

Hydrologische analyse Bloemendaal

Eindrapportage polder Bloemendaal

ACACIA WATER

Hydrologische analyse Bloemendaal

Eindrapportage polder Bloemendaal

Samenvatting

In de polder Bloemendaal, nabij Gouda, is door de Stichting Weids Bloemendaal een pilot gestart om bodemdaling door veenoxidatie tegen te gaan op een grasperceel. Op het proefgedeelte van het perceel zijn drains aangelegd waarmee in de zomer water wordt geïnfiltreerd vanuit de sloot het perceel in. Acacia Water heeft in het voorjaar van 2022 de monitoring aangelegd van de hydrologische effecten op grondwaterstand en bodemvocht, en van de chemie in de bodem via zuurstofsensoren en periodieke bemonstering van het bodemwater. Dit rapport beschrijft de resultaten gedurende de gehele projectperiode (2022 t/m juli 2024), inclusief drainage en infiltratie fluxen in het systeem gemeten door Broere Irrigatie. De metingen tonen aan dat de maatregel goed werkt om de daling van de grondwaterstand bij aanhoudende droogte te voorkomen. In 2022 was het grootste effect: de grondwaterstanden op het proefperceel waren tot 70 cm hoger in dan op het referentieperceel en bleven de gehele periode vrij constant op slootniveau. Het bodemvocht in de bovenkant van het veen (onder de toemaakdeklaag) bleef hierdoor verzadigd en er was geen zuurstofrijk afbraakmilieu. Op het referentieperceel bleef zuurstofindringing ook erg beperkt, behalve rondom scheuren in 2022, die een versnelde transportroute vormen. De chemie van het bodemvocht in de veenlaag geeft inzicht in de redoxomstandigheden in de bodem en lijkt erop te wijzen dat compleet oxische condities beperkt voorkomen op het referentiegedeelte en afwezig zijn op het proefgedeelte.

Colofon

Klant
Stichting Weids Bloemendaal

Status
Eindrapport

Datum
16 december 2024

Projectnummer
AW24_324_FH_211282

Auteur(s)
Van Hateren, Tessa, Hoogland, Frouke

Gecontroleerd door
Arjen Roelandse

Vrijgegeven door
Tine te Winkel

Disclaimer
Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciawater.com

Inhoud

1 Inleiding **1**

2 Aanpak monitoring **2**
2.1 Proefperceel 2
2.2 Aangelegde monitoring 3

3 Resultaten hydrologische metingen **5**
3.1 Neerslagtekort in de verschillende proefjaren 5
3.2 Werking systeem 6
3.3 Resultaten Zuurstofindringing 23

4 Chemie van het bodemvocht **29**
4.1 Theorie 29
4.2 Resultaten chemie van het bodemvocht 32

5 Discussie **43**
5.1 Werking systeem 43
5.2 Effect van vernatting op afbraakmilieus in het veen 45

6 Conclusies **49**
6.1 Onderzoeksvragen 49
6.2 Werking van het systeem 49
6.3 Effect op afbraakmilieus 50

Literatuur **52**

Appendix A1: geïnstalleerde sensoren **53**

Appendix A2: momenten in het schuifbeheer **54**

1 Inleiding

In 2022 is Stichting Weids Bloemendaal een pilotproject met onderwaterdrainage in de polder Bloemendaal gestart. Het doel van de maatregel is bodemdaling en CO_2 uitstoot door veenafbraak tegen te gaan door vernatting van de veenbodem in droge periodes. In het aangelegde systeem zijn drains aangesloten op een verzameldrain en put die in verbinding staat met het slootpeil. In de put kunnen schuifjes open en dicht worden gezet, zodat het ook mogelijk is momenten van drainage en infiltratie uit te stellen.

In het project is er tussen 2022 en 2024 onderzocht wat de effecten zijn van het systeem op de waterhuishouding, bodemdaling en CO_2 uitstoot bij een perceel in de polder. Het perceel heeft een toemaakdek op het veen. Het wordt extensief beheerd met uitgesteld maaibeheer ten behoeve van weidevogels en twee maaimomenten per jaar.

Deze eindrapportage bespreekt de resultaten van de monitoring die is uitgevoerd door Acacia Water (grondwaterstanden, bodemvocht, zuurstofconcentraties, poriewaterchemie) en door Broere Irrigatie (putfluxen en waterpeilen in putten en de sloot). De meeste metingen zijn continu uitgevoerd gedurende de gehele pilot door middel van telemetrische sensoren. Daarnaast is er in de zomer van 2022 en 2023 gemeten aan de poriewaterchemie door middel van periodieke watermonsters om het effect op afbraakmilieus te onderzoeken.

In dit rapport richten we ons met de analyse op de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe werkt het systeem en is het in staat voldoende water te infiltreren om de daling van de grondwaterstand bij aanhoudende droogte te voorkomen?
- Wat is het effect van vernatting middels hogere grondwaterstanden op de afbraakmilieus in het veen?

De broeikasgasemissies (CO2 en methaan) zijn door Ko van Huissteden bemeten. De resultaten hiervan staan in een aparte deelrapportage. Ook zijn metingen uitgevoerd door Broere Irrigatie aan de maaiveldhoogtes (via waterpassen). Dirk van der Eijk van de Stichting Weids Bloemendaal heeft daarnaast een integrale rapportage geschreven waarin dit rapport en het rapport over broeikasgassen zijn opgenomen.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het drainage systeem en de inrichting van de monitoring beschreven. In hoofdstuk 3 en 4 beschrijven we de resultaten van de metingen. Hoofdstuk 3 gaat hierbij in op de continue metingen van putfluxen, grondwaterstanden, bodemvocht en zuurstof. Hoofdstuk 4 richt zich op de periodieke metingen van de poriewaterchemie in het veen. In 2023 heeft het project aanvullend budget gekregen van de Provincie Zuid-Holland om deze metingen uit te breiden met analyses van totaal N en totaal P. Hoofdstuk 5 bevat de discussie en hoofdstuk 6 de conclusies. In de appendix zijn verdere details te vinden van de monitoring, specifieke momenten in het schuifbeheer en de maaiveldmetingen.

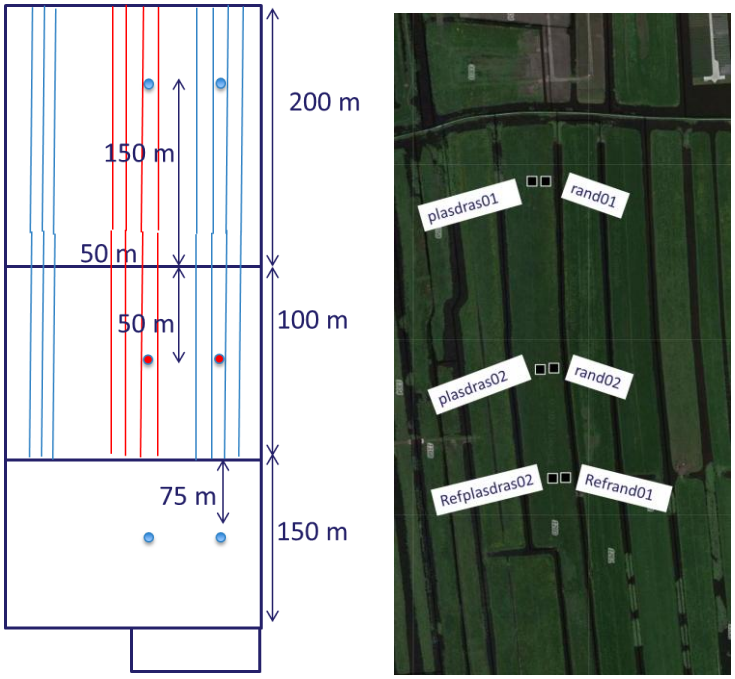
2 Aanpak monitoring

2.1 Proefperceel

Het proefperceel ligt in het weidevogelbroedgebied van Polder Bloemendaal. Het perceel heeft een lengte van ca 450 m en een breedte van ca 55 m, met een hol hoogteprofiel. In het voorjaar van 2022 zijn er over een lengte van 300 m drains aangebracht (zie Integrale Rapportage - Hoofdstuk 3). De resterende 150 m is niet gedraineerd en diende in dit onderzoek als referentie. In het perceel is het voor de regio kenmerkende koopveenprofiel met toemaakdek aangetroffen. Het perceel wordt extensief gebuikt: er wordt tweemaal per jaar gemaaid, met nabeweiding door schapen. Het perceel is al enkele jaren niet bemest. De graslandvegetatie is kruidenrijk met bloemrijke oevers. Sinds de komst van de rivierkreeften blijven de sloten open, wat een goede toestroom van water naar het infiltratiepunt garandeert.

De aangelegde drainage op het proefperceel is opgedeeld in twee systemen van drains die zijn aangesloten op een verzameldrain en put. In de put kunnen schuifjes dicht of open worden gezet. Bij open schuiven kan een uitwisseling plaatsvinden tussen het grondwater in het perceel en de sloot. Wanneer de schuiven van een put dicht staan, is er geen uitwisseling (infiltratie en drainage) tussen sloot en perceel via de drains. De schuiven maken het mogelijk om op bepaalde periodes meer water in het perceel vast te houden, bijvoorbeeld in het voorjaar zodat het moment van infiltratie kan worden uitgesteld, of in de zomer na een regenbui kan worden stopgezet om het regenwater vast te houden.

Midden in het perceel (iets uit het midden naar de zuidzijde gelegen) ligt een greppel parallel aan de drains. Het eerste drainsysteem (systeem 1) bestaat uit twee drains aan de noordzijde van de greppel en twee drains aan de zuidzijde van de greppel, in het midden van het perceel. De drains aan weerszijde van de greppel hebben een onderlinge afstand van 5 meter. Systeem 1 (rood in Figuur 1) verbindt de 4 drains in het middenstuk met een put en debietmeter. De greppel is dichtgezet over het gedraineerde proefgedeelte van het perceel en opengehouden op het referentiegedeelte.
Systeem 2 (blauw in Figuur 1) verbindt de drains in de noordelijke en zuidelijke randzone met een put en debietmeter. Op systeem 2 zijn zeven drains aangesloten (vier aan de noordzijde en drie aan de zuidzijde), met een onderlinge drainafstand van 4 meter. De kortste afstand tussen sloot en drain is 3 meter. De drainafstand tussen de twee systemen is 6 meter.



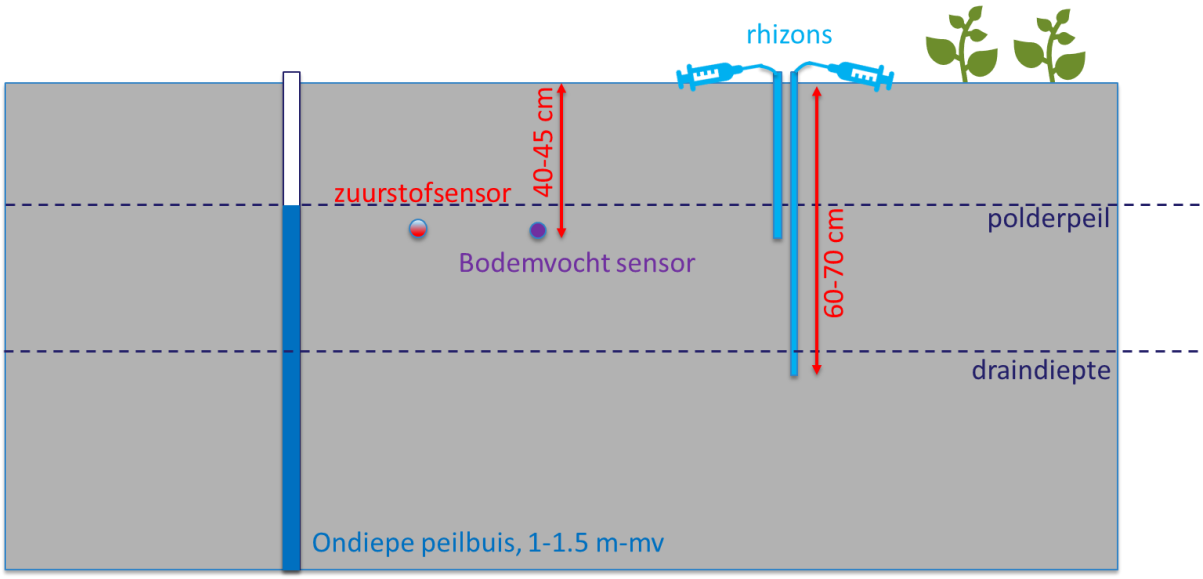
Figuur 1: locaties van de meetpunten ten opzichte van de drainage. Rood gekleurde drains zijn aangesloten op systeem 1 (middensysteem, plasdras) en blauw gekleurde drains op systeem 2 (randsysteem).

2.2 Aangelegde monitoring

In het voorjaar van 2022 is het project van start gegaan. Na de aanleg van de drains is ook het monitoringssysteem geïnstalleerd. Het monitoringssysteem meet de effecten op grondwaterstand, bodemvocht, zuurstof in de bodem en chemie in het bodemwater. Naast deze monitoring zijn de in- en uitgaande debieten in de drains gemeten door Broere Irrigatie, samen met de waterstanden in de putten en in de sloot.

De meetlocaties zijn ingericht met in totaal 6 meetpunten met sensoren zoals schematisch weergegeven in Figuur 2. De installatie vond plaats op 29/30 maart en 12 april 2022. In de figuur is te zien dat elk meetpunt bestaat uit een grondwaterstandsmeting middels een peilbuis met ondiep filter in het veen, een bodemvochtmeting op 45 cm diepte (in het veen net onder de kleiige toemaakdeklaag), een zuurstofsensor op dezelfde diepte en twee rhizons om watermonsters van het bodemvocht te nemen (op diepte 45 en 60-70 cm-mv).

Deze meetlocaties staan in het proefperceel zoals aangegeven in Figuur 1. Hierbij staan 4 meetlocaties in het proefgedeelte van het perceel waar drainage ter infiltratie is aangelegd. Twee meetpunten staan in het referentieperceel, waar geen drainage aanwezig is. Een uitgebreid overzicht van de geïnstalleerde sensoren is te vinden in appendix A1.



Figuur 2 schematische weergave van monitoring per meetlocatie (dwarsdoorsnede)

.



Figuur 3 Foto van een meetlocatie: van links naar rechts: 2x een rhizon, telemetrische logger, peilbuis, bodemvochtsensor (in de bodem), zuurstofsensor (in de bodem)

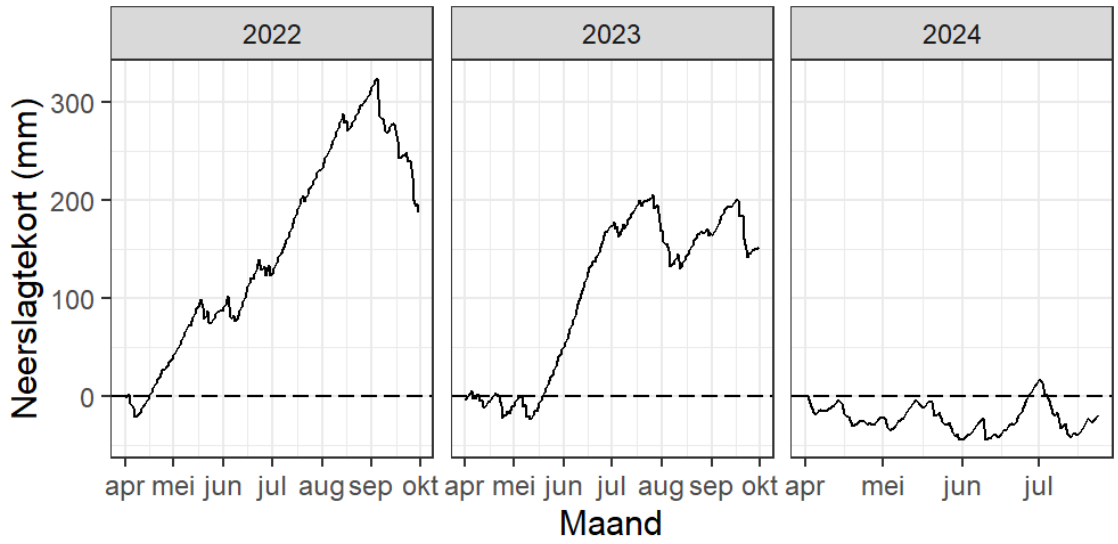
3 Resultaten hydrologische metingen

In dit hoofdstuk bespreken we de hydrologische metingen die inzicht geven in de werking van het systeem en het effect op de zuurstofindringing en daarmee de afbraakmilieus in de bodem. Het effect van de maatregel kan variëren van jaar tot jaar door de variaties in neerslag en droogte, waardoor infiltratie in meer of mindere mate plaatsvindt. Daarom bespreken we eerst de verschillen tussen de jaren gedurende de proef.

3.1 Neerslagtekort in de verschillende proefjaren

Het neerslagtekort wordt enkel gemeten in het groeiseizoen (april t/m september), omdat dit de maanden zijn waarin een eventuele droogte normaliter optreedt (https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/achtergrondinformatie-neerslagtekort). Dit zijn dan ook de maanden waarin de grootste effecten van het aangepaste waterbeheer worden verwacht. In de hydrologische analyse wordt er daarom op deze droge periodes geconcentreerd.

De zomer van 2022 was zeer droog (zie Figuur 4 met het gemeten neerslagtekort bij KNMI station Rotterdam), waardoor de effecten van de draininfiltratie goed konden worden gemeten ten opzichte van de referentiesituatie. In 2023 was het minder droog dan in 2022, maar er waren toch twee langere periodes met weinig tot geen neerslag: één aan het begin van de zomer (mei-juni) en één in augustus. Ook in dit jaar kon er dus een goed beeld van het effect van de draininfiltratie worden verkregen. Ook kon de werking van het systeem met regelbare schuifjes onder natte omstandigheden uitgebreider worden getest. Het jaar 2024 was tot het einde van de metingen in juli uitzonderlijk nat, waardoor het neerslagtekort nauwelijks boven de nul is geweest. Dit heeft een grote invloed gehad op de vochtbalans van het proefperceel en op de hoeveelheid infiltratie.



Figuur 4 neerslagtekort gemeten bij KNMI-station Rotterdam in de drie meetjaren.

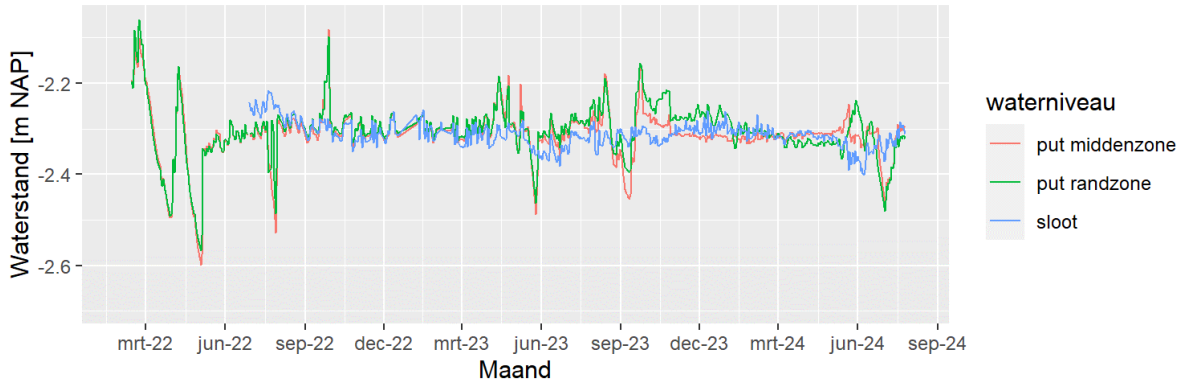
3.2 Werking systeem

De werking van het drainage/infiltratiesysteem is gemonitord door middel van metingen van de putwaterstanden en de slootwaterstand en van de in en uitgaande fluxen in de verzameldrains. In combinatie met de gemeten grondwaterstanden in het perceel geven deze metingen inzicht in de werking van de infiltratie en drainage en in de momenten en hoeveelheden van infiltratie.
Het systeem wordt aangestuurd in de putten waarop de verzameldrains uitkomen. Hier kan met schuifjes worden bepaald of er een directe interactie is tussen slootwaterpeil en grondwater (de schuifjes staan dan open). Door de schuifjes dicht te zetten, kan water worden vastgehouden in het perceel na een natte periode of kan infiltratie worden gestopt.

3.2.1 Schuifbeheer gedurende de proef

Figuur 5 toont de waterstanden gemeten in de putten en in de sloot. Wanneer de schuifjes open staan, volgt het putpeil het slootpeil. Wanneer schuiven gesloten zijn, volgt het putpeil daarentegen de grondwaterstand in het perceel, los van het slootpeil.
Hieronder staat het schuifbeheer per jaar beschreven.
Met name in 2023 is geëxperimenteerd met de mogelijke voordelen van een actief schuifbeheer, bijvoorbeeld om in het voorjaar het moment van infiltratie uit te stellen.

- 2022:
    - De infiltratie is gestart op 5 mei (dit was net op tijd om luchtindringing in de drains te voorkomen, omdat de grondwaterstand al aan het dalen was). In de periode van 20-7 tot en met 29-7 hebben de schuiven dichtgestaan, waardoor er geen infiltratie plaatsvindt in deze droge periode. De putwaterstanden zakken daardoor mee met het grondwater.
    - In de periode 21-9 tot 29-9 stonden de schuiven dicht waardoor regenwater werd gebufferd in het perceel en de putwaterstanden boven slootpeil kwamen.
- 2023:
    - Op 5-4 zijn de schuiven dichtgezet om regenwater te bufferen. Tussen 24 april tot en met 28 april zijn ze even opengezet vanwege veel regenval en daarna weer gesloten voor buffering van neerslag. Van 4 tot 15 mei is vervolgens gestart met de infiltratie door de schuiven open te zetten. Deze zijn vervolgens gesloten. De aanvang van de droge periode die inzet rond 15 mei leidt er daarmee toe dat de putwaterstanden uitzakken tot onder het slootpeil tot circa 50 cm onder maaiveld, ten gevolge van de zakkende grondwaterstanden. Op 27 mei zijn vervolgens de schuiven opengezet, waarna de putwaterstanden gelijk worden aan het slootpeil.
    - In de periode van de tweede helft van juli t/m september hebben de schuiven voornamelijk dicht gestaan. Hierdoor volgen de putwaterstanden de grondwaterstand, waarbij deze onder slootpeil komen in de droge periode van eind augustus tot midden september, en boven slootpeil komen te staan gedurende neerslag. Op 26 september zijn vanwege de hoge neerslag de schuiven op de middenstrook openzet. Vanaf 13 oktober is ook de schuif op de randstrook opengezet en start de drainage.
- In 2024 hebben de schuiven delen van de zomer dicht gestaan. Er heeft weinig infiltratie plaatsgevonden vanwege de overwegend natte omstandigheden.



Figuur 5: waterpeil in de putten van de drains in de midden- en in de randzone en het slootpeil.

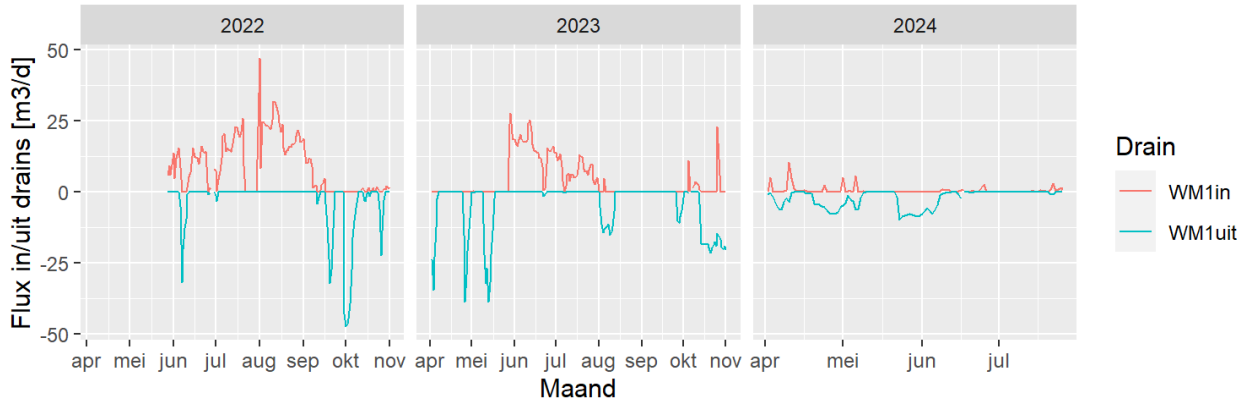
In de Appendix A2 wordt ingezoomd op een aantal specifieke momenten van het schuifbeheer en het effect op de fluxen en de grondwaterstanden.

3.2.2 Drainage en infiltratiefluxen

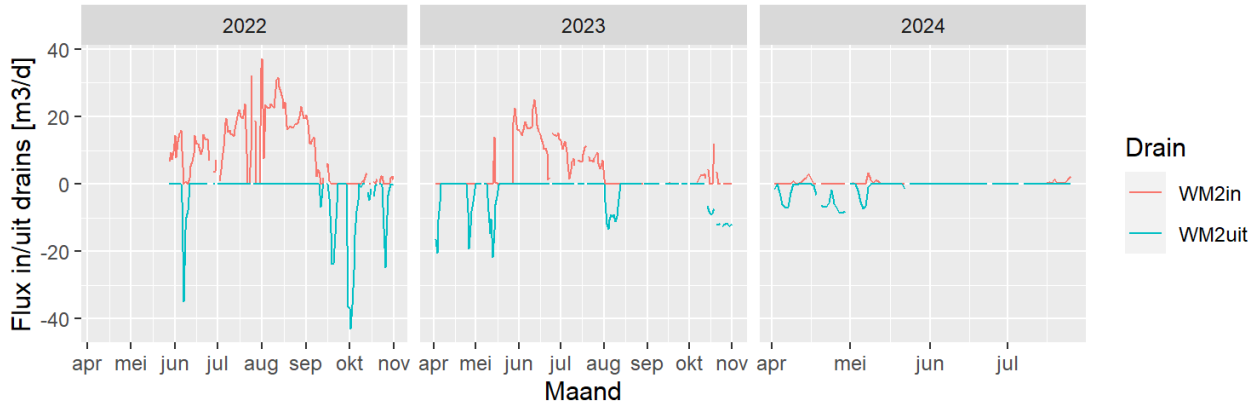
Onderstaande figuren tonen de fluxen voor de middenstrook (Figuur 6) en voor de randzone (Figuur 7). Figuur 8 toont de neerslag in dezelfde periode.
De patronen van infiltratie en uitstroom vanuit de drains komen goed overeen tussen de twee systemen. Te zien is dat buiten de zomerperiode neerslag telkens wordt gevolgd door uitstroom uit de drains (blauw in Figuur 6 en Figuur 7), behalve in periodes waarin de schuiven gesloten zijn. In de zomerperiode wordt neerslag meestal niet direct gevolgd door drainage, wat betekent dat de neerslag wordt opgenomen in de bodem.

