

Integrale eindrapportage

Pilotproject bodemdaling Polder Bloemendaal

Regiodeal Bodemdaling Groene Hart



Auteurs:

Dirk van der Eijk

Ko van Huissteden:

Frouke Hoogland:

Tessa van Hateren:

Arie-Jan Broere:

V.O.F. Kytalyk Carbon Cycle Research

Acaciawater

Acaciawater

Broere Irrigatie B.V.

Februari 2025

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	3
2	Publiekssamenvatting	5
3	Polder Bloemendaal	9
	3.1 Ontstaan	9
	3.2 Bodemopbouw en Geohydrologie	9
	3.3 Bodemgebruik	10
4	Selectie proefperceel	12
5	Grondwaterbeheer veenweidegebied	14
6	Onderwaterdrainage proefveld	15
	6.1 Ontwerp	15
	6.2 Aanleg	16
7	Infiltratie en energiesysteem proefveld	18
8	Bodemprofiel proefperceel	19
	8.1 Methoden	19
	8.2 Resultaten	20
9	Hydrologische analyse	23
10	Broeikasgas-fluxen	77
11	Bodemdaling	150
	11.1 Maaiveldhoogtemeting klassieke methode	150
	11.2 Maaiveldhoogtemeting Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)	155
11.3	Maaiveldhoogtemeting InSAR-satellietmetingen	155
	11.4 Discussie	157
	11.4.1 Nauwkeurigheid metingen	157
	11.4.2 Veldomstandigheden metingen	159
12	Onderhoud en beheer	161
	12.1 Monitoringssysteem en meetplekken	161
	12.2 Infiltratie- en drainagesysteem	161
	12.3 Energiesysteem	161
	12.4 Weilandbeheer	162
	12.5 Schuifbeheer	164
	12.5.1 Indicatoren en grenswaarden	164
	12.5.2 Ervaringen	168
	12.5.3 Evaluatie	172
	12.5.4 Handelingsperspectief proefperceel	174
13	Algemene Discussie	177
14	Conclusies en aanbevelingen	181
	Literatuur	183
	Begrippen	184
	Bijlage Handelingsperspectief eigenaren/gebruikers veenweidepercelen	185

1. Inleiding

Het project Bodemdaling Polder Bloemendaal is één van de projecten van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart. Het is een initiatief van de Stichting Weids Bloemendaal en vloeit voort uit de ambitie in het Manifest Duurzame Ontwikkeling Polder Bloemendaal (Lit.1.) om het veenweidelandschap te behouden en de bodemdaling door veenafbraak te beperken.

Het project is opgenomen in de 2^{de} tranche van het programma voor de Regio Deal op basis van het projectvoorstel van 30 december 2020 (Lit.2.).

Het project is mogelijk gemaakt door een Rijksbijdrage en door medefinanciering van het platform Groene Hart Werkt, Provincie Zuid-Holland, gemeente Waddinxveen, Hoogheemraadschap Rijnland, Broere-Irrigatie en het Ondernemersfonds Waddinxveen. Het is mede mogelijk gemaakt door Dirk van der Eijk door het beschikbaar stellen van zijn tijd. Het kon worden gerealiseerd door de bereidheid van Niels de Jong, eigenaar en melkveehouder uit ter Aar, om zijn weiland in Polder Bloemendaal voor de duur van het project beschikbaar te stellen van de veldproeven.

Het project is in 2021 gestart. Het zou aanvankelijk lopen tot eind 2025, maar is in verband met het aflopen van de Regio Deal bodemdaling Groene Hart beperkt tot eind 2024.

In 2021 is het drainagesysteem ontworpen en aangelegd, het monitoringsprogramma samengesteld en is de 'projecten-factsheet' (Lit. 3.) voor het Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling opgesteld. In 2022 zijn de systemen geïnstalleerd. Het betreft het infiltratiesysteem, de energiesystemen en de monitoringsystemen voor de hydrologie, de broeikasgasemissie en de bodemdaling. Het broeikasgasemissie onderzoek is in 2022 en 2023 uitgevoerd. Het hydrologische onderzoek is uitgevoerd in 2022, 2023 en 2024.

De voortgang van het project is beschreven in de voortgangsrapportages voor de Regio Deal van 2021 (Lit. 4.) en 2022 (Lit.5.).

Van het project is op 15 september 2022 een film gemaakt door Martine van Dijk, communicatieadviseur van de Regio Deal bodemdaling Groene Hart. In deze film is de aanleg van de drainage- en het infiltratiesysteem en de werking van de monitoringsystemen en energiesystemen door de betrokkenen in het veld toegelicht (Lit.6.).

Informatie over het project en eerste resultaten van 2022 en 2023 zijn gepresenteerd in het Magazine van de Regio Deal bodemdaling Groene Hart: 'Duurzaam beheer veenweidegebied' (Lit.7.). Dit magazine is op het slotevenement van de Regio Deal op 5 februari 2024 aangeboden aan demissionair Minister van Landbouw Adema.

Leeswijzer

In de integrale eindrapportage wordt verslag gedaan van de activiteiten en onderzoeken die in kader het pilotproject Bodemdaling Polder Bloemendaal zijn uitgevoerd. Bijdragen van de auteurs zijn in deze eindrapportage samengebracht.

Om snel inzicht te geven aan een brede en diverse doelgroep van betrokkenen is een publiekssamenvatting gemaakt. Deze is door Tessa van Hateren geschreven en opgenomen als hoofdstuk 2. Deze komt ook apart beschikbaar (Lit.8.).

Hoofdstukken 3, 4 en 5 geven inzicht in de kenmerken van het westelijk veenweidegebied en specifiek Polder Bloemendaal, in het selectieproces voor het vinden van een representatief proefperceel, en in de ontwikkelingen van het grondwaterbeheer in het veenweidegebied. Deze hoofdstukken zijn geschreven door Dirk van der Eijk.

Hoofdstuk 6 geeft inzicht in het ontwerp van de drainage en de uitvoering ervan. Dit hoofdstuk is door Dirk van der Eijk met medewerking van Arjan van Drunen en Janus Verkerk van Barth Drainage B.V. geschreven.

Hoofdstuk 7 geeft een beschrijving van het infiltratiesysteem voor het grondwaterbeheer en van de energiesystemen die zijn toegepast voor de energievoorziening voor schuifbeheer en voor het uitvoeren van de broeikasgasemissie-metingen. Dit is geschreven door Arie-Jan Broere.

Hoofdstuk 8 beschrijft de bodemopbouw van het proefveld en de bemonstering van het bodemprofiel. Dit hoofdstuk is geschreven door Ko van Huissteden in samenwerking met Dirk van der Eijk.

Hoofdstuk 9 betreft het hydrologisch onderzoek. Het rapport van dit onderzoek 'Hydrologische analyse Bloemendaal' is geschreven door Frouke Hoogland en Tessa van Hateren in samenwerking met Arie-Jan Broere. Het is apart gepubliceerd (Lit.9.) en is in zijn geheel opgenomen als hoofdstuk 9.

Hoofdstuk 10 betreft het broeikasgasemissie onderzoek. Het rapport van dit onderzoek 'Broeikasgas-fluxen uit een koopveenbodem in Polder Bloemendaal (Waddinxveen, Zuid-Holland)' (Lit.10.) is geschreven door Ko van Huissteden. Het is in zijn geheel opgenomen als hoofdstuk 10.

Hoofdstuk 11 geeft inzicht in de maaiveldhoogtemetingen om de bodemdaling te kunnen volgen. Dit hoofdstuk is geschreven door Dirk van der Eijk met medewerking van Arie-Jan Broere en Mark Kramer van het Hoogheemraadschap Rijnland.

Hoofdstuk 12 beschrijft de ervaringen met het onderhoud van de systemen en het beheer van het weiland. De ervaringen zijn gebruikt om passende grenswaarden te vinden voor de indicatoren waarmee met het schuifstelsel het grondwater kan worden beheerd (12.5). Deze zijn bedoeld om het grondwaterbeheer op het proefperceel voort te zetten na beëindiging van de pilot (12.5.4). Ze zijn ook gebruikt om een handelingsperspectief op te stellen voor het opschalen van het grondwaterbeheer met het schuifstelsel dat in de pilot is beproefd. Dit handelingsperspectief is als bijlage bijgevoegd en komt ook apart beschikbaar. Hoofdstuk 12 is geschreven door Dirk van der Eijk behoudens 12.2 en 12.3. Deze zijn geschreven door Arie-Jan Broere.

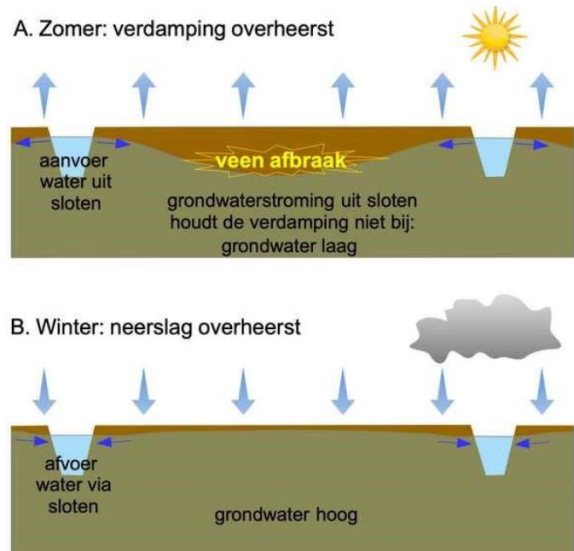
Hoofdstuk 13 en 14 bouwen voort op de discussies, conclusies en aanbevelingen van de hoofdstukken 9, 10 en 11. Hoofdstukken 13 en 14 gaan verder in op de toepassingsmogelijkheden van het schuif- en infiltratiesysteem zoals dat in deze pilot voor het grondwaterbeheer is beproefd. Deze hoofdstukken en het handelingsperspectief in de bijlage zijn geschreven door Dirk van der Eijk.

2. Publiekssamenvatting

Proef tegen bodemdaling polder Bloemendaal veelbelovend

In het kort

De veenbodem in Polder Bloemendaal bij Gouda is een typisch voorbeeld van de veenweidebodems die je vaak in het westen van Nederland vindt. De bovenste laag van de bodem, het toemaakdek, is ongeveer 45 cm dik. Deze laag is vanaf de Middeleeuwen op het land gestrooid en bestaat uit een mengsel van klei, bagger, zand en stadsafval. Hieronder ligt de veenbodem. Als het grondwaterpeil zakt tot in het veen, komt er mogelijk zuurstof bij het veen, wat leidt tot een snellere afbraak. Bij de afbraak van veen komt CO_2 vrij en daalt de bodem. Zonder zuurstof in de bodem breekt het veen ook wel af, maar dit gebeurt veel langzamer.



In de zomer zakt het grondwater van een veenperceel tot onder het niveau van de sloot.

Meestal staan de grondwaterstanden in dit gebied hoog, maar in droge periodes kan het grondwater zakken tot wel een meter diep. Door maatregelen kan het grondwater op een hoger niveau worden gehouden. Dat helpt veenafbraak te verminderen. Vanuit de ambitie om veenweidelandschap te behouden en bodemdaling te verminderen heeft Stichting Weids Bloemendaal een proef opgezet om een van deze maatregelen te testen.

Tijdens de proef is er water via ondergrondse buizen (drainagebuizen) in en uit het perceel geleid. Dit systeem werkt met een put en schuiven die op afstand worden bediend. Als de schuiven openstaan, stroomt water uit de sloot naar de drainagebuizen. Zo kan je in droge periodes extra water in de bodem brengen (infiltratie), en in natte periodes overtollig water afvoeren (drainage). Door dit systeem bleef het grondwaterpeil in droge periodes bijna gelijk aan het slootwaterpeil, waardoor de afbraak van het veen werd beperkt.



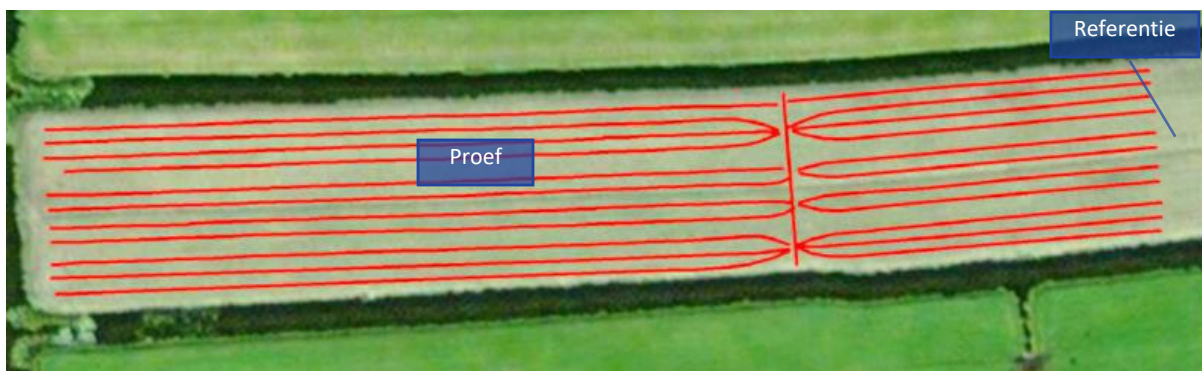
De drains werden sleufloos in de bodem aangelegd door Barth drainage.

De proef heeft laten zien dat het zelfs tijdens de extreem droge zomer van 2022 mogelijk was om het veen vochtig te houden. De veenafbraak vertraagde en broeikasgasuitstoot verminderde. Het is waarschijnlijk dat dit systeem ook heeft geholpen om de bodemdaling te verminderen.

Proefopzet

Hoe kan actief grondwaterbeheer helpen om veenafbraak te vertragen en broeikasuitstoot te verminderen? En is de maatregel ook toe te passen op andere percelen in Polder Bloemendaal? Dit hebben we in de proef onderzocht.

De proef is gedaan op een veenperceel met toemaakdek in de polder Bloemendaal. Aan de westkant van het perceel is in de tweede helft van 2021 drainage aangelegd. Dit ondergrondse buizensysteem is te zien op de onderstaande luchtfoto (rode lijnen). Aan de oostkant van het proefveld is geen drainage aangelegd, maar hier zijn wel metingen verricht om de effecten van de maatregel op het proefveld te kunnen vergelijken met de 'gewone situatie' op het referentieveld. Het drainagesysteem is een bijzondere vorm van een passief waterinfiltratiesysteem (PWIS), waarbij de drains direct met de sloot in verbinding staan. Het systeem in deze proef heeft op afstand bedienbare schuiven die de verbinding tussen sloot en perceel 'open' of 'dicht' zetten. Hiermee kan de grondwaterstand actief worden beheerd.



Ligging van de drainage (het buizensysteem) op het perceel. Het referentieperceel bevindt zich aan de rechterzijde van de foto en loopt verder buiten beeld.

Meetopstelling

Het onderzoek begon in 2022 en liep tot 2024. Acacia Water heeft metingen uitgevoerd van de grondwaterstanden en de samenstelling van het water in de bodem. Hoeveel water in en uit de buizen stroomde is gemeten door Broere Irrigatie. De broeikasgasuitstoot (CO_2 en methaan) is meerdere keren gemeten door V.O.F. Kytalyk Carbon Cycle Research. Ook is een model van de Vrije Universiteit (Peatland-VU) gebruikt om de uitstoot van CO_2 en methaan te berekenen. Het methaangehalte is relevant, omdat dit bij hoge grondwaterstanden in veen kan ontstaan en sterker bijdraagt aan opwarming van de aarde dan CO_2 .



Metingen aan het water in het perceel (links) en aan de broeikasgassen (rechts).

Resultaten: Water

Het aangelegde drainagesysteem werkt goed om in droge periodes te voorkomen dat de grondwaterstand te veel daalt. Het grootste effect van het systeem was te zien tijdens het droogste meetjaar (2022): de grondwaterstanden op het proefveld waren toen tot 70 cm hoger dan op het referentieveld.

Op het proefveld hield het systeem de bovenkant van het veen goed vochtig. Er kwam geen zuurstof bij en de veenafbraak bleef minimaal. Ook op het referentieveld, waar geen water werd ingelaten, bleef het veen nog redelijk vochtig, maar hier ontstonden later in de zomer brede en diepe scheuren. Ter plaatse van de scheuren ontstond daardoor zeer waarschijnlijk meer veenafbraak. De scheuren ontstonden niet op het proefveld. Wel vormde zich daar door de droogte in het voorjaar op plekken met weinig grasbedekking krimpscheuren aan het bodemoppervlak. Dankzij de infiltratie werd verdere scheurvorming voorkomen.



Krimpscheuren aan het oppervlak in het proefveld (links, mei 2022). Brede en diepe scheuren in het referentieveld (rechts, zomer 2022).

Resultaten: Broeikasgasuitstoot

De modelstudie en metingen laten zien dat het verschil in grondwaterstand in 2022 (70 cm) invloed heeft gehad op de broeikasgasuitstoot. De CO₂-uitstoot was lager op het proefveld dan op het referentieveld. Wel was er iets meer methaanuitstoot op het proefveld. Dit was vooral zo bij een greppel in het midden van het perceel, waar het erg nat bleef. Het verschil tussen referentieveld en proefveld bedroeg ongeveer 3,8 ton CO₂-equivalent (combinatie van CO₂ en methaan)¹ per hectare (meer uitstoot op referentieveld). In de nattere jaren 2023 en 2024 waren de verschillen in grondwaterstand tussen het proefveld en het referentieveld veel kleiner. Hierdoor was er in die jaren bijna geen verschil in de gemodelleerde uitstoot tussen beide velden. De vermindering van broeikasgasuitstoot was dus sterk afhankelijk van het weer, en het grootste effect trad op in het droogste meetjaar.

¹ De broeikasgassen CO₂ en methaan (CH₄) verschillen sterk in hun effect op het klimaat. CH₄ is een veel sterker broeikasgas dan CO₂ maar wordt snel afgebroken tot CO₂. Het effect van CH₄ wordt met een omrekeningsfactor (Global Warming Potential) omgezet in CO₂-equivalent, zodat het bij de CO₂ uitstoot opgeteld kan worden.

Opschaling

Het waterbeheer op het proefveld heeft het gewenste resultaat behaald: het heeft de veenafbraak verminderd. Het is daarom aannemelijk dat vergelijkbare percelen in het westelijk veenweidegebied over het algemeen geschikt zijn voor infiltratie met een drainagesysteem. Het is echter belangrijk om rekening te houden met de lokale situatie. Iedere unieke bodemopbouw kan de werking van het systeem sterk beïnvloeden. Ook het weer speelt een rol, zowel bij de aanleg van het systeem als bij het beheer ervan. Goede monitoring en inzicht in de huidige situatie zijn daarom essentieel. Afhankelijk van lokale condities kan het daarnaast een mogelijkheid zijn ook bestaande waterinfiltratiesystemen uit te breiden met op afstand bedienbare schuiven.

Een hoog grondwaterpeil brengt, naast voordelen, ook risico's met zich mee. Deze risico's kunnen een obstakel vormen voor de opschaling. Het is dan ook noodzakelijk om hier rekening mee te houden en eventueel aanvullend onderzoek uit te voeren op de beoogde locatie.

Een belangrijk risico is dat kleiige bodemlagen verdicht kunnen worden als het land onder natte omstandigheden wordt bewerkt of beweid. Omdat er daarnaast ook op het referentieveld maar weinig zuurstof in de bodem kwam, rijst de vraag of het nodig is om de grondwaterstand zo hoog te houden als in deze proef, vooral in gebieden met een kleilaag boven het veen. De kleilaag lijkt het veen bij korte droogtes te beschermen tegen uitdroging en zuurstofindringing. Bij langere droogtes heeft het schuifstelsel echter wel een duidelijk effect. Ook kan met het systeem de infiltratie tijdelijk stopgezet worden rond maaimomenten, zodat het grondwater kan zakken en verdichting van de kleilaag kan worden voorkomen.

Een uitgebreide beschrijving van deze en andere aandachtspunten, evenals het optimale schuifbeheer, is te vinden in de rapportages en het handelingsperspectief (te downloaden via de QR-code onderaan deze pagina).

Met dank aan

Dank aan de inzet van donateurs, bedrijven en mensen die het project hebben uitgevoerd en de rapportages hebben opgesteld.



Weids Bloemendaal



3. POLDER BLOEMENDAAL

3.1. Ontstaan

Polder Bloemendaal is één van de vele veenpolders van het grote westelijk veenweidegebied in de provincies Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland.

Het veenweidegebied in Polder Bloemendaal is ontstaan door ontginning van het veenmoeras ten oosten van de Gouwe. Het brongebied van deze veenrivier was het uitgebreide hoge veenkussen ten westen van Boskoop. Vandaar stroomde het veenwater via de Gouwe en Hollandse IJssel naar zee. Ten tijde van de ontginning lag het gebied waar nu polder Bloemendaal is waarschijnlijk op ca +2 m NAP.

Vanaf ca 1100 werd vanuit Gouda ten oosten van de Gouwe een ontginningsas aangelegd, die nu bekend staat als de Bloemendaalseweg. Haaks hierop werden afwateringssloten gegraven tot aan de kade (Winterdijk) en de Gouwe. Zo ontstond het kenmerkende slagenlandschap met smalle lange kavels van Polder Bloemendaal. Door de ontwatering en oxidatie van het veen is de bodem in de loop der eeuwen gedaald. Nadat afvoer onder vrij verval naar Gouwe en Hollandse IJssel niet meer goed mogelijk was, is in 1484 gestart met bemaling van de polder, aanvankelijk met windmolens en vanaf 1879 met een gemaal.

Om de voortschrijdende bodemdaling het hoofd te bieden is het polderpeil regelmatig verlaagd. Het polderpeil staat nu op - 2,32 m NAP en de gemiddelde drooglegging is ca 35 cm. Sinds de ontginning is de bodem dus met ca 4 m gedaald. Peilverlaging zet aan tot verdere bodemdaling. Dit is zichtbaar aan de onderbemalingen in Polder Bloemendaal, Polder Reeuwijk-West en de Verenigde Gouwepolder. Vanaf de 19^{de} eeuw zijn meerdere grondeigenaren gestart met onderbemaling van hun sloten met behulp van kleine windmolentjes. Deze percelen liggen nu aanmerkelijk lager dan de overige percelen. De laagste weilanden in Polder Bloemendaal liggen op ca - 2,60 m NAP en komen voor in de hoek Baarsjeskade - Bloemendaalseweg. Eenmaal gestart met onderbemaling, dan blijft dit nodig om het weilandgebruik te kunnen behouden. De meeste windmolentjes zijn vervangen door elektrische pompen en worden tegenwoordig ook wel ondersteund door op zonne-energie aangedreven pompen.

3.2. Bodemopbouw en geohydrologie

De bodem in de polder Bloemendaal bestaat uit bosveen, waarvan de bovengrond veraard is. Volgens het Nederlands bodemclassificatiesysteem betreft het hier koopveengronden (Lit. 11.). Koopveengronden hebben een veraarde bovengrond tot ca 50 cm. Ze zijn kleihoudend en kunnen wat zand bevatten. Op de bodemkaart van Nederland (Lit. 12.) is voor Polder Bloemendaal aangegeven dat de veraarde bovengrond nabij de Gouwe en IJssel kleirijk is en verder af van deze rivieren kleiarm is. Dit verschil is ontstaan door afzettingen van kleirijk rivierslib langs de benedenloop van Gouwe uit de tijd dat de Hollandsche IJssel nog niet was afgedamd bij IJsselstein en de Gouwe nog niet was voorzien van een sluis in Gouda. Tot die tijd werd bij hoge rivierstanden in de Rijn slibhoudend rivierwater via de Hollandse IJssel afgevoerd. In combinatie met de getijdenwerking in de benedenloop van de Hollandse IJssel en Gouwe leidde dit regelmatig tot overstromingen, waarbij kleirijk rivierslib op het veen langs de benedenloop van de Gouwe werd afgezet.

Het veen reikt in het Waddinxveense deel van de polder Bloemendaal tot een diepte van ca -5,5 m NAP. Volgens de Geologische Kaart behoort het veen tot de Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen laagpakket en is 3.6 ± 0.2 m dik. De dikte varieert over het gebied enigszins door de aanwezigheid van geulafzettingen in het onderliggende Laagpakket van Wormer (getijde-afzettingen) van de

Formatie van Naaldwijk. Het betreft oude zeelei voorheen ook wel genoemd afzettingen van Calais (Lit. 13.). Onder deze getijden-afzettingen bevinden zich plaatselijk riviergeul afzettingen van de formatie van Echteld. Het betreft kleiige stroomruggronden met zandige rivierbeddingen van vroegere rijnclopen (Lit. 14.). Deze zandige rivierbeddingen worden ook wel zandbanen genoemd. Vanaf een diepte van ca - 10 à - 12 m NAP begint het pleistocene zand van het eerste watervoerende pakket (Lit. 15.).

De zandbanen lopen ondergronds door naar het westen tot ver in de nabijgelegen droogmakerijen van de Zuidplaspolder en de Noordplaspolder. De zones boven de zandbanen zijn gevoelig voor het ontstaan van wellen. Zones met veel wellen komen daardoor voor op het ICT- en PCT-terrein in de Noordplaspolder en in de woonwijken Westergouwe en Triangel in de Zuidplaspolder. Wellen zijn bronnen van methaan-emissie. Welwater wordt gekenmerkt door een hoog chloride en ijzergehalte. Het ijzer zorgt voor permanent roestbruin troebel water in sloten en poldertochten en in water dat gegraven is om aan de regelgeving van de waterschappen te voldoen bij de inrichting van deze bedrijventerreinen en woonwijken.

Wat betreft de geohydrologie In Polder Bloemendaal is sprake van infiltratie. De stijghoogte in het watervoerende pakket is - 4 tot - 5 m NAP. Bij een polderpeil van -2,32 m NAP is dit een infiltratiepotentiaal van ca 2,5 m. De ongerijpte zware zeelei in de ondergrond zorgt ervoor dat mag worden verwacht dat slechts een zeer beperkt deel van het neerslagoverschot door de zeelei zal wegzijgen naar de zandbanen en het watervoerende pakket in de ondergrond.

Door de slecht doorlatende klei in de ondergrond van Polder Bloemendaal zal vrijwel het volledige neerslagoverschot daardoor via de veenbodem afstromen naar de aangrenzende sloten in de polder. Een perceel in Polder Bloemendaal kan daardoor worden beschouwd als een afzonderlijke geohydrologische eenheid.

3.3. Bodemgebruik

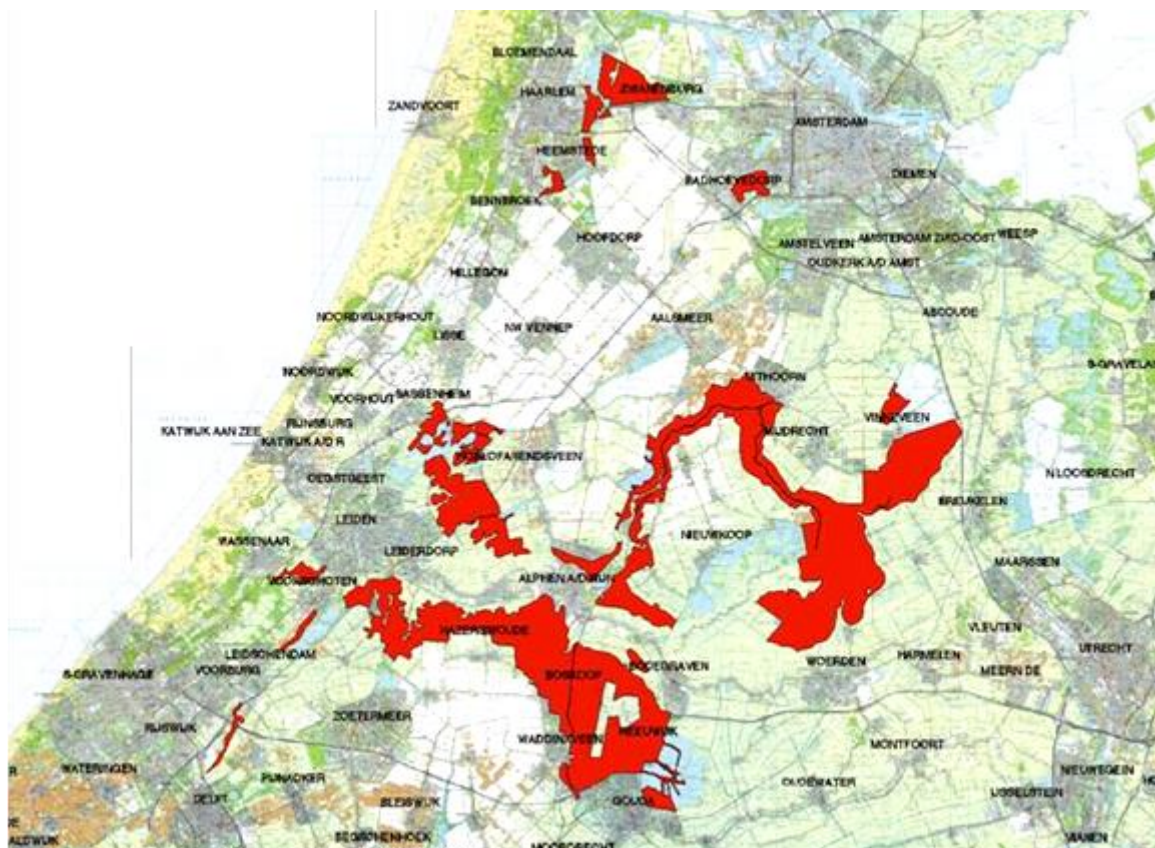
Na de ontginning werd het veengebied gebruikt voor landbouw. Aanvankelijk onder andere voor akkerbouw (o.a. graanteelt), later overwegend voor veeteelt. Ontwaterd veen bleek ook geschikt als brandstof. Vooral veenmosveen kon goed worden verveend en verturfd. Om in de behoefte aan turf in de groeiende steden te voorzien, ontstonden zo de vele veenplassen in Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland. Velen hiervan zijn later drooggemaakt, bijvoorbeeld de Zuidplaspolder ten westen van de Gouwe en de Middelburg-Tempelpolder ten oosten van Gouwe aangrenzend aan Polder Bloemendaal. In Polder Bloemendaal is de vervening beperkt gebleven tot het noordoostelijk deel van de polder, waardoor hier 4 veenputten zijn ontstaan. Het restende veengebied in Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland bestaat grotendeels uit bosveen. Dit is minder geschikt om te verturven, omdat het houtresten bevat en bovendien veelal kleihoudend is. Hierdoor blijft na verbranding veel as achter. Het resterende veengebied is daardoor niet verveend en dit vormt nu de basis voor het westelijk veenweidegebied. Polder Bloemendaal maakt deel uit van het westelijk veenweidegebied. De percelen worden gebruikt voor beweiding en het oogsten van gras.

