tussen de drain zien op 25-, 50-, en 75 cm-mv, en voor de ondiepe- en diepe peilbuis. Het bovenste paneel laat zien dat de gemeten zoutconcentratie op 50 cm-mv vele malen hoger is dan de metingen op 25- en 75 cm-mv. Dit lijkt onrealistisch en daarom worden de metingen op 50 cm-mv als onbetrouwbaar bestempeld. Het middelste paneel laat wederom de gemeten zoutconcentraties zien, maar dan zonder de metingen op 50 cm-mv. De metingen op 25 en 75 cm-mv lijken wel betrouwbaar. Een initiële zoutconcentratie van 1,97 en 2,06 mS/cm is gebruikt voor respectievelijk 25 en 75 cm-mv. Tot slot laat het onderste paneel de gemeten zoutconcentratie in de ondiepe- en diepe peilbuis tussen de drain zien. Wat meteen opvalt is dat er veel pieken en dalen in zitten. Dit is het gevolg van (zoet) regenwater dat de peilbuis insijpelt tijdens perioden van regenval. De ondiepe peilbuis lijkt hier minder last van te hebben. De initiële zoutconcentratie (1 juli 2020) voor de diepe peilbuis is nagenoeg hetzelfde als die voor de ondiepe peilbuis. Ook dit lijkt onrealistisch omdat verwacht wordt dat de zoutconcentratie toeneemt met de diepte. Voor de diepe peilbuis hebben we daarom aangenomen dat de initiële zoutconcentratie 23 mS/cm is, een waarde die veelal bij de knippunten ligt waarbij de concentratie sterk afneemt na een regenbui. Omdat we vanwege de pieken en dalen de zoutconcentratie van de diepe peilbuis niet kunnen gebruiken als onderrandvoorwaarde (in combinatie met de stijghoogte), is ervoor gekozen deze constant te houden op 23 mS/cm gedurende de gehele simulatieperiode. Tabel 13 laat de initiële zoutconcentraties op verschillende bodemdieptes zien die zijn aangenomen voor de stationaire modelsimulatie.

Tabel 13 Initiële zoutconcentraties aangenomen voor het proefblok op verschillende dieptes voor de stationaire modelsimulatie.

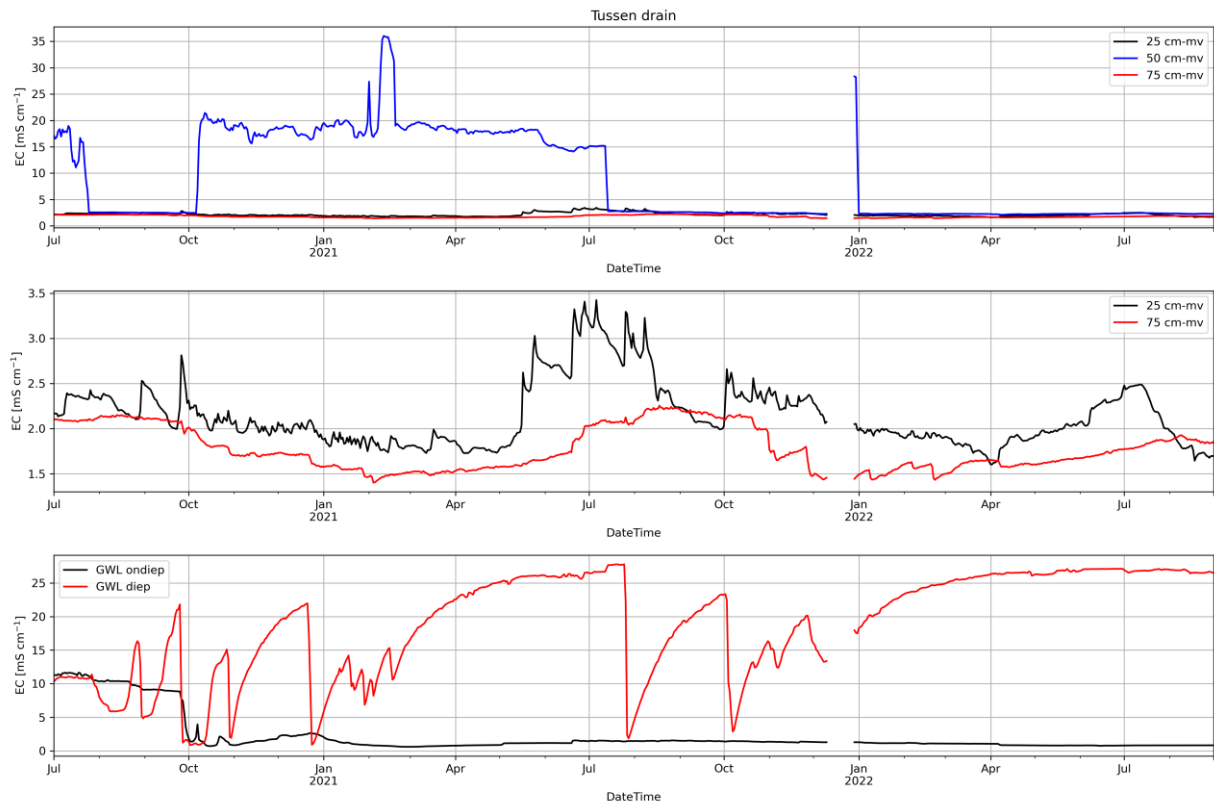
Diepte [m-mv]	Initiële zoutconcentratie [mS/cm]
0,00	0,00
0,25	2,17
0,75	2,09
1,25	11,30
7,00	* 23,00

* Deze zoutconcentratie is ook ingesteld als constante onderrandvoorwaarde.

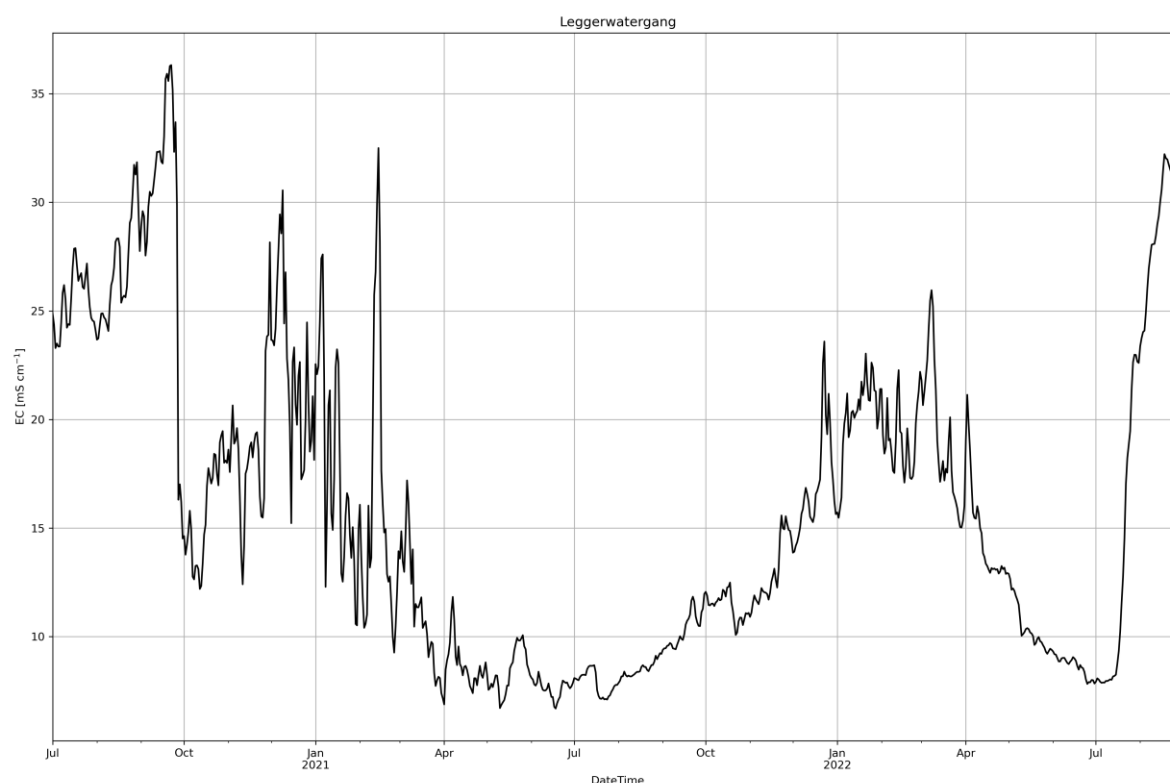
Naast de zoutconcentraties in de bodem heeft het model een zoutconcentratie nodig voor de linker randvoorwaarde (leggerwatergang) en het water dat via subirrigatie het blok wordt ingebracht. Omdat er op het proefblok gebruik wordt gemaakt van zoet water bij subirrigatie, is de

zoutconcentratie hier op 0 mS/cm gezet. Figuur 62 laat de tijdreeks zien van het gemeten zoutgehalte in de leggerwatergang. Deze tijdreeks van zoutconcentraties is samen met de drukhoogte opgelegd als linker randvoorwaarde. De initiële zoutconcentratie voor de linker randvoorwaarde is ingesteld op 24,9 mS/cm.