In de zomerperiode van 2022 is in beide systemen vrijwel elke dag water geïnfiltreerd (in rood), behalve een korte periode in juli toen de schuiven dicht stonden. In 2023 is de infiltratie gestart op 27 mei door het openen van de schuiven. De grondwaterstand was toen al onder slootpeil gezakt waardoor de infiltratieflux in eerste instantie een piek vertoond doordat het grondwaterpeil moet worden aangevuld, en niet alleen op peil moet worden gehouden (zie A2). Gedurende de zomer is regelmatig water geïnfiltreerd, maar in het begin van augustus werd er ook water gedraineerd door de neerslag. De twee pieken in regenval in juli 2023 vallen samen met een dip in de waterinfiltratie. In de middenstrook is tijdens die eerste piek zelfs wat water gedraineerd. Infiltratie zal eerder omslaan in drainage in de middenstrook omdat hier minder bodemberging beschikbaar is door de lagere ligging van het maaiveld ten opzichte van het grond- en slootwaterpeil. In 2023 is meer geëxperimenteerd met het schuifbeheer. De schuiven hebben toen dicht gestaan vanaf augustus om water vast te houden, tot 26 september. Toen is er vanwege de grote regenval besloten om de schuiven weer open te zetten. Vanaf dat moment is er dan ook drainage uit het proefperceel zichtbaar.

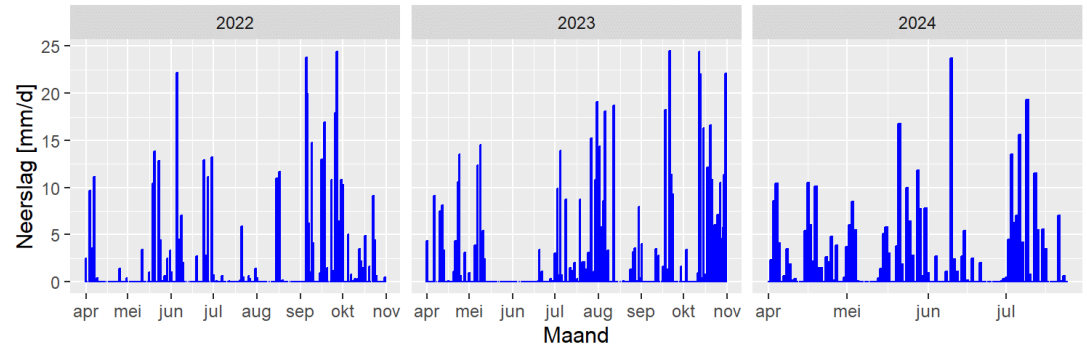
In 2024 is er vanwege de uitzonderlijk natte situatie vooral water uit het perceel gedraineerd, zelfs in de zomer. Er is slechts beperkt een aantal kubieke meter water geïnfiltreerd, waarvan iets meer in de middenstrook dan in de randzone. Vanwege de vele regenbuien tot in juli hebben de schuiven meestentijds open gestaan voor drainage. Tussentijds hebben ze enkele malen dicht gestaan om onnodige infiltratie te vermijden en daarmee te voorkomen dat de bodem onvoldoende opdroogt en daardoor onvoldoende draagkracht krijgt voor de oogst van de eerste grassnede.



Figuur 6: gemeten fluxen in- en uitgaand in de drains van de middenstrook.



Figuur 7: gemeten fluxen in- en uitgaand in de drains van de randzone.



Figuur 8: gemeten neerslag

In Tabel 1 is op maandbasis weergegeven welk volume is geïnfiltreerd en gedraineerd in de twee systemen. Per systeem is dit ook omgerekend naar een gemiddelde per drain.

De fluxen kunnen ook worden omgerekend naar mm's door gebruik te maken van de oppervlakten waarover de twee drainsystemen infiltreren, dit is te zien in Tabel 2. Door de waterbalans om te rekenen naar mm's zijn de resultaten op te schalen naar hectares en te extrapoleren naar vergelijkbare locaties in de polder.

Voor de omrekening naar mm's is gebruik gemaakt van de volgende oppervlakten:

- middenstrook (systeem 1): oppervlakte is circa 19 m x 300 m drainlengte = 5700 m^2. De 19 m breedte van de middenstrook is hierbij gebaseerd op een onderlinge drainafstand van 4 m, behalve tussen de drains aan weerzijde van de greppel waarbij de onderlinge afstand 5 m is, en een afstand van 6 m tussen de drains van randstrook en middenstrook.
- randzone (systeem 2): oppervlakte is circa 32 m x 300 m drainlengte = 9600 m^2. De 32 m breedte van de randstrook is hierbij gebaseerd op een drainafstand van 4 m tussen drains binnen de randstrook, een afstand tussen de buitenste drain en de sloot van 3 m en een drainafstand tussen de randstrook en middenstrook van 6 m.

Tabel 1: Fluxen in m^3 in en uit de drains bij systeem 1 (de middenstrook met 4 gekoppelde drains) en systeem 2 (de randzone met 7 gekoppelde drains).

		Systeem 1, middenstrook			Systeem 2, randzone		
Jaar	Maand	Infiltratie (m^3)	Drainage (m^3)	Infiltratie per drain (m^3)	Infiltratie (m^3)	Drainage (m^3)	Infiltratie per drain (m^3)
2022	Juni	231	83	58	230	72	33
	Juli	386	4	96	439	0	63
	Augustus	643	0	161	664	0	95
	September	85	208	21	104	168	15
	Oktober	17	247	4	20	206	3
	November	1	394	0	3	344	0
	December	2	77	0	1	79	0
2023	Januari	2	864	1	0	327	0
	Februari	12	40	3	17	45	2
	Maart	3	429	1	3	321	0
	April	0	218	0	0	108	0
	Mei	109	189	27	105	79	15
	Juni	452	3	113	423	0	60
	Juli	214	0	53	214	0	31
	Augustus	5	128	1	0	99	0
	September	0	38	0	1	0	0
	Oktober	48	341	12	34	168	5
	November	14	441	4	0	301	0
	December	0	210	0	0	139	0
2024	Januari	1	219	0	0	105	0
	Februari	0	277	0	0	243	0
	Maart	93	156	23	0	111	0
	April	32	101	8	9	96	1
	Mei	7	111	2	7	24	1
	Juni	11	44	3	1	0	0
	Juli	9	2	2	8	0	1

Tabel 2: Fluxen omgerekend naar mm's in en uit de drains bij systeem 1 en systeem 2. Hierbij is gebruik gemaakt van het oppervlak waarover de drains werken, zoals toegelicht in de tekst.

		Systeem 1, middenstrook		Systeem 2, randzone	
	Maand	Infiltratie (mm)	Drainage (mm)	Infiltratie (mm)	Drainage (mm)
2022	Juni	40.6	14.6	23.9	7.5
	Juli	67.6	0.6	45.8	0.0
	Augustus	112.8	0.0	69.2	0.0
	September	14.9	36.6	10.8	17.5
	Oktober	2.9	43.4	2.1	21.4
	November	0.1	69.1	0.4	35.8
	December	0.3	13.5	0.1	8.2
2023	Januari	0.4	151.5	0.0	34.1
	Februari	2.1	7.0	1.7	4.6
	Maart	0.5	75.3	0.3	33.4
	April	0.1	38.2	0.0	11.2
	Mei	19.2	33.2	11.0	8.2
	Juni	79.4	0.5	44.1	0.0
	Juli	37.5	0.1	22.3	0.0
	Augustus	0.8	22.4	0.0	10.3
	September	0.1	6.7	0.1	0.0
	Oktober	8.4	59.8	3.6	17.5
	November	2.5	77.3	0.0	31.3
	December	0.0	36.9	0.0	14.5
2024	Januari	0.1	38.4	0.0	10.9
	Februari	8.4	48.7	0.0	25.3
	Maart	2.5	27.4	0.0	11.6
	April	5.6	17.7	1.0	10.0
	Mei	1.3	19.5	0.8	2.5
	Juni	1.9	7.7	0.1	0.0
	Juli	1.6	0.3	0.8	0.0

Verschillen rand en middenzone

Qua volume per systeem heeft er in de maanden van infiltratie (bijv. augustus 2022, juli 2023) ongeveer net zoveel infiltratie plaatsgevonden in de rand als in de middenzone. De randzone beslaat echter een groter oppervlak en meer drains dan de middenzone. Per drain bekeken is er dan ook altijd meer water geïnfiltreerd in de middenstrook dan in de randstrook. Ook omgerekend naar mm's was de infiltratie in de middenstrook zo'n 1.6 a 1.7 keer zo hoog als in de randzones. De drainage flux is altijd groter in de middenstrook dan in de randzone, zowel in volume per systeem als omgerekend naar mm's.

Er zijn meerdere mogelijke oorzaken voor de hogere infiltratie in de middenstrook dan de randzone.

Eén is dat de randzone deels nog infiltratie ondervindt vanuit de sloot. Ook is het waarschijnlijk dat gedurende drogere periodes de wortels van het gras in de midden- en randstrook tot dezelfde diepte groeien ten opzichte van maaiveld. Door de holle ligging van het perceel ligt hierdoor de zone waaruit het gras voornamelijk water onttrekt lager ten opzichte van NAP. Deze verklaringen zijn in overeenstemming met de observatie dat op het referentieperceel de grondwaterstand in droge periodes in de middenstrook verder uitzakt dan in de randzone, zowel t.o.v. maaiveld als t.o.v. NAP. Dit betekent dat in de zomer onder referentie omstandigheden sprake is van een holle grondwaterspiegel (deels de oorzaak ook van de holle ligging van het perceel).

Een andere mogelijke oorzaak voor de hogere infiltratie in de middenstrook is dat door de lagere ligging ten opzichte van slootpeil er minder ruimte beschikbaar is voor berging van neerslag in de onverzadigde zone. Hierdoor zuigt het gewas eerder water aan vanuit de verzadigde zone, met een daling van het grondwater tot gevolg, en als gevolg daarvan infiltratie door de drains. In de metingen is terug te zien dat aan het begin van het groeiseizoen het grondwater dichter aan maaiveld staat in de middenstrook dan aan de randstrook. Hierdoor is een dunnere onverzadigde zone aanwezig boven het grondwater en daardoor minder watervoorraad in de vorm van bodemvocht. Hierdoor leidt de grasverdamping direct tot een grondwaterstandsverlaging. Dat de middenstrook minder bodemberging beschikbaar heeft verklaard ook waarom hier eerder drainage optreedt bij neerslag gedurende het groeiseizoen en de hoeveelheid drainage groter is: er is geen ruimte in de onverzadigde zone om de neerslag in op te slaan waardoor deze direct bijdraagt aan een grondwaterstandsverhoging, met drainage tot gevolg.

Een andere mogelijke bijdrage aan de grotere infiltratie op de middenstrook is de grondwatergradiënt die ontstaat tussen referentie en proefgedeelte: door de opzet van de proef ontstaat ook een grondwatergradiënt tussen het gedraineerde proefgedeelte en ongedraineerde referentiegedeelte. In de droogste periodes, wanneer de grondwaterstand op referentiegedeelte significant lager staat dan op het proefgedeelte, ontstaat zo een wegzijging van proef- naar referentie perceel. Door een grotere uitzakking in de middenstrook van het referentiegedeelte kan deze groter zijn voor de middenstrook.

De hogere afvoer van het systeem (drainage) in de middenstrook dan in de randstrook is deels te verklaren door de bovengenoemde kleinere beschikbare berging in de onverzadigde zone van de middenstrook. Daarnaast is het mogelijk dat er oppervlakkige afspoeling heeft plaatsgevonden van de rand- naar de middenstrook, omdat deze laatste lager ligt. Daarnaast kan een deel van de drainage van de randzone verlopen direct naar de sloot in plaats van via de drains naar de sloot.

Waterbalans

Met een waterbalans worden alle ingaande en uitgaande fluxen van het perceel met elkaar vergeleken. Met de gemeten drainfluxen en het neerslagoverschot/tekort hebben we inzicht in een aantal belangrijke balanstermen. Deze zijn naast elkaar gezet in Tabel 3 en Tabel 4. Hiertoe hebben we de neerslag- en verdampingsgegevens van het KNMI-station in Rotterdam gebruikt. Als verdamping zijn we uitgegaan van de Makkink verdamping zoals berekend door het KNMI. Dit is de maximale verdamping vanuit gras.

In Tabel 3 zijn deze fluxen uitgedrukt in m^3 per maand en in Tabel 4 in mm/d. Om mm naar m^3 om te rekenen en vice versa gaan we hier uit van een oppervlakte van 300x50 m^2 voor het gehele gedraineerde perceel. Missende balanscomponenten in deze tabel zijn de kwel/wegzijging, de uitwisseling met de sloot en het referentieperceel en verandering in de berging van water binnen het bodemprofiel. Een verandering van de waterberging kan zowel samengaan met een grondwaterstandsverandering als met een verandering in de vochtigheid van de onverzadigde zone. In geval van veen kan ook in de verzadigde zone een verandering optreden in de berging zonder een grondwaterstandsverandering, namelijk via krimp en zwel van het veen. We verwachten dat de kwel/wegzijging neutraal is doordat er op diepte (tussen circa 3 en 7 m-mv) een dikke kleilaag aanwezig is die het veenpakket afsluit van het eerste watervoerende pakket. Deze verticale weerstand zorgt ervoor dat, hoewel er water betreft het verticale drukverschil een wegzijgingssituatie is naar diepere omliggende polder, de verticale flux als resultante van dit drukverschil verwaarloosbaar is.

Zoals in Tabel 4 te zien is, heft in de maand augustus 2022 de infiltratie door de drains het neerslagtekort grotendeels op. In juli is de infiltratie echter lager dan het neerslagtekort. Omdat de grondwaterstand op het proefperceel in die maanden weinig is veranderd zal het verschil in het tekort en de infiltratie in juni met name hebben gezorgd voor een uitdroging van de onverzadigde zone. In de maand september is meer regen gevallen dan dat er via de drainage het perceel uit is gegaan. Dit is deels te verklaren door een grondwaterstandsverhoging in die maand (14 cm gemiddeld tussen begin en einde van deze maand). Nemen we echter een bergingscapaciteit aan boven het grondwater van 0.1-0.2 dan bergt de grondwaterstandsverhoging slechts 1 tot 3 mm van het verschil. Het grootste gedeelte van het neerslagoverschot zal daarom in de verzadigde zone zijn opgeslagen door zwel van de verzadigde veenbodem (hierdoor kan deze meer water bevatten) en door een verhoging van het bodemvocht in combinatie met zwel in de onverzadigde zone. Een deel van het neerslagoverschot kan daarnaast zijn afgevoerd via oppervlakkige afstroming en grondwater richting de sloot en richting het drogere referentieperceel.

In 2023 waren mei en juni maanden met een neerslagtekort. Op 27 mei zijn de schuiven opengezet en is gestart met de infiltratie. In de maand juni was het neerslagtekort groter dan de infiltratie, terwijl de grondwaterstand weinig veranderde. Het bodemvocht in de onverzadigde zone zal dan ook zijn gedaald in deze periode. In juli was er een neerslagoverschot, maar heeft er geen drainage plaatsgevonden. In die maand is de grondwaterstand gemiddeld gestegen met 13 cm, wat een deel van het verschil verklaart. Net als in 2022 zal echter een groot deel van het verschil komen door waterberging in de onverzadigde zone en door zwel van de veenbodem.

In 2024 (analyse tot en met juli 2024) was het zeer nat en was er alleen sprake van een neerslagtekort in juni. Ook hebben de schuiven grotendeels dichtgestaan, met name in de randzone, waardoor er weinig infiltratie en drainage heeft plaatsgevonden.

Tabel 3: waterbalans proefperceel (systeem 1 + systeem 2) in m^3. Het gebruikte oppervlak voor het proefperceel is 300x50 m^2. Het neerslagoverschot is negatief wanneer er meer verdampt is dan dat er neerslag is gevallen. Het berekende verschil is positief wanneer er meer gedraineerd (of minder geïnfiltreerd) is dan verwacht op basis van het neerslagoverschot en vice versa. Het verschil geeft dus het verwachte volume gebufferde of verloren water.

	Maand	Neerslagoverschot (m^3) KNMI station Rotterdam	Infiltratie (m^3)	Drainage (m^3)	Verschil (m^3)
2022	Juni	-530	461	155	223
	Juli	-1617	825	4	796
	Augustus	-1209	1307	0	-98
	September	1865	189	377	-1677
	Oktober	180	37	453	237
	November	1602	4	738	-869
	December	1230	2	156	-1077
2023	Januari	2060	2	1191	-871
	Februari	42	29	85	14
	Maart	1145	5	750	-400
	April	156	1	325	169
	Mei	-878	215	268	931
	Juni	-1898	875	3	1025
	Juli	80	428	1	-507
	Augustus	32	5	227	190
	September	221	1	39	-183
	Oktober	2307	83	509	-1880
	November	2513	15	741	-1786
	December	1364	0	349	-1015
2024	Januari	1193	1	324	-870
	Februari	1443	0	520	-923
	Maart	25	93	268	149
	April	324	41	197	-168
	Mei	336	15	135	-216
	Juni	-861	12	44	-893
	Juli	470	17	2	-485

Tabel 4 waterbalans proefperceel omgerekend naar mm/d. Het gebruikte oppervlak voor het proefperceel is 300 x 50 m^2.

	Maand	Neerslagoverschot (mm/d) KNMI station Rotterdam	Infiltratie (mm/d)	Drainage (mm/d)	Verschil (mm/d)
2022	Juni	-1.2	1.0	0.3	0.5
	Juli	-3.5	1.8	0.0	1.7
	Augustus	-2.6	2.8	0.0	-0.2
	September	4.1	0.4	0.8	-3.7
	Oktober	0.4	0.1	1.0	0.5
	November	3.6	0.0	1.6	-2.0
	December	2.6	0.0	0.3	-2.3

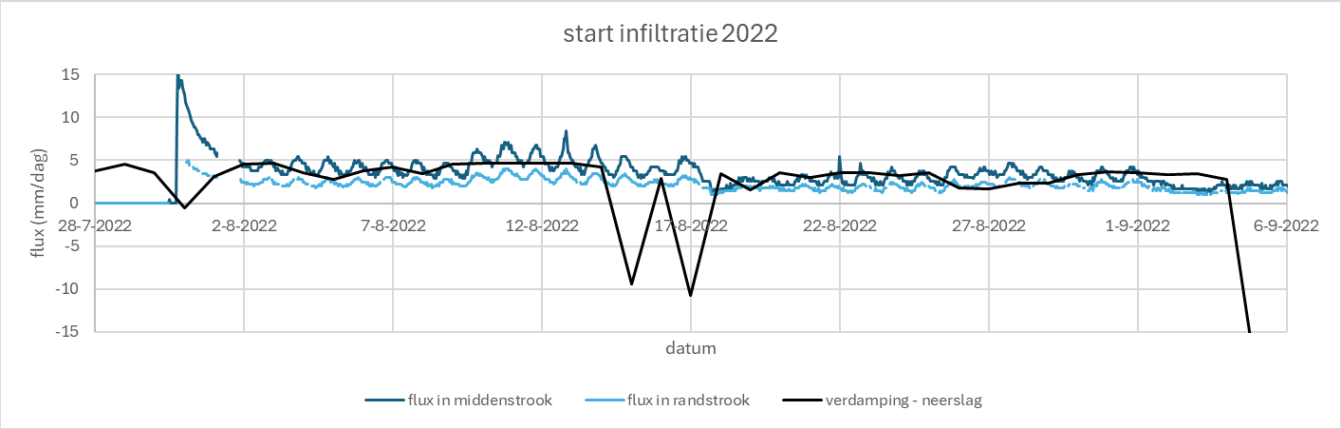
2023	Januari	4.4	0.0	2.6	-1.8
	Februari	0.1	0.1	0.2	0.0
	Maart	2.5	0.0	1.6	-0.9
	April	0.3	0.0	0.7	0.4
	Mei	-1.9	0.5	0.6	2.0
	Juni	-4.2	1.9	0.0	2.3
	Juli	0.2	0.9	0.0	-1.1
	Augustus	0.1	0.0	0.5	0.4
	September	0.5	0.0	0.1	-0.4
	Oktober	5.0	0.2	1.1	-4.1
	November	5.6	0.0	1.6	-4.0
	December	2.9	0.0	0.8	-2.1
2024	Januari	2.6	0.0	0.7	-1.9
	Februari	3.3	0.0	1.1	-2.2
	Maart	0.1	0.2	0.6	0.3
	April	0.7	0.1	0.4	-0.4
	Mei	0.7	0.0	0.3	-0.4
	Juni	-1.9	0.0	0.1	2.0
	Juli	1.0	0.0	0.0	-1.0

Maximale watervraag gedurende infiltratie

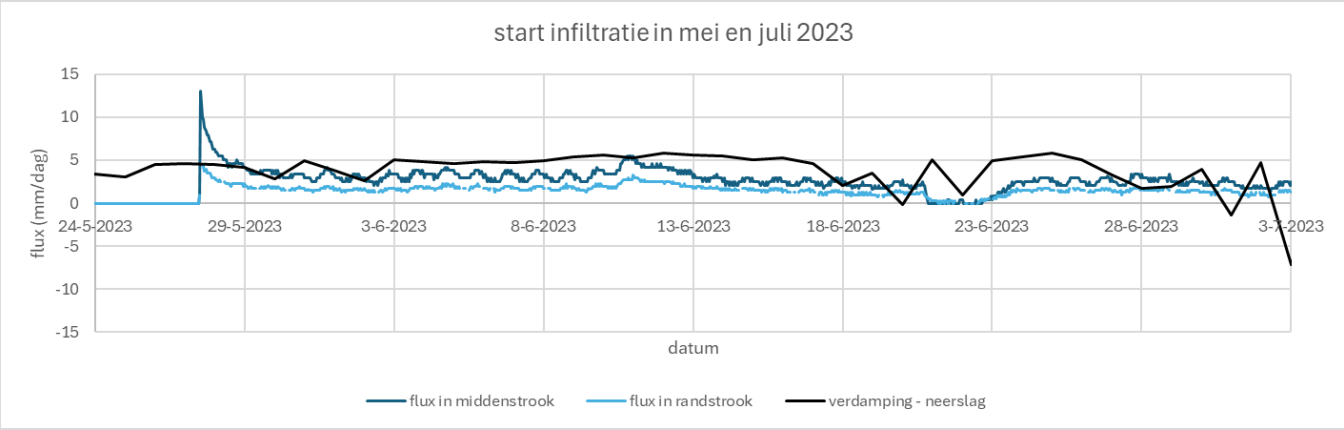
In de maanden van augustus 2022 en juli 2023 heeft alleen infiltratie plaatsgevonden en geen drainage. Dit waren droge maanden en de keren dat het regende heeft dit niet geleid tot een dusdanig hoge grondwaterstand dat de infiltratie omsloeg naar drainage uit het perceel. De maanden zijn daarom interessant om in meer detail te bekijken wat de watervraag van het systeem is in langere periodes van droogte.
Figuur 9 en Figuur 10 tonen de infiltratie in deze periode in detail, omgerekend naar mm/dag. Ook is de gewasverdamping minus de neerslag toegevoegd, op dagbasis van het KNMI station in Rotterdam.
Te zien is dat er een dag/nachtritme is in de infiltratieflux, waarbij deze het hoogste is gedurende de dag, wanneer gewasverdamping leidt tot een verlaging van de grondwaterstand. De maximale infiltratieflux in augustus 2022 was in zowel rand als middenstrook circa 30 m3/dag. Dit vertaalt zich naar circa 5 mm/dag voor de middenstrook en 3 mm/dag voor de randstrook (Figuur 9). Gemiddeld over het gehele proefperceel komt dit overeen met 4 mm/dag. Zoals te zien in de figuur komt de infiltratieflux goed overeen met de gewasverdamping.
Voor de maand juli in 2023 geldt ongeveer hetzelfde. De maximale infiltratieflux was circa 20 m3/dag in zowel rand als middenstrook. Dit vertaalt zich naar circa 3.5 mm/dag in de middenstrook en 2 mm/dag in de randstrook (Figuur 10). Gemiddeld over het gehele proefperceel komt dit overeen met 2.5 mm/dag. Dit is wat lager dan in 2022 en dan de gewasverdamping in deze maand. De grondwaterstand bleef wel goed op peil in deze periode. Mogelijk was de onverzadigde zone minder uitgedroogd dan in augustus 2022, waardoor het gras vocht uit deze zone kon benutten zonder dat dit tot evenveel aanvulling vanuit het grondwater leidde. Een andere mogelijkheid is dat er in deze

periode minder gewasverdamping plaatsvond dan de Makkink referentie verdamping van het KNMI.

Gedurende het totale groeiseizoen van 2023 (april tot en met september) is circa 100 mm water geïnfiltreerd in het proefperceel, wat overeenkomt met een gemiddelde van 0.6 mm/dag over de hele periode van 6 maanden. In 2022 startten de metingen pas in juni. Over de periode juni t/m september 2022 is in totaal circa 185 mm geïnfiltreerd, wat met een gemiddelde van 1.5 mm/dag overeenkomt voor deze periode.



Figuur 9: infiltratieflux in rand en middenstrook in augustus 2022. Negatieve waardes van de zwarte lijn, verdamping minus neerslag, komen door grote regenbuien op die dagen.



Figuur 10: infiltratieflux in rand en middenstrook in juli 2023.

3.2.3 Resultaten grondwaterstand

Proefperceel

In de onderstaande figuren (Figuur 11 en Figuur 12) is de grondwaterstand op de verschillende meetlocaties op het proefgedeelte (met drains) weergegeven. Opvallend is dat de grondwaterstand in het gehele proefperceel (meetpunten in rand en midden) vrijwel gelijk is ten opzichte van NAP. In de randzone is het niveau gedurende de infiltratie rond de 2.35 m-NAP, in de plasdraszone rond 2.3 m-NAP. Wanneer de grondwaterstand wordt uitgedrukt ten opzichte van maaiveld is er wel een verschil

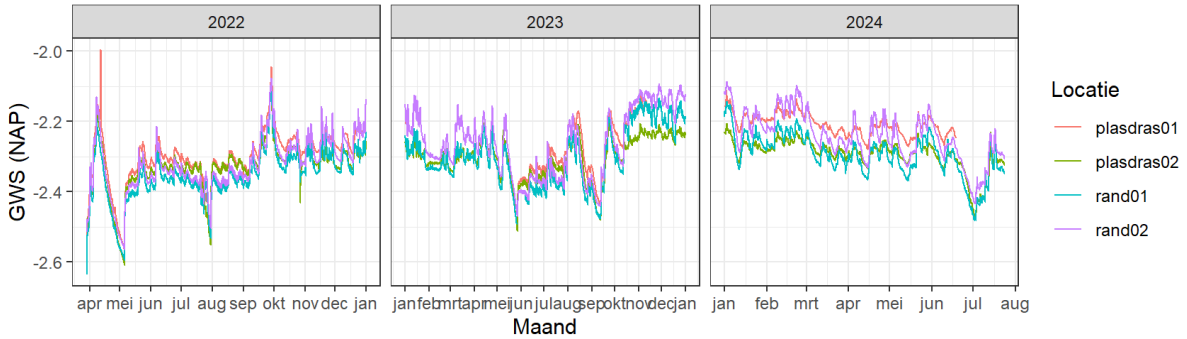
tussen de rand en het midden. Dit komt door de lage ligging van het midden van het perceel waardoor hier de grondwaterstand dichter bij maaiveld staat.