Toemaakgronden

De vervening en de daarmee gepaard gaande turfhandel heeft geleid tot het ontstaan van zogenaamde toemaakgronden. Vanaf de middeleeuwen tot medio vorige eeuw brachten turfschippers als retourvracht organische mest, stadsafval en zand mee. De boeren verspreidden deze toemaakmaterialen samen met slootbagger en dierlijke mest over het drassige veenland, teneinde de structuur en vruchtbaarheid van de bodem te verbeteren. Het stadsafval dat herkenbaar is aan artefacten (zoals pijpenkopjes), potscherfjes, sintels en verbrandingslakken vormden voor de

bodemkarteerders aanleiding om op percelen waar veel toemaakmaterialen in de bovengrond voorkomen, deze als een aparte eenheid binnen de veengronden te onderscheiden. Daarbij is als criterium aangehouden dat het zogenaamde toemaakdek in een dikte van minstens 10 cm aanwezig moet zijn, waarbij de dikte kan reiken tot ca 50cm. De toemaakgronden komen voor in Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland. Het voorkomen van de toemaakgronden is op de kaart weergegeven. Ze beslaan een oppervlakte van ca 6000 ha. Volgens het Nederlandse bodemclassificatiesysteem betreft het koopveengronden op bosveen of eutroof broekveen (code hVb) met een zandig-moerig toemaakdek. Het veenweidegebied van de Polder Bloemendaal voldoet aan het criterium. Vandaar dat de veengronden in deze polder ook tot de toemaakgronden worden gerekend. De aard van de toemaakmaterialen en de mate waarin deze zijn aangebracht varieert tussen de percelen en uit zich in variaties in de diepte tot waar toemaakmaterialen in de bovengrond voorkomen en de hoeveelheid en samenstelling van de toemaakmaterialen (Lit. 16.). Ook in Polder Bloemendaal zijn deze verschillen tussen percelen aanwezig (Lit.17.).

In het veld zijn toemaakgronden makkelijk te herkennen aan de aanwezigheid van Goudse pijpenkopjes en potscherfjes in molshopen, vooral als deze na een regenbui schoongespoeld zijn. Ook buiten het toemaakdek komen in veel veenweidegebieden toemaakmaterialen in de bovengrond van de bodem voor, maar in onvoldoende mate om aan het criterium voor het toemaakdek te voldoen. Bijvoorbeeld ook in de Krimpenerwaard worden pijpenkopjes in molshopen aangetroffen.



Voorkomen van veengronden met een toemaakdek op de Nederlandse Bodemkaart.

Slottedempingen

De groei van de economie vanaf ongeveer de jaren 50 van de vorige eeuw ging gepaard met een toename van de hoeveelheid afvalstoffen. Dit bood de mogelijkheid voor onder andere veehouders

in het veenweidegebied om hun lange smalle percelen te verbreden door tussensloten te dempen met afvalstoffen en zo te komen tot een efficiënter weilandbeheer. Sindsdien zijn in het westelijke veenweidegebied vele duizenden sloten gedempt. Met name in de Krimpenerwaard zijn veel sloten gedempt met afvalstoffen. Ook in Polder Bloemendaal zijn meerdere sloten gedempt. Provincie Zuid-Holland heeft de dempingen in kaart gebracht (Lit. 18.).

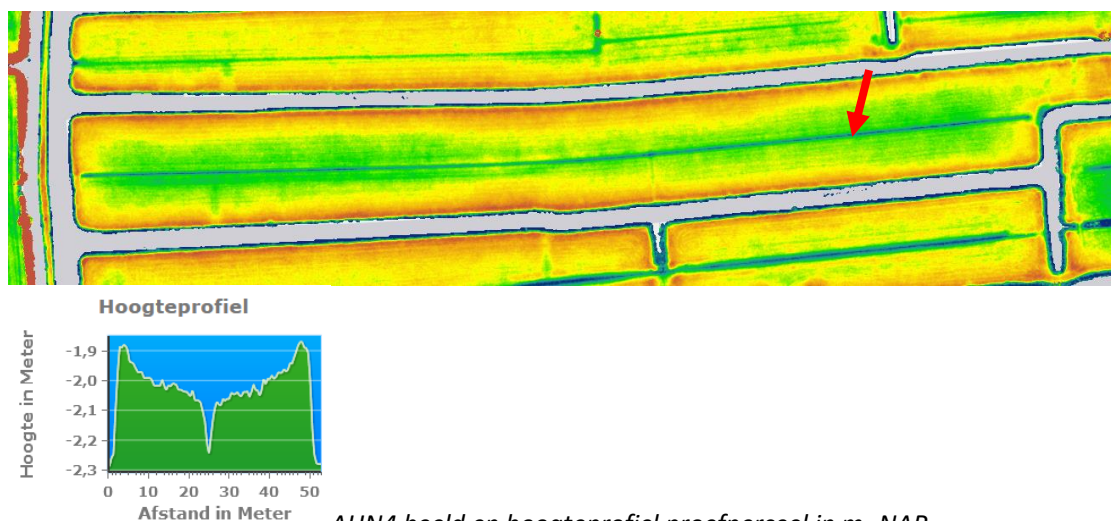
4. Selectie proefperceel

Gezocht is naar een proefperceel dat representatief kan zijn voor Polder Bloemendaal en overige polders in het westelijk veenweidegebied. Daarbij zijn de volgende selectiecriteria gebruikt.

1. Het perceel dient een enigszins holle vorm te hebben met in het midden een greppel. Een karakteristiek kenmerk van een weilandperceel in het westelijk veenweidegebied is de holle ligging en de aanwezigheid van een greppel in het midden, waarmee overtollige regenwater wordt afgevoerd en zo plaspvorming wordt voorkomen;
2. Het perceel dient een vergelijkbare drooglegging te hebben als de overige weilandpercelen in Polder Bloemendaal. De drooglegging varieert tussen de percelen en gemiddeld is deze ca 35 cm;
3. Het perceel dient een bodemopbouw te hebben dat past bij de bodemkaart;
4. Het perceel dient vrij te zijn van slootdempingen;
5. Het perceel dient deel uit te maken van het weidevogelbroedgebied in Polder Bloemendaal;
6. Het perceel dient voldoende breed te zijn voor een veldproef met infiltrerende drainage;
7. Het perceel dient beschikbaar te zijn tot eind 2025;
8. Het perceel dient toegankelijk te zijn vanaf de Bloemendaalseweg.

Kenmerken proefperceel

Criteria 1 en 2. Hieraan wordt voldaan. De hoogteligging en het reliëf worden in het kader van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) met tussenposen van ca 10 jaar gemeten. Onderstaand de resultaten van de 4^{de} meetronde (AHN-4) van 7 april 2020. Het reliëf wordt met de gebruikelijke hoogtekleuren weergegeven en kan in een dwarsprofiel t.o.v. NAP zichtbaar worden gemaakt. Hieruit blijkt de holle ligging van het proefperceel met een lengtegreppel in het midden. Uit de resultaten van maaiveldhoogtemeting van Broere-Irrigatie d.d. 19-04-2022 komt een gemiddelde droogligging van ca 36 cm t.o.v. het polderpeil van -2,32 m NAP. (zie hoofdstuk 11 bodemdaling)



AHN4 beeld en hoogteprofiel proefperceel in m -NAP.

Criterion 3. Representatieve Bodemopbouw. Hieraan wordt voldaan. Bij de verkennende handboringen met een Edelman boor werd het kenmerkende koopveenprofiel met toemaakdek over het gehele perceel aangetroffen, alsmede op de percelen grenzend aan beide zijden van het proefperceel. Na selectie van het perceel werd dit ook waargenomen bij het graven van dwarssleuven voor de verzameldrains. Ook in de kuil die ten behoeve van de beschrijving van het bodemprofiel is gemaakt, werd dit profiel aangetroffen (zie Hoofdstuk 8 bodemprofiel proefperceel).

Criterion 4. Geen Slootdempingen. Hieraan wordt voldaan. Op de kaart van het digitale bodemloket wordt geen demping aangegeven. Ook bij de oriënterende veldkartering is geen demping aangetroffen. Na de selectie van het perceel is ook bij de aanleg van de drainage geen slootdemping aangetroffen.

Criterion 5. Weidevogelbroedgebied. Hieraan wordt voldaan. Niels de Jong (eigenaar en veehouder) heeft een weidevogelbeheerovereenkomst met de Vereniging Agrarisch Natuur- en Landschapsbeheer Rijn & Gouwe Wiericke. Het perceel ligt in het weidevogelbroedgebied van Polder Bloemendaal. Om de weidevogels te beschermen geldt een uitgestelde maaidatum tot 8 juni. Het perceel wordt extensief gebruikt. 2 maal per jaar gemaaid, met nabeweiding door schapen. Het perceel is al enkele jaren niet bemest. De graslandvegetatie is kruidenrijk met bloemrijke oevers. De sloot is vrij van waterplanten. Na de invasie van de Amerikaanse rode rivierkreeft (*Pocambarus clarkii*) rond 2008 zijn de zachte veel voorkomende waterplanten uit de polder verdwenen zoals: hoornblad, waterpest, waterranonkel, kikkerbeet of nagenoeg verdwenen zoals eendenkroos en krabbenscheer. Groeiden voorheen de sloten vol met deze planten, na de komst van de rivierkreeften bleven de sloten open. Dit garandeert een goede toestroom van water naar het infiltratiepunt gedurende de zomers.

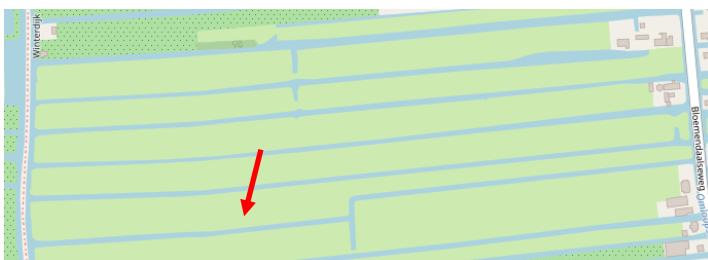


De foto geeft een beeld van de slootkant langs de noordzijde van het perceel. Hij is gemaakt op 18 juli 2023.

Criterion 6. Breedte. Hieraan wordt voldaan. Het perceel is voldoende breed voor een proef met infiltrerende drainage. De ligging van het perceel is weergegeven op onderstaande kaart. Het brede deel van het perceel is gebruikt voor de proef. Dit deel heeft een breedte van ca 55 m en een lengte van ca 450 m.

Criterion 7. Beschikbaarheid. Hieraan wordt voldaan. Met eigenaar/veehouder Niels de Jong is afgesproken dat het perceel gebruikt mag worden tot eind 2025.

Criterion 8. Toegankelijkheid. Hieraan wordt voldaan. Het perceel is vrij toegankelijk vanaf de Bloemendaalseweg. Via het smalle deel van het perceel is het brede proefdeel te bereiken. De kostbare meetapparatuur voor de diverse onderzoeken en energievoorziening komen op voldoende afstand van de Bloemendaalseweg te staan om het risico op vandalisme of diefstal beperkt te houden.



Ligging proefperceel in Polder Bloemendaal. Het brede deel van het perceel is gebruikt voor de proef. De afstand tussen Bloemendaalseweg (rechts) en Winterdijk (links) is ca 1000 m. Het brede deel is ca 450 m bij 55 meter.

5. Grondwaterbeheer veenweidegebied

Retrospectief

In het westelijk veenweidegebied was bij veehouders tot voor kort weinig belangstelling om hun weilandpercelen te draineren, terwijl dit bij boomkwekers in Boskoop op dezelfde koopveengronden al lang gebruikelijk is. Het nut ervan werd lang niet ingezien. In de zomer blijft het gras immers ook bij droogte wel doorgroeien door het grote vocht leverend vermogen van de veenbodem en in de winter kan plasvorming op de veelal hol liggende percelen worden voorkomen door het graven van greppels.

Na de extreme droogte in 1976 begon daar een kentering in te komen. Twee veehouders in de provincie Utrecht zijn toen overgegaan tot aanleg van onderwaterdrainage voor het infiltreren met slootwater. Eén ervan was veehouder Theo Spruit uit Zegveld. In 2003 was er opnieuw een extreme droogte. Pas toen groeide het besef dat onderwaterdrainage kan helpen om veenafbraak en bodemdaling te beperken. Op wat nu het Veenweide Informatie Centrum (VIC) heet is toen op initiatief van de Wageningen Universiteit en Researchcentrum (WUR) onder leiding van Jan van den Akker een meerjarige veldproef gestart met onderwaterdrainage. Er werden veel onderzoeksvragen gesteld. Vanuit wetenschappelijke invalshoek kwam de vraag in hoeverre leidt het infiltreren van zuurstofhoudend slootwater tot oxidatie van het veen rondom de drains? Anders gezegd is het middel niet erger dan de kwaal? Vanuit operationele invalshoek kwam de vraag hoeveel extra water is nodig en kan dit wel worden aangevoerd, wetende dat bij extreme droogte aanvoer van voldoende zoetwater naar het westen problematisch kan zijn.

Maatschappelijk was de vraag of drainage wel nodig was. Kunnen we niet volstaan met het stoppen van de steeds verdergaande polderpeilverlagingen. Als het peil niet wordt verlaagd stopt de bodemdaling toch vanzelf was een idee dat wel geopperd werd. Recent is daaraan toegevoegd dat dit sneller kan worden bereikt door het polderpeil te verhogen. Vervolgens gaat de discussie over of het peil moet worden verhoogd naar 20 cm- maaiveld of dat met 40 cm- maaiveld mag worden volstaan. Naar verwachting zal het leiden tot een compromis dat ergens daartussen uitkomt.

De gedachte dat hiermee de bodemdaling kan worden gestopt is echter een misvatting. In Polder Bloemendaal is dit hoge polderpeil (geringe droogligging) al lang praktijk en gaat de bodemdaling toch door. Droogligging/drooglegging is het hoogteverschil tussen maaiveld en slootpeil. De bodemdaling gaat door omdat bij een geringe droogligging voor het gras minder bodemvocht beschikbaar dan bij een grote droogligging. Bodemvocht is hier gedefinieerd als het water in de bodem tussen maaiveld en slootpeil. Bij een geringe droogligging zal het gras bij droogte eerder het bodemvocht verbruiken en overgaan op het gebruik van grondwater dan bij een grote droogligging. Hierdoor zal op een perceel met geringe droogligging bij aanhoudende droogte het grondwater eerder en verder onder het polderpeil dalen en daardoor ook eerder en verder dalen tot in het nog onveraaide veen, dan op een perceel met een grote droogligging. Hierdoor gaat ook in veenweidegebieden met een hoog polderpeil (geringe droogligging) de bodemdaling door. Het actief beheren van het grondwater om te voorkomen dat het daalt tot onder het slootpeil (polderpeil) is daarom noodzakelijk om verdere bodemdaling door veenafbraak zoveel als mogelijk is te voorkomen. Het infiltreren met onderwaterdrainage biedt hiervoor een oplossing.

Het onderzoek op het VIC in Zegveld heeft veel bruikbare resultaten opgeleverd. Jammer was dat er de eerste jaren na 2003 geen extreem droge zomers kwamen. Pas in 2018 was er weer een extreem droge zomer. Dit heeft meerdere veehouders ertoe aangezet om daarna over te gaan tot het laten

aanleggen van onderwaterdrainage mede gestimuleerd door overheidssubsidies. De extreme droogte van 2022 heeft het draagvlak verder vergroot.

Prospectief

Onderwaterdrainage ten behoeve van Infiltratie evolueert. Aanvankelijk is gestart met het leggen van onderwaterdrains van sloot naar sloot. Wanneer bij droogte het grondwater daalt tot onder het slootpeil werkt het infiltrerend. Gaat het daarna regenen, dan werkt het drainerend. Deze open en daarmee passieve vorm van grondwaterbeheer is minder geschikt voor percelen met een geringe droogligging. In de zomer kunnen deze percelen te drassig blijven. Het is ook minder geschikt voor percelen met een grote droogligging. In extreem droge zomers kan de wortelzone op deze percelen te droog worden, waardoor de grasgroei afneemt. Voor deze percelen is de zogenaamde 'drukdrainage' ontwikkeld. Hierbij wordt het slootwater in de drains gepompt om zo het grondwater te verhogen tot boven het slootpeil. Dit is een gesloten systeem waarbij het grondwater actief beheerd wordt. Voor Polder Bloemendaal zijn beide systemen niet geschikt. De droogligging is te gering voor het passieve systeem en tegelijkertijd is de droogligging onvoldoende hoog om over te gaan op drukdrainage.

Passend bij Polder Bloemendaal is een vorm van actief grondwaterbeheer, waarbij grondwater kan worden ingelaten als dit bij droogte te ver daalt onder het slootpeil en bij regen kan worden uitgelaten om plasvorming te voorkomen. Dit kan onder vrij verval, dus zonder tussenkomst van een pomp, worden geregeld met op afstand bestuurbare schuiven. Deze tussenvorm tussen passieve drainage en drukdrainage wordt in dit project aangeduid met 'schuifdrainage' of 'drainagesysteem Polder Bloemendaal' of, om het accent te leggen op infiltratie, met 'schuifinfiltratiesysteem'. Aangezien het systeem zowel een infiltrerend als een drainerende functie heeft, is een passende naam **SchuifInfiltratie-en DrainageSysteem**, afgekort **SIDS**, of **SIDS-Polder Bloemendaal**, omdat het kennelijk voor het eerst in Polder Bloemendaal is toegepast. Landelijk wordt als naam **PWIS** gebruikt. Dit wordt omschreven als een bijzondere vorm van een **Passief WaterInfiltratieSysteem**.

6. Onderwaterdrainage proefveld

6.1. Ontwerp

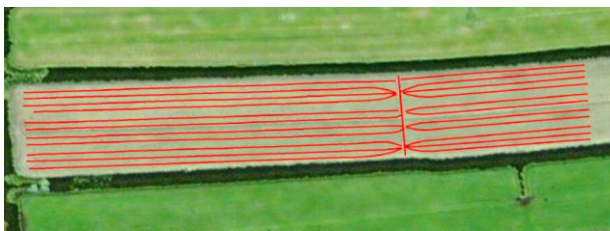
Het proefperceel ligt in weidevogelbroedgebied van Polder Bloemendaal. Om het gebied aantrekkelijk te maken voor weidevogels worden gedurende het broedseizoen verspreid over de polder enkele hol liggende percelen plasdras gemaakt. Dit wordt gedaan door de greppel in het midden van het perceel dicht te zetten en slootwater op het perceel te pompen. Op de hoger gelegen randstroken kunnen de weidevogels broeden en hun kuikens kunnen in het midden langs de plasoevers voedsel vinden. Het gebruik van slootwater heeft evenwel nadelen. Het heeft een andere chemische samenstelling dan regenwater en met het oppompen van slootwater kunnen onkruidzaden en parasieten worden meegevoerd die ongunstig zijn voor de graslandvegetatie en weidevogels (pitrus) en voor het vee (leverbot). Ook het beheer vraagt veel aandacht. Voorzieningen of acties zijn nodig om te voorkomen dat na een regenbui in het broedseizoen de plas te groot en te diep wordt. Deze nadelen kunnen worden voorkomen door met infiltrerende drainage het regenwater in het midden van het perceel vast te houden en bij droogte het slootwater in te pompen en zo het grondwaterpeil op te zetten. Om dit mogelijk te maken is gekozen voor een gesegmenteerd drainagesysteem, bestaande uit een segment voor de middenstrook en een segment voor de randstroken. Beide segmenten kunnen onafhankelijk van elkaar worden beheerd. De mogelijkheid om de middenstrook plasdras te zetten zal pas worden benut na 2025 na afloop van het project. Gedurende de looptijd van het project ligt het accent op het beperken van de bodemdaling door tijdens droogte water te infiltreren.

Uitvoeringsplan

Het proefperceel heeft een lengte van ca 450 m en een breedte van ca 55 m. De drains worden aangebracht over een lengte van 300 m, verdeeld over een lengte van 200 en 100 m die samen komen in een verzameldrain die aangesloten wordt op de infiltratieput. De resterende 150 m wordt niet gedraineerd en dient als referentie voor het onderzoek. In de randstroken worden de drains (bovenkant) op 30 cm onder slootpeil gelegd en in de lager liggende middenstrook op 40 cm onder slootpeil, teneinde ook daar voldoende gronddekking te houden voor het weilandgebruik. Dit betekent dat op beide stroken de drains op ca 65 cm onder maaiveld worden aangelegd. In de middenstrook worden 4 drains gelegd, ter weerszijde van de greppel elk 2. In de randstroken worden 6 drains aangelegd, met in elke strook 3 drains. De drains worden op 4 m afstand van elkaar gelegd, waarbij tussen de drains van de middenstrook en randstroken een afstand van 6 m wordt aangehouden om onderlinge beïnvloeding van de stroken te beperken.

6.2. Aanleg

Bij het uitzetten van plan in het veld bleek de greppel niet in het midden van het perceel te liggen, maar enkele meters naar het zuiden. In de praktijk blijkt vaak een middengreppel niet in het midden van een weilandperceel te liggen. Gekozen is om vast te houden aan het leggen van 2 drains ter weerszijde van de greppel in de middenstrook. Het gevolg daarvan is dat de randstroken in breedte verschillen en aan de noordzijde een extra drain nodig was om de randstrook voldoende te kunnen infiltreren. Daarmee komt het aantal drains in de randstroken op 7, waarvan 4 in de noordelijke randstrook en 3 in de zuidelijke randstrook. Om de mogelijke beïnvloeding van de greppel te beperken is ervoor gekozen om bij de 2 middelste drains in de middenstrook een afstand aan te houden van 5 m in plaats van 4 m.



Lay-out van het drainagesysteem. De referentie begint aan de oostzijde waar de drains ophouden. De ligging van de drains is met GPS vastgelegd.

Om het gehele drainagenetwerk binnen de breedte van het perceel passend te houden is ervoor gekozen om de afstand tussen de buitenste drains in de randstroken en de sloot niet kleiner te laten zijn dan ca 3 m. Anticiperend op het 'slootkanteffect' (Lit.19.) wordt verwacht dat daarbij geen kortsluitstroming zal ontstaan. Daarmee was het grotendeels inpasbaar. Slechts op enkele stukken was het nodig om langs de zuidzijde en de noordzijde de buitenste drain wat naar binnen te leggen. In plaats van 4 m is daar



respectievelijk een afstand van 3,5 en 3,7 m aangehouden tot de naast liggende drain. Het drainagesysteem is aangelegd door Barth Drainage BV. Het werk is voorbereid en begeleid door Arjan van Drunen en het draineren is uitgevoerd door een team onder leiding van Janus Verkerk. Het systeem is aangelegd op 16 juli 2021 onder gunstige omstandigheden, niet te nat (geen insporing) en niet te droog (geen opstroping van de graszode) en niet te hoog gras (zie foto) en dus geen opbrengstderving.

De drains zijn sleufloos met 1 mes (zwaard), zogenaamde halve V, in de bodem gebracht.

Als drains zijn PVC-ribbelbuizen Ø 60 mm omwikkeld met PP-450/PE-1000 gebruikt. De drains zijn sleufloos aangelegd en aan het eind afgedopt.

Tijdens de aanleg is enkele malen op een boomstronk gestuit. Dit is te verwachten bij bosveen. Deze stronken konden worden verwijderd waarna het draineren kon worden voortgezet. Op één plaats net voor het einde is dit niet gedaan. De boomstobbe is daar weliswaar verwijderd, maar de drain is niet doorgetrokken tot het einde. Op het GPS-beeld is dit zichtbaar in de noordelijke randstrook in de vierde drain vanaf de sloot.

De drains zijn aangesloten via putjes (PVC Ø 315 en 400 mm) op de overdwars aangelegde verzamel drains (PVC Ø 125 mm SN8). Eén voor de middenstrook en één voor de randstroken. Ze zijn in gegraven sleuven gelegd parallel naast elkaar naar de twee infiltratieputten (PVC Ø 630 mm) aan de noordzijde. Deze putten zijn in 2022 aangesloten op de sloot.



Aansluiting drains op putjes



Verzameldrain



Infiltratieput

Voorafgaande aan het gebruik van het drainagesysteem is op de grens met de referentie en het gedraineerde deel van het perceel de greppel met grond opgevuld en de afvoerpijp naar de sloot aan de westzijde van het gedraineerde deel dichtgezet. Dit is gedaan om het overtollige regenwater op het gedraineerde deel via de drains af laten afvoeren naar de sloot in plaats van via de greppel. Op de referentie is de greppel intact gelaten, zodat het regenwater via de greppel kon blijven afstromen.

Na afloop van het project is met de eigenaar afgesproken om ook het referentiedeel te draineren. Hiervoor zullen de drains worden verlengd. De lengte van de drains wordt dan 250 m (100 + 150). Verwacht wordt dat vanuit het inlaatpunt het gehele perceel voldoende kan worden geïnfiltreerd. Om die reden zijn verzamel drains niet in het midden van het gedraineerde deel gelegd.



Een opvallend fenomeen openbaarde zich na aanleg van het drainagesysteem. Mollen ontdekten dat zij hun ritten makkelijker kunnen maken via de zwaardsporen (zie foto). Dit maakte het situeren van de meetplekken voor de monitoring eenvoudig, zowel voor de geohydrologische monitoring (midden tussen de drains) als voor het plaatsen van de kamertjes voor de gasemissiemetingen (op en midden tussen de drains).

Mollen volgen bij voorkeur het zwaardspoor van de draineermachine. Drain ligt op ca 50 cm naast het spoor. Drains zijn aangelegd op 15 juli 2021, foto mollenrit is gemaakt op 31 januari 2022. Het weiland was kaal gegraasd door schapen in najaar 2021.

7. Infiltratie en energiesysteem proefveld

Inleiding

In het zakelijke netwerk van Arie-Jan Broere kwam er kennis van informatie dat het onderzoeken van de bodemdaling in polder Bloemendaal een reëel kans zou hebben en er middelen uit diverse fondsen beschikbaar zouden kunnen komen. Arie-Jan Broere heeft deze informatie uit zijn netwerk meegenomen naar het bestuur van Stichting Weids Bloemendaal en daar op de agenda gezet. Medebestuurder Dirk van der Eijk was zeer gemotiveerd om dit onderzoek te coördineren. De drive om dit onderzoek te doen zit in het feit dat de andere onderzoeken in de regio op percelen plaats vindt waar er nu nog een grotere drooglegging is dan in Polder Bloemendaal. Het bebouwingslint heeft in polder Bloemendaal eenzelfde slootpeil dan het weide grasland. Voor Broere Irrigatie was het bij de start een zeer uitdagend project. Het lukte om de fondsen te verwerven, perceel werd gevonden, een welwillende eigenaar/veehouder Niels de Jong, En een ontwerp voor een gesegmenteerde peil besturing. Periodiek een week meten met 230volt meetapparatuur zonder het gebruik van fossiele brandstoffen. De rapportage van Broere Irrigatie is vanuit een technische invalshoek geschreven.

Infiltratiesysteem

De voorkeursperiode voor realisatie van onderwater drainage is in de periode vanaf juli tot oktober, i.v.m. weidevogels en derving grasopbrengsten en juiste weersomstandigheden. De onderwaterdrainage wordt gekoppeld middels een verzamelleiding aan de pomp en regelput. In de sloot wordt een drijver met Solar paneel aangebracht, met een maximale hoogte van 50cm boven waterniveau zodat er geen uitkijkpost voor predatoren ontstaat. De Solar panelen voorzien luchtpomp, schuifafsluiters en sensoren voor de monitoring van energie. Op een locatie zullen we ook het in- en uitstroom volume in beeld brengen. Na installatie zullen de betrokken gebruikers geïnstrueerd worden. Onderzoekspartijen krijgen een dieper toegangslevel waardoor zij ruwe data kunnen zien en gebruiken voor hun onderzoek. Voor de aanleg zijn drie drainage bedrijven benaderd, na een grondige afweging is er gekozen voor Barth Drainage. Doorslag geven was het gewicht van de machine gecombineerd met de nauwkeurigheid van werken op diverse referentie percelen.

Energiesystemen



Het energiesysteem bestaat uit 2 delen, Het eerste deel de continu stroomvoorziening voor de besturing van de peilvak kleppen en het doorgeven van de informatie uit het veld naar de Cloud. Dit systeem bestaat uit een solar panel met een laad regelaar en accu.

Dit alles gemonteerd op een drijver, gemaakt van duurzaam PE-buis. Voor de besturing van de kleppen is er een luchtpompje gemonteerd welke een buis vult met samengeperste lucht. Deze samengeperste lucht is opgeslagen energie om op elk willekeurig moment de kleppen van de peilvakken open of dicht te sturen.