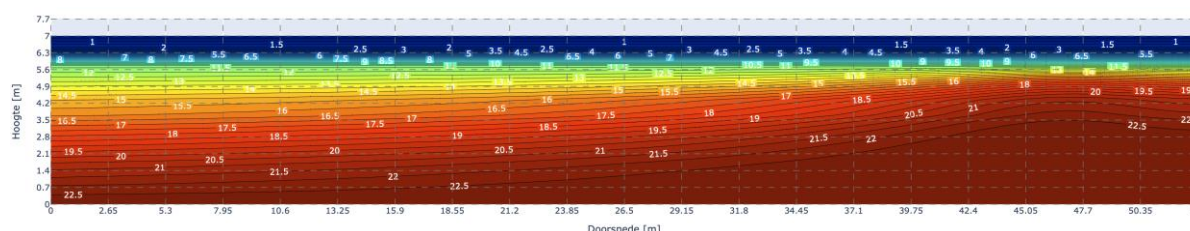
Figuur 63 laat de initiële zoutconcentraties zien voor de niet-stationaire modelsimulatie als resultaat van de stationaire simulatie met opgelegde gemeten initiële condities (Tabel 13).



Figuur 61 Gemeten zoutconcentraties [mS/cm] op het proefblok tussen de drain. Top: zoutconcentraties op 25, 50, en 75 cm-mv. Midden: idem, alleen dan zonder de waarden op 50 cm-mv. Onder: zoutconcentraties in ondiepe en diepe peilbuis.



Figuur 62 Gemeten zoutconcentratie leggerwatergang (hoofdwatgang).



Figuur 63 Initiële zoutconcentraties (kg/kg) voor niet-stationaire run na stationair doorrekenen met opgelegde initiële condities. Let op: SUTRA rekent met een zoutconcentratie in kg/kg i.p.v. mS/cm.

Regelbare drainage met subirrigatie

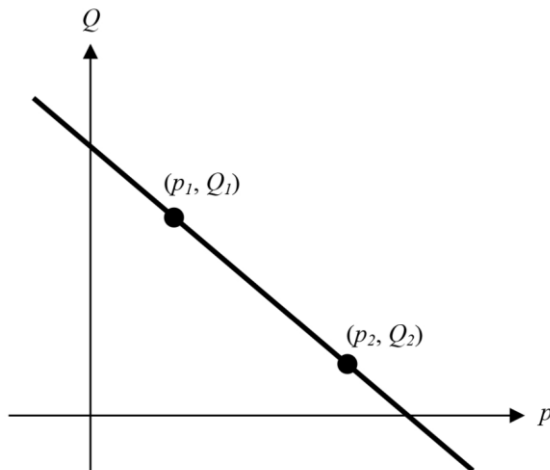
Het enige wezenlijke verschil tussen het proef- en het referentieblok is dat er op het proefblok regelbare drainage met subirrigatie plaatsvindt, terwijl dit niet het geval is bij het referentieblok; hier ligt een systeem van conventionele drainage.

Proefblok

Het waterpeil in de put op het proefblok en de grondwaterstand rondom de drain bepalen of er water vanuit het veld draineert naar de put, of dat er water vanuit de put via de drains de bodem ingaat (subirrigatie). Is de grondwaterstand hoger dan het waterpeil in de put (positief stijghoogteverschil) dan vindt er drainage plaats. Is het waterpeil in de put hoger dan het grondwaterpeil (negatief stijghoogteverschil), dan vindt er subirrigatie plaats. De drainage-/infiltratiesnelheid geeft de snelheid aan waarmee dit gebeurt en is hiermee een kalibratieparameter.

SUTRA versie 3.0 (Provost & Voss, 2019) is gebruikt omdat het beschikt over nieuwe types randvoorwaarden, de "Generalized Boundary Conditions". Hiervoor bestaan een aantal opties, en voor de huidige studie is gekozen voor de "General-Pressure" randvoorwaarde (Figuur 64). Deze randvoorwaarde bestaat uit het specificeren van twee punten ((p_1, Q_1) en (p_2, Q_2)), waarbij p de stijghoogte op de plek van de drain is, en Q de daarbij behorende flux (in- of uitgaand) afhankelijk van de externe stijghoogte (waterpeil put). Voor deze randvoorwaarde geldt altijd $p_1 < p_2$ en $Q_1 >$

Q2. Voor het proefblok met subirrigatie geldt dan dat p_1 hoort bij een situatie waarbij subirrigatie plaatsvindt en p_2 hoort bij een situatie waarbij drainage plaatsvindt. Met andere woorden: p_1 is de laagste stijghoogte die we kunnen verwachten op de plek van de drain en p_2 de hoogste stijghoogte die we kunnen verwachten op de plek van de drain. Omdat deze randvoorwaarde lineair is wordt de bijbehorende flux voor een stijghoogte tussen p_1 en p_2 opgezocht op de lijn. Er moet opgemerkt worden dat in de praktijk deze relatie niet lineair hoeft te zijn want de infiltratie- en drainageweerstand zijn niet altijd aan elkaar gelijk. De lineaire "General-Pressure" randvoorwaarde is de enige mogelijkheid om het proces van zowel subirrigatie als drainage te simuleren, en is daarmee dus tegelijk een aanname.



Figuur 64 Twee-punts presentatie van de "General-Pressure" randvoorwaarde in SUTRA. Deze figuur is overgenomen uit Provost & Voss (2019).

De laagste stijghoogte (p_1) vindt plaats bij een volledig onverzadigd profiel. Met een profieldikte van 7 m en de drain op 1,2 m resulteert dit bij de drain in een stijghoogte van $1,2 - 7 = -5,8$ m. De maximale stijghoogte (p_2) vindt plaats bij een volledig verzadigd profiel. Dit resulteert in een stijghoogte bij de drain van $7 - 5,8 = 1,2$ m. Deze waarden voor p_1 en p_2 liggen vast voor elke tijdstap. De bijbehorende waarden voor Q_1 en Q_2 worden vervolgens voor elke tijdstap bepaald aan de hand van een gekalibreerde drainage-/infiltrati weerstand en de stand van het waterpeil in de put. Q_1 en Q_2 worden dan berekend door de waterstand in de put te vergelijken met respectievelijk p_1 en p_2 , en deze dan te delen door de drainage-/infiltrati weerstand. De berekening van Q_1 en Q_2 voor elke model tijdstap als gevolg van het waterpeil in de put gebeurt als voorbewerking. Dit resulteert in een invoerbestand dat voor elke tijdstap de waarden voor p_1 , p_2 , Q_1 , en Q_2 bevat. Daarnaast is het nodig de zoutconcentratie van het instromende water (subirrigatie) te specificeren. Voor de modelkalibratie voor de huidige situatie is deze 0 mS/cm (nul; zoet).

Om de werking van deze randvoorwaarde te verduidelijken is dit geschematiseerd in Figuur 65. De blauwe lijn schetst een situatie waarbij het waterpeil in de put gelijk is aan drainniveau (1,2 m-mv). De groene lijn schetst een situatie waarbij het waterpeil in de put hoger is dan drainniveau.

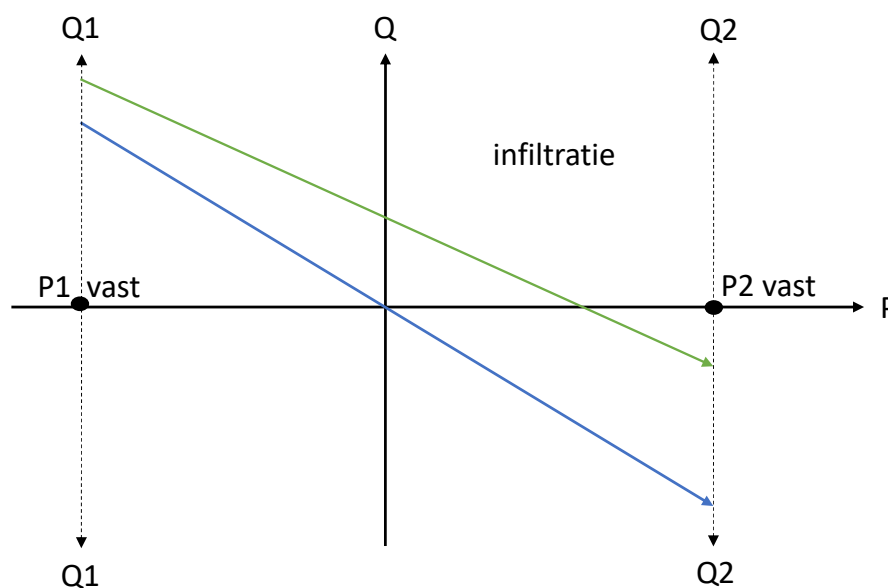
Situatie waterpeil put gelijk aan drainniveau (blauwe pijl):

- Het grondwater staat onder de drain, er heerst een negatieve stijghoogte ter plaatse van de drain: $p_1 < 0$, $Q_1 > 0$ -- > er vindt subirrigatie plaats.
- Door subirrigatie stijgt de grondwaterstand en neemt de stijghoogte ter plaatse van de drain toe, totdat deze gelijk is aan het peil in de put. De stijghoogte is dan 0. Q is dan 0: er vindt geen drainage en geen subirrigatie plaats.