De start van de infiltratie op 5 mei 2022 is duidelijk terug te zien in de grondwaterstand die op dat moment omhoog gaat bij de meetpunten. Vóór deze periode reageerden de meetpunten op het gedraineerde gedeelte gelijk op droogte als de meetpunten op het referentie gedeelte (zie Figuur 13). Eind juli 2022 heeft er een periode geen infiltratie plaatsgevonden, wat ook terug te zien is in een tijdelijke uitzakking van de grondwaterstand. In die perioden zonder infiltratie, dalen de grondwaterstanden in het proefperceel tot maximaal 62 cm-mv in de randzone en 55 cm-mv in de middenstrook.

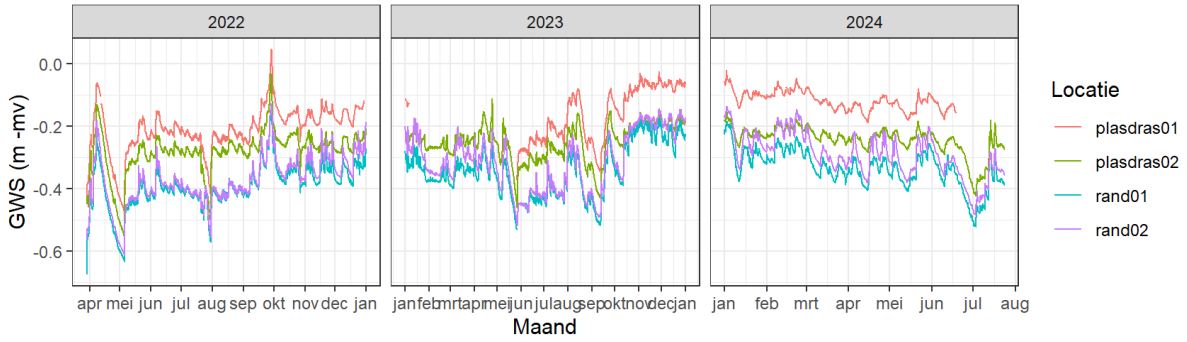
In 2023 valt een periode in mei op, waar de grondwaterstanden stevig uitzakten tot 53 cm-mv in de randzone en 46 cm-mv in de middenstrook. Ook hier is de uitzakking op het gedraineerde gedeelte gelijk aan het referentiegedeelte, tot het moment dat met de infiltratie wordt gestart. Vervolgens is infiltratie gestart op 27 mei waarna de grondwaterstanden op alle meetpunten op het gedraineerde gedeelte omhoog gaan. In juni en daarna is de grondwaterstand hersteld tot vergelijkbare waarden als tijdens de infiltratie in 2022, dicht rond het slootwaterpeil van -2.35 m-NAP. September 2023 had opnieuw droge periodes waarin de grondwaterstanden tot onder slootpeil zijn gezakt, omdat in die periode de schuiven dicht hebben gestaan en er dus een periode geen infiltratie heeft plaatsgevonden.

In 2024 hebben schuiven grotendeels dicht gestaan vanwege overwegend natte omstandigheden waardoor de grondwaterstanden lange tijd niet uitzakten. In de geanalyseerde periode tot eind juli heeft daardoor vrijwel geen infiltratie plaatsgevonden. De grondwaterstanden zakten op zowel proef en referentie tot 42 a 48 cm-mv begin juli.

In de Appendix A2 zijn een aantal specifieke momenten in het schuifbeheer uitgelicht en het effect op de grondwaterstand.



Figuur 11: gemeten grondwaterstand ten opzichte van NAP op het gedraineerde proefperceel (m - NAP).



Figuur 12 gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld op het gedraineerde proefperceel (m - mv).

Vergelijking proef- en referentieperceel

In onderstaande Figuur 13 en Figuur 14 is de grondwaterstand van het proefperceel vergeleken met de twee meetpunten op het referentieperceel.

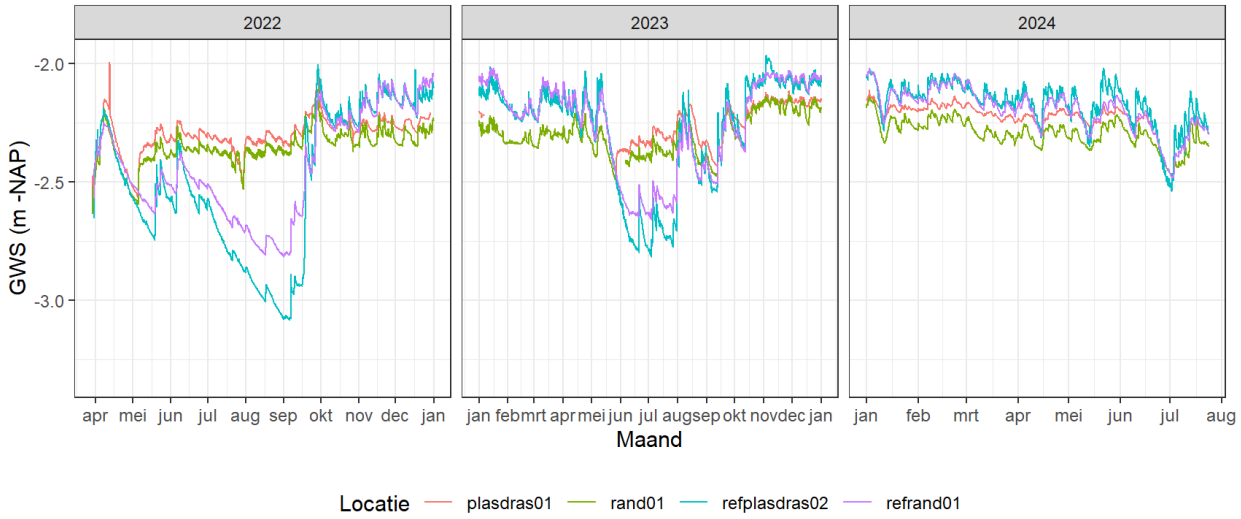
In 2022 zakte de grondwaterstand op het referentieperceel tot 81 cm-mv in de randzone en 104 cm-mv in de middenstrook. De grondwaterstand in de middenstrook zakt dus verder uit. Door het lagere maaiveld is dit verschil nog groter wanneer de grondwaterstand wordt uitgedrukt ten opzichte van NAP. Dit geeft aan dat zonder drains een holle grondwaterstandspiegel ontstaat in het groeiseizoen.
In 2023 zakte de grondwaterstand minder ver uit, tot 66 cm-mv in de randzone en 77 cm-mv in de midden zone. In 2024 (analyse tot eind juli) was dit nog een stuk minder, en zakte de grondwaterstand tot 48 cm-mv uit in rand en middenstrook (in de niet-geanalyseerde periode in september is het nog wat droger geweest, maar 2024 was overwegend een nat jaar).

De grondwaterstand in de middenstrook zakt in de zomer structureel verder uit dan in de randzone. Dit duidt op een holle grondwaterspiegel op het referentiegedeelte, waarbij de grondwaterstand hoger is aan de randen dan in het midden, door de invloed van de sloot. Uitgedrukt in NAP is het verschil tussen randzone en middenstrook op het moment van de laagste grondwaterstanden 32 cm in 2022 en 20 cm in 2023.
Op basis van de verschillen van de grondwaterstanden tussen het proef- en referentieperceel blijkt het systeem goed te werken met betrekking tot het voorkomen van het uitzakken van de grondwaterstand in de zomer, ook midden tussen de drains. In de zomers van 2022 en 2023 zakte de grondwaterstand in het referentieperceel dieper uit, maar vooral in 2022 is het verschil groot. Het maximale verschil in 2022 is circa 70 cm ten opzichte van maaiveld voor de meetpunten in de middenstrook, waar de grondwaterstand zonder drains het verste uitzakt. In 2023 was dit 45 cm. In zowel 2022 als 2023 herstelde het grondwaterpeil op het referentieperceel zich in regenachtige periodes. In 2024 was het zo'n nat voorjaar dat de grondwaterstanden pas in juni uitzakten, alhoewel dit veel minder was dan in eerdere jaren. Dit gebeurde zowel in de randzone als in de middenstrook. Het peilbeheer in 2024 is aangepast op de natte zomer. De schuiven zijn laat dichtgezet om nog zoveel mogelijk te draineren. Na dichtzetten in de hoop dat de verwachte droogte zou doorzetten, zijn ze meerdere malen weer even

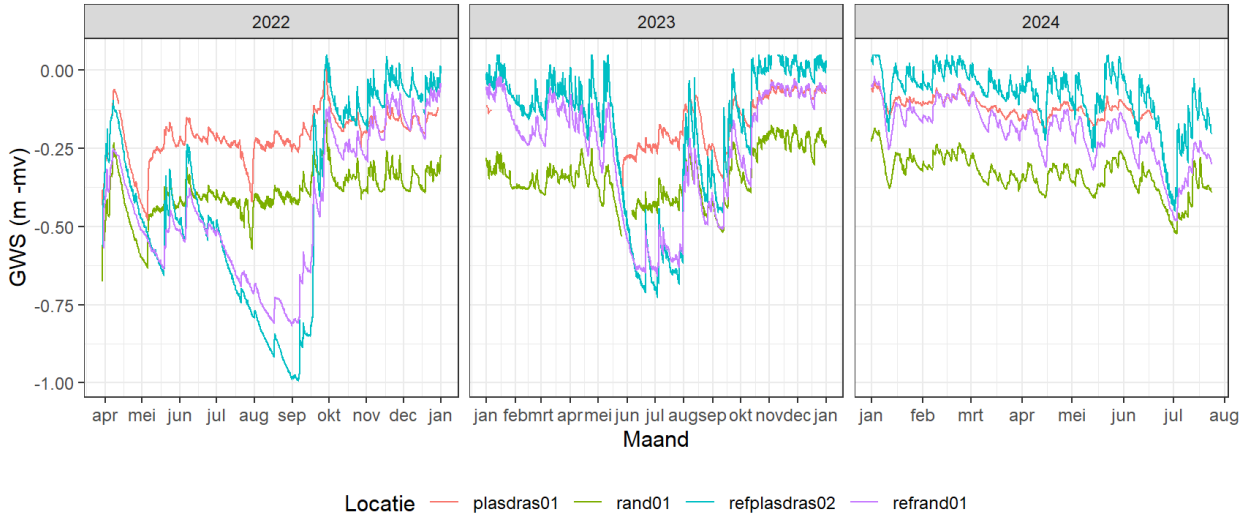
opengezet om de nieuw gevallen regen af te voeren. Hierdoor is in 2024 weinig water geïnfiltreerd, maar het schuifbeheer wel zeer intensief geweest.

In de natste periodes is er weinig verschil in de grondwaterstand tussen midden en randzone op het referentiegedeelte. De grondwaterstanden komen daardoor in natte periodes dicht bij het maaiveld in de middenzone. In de middenzone van het referentieperceel stond de greppel open dus deze heeft hier bijgedragen aan afvoer van plassen.

In de natte periodes is wel een verschil te zien tussen proef en referentieperceel. Op het proefperceel zijn de grondwaterstanden lager en fluctueren minder. Dit komt door het optreden van drainage via de drains. Er is wel een verschil te zien in de grondwaterstand op het gedraineerde plasdrasgedeelte tussen het najaar van 2022 en het najaar van 2023. De grondwaterstanden staan structureel hoger in de laatste periode, deze verandering in de drainerende werking wordt in de volgende sectie nader bekeken.



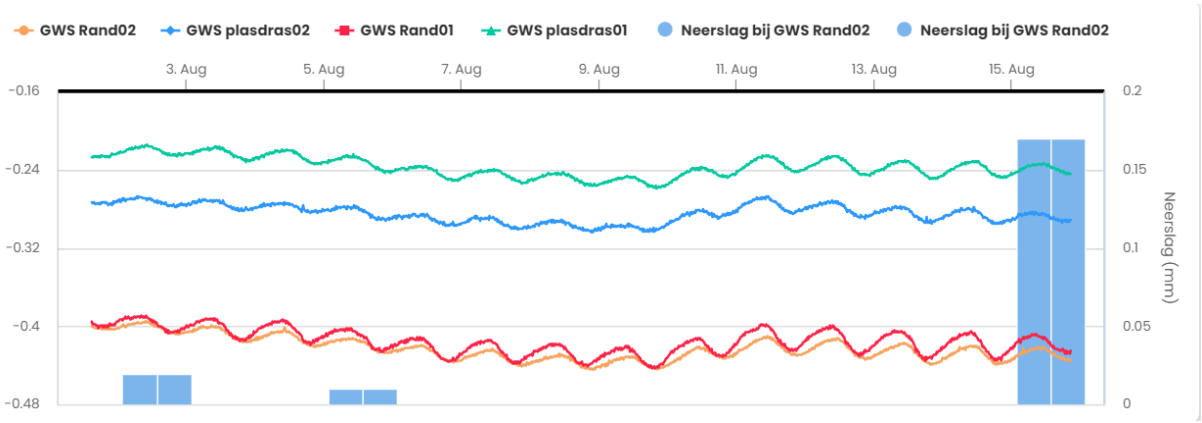
Figuur 13 gemeten grondwaterstand ten opzichte van NAP (m - NAP).



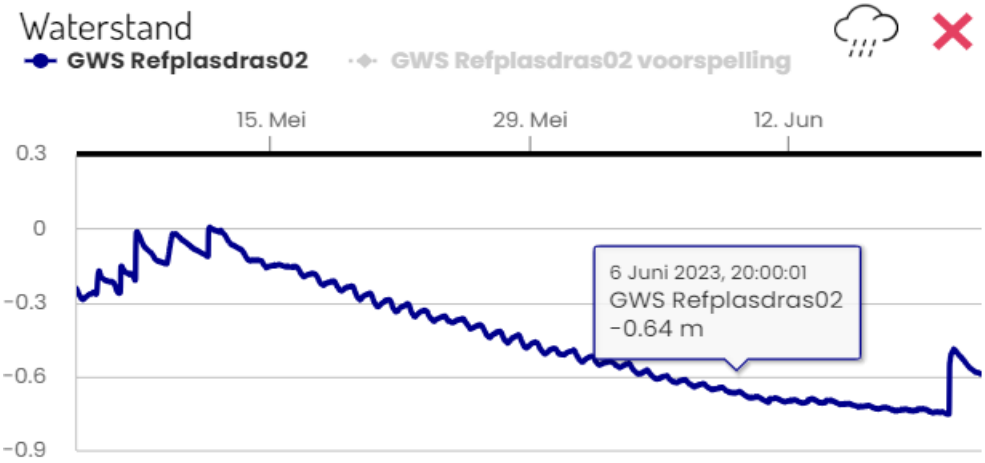
Figuur 14: gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld (m - mv).

Als we de meetreeksen in detail bekijken blijkt er een dag en nacht effect te zijn in de grondwaterstanden op het proefperceel gedurende de droge periodes waarop infiltratie plaatsvindt (Figuur 15). Dit treedt op bij alle meetpunten. De grondwaterstand is het hoogste in de ochtend en het laagst in de avond. De oorzaak ligt dan ook bij de verdamping van het gras gedurende de dag. De fluctuatie is circa 2 cm in de droge periode van 2022. Bij een gemiddelde grasverdamping van 3 mm/d op een droge zomerse dag wijst dit op een bergingscapaciteit van circa 15% in de zomer.

In de meetpunten op het referentieperceel is dezelfde fluctuatie te zien zolang de grondwaterstand dicht bij maaiveld staat. Zodra die uitzakt doven de fluctuaties geleidelijk uit, zoals te zien in Figuur 16. Rond een grondwaterstand van 70 cm-mv zijn de fluctuaties significant afgenomen, wat een indicatie kan zijn dat de capillaire opstijging vanuit het grondwater door de aanzuigkracht van de graswortels significant verminderd is op deze diepte. Rond deze diepte wordt de daling van de grondwaterstand ook vlakker.



Figuur 15 Detail van gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld (m - mv).

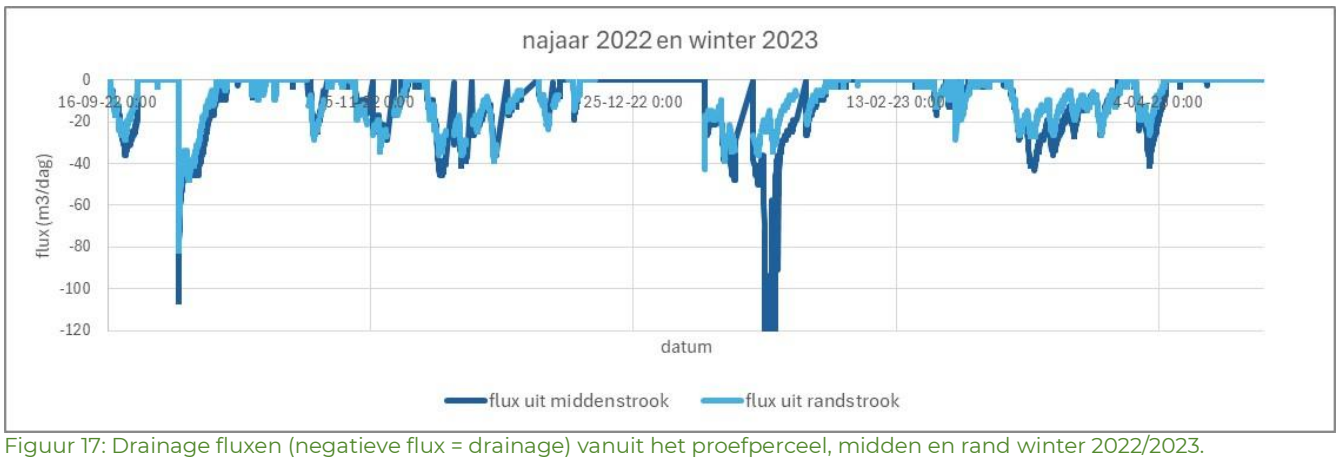


Figuur 16 Detail van gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld (m-mv) in de middenstrook van het referentiegedeelte tijdens de uitzakking van de grondwaterstand in 2023. De getoonde periode eindigt met een neerslagevent.

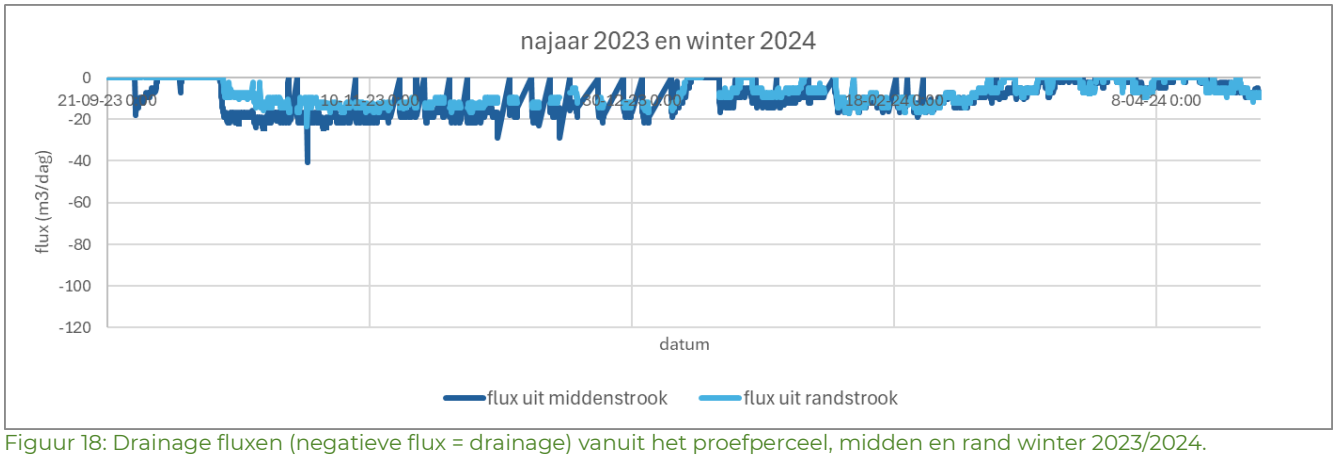
3.2.4 Drainage en veranderingen in de werking van het systeem

Bij neerslag in al natte periodes stijgt de grondwaterstand in het perceel, waardoor de drains drainerend werken (in het geval dat de schuiven in de putten open staan). Hierdoor is de grondwaterstand op het proefgedeelte in natte periodes meestal lager dan op het referentieperceel. In natte periodes zijn echter alsnog plassen gesignaleerd op het middengedeelte van het proefperceel, vooral in het najaar van 2023, maar ook in het najaar van 2022 en in het voorjaar van 2024. Hieruit blijkt dat de drainerende werking van het systeem niet voldoende is om plasvorming te voorkomen. Hieronder kijken we in meer detail naar de afvoer van de drains in natte periodes.

Op basis van de grondwaterstanden lijkt het dat de drainerende functie van het drainage systeem minder goed werkte in najaar 2023 dan het jaar daarvoor. In Figuur 12 zijn bijvoorbeeld de grondwaterstanden te zien ten opzichte van maaiveld: hieruit blijkt dat de grondwaterstanden verder uitzakken in najaar en winter van 2022/2023, dan in najaar en winter van 2023/2024. In het najaar van 2023 zijn schuiven wel langer dichtgehouden voordat ze open werden gezet voor waterafvoer. Hierdoor start het najaar natter.
Ook de drainage fluxen waren minder groot in het najaar en winter van 2023/2024 dan in najaar 2022/2023, zoals te zien in Figuur 17 en Figuur 18. Het slootwaterpeil en de putwaterstanden zijn in de winter van 2023/2024 gelijk en niet anders dan in de winter van 2022/2023 voor de periodes dat de schuiven openstonden. Het lijkt er daarom op dat de afvoer binnen het perceel richting de drains meer weerstand ondervind.

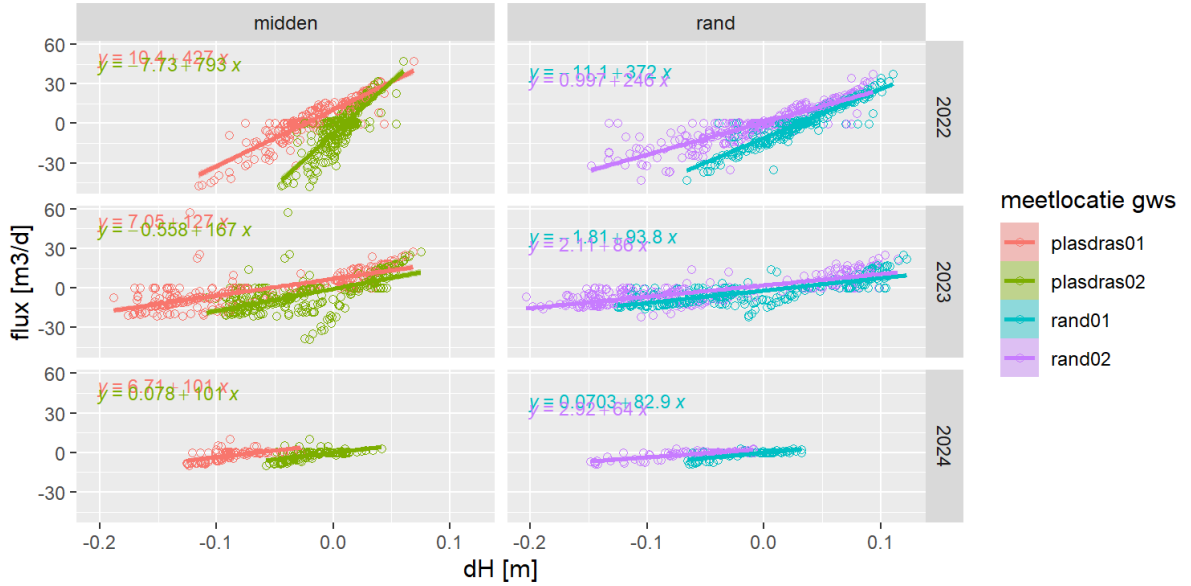


Figuur 17: Drainage fluxen (negatieve flux = drainage) vanuit het proefperceel, midden en rand winter 2022/2023.



Figuur 18: Drainage fluxen (negatieve flux = drainage) vanuit het proefperceel, midden en rand winter 2023/2024.

Een indicatie voor de drainage weerstand is de flux die gepaard gaat bij een bepaald drukverschil tussen putpeil en grondwaterstand. Een hogere grondwaterstand ten opzichte van het putpeil zorgt voor een grotere flux het perceel uit. Deze relatie is sterker bij een beperkte weerstand, en vlakt af bij een grotere weerstand. Uit onderstaande figuur is te zien dat op zowel de middenstrook als de randstrook de relatie tussen dH (verschil grondwaterstand en putpeil) en de drainage flux minder sterk is in de winter van 2023/2024 dan in het jaar daarvoor. Een negatieve dH waarde en een negatieve flux komen in de figuur overeen met een drainerende situatie (grondwaterstand hoger dan putpeil). Een positieve dH en positieve flux komen overeen met infiltratie.



Figuur 19 Stijghoogteverschil ten opzichte van flux per hydrologisch jaar (i.e. 2022 is van 01-04-2022 t/m 31-03-2023) en per meetlocatie.

Er zijn verschillende mogelijke oorzaken voor de afnemende drainage capaciteit:

- Door luchtindringing of verstopping gaan de drains minder goed functioneren. Luchtindringing is echter onwaarschijnlijk: De drains (bovenkant) zijn in de randstrook aangelegd op 30 cm onder het polderpeil van -232 cm-NAP en in de middenstrook op 40 cm onder het slootpeil. Bij geen enkel grondwatermeetpunt zijn de grondwaterstanden onder dit niveau gezakt. Verstopping van de drains is wel mogelijk op verschillende plekken: de drains zelf kunnen verstopt zijn geraakt, mogelijk door drab bij infiltratie vanuit de sloot. Ook kan de omhulling van de drains verstopt raken waardoor de drainwand meer weerstand creëert. Verstopping in de drains zelf is mogelijk in het veld te onderzoeken middels een camera inspectie.
- Door vermindering van scheurvorming in de zomer op het proefveld is de bodemweerstand voor afvoer in het najaar en in de winter hoger. In de zomer van 2022 zijn diepe scheuren geobserveerd op het referentieveld die niet op het proefveld aanwezig waren. Deze scheuren vormen een netwerk van goed doorlatende vlakken waardoor neerslag gemakkelijker kan infiltreren.
- Verdichting van het toemaakdek: doordat het proefperceel in de zomer natter is dan het referentieperceel is het mogelijk dat er verdichting heeft plaatsgevonden tijdens landbetreding met machines. Onderstaande tabel toont de grondwaterstanden in de middenstrook van het proefperceel en de middenstrook

van het referentieperceel op de maaimomenten. De grondwaterstanden zijn op het proefperceel op die momenten rond het slootwaterpeil en daarmee duidelijk hoger dan op het referentieperceel. Onder deze omstandigheden is er een risico op verdichting van een kleidek. In de waterwijzer landbouw worden bijvoorbeeld grenswaardes gehanteerd voor de vochtspanning op 15 cm diepte tijdens het maaien (Figuur 20) tussen -60 en -70 cm. Het is waarschijnlijk dat bij een grondwaterstand rond 30 cm-mv de vochtspanning op 15 cm diepte minder negatief is. Dit betekent dat de bodem dusdanig nat is dat er een risico is op verdichting. Kanttekeningen hierbij zijn dat er geen sporen insporing en van verdichting zichtbaar zijn geweest na de oogst (zie de integrale rapportage) en dat er landelijk weinig metingen zijn van draagkracht onder dusdanig natte omstandigheden op graslanden waarbij de sterkte van de graszode een belangrijke rol zal spelen.