Het tweede deel van de energievoorziening bestaat uit de stroomvoorziening voor het periodiek



meten van de emissie uit de bodem, deze meet cyclus was sterk weersafhankelijk. De duur was minimaal een week en het mocht niet te hard veel wind staan. Deze meet cycli worden in verschillende periodes in het jaar uitgevoerd. Zowel in de winter als in de zomer. Om in de winter er zeker van te zijn dat we over genoeg stroom zouden beschikken is er een combinatie gemaakt van twee windmolentjes met een propeller doorsnede van 1.20meter en vier

solar panelen. Betreft twee laadregelaars een voor de windmolens en een voor de solar panelen. De accu's zijn van het type: "deep cycle" wat wil zeggen geschikt om heel lang rustig stroom te leveren tot een zeer diepe ontlading. Het volume Kilowattuur wat de accu's kunnen opslaan zijn we van drie donkere dagen zonder wind uitgegaan. Gedurende de proef bleek dat we genoeg energie in de accu's beschikbaar hadden. Voorbij de accu's er een omvormer geïnstalleerd welke de VDC stroom in de accu's omzet naar 230VAC met een maximum van 500watt. Het energieproductie systeem mocht niet op het land maar moest op het water plaats vinden. Er is een gegalvaniseerd frame gemaakt drijvend op 250mm buizen. Afmetingen: Zes meter lang en drie meter breed. Met name het gewicht van de accu's waren bepalend voor het drijfvermogen.

8 Bodemprofiel proefperceel

8.1. Methoden

In de eerste week van juli 2022 is op de overgang tussen de maatregel- en referentielocatie een profielkuil gegraven en bemonsterd. Monsternamen vond plaats met monsterringen van 100 cm³ inhoud en een brede guts (veen- en kleiboor) voor bemonstering onder de grondwaterspiegel. De monsters zijn geanalyseerd op bulk dichtheid, organische stof gehalte en koolstof / stikstofgehalte (C/N ratio) in het sediment-laboratorium van de Vrije Universiteit. Het organische stof gehalte is

bepaald door middel van gloeiverlies bij 330°C en 550 °C in een thermografische oven (LECO 701). C en N zijn gaschromatografisch bepaald met een Thermo Finnigan C/N/S elemental analyzer.

8.2. Resultaten

Het bodemprofiel is beschreven aan de hand van een profielkuil tot 50 cm diepte, en vanaf 50 cm tot 150 cm aan de hand van een boring met een brede guts. Het profiel is opgenomen in juli 2022. Tabel 1 geeft de profielbeschrijving volgens de FAO richtlijnen voor het beschrijven van bodemprofielen; Fig. 12 foto's van het bodemprofiel.

Ondergrens cm - maaiveld	Horizont	Beschrijving	Monsters	Interpretatie
10	A1	Wortelzone; kleiig sterk veraard (humeus) veen, wortels >50%; (sterk doorworteld) zwak ontwikkelde zeer fijne hoekige blok-structuur (kruimelig). Ondergrens geleidelijk, binnen 5 cm	W1, W2, W3; W1 wortels	toemaakdek
25	A2	Grijszwart zandig kleiig veen met kleine (< 10mm, < 5%) stukjes aardewerk, baksteen, grind, matig doorworteld met zeer fijne wortels (5-15%), zand zeer fijn, fijne hoekige blok-structuur, brokkelig Ondergrensgrens geleidelijk	W4, W5	toemaakdek
43	A3	Zeer venige klei, stenig, donker olijfbroin, veel grote baksteen- en aardewerkfragmenten (15-40%), licht doorworteld (5%), wat kleine roestvlekjes matig fijne hoekige blok-structuur, slickensides (glijvlakken) vrij scherpe grens met concentratie steenfragmenten	W5, W6	basis toemaakdek
65	H1	Veen; donkerbruin / zwart bosveen, licht veraard, veel hout (wilg), rechtopstaande houtfragmenten in elkaar gedrukt door compactie, Ondergrens zeer geleidelijk	W8, W9	oorspronkelijk veen, deels geoxideerd
95	H2	Veen; donkerbruin bosveen, niet veraard, veel hout (wilg). Ondergrens zeer geleidelijk	W10, W11	veen, permanent onder grondwaterspiegel
150	H3	Veen, riet-zeggeveen, weinig hout (wilg en els). Riet, veel fijne worteltjes (zegge), wat zwarte biezenstengels	W12 W13 W14	veen, permanent onder grondwaterspiegel
150		Boring beëindigd		

Tabel 1. beschrijving van het bodemprofiel.

Het bodemprofiel is typisch voor de zogenaamde 'Koopveengronden' in het westelijke veenweidegebied. Het oorspronkelijke veen wordt bedekt door een 'toemaakdek', materiaal dat in de loop van eeuwen cultivatie, is opgebracht om de bodem te verstevigen en nutriënten toe te voegen. Hiervoor werd stadsafval, zand, klei, puin en slootbagger gebruikt. Ook restanten uit de 17e - eeuwse aardewerkindustrie werden gebruikt; de kenmerkende fragmenten van 'Goudse pijpen' zijn ook gevonden.

De top van het oorspronkelijke veenprofiel had waarschijnlijk een kleidek; de A3 horizont wordt geclassificeerd als klei. Deze kleilaag is gemengd met puin. Deze klei is gevoelig voor zwel en krimp; het voorkomen van glimmende 'slickensides' op de structuurelementen wijst daarop. Slickensides zijn glijvlakken die ontstaan door versmering van de klei onder druk bij het opzwellen na een droge periode. In de maand augustus en september '22 vertoonde de bodem diepe en centimeters brede scheuren die de top van het veen kunnen bereiken (Fig. 13). De in figuur 13 gemeten diepte van de scheur is minimaal 19 cm, maar waarschijnlijk beduidend groter. In het veel nattere jaar 2023 zijn de scheuren niet waargenomen.



Figuur 12. Bodemprofiel van het onderzoeksperceel. A: Toemaakdek in de bovenste 43 cm van het profiel, met locatie van de monsterringen. B: veenprofiel onder het toemaakdek. C: verticaal in elkaar gedrukt wilgenhout(oranje) in het veen; dit wijst op compactie. Profielbeschrijving in Tabel 1.



Figuur 13. Scheurvorming in de toplaag van het veen op referentie, begin september 2022. De diepte van de scheur is minimaal 19 cm. Lengte zakmes: 9 cm.

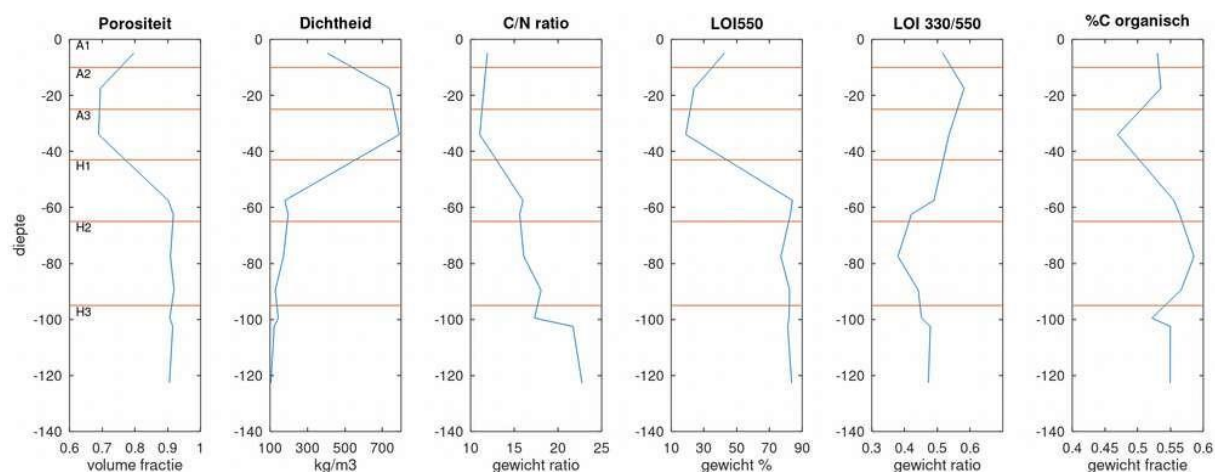
De resultaten van de organische stof-analyses en fysische eigenschappen van het bodemprofiel zijn weergegeven in Tabel 2 en Fig. 14. Bij de overgang van de A- naar de H-horizont neemt de porositeit sterk toe tot meer dan 90% poriënvolume, de hoeveelheid organisch materiaal neemt sterk toe (hogere LOI 550), en de dichtheid neemt sterk af door de toename van de organische fractie met een lager soortelijk gewicht dan dat van mineraal materiaal, en de hogere porositeit.

Ook de chemische eigenschappen van het organische materiaal veranderen. De koolstof-stikstof verhouding (C/N ratio) is zeer laag in de A-horizont (relatief meer N). In het veen van de H-horizont neemt C/N ratio toe met de diepte, gepaard gaande met een verandering in de veensamenstelling

(van eutroof bosveen in H2-H1 naar mesotroof riet-zegge veen in H3). LOI bij 330°C is een indicatie voor de hoeveelheid snel oxideerbaar organisch materiaal; het materiaal dat bij hogere temperaturen verbrandt is ook relatief recalcitrant voor bacteriële afbraak (Lopez-Capel et al., 2005; Nakhli et al., 2019). De verhouding tussen LOI 330/350 is hoger in de A-horizont dan in het onverstoorde veen van de H horizont, en wijst op meer recalcitrant organisch materiaal. Het hogere percentage koolstof in het organische materiaal van het veen is ook een indicatie voor meer recalcitrante organische stof. Doorgaans is veen minder makkelijk afbreekbaar dan vers geproduceerd plantenmateriaal.

Nr	Horizont	Diepte cm	porositeit	bulk dichtheid kg/m ³	wortels g/m ³	C gewicht %	N gewicht %	C/N ratio	LOI 330 gewicht %	LOI 550 gewicht %	LOI 330/550	C organisch gewicht %
1	A1 wortels	0-10			209,7	39,40	1,48	26,6				
2	A1	0-10	0,80	381,37		22,61	1,88	12,0	21,79	43,18	0,50	0,52
3	A1	0-10	0,79	432,30		22,38	1,89	11,8	22,11	41,73	0,53	0,54
4	A2	15-20	0,68	774,83		12,18	1,04	11,7	13,41	23,02	0,58	0,53
5	A2	15-20	0,70	700,93		13,44	1,19	11,3	14,46	24,85	0,58	0,54
6	A3	31.5-36.5	0,69	808,78		8,31	0,76	10,9	9,747	18,06	0,54	0,46
7	A3	31.5-36.5	0,69	772,83		9,45	0,85	11,2	10,54	19,79	0,53	0,48
8	H1	55-60	0,90	178,65		46,67	2,92	16,0	41,16	84,08	0,49	0,56
9	H1	60-65	0,92	196,63		46,68	2,99	15,6	34,87	82,76	0,42	0,56
10	H2	75-80	0,91	171,66		45,09	2,80	16,1	29,23	76,99	0,38	0,59
11	H2	87-92	0,92	127,72		46,58	2,58	18,1	36,37	82,28	0,44	0,57
12	H3	97-102	0,91	143,70		42,75	2,47	17,3	37,05	81,99	0,45	0,52
13	H3	105-110	0,91	121,73		44,60	2,05	21,7	38,86	81,14	0,48	0,55
14	H3	120-125	0,90	104,76		45,90	2,02	22,7	39,53	83,54	0,47	0,55

Tabel 2. Analyseresultaten van het bodemprofiel. LOI: Loss on ignition (gloeiverlies, gewichtsverlies bij verhitting). LOI bij 550°C benadert de totale hoeveelheid organische stof in de bodem; LOI bij 330°C is een benadering van de hoeveelheid relatief snel afbreekbare organische stof (zie tekst). De kolom C-organisch geeft het koolstofpercentage van de organische stof; kolom C het percentage koolstof van bodemmateriaal inclusief het minerale deel.



Figuur 14. Resultaten van de fysische eigenschappen en organische stof van het bodemprofiel. Voor de analyseresultaten zie tabel 2. Analyseresultaten van monsters die op gelijke diepte zijn genomen zijn gemiddeld.

9 Hydrologische analyse

Dit hoofdstuk is geschreven door Frouke Hoogland en Tessa van Hateren van Acacia Water. Het is ook uitgekomen als rapport: Hydrologische analyse Bloemendaal (Lit.9.)

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 zuurstofsenoren 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.

Inhoud

9.1. Inleiding	24
9.2. Aanpak monitoring	25
9.2.1. Aanleg proefperceel	25
9.2.2. Aangelegde monitoring	26
9.3. Resultaten hydrologische metingen	27
9.3.1. Neerslagtekort in de verschillende proefjaren	27
9.3.2. Werking systeem	27
9.3.2.1. Schuifbeheer gedurende de proef	28
9.3.2.2. Drainage en infiltratiefluxen	29
9.3.2.3. Resultaten grondwaterstand	37
9.3.2.4. Drainage en de veranderingen in de werking van het systeem	41
9.3.3. Resultaten zuurstofindringing	45
9.3.3.1. Metingen bodemvocht	45
9.3.3.2. Metingen zuurstof	47
9.4. Chemie van het bodemvocht	49
9.4.1. Theorie	50
9.4.2. Resultaten chemie van het bodemvocht	52
9.5. Discussie	61
9.5.1. Werking systeem	61
9.5.2. Effect van vernatting op afbraakmilieus in het veen	64
9.6. Conclusies	66

9.6.1. Onderzoeksvragen	66
9.6.2. Werking van het systeem	67
9.6.3. Effect op afbraakmilieus	68
Literatuur	68
Appendix A1: geïnstalleerde sensoren	70
Appendix A2: momenten in het schuifbeheer	72

9.1. Inleiding

In 2022 is Stichting Weids Bloemendaal een pilotproject met onderwaterdrainage in de polder Bloemendaal gestart. Het doel van de maatregel is bodemdaling en CO₂ 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 CO₂ 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.

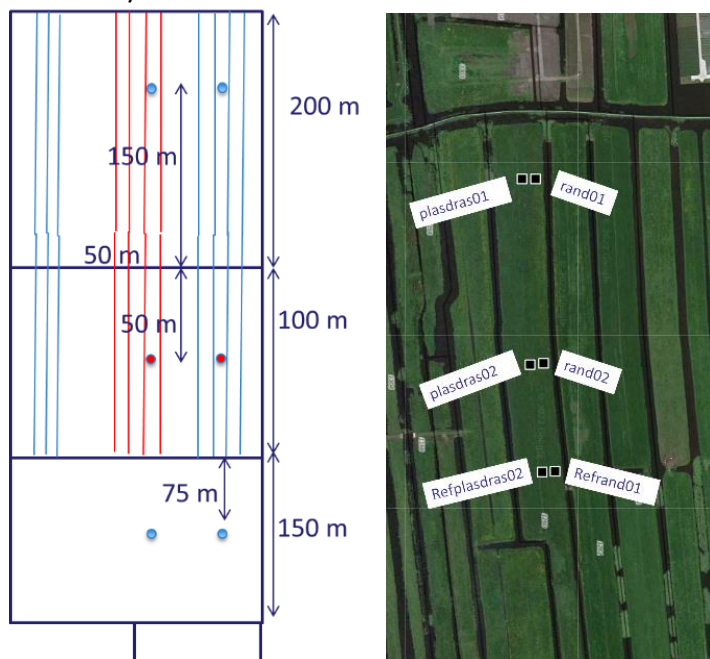
9.2. Aanpak monitoring

9.2.1. Aanleg 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 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.



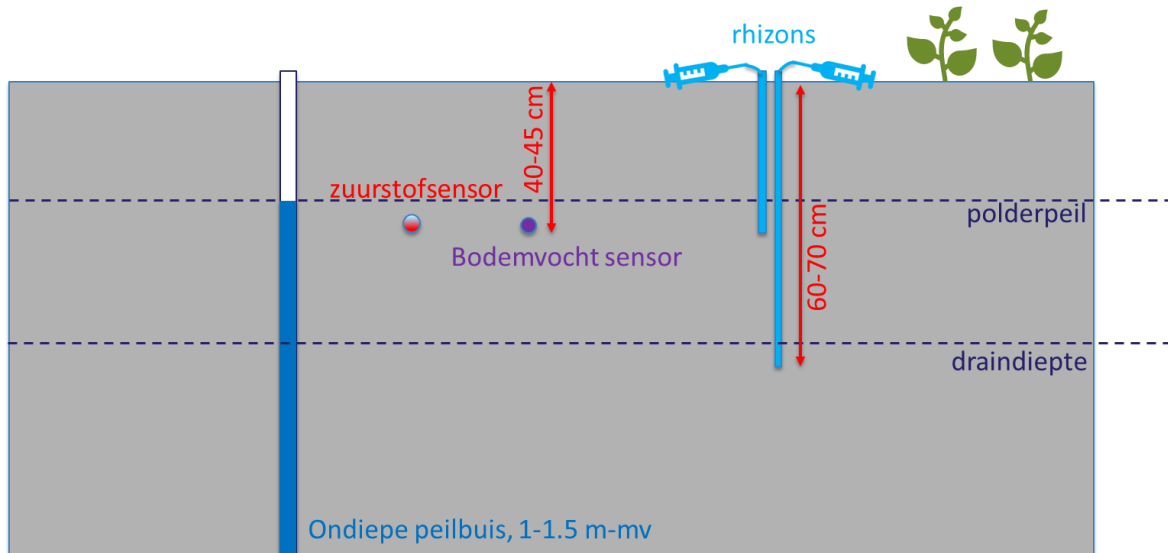
Figuur 1: locaties van de meetpunten ten opzichte van de drainage. Rood gekleurde drains zijn aangesloten op systeem 1 (middensysteem, plasdras) en blauw gekleurde drains op systeem 2 (randsysteem).

9.2.2. 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).

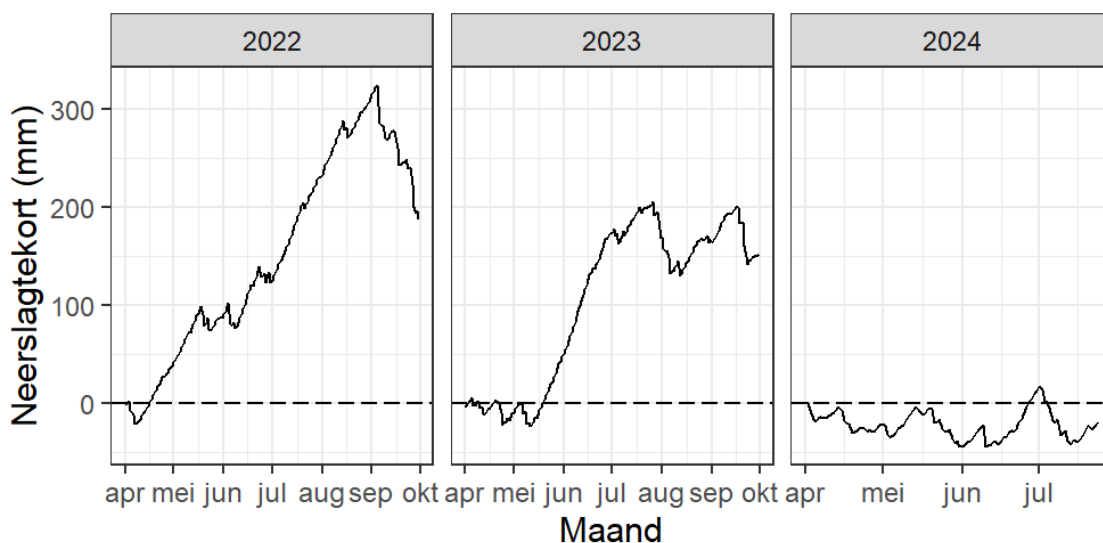
9.3 Resultaten hydrologische metingen

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.

9.3.1 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.

9.3.2 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.

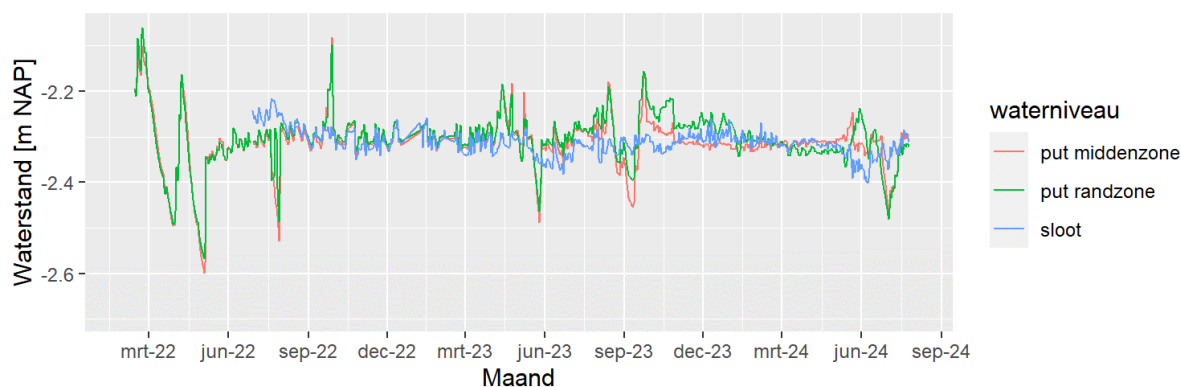
Het systeem wordt aangestuurd in de putten waarop de verzameldrains uitkomen. Hier kan met schuifjes worden bepaald of er een directe interactie is tussen slootwaterpeil en grondwater (de schuifjes staan dan open). Door de schuifjes dicht te zetten, kan water worden vastgehouden in het perceel na een natte periode of kan infiltratie worden gestopt.

9.3.2.1. 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:
 - o 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.
 - o 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:
 - o 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.
 - o 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.
- 2024:
 - o 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.

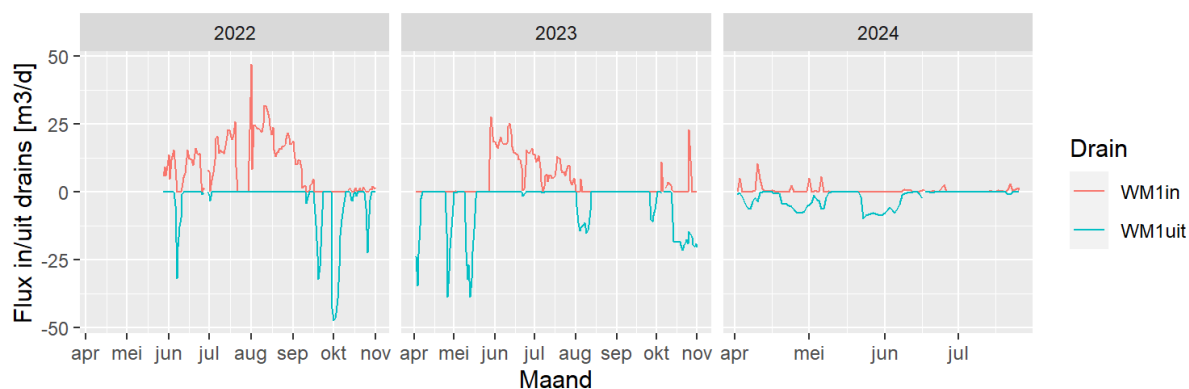
9.3.2.2. Drainage en infiltratiefluxen

Onderstaande figuren tonen de fluxen voor de middenstrook (*Figuur 6*) en voor de randzone (*Figuur 7*). *Figuur 8* toont de neerslag in dezelfde periode.

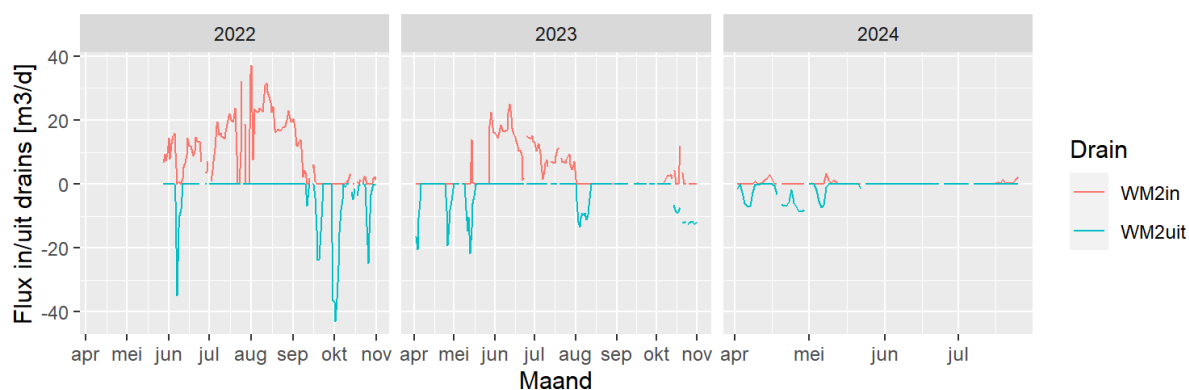
De patronen van infiltratie en uitstroom vanuit de drains komen goed overeen tussen de twee systemen. Te zien is dat buiten de zomerperiode neerslag telkens wordt gevolgd door uitstroom uit de drains (blauw in *Figuur 6* en *Figuur 7*), behalve in periodes waarin de schuiven gesloten zijn. In de zomerperiode 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 vertoont 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.

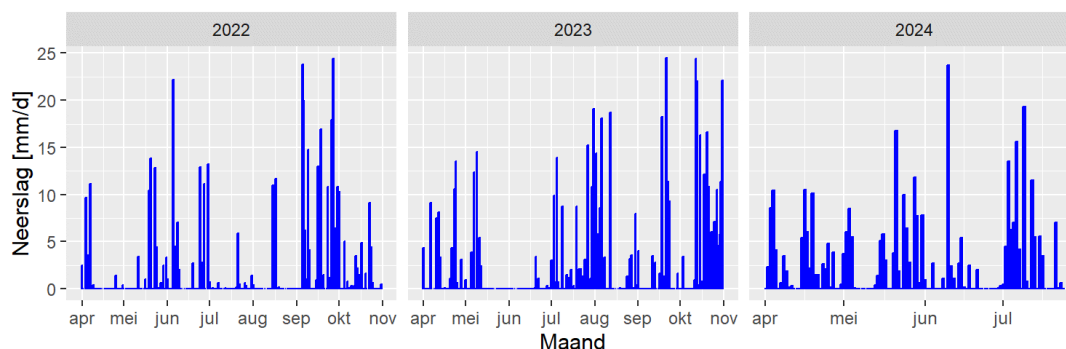
In 2024 is er vanwege de uitzonderlijk natte situatie vooral water uit het perceel gedraineerd, zelfs in de zomer. Er is slechts beperkt een aantal kubieke meter water geïnfiltreerd, waarvan iets meer in de middenstrook dan in de randzone. Vanwege de vele regenbuien tot in juli hebben de schuiven meestentijds 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 m². De 19 m breedte van de middenstrook is hierbij gebaseerd op een onderlinge drainafstand van 4 m, behalve tussen de drains aan weerszijde 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 m². 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.

Jaar	Maand	Systeem 1, middenstrook			Systeem 2, randzone		
		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 1: Fluxen in m³ 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	
	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

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.

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 dicht bij maaiveld staat in de middenstrook dan aan de randstrook. Hierdoor is een dunne 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 verklaart 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 balans termen. Deze zijn naast elkaar gezet in Tabel 3 en Tabel 4. In Tabel 3 zijn deze fluxen uitgedrukt in m³ per maand en in tabel 4 in mm/d.

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.

Om mm naar m³ om te rekenen en vice versa gaan we hier uit van een oppervlakte van 300x50 m² 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 dicht gestaan, met name in de randzone, waardoor er weinig infiltratie en drainage heeft plaatsgevonden.

	Maand	Neerslagoverschot (m ³) KNMI station Rotterdam	Infiltratie (m ³)	Drainage (m ³)	Vershil (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 3: waterbalans proefperceel (systeem 1 + systeem 2) in m³. Het gebruikte oppervlak voor het proefperceel is 300x50 m². 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 (mm/d) KNMI station Rotterdam	Infiltratie (mm/d)	Drainage (mm/d)	Vershil (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

Tabel 4 waterbalans proefperceel omgerekend naar mm/d. Het gebruikte oppervlak voor het proefperceel is 300 x 50 m².

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.

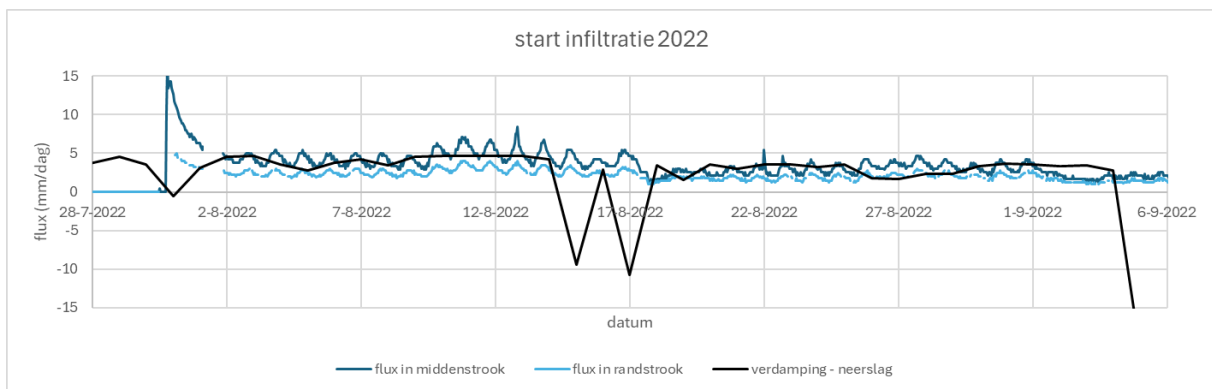
Figuur 9 en *Figuur 10* tonen de infiltratie in deze periode in detail, omgerekend naar mm/dag. Ook is de gewasverdamping minus de neerslag toegevoegd, op dagbasis van het KNMI-station in Rotterdam.