- Gaat het vervolgens regenen, dan zal de grondwaterstand verder stijgen waardoor de stijghoogte ter plaatse van de drain toeneemt. Deze wordt dan positief: $p_2 > 0$, $Q_2 < 0$ -- > er vindt drainage plaats.

Situatie waterpeil put hoger dan drainniveau (groene pijl):

- Het grondwater staat onder de drain, er heerst een negatieve stijghoogte ter plaatse van de drain: $p_1 < 0$, $Q_1 > 0$ -- > er vindt subirrigatie plaats.
- Door subirrigatie stijgt de grondwaterstand en neemt de stijghoogte ter plaatse van de drain toe tot 0. In tegenstelling tot de vorige situatie blijft er subirrigatie plaatsvinden omdat het waterpeil in de put hoger staat (de externe druk is hoger). De subirrigatie gaat door totdat de grondwaterstand gelijk is aan het waterpeil in de put (moment waar de groene lijn de x-as snijdt).
- Gaat het vervolgens regenen zodat de grondwaterstand verder stijgt en uiteindelijk boven het waterpeil van de put uitkomt, dan vindt er drainage plaats: $p_2 > 0$ & $p_2 > p$ put, $Q_2 < 0$.

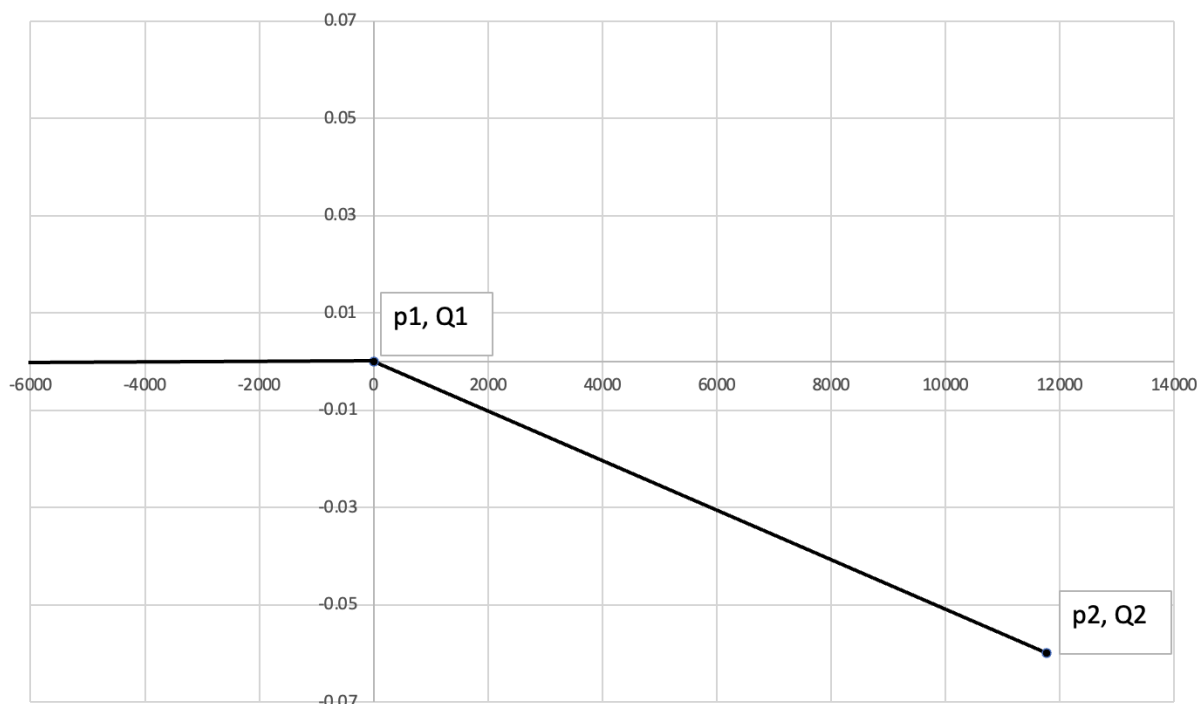


Figuur 65 Illustratie van werking "General-Pressure" randvoorwaarde die gekozen is om het regelbare drainage met subirrigatie systeem te modelleren. In dit figuur zijn twee situaties (blauw en groen) weergegeven. De blauwe lijn is representatief voor een situatie waarbij het waterpeil in de put gelijk is aan drainniveau. De groene lijn is representatief voor een situatie waarbij het waterpeil in de put hoger is dan drainniveau.

De "General-Pressure" randvoorwaarde wordt voor het proefblok geplaatst op de modelknoop $x=50$ m en $y=5,8$ m (1,20 m-mv).

Referentieblok

Voor de simulatie van het referentieblok worden alle eigenschappen van het proefblok overgenomen, behalve het proces van regelbare drainage met subirrigatie via de "General-Pressure" randvoorwaarde. Omdat er wel drainage kan plaatsvinden op het referentieblok wordt de "General-Pressure" randvoorwaarde aangepast zodat p_1 en Q_1 beide nul zijn: de relatie wordt hier als het ware afgekapt zodat er bij een negatieve stijghoogte ($p < 0$) geen water infiltreert ($Q=0$). Deze schematisatie is weergegeven in Figuur 66. De stijghoogte ter plaatse van de drain kan/mag wel negatief worden (grondwaterstand onder de drain), maar dat resulteert dan niet in subirrigatie vanwege de begrenzing op $Q=0$.



Figuur 66 Twee-punts presentatie van de "General-Pressure" randvoorwaarde in SUTRA voor een drain randvoorwaarde (referentieblok). Q kan dan nooit positief worden, maar alleen negatief (=drainage).

Kalibratie huidige situatie regelbare drainage met subirrigatie

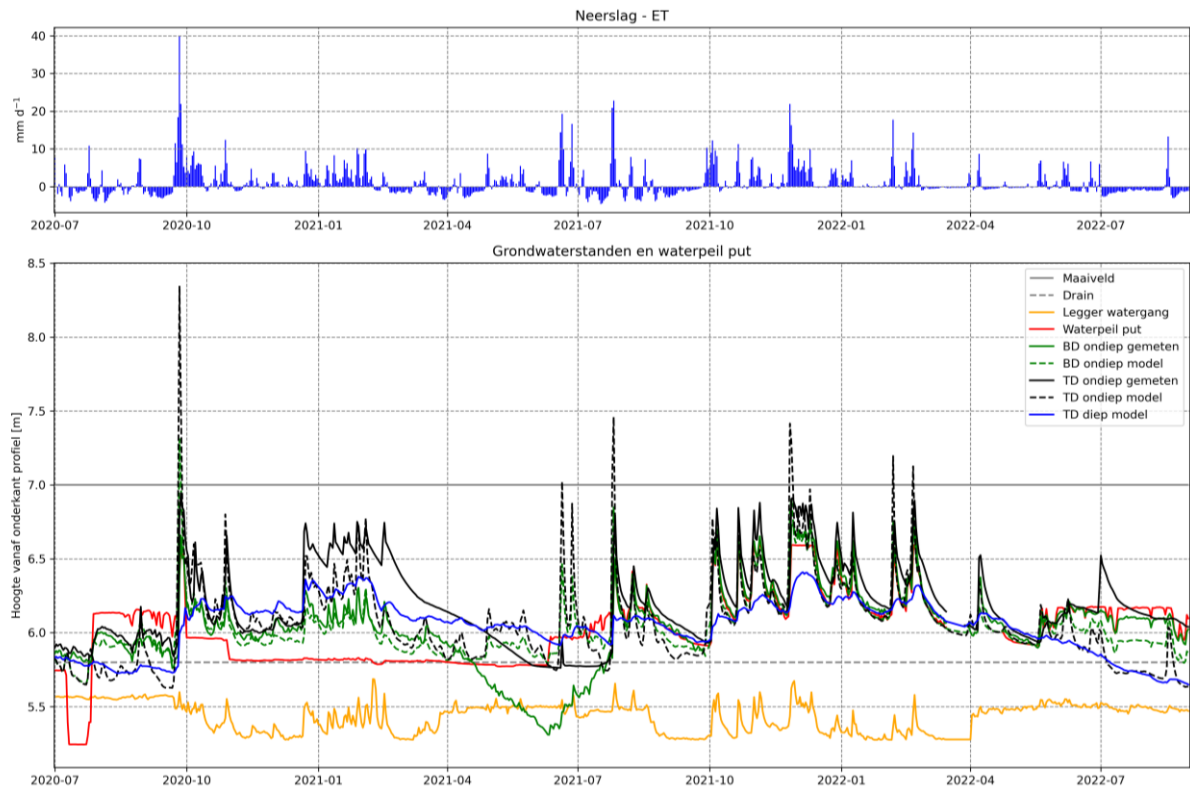
Grondwaterstanden

Figuur 67 laat de SUTRA-modelresultaten zien voor het gekalibreerde proefblok voor de huidige situatie 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. Het gaat hier met name om de vergelijking tussen de gemeten- en gesimuleerde ondiepe grondwaterstand bij de drain (BD) en de gemeten- en gesimuleerde ondiepe grondwaterstand tussen de drains. Het waterpeil in de regelput is weergegeven met een rode lijn, en het waterpeil in de leggerwatergang is weergegeven met een gele lijn. Alle waarden zijn relatief t.o.v. onderkant profiel (7 m-mv). De ligging van de drain is weergegeven met een grijze stippellijn, en het maaiveld is zichtbaar middels een horizontale zwarte lijn.