Verdichting onder de graszode is echter niet uit te sluiten. Verdichting is niet makkelijk te meten, maar zou in het veld onderzocht kunnen worden middels grondboringen en metingen met een penetrologger op het perceel.

- Verslemping van de bodem: door een combinatie van veel regen, begrazing door ganzen en aanhoudende plasvorming kan de bovengrond zijn dichtgeslagen. Hierdoor kan water aan maaiveld niet goed infiltreren in de bodem. Ganzen, smienten en meeuwen versterken het dichtlopen en het verslempen van de bodem. Vooral drassige weilanden trekken de ganzen en smienten aan die het overgebleven gras in najaar en winter kortgrazen. Hierbij wordt de bodem dichtgelopen. Ook is gezien dat dit vervolgens meeuwen aantrekt die op het bodemleven (o.a. wormen) afkomen die door zuurstof schaarste naar boven komen. De meeuwen lopen de bodem nog verder dicht. In Polder Bloemendaal verblijven in het najaar en winter steeds groter wordende groepen ganzen en meeuwen. De meeuwen zelfs tot in het begin van het broedseizoen van de weidevogels. In combinatie met veel regen zoals in najaar 2023 en winter 2024, was dit desastreus voor de structuur en porositeit in de bovengrond. Veehouders uit de buurt klaagden in de zomer van 2024 dat de grond was ‘dichtgeslagen’. Dit hadden ze nog niet zo eerder ervaren.
- Ten slotte kan het ook zijn dat de hoge grondwaterstanden tijdens het groeiseizoen ervoor zorgen dat het wortelgestel van het gras minder diep rijkt. Dit vermindert de infiltratiecapaciteit.

Tabel 5: grondwaterstand ten opzichte van maaiveld tijdens de maaimomenten

Maaidatum	GWS proefperceel (middenstrook), cm-mv	GWS referentieperceel (middenstrook), cm-mv
11 juni 2022	20-27 cm-mv	38 cm-mv
30 augustus 2022	24-28 cm-mv	102 cm-mv
14 juni 2023	23-30 cm-mv	71 cm-mv
6 september 2023	30-40 cm-mv	48 cm-mv

TABEL 4.5 VOCHTSPANNINGSCRITERIUM BIJ HET OOGSTEN VAN EEN GRASSNEDE (VAN BAKEL & HOVING, 2017)

Staring bouwsteen	Omschrijving	Categorie	
		Maaien	Beweiden
B01	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	-30	-40
B02	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-50
B03	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-50
B04	Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	-40	-60
B05	Grof zand	-20	-30
B06	Keileem	-50	-70
B07	Zeer lichte zavel	-60	-80
B08	Matig lichte zavel	-60	-80
B09	Zware zavel	-60	-80
B10	Lichte klei	-60	-80
B11	Matig zware klei	-60	-80
B12	Zeer zware klei	-70	-90
B13	Zandige leem	-50	-70
B14	Siltige leem	-60	-80
B15	Venig zand	-60	-80
B16	Zandig veen en veen	-40	-70
B17	Venige klei	-50	-70
B18	Kleiig veen	-50	-70
005	Grof zand	-20	-30
009	Matig lichte zavel	-60	-80

Figuur 20: Tabel uit de Waterwijzer Landbouw met het vochtspanningscriterium op 15 cm diepte in geval van maaien en 10 cm diepte in geval van beweiden (https://waterwijzer.nl/images/publicaties/STOWA%202018-48%20WWL%20defversie.pdf)

3.3 Resultaten Zuurstofindringing

De hogere grondwaterstanden door het drainage systeem moeten zuurstofindringing in het veen voorkomen. Op die manier wordt veenafbraak en daarmee bodemdaling verminderd. Tijdens de proef is gemeten of de hogere grondwaterstanden effect hebben op de vochtigheid van het veen en op de aanwezigheid van zuurstof in het veen. De resultaten staan hieronder beschreven.

3.3.1 Metingen bodemvocht

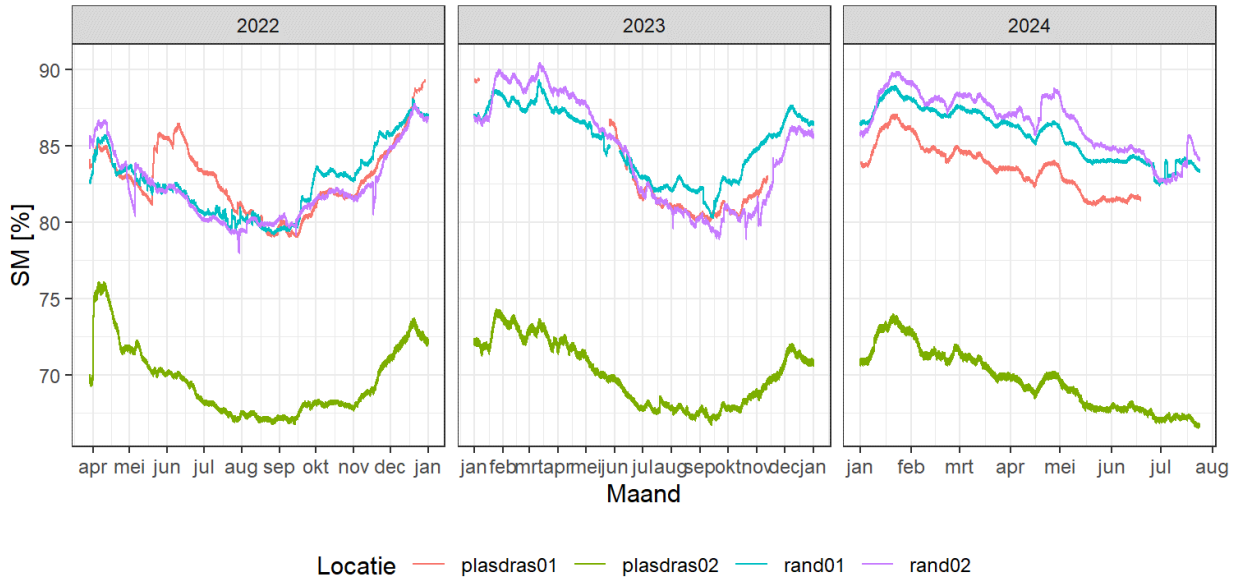
Proefperceel

In Figuur 21 is het bodemvocht op de vier locaties van het proefperceel weergegeven, met in Tabel 6 het jaarlijkse bereik van de metingen. Het bodemvocht is op 45 cm-mv gemeten, in de bovenkant van het veen direct onder het toemaakdek. Uit het bodemprofiel gemeten door Ko van Huissteden met behulp van ringmonsters blijkt dat de porositeit op de overgang van de deklaag naar het veen oploopt van 69% naar 92% (hoofdstuk 5 van de integrale rapportage). Uit de bodemvochttijdreeksen blijkt dat het maximale gemeten vochtgehalte, dat overeenkomt met de porositeit, voor de meeste meetpunten rond de 90% ligt, maar voor meetpunten ‘plasdras02’ en ‘refrand01’ iets lager ligt, op 76% en 81%. Mogelijk ligt de overgang tussen toemaakdek en het veen daar wat lager.

Veen heeft de eigenschap dat het net als klei sterk kan zwellen en krimpen. Dit gaat gepaard met een verandering in de structuur en daarmee de porositeit. Bij krimp komen de vaste delen dichter op elkaar te liggen en gaat de porositeit naar beneden. In geval van krimp en zwel verandert er niet noodzakelijk iets aan het aandeel luchtgevulde poriën, door krimp kan de porositeit veranderen zonder dat de bodem onverzadigd raakt. Dit lijkt het geval te zijn op het proefperceel. Bij de meetpunten in het plasdrasgedeelte van het proefperceel is de grondwaterstand vanaf de start van infiltratie in 2022 (5 mei) de gehele zomerperiode boven de bodemvochtsensor geweest (Figuur 14). Hetzelfde geldt voor 2023 en het merendeel van 2024. Op 45 cm-mv was de bodem dus verzadigd. Toch laten de metingen in alle jaren een lichte daling zien gedurende de zomer (Tabel 6) en een stijging als gevolg van de neerslag in de herfst. Dit is door de hoge grondwaterstanden bij het proefperceel alleen te verklaren door zwel en krimp in de verzadigde zone. In 2024 heeft de grondwaterstand kort onder de 'rand01' en 'rand02' sensoren gestaan (vanaf 27 juni). Dit is terug te zien in de grafiek door een daling van bodemvochtgehaltes. Een daling van bodemvocht hoeft niet meteen gepaard te gaan met luchtindringing, maar kan ook alleen uit krimp bestaan waarbij de bodem verzadigd blijft. Hier is echter terug te zien dat het bodemvocht reageert op neerslag, met name bij rand01. Het lijkt daarom dat de daling in vochtgehaltes in die periode niet alleen samenging met krimp, maar ook met luchtindringing. Het laagst gemeten bodemvocht is in dit jaar nog wel altijd hoger dan in eerdere jaren. Dit is mogelijk te verklaren door de natte zomer, waardoor het veen 's zomers minder gekrompen was toen de grondwaterstand onder de sensor kwam.

Tabel 6: Hoogst en laagst gemeten bodemvochtwaarde op de 6 meetpunten op 45 cm-mv, in het veen net onder de toemaakdeklaag.

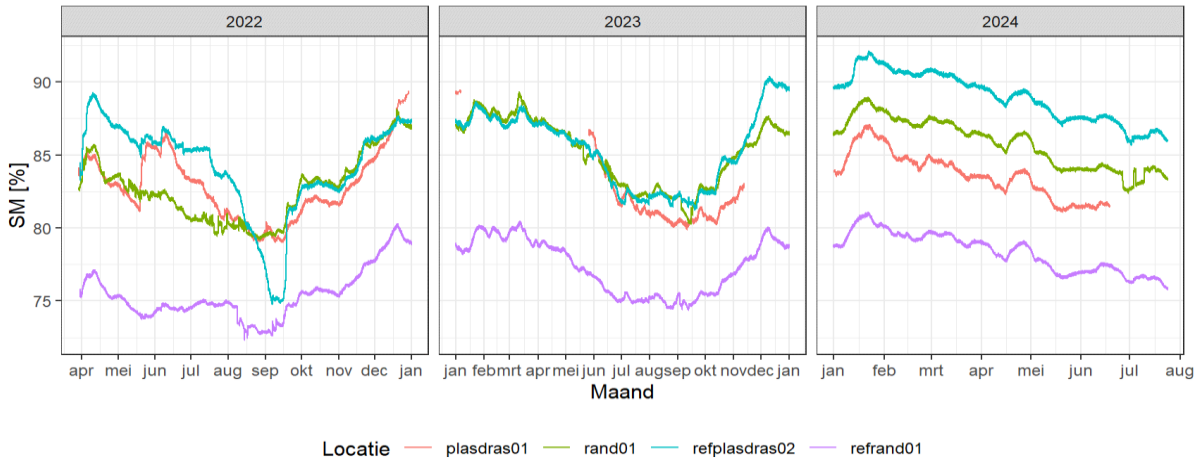
Meetpunt	Hoogst gemeten bodemvocht			Laagst gemeten bodemvocht		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Rand01	88%	89%	89%	79%	80%	82%
Plasdras01	89%	89%	87%	79%	80%	81%
Rand02	88%	90%	90%	78%	79%	82%
Plasdras02	76%	74%	74%	67%	67%	67%
Refrand01	80%	80%	81%	72%	74%	76%
Refplasdras02	89%	89%	92%	75%	81%	86%



Figuur 21 gemeten vochtgehalte (in percentages) op het proefperceel.

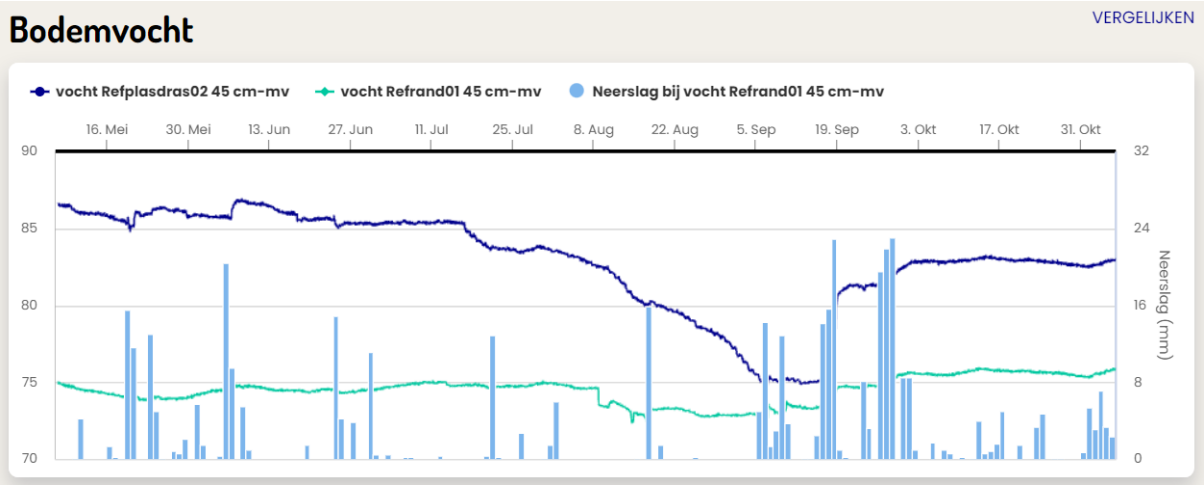
Vergelijking proef- en referentieperceel

In Figuur 22 is het bodemvocht van het proefperceel vergeleken met het referentieperceel. Op het referentieperceel is de grondwaterstand in alle zomers wel onder de bodemvochtsensor geweest. Voor het plasdrasgedeelte tot maximaal 53 cm onder de sensor (in 2022) en voor de randzone tot maximaal 36 cm onder de sensor (ook in 2022). In de tijdreeks van het bodemvocht is dan ook te zien dat toen met name bij het meetpunt in het plasdrasgedeelte het bodemvocht is uitgezakt, tot 84% van de oorspronkelijke porositeitswaarde (75%/89%). In 2023 zakten de grondwaterstanden minder ver uit, en de bodemvochtmetingen laten dan op het proefperceel en op het referentieperceel vergelijkbare waardes zien. In 2024 is de grondwaterstand alleen in de randzone tot onder de sensor gezakt, maar wel in zowel het proefperceel (rand01) en het referentieperceel (refrand01). Dit komt doordat in het natte jaar van 2024 er door middel van een actiever schuifbeheer meer is gezocht naar de juiste grenswaarde van infiltratie. Door de natte zomer is de middenstrook wel altijd verzadigd gebleven.



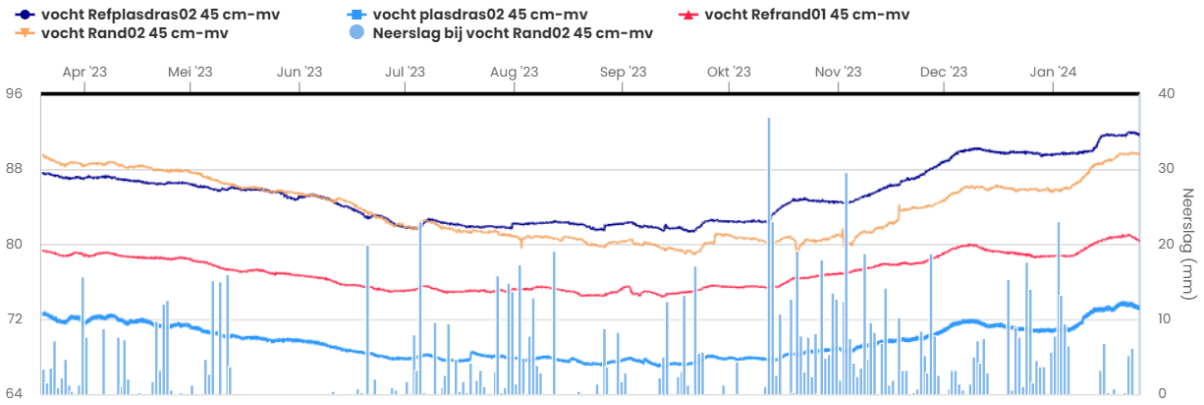
Figuur 22 : gemeten vochtgehalte (in percentages) op het referentieperceel, vergeleken met het proefperceel.

In de dynamiek gedurende de zomer van 2022 (Figuur 23) lijkt op beide locaties in geval van refrand01 krimp en zwel te domineren tot 8 augustus. Op dat moment maakt het bodemvocht een plotselinge daling en toont het later piekjes zodra er neerslag valt, wat duidt op luchtgevulde poriën. Op dat moment staat het grondwater op ongeveer 75 cm-mv, 30 cm onder de bodemvochtsensor.
In geval van refplasdras02 lijkt het bodemvocht echt te dalen vanaf 15 juli, de grondwaterstand staat dan op 70 cm-mv, 25 cm onder de bodemvochtsensor.



Figuur 23 Detail van gemeten vochtgehalte (in percentages) op het referentieperceel.

In 2023 (Figuur 24) reageert het bodemvocht op het referentieperceel minimaal op regenval. Krimp en zwel onder verzadigde omstandigheden lijken dus de hele zomer te domineren op 45 cm-mv. Toch zakte de grondwaterstand ook deze zomer tot onder de sensoren (tot maximaal 29 cm onder de sensor in de middenstrook en 20 cm onder de sensor in de randstrook). Het bodemvocht op het referentieperceel gedraagt zich grotendeels gelijk aan die op het proefperceel, met af en toe een wat duidelijker reactie op neerslag. Voor het grootste gedeelte lijken er daarom ook verzadigde omstandigheden te heersen in het referentieperceel in 2023.

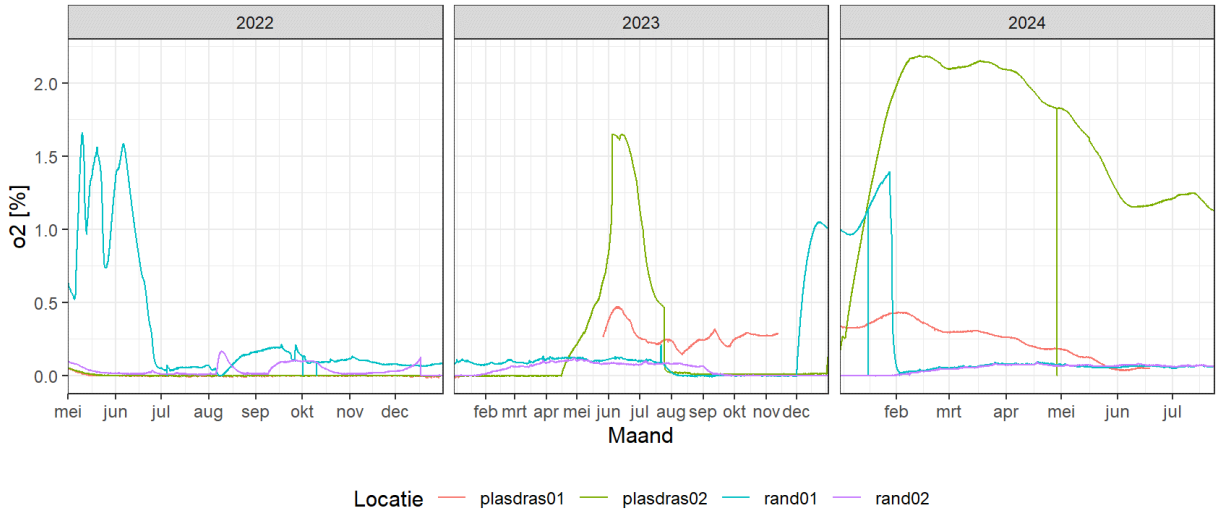


Figuur 24: Vergelijking tussen het bodemvocht op het referentieperceel en gedraineerde proefperceel in de zomer van 2023.

3.3.2 Metingen zuurstof

Proefperceel

Figuur 25 toont de gemeten zuurstofpercentages op het proefperceel (de sensor zit op dezelfde diepte als de bodemvochtsensor). De zuurstofpercentages zijn de gehele meetperiode vrijwel 0. Net voor de start van infiltratie, op 5 mei 2022, is met name de grondwaterstand bij de twee meetpunten aan de rand uitgezakt tot onder de sensor, tot 62 cm-mv (17 cm onder de sensor). In die periode is dan ook te zien dat het zuurstofgehalte bij Rand01 nog wat omhooggaat, maar slechts tot een zuurstofconcentratie van 2%. Lage zuurstofpercentages gedurende de infiltratie zijn te verwachten aangezien de bodem op het proefperceel in die periode verzadigd was. In 2023 laten de zuurstofsensoren op de rand van het proefperceel vergelijkbare waarden als gedurende de infiltratie in 2022 zien, namelijk dicht bij 0. In de plasdraszone zijn er echter ineens wat hogere waardes voor zuurstof waargenomen (hoewel nog steeds relatief erg laag). Alleen in mei 2023 is de grondwaterstand toen heel kort tot op de diepte van de sensor gezakt. In dezelfde sensor is ook in 2024 een verhoogde concentratie te zien, ondanks volledig verzadigde condities. De geringe verhoging is dus niet helemaal te verklaren. Misschien is de sensor toch iets hoger geplaatst in de bodem.
Gedurende de winter van 2023-2024 is er een verhoging in zuurstofconcentraties waargenomen in de rand01 sensor. Dit was een uitzonderlijk natte winter, en een bodemvochtverzadigde omgeving is daarom haast gegarandeerd. De stijging in zuurstofconcentraties is dan ook nog niet te verklaren. Concentraties zijn echter nog steeds heel laag.



Figuur 25: zuurstofpercentages (%) gemeten op het proefperceel op 45 cm-mv (bovenin het veen, net onder de toemaakdeklaag).

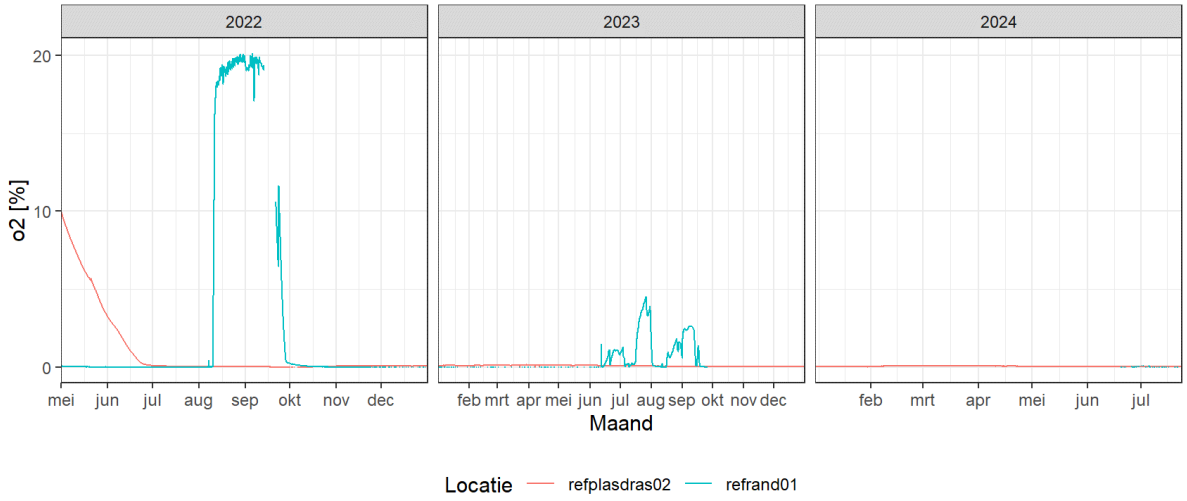
Vergelijking proef en referentieperceel

Figuur 26 toont het gemeten zuurstofgehalte op de twee referentiemeetpunten. Bij Refplasdras02 wordt in mei 2022 nog het zuurstof verbruikt uit de ingesloten lucht bij installatie van de sensor. Daarna is het zuurstofgehalte de hele zomerperiode 0% bij meetpunt Refplasdras02, hoewel het bodemvochtgehalte wel lijkt aan te geven dat de bodem onverzadigd raakt vanaf juli. Mogelijk is de bodem boven de sensor nog te vochtig en de consumptie van zuurstof te hoog om zuurstof tot 45 cm-mv te kunnen transporteren.

Meetpunt Refrand01 laat wel een duidelijke zuurstofindringing zien, vanaf 10 augustus zijn concentraties gelijk aan atmosferische zuurstofconcentraties (21%). Dit geeft aan dat vanaf dat moment er een goed transport is van zuurstof naar 45 cm-mv. Op het referentieperceel zijn in de zomer dikke brede en diepe scheuren in het toemaakdek ontstaan (foto's zijn te vinden in de rapportage over broeikasgassen), deze kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het transport van zuurstof naar het veen.
In de missende meetperiode (tussen 13 en 21 september 2022) was de sensorkabel doorgesneden, veroorzaakt tijdens het knippen van het gras rond de meetopstelling. In de periode na het herstel van de kabel werden weer verhoogde zuurstofconcentraties gemeten tot aan de regenval eind september.

In 2023 heeft er opnieuw zuurstofindringing plaatsgevonden bij meetpunt refrand01. De bodem was echter nog wat vochtiger dan in 2022, dus zijn de zuurstofgehaltes nooit op atmosferische zuurstofconcentraties gekomen (de maximale waarde was 4%). De refplasdras02 sensor laat gedurende het hele jaar een zuurstofconcentratie van ongeveer 0 zien.

In 2024 is er geen zuurstofindringing gemeten op het referentieperceel.



Figuur 26: zuurstofpercentages (%) gemeten op het referentieperceel op 45 cm-mv (boven in het veen, net onder de toemaakdeklaag). De missende waarden in 2022 komen door een kapotte kabel.

4 Chemie van het bodemvocht

De aanwezigheid van zuurstof geeft aan of aerobe afbraak plaats kan vinden. Daarnaast kan veen ook worden afgebroken via anaerobe afbraakprocessen, in afwezigheid van zuurstof. Indicaties hiervan kunnen worden afgeleid uit de chemie van het bodemvocht. Bij de meetpunten zijn op 45 en 70 cm diepte rhizons geplaatst waarmee het poriewater uit de bodem kan worden getrokken en geanalyseerd in het lab. In 2022 zijn alle rhizons in de zomer over het algemeen tweewekelijks bemonsterd, behalve in de maand augustus. In 2023 is de frequentie van bemonstering in de zomer vermindert naar maandelijkse bemonstering, zijn twee meetpunten minder meegenomen in de bemonstering (plasdras01 en rand01) en is het slootwater aanvullend bemonstert. Daarnaast is door middel van aanvullend budget in 2023 ook een analyse gedaan van het totale stikstof in het water (in opgeloste en organisch gebonden vorm) en het totale fosfor in het water (in opgeloste en organisch gebonden vorm). Deze aanvullende analyses zijn alleen gedaan voor de diepe rhizons (70 cm diepte) en voor het slootwater. Hierbij is voor de diepe rhizons gekozen omdat deze het dichtst bij draindiepte bevindt en daardoor een indicatie kan geven voor het risico op uitspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater.