Te zien is dat er een dag/nachtritme is in de infiltratieflex, waarbij deze het hoogste is gedurende de dag, wanneer gewasverdamping leidt tot een verlaging van de grondwaterstand. De maximale infiltratieflex in augustus 2022 was in zowel rand als middenstrook circa 30 m³/dag. Dit vertaalt zich

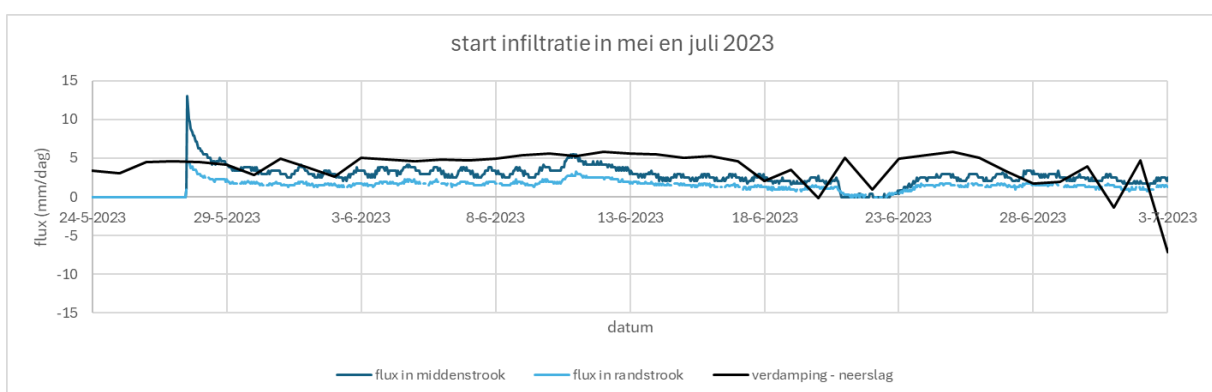
naar circa 5 mm/dag voor de middenstrook en 3 mm/dag voor de randstrook (Figuur 9). Gemiddeld over het gehele proefperceel komt dit overeen met 4 mm/dag. Zoals te zien in de figuur komt de infiltratieflex goed overeen met de gewasverdamping.

Voor de maand juli in 2023 geldt ongeveer hetzelfde. De maximale infiltratieflex 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: infiltratieflex in rand en middenstrook in augustus 2022. Negatieve waarden van de zwarte lijn, verdamping minus neerslag, komen door grote regenbuien op die dagen.



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

9.3.2.3. 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

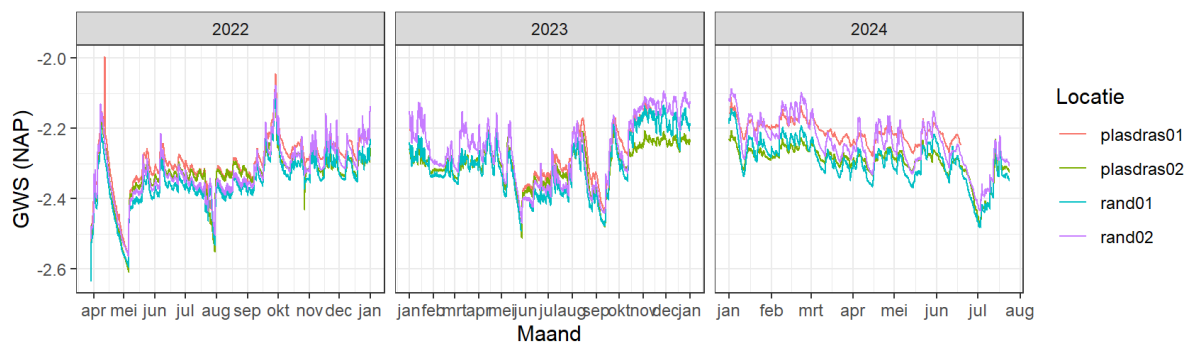
in het gehele proefperceel (meetpunten in rand en midden) vrijwel gelijk is ten opzichte van NAP. In de randzone is het niveau gedurende de infiltratie rond de 2.35 m-NAP, in de plasdraszone rond 2.3 m-NAP. Wanneer de grondwaterstand wordt uitgedrukt ten opzichte van maaiveld is er wel een verschil tussen de rand en het midden. Dit komt door de lage ligging van het midden van het perceel waardoor hier de grondwaterstand dicht 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.

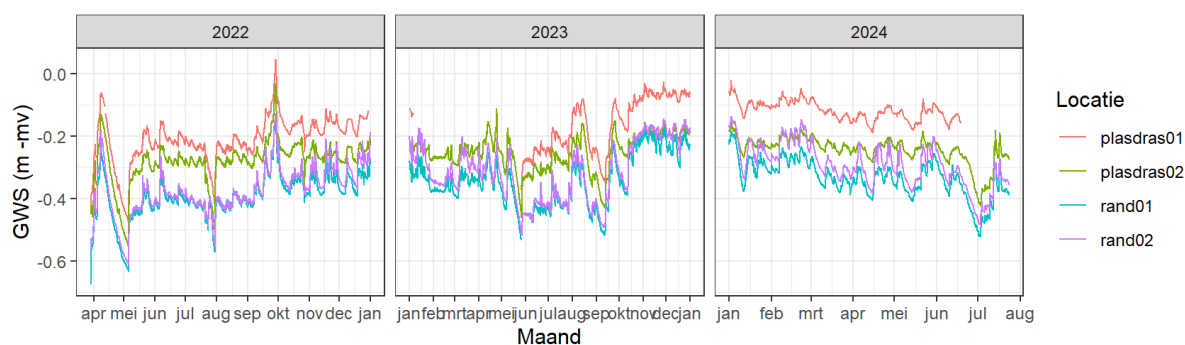
In 2023 valt een periode in mei op, waar de grondwaterstanden stevig uitzakten tot 53 cm-mv in de randzone en 46 cm-mv in de middenstrook. Ook hier is de uitzakking op het gedraineerde gedeelte gelijk aan het referentiegedeelte, tot het moment dat met de infiltratie wordt gestart. Vervolgens is infiltratie 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).

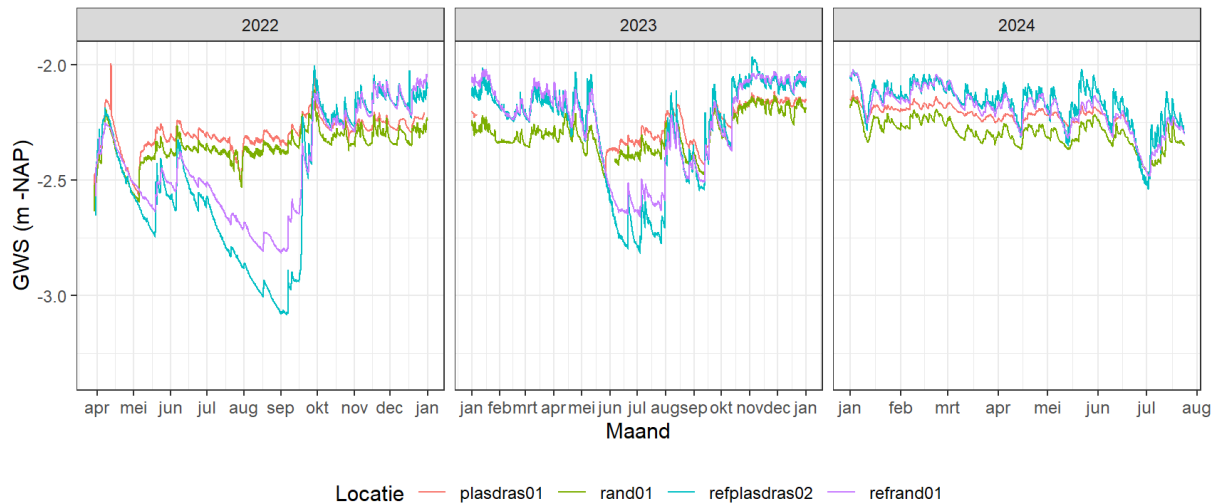
De grondwaterstand in de middenstrook zakt in de zomer structureel verder uit dan in de randzone. Dit duidt op een holle grondwaterspiegel op het referentiegedeelte, waarbij de grondwaterstand hoger is aan de randen dan in het midden, door de invloed van de sloot. Uitgedrukt in NAP is het verschil tussen 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.

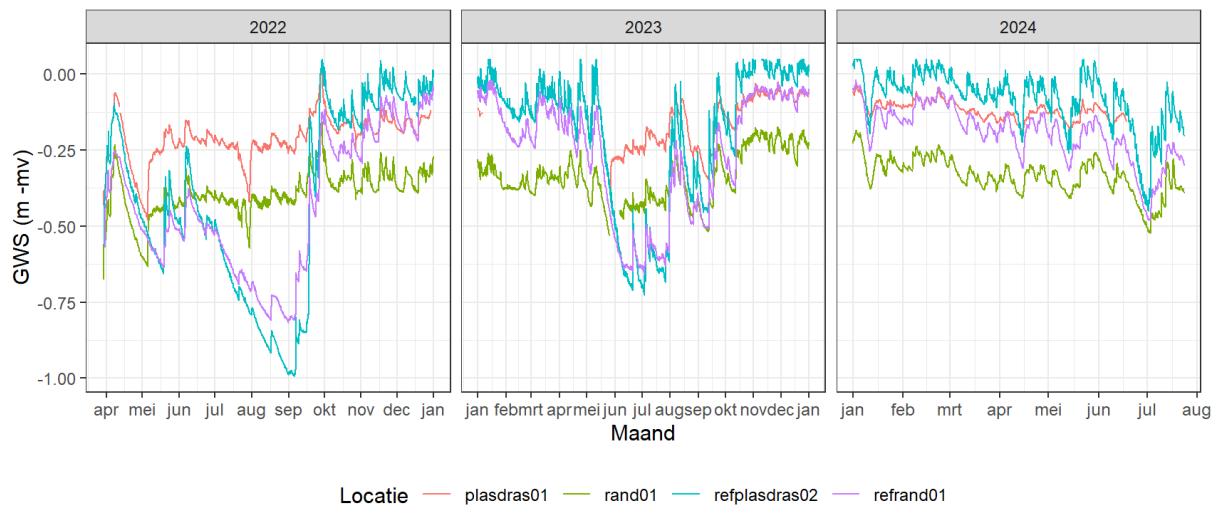
In de natste periodes is er weinig verschil in de grondwaterstand tussen midden en randzone op het referentiegedeelte. De grondwaterstanden komen daardoor in natte periodes dicht bij het maaiveld in de middenzone. In de middenzone van het referentieperceel stond de greppel open dus deze heeft hier bijgedragen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

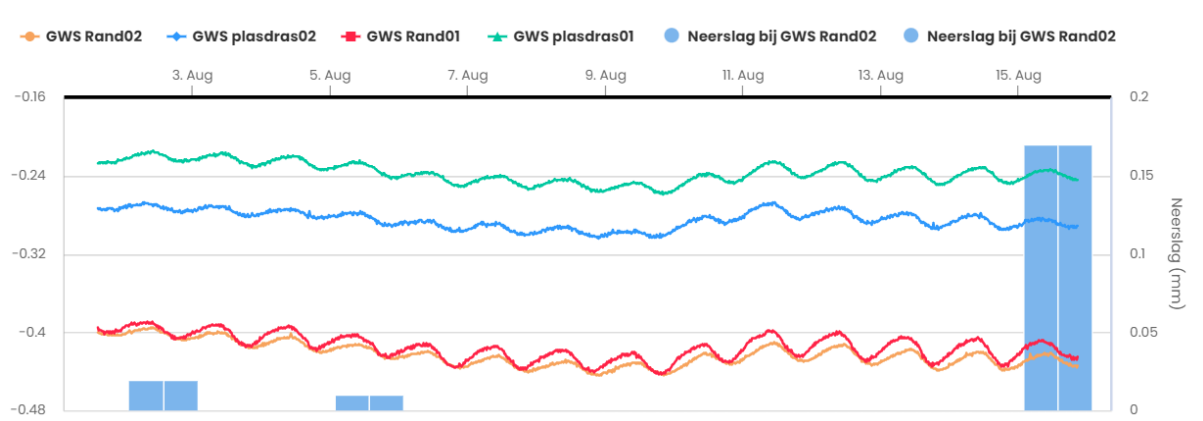


Figuur 14: gemeten grondwaterstand ten opzichte van maaiveld (m - mv).

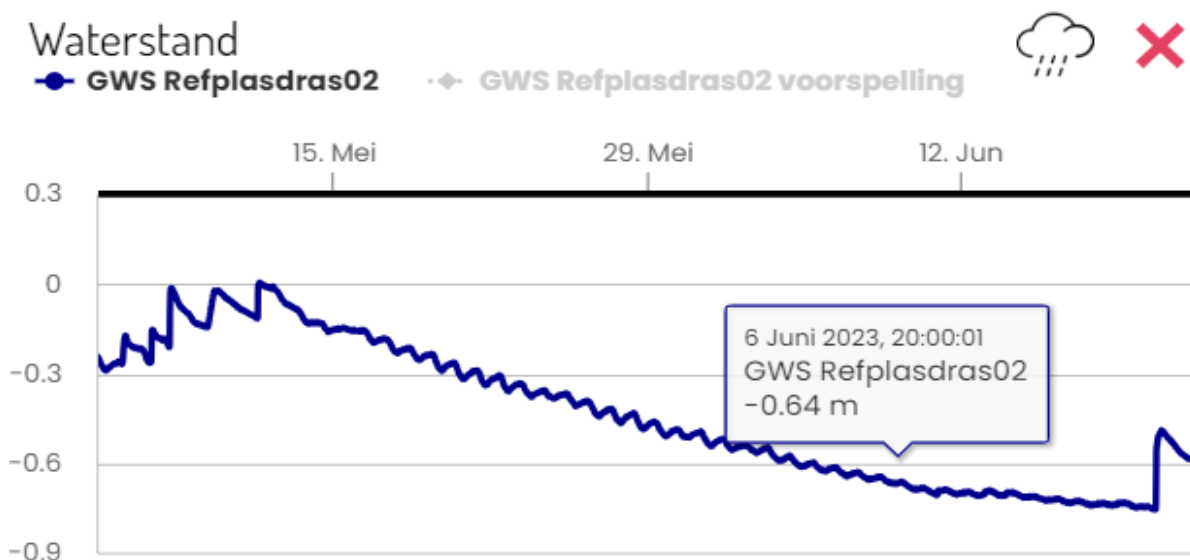
Als we de meetreeksen in detail bekijken blijkt er een dag en nacht effect te zijn in de grondwaterstanden op het proefperceel gedurende de droge periodes waarop infiltratie plaatsvindt (*Figuur 15*). Dit treedt op bij alle meetpunten. De grondwaterstand is het hoogste in de ochtend en het laagst in 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.

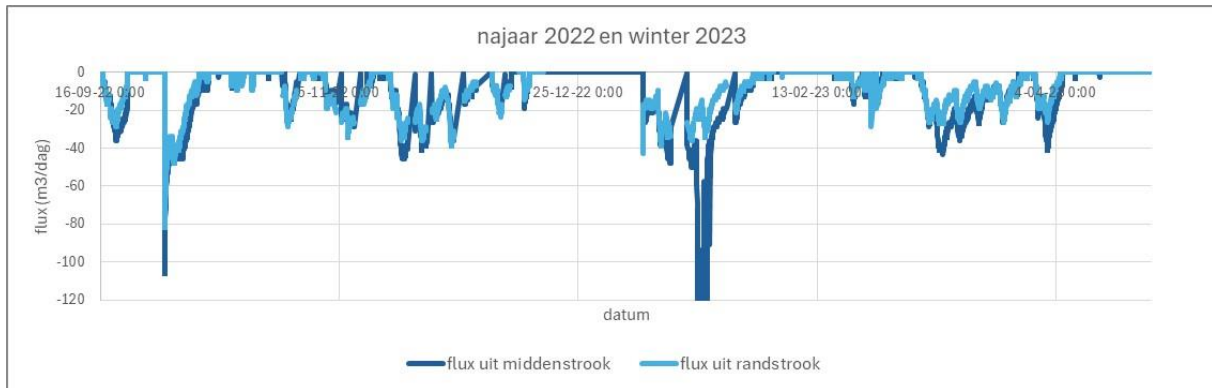
9.3.2.4. Drainage en veranderingen in de werking van het systeem

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 plasmvorming te voorkomen. Hieronder kijken we in meer detail naar de afvoer van de drains in natte periodes.

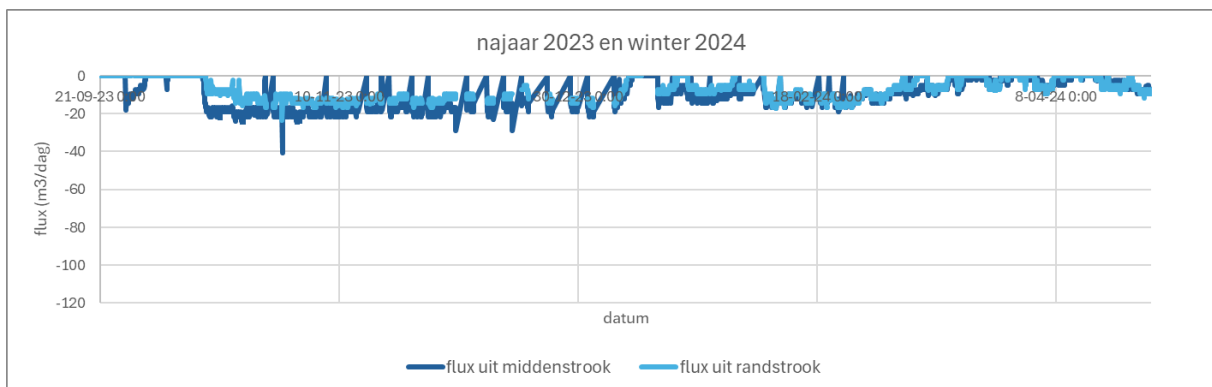
Op basis van de grondwaterstanden lijkt het dat de drainerende functie van het drainagesysteem minder goed werkte in najaar 2023 dan het jaar daarvoor. In Figuur 12 zijn bijvoorbeeld de grondwaterstanden te zien ten opzichte van maaiveld: hieruit blijkt dat de grondwaterstanden verder uitzakken in najaar 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 ondervindt.

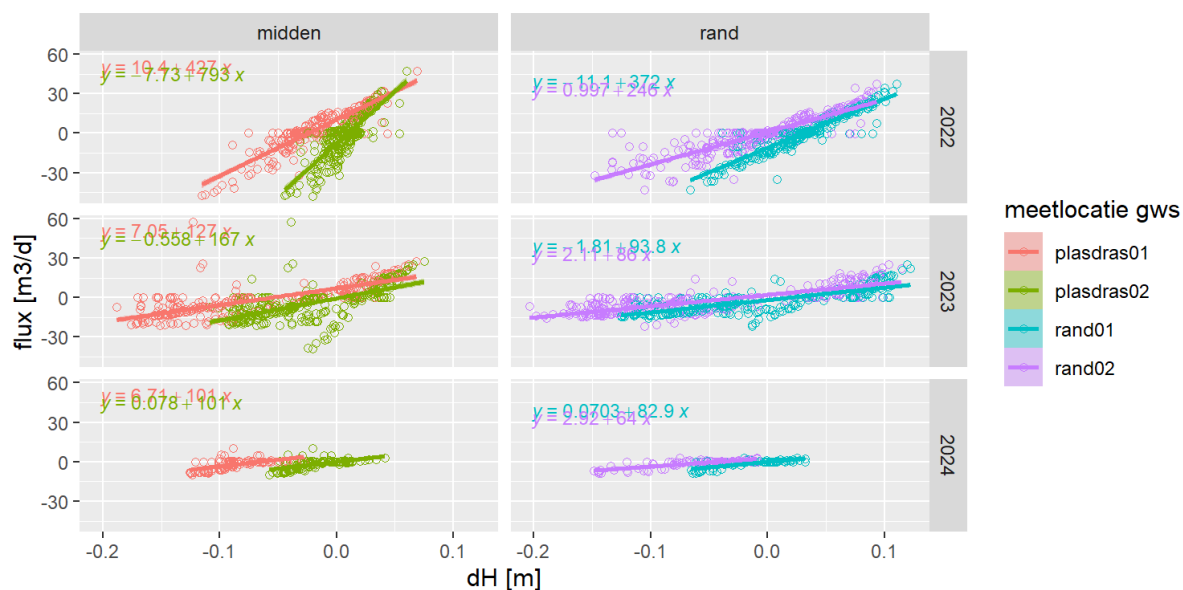


Figuur 17: Drainage fluxen (negatieve flux = drainage) vanuit het proefperceel, midden en rand winter 2022/2023.



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 vlt 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 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.

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 5: grondwaterstand ten opzichte van maaiveld tijdens de maaimomenten.

TABEL 4.5

VOCHTSPANNINGSCRITEIRIUM 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
O05	Grof zand	-20	-30
O09	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>)

9.3.3 Resultaten zuurstofindringing

De hogere grondwaterstanden door het drainagesysteem 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.

9.3.3.1 Metingen bodemvocht

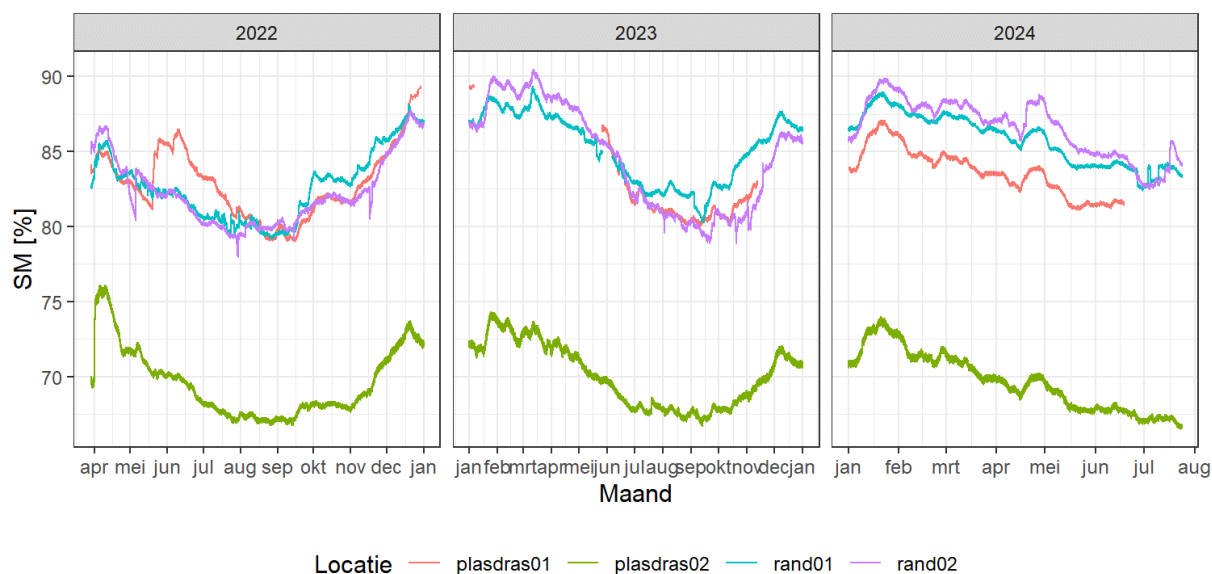
Proefperceel

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 bodemvochttdreksen 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 bodemvochtgehalten. 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 vochtgehalten 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.

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%

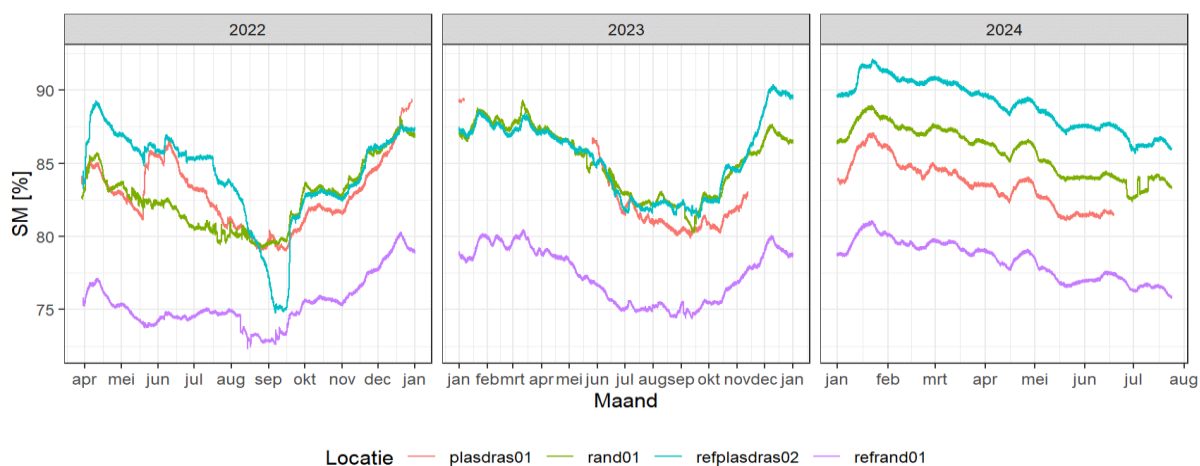
Tabel 5: Hoogst en laagst gemeten bodemvochtwaarde op de 6 meetpunten op 45 cm-mv, in het veen net onder de toemaakdeklaag.



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.

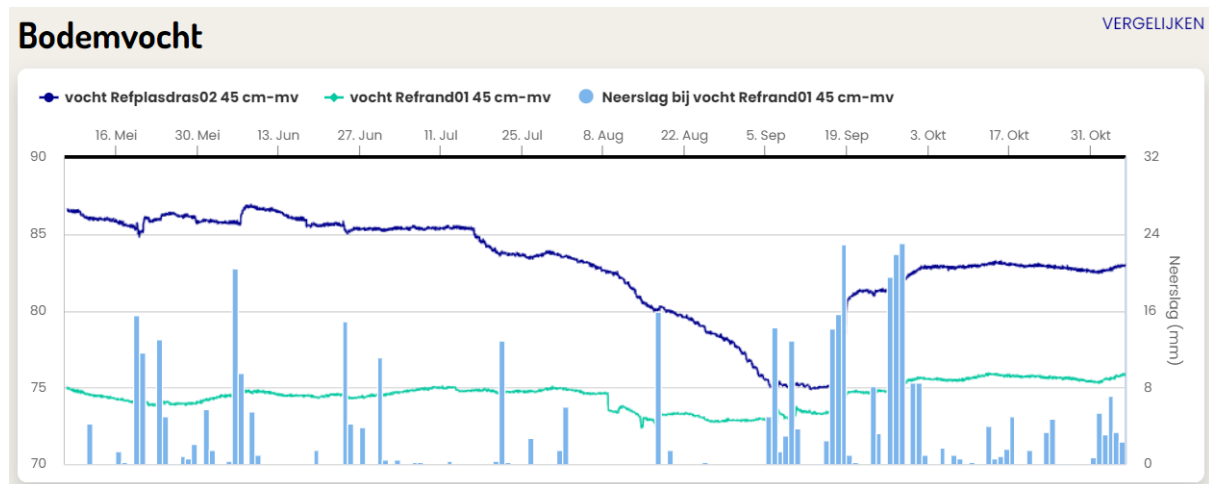


Figuur 22 : gemeten vochtgehalte (in percentages) op het referentieperceel, vergeleken met het proefperceel.

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

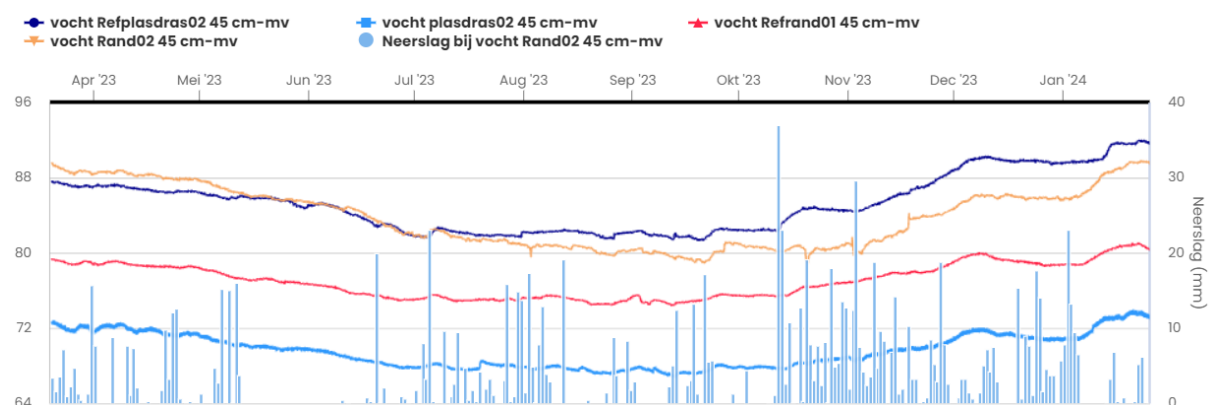
plotselinge daling en toont het later piekje zodra er neerslag valt, wat duidt op luchtgevulde poriën. Op dat moment staat het grondwater op ongeveer 75 cm-mv, 30 cm onder de bodemvochtsensor.

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.