Met uitzondering van de periode eind april 2021 t/m eind juli 2021, is SUTRA goed in staat om de gemeten ondiepe grondwaterstand bij de drain te simuleren. De pieken en grondwaterstands dalingen (recessies) komen goed overeen met die van de gemeten ondiepe grondwaterstand bij de drain. De gemeten grondwaterstand zakt voor de wat 'mindere' simulatieperiode ver uit, en zakt onder drainniveau en het waterpeil in de put. De vraag is of de metingen voor deze periode correct zijn, mede omdat er wel netto via de bovenrand water ingaat (neerslag-verdamping), maar er nauwelijks sprake lijkt te zijn van een response in de gemeten grondwaterstand. Hetzelfde geldt voor de gemeten grondwaterstand tussen de drains voor deze periode.

Het model lijkt meer moeite te hebben met het simuleren van de gemeten ondiepe grondwaterstand tussen de drains voor met name de periode december 2020 t/m eind juli 2021. De gemeten grondwaterstand tussen de drains is ca. 40-50 cm hoger dan die bij de drain. Al hoewel er enige opbolling verwacht wordt tijdens deze periode van met name drainage (grondwaterstand > waterpeil put), lijkt de gemeten opbolling vrij groot voor een afstand van 3 m vanaf de drain.

Tijdens perioden van drainage (grondwaterstand hoger dan waterpeil put) simuleert SUTRA correct een hogere grondwaterstand bij de drain dan tussen de drains. Wanneer er subirrigatie plaatsvindt (waterpeil put hoger dan grondwaterstand) zien we het omgekeerde – een grondwaterstand die hoger is bij de drain dan tussen de drains. Dit toont aan dat SUTRA goed in staat is om zowel het drainage- als het subirrigatie-proces te simuleren.



Figuur 67 Boven: Neerslag – ET. Onder: gesimuleerde versus gemeten grondwaterstanden ondiep bij de drain (BD) en ondiep tussen de drain (TD), gemeten grondwaterstand diep tussen de drain, waterpeil leggerwatergang, en waterpeil put.

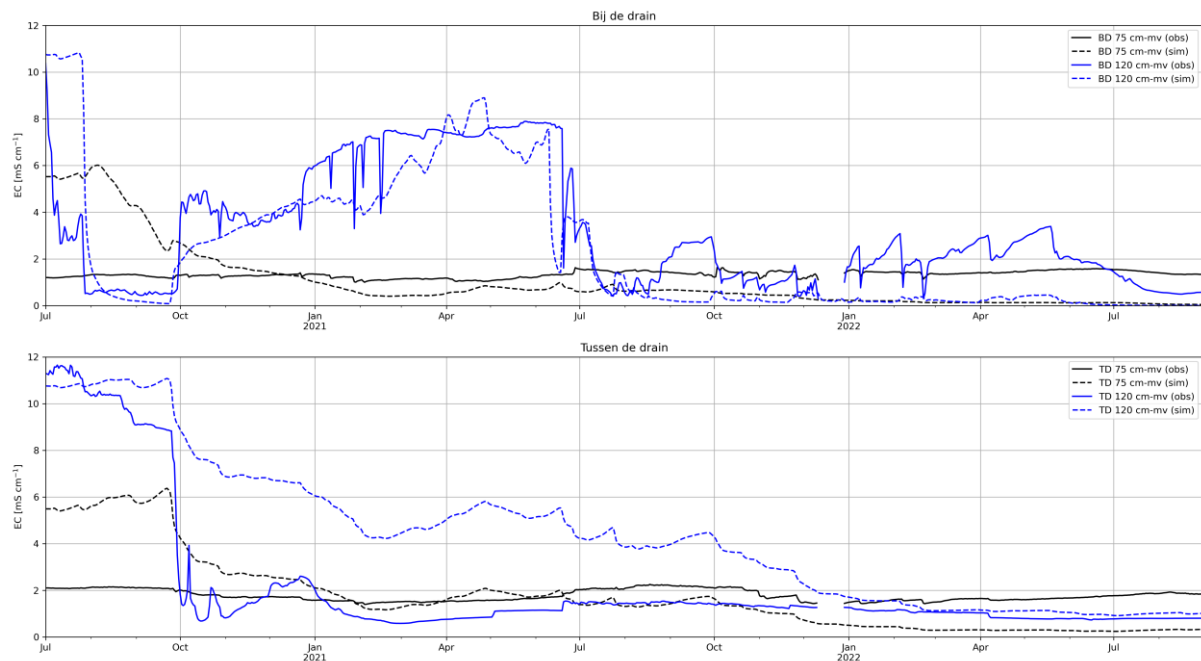
Zoutconcentraties

Figuur 68 laat de gemeten en gesimuleerde zoutconcentraties zien op 75 en 120 cm-mv bij de drain (bovenste paneel) en tussen de drains (onderste paneel).

De zoutconcentraties bij de drain op 120 cm-mv zijn over het algemeen hoger dan die dicht bij maaiveld (75 cm-mv), met name tijdens perioden van drainage. Zodra er subirrigatie plaatsvindt reageren zowel de gemeten als de gesimuleerde zoutconcentratie bij de drain op 120 cm-mv hier sterk op: de zoutconcentratie neemt sterk af en is vaak zelfs lager dan de zoutconcentratie dicht bij maaiveld, een resultaat wat we technisch gezien verwachten. Over het algemeen komt de gesimuleerde zoutconcentratie op deze diepte redelijk goed overeen met de gemeten zoutconcentratie. Behalve voor de beginsituatie, geldt hetzelfde voor de zoutconcentratie op 75 cm-mv. Het model laat op deze diepte over verloop van tijd enige verzoeting zien, terwijl de gemeten zoutconcentratie hier min of meer gelijk blijft. Dit betekent dat subirrigatie op deze diepte nauwelijks tot verzoeting leidt.

Omdat de locatie tussen de drain verder van het 'subirrigatie mechanisme' afligt, reageert de zoutconcentratie hier minder direct op subirrigatie en drainage. Daarentegen lijkt deze op 120 cm-mv wel sterk te reageren op een hevige neerslaggebeurtenis zoals die in eind September 2020. De gesimuleerde zoutconcentratie lijkt hier minder sterk op te reageren en blijft vervolgens zouter dan de gemeten zoutconcentratie op deze diepte. Vanaf januari 2022 zijn de verschillen tussen gesimuleerd en gemeten op 120 cm-mv weer minimaal. De gemeten- en gesimuleerde

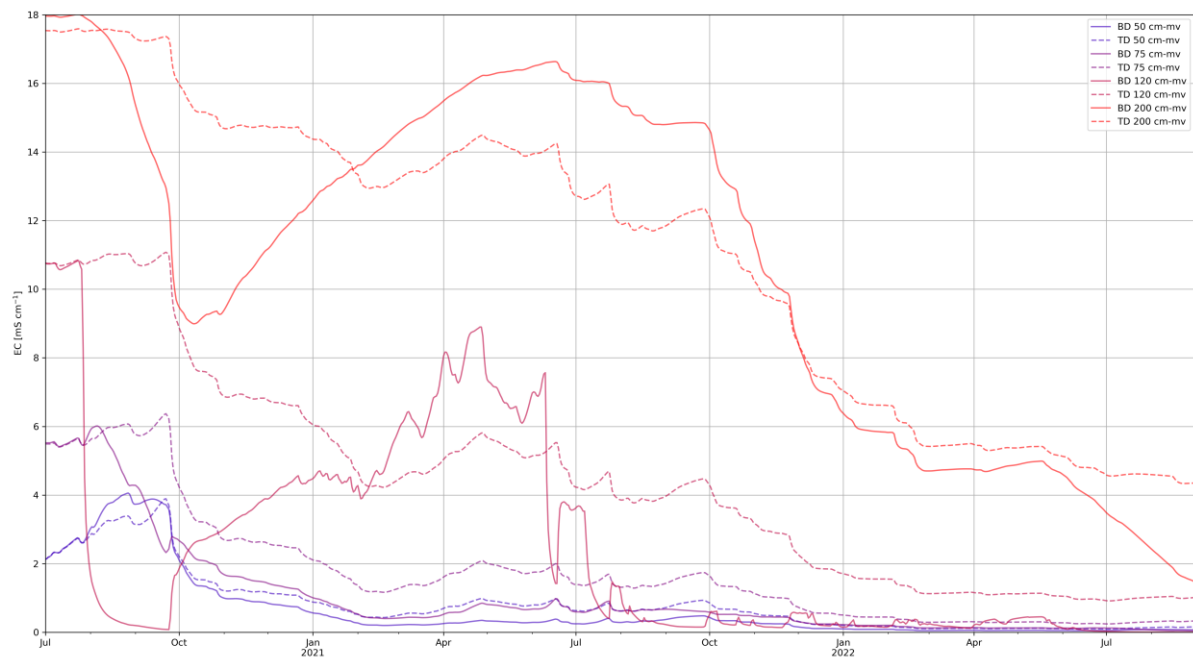
zoutconcentraties op 75 cm-mv zijn vergelijkbaar met die van bij de drain. Een opvallend resultaat is dat de gemeten zoutconcentraties dicht bij maaiveld, met uitzondering van de beginperiode, hoger zijn dan die op grotere diepte. Het model laat hier juist het omgekeerde zien: hogere zoutconcentraties op grotere diepte dan dicht bij maaiveld.