De chemie van het poriewater geeft, naast de metingen van zuurstof in de bodem, inzicht in de afbraakmilieu ‘s die er heersen en de veranderingen gedurende de tijd ten gevolge van onder andere veranderingen in de vochtigheid. Wanneer zuurstof afwezig iskunnen alternatieve electronacceptoren worden gebruikt door bacteriën in de bodem om het organisch materiaal af te breken.

4.1 Theorie

De chemie van het bodemwater wordt mede bepaald door de chemische en microbiële processen die actief zijn in de bodem. In de deklaag kunnen concentraties van nutriënten hoog zijn door bemesting. Daarnaast zijn hier het meest oxische condities aanwezig doordat de deklaag als eerste uitdroogt en de lucht met hoge atmosferische zuurstofconcentraties hier als eerste de bodem indringt.

Zuurstofindringing naar grotere diepte hangt sterk samen met de bodemvochtigheid. Zuurstofdiffusie in de luchtgevulde poriën gaat een stuk sneller dan het transport door water. Hoe meer van de porieruimtes luchtgevuld raken, hoe beter deze in verbinding staan met de atmosfeer en zuurstoftransport van maaiveld naar beneden kan plaatsvinden.

Het zuurstoftransport van atmosfeer naar diepere bodemlagen wordt, naast de diffusiviteit in de bodem, ook bepaald door de consumptie van zuurstof onderweg en de gradiënt van de zuurstofconcentratie. De zuurstof wordt getransporteerd via de luchtgevulde poriën, maar wordt onderweg ook geconsumeerd door het bodemleven en opgenomen door wortels. Hierdoor wordt het transport naar beneden toe beperkt en neemt de zuurstofconcentratie af met diepte. In het Nationaal Onderzoek Broeikasgassen Veenweiden is bijvoorbeeld geobserveerd dat op de meetlocaties zuurstof niet dieper de veenbodem indrong dan 70 cm, ook als de grondwaterstand dieper uitzakte. Dit inzicht is

verwerkt in de nieuwste versie van het landelijke monitoringssysteem SOMERS 2.0 waarin voor de berekening van broeikasgassen uit organische bodems wordt aangenomen dat de zuurstofconcentratie afneemt vanaf 50 cm diepte en nihil is op 70 cm diepte.

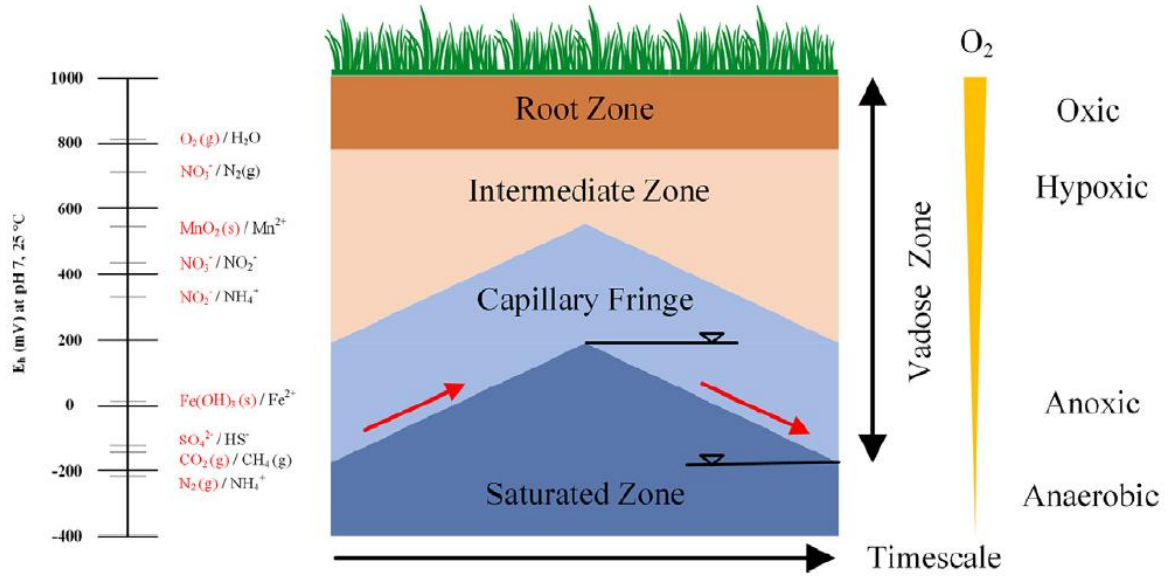
Afbraak van organisch materiaal in de bodem vindt plaats door microbiële processen die afhankelijk zijn van het aanwezige afbraakmilieu en de redoxcondities in de bodem. Hierbij speelt de aanwezigheid van zuurstof een belangrijke rol. Zuurstof is een sterke oxidator, wat betekent dat het gemakkelijk elektronen accepteert. De aanwezigheid van oxidatoren in het chemische milieu spelen een belangrijke rol in de mogelijkheid voor de microben om organisch materiaal af te breken. Als zuurstof afwezig is, kunnen andere stoffen functioneren als oxidator. Belangrijke oxidatoren, in aflopende sterkte, zijn nitraat (NO_3^-), mangaanoxide (MnO_2), ijzeroxide (e.g. Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$) en sulfaat (SO_4^{2-}). Een schema van mogelijke redoxomzettingen en de volgorde waarin deze plaatsvinden staat in Figuur 27.

Indien zuurstof afwezig is, spelen NO_3^- en SO_4^{2-} een belangrijke rol in anoxische redoxmilieus (Figuur 28). Onder anaerobe omstandigheden, zoals in verzadigd veen, worden deze stoffen gereduceerd en verdwijnen deze stoffen uit het bodemvocht. In de figuur is aangegeven bij welk redoxmilieu en welke diepte bepaalde stoffen te vinden zijn in het bodemvocht.

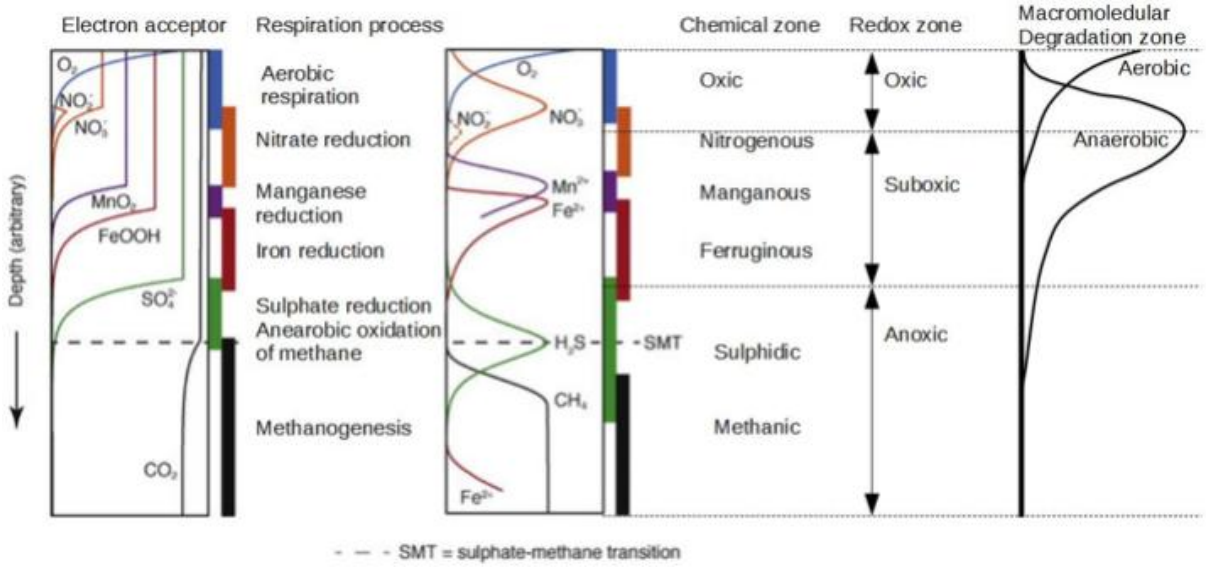
Wanneer het milieu verandert van oxisch naar anoxisch vervangt NO_3^- zuurstof als elektronenacceptor en wordt het gedenitrificeerd tot N_2 en N_2O, waarmee het als gas verdwijnt uit de bodem. Wanneer alle NO_3^- (en in de bodem aanwezige MnO_2, Fe_2O_3) is opgebruikt, wordt SO_4^{2-} de belangrijkste elektronenacceptor, welke daarmee onder dieper anoxische omstandigheden verdwijnt, waarbij H_2S en pyriet (FeS) gevormd worden. In een diep anoxisch milieu komt zwavel vooral voor als H_2S. In een diep anoxisch milieu wordt daarnaast CO_2 gebruikt als oxidator, waarbij methaan (CH_4) vrijkomt.

In de bodem kunnen oxische omstandigheden heersen, maar daarnaast ook anoxische microsites bestaan. Dit gebeurt bijvoorbeeld als er door de structuur van de bodem veel variatie is in poriegroottes, waardoor sommige delen lang verzadigd blijven, terwijl grotere porieën luchtgevuld zijn. Dit is het geval bij bijvoorbeeld aggregaten in de bodem of rondom scheuren. In dat geval kunnen verschillende afbraakomstandigheden (oxisch en anoxisch) naast elkaar voorkomen.

Naast de beschikbaarheid van sterke oxidatoren spelen andere factoren een rol in de snelheid van de afbraak. Een belangrijke factor is bijvoorbeeld de temperatuur. Daarnaast hebben ook de pH, het type veen, de afbraakgraad van het veen en zoutgehaltes een rol.



Figuur 27: schematische weergave redoxmilieu's in de bodem, uit Zhang and Furman, 2021.



Figuur 28:schematische weergave redoxreacties in de bodem.

N verbindingen (nitraat, nitriet, ammonium)

De N cyclus (Figuur 29) is een belangrijke chemische cyclus in bodems en voor landbouw. Aan de ene kant is N een voedingsstof voor gewassen en aan de andere kant ongewenst in de vorm van nitraatuitspoeling naar oppervlaktewater, lachgas emissie als sterk broeikasgas en ammoniakemissie als verzurende stof voor natuur. Daarnaast is nitraat de belangrijkste oxidator na zuurstof als het gaat om afbraak van organisch materiaal. Vooral in de zone waar het afwisselend oxisch en anoxisch is (de zone waar het grondwater fluctueert) vinden er veel stikstofomzettingen plaats. Hier kunnen oxische en anoxische N-omzettingen naast elkaar plaatsvinden. N verbindingen in de vorm van nitraat en ammonium kunnen ook makkelijk door het gras worden opgenomen.

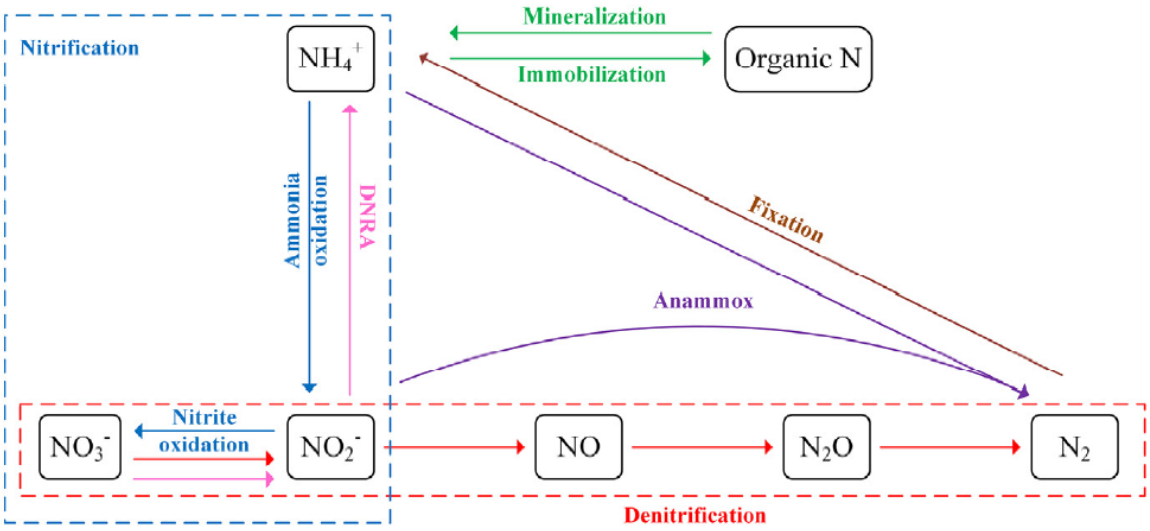


Fig. 3. Main nitrogen transformation processes. Adapted from Guo et al. (2013).

Figuur 29: stikstofcyclus uit Zhang and Furman, 2021.

Mangaan en ijzeroxiden

Na zuurstof en nitraat zijn mangaanoxiden en ijzeroxiden de sterkste oxidatoren. Wanneer deze worden gereduceerd komen Mn^{2+} en Fe^{2+} in oplossing in het bodemwater. Onder anoxische omstandigheden waarbij sulfaat de rol heeft van oxidator verdwijnen Fe^{2+} en Mn^{2+} weer uit de oplossing als precipitaat in verbinding met zwavel (pyriet, alabandiet).

Sulfaat

Onder anoxische omstandigheden wordt sulfaat gebruikt als oxidator. In anoxische omstandigheden verdwijnt sulfaat dan ook uit het bodemwater. In diep anoxische omstandigheden, waar sulfaat afwezig is, kan CO_2 worden gebruikt als oxidator en ontstaat methaan. Als deze omstandigheden dicht aan maaiveld voorkomen (circa 20 à 30 cm -mv) is er groot risico op methaanemissie omdat het gevormde methaan niet terug wordt geoxideerd in de onverzadigde bovenlaag naar CO_2.

Invloed hydrologie op chemie

Naast de redoxreacties in de bodem heeft de stroming van water in de bodem een rol in de chemie. Zo zorgt infiltratie via drainage voor de instroom van slootwater, wat vaak oxisch is (circa 8 mg/L O_2 in oplossing) en mogelijk hoge concentraties van nitraat, ammonium en sulfaat meevoert. Bij neerslag na een lange droge periode kunnen stoffen uit de oxische deklaag naar beneden uitspoelen. Bij neerslag na bemesting kunnen nutriënten naar beneden uitspoelen. Ook heeft de grasgroei een rol: in de groeiperiode neemt deze extra nutriënten op uit de bodem.

4.2 Resultaten chemie van het bodemvocht

N- verbindingen

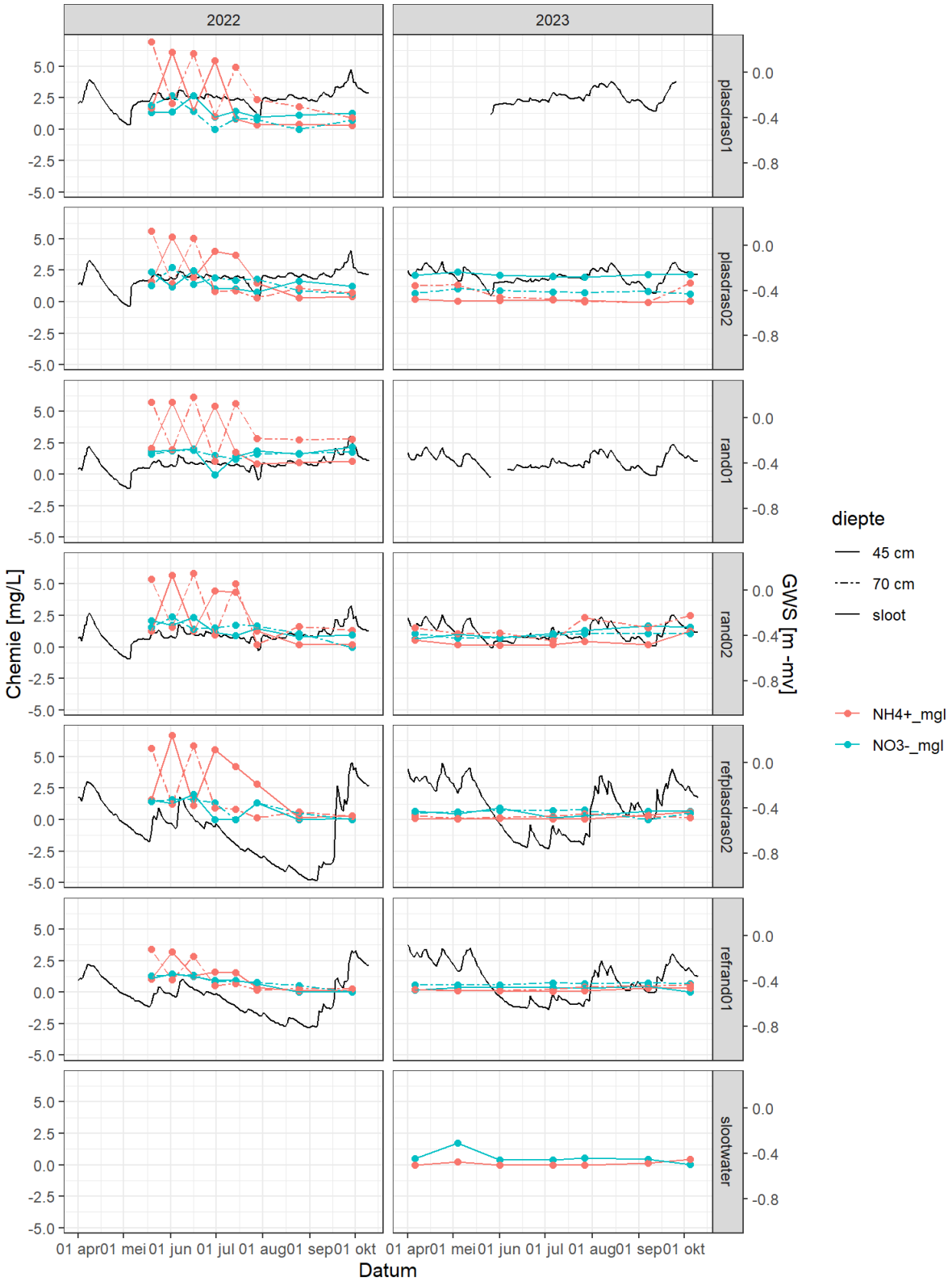
Figuur 30 toont de nitraat- en ammoniumconcentraties in het bodemwater zoals bemonsterd gedurende de zomer van 2022 en 2023 op de zes meetlocaties.

Nitrietconcentraties waren in beide jaren altijd onder de detectielimiet (<0.01 mg l^{-1}) en zijn daarom niet weergegeven.
De gemeten concentraties van nitraat zijn erg laag voor bodemwater (rond 1 à 2 mg/L). Mogelijke bronnen van nitraat zijn bemesting, het infiltratiewater vanuit de sloot en als afbraakproduct bij veenoxidatie. Nitraat, en ammonium, worden ook opgenomen door planten.
In 2023 zijn nitraatconcentraties in het slootwater gemeten, deze waren vrijwel altijd dicht bij nul. Het infiltratiewater lijkt daarmee geen bron voor nitraat. Daarnaast wordt er al een tijd niet bemest (sinds 2021). Hierdoor is ook te verwachten dat de nitraatconcentraties laag zijn. Ook kunnen lage nitraatconcentraties een indicatie zijn van een anoxisch milieu waarin nitraat wordt gebruikt als elektronacceptor (zuurstof afwezig). In dit geval nemen tegelijkertijd ammoniumconcentraties toe omdat nitrificatie wordt geremd in een anoxisch milieu.

Normale waardes van ammonium zijn circa 0.6-0.5 mg/L. Wanneer concentraties boven de 3 mg/L uitkomen is er sprake van een reducerend milieu voor nitraat en/of een extra input van ammonium vanuit het geïnfiltreerde slootwater.

In de eerste helft van het groeiseizoen van 2022 zijn er fluctuaties in ammonium en nitraatconcentraties te zien op beide dieptes. Dit is met name te zien in de ammonium concentraties, de nitraatconcentraties zijn over het algemeen laag. In de tweede helft van het groeiseizoen zijn de ammoniumconcentraties, zeker op diepte, over het algemeen hoger op het proefgedeelte dan op de referentie. Dit duidt op meer reducerende condities op het proefperceel, waar de grondwaterstand stabiel hoog blijft in deze periode.
Het meetpunt refrand01 had in deze periode de laagste ammonium concentraties. Bij de zuurstofsensor is hier ook zuurstof gemeten. Dit kan duiden op een oxischer milieu op dit meetpunt. Ruimtelijk kunnen er wel verschillen in chemie zijn tussen de locatie van de zuurstofsensor en de rhizons, doordat vooral in het referentieperceel veel scheurvorming is geweest. Aangezien bij de zuurstofsensor atmosferische zuurstofconcentraties zijn gemeten is het waarschijnlijk dat deze is beïnvloed door een scheur in de bodem. Bij de rhizons kan het tegelijkertijd minder oxisch zijn geweest.

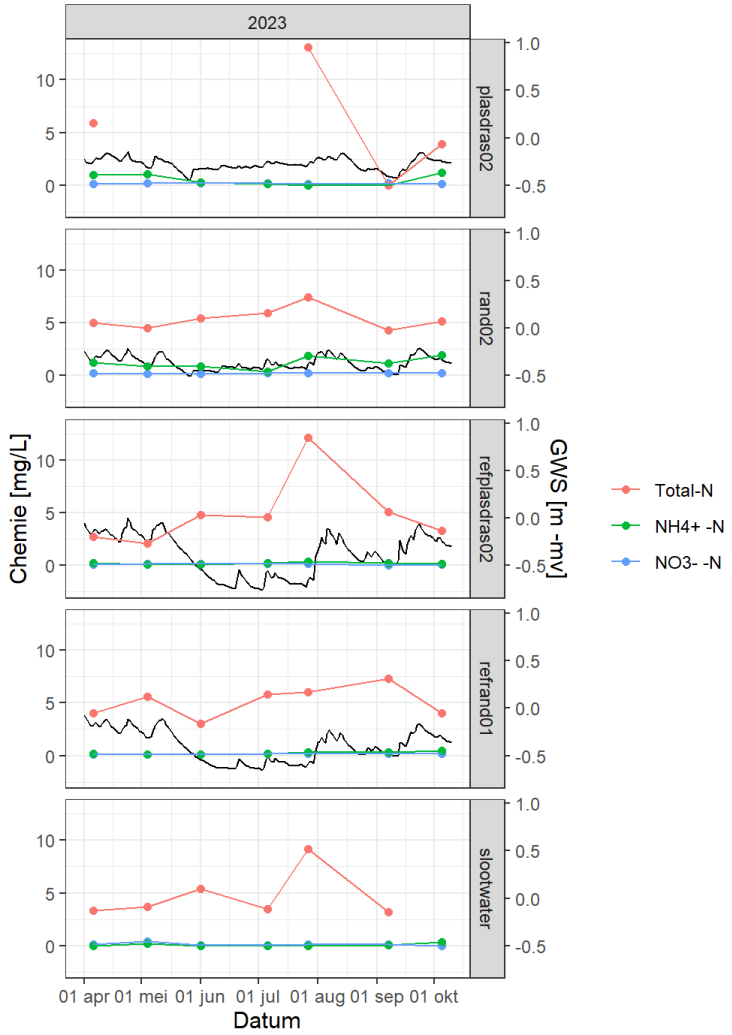
In 2023 waren de waarden voor ammonium een stuk constanter dan in 2022 en altijd laag. Op geen van de meetlocaties kwam de ammoniumconcentratie boven de 3 mg/L uit. Aangezien het wel zeer waarschijnlijk is dat, zeker op diepte en op het proefperceel, anoxische condities heersten, duiden de lage concentraties met name op een lage aanwezigheid van nitraat (door de afwezigheid van bemesting). Ook kan ammonium zijn opgenomen door de wortels. Er is wel een verschil te zien tussen de referentiemeetpunten, deze hebben structureel lagere ammonium concentraties wat duidt op een oxischer milieu.



Figuur 30: gemeten nitraat (NO_3^-, blauw) en ammonium (NH_4^+, rood) in het bodemvocht op de 6 meetlocaties gedurende de zomer, op twee verschillende dieptes (45 en 70 cm diepte). Ook de grondwaterstand is aangegeven op de secundaire as.

In 2023 is er naast de concentraties van nitraat en ammonium ook totaal-N gemeten. De resultaten van deze analyse zijn samen met NO3-N en NH4-N te zien in Figuur 31. Hieruit blijkt dat slechts een klein gedeelte van het stikstof in het diepe bodemwater aanwezig is in de vorm van ammonium en nitraat. Het resterende stikstofgehalte geeft het organisch gebonden stikstof weer. De totaal N waarden van slootwater en bij de meetpunten zijn vergelijkbaar. Op de twee meetpunten in de middenstrook, zowel op referentie als op proefperceel, is de hoogste waarde gemeten eind juli. Deze piek komt ook terug in het slootwater en in mindere mate bij de randzone. Het is aannemelijk dat deze verhoging wordt veroorzaakt door de plotselinge grote hoeveelheid neerslag in deze periode waardoor geaccumuleerde stikstof kan uitspoelen naar het diepere grondwater en naar de sloot.

Ammonium en nitraatconcentraties in de sloot zijn beide laag. De totaal N concentratie komt echter wel boven de norm die geldt voor KRW oppervlaktewateren van 2.4 mg/L (https://www.rivm.nl/landelijk-meetnet-effecten-mestbeleid/nieuwsbrieven/normen-voor-stikstof-in-grondwater-en-oppervlaktewater-onvoldoende-op-elkaar-afgestemd). Voor grondwater geldt een nitraatnorm van 50 mg/L, wat zich vertaald in een totaal N norm van 11 mg/L, welke alleen tijdens de piek op het moment van veel neerslag wordt overschreden.