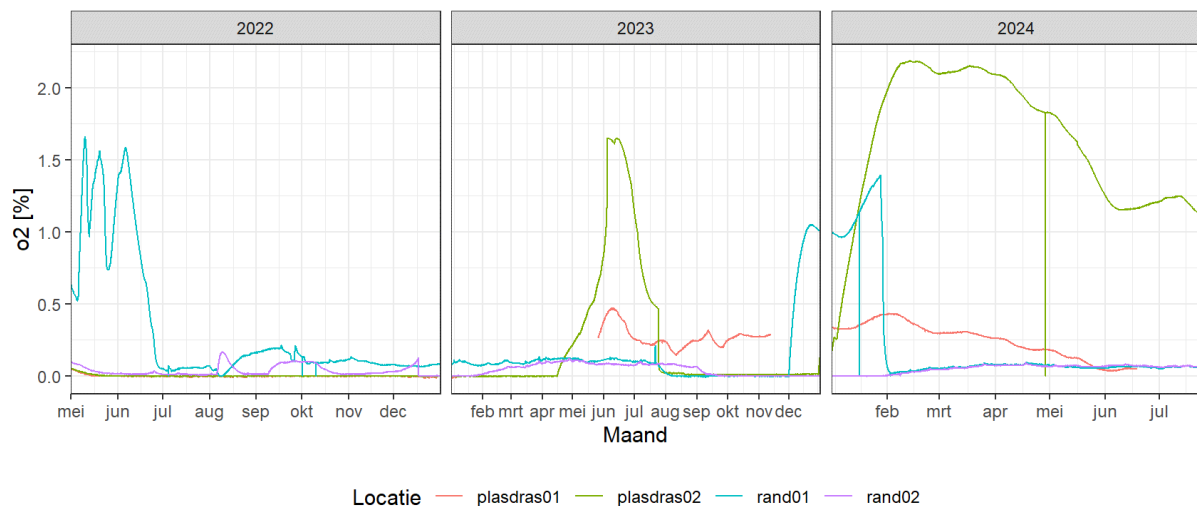
9.3.3.2 Metingen zuurstof

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 waarden 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.

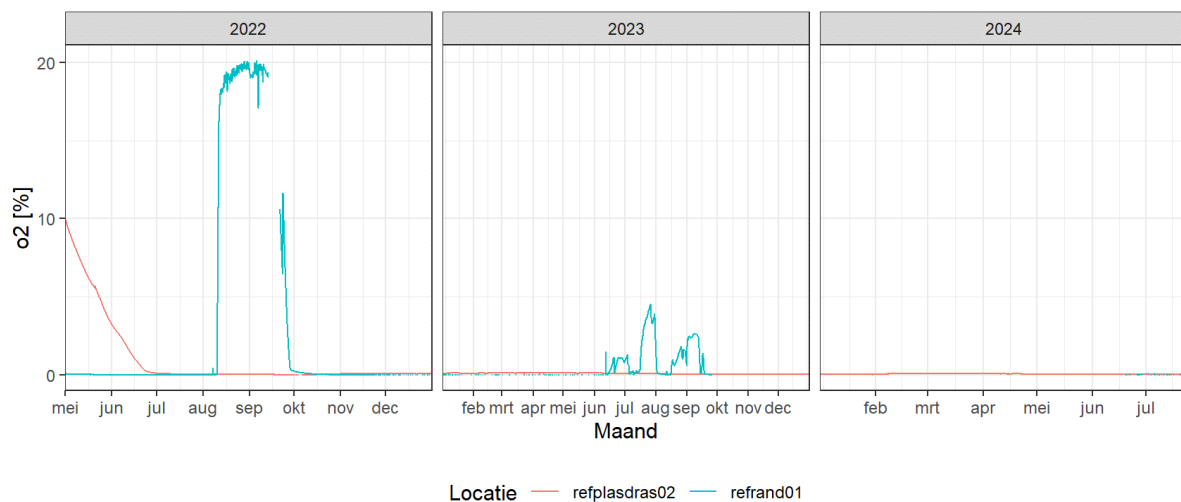
Meetpunt Refrand01 laat wel een duidelijke zuurstofindringing zien, vanaf 10 augustus zijn concentraties gelijk aan atmosferische zuurstofconcentraties (21%). Dit geeft aan dat vanaf dat moment er een goed transport is van zuurstof naar 45 cm-mv. Op het referentieperceel zijn in de zomer dikke brede 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 zuurstofgehaltenes 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.

9.4 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 is kunnen alternatieve electronacceptoren worden gebruikt door bacteriën in de bodem om het organisch materiaal af te breken.

9.4.1 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.

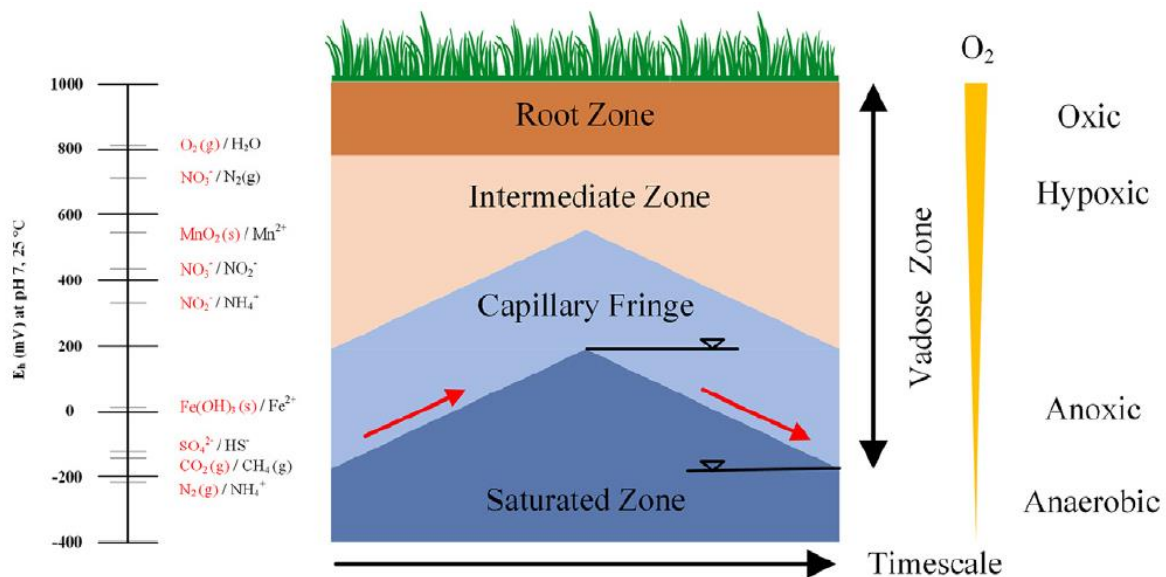
Afbraak van organisch materiaal in de bodem vindt plaats door microbiële processen die afhankelijk zijn van het aanwezige afbraakmilieu en de redoxcondities in de bodem. Hierbij speelt de aanwezigheid van zuurstof een belangrijke rol. Zuurstof is een sterke oxidator, wat betekent dat het gemakkelijk 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 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$) 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.

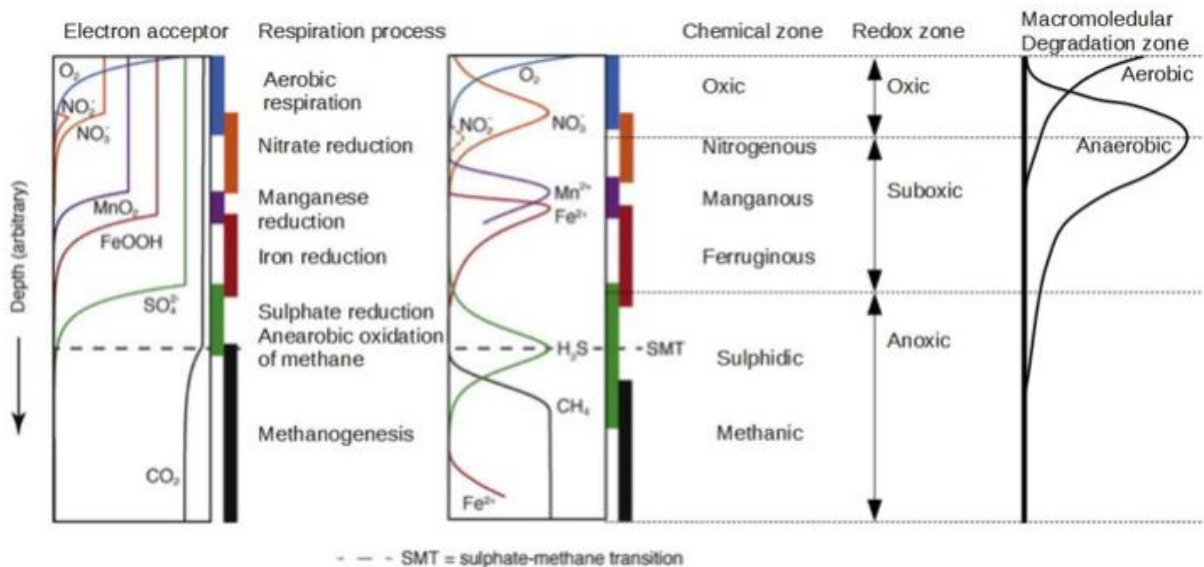
Wanneer het milieu verandert van oxisch naar anoxisch vervangt NO_3^- zuurstof als elektronenacceptor en wordt het gedenitrificeerd tot N_2 en N_2O , waarmee het als gas verdwijnt uit de bodem. Wanneer alle NO_3^- (en in de bodem aanwezige MnO_2 , Fe_2O_3) is opgebruikt, wordt SO_4^{2-} de belangrijkste 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 poriën 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.

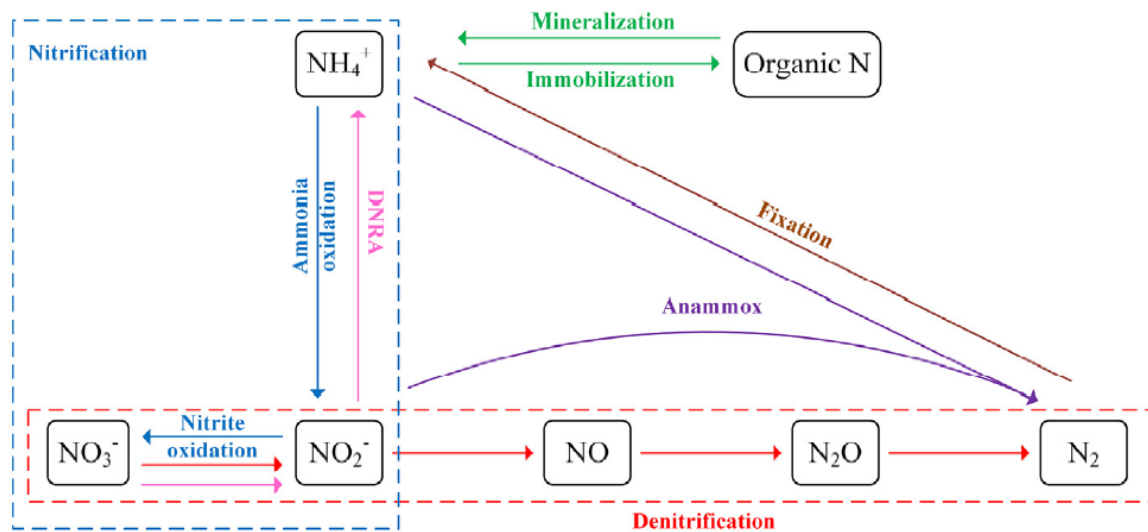


Fig. 3. Main nitrogen transformation processes. Adapted from Guo et al. (2013).

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.

9.4.2 Resultaten van de 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 ($<0.01 \text{ mg l}^{-1}$) 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.

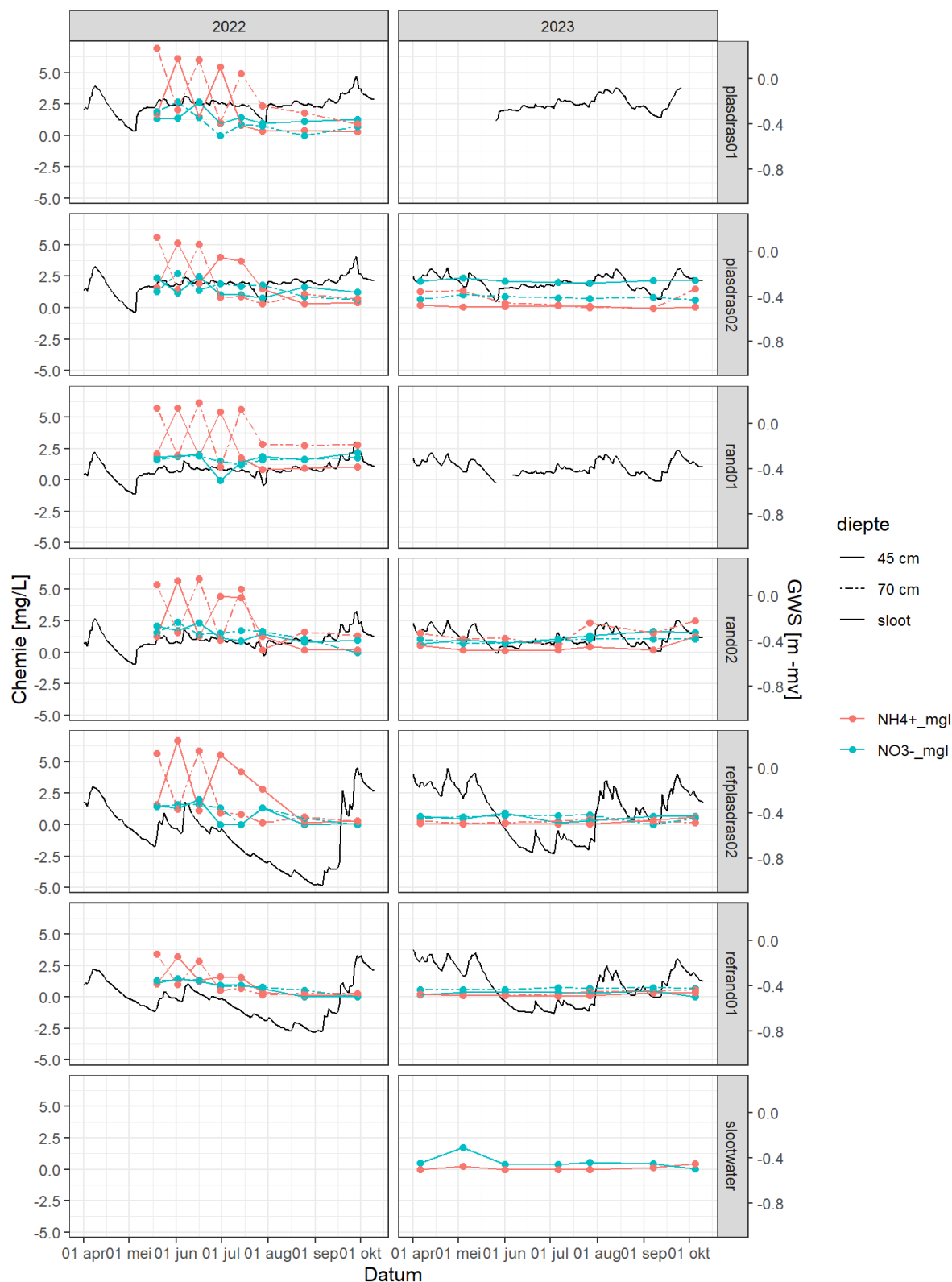
In 2023 zijn nitraatconcentraties in het slootwater gemeten, deze waren vrijwel altijd dicht bij nul. Het infiltratiewater lijkt daarmee geen bron voor nitraat. Daarnaast wordt er al een tijd niet bemest (sinds 2021). Hierdoor is ook te verwachten dat de nitraatconcentraties laag zijn. Ook kunnen lage 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 waarden 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.



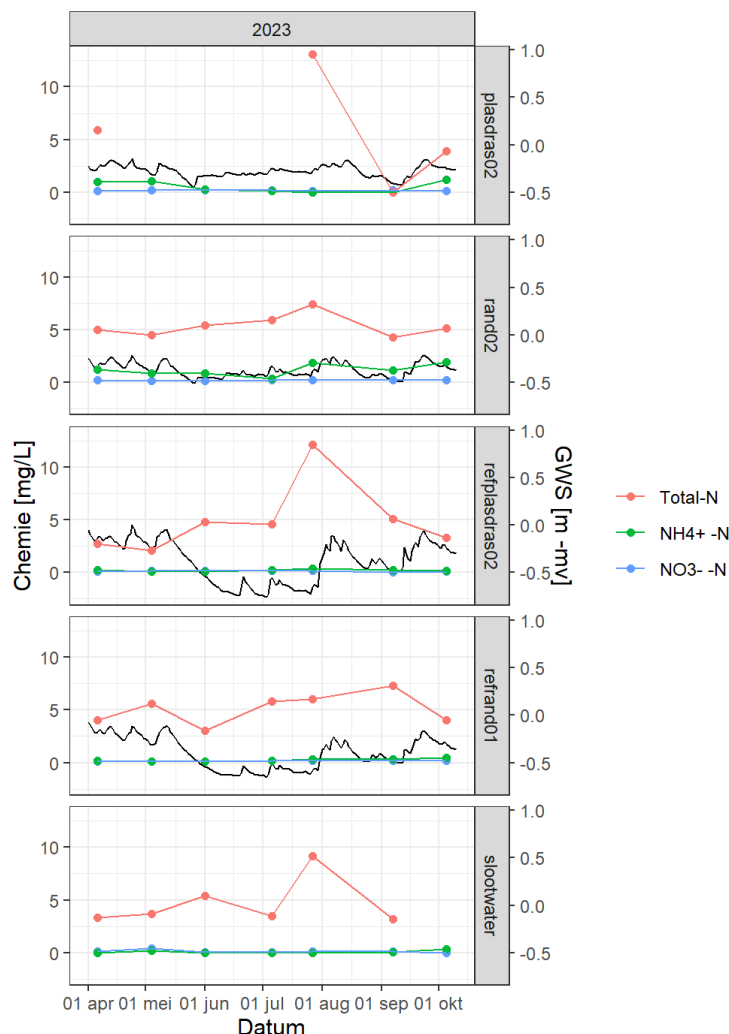
Figuur 30: gemeten nitraat (NO₃⁻, blauw) en ammonium (NH₄⁺, rood) in het bodemvocht op de 6 meetlocaties gedurende de zomer, op twee verschillende dieptes (45 en 70 cm diepte). Ook de grondwaterstand is aangegeven op de secundaire as.

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-oppevlaktewateren van 2.4 mg/L

(<https://www.rivm.nl/landelijk-meetnet-effecten-mestbeleid/nieuwsbrieven/normen-voor-stikstof-in-grondwater-en-oppevlaktewater-onvoldoende-op-elkaar-afgestemd>). Voor grondwater geldt een nitraatnorm van 50 mg/L, wat zich vertaalt 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 Mn^{4+} 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 et al. 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 Mn^{4+} een belangrijke electronacceptator zal zijn in dit type bodems. De lage concentraties in het project Bloemendaal zijn daarmee in overeenstemming.

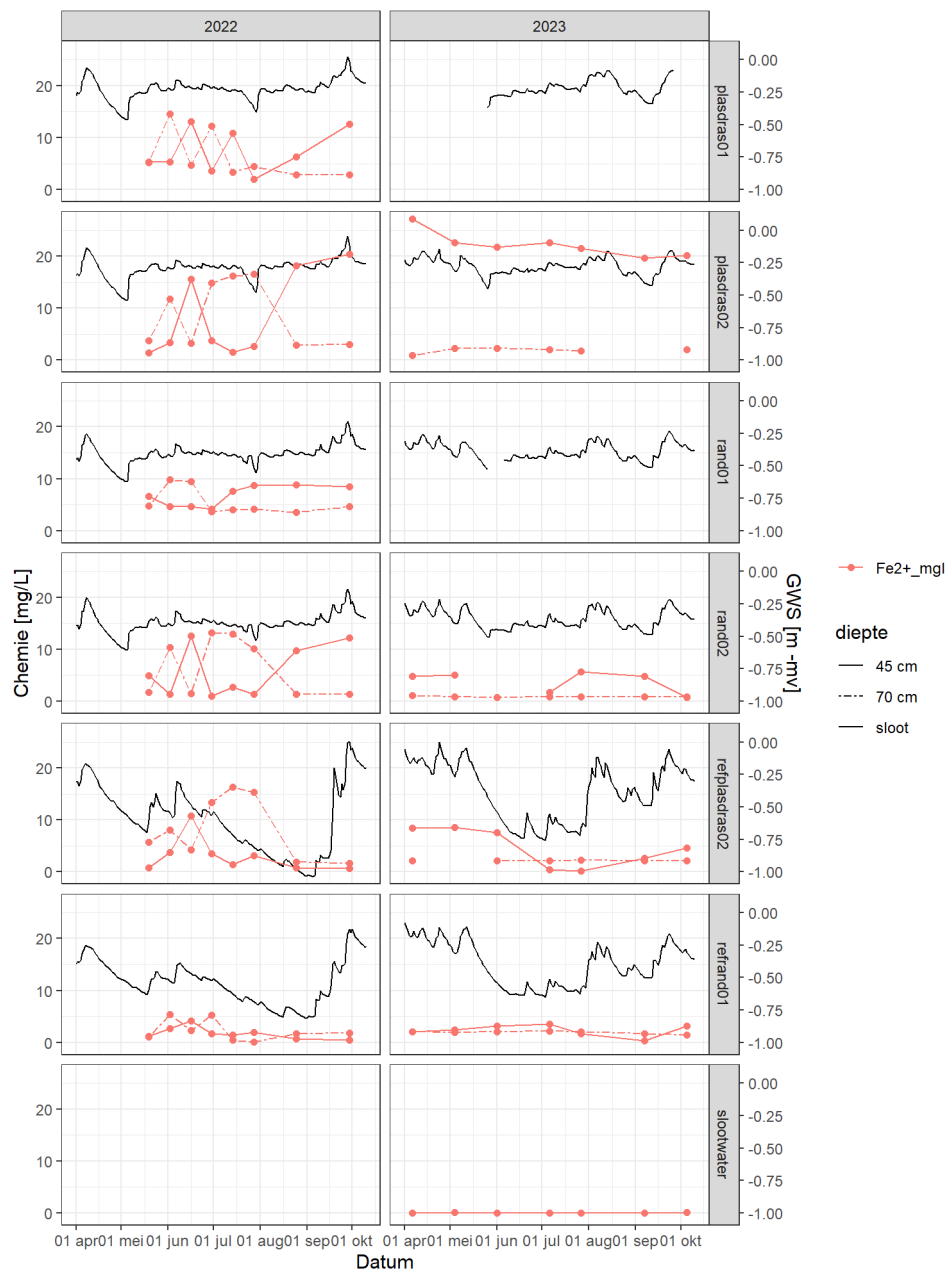
De volgende electronacceptor in de redoxsequentie is ijzer. Door jaren van oxidatie in de veenbodem is ijzer in geoxideerde vorm aanwezig, Fe^{3+} , wat gebonden wordt in de vorm van ijzeroxiden en ook P kan binden (Harpenslager et al. 2024). Wanneer reducerende omstandigheden optreden komt de ijzer als Fe^{2+} 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 stabiel 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 Fe^{2+} naar Fe^{3+} en vervolgens reducerende omstandigheden de ijzeroxiden omzetten en ijzer weer in oplossing brengen als Fe^{2+} . 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.

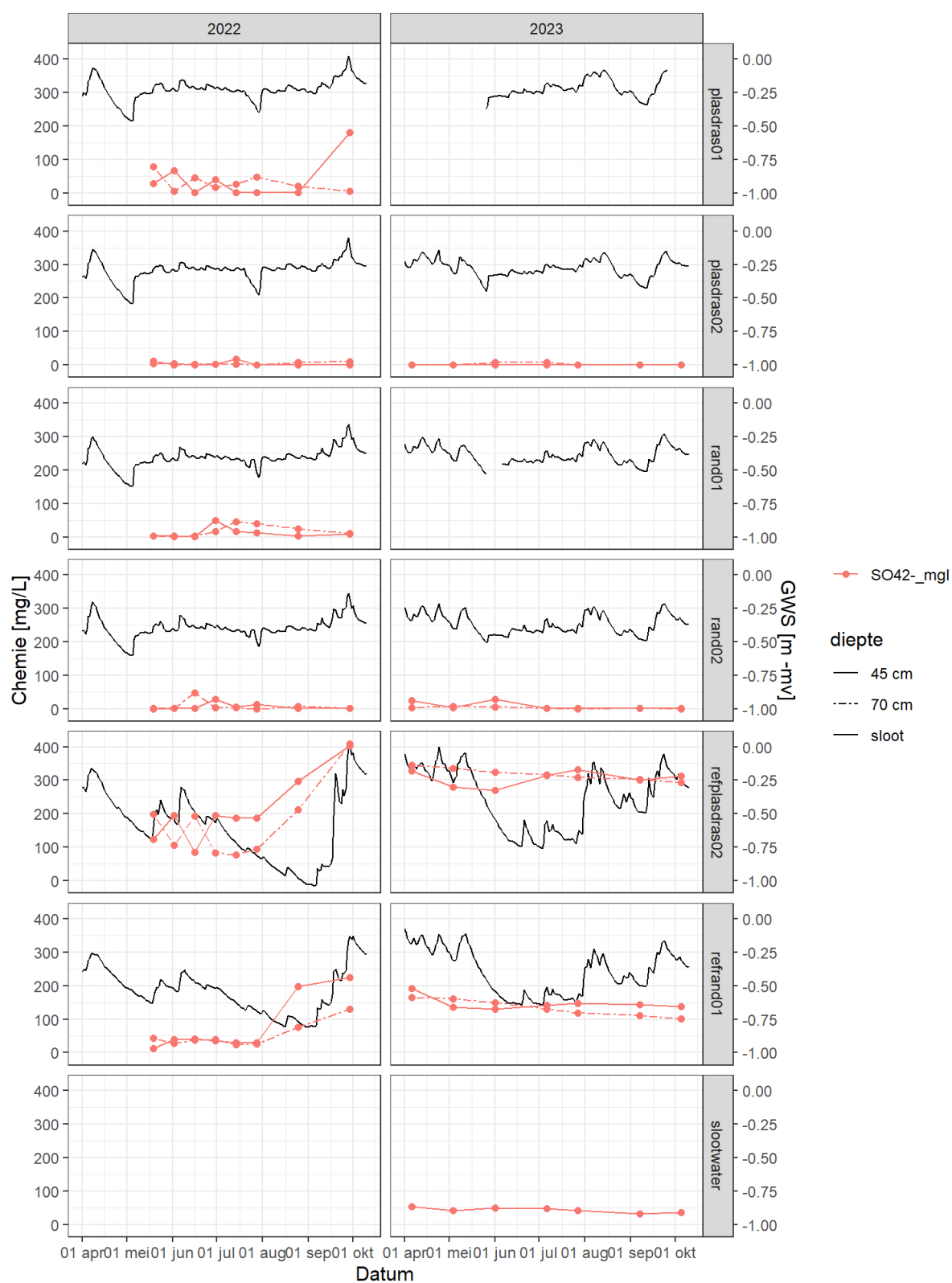
Op het referentieperceel stijgen de concentraties in 2022 daarentegen, naar behoorlijk hoge concentraties. Die stijging zet in met name in de tweede helft van het groeiseizoen, wanneer de grondwaterstand behoorlijk uitzakt. De concentraties zijn het hoogst bij het ondiepe meetpunt en bij refplasdras02, 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.

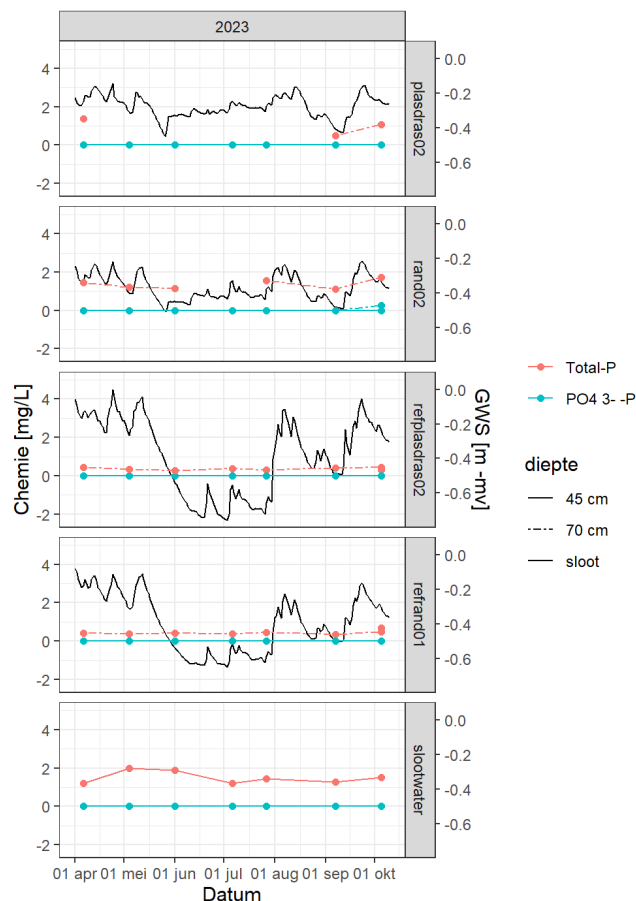
Fosfodynamiek

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 fosfaatsuitleiding 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.