Figuur 68 Vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde zoutconcentraties bij de drain (boven) en tussen de drain (onder) op twee verschillende dieptes (75 en 120 cm-mv).

De gesimuleerde zoutconcentraties op verschillende dieptes, zowel bij- als tussen de drain, zijn weergegeven in Figuur 69. Ook hier geldt dat de zoutconcentraties toenemen met de diepte, en dat het systeem van regelbare drainage met subirrigatie relatief snel de zoutconcentratie bij de drain kan beïnvloeden (verlagen tijdens subirrigatie en verhogen tijdens drainage). Dit effect is met name zichtbaar op draindiepte (120 cm-mv) en dieper (200 cm-mv). De locaties tussen de drains zijn minder direct gevoelig voor de regelbare drainage met subirrigatie: we zien hier geen directe daling in de zoutconcentratie als gevolg van subirrigatie of een directe stijging als gevolg van drainage.

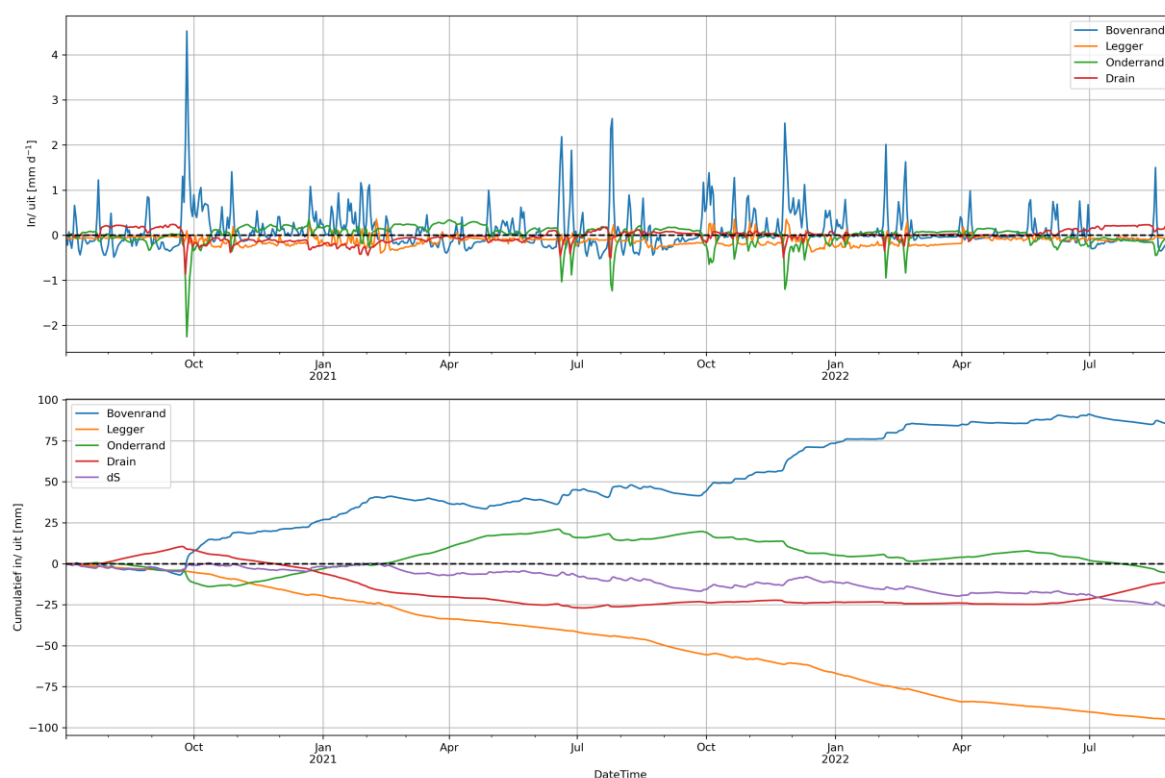
Alle locaties laten een verzoeting van het profiel zien over de simulatieperiode, met de sterkste verzoeting op grotere dieptes (draindiepte en dieper). In hoeverre deze algemene verzoeting het gevolg is van het systeem van regelbare drainage met subirrigatie, of het gevolg is van 'zoete' neerslag aan de bovenrand, wordt onderzocht in Sectie 4.3.2 en Sectie 4.3.3.



Figuur 69 Gesimuleerde zoutconcentraties (mS cm^{-1}) tussen de drain (TD) en bij de drain (BD) op vier verschillende dieptes.

Water- en zoutbalans voor totale modeldomein

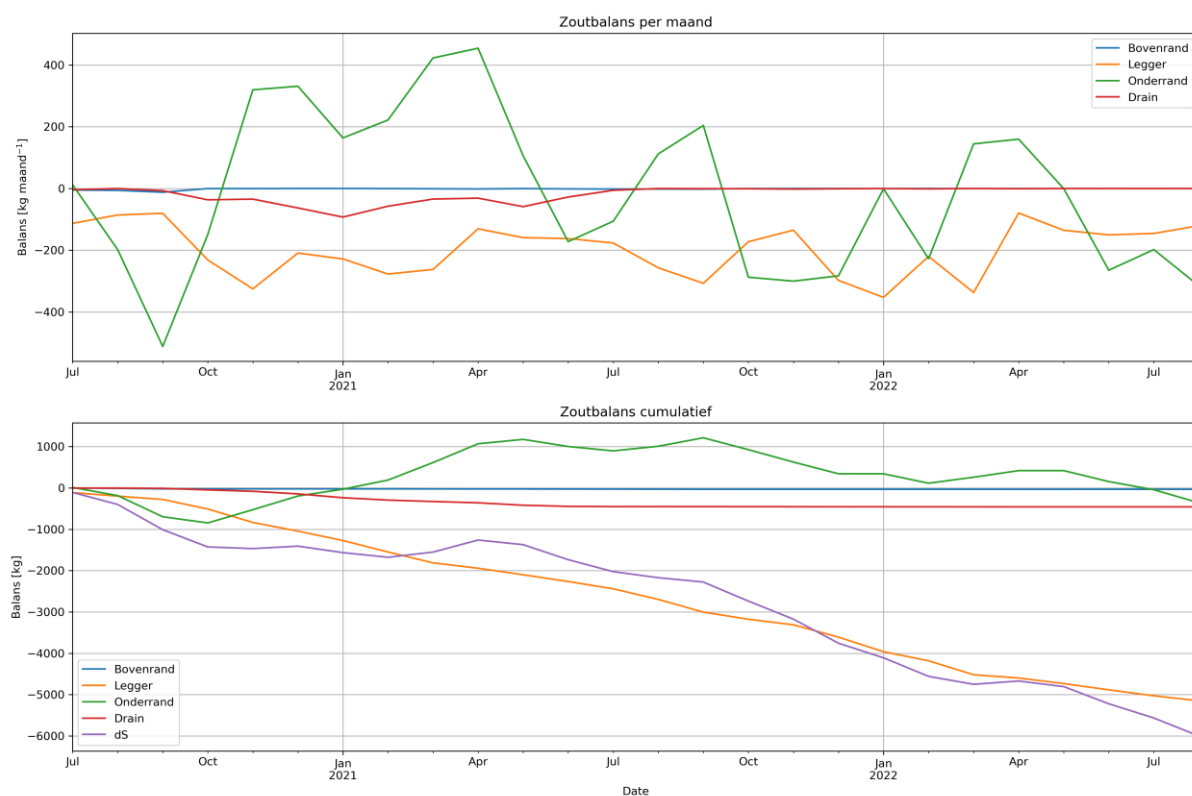
Het bovenste paneel van Figuur 70 laat de in- en uitgaande fluxen over de randen zien op dag basis. Hieruit blijkt dat de subirrigatie met name actief is (positief=ingaaand) gedurende juli t/m september 2020 en juni t/m augustus 2022. Dit is ook duidelijk terug te zien in de cumulatieve figuur in het onderste paneel. Over de gehele simulatieperiode raakt het modeldomein ca. 10 mm water kwijt via drainage via de drain. Het merendeel van het water verlaat het domein via de leggerwatergang (ca. 95 mm). De leggerwatergang heeft een sterkere drainerende werking gedurende het winterseizoen dan gedurende het zomerseizoen. De onderrand laat zowel wegzijging als kwel zien, en dit lijkt in relatie te staan met wanneer er drainage of subirrigatie plaatsvindt: gedurende juli-september 2020 is er sprake van subirrigatie, en op dat moment verliest het model water via de onderrand. Vervolgens is er een periode (t/m juni 2021) met voornamelijk drainage, en komt er water via de onderrand het modeldomein in. Tot slot is er gedurende juni-augustus 2022 weer sprake van voornamelijk subirrigatie, en verliest het model weer water via de onderrand. De netto waterbalans over de gehele simulatieperiode is ca. -26 mm.



Figuur 70 Boven: gesimuleerde fluxen [mm d⁻¹] via de bovenrand, legger (linker zijrand), onderrand, en drain voor de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. Onder: idem, maar nu cumulatief. Hierin is tevens de totale bergingsverandering (dS) weergegeven.