Figuur 31: NH4-N, NO3-N en Total N op 70 cm diepte in 2023 (geen total-N metingen in 2022)

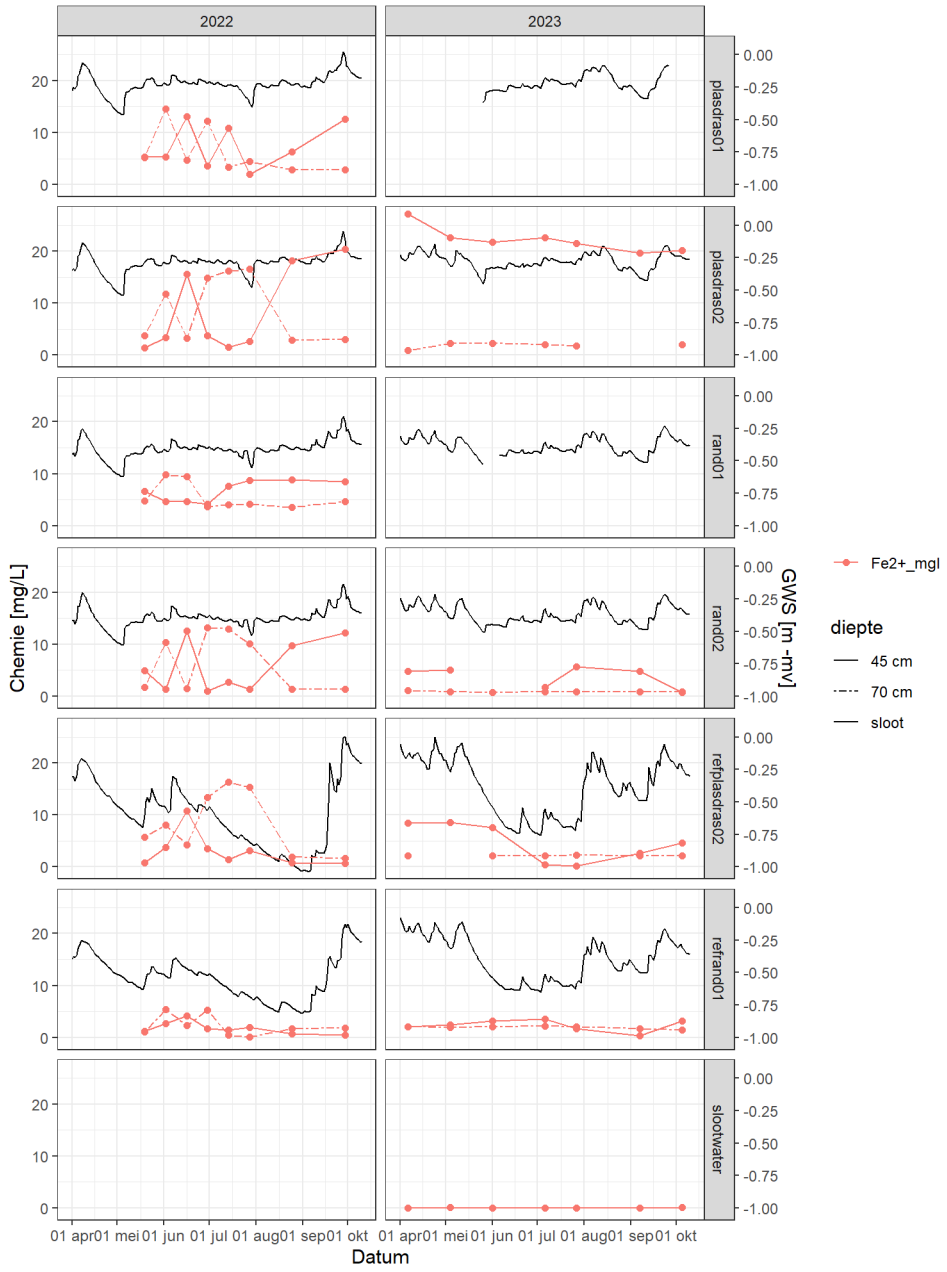
Opgelost ijzer en mangaan

Na zuurstof en nitraat is Mn4+ de electronacceptor die de meeste energie oplevert. Opgelost mangaan is vrijwel altijd onder de detectielimiet geweest in het bodemwater. In een recente studie van Harpenslager etal. 2024 (gepubliceerd binnen het NOBV) over de relatie tussen chemie en afbraakmilieus in veenbodems, is genoemd dat de bodems van nature arm zijn in mangaan, waardoor niet te verwachten is dat Mn4+ een belangrijke electronacceptator zal zijn in dit type bodems. De lage concentraties in het project Bloemendaal zijn daarmee in overeenstemming.

De volgende electronacceptor in de redoxsequentie is ijzer. Door jaren van oxidatie in de veenbodem is ijzer in geoxideerde vorm aanwezig, Fe3+, wat gebonden wordt in de vorm van ijzeroxiden en ook P kan binden (Harpenslager etal. 2024). Wanneer reducerende omstandigheden optreden komt de ijzer als Fe2+ in oplossing, samen met eventueel gebonden P. IJzerconcentraties in het poriewater nemen dan toe. Wanneer nog dieper anoxische omstandigheden optreden waarbij sulfaat als electrondonor wordt gebruikt wordt ijzer opnieuw gebonden aan de vrijkomende S, in de vorm van ijzersulfide.

Het opgeloste ijzer is weergegeven voor beide meetjaren in Figuur 32.
In 2022 zijn de Fe^{2+} concentraties in de eerste helft van het groeiseizoen redelijk hoog geweest, wat aangeeft dat er ijzerreductie plaatsvond van ijzeroxiden. De ijzerconcentratie op de twee verschillende dieptes lijkt zich invers te gedragen: wanneer de concentratie stijgt op diepte, daalt deze op de ondiepere meetlocatie, en andersom. Dit duidt op een verschuiving van de redoxzone van ijzerreductie tussen deze dieptes. In de tweede helft van het groeiseizoen is op de meetpunten op het proefgedeelte te zien dat de ijzerconcentratie hoog blijft op 45 cm diepte. Dit duidt op een reducerend milieu op deze diepte. Op 70 cm diepte blijven de concentraties juist laag, dit duidt erop dat op deze diepte een dieper anoxisch milieu heerst waarbij sulfaat wordt gereduceerd en opgelost ijzer neerslaat als ijzersulfide. Op de referentiemeetpunten zijn op beide dieptes de ijzerconcentraties laag geweest in de tweede helft van het groeiseizoen. Hier heersen waarschijnlijk juist meer oxische omstandigheden in deze periode waardoor opgelost ijzer geoxideerd wordt en neerslaat als ijzeroxide.

In 2023 waren de concentraties een stuk stabieler gedurende het jaar. Aan het begin van het groeiseizoen was het opgelost ijzer vrijwel nul op 70 cm diepte bij alle meetpunten. Dit duidt erop dat het gereduceerd ijzer nog in de vorm van ijzersulfide is gebonden. Deze ijzer komt pas weer in oplossing als oxische omstandigheden het ijzer hebben geoxideerd van Fe2+ naar Fe3+ en vervolgens reducerende omstandigheden de ijzeroxiden omzetten en ijzer weer in oplossing brengen als Fe2+. Bij alle meetpunten blijft ijzer op 70 cm diepte het gehele groeiseizoen vrijwel nul, wat erop duidt dat de sequentie van oxische en anoxische omstandigheden niet heeft plaatsgevonden.
Op de diepte van 45 cm-mv was aan het einde van het groeiseizoen 2022 veelal ijzer in oplossing door een ijzer reducerend milieu. Deze blijft in het groeiseizoen van 2023 over het algemeen hoog in het proefgedeelte, met name bij plasdras02, wat duidt op een continu ijzer reducerend milieu op deze diepte. Op de middenstrook van het referentiegedeelte (refplasdras02) gaat de ijzerconcentratie op 45 cm diepte juist naar beneden wanneer de grondwaterstand daalt, wat duidt op een oxisch milieu. Vervolgens stijgt hij weer in de nattere tweede helft van het groeiseizoen. Ook aan de rand van het referentiegedeelte is deze dynamiek aanwezig, maar zijn de concentraties veel lager.



Figuur 32: gemeten Fe^{2+} in het bodem- en slootwater, met grondwaterstanden op de secundaire as.

Sulfaat als indicatie van diep anoxische condities

Sulfaatconcentraties zijn weergegeven voor beide meetjaren in Figuur 33. Hierin zijn duidelijke verschillen te zien tussen het proef- en het referentieperceel.

In het proefperceel waren de concentraties in beide meetjaren laag tot 0 (met als uitzondering het laatste meetpunt op 40 cm-mv bij plasdras01). Dit is een indicatie van een anoxisch milieu waarin sulfaatreductie plaatsvindt op beide dieptes.

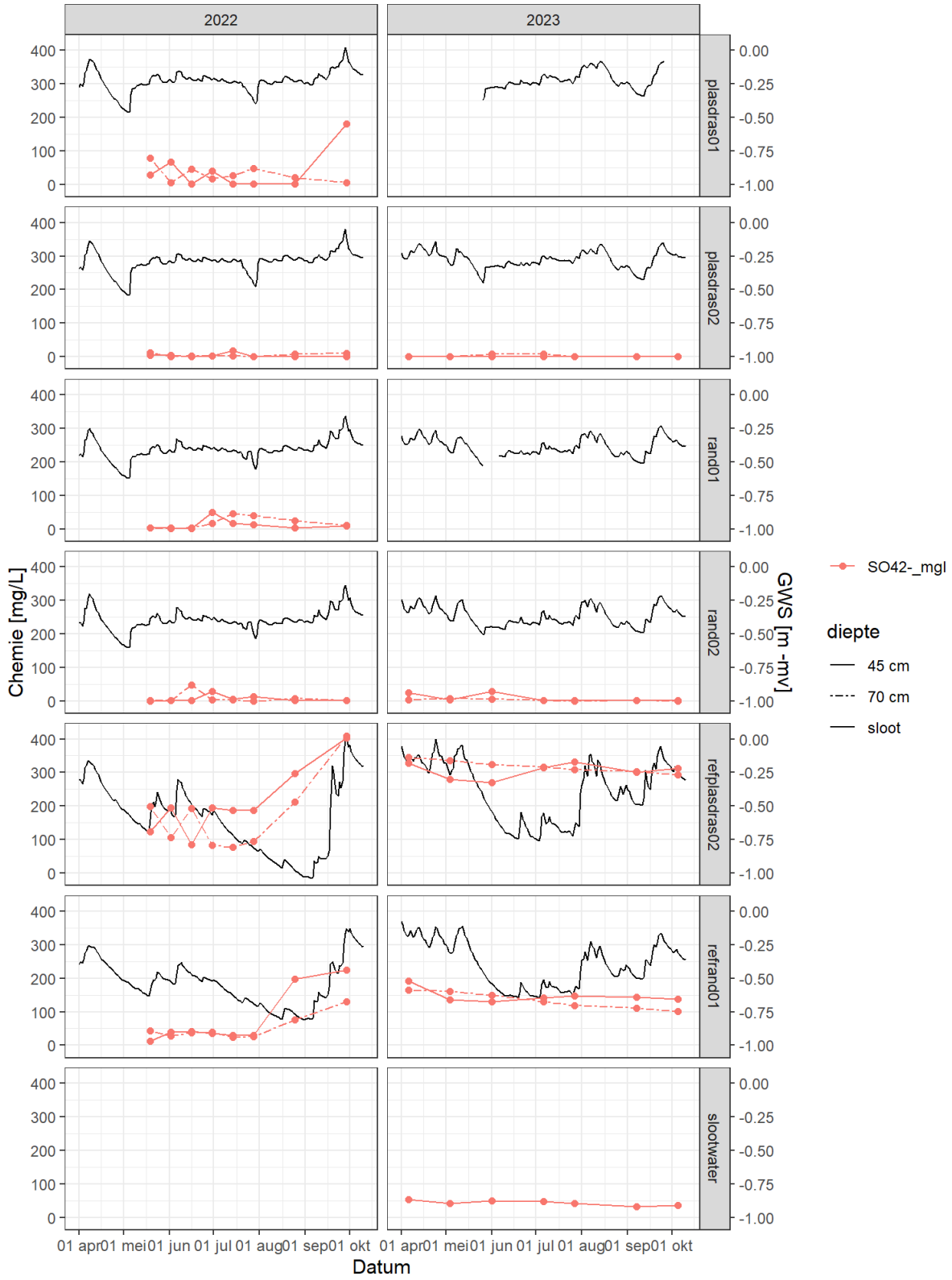
Op bet referentieperceel stijgen de concentraties in 2022 daarentegen, naar behoorlijk hoge concentraties. Die stijging zet in met name in de tweede helft van het groeiseizoen, wanneer de grondwaterstand behoorlijk uitzakt. De concentraties zijn het hoogst bij het

ondiepe meetpunt en bij refplasdras02, waar de grondwaterstand verder uitzakt ten opzichte van maaiveld dan in de randzone.

Op het meetpunt ‘refplasdras02’ is te zien dat de concentraties nog verder zijn gestegen bij de laatste bemonstering eind september. Eind september was de grondwaterstand alweer hersteld door grote hoeveelheid neerslag. De hoge concentratie op dat moment is te verklaren door uitspoeling van de bovenliggende bodem, na een lange droge periode waarin geen uitspoeling plaats kon vinden.

Het voorjaar van 2023 start op het referentieperceel met soortgelijke concentraties als aan het einde van het groeiseizoen in 2022. Diep anoxische condities lijken daarom niet te hebben plaatsgevonden in de winter ofwel was de microbiële activiteit te laag om concentraties te laten dalen door koude temperaturen. In 2023 is er minder dynamiek in de sulfaatconcentraties op het referentieperceel. Ondiep is te zien dat de concentraties wat toenemen bij lagere grondwaterstanden, wat duidt op een verschuiving naar oxischer condities. Op 70 cm diepte nemen de concentraties heel langzaam af.

Onder diep anoxische condities waarin sulfaat afwezig is, is er waarschijnlijk methaanvorming doordat CO_2 als oxidator fungeert. Wanneer tegelijkertijd de grondwaterstanden erg ondiep zijn (20-30 cm-mv) is er een risico op methaanuitstoot uit de bodem, omdat er niet voldoende onverzadigde zone is om het methaan terug om te zetten naar CO_2.
In 2023 waren de sulfaatconcentraties in het gehele proefperceel laag, en op het referentieperceel hoog. Diep anoxische condities hebben dit jaar dus alleen plaatsgevonden op het proefperceel, en op het referentieperceel was altijd wat meer zuurstof aanwezig.



Figuur 33: Sulfaatconcentraties in het bodemwater.

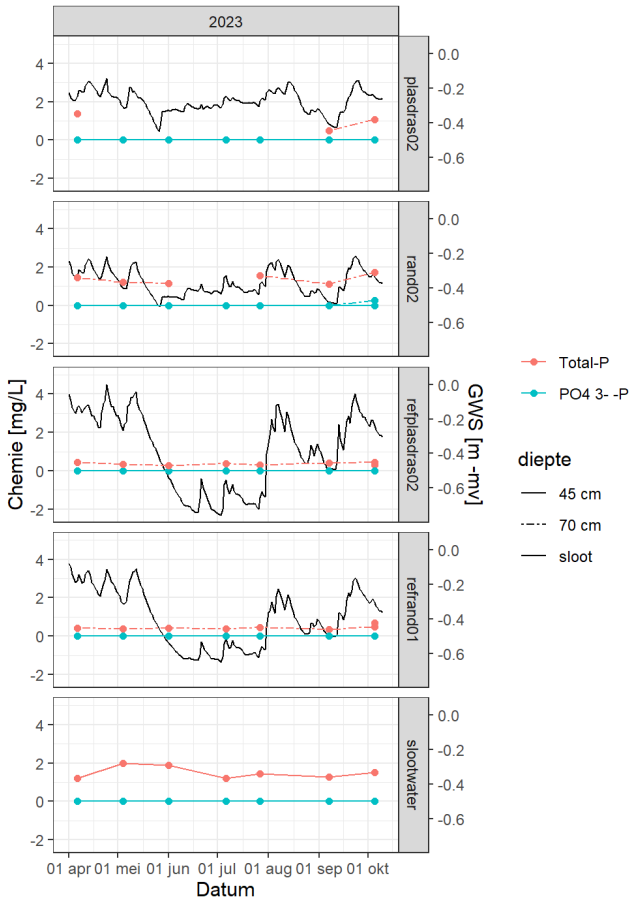
Fosfordynamiek

Er is een risico op fosfaatmobilisatie onder suboxische omstandigheden waarin ijzeroxiden worden gereduceerd. Daarnaast kan fosfor gebonden zijn aan organisch materiaal opgelost in het water.

In Figuur 34 zijn de resultaten voor fosfaat en totaal P weergegeven in 2023. Het verschil tussen PO4-P en totaal P is het organisch gebonden fosfor. De fosfaatconcentraties zijn altijd laag geweest op alle meetpunten, ook in 2022. Er is dus geen indicatie van een verhoogde fosfaatuitspoeling door vernatting. Wat betreft totaal P is te zien dat de concentraties hoger zijn op het proefperceel dan op het referentieperceel. De concentraties in het slootwater zijn vergelijkbaar. De hogere totaal P concentraties in het proefperceel kunnen daarom ook zijn veroorzaakt door infiltratie vanuit de sloot, omdat een groot deel van het seizoen infiltratie heeft plaatsgevonden.

De sloot zelf is geen KRW water, maar de vaarten in de polder wel (KRW water 'vaarten polder Bloemendaal'). Uit de beoordeling van Rijnland blijkt dat de doelstelling voor fosfor een maximale concentratie van 0.15 mg/L is. Deze wordt overschreden bij het KRW meetpunt. Ook in de sloot bemeten in dit project zijn de concentraties hoger.

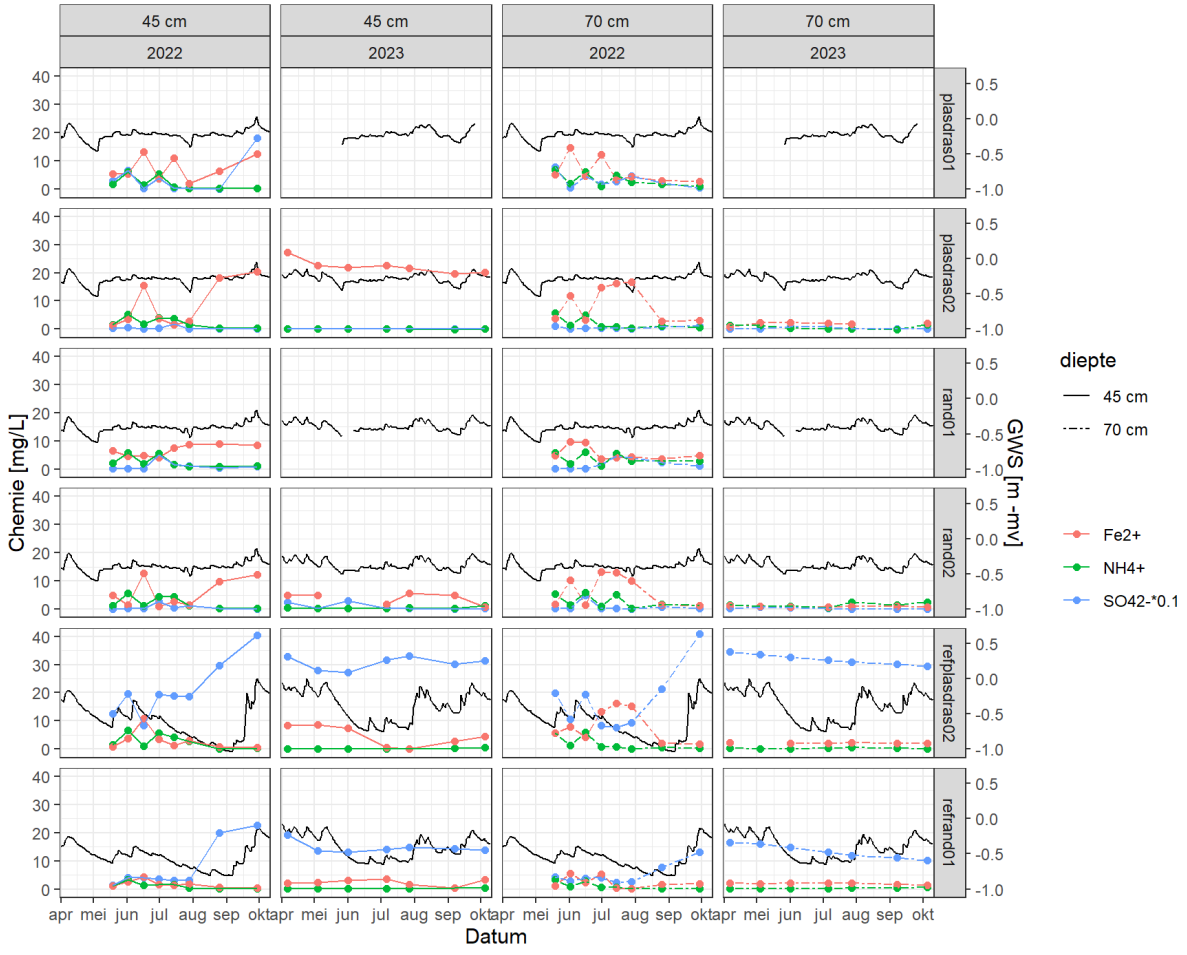
De richtlijn voor grondwater is 2 mg/L totaal P (Rapport 'Vergelijking KRW-normen Nederland en buurlanden', 2022). Deze wordt nog niet bereikt.



Figuur 34: Fosfaat-P en total P in 2023

Belangrijkste redoxindicatoren samengevat

Naar aanleiding van de redoxreacties zoals in Figuur 28, kunnen we een overzicht creëren van afbraakmilieus in de bodem aan de hand van ijzer, ammonium en sulfaatconcentraties (Figuur 35). Aanwezig ammonium geeft aan dat er nitraat gereduceerd wordt (suboxisch). Aanwezig ijzer laat zien dat er ijzeroxide wordt gereduceerd (suboxischer), en lage sulfaatconcentraties geven aan dat sulfaatreductie plaatsvindt (anoxisch). Het grootste verschil tussen het referentie- en het proefperceel is in dit geval de sulfaatgehalte. Die is aanzienlijk lager in het proefperceel, waar dus in het algemeen sulfaat wordt gereduceerd. Op het referentieperceel verschuift het afbraakmilieu naar een oxisch milieu in de tweede helft van het groeiseizoen, zichtbaar in toenemende sulfaatconcentraties en een afname van opgelost ijzer. Daarnaast is in 2022 op het proefperceel een tegengestelde dynamiek zichtbaar tussen ijzer en ammonium, wat toch enkele variaties verschuivingen in redoxzones aangeeft.



Figuur 35: Ijzer, ammonium en sulfaat voor de twee jaren op twee verschillende dieptes als illustratie voor de verschillende redoxcondities waarop de percelen zich bevinden.

5 Discussie

5.1 Werking systeem

Op de locatie van het proefperceel is het heel goed mogelijk gebleken om de grondwaterstand tussen de drains hoog te houden in de zomer door middel van het drainage/infiltratie systeem. Op de momenten dat de schuiven openstonden is gedurende het groeiseizoen de grondwaterstand ook midden tussen de drains rond slootwaterpeil gebleven. In de zomer van 2022 leidde dit tot grondwaterstanden tot wel 70 cm boven de gemeten grondwaterstand op het referentieperceel. De grondwaterstand is door de maatregel ook stabieler gebleven gedurende het groeiseizoen. Dit toont aan dat de infiltratie goed werkt en dat de bodem voldoende doorlatend is om infiltratie plaats te laten vinden.

Voordelen schuifbeheer

Bij het drainagesysteem zoals aangelegd in dit project vindt infiltratie en drainage plaats naar slootwaterpeil. Daarmee werkt het zoals een Passief Water Infiltratie Systeem (PWIS). Het systeem heeft echter een aanpassing ten opzichte van standaard PWIS systemen door het actieve schuifbeheer: infiltratie of drainage kan door het dichtzetten van schuiven in regelputten worden stopgezet. Dit kan voordelen hebben omdat het meer mogelijkheden geeft om actief te sturen met momenten van drainage en infiltratie.

Door het schuifbeheer kan drainage via de drains in het voorjaar worden gestopt om langer neerslag vast te houden in het perceel in anticipatie van een droge periode. Op deze manier wordt het infiltratiemoment uitgesteld en vermindert de watervraag. Met dit doel is er tijdens de proef ook geëxperimenteerd met het schuifbeheer. In 2023 is door het sluiten van de schuiven de infiltratie bijvoorbeeld met circa 10 dagen uitgesteld. Stel dat het systeem grootschalig zou worden uitgerold in de polder, dan is het niet de verwachting dat uitstel van drainage van 1-2 weken in het voorjaar helpt om lokale watertekorten tegen te gaan. De periode van uitgestelde infiltratie zal namelijk niet samenvallen met een periode van watertekort. Dit laatste treedt met name op na een langere droge periode. Een vergelijkbare conclusie is bijvoorbeeld getrokken in regionale modelstudies naar de watervraag van veenvernattingsmaatregelen en het mogelijk mitigerende effect van flexibel peilbeheer (Rozemeijer et al., 2019 en America - van den den Heuvel et al., 2023). De conclusie in deze studies was dat flexibel slootpeilbeheer momenten van infiltratie kan uitstellen met 1-2 weken, maar geen invloed zal hebben op een watertekort vanwege verschil in timing.

In een geval van extreem watertekort zou dit systeem met schuiven wel extra flexibiliteit kunnen geven voor de waterbeheerder, doordat er een mogelijkheid is de infiltratie op kritieke momenten stop te zetten. Er wordt in zo'n geval geaccepteerd dat de grondwaterstand verder uitzakt dan gewenst om de druk op het watersysteem te verlichten. In zo'n geval is het belangrijk dat de drains weer luchtvrij kunnen worden gemaakt indien de grondwaterstand onder drainniveau uitzakt. Bij de proef is zo'n extreme situatie nooit aan de orde geweest en dit zou voor een gebied pas relevant worden wanneer grote arealen vernatte veenweide zorgen voor een knelpunt in de waterbeschikbaarheid.

De optie van schuifbeheer kan daarnaast interessant zijn voor de landeigenaar bij het beheer van het perceel. Het proefperceel is slechts extensief bewerkt, maar toch moet het land voor maaimomenten betreed worden met machines. Wanneer de grondwaterstand zo hoog staat als in het midden van het perceel het geval was, rond 30 cm-mv, is er een serieus risico op structuurschade. Met name kleiige bodems zijn hier gevoelig voor. Op het proefperceel was een kleiig toemaakdek aanwezig en ook in veel andere delen van het veenweide gebied komen bodemprofielen voor met een kleidek. Door schuifbeheer kan de grondwaterstand verder uitzakken voor het beheermoment om zo het risico op structuurschade te verminderen.

Watervraag

Tijdens de proef is gemeten aan de fluxen in en uit de drains. De totale infiltratie gedurende het groeiseizoen was 185 mm in de meetperiode van 2022 (juni t/m september) en 100 mm in 2023. Het jaar 2023 was dan ook veel natter dan 2022. In 2024 (tot eind juli) was het dusdanig nat dat de schuiven grotendeels dicht hebben gestaan en er daardoor vrijwel geen infiltratie heeft plaatsgevonden.

Uit de metingen blijkt dat in een langdurig droge periode de watervraag per dag ongeveer gelijk wordt aan de gewasverdamping (~3-5 mm/d). In geval van vernattingsmaatregelen in het algemeen is er, naast de gewasverdamping, nog een andere mogelijke watervrager, namelijk een verandering in de verticale flux (kwel/wegzijging) door verhoogde grondwaterstanden (Roelandse etal., 2024, STOWA rapport in voorbereiding). Dit is op deze locatie echter niet aan de orde, omdat er een grote verticale weerstand in de bodem aanwezig is, in de vorm van een dik veenpakket met een kleilaag op diepte. Deze bodemopbouw zorgt ervoor dat er geen uitwisseling plaatsvindt tussen het eerste watervoerende pakket en het veen. Door omliggende diepe polders is een wegzijgingssituatie aanwezig, maar door de grote verticale weerstand leidt dit niet tot een sterke verticale flux. Een verandering in de druksituatie door de hogere grondwaterstanden als resultaat van de vernatting zullen dan ook niet tot een significante toename leiden van de wegzijging.