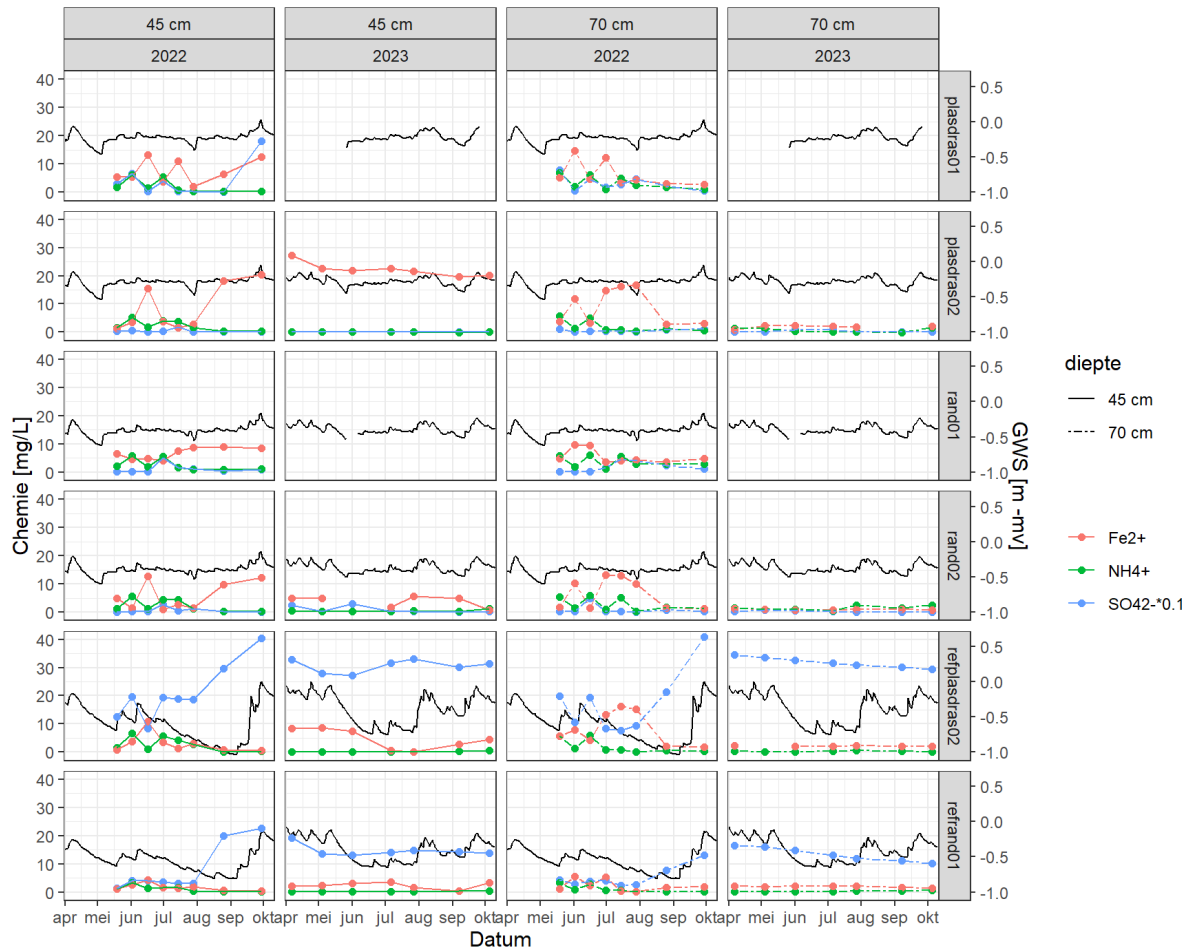


Figuur 34: Fosfaat-P en total P in 2023.

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 het 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.

9.5 Discussie

9.5.1 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 stabiel 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 betreden 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 kleig toemaakdek aanwezig en ook in veel andere delen van het veenweidegebied 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 et al., 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 geïnfilteerd 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.

9.5.2 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 et al., 2024). De anaerobe afbraak kost meer energie en gaat daardoor langzamer dan met zuurstof, maar resulteert ook in afbraak van veen en dus in CO₂ 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 poriën 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 luchtge vulde poriën 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 veenvernating 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 CO₂ 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 CO₂ en methaan. Ook is bij deze metingen geobserveerd dat de CO₂ 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 et al., 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 CO₂, 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.

9.6 Conclusies.

9.6.1. 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?

9.6.2. 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 gewasverdamming.
- 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).

9.6.3. 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 geleid 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

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

Tabel A1: aangelegd monitoringsysteem.

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

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

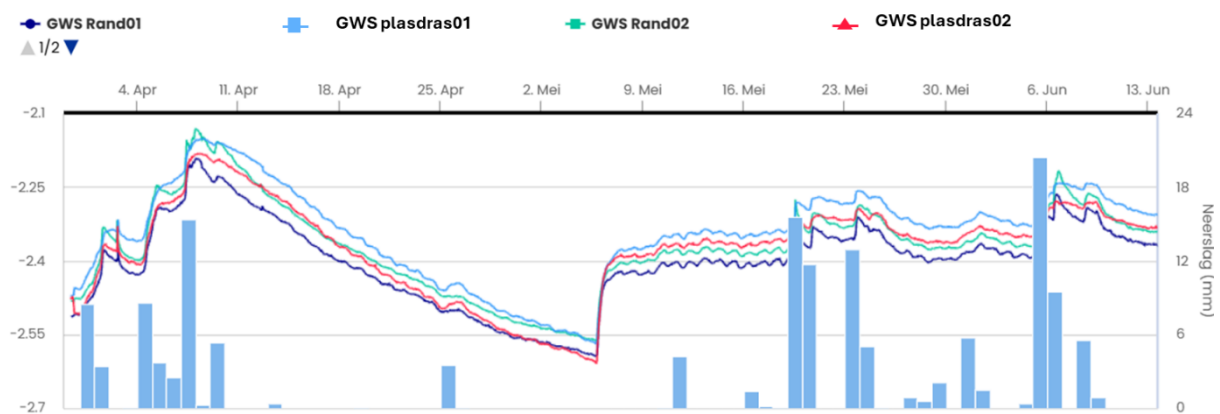
In de sectie hieronder bespreken we per jaar een aantal specifieke momenten van het schuifbeheer en de het effect op de fluxen en de grondwaterstanden.

2022

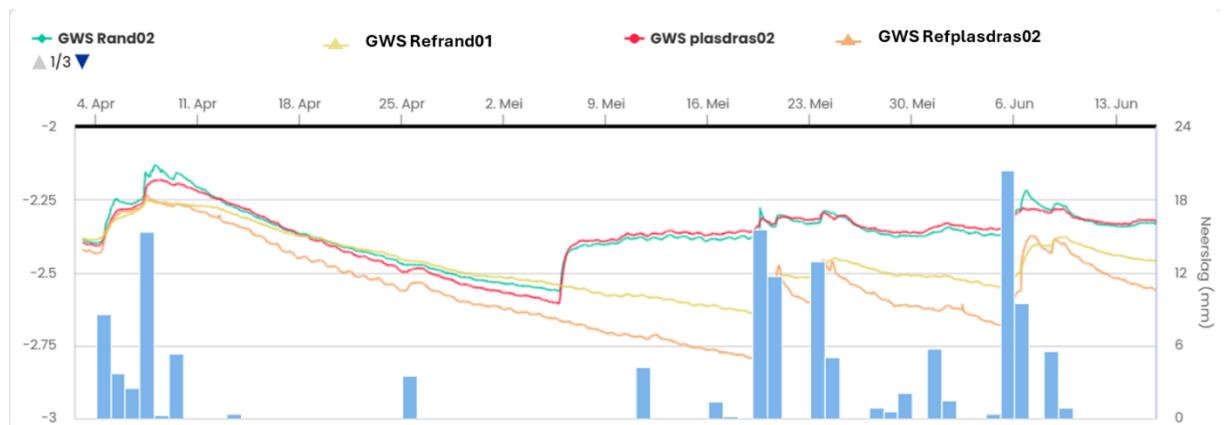
De infiltratie is gestart op 5 mei 2022. De debietmeters hebben echter pas vanaf 28 mei gemeten aan de fluxen in en uit het perceel. Uit de reactie van de grondwaterstanden is wel duidelijk op te maken dat de start van infiltratie direct effect had op de grondwaterstanden bij alle vier de meetpunten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

In de periode vóór het moment van infiltratie zakten 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.



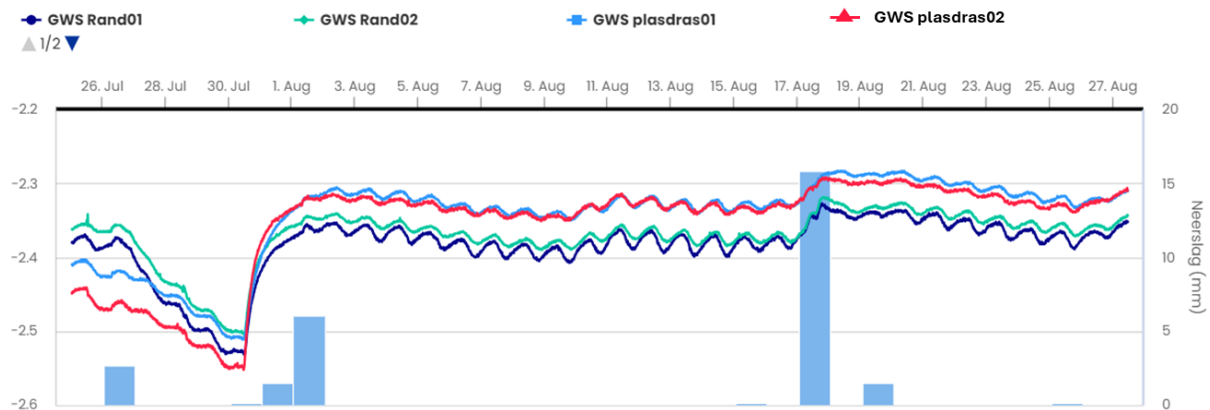
Figuur A1: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in de periode voor en na de start van de infiltratie op 5 mei 2022.



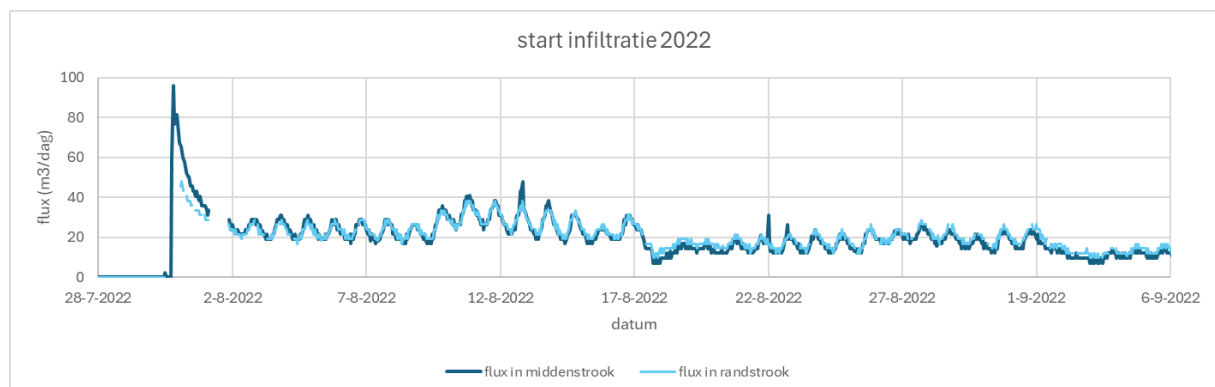
Figuur A2: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte en referentiegedeelte in m-NAP in de periode voor en na de start van de infiltratie op 5 mei 2022.

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 infiltratieflex 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 infiltratieflex is gezakt naar een stabiele waarde die in de periode daarna aanhoudt. In de droge dagen daarna is de infiltratieflex ongeveer constant, maar schommelt met een dag/nachtritme, waarbij de meeste infiltratie overdag plaatsvindt.

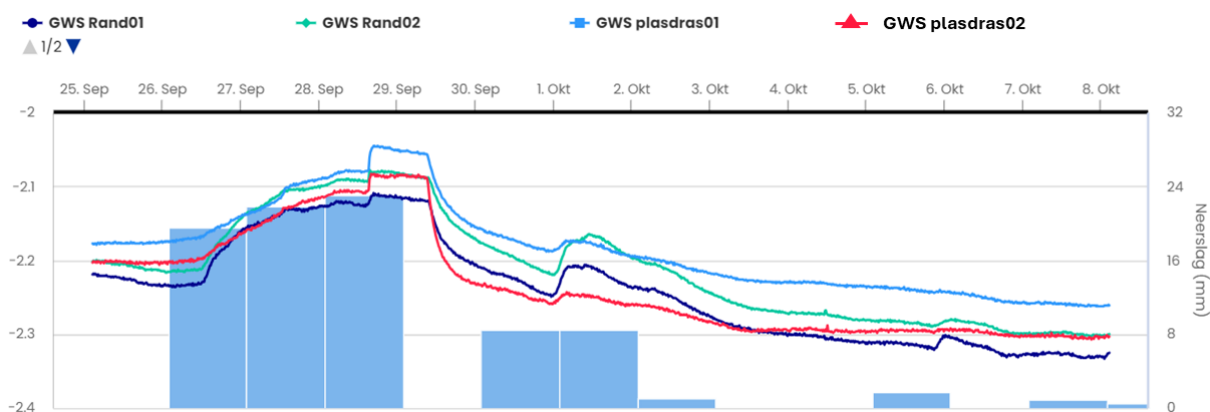


Figuur A3: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in de periode rond 30 juli, toen de schuiven even dichtstonden en op 30 juli opnieuw open werden gezet, waarna infiltratie plaats kon vinden.

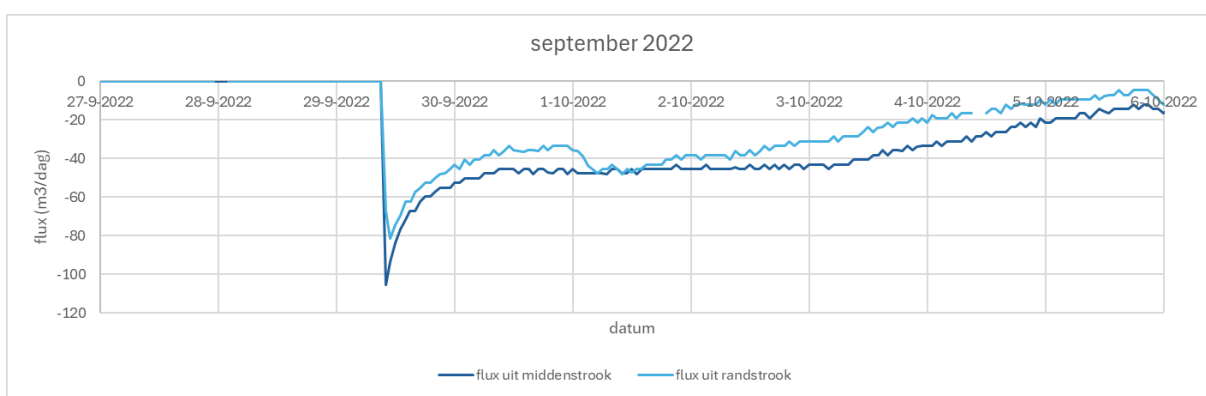


Figuur A4: gemeten infiltratieflex in midden- en randzone op het proefgedeelte in de periode rond 30 juli, toen de schuiven even dichtstonden en op 30 juli opnieuw open werden gezet, waarna infiltratie plaats kon vinden.

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.

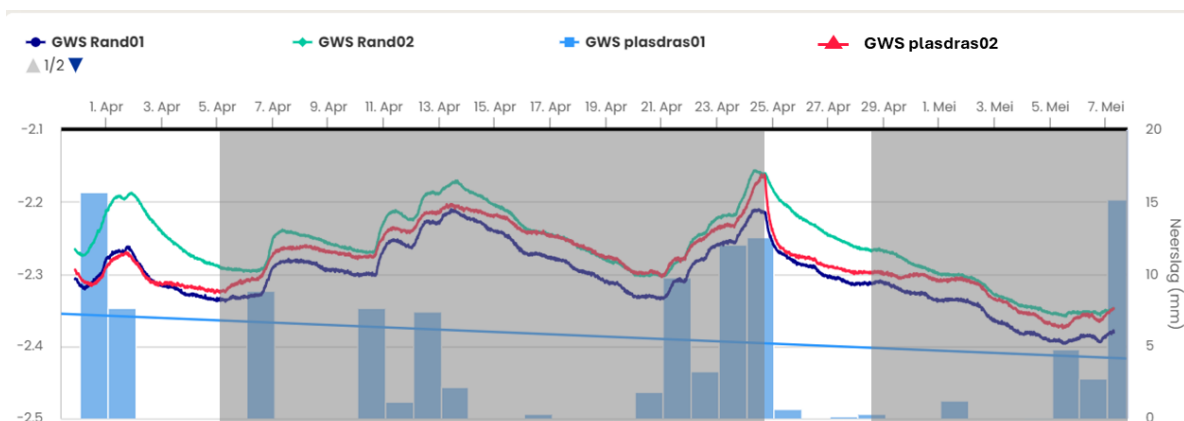


Figuur A6: gemeten drainageflux in midden- en randzone op het proefgedeelte in de periode rond 29 september. Schuiven werden geopend op 29 september ten behoeve van drainage.

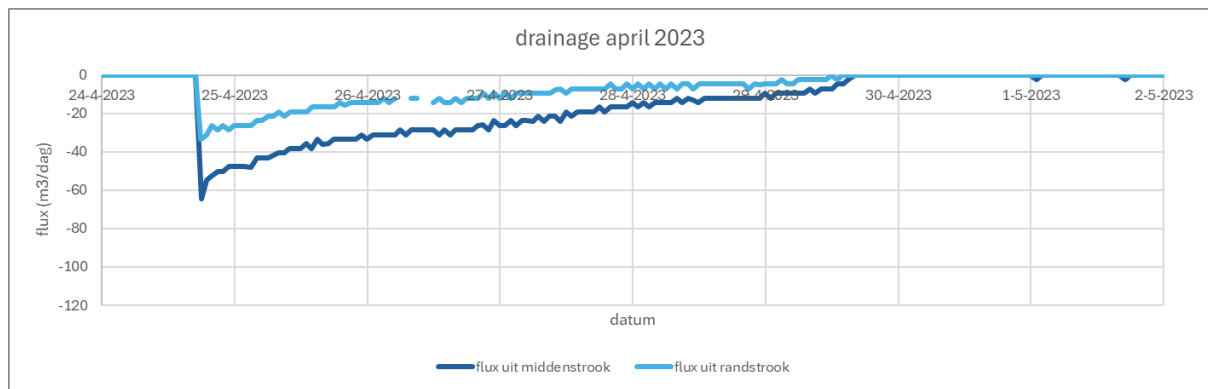
2023

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.



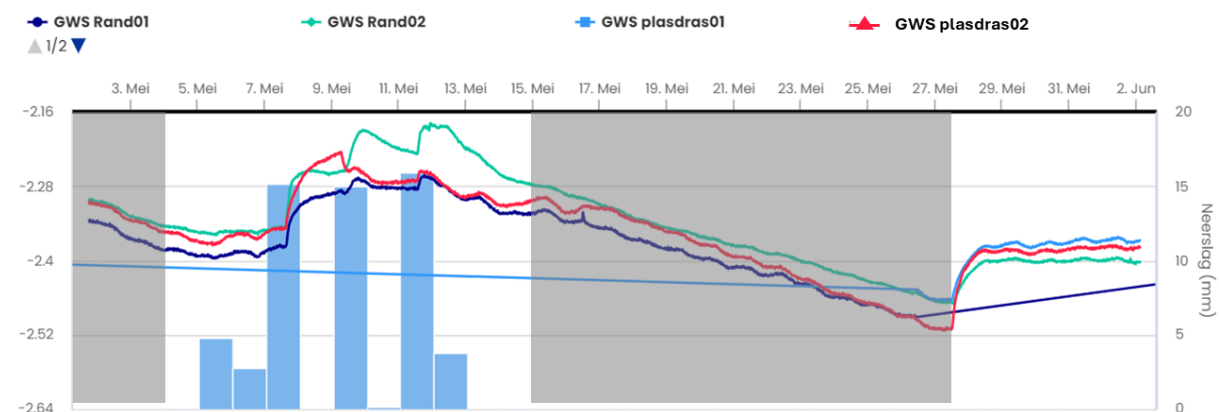
Figuur A7: gemeten grondwaterstanden op het proefgedeelte in m-NAP in het voorjaar van 2023. In de grijs beschaduwde periodes in de grafiek stonden schuiven gesloten om regenwater vast te houden. In de periode daartussen werden ze even geopend ten behoeve van drainage.



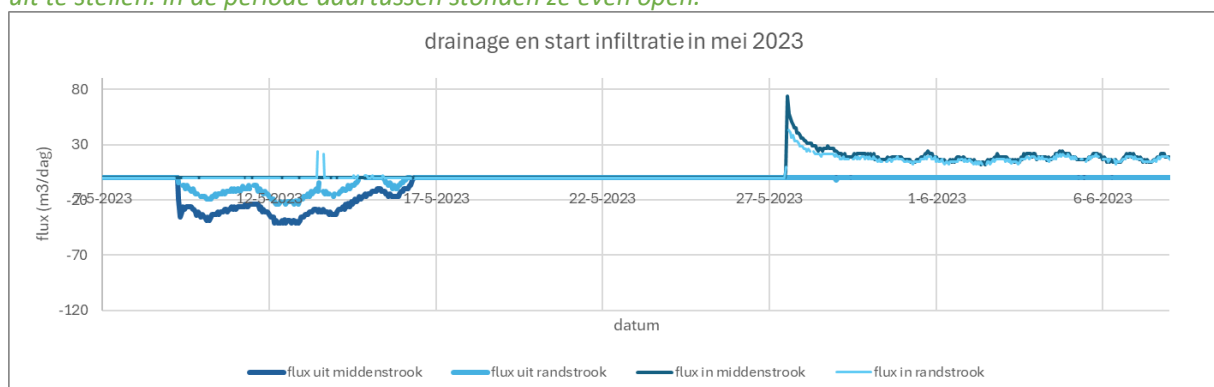
Figuur A8: gemeten drainageflux in midden- en randzone in de periode dat schuiven tijdelijk openstonden, voorjaar 2023 (let op, tijdschaal is anders dan in figuur A7).

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.



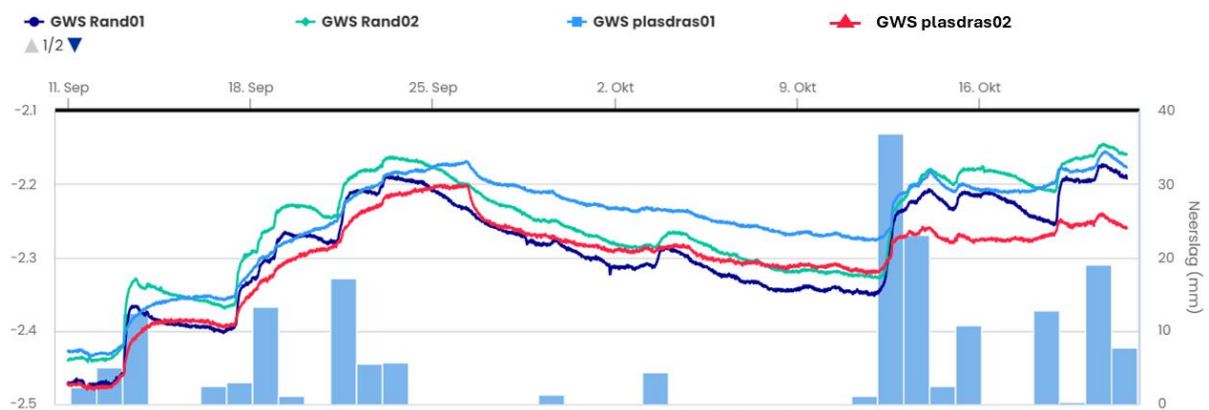
Figuur A10: gemeten drainageflux in midden- en randzone in de periode van mei 2023. In de eerste periode dat de schuiven openstonden trad drainage op door de hoge grondwaterstanden. In de tweede periode trad infiltratie op doordat de grondwaterstanden al verder waren uitgezakt.

September en oktober: drainage

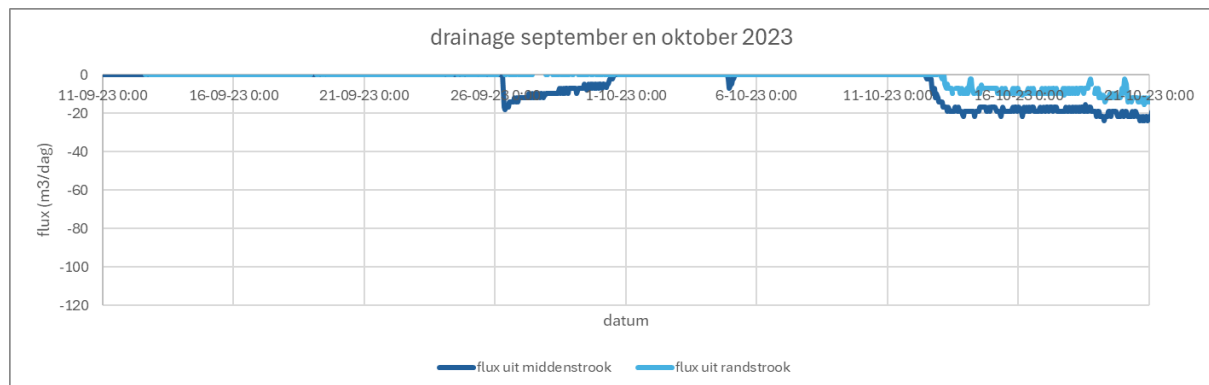
Vanwege voldoende neerslag in de tweede helft van de zomer hebben de schuiven voornamelijk dicht gestaan om water te bufferen in het perceel. Op 26 september zijn ze opengezet op de middenstrook ten behoeve van drainage. Dit is duidelijk terug te zien in de grondwaterstanden, die op dat moment sneller 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 grondwatervluchten rond deze tijd ongeveer gelijk zijn aan het slootwatervlucht (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.

10 Broeikasgas-fluxen

Dit hoofdstuk is geschreven door Ko van Huissteden van Kytalyk Carbon Cycle Research. Het is ook uitgekomen als deelrapport: 'Broeikasgas-fluxen uit een koopveenbodem in Polder Bloemendaal (Waddinxveen, Zuid-Holland (Lit.10.).

Inhoud

Samenvatting	77
10.1 Inleiding	80
10.2 Nieuwe inzichten omtrent omzetting van organische stof in veenbodems	81
10.3 Methoden	83
10.3.1 Het proefperceel	83
10.3.2 Meetmethoden	85
10.3.2.1 CO ₂ /CH ₄ metingen	85
10.3.2.2 Meetonzekerheid broeikasgasmetingen	87
10.3.2.3 Bodemprofiel	89
10.3.2.4 Biomassa	89
10.3.2.5 Weerstation	89
10.3.2.6 Water	89
10.3.3 Bepaling van de jaarbalans en veenoxidatie	89
10.3.3.1 Peatland-VU	91
10.3.3.2 Aanpak parameter onzekerheid van het model	95
10.4 Resultaten	98
10.4.1 Het bodemprofiel	98
10.4.2 Biomassa	98
10.4.3 Broeikasgasmetingen	98
10.4.3.1 Beschrijving van de metingen	98
10.4.3.2 Statistische analyse	102
10.4.3 Modelleren van de broeikasgasfluxen met Peatland-VU	108
10.4.1 Jaarbalans	116
10.4.2 Bodemdaling	120
10.5 Discussie	120
10.5.1 Welke emissie uit de bodem?	120
10.5.2 Onzekerheden	121
10.5.3 Bodemdaling	124
10.6 Conclusies en aanbevelingen	125
Dankbetuiging	127
Literatuur	127
Appendix I	132
Appendix II	148
Appendix III	149

Samenvatting.

Een belangrijke oorzaak van bodemdaling in veenbodems is verlaging van de grondwaterstand. Daarbij kan zuurstof in de bodem doordringen, wat leidt tot afbraak van het veen waaruit de bodem bestaat. Een tweede effect van lage grondwaterstand is de uitstoot van het broeikasgas CO₂, wat bijdraagt aan klimaatverandering. Een van de middelen om dit proces te vertragen of te stoppen is verhoging van de grondwaterstand door 'onderwaterdrainage' (omgekeerde drainage): aanleg van een systeem van drainagebuizen die in de winter overtollig water in de bodem afvoeren en in droge

perioden in de zomer vanuit de sloten water aanvoeren om de grondwaterstand in het veenpakket op peil te houden.

In een proefproject voor omgekeerde drainage in Polder Bloemendaal in het kader van de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart zijn in 2022 en 2023 metingen gedaan om de uitstoot van CO₂ en CH₄ uit de bodem te kwantificeren. CH₄ (methaan) is ook gemeten, omdat verhoging van grondwaterstand in de bodem kan leiden tot extra uitstoot van dit sterke broeikasgas. De bodem bestaat uit een voor de regio representatieve ‘koopveengrond’ met een kleig toemaakdek.

De metingen zijn uitgevoerd met een geautomatiseerd kamersysteem (afsluitbare cilinders op de bodem waarin toename van gasconcentratie gemeten wordt), dat zowel overdag als ‘s nachts metingen uitvoert. Het systeem is ingezet in een reeks meetcampagnes van 4-5 dagen in de zomer en winter. Met de metingen zijn een perceel met omgekeerde drainage (maatregel), en een perceel zonder maatregel (referentie) onderzocht. Het drainagesysteem is in 2021 aangelegd en in mei 2022 in werking gesteld.

De gemeten verschillen in CO₂ uitstoot tussen maatregel en referentie geven een schatting van de maximale afname van veenoxidatie. Er treden echter ook veranderingen in vegetatie (dichtheid, doorworteling) op door de maatregel, die bijdragen aan verschillen in CO₂ flux uit de bodem. Dit is echter CO₂ dat recent door fotosynthese geassimileerd is, en niet afkomstig uit veen. Daarom is naast de metingen ook een veenbodem-model (Peatland-VU) gebruikt om de bijdrage van veenafbraak in de gemeten CO₂-fluxen nauwkeuriger in te schatten. Dit model is tevens in staat om fluxen van CH₄ te berekenen. Het model is geijkt op de metingen van nachtelijke CO₂ flux (ecosysteemrespiratie), het dagelijkse gemiddelde van de CO₂ flux inclusief fotosynthese en de CH₄ flux. De modelsimulaties geven de verschillende koolstofstromen in de bodem als uitkomst, waaronder CO₂ dat ontstaat door omzetting van veen door micro-organismen.