De zoutbalans op maandbasis is weergegeven in het bovenste paneel van Figuur 71. Het onderste paneel laat de cumulatieve zout balanstermen zien. Over de gehele periode neemt het zoutgehalte af met ca. 6.000 kg. Het meeste daarvan (5000+ kg) verlaat het modeldomein via de leggerwatergang. Het overige verlaat het modeldomein via drainage en de onderrand, beiden ca. 500 kg. We zagen eerder in Figuur 70 dat er gedurende perioden van drainage meer water het domein binnenkomt via de onderrand. Dit vertaalt zich in Figuur 71 door een hogere zoutflux via de onderrand die op deze momenten het profiel instroomt (zoute kwel). Zodra er duidelijk sprake is van subirrigatie, met name juli t/m september 2020 en juni t/m augustus 2022, wordt door de overdruk het zoute kwelwater als het ware teruggedrukt. Tijdens september-december 2021 is de afname in zoute kwel via de onderrand vooral te wijten aan een aantal hevige neerslaggebeurtenissen.

Totale balanstermen voor zowel water als zout zijn apart weergegeven voor de maanden juli t/m juni voor de jaren 2020/2021 en 2021/2022. Er is hier gekozen om de totalen weer te geven voor juli t/m juni omdat we anders geen volledige 'jaarsommen' krijgen vanwege het feit dat de simulaties starten op 1 juli en niet op 1 januari. Het grote verschil tussen deze twee periodes is dat de totale bergingsverandering (dS) voor zowel water als zout meer dan twee keer zo groot negatief is in de periode 2021/2022 dan in 2020/2021. Dit heeft te maken met het feit dat er door het relatief veel draineren tijdens 2020/2021, duidelijk meer zout water het domein binnenkomt via de onderrand. Dit zoute kwelwater resulteert in een zouttoename van 1.002 kg voor 2020/2021, terwijl er in 2021/2022 juist een zoutafname is van 1.047 kg via de onderrand.



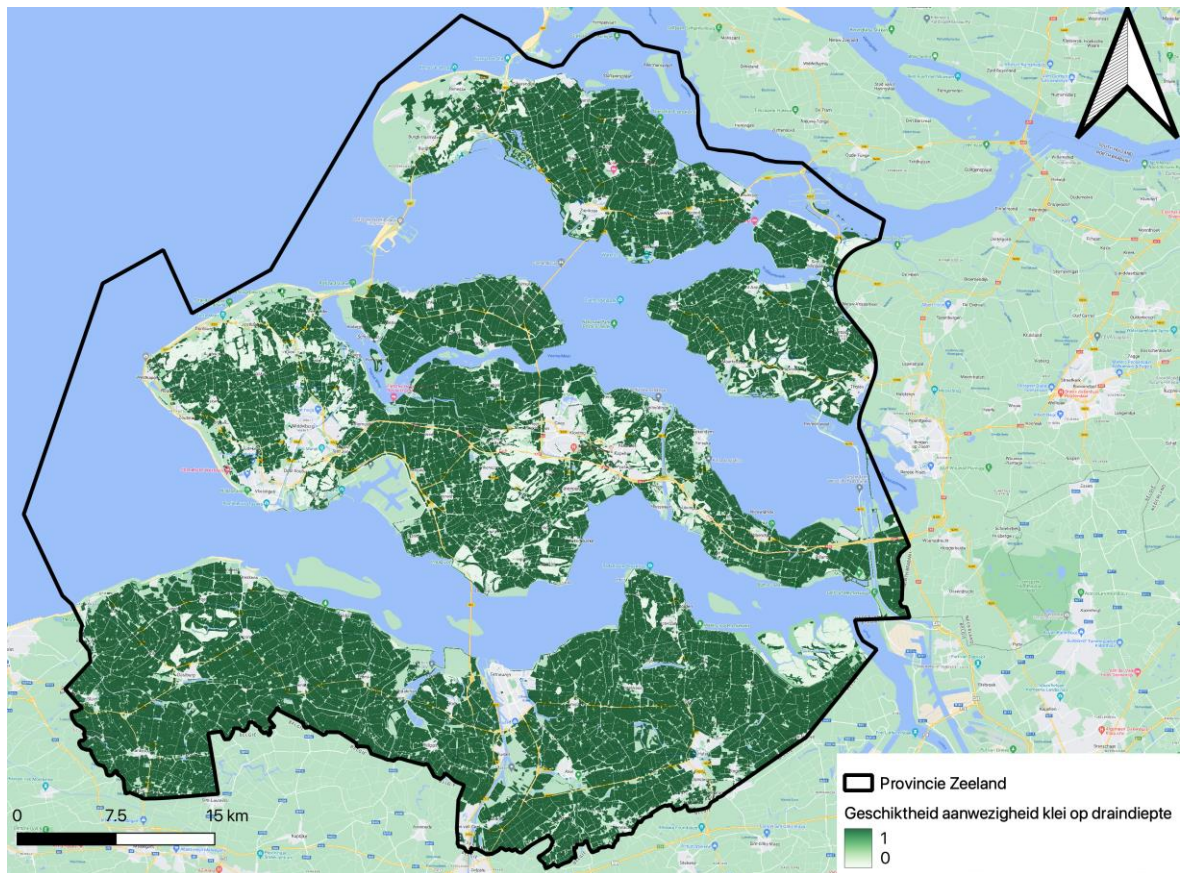
Figuur 71 Top: gesimuleerde zoutbalans per maand over de randen van het model voor de periode 1 juli 2020 t/m 31 augustus 2022. Onder: idem, maar nu cumulatief. Hierin is tevens de totale zoutverandering (dS) weergegeven.

Tabel 14 Water- en zoutbalans over de randen voor de maanden juli t/m juni voor de seizoenen 20/21 en 21/22. dS geeft de totale verandering over het gehele modeldomein weer.

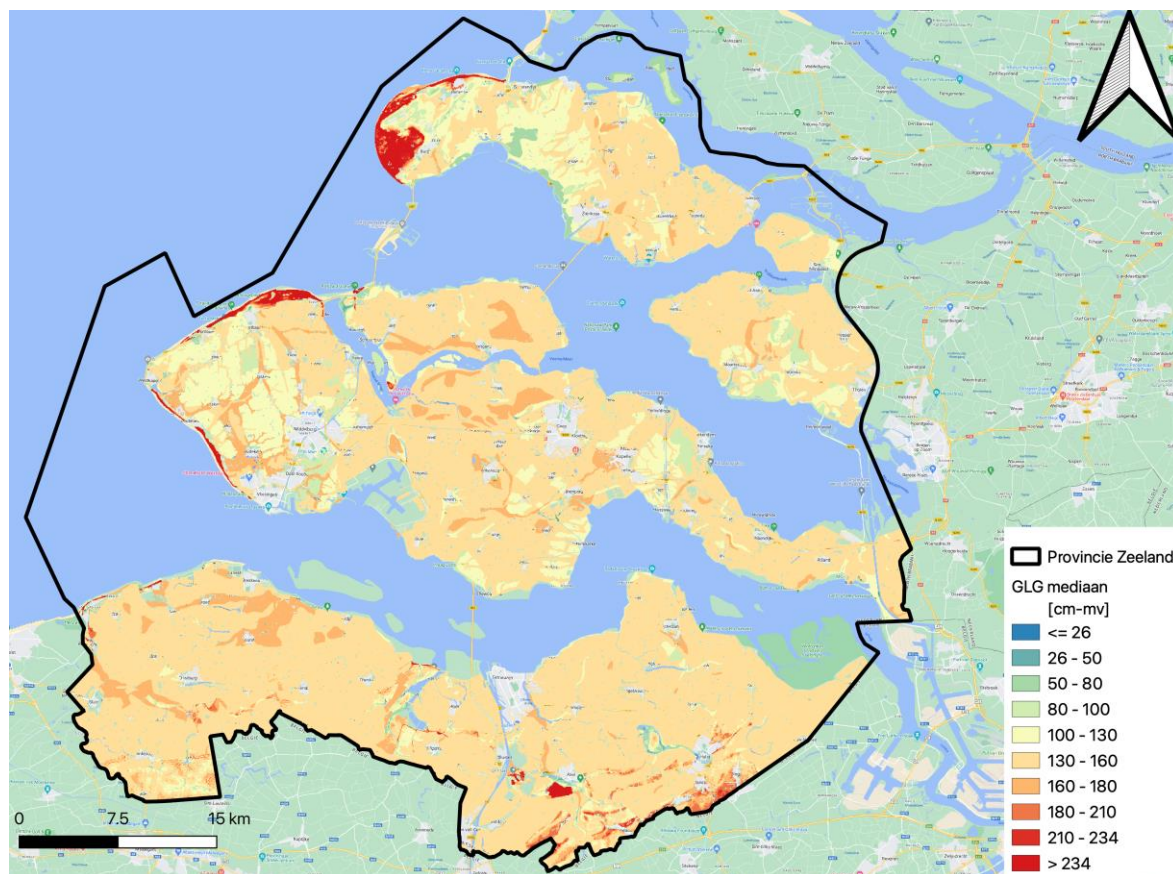
Balans	juli-juni	Bovenrand	Legger	Onderrand	Drain	dS
Water [mm]	20/21	+45	-41	+16	-27	-7
Zout [kg]	20/21	-27	-2264	+1002	-446	-1736
Water [mm]	21/22	+41	-52	-17	11	-16
Zout [kg]	21/22	-6	-2766	-1047	-12	-3830

Kortom, door het toepassen van subirrigatie lijkt het mogelijk om de zoute kwel terug te dringen. Wordt er juist gedraineerd, dan neemt het zoutgehalte in het profiel toe door een toename van zoute kwel via de onderrand.