De relatie tussen de gewasverdamping en de infiltratieflux wordt verder nog gedempt door de beschikbare buffercapaciteit van de onverzadigde zone. In deze bodemlaag boven het grondwater kan regenwater tijdelijk worden opgeslagen. Dit water is vervolgens beschikbaar voor het gras, waardoor verdamping niet direct leidt tot infiltratie. Hoe hoger de grondwaterstand, des te kleiner de onverzadigde zone en dus de bufferingscapaciteit hiervan. In het extreme geval dat het streefpeil bijvoorbeeld op maaiveld zou staan is er geen onverzadigde zone als buffer voor het tijdelijk vasthouden van neerslag, en moet een verdampingsflux direct worden aangevuld door infiltratie. Doordat de drains in de proef zijn opgesplitst in een middengedeelte en een randgedeelte is dit effect van het bufferend vermogen van de onverzadigde zone voor de watervraag terug te zien in het verschil in fluxen. Het perceel ligt hol waardoor de middenstrook op het proefperceel altijd natter is geweest dan de randzone, met een dunnere onverzadigde zone tot gevolg. De metingen aan de hoeveelheid infiltratie hebben aangetoond dat in het midden altijd meer water is geïnfiltreerd en dat de infiltratie in de middenzone in de zomer eerder omsloeg naar drainage wanneer het flink regende. Een deel van de verklaring hiervoor is dat de middenzone, door de hogere grondwaterstand aan maaiveld, minder bufferingscapaciteit had in de onverzadigde zone

(een ander deel van de verklaring is dat in de randzone nog deels infiltratie plaatsvindt vanuit de sloot).

Risico's van vergaande vernatting

Zoals genoemd hebben de grondwaterstanden op het proefperceel grote delen van de zomer rond het slootwaterpeil gestaan. Dit leidde tot grondwaterstanden tussen de 30 en 40 cm-mv. Hoge grondwaterstanden zijn gewenst om veenoxidatie tegen te gaan, maar brengen ook risico's met zich mee. Zo lijkt het dat gedurende de proef de drainage capaciteit van het systeem minder goed is geworden, met name op de middenstrook. Hier is ook plasvorming gesignaleerd, met name in het najaar van 2023 en winter en voorjaar 2024. Er zijn verschillende mogelijke oorzaken voor deze verminderde drainage. Zo is er een risico op verdichting van het toemaakdek door de hoge grondwaterstanden in het groeiseizoen wanneer beweid, bemest en gras geoogst wordt. Ook kunnen de hoge grondwaterstanden ertoe leiden dat er minder diepe beworteling is. Wortels groeien namelijk niet in de verzadigde zone. Dit kan leiden tot een lagere infiltratiecapaciteit en een minder luchtige structuur van de bodem. Ten slotte kan verminderde scheurvorming door de hoge grondwaterstanden een rol spelen in vermindering van de drainage capaciteit. In 2022 is op het referentieperceel bijvoorbeeld scheurvorming opgetreden in het toemaakdek, wat op het maatregel perceel niet het geval was. Via scheuren kan water versneld worden afgevoerd. Scheurvorming (brede en diepe scheuren) was alleen zichtbaar op referentie.
Om de plasvorming tegen te gaan is het aan te raden de greppel in het midden van het perceel opnieuw in gebruik te nemen, zoals ook gedaan is op het referentieperceel. Een greppel kan wel een risico vormen voor de waterkwaliteit omdat deze een versnelde route vormt voor oppervlakkige afstroming van perceel naar sloot.

Een ander mogelijk risico bij extreem hoge grondwaterstanden is daarnaast dat er een directere uitwisseling plaatsvindt tussen het perceel en het oppervlaktewater: neerslag verblijft minder lang in de bodem en is eerder onderdeel van het grondwater. Hierdoor is er een mogelijk risico op snellere uitspoeling van nutriënten bij bemesting. Op de locatie van de proef is niet bemest, dus dit was hier minder relevant. In 2023 is gemeten aan totaal P en totaal N in sloot en rond draindiepte in het perceel. Op het proefperceel waren hogere totaal P concentraties aanwezig, wat waarschijnlijk zijn oorsprong heeft in het geïnfiltreerde slootwater.

5.2 Effect van vernatting op afbraakmilieus in het veen

Afbraak van veen is het snelst in aanwezigheid van zuurstof, maar kan ook zonder zuurstof plaatsvinden (anaeroob) door middel van alternatieve oxidatoren zoals nitraat, ijzeroxiden en sulfaat (Keuskamp etal., 2024). De anaerobe afbraak kost meer energie en gaat daardoor langzamer dan met zuurstof, maar resulteert ook in afbraak van veen en dus in CO_2 uitstoot. De afwezigheid van zuurstof is niet beperkt tot de verzadigde zone onder het grondwater. Ook in de onverzadigde zone daarboven kan het dusdanig vochtig blijven dat het transport van zuurstof naar diepte wordt geremd. De vochtigheid van de bodem heeft een relatie met de aerobe afbraak: wanneer de bodem erg nat is kan er geen zuurstof via de luchtgevulde poriën het veen indringen. Is het heel droog, dan raken microbiële processen gelimiteerd door de afwezigheid van vocht en gaat de afbraaksnelheid ook naar beneden. In geval van een kleidek of kleiig toemaakdek is er

een bodemlaag op het veen aanwezig die ook zeer goed water vasthoudt, waardoor zuurstoftransport door deze laag naar het veen wordt bemoeilijkt.

Om iets te zeggen over de aanwezigheid van aerobe of anaerobe afbraakmilieus is tijdens de proef onder andere gemeten aan het bodemvocht en zuurstofgehalte bovenin het veen net onder het toemaakdek (45 cm-mv). Daarnaast is er aan de poriewaterchemie gemeten.

Het proefveld is op diepte van de sensoren, bovenin het veen, grotendeels verzadigd geweest omdat de grondwaterstand meestal boven de sensoren stond. Toch fluctueerde het bodemvocht met de seizoenen met een amplitude tot wel 5%, waarbij bodemvocht het hoogst is in de winter en het laagst in de zomer. Omdat dit onder de grondwaterstand plaatsvindt is dit het gevolg van krimp en zwel van de verzadigde veenbodem.
Op die momenten dat de grondwaterstand onder de bodemvochtsensor kwam op het proefgedeelte zakte het bodemvocht nauwelijks. Ook de zuurstofconcentraties waren altijd laag. De maximale waarde was 2% zuurstof bij één van de meetlocaties op het proefgedeelte. Dit is een stuk lager dan de atmosferische zuurstofconcentratie. Waarschijnlijk hebben er nauwelijks zuurstofrijke condities opgetreden. Wanneer het bodemvocht dicht bij verzadiging blijft is een groot deel van de bodem nog anaeroob, behalve de enkele porieën waar wel lucht is doorgedrongen.

Ook op het referentieperceel bleef het bodemvocht erg hoog, ook al zakte de grondwaterstand in het groeiseizoen verder uit dan de sensor. Dat het bodemvocht niet sterk daalde met de uitzakkende grondwaterstand duidt erop dat het veen een goede capillaire werking heeft die voldoende is om de gewasverdamping bij te houden en zo uitdroging van het veen te voorkomen. Een voordeel hierbij is dat het merendeel van het wortelgestel van het gras in het toemaakdek zit. Ook bleven de zuurstofmetingen op het referentieperceel laag terwijl de grondwaterstand onder het meetpunt uitzakte (80-110 cm-mv op respectievelijk rand en middenzone): in de middenstrook was zuurstof altijd afwezig bij de sensor. In de randstrook is het een periode in 2022 gelijk geweest aan atmosferische concentraties, wat duidt op een zeer goed transport van zuurstof naar de diepte van de sensor. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er mogelijk een diepe scheur in de buurt van de sensor aanwezig was (er zijn in de zomer van 2022 scheuren gevormd op het referentieperceel door de droogte). Scheurvorming kan ruimtelijke variaties veroorzaken in zuurstofbeschikbaarheid en de afbraakmilieus die hier aanwezig zijn in de bodem. In 2023 was de concentratie hier nog maar maximaal 5% en in 2024 0%. Het lijkt er dan ook op dat ook wanneer het veen boven het grondwater uitkomt zuurstofindringing zeer beperkt is op de proeflocatie door i) de capillaire werking van het veen, ii) de afsluitende werking van het toemaakdek dat waarschijnlijk ook goed water vasthoudt en daardoor beperkt lucht doorlaat en iii) de consumptie van zuurstof onderweg waardoor zuurstofconcentraties op diepte afnemen. Wanneer de gemeten zuurstofconcentraties laag zijn en de bodemvochtgehaltes nog relatief erg hoog is het aannemelijk dat een groot deel van de bodem op die diepte anaeroob blijft, terwijl rond enkele luchtgevulde porieën aerobe condities optreden. Scheuren kunnen daarnaast hotspots vormen voor zuurstoftransport en ruimtelijke variaties veroorzaken in zuurstofbeschikbaarheid en de afbraakmilieus die hier aanwezig zijn in de bodem.

Er zijn metingen gedaan aan de chemie van het bodemwater om ook iets te kunnen zeggen over de anaerobe afbraakprocessen. De grootste indicator was hierbij de aanwezigheid of afwezigheid van sulfaat. Op het proefperceel waren sulfaatconcentraties op 45 en 70 cm diepte altijd laag, terwijl deze op beide dieptes hoger waren op het referentiegedeelte. De afwezigheid van sulfaat wijst op een diep anoxisch milieu waarin sulfaatreductie plaatsvindt. De aanwezigheid van sulfaat op het referentieperceel geeft aan dat hier meer suboxische afbraakmilieus heersten, waarbij nitraat en ijzeroxides worden gereduceerd. Op het referentiegedeelte stijgen de sulfaatconcentraties in de loop van de zomer 2022 en blijven hoog in 2023. Ook ijzerconcentraties dalen aan het einde van het groeiseizoen. Ten tijde van de diepste grondwaterstanden lijkt er daarom wel sprake te zijn van een oxisch milieu op het referentieperceel.

Mogelijke effecten op de waterkwaliteit

Het effect van veenvernatting op de waterkwaliteit is niet eenduidig. Aan de ene kant neemt de mineralisatie af en daarmee de mobilisatie van N en P, aan de andere kant is het mogelijk dat vernatting leidt tot mobilisatie van opgehoopt fosfor uit de bouwvoor. In deze proef is beperkt gemeten aan totaal N en totaal P in 2023, als indicatie voor de waterkwaliteit van grond- en oppervlaktewater. Hoewel fosfaat altijd laag is geweest op zowel de meetpunten als in de sloot was totaal P wel aanwezig, met name bij de meetpunten van het proefgedeelte en in de sloot. In het groeiseizoen vindt voornamelijk infiltratie plaats, het is daarom waarschijnlijk dat de hoge concentraties op het proefperceel worden veroorzaakt door het geïnfiltreerde slootwater.
Ook de nitraatconcentraties waren laag, zowel in het grondwater als in de sloot. Totaal N was echter wel hoog. De waardes vertoonden met name een piek bij neerslag na een langere droge periode. Een dergelijke piek werd waarschijnlijk veroorzaakt door uitspoeling van de onverzadigde zone na de droge periode.
De metingen aan de waterkwaliteit zijn nog te beperkt geweest om iets te zeggen over het effect van vernatting op de oppervlaktewaterkwaliteit.

Wat is de ideale grondwaterstand voor het tegengaan van bodemdaling en broeikasgassen?

De vernattingsmaatregel heeft als doel het tegengaan van bodemdaling en broeikasgassenuitstoot vanuit het veen. De metingen tonen aan dat de hydrologische omstandigheden op het proefperceel gunstig zijn om te vernatten via draininfiltratie. Op basis van de metingen aan bodemvocht, zuurstof en chemie lijkt het dat de vernatting met name heeft geleid tot een verschuiving in het veen van overwegend suboxische naar diep anoxische omstandigheden. Op het referentieperceel is alleen in 2022 duidelijk zuurstof aanwezig geweest in het veen. Het lijkt er daarnaast op dat de scheuren die toen zijn ontstaan belangrijke hotspots van zuurstoftransport gevormd hebben.

Een belangrijke oorzaak voor het overwegend zuurstofarme milieu in het veen is de bodemopbouw op de locatie. Bovenop het veen bevindt zich een kleiig toemaakdek. Hierdoor blijft het veen ook op het referentieperceel grotendeels beschermd tegen zuurstofindringing. Klei en veen kunnen beide goed water vasthouden. Indien het toemaakdek zeer nat blijft komt er ook weinig zuurstof doorheen. Vervolgens wordt een deel van de zuurstof al geconsumeerd in de bovengrond waar de meeste microbiologische activiteit plaatsvindt. Verder kan het veen zelf onder het toemaakdek

goed vochtig blijven door de sponswerking en doordat het wortelgestel van het gras voornamelijk in het toemaakdek aanwezig is en daardoor in eerste instantie vooral water uit het toemaakdek onttrekt. Door deze factoren hebben zuurstofrijke omstandigheden ook op het referentieperceel niet vaak opgetreden in het veen. Door het systeem is wel een verschuiving opgetreden in afbraakmilieu's van overwegend suboxisch, en oxisch gedurende lange droge perioden en rond scheuren, naar anoxisch. Deze verschuiving leidt tot een langzamere afbraak van organisch materiaal, omdat de afbraak onder anoxische omstandigheden meer energie kost. Daarmee leidt het systeem tot verminderde bodemdaling (de component veroorzaakt door veenafbraak) en minder CO_2 uitstoot, met name in droge jaren zoals 2022.
Aerobe afbraak treedt bij dit bodemprofiel met name op bij scheurvorming en helemaal aan het einde van een echt droge periode zoals in 2022. De observatie dat overwegend anaerobe afbraakmilieus een rol spelen op de locatie komt overeen met modellering van de broeikasgasuitstoot op het proefveld door Ko van Huissteden (Van Huissteden, 2024), gekalibreerd op metingen van CO_2 en methaan. Ook is bij deze metingen geobserveerd dat de CO_2 uitstoot lokaal zeer hoog kan zijn in de buurt van een scheur.

Bij verregaande vernatting is er een aanvullend een risico op methaanemissies. Deze treden met name op bij grondwaterstanden ondieper dan 30 tot 20 cm-mv en hebben als voornaamste bron recent gevormd plantenmateriaal (Buzacott etal., 2024). Bij metingen aan methaan op het proefperceel is dit met name gemeten dicht bij de greppel, waar de bodem natter was (Van Huissteden, 2024). Methaan wordt gevormd vanuit recent plantenmateriaal en makkelijk afbreekbaar koolstof en de vorming ervan heeft daardoor geen relatie met bodemdaling. Wel is methaan een veel sterker broeikasgas dan CO_2, en beïnvloedt de uitstoot ervan daarmee de broeikasgasbalans. Dit is verder uitgewerkt in het rapport van Ko Van Huissteden.

Het is de vraag of het nodig is om grondwaterstanden dusdanig hoog te zetten zoals gedaan is bij deze proef wanneer er een toemaakdek of kleidek aanwezig is. Ook bij een grondwaterstand van 40-45 cm-mv zou het veen nat zijn gebleven. De hoge grondwaterstanden brengen risico's met zich mee voor de bodemstructuur en de beworteling en groei van het gras. Wanneer gras suboptimaal groeit neemt ook de nutriëntenopname af, wat ongewenst is voor bemeste percelen omdat dan meer verliezen zullen optreden naar lucht en water. Ook geeft bemesting op natte bodems een groter risico op lachgasemissies, wat een zeer sterk broeikasgas is. Op dit proefperceel is niet bemest gedurende de proef, maar het zijn factoren om rekening mee te houden bij intensiever beheerde percelen. Vanuit de Stichting wordt een handelingsperspectief voor de landgebruikers gemaakt op basis van de bevindingen uit het project.

6 Conclusies

6.1 Onderzoeksvragen

Dit rapport richtte zich op de onderstaande onderzoeksvragen tijdens de pilot met PWIS en actief schuifbeheer op een veenweide perceel in de polder Bloemendaal:

- Hoe werkt het systeem en is het in staat voldoende water te infiltreren om de grondwaterstand hoog te houden?
- Wat is het effect van vernatting middels hogere grondwaterstanden op de afbraakmilieus in het veen?

6.2 Werking van het systeem

De belangrijkste conclusies ten aanzien van de werking van het systeem zijn als volgt:

- Het drainage/infiltratiesysteem is in staat voldoende water te infiltreren zodat ook de grondwaterstand tussen de drains dicht bij slootpeil blijft (30-40 cm-mv afhankelijk van de locatie in het perceel). Het bosveen in de ondergrond is dus voldoende doorlatend voor een goede werking.
- De toevoeging van schuifbeheer in de regelputten van het systeem maakt het mogelijk de momenten van drainage en infiltratie uit te stellen. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk om langer neerslag vast te houden in het perceel in het voorjaar zodra het wat droger weer wordt en tijdens droogte bij zomerse buien water vast te houden. Hiermee wordt infiltratie uitgesteld. Het schuifbeheer zou ook gebruikt kunnen worden door de landbeheerder om te sturen op goede, voldoende droge, condities tijdens bijvoorbeeld het maaien.
- De infiltratie was 185 mm in het groeiseizoen van 2022 (gemeten vanaf juni, de eerste infiltratieflux bij start van de proef is daarmee gemist) en 100 mm in het groeiseizoen van 2023. In droge periodes is de infiltratie per dag vrijwel gelijk aan de gewasverdamping.
- Door de grote verticale weerstand op de locatie (dik veenprofiel met kleilaag op diepte) is er geen effect van de hogere grondwaterstanden op een verticale flux naar het onderliggend zandpakket. In veenpolders waar deze kleilaag ontbreekt en het veenpakket bijvoorbeeld dunner is, kan de verticale weerstand minder groot zijn waardoor vernatting wel kan leiden tot meer wegzijging, en daarmee een grotere infiltratiebehoefte dan gemeten in deze proef.
- De drainagecapaciteit van het systeem leek minder goed te worden naarmate de proef vorderde. Drainagefluxen in de winter van 2023/2024 reageerden minder sterk op hoge grondwaterstanden dan in de winter van 2022/2023. Ook is er meer plasvorming gesignaleerd op het lager liggende middengedeelte van het holle perceel. Het is mogelijk dat de hoge grondwaterstanden gedurende het groeiseizoen zorgen voor een risico op verdichting bij maaien. Verdichting van het kleiig toemaakdek is één van de mogelijke oorzaken van de verminderde drainage, en zal indien gewenst verder onderzocht moeten worden in het veld. Verslemping van de bovengrond kan ook plaatsvinden door de combinatie van veel regen, begrazing door ganzen en aanhoudende plasvorming. Soms stonden er plassen terwijl de grondwaterstand lager was dan het maaiveld (schijngrondwaterstand), wat aangeeft dat de bovengrond dichtgeslagen was.

- Bij hoge grondwaterstanden is er nog weinig buffering mogelijk van neerslag in de onverzadigde zone. Hierdoor is er een directere uitwisseling tussen perceel en sloot. Het is aan te raden om binnen dit project ofwel daarbuiten meer onderzoek te doen naar de mogelijke impact hiervan op de waterkwaliteit. Wel is het zo dat bij hol liggende percelen vaak een greppel aanwezig is en dat deze zorgt voor een directere uitwisseling met de sloot dan in geval van drainage. Greppels worden deels gevoed door oppervlakkige afstroming van meststoffen en bijvoorbeeld ganzenpoep die zo direct worden afgevoerd. In geval van drainage moet het water eerst nog door de bodem waarbij ammonium bijvoorbeeld geadsorbeerd wordt aan de kleiige bodem.
- Het perceel is extensief beheerd. Wanneer bemesting plaats zou vinden is er door de hoge grondwaterstanden mogelijk een groter risico op lachgasemissies. Lachgasemissies vanuit veengronden met en zonder bemesting zijn nog relatief weinig bemeten en worden op dit moment onderzocht binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV).

6.3 Effect op afbraakmilieus

De belangrijkste conclusies ten aanzien van het effect op de afbraakmilieus in het veen zijn als volgt:

- De hoge grondwaterstanden op het proefveld zorgen voor bijna permanent verzadigde condities bovenin het veen, onder het toemaakdek. Hierdoor heersen hier zuurstofloze omstandigheden. Veenafbraak kan wel plaatsvinden onder zuurstofloze (anaerobe) condities, maar gaat langzamer dan als zuurstof wel aanwezig is.
- Op het referentieperceel daalde de grondwaterstand met name in 2022 (tot 80 à 100 cm -mv). Dit heeft maar beperkt geleidt tot een lager bodemvocht bovenin het veen, onder het toemaakdek. Slechts op één van de twee meetpunten op het referentieperceel is zuurstof gemeten op die diepte. Scheuren lijken een belangrijke rol te spelen bij het zuurstoftransport: in 2022 was er veel scheurvorming aanwezig op het referentieperceel en werd dan ook bij één meetpunt een zuurstofconcentratie gelijk aan atmosferische concentraties gemeten. Het jaar erop kwam het zuurstofgehalte niet boven 5%. Ook op basis van bodemchemie lijkt op het referentieperceel alleen eind 2022 zuurstof in het veen te zijn gekomen. Verder heersen met name suboxische condities. De afbraakmilieus zijn wel minder diep anoxisch dan op het proefperceel. Ook de anaerobe component van veenafbraak kan daardoor groter zijn op het referentieperceel dan op het proefperceel. Het systeem beperkte dus de anaerobe afbraak van het veen, en voorkwam aerobe condities in zeer droge zomers zoals in 2022.
- De effecten op aerobe en anaerobe afbraak en de resulterende broeikasgasuitstoot en bodemdaling zijn ingeschat door Ko van Huissteden en terug te vinden in zijn rapportage (hoofdstuk 7 van de integrale rapportage van dit project). Op basis van metingen en modellering met het Peatland-VU model blijkt uit zijn onderzoek dat het systeem resulteert in een aanzienlijke vermindering van de broeikasgasuitstoot en bodemdaling met name in het droge jaar van 2022. In 2023, een natter jaar, was het effect veel beperkter.

Het is de vraag of het bij een kleidek of kleiig toemaakdek (>40 cm dikte) nodig is de grondwaterstand dusdanig te verhogen als in deze proef. Het kleiig toemaakdek in combinatie met de capillaire werking van het veen bieden bij kortdurende droogtes bescherming tegen zuurstofindringing. De hoge grondwaterstanden brengen ook risico's met zich mee: met name kleiige bodems zijn bijvoorbeeld gevoelig voor verdichting. Door een flexibel beheer van de infiltratiemomenten mogelijk te maken met de schuiven zoals in dit systeem wordt het ook mogelijk te anticiperen op maaimomenten.

Literatuur

- Zhang, Z., A. Furman, Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes-A review, Science of the Total Environment 763, 143026, 2021.
- Rapport 'Vergelijking KRW-normen Nederland en buurlanden', Royal HaskoningDHV, 2022, https://open.overheid.nl/documenten/ronl-06c6bef01e552efa0e730eed8a0c47c53b5c75a6/pdf)
- Harpenslager, S.F., G. van Dijk, J. Boonman, S.T.J. Weideveld, B.P. van de Riet, M.M. Hefting, A.J.P. Smolders, Rewetting drained peatlands through subsoil infiltration stabilises redox-dependent soil carbon and nutrient dynamics, 2024, Geoderma 442 116787.
- Rozemeijer, J., H. Boomsma, A. Veldhuizen, J. Pouwels, J. van den Akker, T. Kroon, Effecten van onderwaterdrainage op de regionale watervraag – Berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model, Deltares rapport
- America – van den Heuvel, I., R. Boelens, M. Mens, E. Mes, Potentie van watervraagreductie in het veengebied – een modelverkenning op landelijke schaal, 2023, Deltares rapport
- Van Huissteden, K., Broeikasgas-fluxen uit een koopveenbodem in Polder Bloemendaal (Waddinxveen, Zuid-Holland), rapport V.O.F. Kytalyk Carbon Cycle Research
- Keuskamp, J., M. Hefting, S. Weidner, D. Tolunay, J. Boonman, G. Erkens, Integratierapport mechanistisch begrip, NOBV Jaarrapportage 2024.
- Buzacott, A.J.V., B. Kruijt, Q. van Giersbergen, C. Fritz, R. Nouta, G. Erkens, M. van den Berg, J. van Huissteden, Y. van der Velde, 'Drivers and annual totals of methane emissions from Dutch peatlands', 2024, Global Change Biology, Vol. 30, Issue 12 https://doi.org/10.1111/gcb.17590

Appendix A1: geïnstalleerde sensoren

Een overzicht van de geïnstalleerde telemetrische sensoren is gegeven in Tabel A1. Daarnaast zijn rhizons geïnstalleerd op twee verschillende dieptes.

Tabel A1: aangelegd monitoringsysteem

Meetpunt	Sensor	Diepte (m-mv)	Benaming op dashboard
Rand01 (maaiveldhoogte: -1,96 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.58-1.58	GWS Rand01
	Bodemvocht	0.47	vocht Rand01 47 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 Rand01 45 cm-mv
Plasdras01 (maaiveldhoogte: -2,09 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.74-1.74	GWS plasdras01
	Bodemvocht	0.45	vocht plasdras01 45 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 plasdras01 45 cm-mv
Rand02 (maaiveldhoogte: -1,95 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.73-1.73	GWS Rand02
	Bodemvocht	0.45	vocht Rand02 45 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 Rand02 45 cm-mv
Plasdras02 (maaiveldhoogte: -2,05 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.74-1.74	GWS plasdras02
	Bodemvocht	0.45	vocht plasdras02 45 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 plasdras02 45 cm-mv
Refrand01 (maaiveldhoogte: -2,00 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.71-1.71	GWS Refrand01
	Bodemvocht	0.45	vocht Refrand01 45 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 Refrand01 45 cm-mv
Refplasdras02 (maaiveldhoogte: -2,09 m-NAP)	Grondwaterstand in peilbuis	Filterstelling 0.69-1.69	GWS Refplasdras02
	Bodemvocht	0.45	vocht Refplasdras02 45 cm-mv
	Zuurstof	0.45	O2 Refplasdras02 45 cm-mv

Naast de meetinstrumenten is er ook een dashboard opgezet. Daarin konden partners in het project met hun eigen inloggegevens de meetgegevens bekijken.
Op het dashboard worden tijdreeksen weergegeven van alle telemetrisch geautomatiseerde meetgegevens.