Nieuwe inzichten uit metingen van de redox-potentiaal in veenbodems op andere veenweide-locaties laten zien dat vrij zuurstof niet overal in de bodem kan doordringen bij lage grondwaterstand, ook boven de grondwaterspiegel niet. De bodem is gedeeltelijk anaeroob (zuurstofloos). Onder die omstandigheden wordt ook veen afgebroken door anaerobe processen (reductie van nitraat, sulfaat en mangaan/ijzeroxiden). Deze processen verlopen veel trager dan oxidatie van veen door zuurstof, maar dragen wel bij aan de uitstoot van CO₂ en de afbraak van veen. Het Peatland-VU model is aangepast om dit effect ook te kunnen simuleren.

Beide meetjaren contrasteren sterk in weerpatronen. In het voorjaar en zomer van 2022 trad een langdurige droogteperiode op, gevolgd door een natte herfst en winter. Een droge periode in de zomer van 2023 was veel korter, waarna een herfst en winter met extreme neerslaghoeveelheden volgde. De droge periode in 2022 veroorzaakt op grote schaal scheuren in de kleige bovenlaag van de bodem op de referentie-locatie. De beginnende scheurvorming tijdens de droogte in maart en april zette op het gedraineerde perceel niet door na start van de infiltratie. Scheurvorming heeft sterk bijgedragen aan hoge CO₂-uitstoot uit het referentie-perceel in juli-augustus 2022.

De modelsimulaties zijn beter vergelijkbaar met de waarnemingen wanneer anaerobe omzetting van veen in het model wordt opgenomen, dan wanneer alleen oxidatie door zuurstof wordt aangenomen. Ook de daaruit geschatte bodemdaling (2.1 – 3.5 mm/jaar) komt beter overeen met de bodemdaling die in de omgeving wordt gemeten met behulp van radarsatellieten (±2 mm/jaar). Anaerobe omzetting van veen onder de grondwaterspiegel draagt ook bij aan bodemdaling waardoor bodemdaling waarschijnlijk nooit helemaal te reduceren zal zijn met alleen maatregelen die de grondwaterspiegel beïnvloeden.

De aangelegde onderwaterdrainage heeft een duidelijk gunstige invloed op de hoeveelheid koolstof die door veenoxidatie uit de bodem ontwijkt. In 2022 bedroeg volgens het model de vermeden broeikasgasemissie 3.8 ton CO₂ equivalent per hectare (rekening houdend met een licht verhoogde CH₄ emissie op het maatregelperceel). In het natte jaar 2023 was de vermeden broeikasgasemissie door de maatregel nihil. In deze resultaten is ook rekening gehouden met 14% greppel- en slootranden, die een lagere CO₂-emissie hebben. Wanneer alleen met aerobe processen gerekend wordt is de vermeden emissie aanzienlijk hoger: 12.4 en 2.9 ton CO₂ equivalent/ha. Dit moet echter als een overschatting beschouwd worden, gezien de nieuwe inzichten omtrent anaerobie boven de grondwaterspiegel.

Onzekerheden in het model zijn onzekerheden omtrent afbraakconstanten van anaerobe omzetting van organische stof en het ontbreken van scheurvorming in het model, waardoor de CO₂-uitstoot in de zomer van 2022 waarschijnlijk iets te laag wordt ingeschat. Overigens zijn de modeluitkomsten gecorrigeerd met de waarnemingen voordat de totale emissies berekend zijn.

Uit de grote verschillen tussen beide jaren blijkt een sterke weersafhankelijkheid van de veenoxidatie. Beide jaren kunnen waarschijnlijk gezien worden als extremen waartussen de effectiviteit van onderwaterdrainage ligt, gegeven de huidige klimaatomstandigheden. Voor de inschatting van de bodemdaling is van belang dat er ook organisch koolstof via het grondwater en drains afgevoerd kan worden. Hierover kan dit rapport geen uitsluitsel geven. Andere onzekerheden liggen in de meetonzekerheid, vooral in droge perioden met scheurvorming en ten gevolge van ruimtelijke variatie in de CO₂ fluxen.

10.1 Inleiding.

In 2021 is in het kader van de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart een proefproject gestart naar maatregelen ter voorkoming van bodemdaling en CO₂uitstoot uit veenbodems in de Polder Bloemendaal ten noorden van Gouda. De penvoerder en organisator van dit project is de Stichting Weids Bloemendaal. Basis voor het proefproject vormde het Manifest Duurzame Ontwikkeling Polder Bloemendaal, dat door bewoners, gebiedspartijen, (waaronder gemeente Waddinxveen en het Hoogheemraadschap Rijnland) is opgesteld. Het onderzoek naar mogelijkheden om bodemdaling te beperken is een onderdeel van dit manifest.

In droge perioden kan door verdamping de grondwaterstand in veenbodems diep uitzakken tot een meter onder het maaiveld en circa 70 cm beneden slootpeil. Daardoor kan zuurstof diep in het veen doordringen en vindt

Figuur 1: Schematische dwarsdoorsnede van een weiland met sloten in het veenweidegebied. Boven: de hoogte van de grondwaterspiegel in een droogteperiode in de zomer. Midden: de grondwaterspiegel in de winter. Veenafbraak en bodemdaling treden het sterkst op afstand van de sloten, en veroorzaken een hol hoogteprofiel van het perceelsoppervlak.



veenoxidatie plaats, wat zowel bodemdaling als CO₂-uitstoot veroorzaakt. De oorzaak hiervan is de slechte doorlatendheid voor water van de veenbodem; vaak bevindt zich dichtbij de slootkanten nog een zone met slechte horizontale doorlatendheid (het 'slootkanteffect' van Sonneveld, 1954).

De ondergrondse wateraanvoer uit de sloten kan daardoor de verdamping niet bijhouden in droge perioden (Fig. 1). Doordat dichtbij de sloten nog wel een hoge grondwaterstand gehandhaafd blijft, is daar de veenoxidatie geringer dan in het midden van het perceel. Er ontstaat door de sterkere bodemdaling in het midden een holle ligging van het oppervlak, met een laagte in het midden en hogere randen langs de sloten. Dit is ook in Polder Bloemendaal het geval.

Het doel van dit project is kennisontwikkeling; de onderzochte maatregel om bodemdaling en CO₂uitstoot te verminderen, betreft onderwater-drainage (OWD). Met OWD wordt via drainagebuizen water uit de sloten aangevoerd naar de veenbodem, om het waterniveau in de bodem hetzelfde peil als dat van de sloot te houden. In de tweede helft van 2021 is de

onderwaterdrainage aangelegd in de westelijke helft van het onderzoeksperceel; de oostelijke helft zonder maatregel dient als referentieperceel.

Op dit moment loopt ook een groot landelijk onderzoeksproject naar bodemdaling en broeikasgasemissie in Nederlandse veengebieden, het door STOWA geregistreerde landelijke onderzoeksproject NOBVeenweiden, met meerdere onderzoekslocaties met onderwaterdrainage in het veenweidegebied van Zuid-Holland tot Friesland. De onderzoekslocatie in de Polder Bloemendaal maakt daar geen deel van uit. Een uniek aspect van het onderzoeksperceel in Polder Bloemendaal is, dat het de laatste jaren niet wordt bemest en alleen met schapen werd begraaasd. Tijdens het onderzoek is overigens geen begrazing schapen geweest; wel begrazing door ganzen en smienten. De vegetatie is hierdoor diverser dan in gangbare veenweiden. Hierin verschilt het van alle andere veenweidepercelen in NOBV, die voor melkveehouderij gebruikt worden en worden bemest.

Het onderzoek is gestart in 2022. Metingen van grondwaterstanden, bodembeweging en waterchemie worden uitgevoerd door onderzoeksbureau Acacia Water te Gouda. Metingen aan gasemissie uit de bodem, die ook kunnen dienen om de mate van veenoxidatie in te schatten, werden uitgevoerd door V.O.F. Kytalyk Carbon Cycle Research in de periode 2022-2023.

Dit rapport presenteert de onderzoeksresultaten van de CO₂- en CH₄-emissie uit de bodem over 2022 en 2023, en volgt op de rapportage van het eerste jaar, 2022 (Van Huissteden, 2023). Dit eerste rapport bestond uit een presentatie van de metingen over 2022. In dit rapport worden ook de meetgegevens van 2023 gepresenteerd, en vindt een verdere analyse van de meetgegevens plaats. Om de veenoxidatie in te schatten dienen de onderzoeksgegevens nader uitgewerkt te worden met een numeriek model van de bodemprocessen. De analyse in dit rapport betreft:

- Uitbreiding van de statistische analyse met de meetgegevens uit 2023;
- Modellerings van de jaarbalans en de veenoxidatie met behulp van het Peatland-VU model.

Rapportage over grondwaterstanden, grondwaterchemie en bodembeweging wordt door Acacia Water verzorgd.

Er is een groot verschil tussen de beide meetjaren. Het jaar 2022 had een langdurige droogteperiode die duurde tot 13 september. Daarin daalde de grondwaterstand scherp en er ontstonden diepe scheuren in de kleiige bovengrond in het referentieperceel (Van Huissteden, 2023). Daarna viel in korte tijd veel regen, steeg de grondwaterspiegel snel en daalde de temperatuur. Het jaar 2023 was een extreem nat jaar; zelfs het natste jaar ooit gemeten, hoewel er in mei en juni een lange droge periode was (KNMI, <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/weeroverzicht-2023>). Dit is een unieke situatie. Hierdoor konden tijdens de uitersten van voor veenoxidatie relevante weersomstandigheden in het huidige klimaat in twee jaar gemeten worden.

10.2 Nieuwe inzichten omtrent omzetting van organische stof in veenbodems.

Over het algemeen wordt aangenomen dat indringing van zuurstof in de veenbodem de belangrijkste oorzaak is voor oxidatie van veen tot CO₂. Een belangrijke bron van onzekerheid is de anaerobe omzetting van veen en andere organische stof. Onder anaerobe omstandigheden wordt CO₂ geproduceerd door:

1. Acetoclastische methaanvorming (omzetting van organische zuren), waarbij gelijke hoeveelheden CO₂ en CH₄ moleculen geproduceerd worden; in het model is acetoclastische

methaanvorming aangenomen. Dit wordt doorgaans voorafgegaan door bacteriële omzetting van organische stof in organische zuren en alcohol.

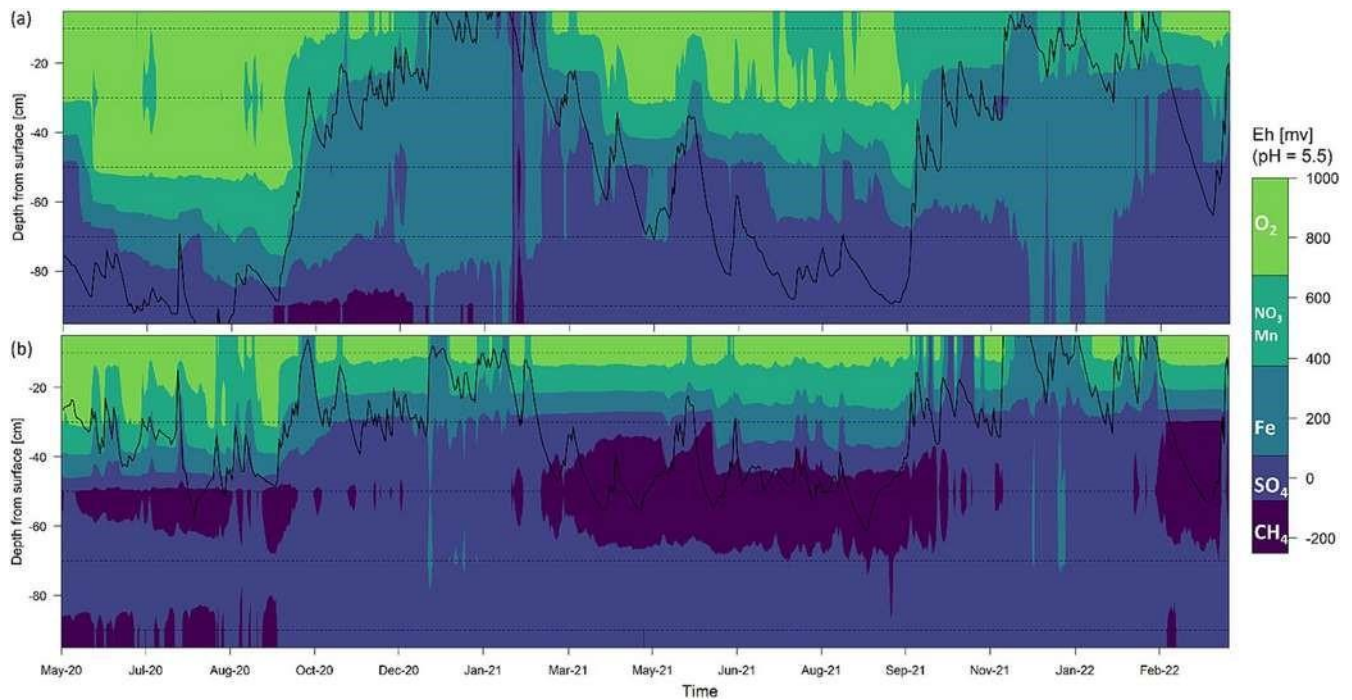
2. Sulfaatreductie: hierbij wordt zuurstof uit sulfaat (SO_4^{2-}) gebruikt om organische stof om te zetten tot CO_2 .
3. Reductie van ijzer-oxiden, waarbij de aan deze oxiden gebonden zuurstof wordt gebruikt.
4. Reductie van mangaan-oxiden.
5. Nitraatreductie: hierbij dient nitraat (NO_3^-) als oxidator.

Reactie 1 tot 3 vinden alleen plaats bij strikte afwezigheid van vrij zuurstof, onder strikt anaerobe omstandigheden; de overige reacties door organismen die ook van zuurstof gebruik kunnen maken (Boonman et al., 2024 en referenties daarin). Dat wil overigens niet zeggen dat deze reacties alleen onder de grondwaterspiegel plaatsvinden. Ook boven de grondwaterspiegel kan de bodem nog dusdanig met water verzadigd zijn, dat zuurstof via diffusie nauwelijks kan doordringen. Dat geldt vooral voor veen- en kleibodems. De bodem kan dan zelfs zo anaeroob zijn dat er boven de grondwaterspiegel nog methaanvorming kan optreden, afhankelijk van bodemstructuur (Wagner et al., 1999). Boonman et al. (2024) hebben met continue metingen van redoxpotentiaal en grondwaterstand aangetoond dat in veenweidebodems bij diepe grondwaterstanden in de zomer (tot 80 - 100 cm diepte) zuurstof zo slecht in de bodem doordringt, dat tot op 50 a 60 cm boven de grondwaterspiegel alleen anaerobe reacties optreden. Hoger in het profiel is dat nitraatreductie, wat bevorderd kan worden door nitraat uit bemesting. Wat dieper (tot 40 cm boven de grondwaterspiegel) zijn dit ook strikt anaerobe reacties op zoals sulfaat- en ijzerreductie. Nog dieper blijkt zelfs CH_4 boven de grondwaterspiegel nog mogelijk (Fig. 2).

Eerder onderzoek van Vermaat et al. (2013) en het werk van Boonman et al. (2024) en Harpenslager et al. (2024) in het Nederlandse veenweidegebied toont aan, dat er in anaerobe omzetting van veen ook een antropogene component aanwezig is. In de eerste plaats door beïnvloeding van de waterkwaliteit: aanvoer van nitraat door bemesting en via oppervlaktewater, en aanvoer van sulfaathoudend water uit verschillende bronnen, waaronder pyriethoudend oxiderend veen (Vermaat et al., 2013). In de tweede plaats, doordat bij diepere grondwaterstanden gereduceerd stikstof, ijzer, mangaan en zwavel

opnieuw geoxideerd kunnen worden, waardoor deze oxidatoren weer opnieuw een bijdrage aan veenafbraak kunnen leveren wanneer de grondwaterstand stijgt na droogte. Op basis hiervan zou het

gerechtvaardigd zijn om de anaerobe afbraak van veen naar CO_2 wel mee te rekenen, zeker als het gaat om anaerobe afbraak boven de grondwaterspiegel.



Figuur 2. Zonering van de diepte (y-as) met dominant oxidatiemiddel (of het product in het geval van CH_4) in de loop van de tijd (x-as) op basis van continue pH-gecorrigeerde redoxpotentiaal (Eh)metingen ($\text{pH} = 5,5$) in de (a) referentie en (b) onderwaterdrainage-perceel in Zegveld. De zwarte lijn geeft de gemeten grondwaterstanden weer. De SSL redoxsonde en grondwatermeting bevonden zich op een afstand van 1,5 m loodrecht op de drain. De meetdiepten worden weergegeven met horizontale stippellijnen. Uit: Boonman et al., 2024, CC BY creative commons licentie (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

10.3 Methoden

10.3.1 Het proefperceel

Het proefperceel is gelegen in Polder Bloemendaal in Waddinxveen tussen de Winterdijk en de Bloemendaalseweg (Fig. 3). Het perceel is representatief voor het veenweidegebied van Polder Bloemendaal, en voor overige polders in het westelijk veenweidegebied met vergelijkbare bodemopbouw. Voor de selectiecriteria zie hoofdstuk 2.4. van deze integrale rapportage van het onderzoeksproject. Het proefperceel is eigenaar van melkveehouder Niels de jong uit Ter Aar. Volgens de bodemclassificatie van Nederlandse bodemkaart is dit een koopveengrond op bosveen of eutroof broekveen (code hVb) met een zandig-moerig toemaakdek. Controle van het bodemprofiel ter plaatse (zie Resultaten) liet echter een sterk kleilig toemaakdek gemengd met puin zien. Volgens de Geologische Kaart behoort het veen tot de Formatie van Nieuwkoop (Hollandveen laagpakket) en is 3.6 ± 0.2 m dik. De dikte varieert over het perceel enigszins door de aanwezigheid van geulafzettingen in het onderliggende Laagpakket van Wormer (getijde-afzettingen) van de Formatie van Naaldwijk. Onder de getijde-afzettingen bevinden zich op een diepte ± 6 m beneden maaiveld geulafzettingen van de fluviatiele Formatie van Echteld (Bodem- en Geologische gegevens uit Dinoloket, geraadpleegd December 2022).

Op 650 m ten noorden van het perceel bevindt zich een diepe droogmakerij (de Middelburg-Tempelpolder), en ten westen van Waddinxveen liggen de diepe Zuidplaspolder en Noordplaspolder.

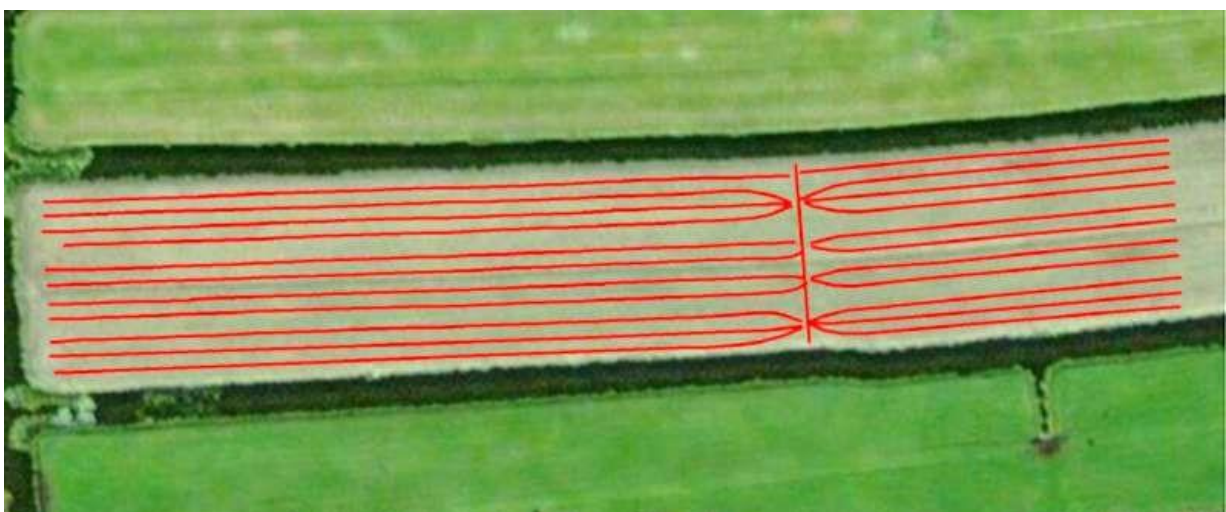
Dit leidt waarschijnlijk tot wegzijging van water uit de polder via de onderliggende doorlatende Formaties van Naaldwijk en Echteld. Het perceel heeft een typisch 'holle' ligging; de randen bij de sloten liggen hoger dan het midden van het perceel. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in

veenoxidatie midden in het perceel en dichtbij de sloten (Fig. 1). In het midden daalt de grondwaterstand in droge perioden in de zomer doordat waterverlies door verdamping niet door de trage grondwaterstroming aangevuld kan worden; bij de sloten kan door de kortere afstand tot de sloot de verdamping nog wel gecompenseerd worden door grondwaterstroming.



Figuur 3. Ligging van het proefperceel, de aangelegde onderwaterdrainage en de meetlocaties.

In de westelijke helft van het perceel is onderwaterdrainage aangelegd (Fig. 4), met een onderlinge afstand tussen de drains van 4-6 m (binnen de middenstrook en de randstrook is de afstand 4 meter, tussen de middenstrook en randstrook 6 m) en een diepte beneden slootpeil van 30 cm in de randstroken en op 40 cm in de middenstrook. De drains zijn aangesloten op een verzamelput op 200 m van het westelijke uiteinde van het perceel, van waaruit de infiltratie drainage met op afstand bedienbare schuiven gestuurd wordt. Via de verzamelput wordt slootwater ingelaten bij aanhoudende droogte. In de oostelijke helft van het perceel is geen drainage aangelegd, om de effecten van wel of geen drainage te kunnen vergelijken. Hieronder zullen deze delen van het perceel worden aangeduid als 'maatregel' en 'referentie'. De infiltratie is in 2023 gestart op 5 mei, toen de grondwaterstand door droogte al aan het dalen was.



Figuur 4. Ligging van de drains en het verzamelpunt. De ligging van de drains is met GPS vastgelegd.

10.3.2 Meetmethoden

10.3.2.1 CO₂/CH₄ metingen

Twee meetlocaties voor CO₂ en CH₄ metingen zijn ingericht, op een afstand van 75 m van de grens tussen het gedraineerde en niet gedraineerde deel van het perceel, naast de greppel in het midden van het perceel (Fig. 2). De meetlocaties liggen op enkele meters afstand van de peilbuizen voor de grondwaterspiegel van Acacia Water.

Op deze locaties zijn metingen met kamers gebruikt om de broeikasgasfluxen te meten. Het principe van deze metingen bestaat uit het plaatsen van een cilindervormige meetkamer op de bodem, die aan het begin van de meting luchtdicht afgesloten wordt. Een luchtpomp voert lucht uit de kamer naar gasanalyse-apparatuur, waarmee de concentratie van broeikasgassen in de lucht van de kamer gemeten wordt: CO₂, H₂O, en afhankelijk van het type gasanalyser, ook CH₄. Wanneer een van deze gassen uit de bodem in de kamer stroomt, zal de concentratie toenemen. Wanneer gas in de kamer wordt opgenomen door planten (in het geval van CO₂) of opgenomen door methanotrofe (methaan consumerende) bacteriën in de bodem (CH₄) daalt de concentratie. Waterdamp wordt mee gemeten, om de gasconcentratie in de kamers te kunnen corrigeren naar de hoeveelheid in droge lucht. Uit de snelheid van concentratie toe-of afname kan met behulp van lineaire regressie de flux van het gas (hoeveelheid gas per oppervlakte-eenheid per tijdseenheid, milligram/m²/uur) in de kamer berekend worden.

De kamermetingen zijn uitgevoerd met behulp van automatisch bediende kamers (Fig. 5). Deze sets bestaan uit vier transparante acrylaat cilinders met een diameter van 35 cm, hoogte 50 cm en een scharnierend deksel van transparant acrylaat, dat geopend en gesloten kan worden met een lineaire actuator. De bovenrand van de cilinders is bekleed met een rand van celrubber, die een luchtdichte sluiting van het deksel mogelijk maakt als de actuator het deksel dicht drukt. Aan de basis worden de cilinders enkele centimeters in de bovengrond gestoken. Het volume van de kamers wordt voor berekening van de gasflux gecorrigeerd voor de insteekdiepte.

De kamers zijn verankerd met metalen pennen. Op ±40 cm boven de kamerbodem is in het midden van de kamer een ventilator gemonteerd voor homogenisatie van de lucht in de kamer. Nabij de ventilator is een waterdichte DSB18B20 temperatuursensor gemonteerd om de luchttemperatuur in de kamer te registreren. Sluiten/openen van de kamers, en het aanzuigen van lucht uit de kamers wordt bestuurd vanuit een controlebox met behulp van een microcomputer (Raspberry Pi). Deze computer dient tevens als datalogger. De kamers worden om de beurt gesloten en weer geopend. Tijdens een meting zijn ze 150 seconden gesloten. Gas wordt bemonsterd en teruggevoerd naar de kamer door een circulatiepomp in de controlebox. Voor het bemonsteren van de gasstroom kan naar keuze een CO₂/CH₄/H₂O gasanalyser (Los Gatos M-GGA-918 microportable) of een LiCor Li850 CO₂/H₂O gasanalyser aangesloten worden. Beide gasanalysers werken met een meetfrequentie van 1 meting per seconde.

De Raspberry Pi-computer in de controlebox dient behalve voor aansturing, ook voor het vastleggen van de gasconcentraties, temperatuur in de kamers en de luchtdruk. Afhankelijk van de keuze van de gasanalyser ligt het stroomverbruik van de apparatuur tussen 75 en 120 Watt. Voor de metingen is grotendeels gebruik gemaakt van autonome energievoorziening op basis van zonnepanelen en kleine windturbines, geconstrueerd door Broere Beregening BV.

De gegevensverwerking gebeurt met behulp van een voor dit meetsysteem ontwikkeld software pakket. Voor iedere meting wordt een grafiek van de gasconcentratie tegen de tijd geplot om de kwaliteit van de meting visueel te beoordelen. De eerste 30 gasconcentratie-metingen worden

genegeerd omdat deze kunnen worden beïnvloed door onregelmatigheden veroorzaakt door het overschakelen van de ene kamer naar de andere. In het ideale geval benaderen deze grafieken een rechte lijn. Afwijkingen daarvan kunnen wijzen op een storing van de kamers (lekkage). Metingen die dergelijke afwijkingen laten zien, worden niet gebruikt als aannemelijk is dat het een storing betreft. Niet alle afwijkingen van een rechte lijn wijzen echter op foutieve metingen. Variaties in de CO_2 -concentratie bij daglicht kunnen worden veroorzaakt door veranderingen in de fotosynthese als gevolg van variaties in de lichtsterkte op bewolkte dagen. Stapsgewijze toename van CH_4 kan worden veroorzaakt door opstijgen van moerasgasbellen in met water verzadigde bodems.

Na inspectie wordt voor elke geldige meting een lineaire regressie van de gasconcentratie tegen de tijd berekend. Uit de hellingscoëfficiënt van de regressielijn wordt de gasflux berekend. De standaarddeviatie van de flux wordt bepaald uit de statistische standaarddeviatie van de hellingscoëfficiënt van de regressielijn.

De opstelling van de kamers is in een rechte lijn, haaks op de greppel in het midden van het proefperceel. Bij de maatregel-locatie is de eerste kamer aan de rand van de greppel geplaatst, de tweede in het midden tussen de greppel en de eerste drain, de derde midden tussen de eerste en de tweede drain, en de vierde op de tweede drain. Bij de referentie-locatie zijn geen drains aanwezig, maar zijn dezelfde afstanden ten opzichte van de greppel gehandhaafd.



Figuur 5. Het automatische kamersysteem voor meting van de broeikasgasfluxen op de meetlocatie bij het referentieperceel. In de groene kist bevinden zich de controlebox en de gasanalyser.

Aanvankelijk was het de bedoeling om simultaan CO₂ metingen te doen op zowel referentie- als maatregel-locatie, en daarbij altijd ook CH₄ te meten. Voor dit doel zouden in 2022 twee Los Gatos microportable gasanalysers beschikbaar zijn; een eerste was al in het bezit van KCCR, een tweede was in bestelling. Door de extreem lange levertijd en steeds weer uitgestelde levering is hiervan afgezien. Bovendien bleek de service en onderhoud door de leverancier van deze apparatuur zeer tijdrovend en kwalitatief ondermaats, waardoor het beschikbare apparaat twee maanden niet beschikbaar was. Besloten is daarom van slechts één Los Gatos microportable gebruik te maken en daarnaast een LiCor CO₂ analyser te gebruiken, zodat in ieder geval zoveel mogelijk op beide locaties simultaan CO₂ gemeten kon worden. Een groot deel van 2022 was dat echter niet mogelijk doordat slechts één gasanalyser beschikbaar was. Dit is opgelost door beide locaties kort na elkaar te bemeten voor een kortere periode dan eerder gepland (3 dagen in plaats van 5), en dan vaker dan eerder gepland, met een hogere frequentie in het groeiseizoen. Medio 2022 is een tweede LiCor CO₂ analyzer aangeschaft, waardoor in het najaar en in 2023 wel simultaan op beide locaties gemeten kon worden, voor wat langere periodes (5 etmalen per meetcampagne). In 2023 is afgezien van verdere CH₄ metingen, omdat uit de rapportage bleek dat de CH₄ fluxen zeer gering waren, met name op de referentie-locatie.