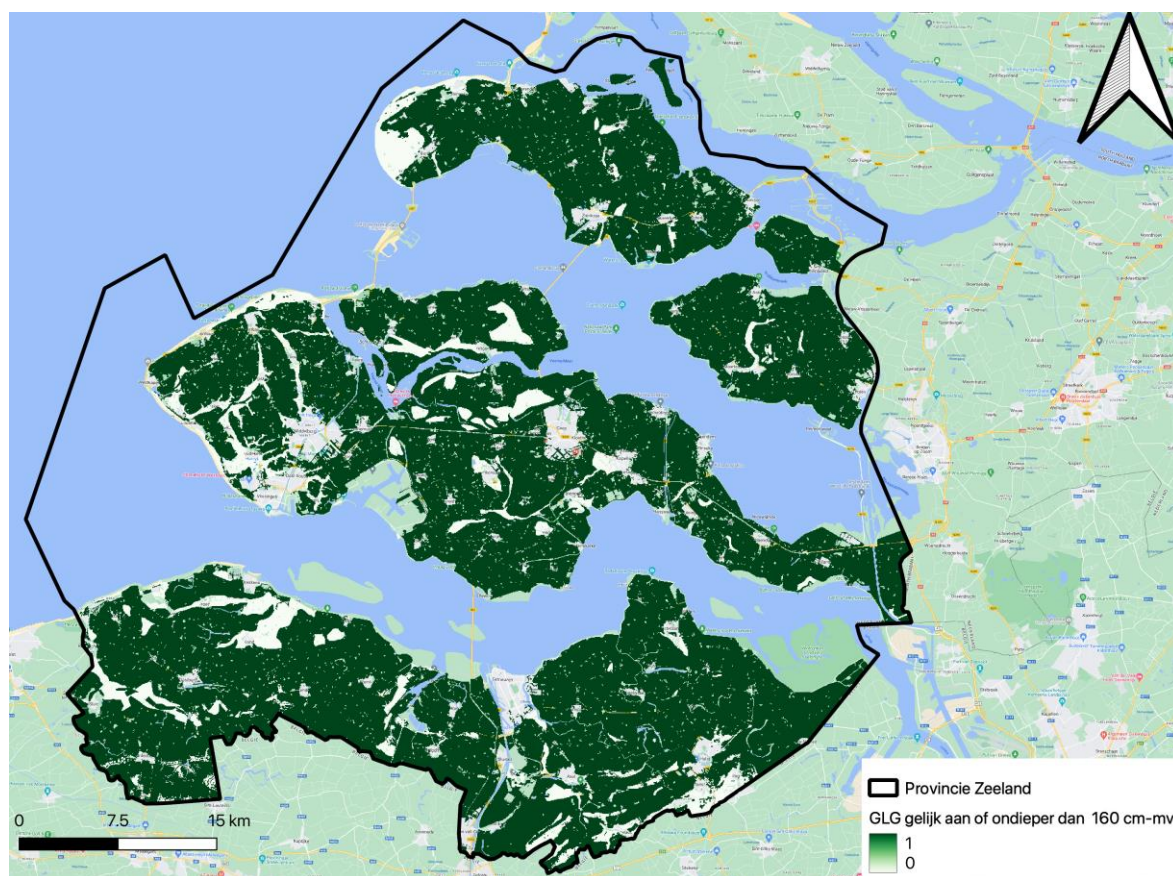
Bijlage D – Kaarten voor regionale geschiktheid regelbare drainage met subirrigatie



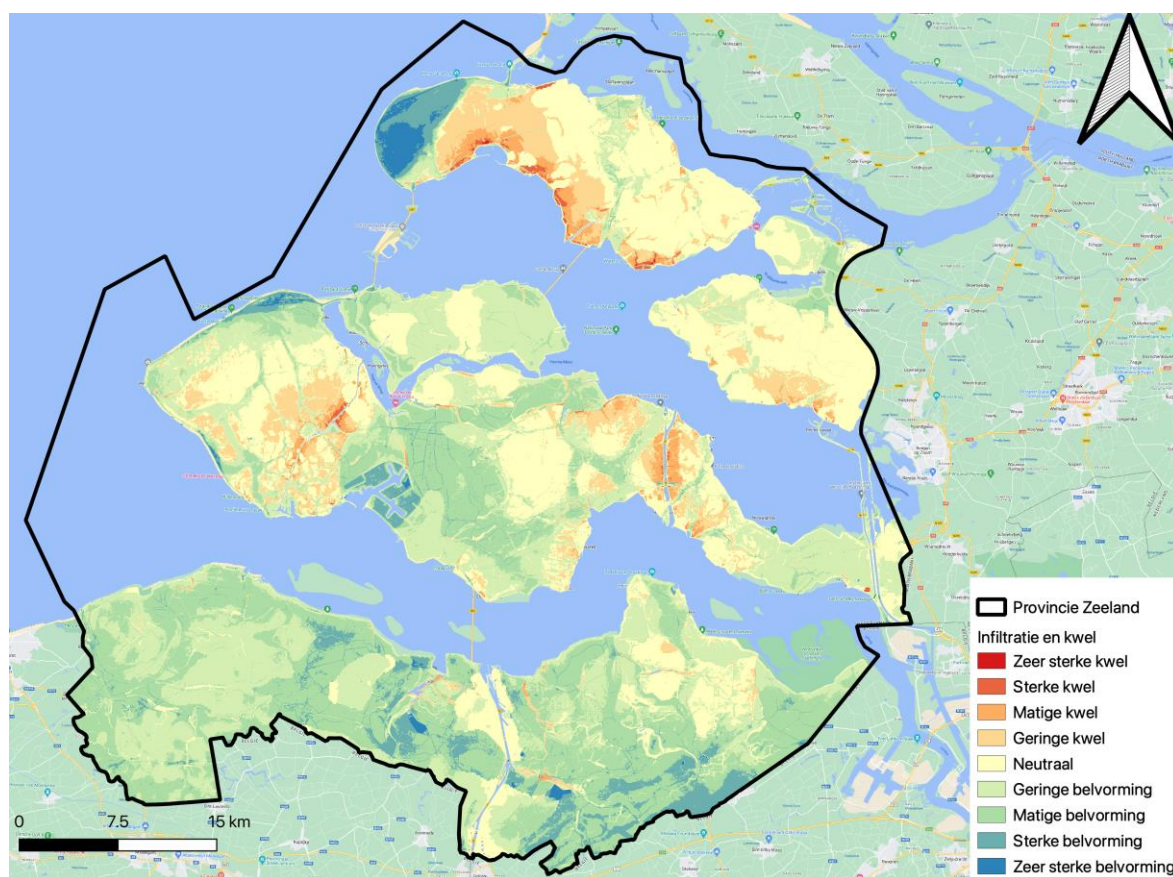
Figuur 72 Regionale geschiktheid klimaat-adaptieve drainage op basis van de aanwezigheid van klei op draindiepte (J. van Bakel et al., 2013; G. A. P. H. Eertwegh et al., 2012).



Figuur 73 GLG-mediaan op basis van grondwaterspiegeldieptemodel (de Gruijter et al., 2004; Hoogland et al., 2014).