Appendix A2: momenten in het schuifbeheer

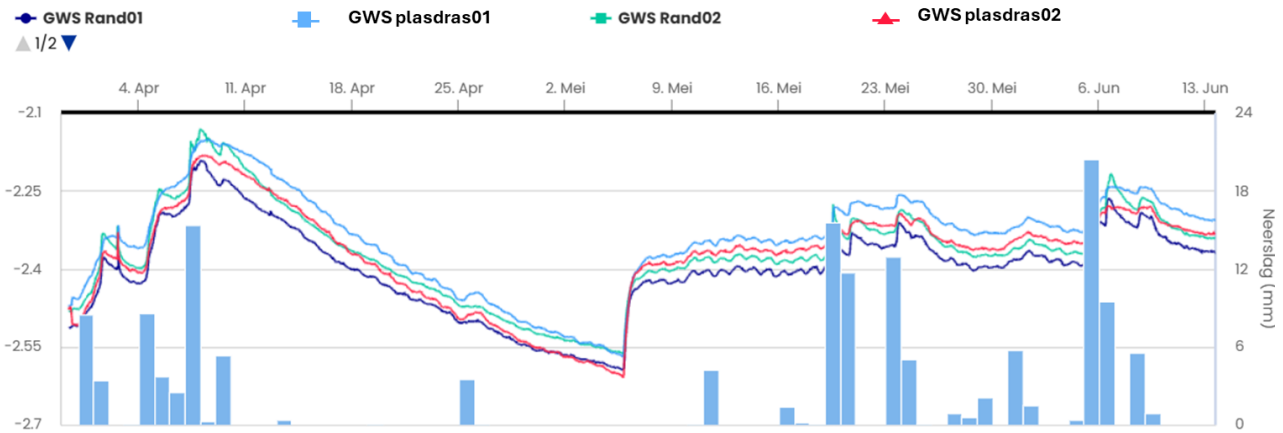
In de sectie hieronder bespreken we per jaar een aantal specifieke momenten van het schuifbeheer en de het effect op de fluxen en de grondwaterstanden.

2022

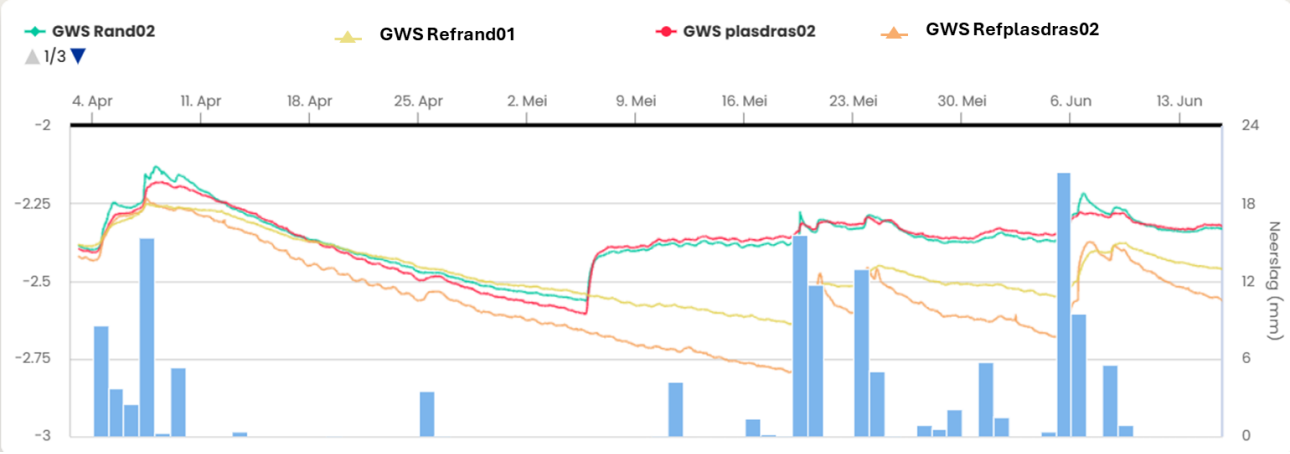
De infiltratie is gestart op 5 mei 2022. De debietmeters hebben echter pas vanaf 28 mei gemeten aan de fluxen in en uit het perceel. Uit de reactie van de grondwaterstanden is wel duidelijk op te maken dat de start van infiltratie direct effect had op de grondwaterstanden bij alle vier de meetpunten op het proefgedeelte, zoals te zien in figuur A1.

In de periode vóór het moment van infiltratie zakken de grondwaterstanden met een zelfde snelheid uit als op het referentieperceel (figuur A2). Ook de grondwaterstand in de randzone zakt uit, wat aantoont dat hier nog relatief weinig infiltratie plaatsvindt vanuit de sloot ('slootkanteffect'). Ook is in deze periode te zien dat de meetpunten op de middenstrook sterkere dag-nacht fluctuaties tonen in de grondwaterstand ten gevolge van gewasverdamping en ook sterker reageren op de neerslag van 25 april. Dit komt doordat de grondwaterstand in de middenstrook dichter aan maaiveld staat waardoor er minder bergingsruimte is in de onverzadigde zone.

In de periode ná de start van de infiltratie is te zien dat op alle meetpunten de grondwaterstand direct reageert, ook aan het einde van de drainage bij meetpunten Rand01 en plasdras01. Hierna blijven de grondwaterstanden stabiel. Dit toont aan dat de infiltratie goed werkt.

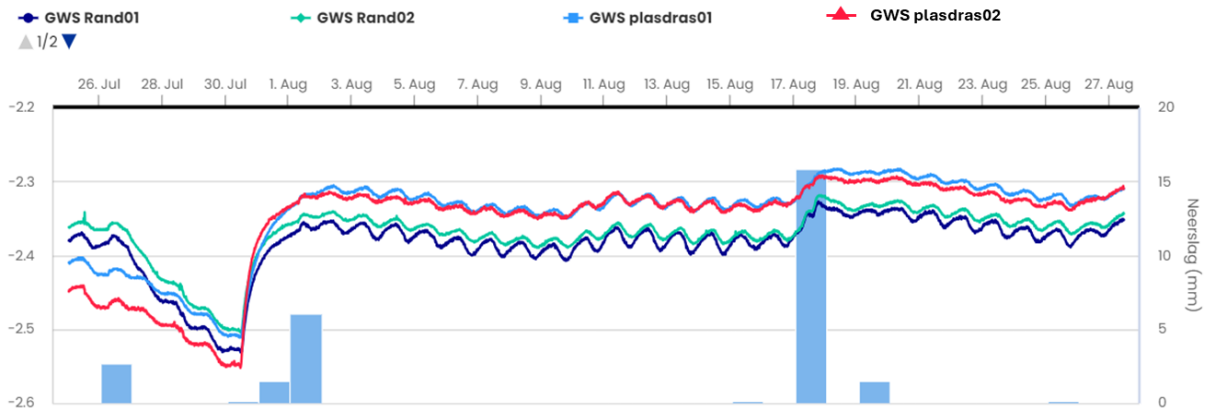


Figuur A1: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in de periode voor en na de start van de infiltratie op 5 mei 2022.

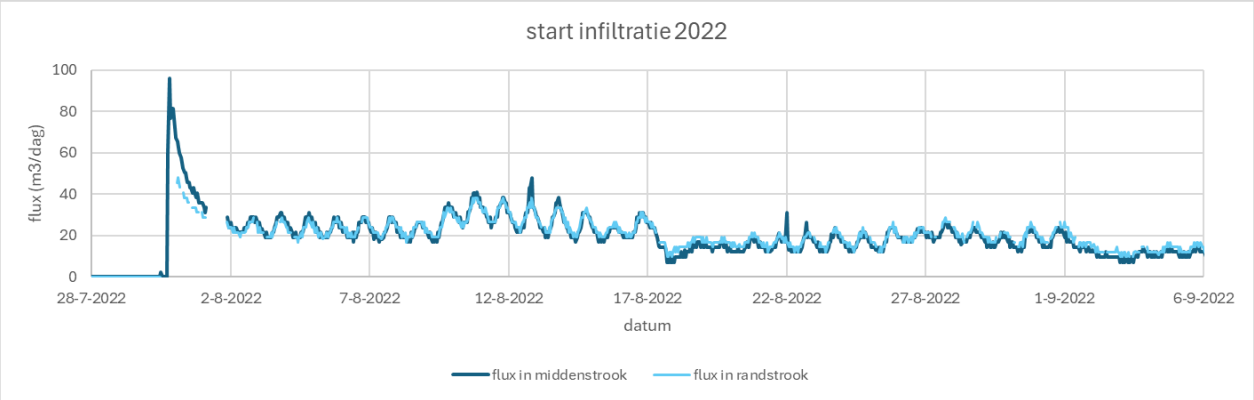


Figuur A2: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte en referentiegedeelte in m-NAP in de periode voor en na de start van de infiltratie op 5 mei 2022.

In een periode eind juli 2022 hebben de schuiven een tijdje dichtgestaan waardoor de grondwaterstand tijdelijk kon uitzakken. Vervolgens zijn de schuiven opengezet op 30 juli. De figuren hieronder (A3 en A4) tonen het verloop van de grondwaterstanden en de infiltratieflux na het openzetten van de schuiven. Met het openzetten van de schuiven gaat de grondwaterstand midden tussen de drains omhoog (12 cm op het midden perceel en 14 cm aan de rand).
Te zien is dat na ongeveer 32 uur de infiltratieflux is gezakt naar een stabiele waarde die in de periode daarna aanhoudt. In de droge dagen daarna is de infiltratieflux ongeveer constant, maar schommelt met een dag/nachtritme, waarbij de meeste infiltratie overdag plaatsvindt.

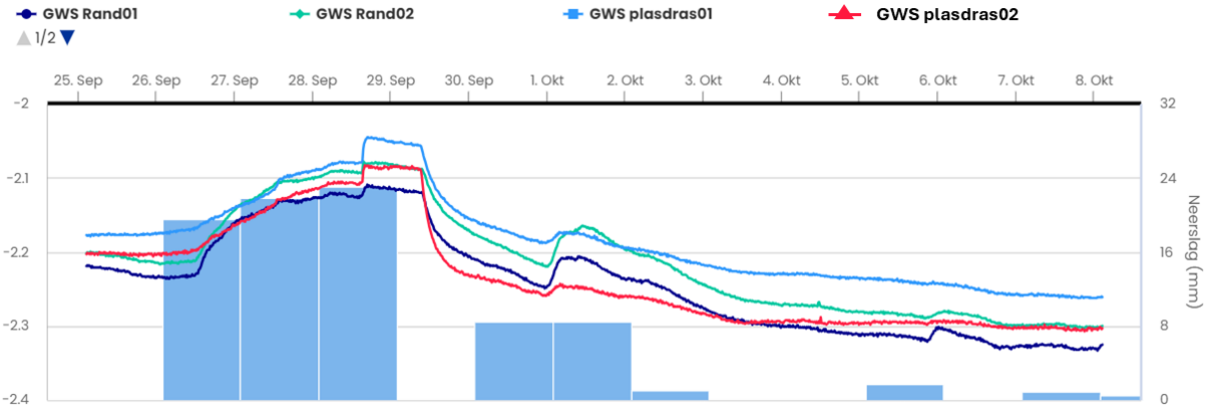


Figuur A3: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in de periode rond 30 juli, toen de schuiven even dichtstonden en op 30 juli opnieuw open werden gezet, waarna infiltratie plaats kon vinden.

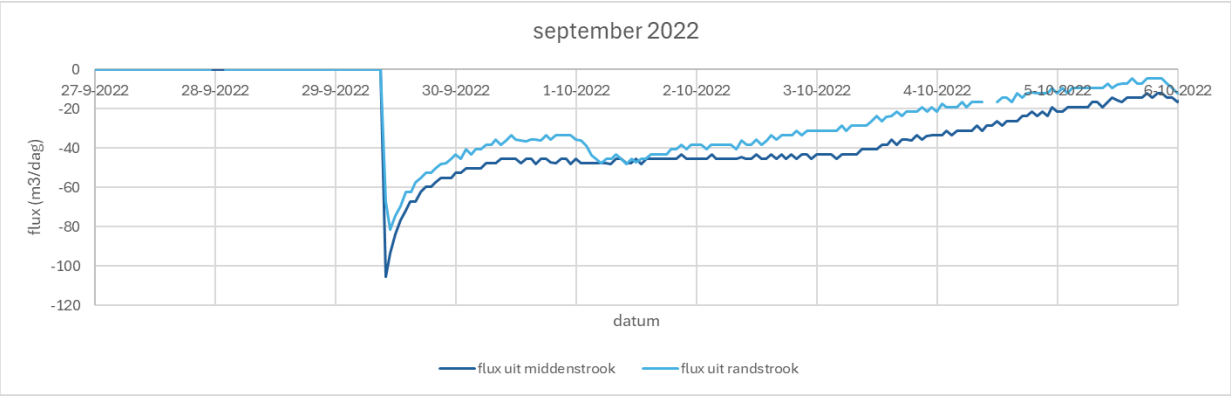


Figuur A4: gemeten infiltratieflux in midden- en randzone op het proefgedeelte in de periode rond 30 juli, toen de schuiven even dichtstonden en op 30 juli opnieuw open werden gezet, waarna infiltratie plaats kon vinden.

Gedurende de zomer hebben de schuiven opengestaan ten behoeve van de infiltratie. In september 2022 zijn ze even dicht geweest om water in het perceel vast te houden. 29 september gingen de schuiven weer open, wat leidde tot drainage. Dit is terug te zien in de reactie van de grondwaterstand op alle vier de meetplekken in het proefperceel (figuur A5) en in de drainageflux (figuur A6).



Figuur A5: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in de periode rond 29 september. In de periode voor 29 september waren de schuiven gesloten om water vast te houden. Door de neerslag is besloten ze te openen op 29 september, waarna drainage kon plaatsvinden.

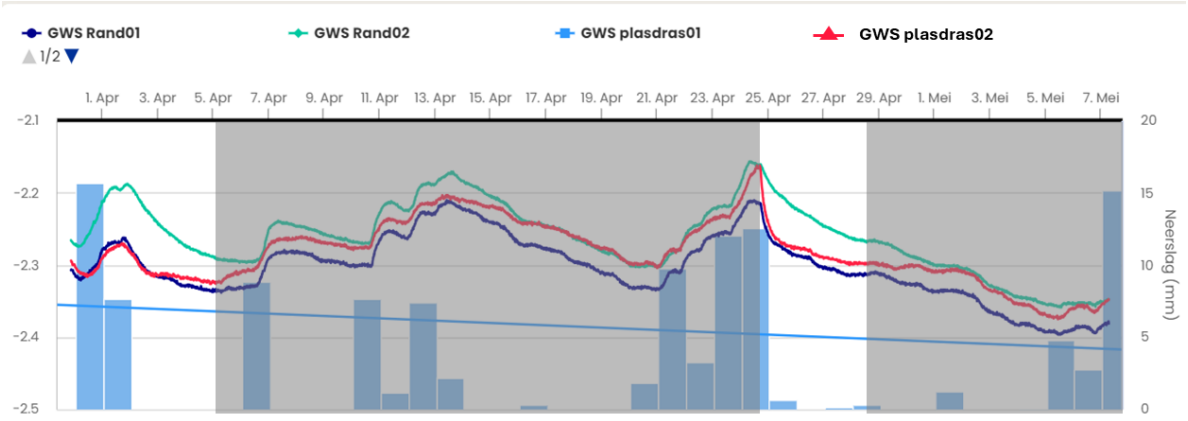


Figuur A6: gemeten drainageflux in midden- en randzone op het proefgedeelte in de periode rond 29 september. Schuiven werden geopend op 29 september ten behoeve van drainage.

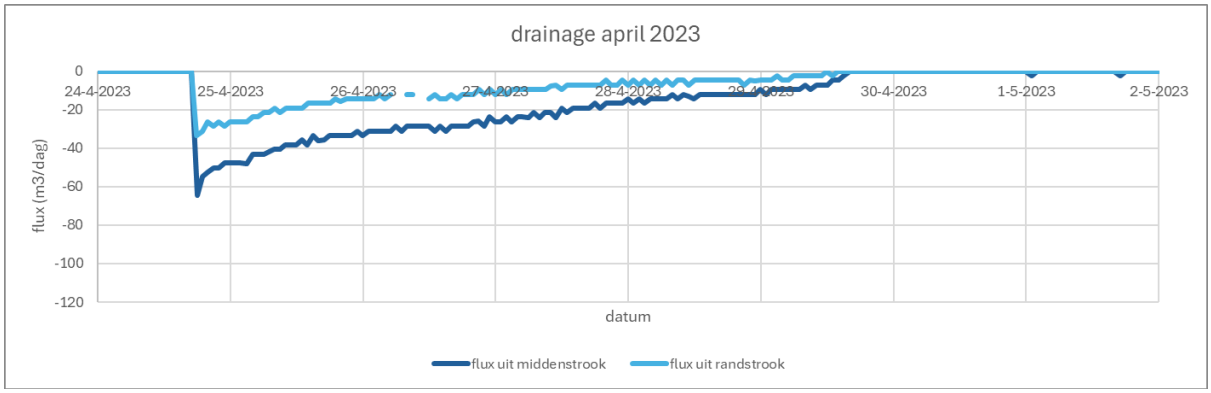
2023

April: buffering van neerslag

In het voorjaar van 2023 zijn de schuiven periodes dichtgezet om regenwater in het perceel vast te houden (zie onderstaande figuur A7). Tussen 24 en 28 april zijn ze even opengezet ten behoeve van drainage. Dit is terug te zien in de grondwaterstanden en de fluxen.



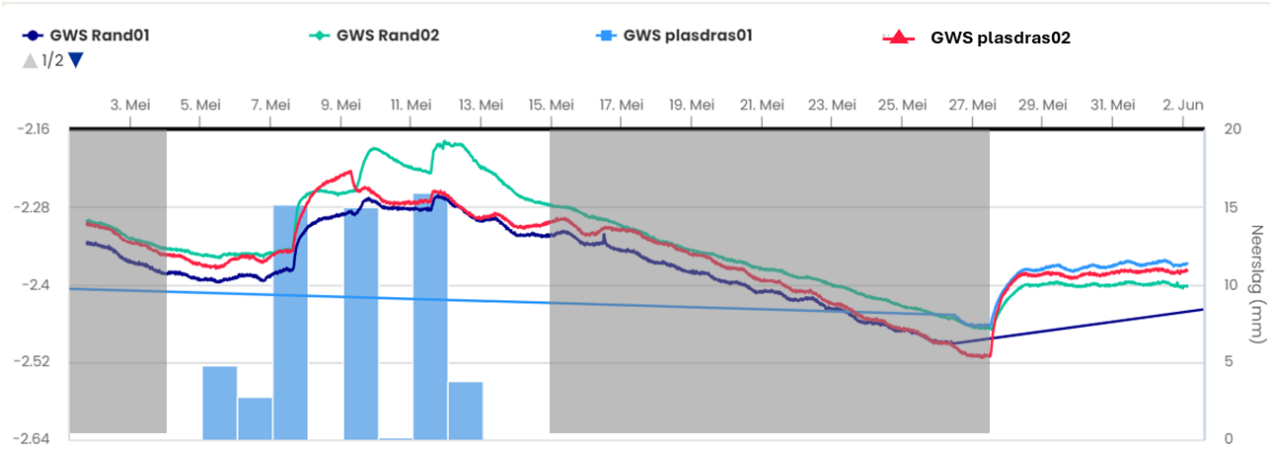
Figuur A7: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in het voorjaar van 2023. In de grijs beschaduwde periodes in de grafiek stonden schuiven gesloten om regenwater vast te houden. In de periode daartussen werden ze even geopend ten behoeve van drainage.



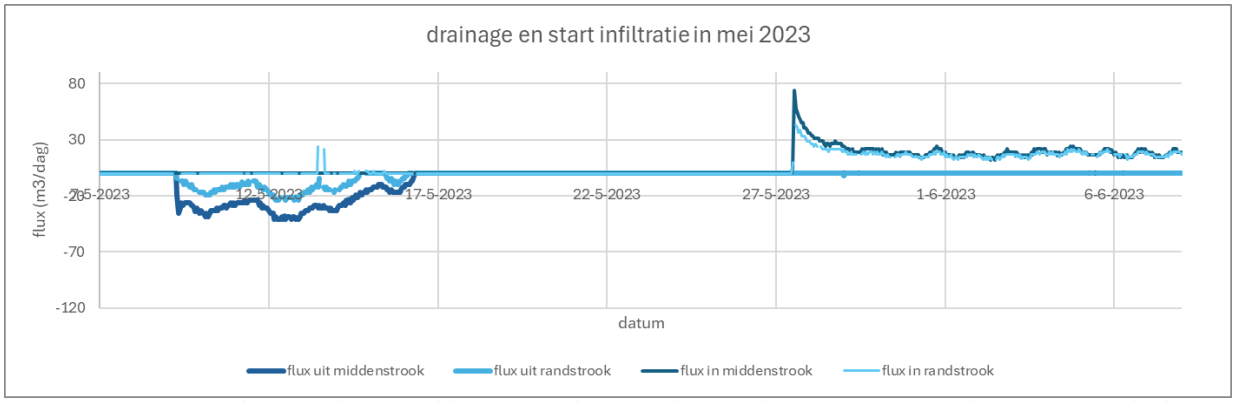
Figuur A8: gemeten drainageflux in midden- en randzone in de periode dat schuiven tijdelijk openstonden, voorjaar 2023 (let op, tijdschaal is anders dan in figuur A7).

Mei: drainage en infiltratie

In mei gingen de schuiven open tussen 4 en 15 mei. Doordat de grondwaterstanden nog hoog waren leidde dit niet tot infiltratie (figuur A9 en A10). In plaats daarvan trad drainage op door de neerslag in deze periode. Tussen 15 en 27 mei stonden de schuiven dicht en zakte de grondwaterstand in deze droge periode. Het openen van de schuiven op 27 mei leidde dan ook direct tot infiltratie. Doordat de grondwaterstand iets minder ver was uitgezakt ten tijde van de infiltratie dan in 2022 is de initiële infiltratieflux iets lager. Na een eerste piek in de infiltratieflux gaat deze naar een fluctuatie rondom een redelijk constante waarde, waarbij de fluctuatie een dag/nachtritme volgt. De gemiddelde infiltratieflux is hier lager dan ten tijde van de infiltratie in 2022, omdat de gewasverdamping in mei (2023) lager is dan in augustus (2022).



Figuur A9: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in mei 2023. In de grijs beschaduwde periodes in de grafiek stonden schuiven gesloten om regenwater vast te houden of infiltratie uit te stellen. In de periode daartussen stonden ze even open.



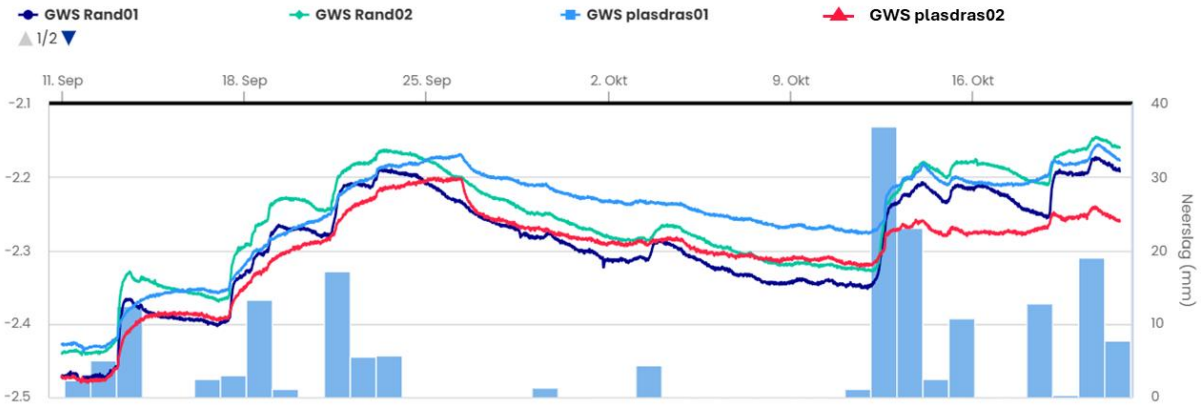
Figuur A10: gemeten drainageflux in midden- en randzone in de periode van mei 2023. In de eerste periode dat de schuiven openstonden trad drainage op door de hoge grondwaterstanden. In de tweede periode trad infiltratie op doordat de grondwaterstanden al verder waren uitgezakt.

September en oktober: drainage

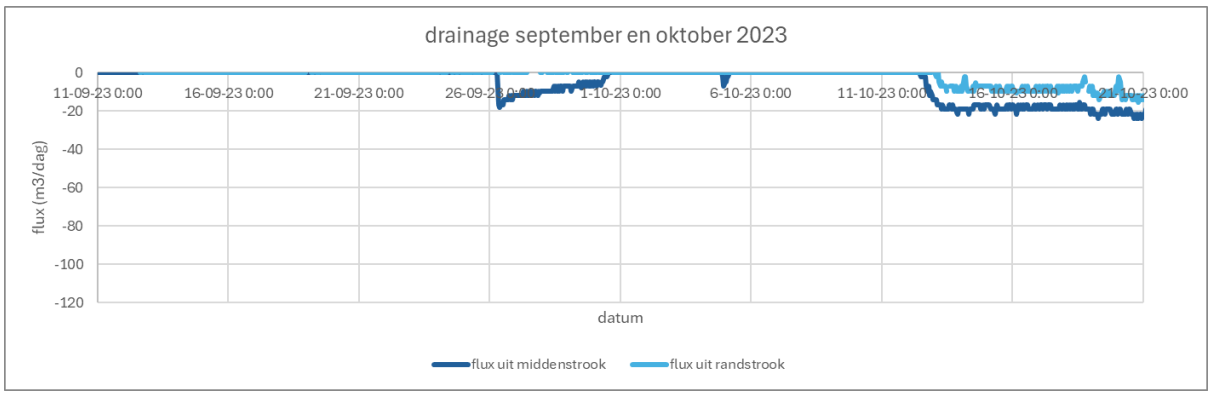
Vanwege voldoende neerslag in de tweede helft van de zomer hebben de schuiven voornamelijk dicht gestaan om water te bufferen in het perceel. Op 26 september zijn ze opengezet op de middenstrook ten behoeve van drainage. Dit is duidelijk terug te zien in de grondwaterstanden, die op dat moment sneller dalen dan in de randstrook (figuur A11). Het verschil tussen gesloten schuiven op de randstrook en open schuiven in de middenstrook is ook te zien bij de afvoer van neerslag op 3 oktober, waarbij de grondwaterstand in de randstrook sterker reageert op de neerslag dan in de middenstrook.

Ook al stonden de schuiven open in de middenstrook, toch heeft er geen infiltratie plaatsgevonden in deze periode (figuur A12). Dit komt doordat de laagste grondwaterniveaus rond deze tijd ongeveer gelijk zijn aan het slootwaterniveau (op 9 oktober op -232 cm-NAP).

Op 13 oktober begint ook de drainage op de randstrook. Tegen die tijd waren dus ook hier de schuiven opengezet.



Figuur A11: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in najaar 2023. Op de middenstrook zijn de schuiven opengezet op 26 september ten behoeve van drainage. Op de randstrook gebeurde dit pas 13 oktober.



Figuur A12: gemeten drainageflux in midden- en randzone in de periode najaar 2023.

Hoofdkantoor

Van Hogendorpplein 4
2805 BM Gouda

Regiokantoor
Noord-Nederland

Watercampus
Agora 4
8934 CJ Leeuwarden

Regiokantoor
Oost-Afrika

Woreda 03, Bole Sub city
House No. 4/020
Addis Abeba

www.acaciawater.com