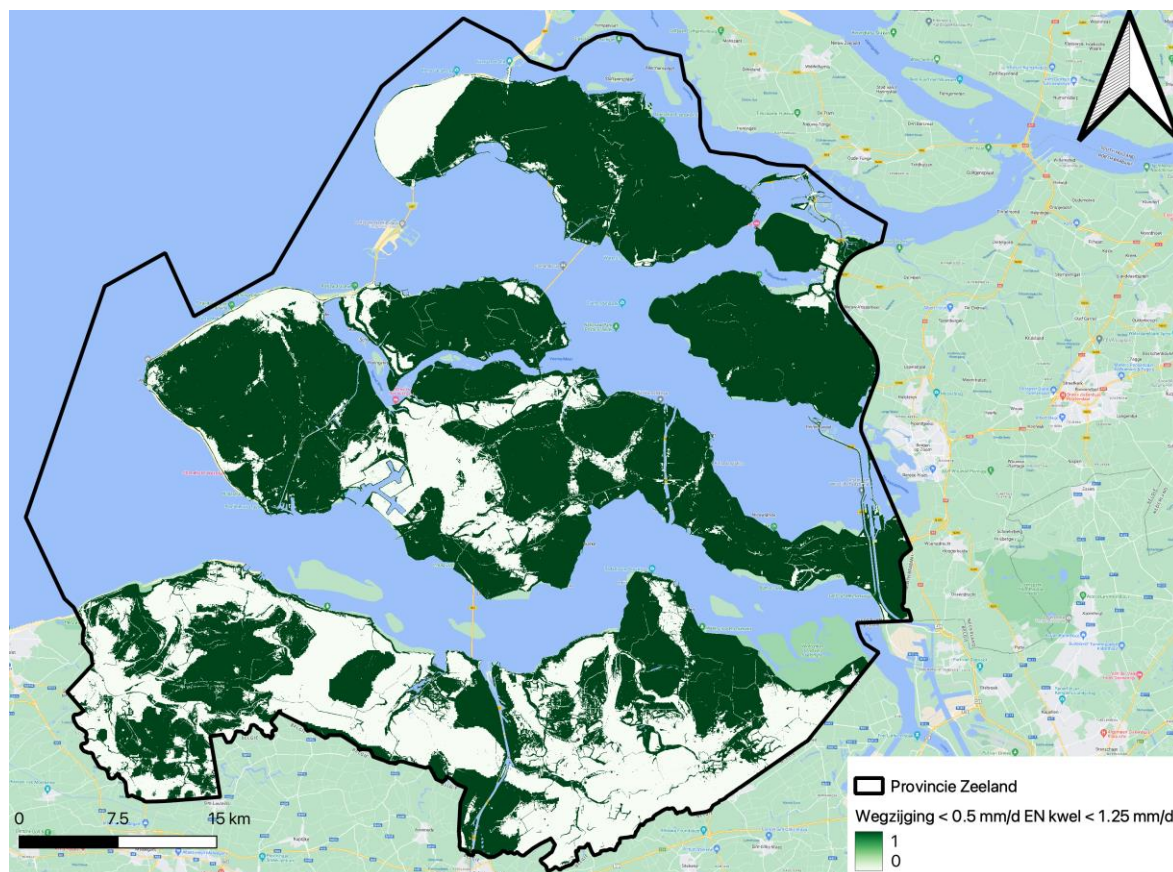


Figuur 74 Geschiktheid op basis van het criterium GLG gelijk aan of ondieper dan 160 cm-mv.

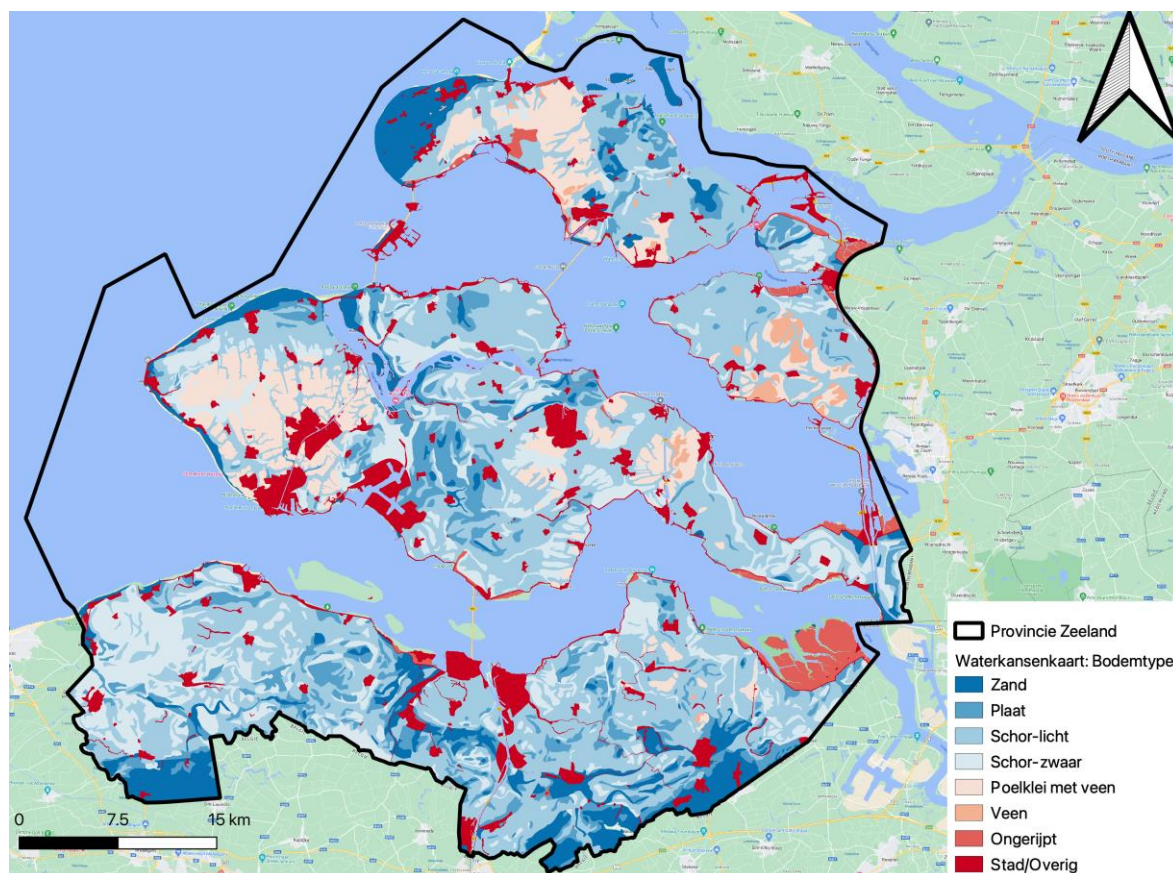


Figuur 75 Infiltratie- en kwelkaart op basis van de combikaart kwel en infiltratie uit 2014 van de provincie Zeeland (dataportaal provincie Zeeland⁹).

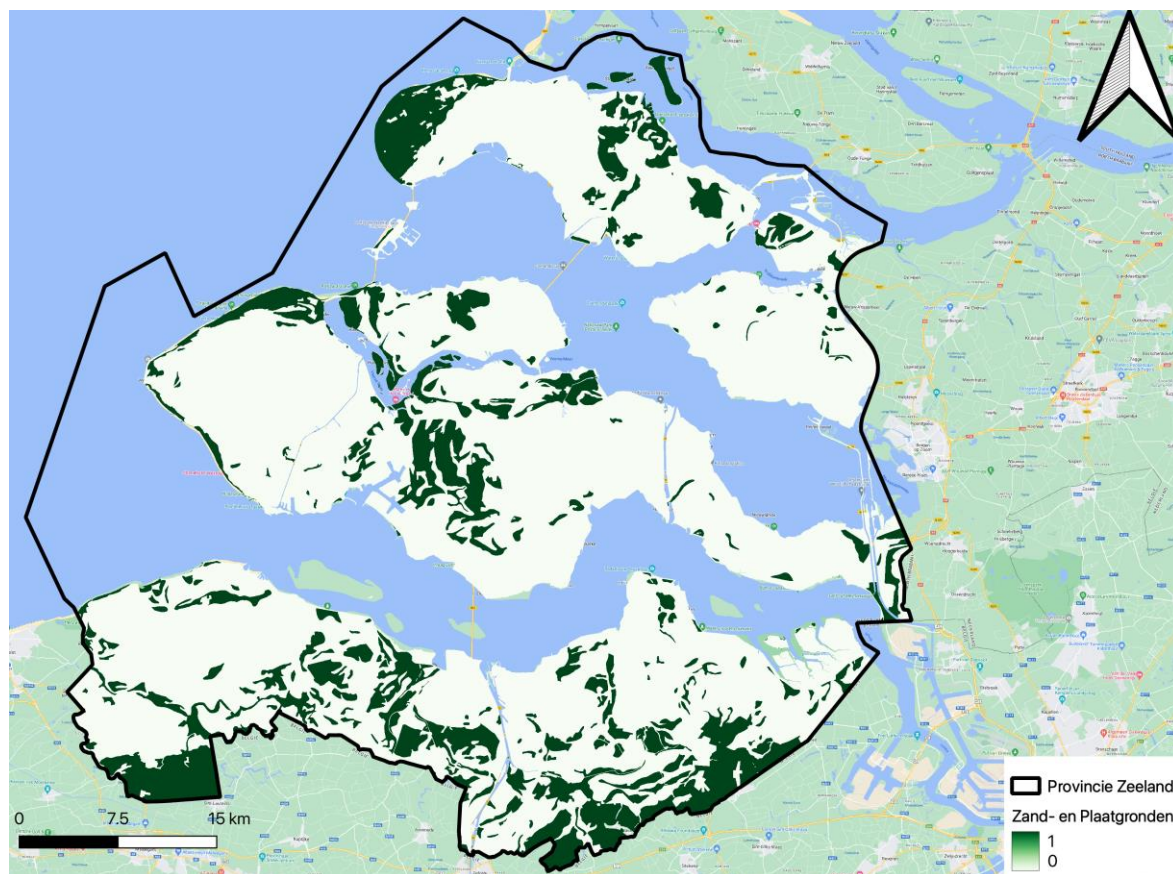
⁹ <https://dataportaal.zeeland.nl/dataportaal/srv/dut/catalog.search#/metadata/ebc21ae3-55c8-4c41-aba8-b638a3d629d2>



Figuur 76 Geschiktheid op basis van het criterium dat wegzijging kleiner is dan 0,5 mm/dag en de zoute kwel kleiner is dan 1,25 mm/dag.



Figuur 77 Bodemtypen op basis van de Waterkanskaart van de Provincie Zeeland.



Figuur 78 Zand- en Plaatgronden op basis van de Waterkansen Bodemtypen kaart van de Provincie Zeeland.



© KnowH2O - 2023