In augustus 2023 is nog een extra meetdag voor CH₄ ingelast met een mobiele, handbediende kamer gekoppeld aan de Los Gatos Microportable gasanalyser, om na te gaan of de verschillen in CH₄ emissie tussen referentie en maatregel in 2022 ook in 2023 gereproduceerd konden worden. De kamer werd daarbij verduisterd, om nachtelijke CO₂ metingen te simuleren. Dit gaf ook informatie over het ruimtelijk patroon, door te meten op transecten dwars op de sloot en greppel.

10.3.2.2 Meetonzekerheid broeikasgasmetingen.

Er kunnen in de meetgegevens drie bronnen van meetonzekerheid worden onderscheiden:

- Onzekerheid ten gevolge van de analyse apparatuur (de gasanalysers). Deze bestaat uit toevallige fluctuaties van de metingen rond de werkelijke waarde, en een mogelijke systematische component ten gevolge van verloop van de kalibratie van de instrumenten. Er is van uitgegaan dat er geen systematische fouten zijn; beide LiCor gasanalysers waren gekalibreerd bij de aanvang van hun inzet en de metingen bleven ruim binnen de aanbevolen kalibratieperiode. De Los Gatos is in de zomer van 2022 gekalibreerd en bleek geen afwijkingen te vertonen. De toevalsc component is vooral voor CH₄ bij lage concentraties relatief hoog ten opzichte van de laagste waarden in het meetbereik. Dat is bij de lage gasfluxen op deze meetlocatie relevant en leidt ertoe dat een deel van de gemeten fluxen als 'niet detecteerbaar' moet worden beschouwd. Bij CO₂ is dit veel minder een probleem omdat het veel hogere concentraties betreft.
- Onzekerheid in de werking van de kamers. De kamers moeten tijdens de meting luchtdicht afgesloten zijn en de ventilator voor homogenisatie van de lucht moet goed werken. Lekkage en uitval van de ventilatoren kan altijd optreden, en kan alleen bij inspectie van de meetopstelling in het veld met zekerheid vastgesteld worden. Over het algemeen sluiten de deksels van de kamers goed af. Uitval van een ventilator maakt een meting niet onbruikbaar, maar vergroot wel de statistische fout bij het berekenen van de flux. In het voorjaar van 2022 zijn alle ventilatoren vervangen door robuustere, waterbestendige exemplaren. Vooral in de zomer is het mogelijk dat er gras of een insect tussen de deksel en de bovenrand van de kamer terechtkomt en zo een geringe lekkage veroorzaakt. Ook uitdrogen van de bodem rond de kamer kan ervoor zorgen dat er lekkage via de onderrand ontstaat. Lekkage kan tijdens de gegevensverwerking gedetecteerd

worden door sterke afwijkingen van de concentratietoename van een rechte lijn. Dit is het best detecteerbaar bij de nachtelijke metingen als wisselingen in de lichtsterkte de metingen niet beïnvloeden.

- Weersomstandigheden. De kamer moet bij voorkeur niet aan sterke temperatuurwisselingen blootstaan. Overdag kan in de zomer ook de temperatuur in de kamer sterk oplopen, maar daarvoor wordt gecorrigeerd door temperatuurmeting in de kamer. In extreme gevallen kan echter wel de CO₂ flux beïnvloed worden doordat hoge temperaturen de fotosynthese kunnen verminderen. Daarom is de meettijd per kamer zo kort mogelijk gehouden. Een tweede weerfactor is de wind. Harde wind kan eventueel het effect van kleine lekkages in de kamer versterken. Voor het effect de weersomstandigheden geldt dezelfde remedie als voor functioneren van de kamers: visuele inspectie van iedere meting.

- Statistische onzekerheid bij het berekenen van de flux uit de concentratie-gegevens.

Deze wordt beïnvloed door voorgaande onzekerheden. De flux wordt berekend uit een lineaire regressie van gasconcentratie tegen de tijd. De helling van de regressielijn (concentratie toename per tijdseenheid per kamer-oppervlak) is de flux. De statistische onzekerheid van de helling van de regressielijn is de statistische onzekerheid van de fluxberekening. Hoe meer afwijking van een rechte lijn (bijvoorbeeld door CH₄ pulsen door bellen of wisselingen in fotosynthesesnelheid en meetonzekerheid van de gasanalysers), hoe groter de statistische onzekerheid van de fluxberekening.

- Onzekerheid door ruimtelijke variatie in bodem en vegetatie.

Bodem en vegetatie kunnen op afstand van een paar meter zodanig verschillen dat per kamer sterk verschillende fluxen worden gemeten. Kleine, nauwelijks zichtbare verschillen in vegetatiedichtheid kunnen verschillen in de productie van wortellexudaten en verschillen in fotosynthese veroorzaken, activiteit van mollen, muizen, wormen en scheurvorming beïnvloeden transport van gassen. Andere inhomogeniteiten (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een baksteen in de ondergrond, zie profielbeschrijving) beïnvloeden de verdeling van organische stof in de ondergrond. Het meetsysteem bestaat uit 4 kamers om dergelijke verschillen uit te kunnen middelen. De invloed van de ruimtelijke variatie in bodem en vegetatie kan ook verminderd worden door niet steeds exact op dezelfde plaats te meten. Dat laatste voorkomt ook langdurige beïnvloeding van de meetlocatie.

De statistische onzekerheid leidt ertoe dat lage CH₄ fluxen niet goed detecteerbaar zijn. Bij fluxen met een absolute waarde beneden de 1 mg/m²/uur zijn toevalsfluctuaties van de gasanalyser en de daardoor veroorzaakte statistische onzekerheid van de fluxberekening vaak zo groot, dat de standaardfout van de meting groter is dan de meetwaarde zelf. Bijvoorbeeld: de standaarddeviatie is even groot als de meting zelf, en de meting geeft een positieve flux aan. Dan is de kans dat de flux negatief is (opname van CH₄) terwijl de fluxberekening een positieve waarde aangeeft 16%. Dat is niet verwaarloosbaar. Dergelijke situaties komen zeer vaak voor als de absolute waarde van de berekende flux kleiner is dan 0.5 mg/m²/uur. Pas bij een standaarddeviatie van 0.8 x de meetwaarde zakt de kans op een negatieve flux onder de 10%. Bij fluxen met een standaarddeviatie die even groot is als de absolute waarde van de flux, moet de flux daarom gezien worden als 'niet detecteerbaar'. Omdat dit meestal bij een zeer lage absolute waarde van de flux voorkomt wordt aangenomen dat de dan de flux 0 mg/m²/uur is.

10.3.2.3 Het bodemprofiel.

Het bodemprofiel is beschreven in hoofdstuk 8 van deze integrale rapportage.

10.3.2.4 Biomassa.

Op 31-8-2022 (de dag voor de maaidatum) is de hoeveelheid droge bovengrondse biomassa bepaald door van een oppervlak van 0.3 m² het gras tot op het oppervlak af te knippen en te verzamelen. Vervolgens is dit gedroogd bij 105°C en gewogen. De ondergrondse biomassa van de bovenste 10 cm van de bodem (wortelmassa) is bemonsterd met een monsterring tijdens het bemonsteren van het bodemprofiel. Het monster is vervolgens uitgewassen en het overblijvende wortelmateriaal er uit gezeefd, gedroogd en gewogen. In 2023 zijn door Dhr. van Eijk schattingen gemaakt van de grasopbrengst door het aantal balen te tellen dat op het veld lag na maaien (13 juni en 6 september). Er is verder een nog onbekend verlies van biomassa door begrazing van ganzen en smienten.

10.3.2.5 Weerstation.

Op 28 november 2022 is een automatisch weerstation geplaatst (Davis Advantage Pro) voor het meten van luchttemperatuur, dauwpunttemperatuur, windsnelheid en -richting, neerslag en, zonnestraling. Deze gegevens zijn nodig voor het Peatland-VU model dat gebruikt zal worden voor interpolatie van de gegevens tussen de metingen om een jaarbalans van CO₂ en CH₄ emissie op te stellen. Aanvankelijk was het de bedoeling hiervoor weergegevens van de KNMI-meetmast in Cabauw of Rotterdam Airport te gebruiken, maar omdat de afstand tot deze stations vrij groot is, is het toch wenselijk om ook ter plaatse meetgegevens te verzamelen. Met dit weerstation is het ook mogelijk om de verdamping te schatten.

Het weerstation stuurde ieder kwartier meetgegevens door naar de websites van KNMI/MetOffice WoW en weatherunderground.com, vanwaar de gegevens gedownload werden. Aanloopproblemen met de stroomvoorziening van het weerstation en de data transfer module hebben voor uitval gezorgd. Op dagen dat onvoldoende waarnemingen beschikbaar waren zijn de gegevens van de KNMI-meetmast bij Cabauw gebruikt.

Uit de gegevens van het weerstation zijn de neerslagsom per dag, de luchttemperatuur en de globale straling berekend. Om verschillen te voorkomen tussen de stralingsmeter van het weerstation en de door KNMI gemeten straling in Cabauw is een correctiecurve berekend. De gegevens zijn vervolgens gebruikt om met de Makkink formule (ook gebruikt door KNMI) de dagelijkse verdamping te berekenen.

10.3.2.6 Water.

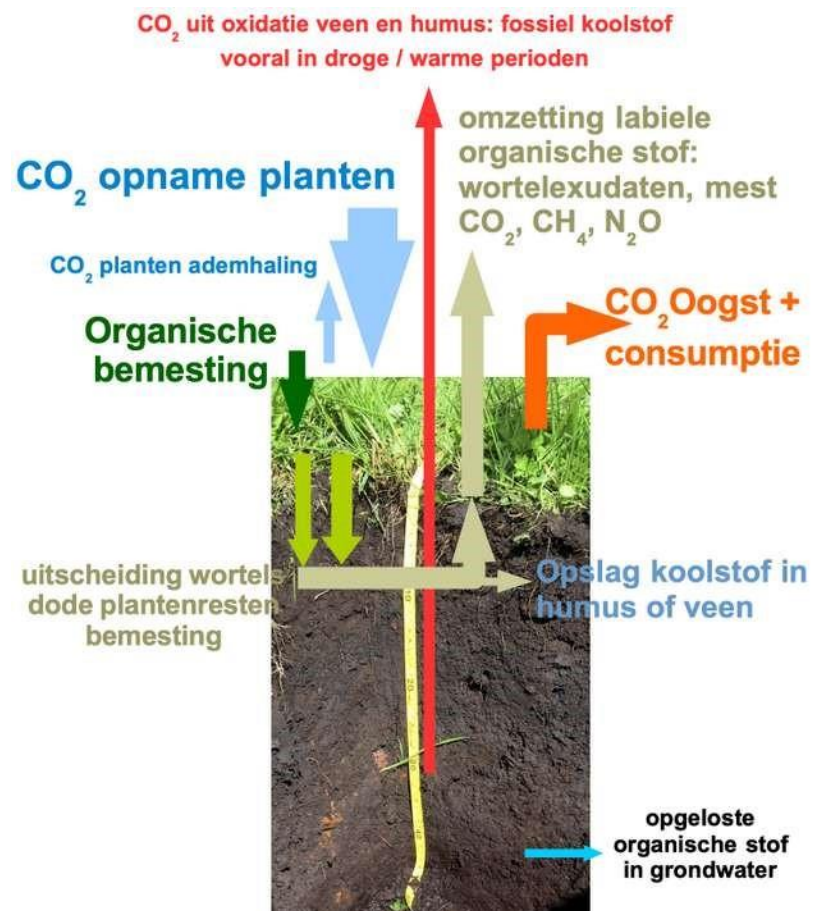
Grondwaterstanden en bodemvochtgehalte zijn gemeten door Acacia Water (Van Hateren en Hoogland, 2024); de grondwaterstanden zijn ieder kwartier automatisch gemeten vanaf maart 2022. Methodologie en resultaten hiervan worden besproken in de rapportage van Acacia Water. Voor de bespreking van de CO₂ en CH₄ emissiemetingen hieronder, zijn gegevens gebruikt van peilbuis RefPlasdras02 (referentie locatie, filter diepte 0.69 – 1.69 -maaiveld) en Plasdras02 (maatregel locatie, filter diepte 0.74 – 1.74 -maaiveld).

10.3.3 Bepaling van de jaarbalans en veenoxidatie.

De jaarbalans van de CO₂ opname en emissie van CO₂ en CH₄ kan niet zondermeer uit de metingen worden afgeleid. Er is immers niet continu het hele jaar door gemeten. Het is daarom nodig, tussen de metingen te interpoleren. Hiervoor worden doorgaans verschillende typen modellen gebruikt,

gebaseerd op statistische relaties tussen weervariabelen en emissie, machine learning methoden of mathematische modellen van de bodemprocessen en uitwisseling van gasen met de atmosfeer.

Het doel van de omgekeerde drainage maatregel is het verminderen van de oxidatie van veen. Ook dat is niet zondermeer uit de metingen af te leiden. Fig. 6. toont een schema van de koolstofstromen uit de veenbodem. Hierin is te zien dat de koolstofstroom uit het veen zelf slechts een onderdeel is van de totale koolstofbalans. De grootste bron van CO₂ is de snelle omzetting van recent door de vegetatie geproduceerd organisch materiaal. Dat zijn vooral uitscheidingsproducten van plantenwortels en afgestorven plantendelen. Dit materiaal kan al binnen enkele dagen weer omgezet worden tot CO₂ door bacteriële omzetting in de bodem (o.a. Subke et al., 2012). Daarnaast wordt de CO₂respiratie van de planten en hun wortels mee gemeten. In principe kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid uit veenoxidatie door het verschil in de nachtelijke CO₂ metingen van maatregel- en referentie-locatie te bepalen. De nachtelijke component



Figuur 6. Koolstofbalans van de bodem. De grootte van de letters en de dikte van de pijlen geeft ongeveer de relatieve grootte van de posten op de balans.

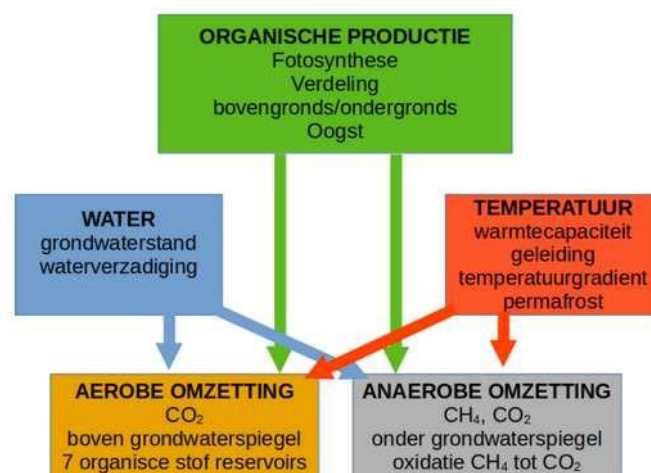
geeft een schatting van de ecosysteemrespiratie (R_{eco}), de CO₂ geproduceerd door planten en bodem samen.

Dit vereist echter afwezigheid van verschil in functioneren van de vegetatie, wat doorgaans niet het geval is. Lokale verschillen in bodem en vegetatie introduceren onzekerheid. Door de maatregel zelf, die verschillen in waterbeschikbaarheid voor de vegetatie veroorzaakt kan de koolstofbalans ook beïnvloed worden: verschuivingen in de verhouding tussen bovengrondse en ondergrondse biomassa, en de mate van productie van uitscheidingsproducten door de wortels (Cheng & Gershenson, 2007; Reid & Crush, 2013; Buttler et al., 2019). Bovendien varieert zowel de veenoxidatie als het effect van de vegetatie sterk in de loop van de tijd. Daarom is hier gekozen voor modelsimulaties met een procesmodel, Peatland-VU (Van Huissteden et al., 2006, 2009, Petrescu et al., 2009, 2010, Mi et al., 2014, Van de Craats et al., 2023). Met dit model kan tussen de metingen geïnterpoleerd worden, en tegelijkertijd het aandeel van de CO₂ uit veenoxidatie bepaald worden.

De modelsimulaties zijn ook noodzakelijk voor het simuleren van de grondwaterstand in de eerste drie maanden van 2022; de metingen van de grondwaterstand zijn pas op 30-3-2022 gestart.

10.4.3.1 Peatland-VU.

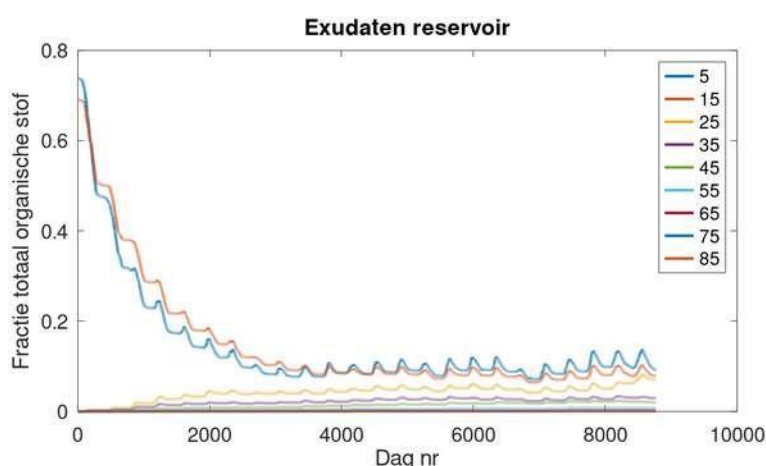
Peatland-VU is een eendimensionaal procesmodel voor het berekenen van CO₂- en methaanfluxen uit organische-stofrijke bodems. Het is middelmatig complex model, wat betekent dat een aantal processen niet in detail in het model zijn opgenomen: stikstofcyclus, transport van water in de onverzadigde zone, transport van opgeloste organische stof in water, zwel en krimp van het bodemmateriaal. 'Eendimensionaal' betekent dat het model de processen in een verticaal bodemprofiel berekent. Zijdelings transport van opgeloste stoffen en gasen is niet in het model opgenomen, zijdelingse stroming van water slechts in sterk vereenvoudigde vorm.



Figuur 7. Blokschema van de submodellen van het Peatland-VU model en hun interactie.

Hieronder wordt een summiere beschrijving van de werking van het model gegeven, zonder op de mathematische details in te gaan; zie verder Van Huissteden et al., 2006 en Mi et al., 2014. Vanwege sterke interactie tussen de vegetatie en de koolstofbalans van de bodem is een vegetatiesubmodel opgenomen, waarin de productie van organische stof en verdeling daarvan naar de bodem berekend wordt. Er is daarbij keuze voor twee vegetatiemodellen van verschillende complexiteit. Verder bestaat het model uit submodellen voor het berekenen van bodemfysische eigenschappen die de microbiële omzetting van organische stof beïnvloeden: bodemtemperatuur, watervverzadiging en grondwaterstand. De omzetting van organische stof is ondergebracht in twee submodellen: aerobe afbraak van organische stof en methaan boven de grondwaterstand wat leidt tot de vorming van CO₂, en anaerobe afbraak van organische stof onder de grondwaterspiegel wat leidt tot de vorming van methaan (CH₄). Recent is hieraan ook anaerobe CO₂ vorming toegevoegd (door sulfaat- en ijzerreductie). Dit laatste onderdeel is experimenteel en is hier voor het eerst toegepast.

Het Peatland-VU model gebruikt een beschrijving van het bodemprofiel als invoer: verticale verdeling van organische stof gehalte, dichtheid, en eigenschappen (pF curves) voor de stijghoogte van water. Daarnaast rekent het met tijdseries van luchttemperatuur, fotosynthetisch actieve straling, neerslag en verdamping, en oogst- en begrazingsdata, in tijdstappen van een dag. Het model kan zelfstandig de grondwaterstanden hieruit uitrekenen, maar vanwege de nauwkeurigheid heeft invoer van gegevens de voorkeur.



Figuur 8. Stabilisatie van het exudaat (worteluitscheiding) koolstofreservoir in de spinup tijd van het model. Het effect van een te hoge inschatting van de beginhoeveelheid van de wortellexudaten verdwijnt in ongeveer 10 jaar.

Het model heeft een spinup-tijd van minimaal twintig jaar nodig om een evenwichtssituatie van de koolstofreservoirs in het model te bereiken (Fig. 7). Voor de simulaties in dit rapport zijn de jaren van 2000 tot en met 2021 als spinup-jaren genomen (21 jaar), met weergegevens van weerstation Cabauw en door het model zelf berekende grondwaterstanden. Voor de meetjaren 2023 en 2024 is de gesimuleerde grondwaterstand vervangen door de gemeten grondwaterstand, voor zover beschikbaar.

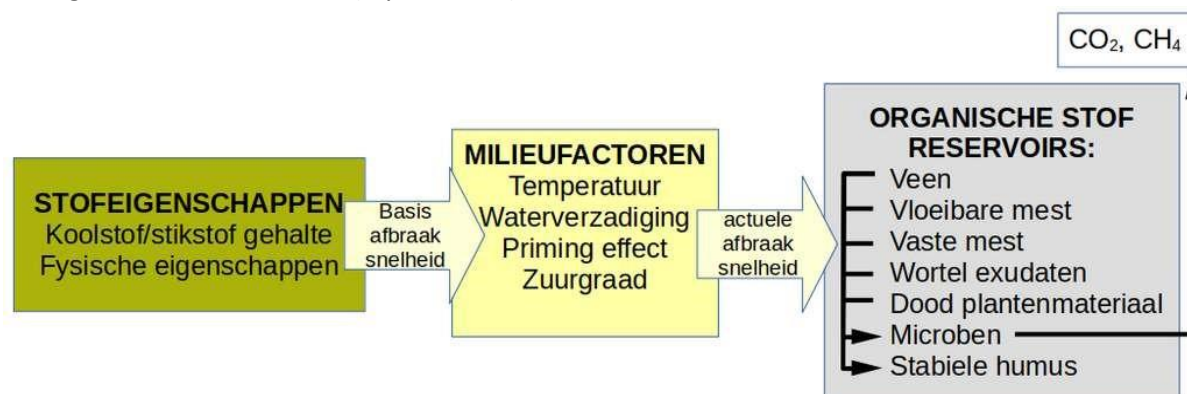
Fig. 6 geeft een schema van de submodellen van Peatland-VU en hun interactie. Per tijdstap (1 dag) wordt aan de hand van de inkomende straling en luchttemperatuur de primaire productie van de vegetatie uitgerekend. Hiervoor is de keuze uit een generiek primaire productiemodel dat ook gebruikt is in globale vegetatiemodellen (Biome3, LPJ, Haxeltine & Prentice, 1996) en een gesimplificeerd productiemodel voor graslanden en toendra (Shaver et al., 2007). Deze worden hierna aangeduid als productiemodel A en B. Beide zijn gebruikt; testen van meerdere modellen in een modelensemble kan een betrouwbaarder resultaat opleveren.

Behalve door het fotosynthetisch actieve deel van de zonnestraling, worden beide modellen worden ook gestuurd door de fenologie (ontwikkeling in de loop van het jaar) van de vegetatie, die afhankelijk is van de luchttemperatuur (modelparameter Phenology). Boven een bepaalde temperatuurdrempel gaan de bladeren van de vegetatie zich ontwikkelen; de ontwikkeling wordt gesimuleerd met het aantal dagen en aantal graden waarmee deze drempel wordt overschreden (Growing Degree Days = GDD, de som van het aantal graden dat de temperatuurdrempel voor iedere dag is overschreden). Dit stuurt de ontwikkeling van het bladoppervlak (Leaf Area Index, LAI in m² blad per m²). Ook wordt oogst (datum en hoeveelheid afgevoerd materiaal) en herstel van LAI daarna in het model berekend. Begrazing (periode en hoeveelheid afgevoerd materiaal + bemesting) en bemesting (data en hoeveelheid aangevoerd materiaal) zijn eveneens in het model te specificeren.

Vervolgens vindt er een verdeling van de primaire productie plaats in plantenrespiratie in het donker (dark respiration, modelparameter RespFac), bovengrondse en ondergrondse biomassa (parameter ShootsFactor) en worteluitscheidingsproducten (ExudateFactor). Over het algemeen verschilt de hoeveelheid worteluitscheiding door het jaar heen met de groeisnelheid van de wortels, die het snelst is in het voorjaar. In het model wordt dit geregeld met de parameter SpringCorrection. Tevens wordt rekening gehouden met een constante sterfte van ondergrondse en bovengrondse biomassa, en afsterven van blad aan het einde van de zomer. De worteluitscheidingsproducten (exudaten) en dood plantenmateriaal (litter) worden toegevoegd aan de ondergrondse organische stofreservoirs.

De organische stof reservoirs in het model zijn het veen (ook onderdeel van de bodemmatrix), twee reservoirs voor bemesting (vloeibaar en vaste stof), wortellexudaten, dood plantenmateriaal, dood materiaal van bodemfauna en microben, en stabiele humus (Fig. 9). Deze materialen verschillen in afbraaksnelheid door verschillen in chemische samenstelling en fysische eigenschappen. Vanwege de stikstofbehoefte van microben breken stikstofrijke materialen sneller af. Lignine (hoofdbestanddeel van hout) breekt traag af, en verschillende andere chemische componenten (o.a. zuren, fenolen) kunnen de afbraak sterk remmen. Vooral veen kan daardoor sterk verschillen in afbraaksnelheid vanwege de botanische samenstelling; in een voedselrijk milieu gevormd veen (riet-zeggeveen, bosveen) breekt sneller af dan veenmosveen (o.a. Aerts, 2006). Over het algemeen is de volgorde van afbraaksnelheid: Bemesting – Dode bodemfauna en microben, Exudaten – Dood

plantenmateriaal – Veen – Stabiele humus. Veen heeft geen hoge afbraaksnelheid, doordat bij de vorming van het veen al veel snel afbreekbaar plantenmateriaal is omgezet in de bovenste aerobe bovenlaag van het moerasmilieu (Clymo, 1984).



Figuur 9. De organische stof reservoirs in het Peatland-VU model (rechts), en de wijze waarop de omzettingssnelheid van de verschillende reservoirs wordt bepaald. De verschillende reservoirs hebben een verschillende basis-afbraaksnelheid die afhangt van chemische en fysische eigenschappen. De actuele omzettingssnelheid wordt bepaald door de milieu-omstandigheden op de diepte in het bodemprofiel waar het materiaal aanwezig is.

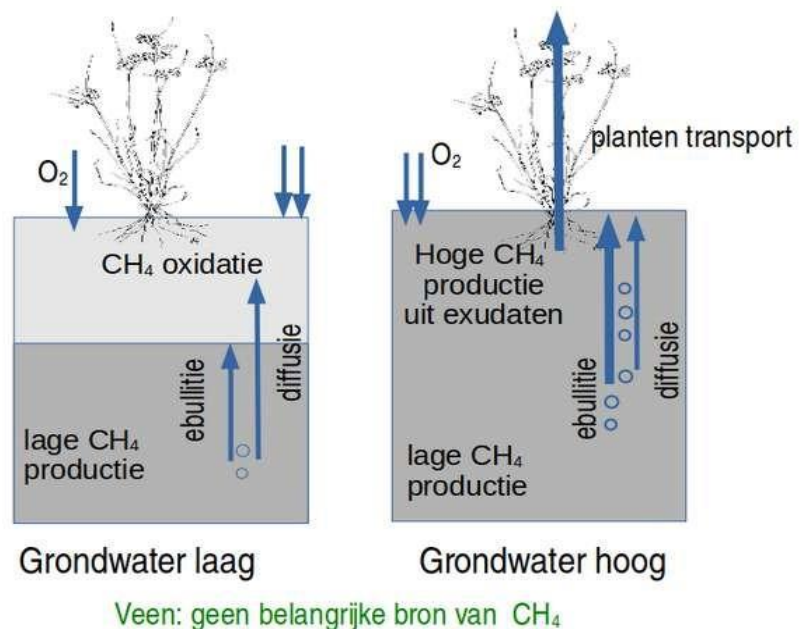
De afbraaksnelheden die door de eigenschappen van de organische stof bepaald worden zijn echter niet beslissend; de omstandigheden in het bodemmilieu, die van dag tot dag en met de diepte onder het oppervlak kunnen verschillen, kunnen de afbraaksnelheid sterk wijzigen (Fig. 8).

- **Temperatuur:** De afbraaksnelheid neemt exponentieel toe met de temperatuur. Dit wordt berekend met Q10-waarde, waarbij Q10 de toename van de afbraaksnelheid weergeeft bij 10 graden temperatuurverschil. De Q10 waarde geeft dus de gevoeligheid van afbraaksnelheid voor temperatuur aan en verschilt per type organische stof. De waarde ligt in het algemeen tussen 2 en 4 voor aerobe omzetting. Een Q10 waarde van 3 betekent een toename van de afbraaksnelheid met een factor 3 bij een toename van de temperatuur met 10 graden. Voor methaan en anaerobe CO₂ vorming kan de Q10 waarde hoger liggen.
- **Waterverzadiging:** Het model maakt een sterk onderscheid tussen afbraakprocessen boven en onder de grondwaterspiegel; onder de grondwaterspiegel kunnen alleen strikt anaerobe processen plaatsvinden (methaanvorming, sulfaat- en ijzerreductie). Boven de grondwaterspiegel kan de afbraaksnelheid verlaagd worden door een hoge waterverzadiging van de poriënruimte waardoor zuurstof nauwelijks doordringt in de poriën. In het model wordt de aerobe afbraaksnelheid daarom vertraagd door een hoge waterverzadiging. Zeer droge omstandigheden remmen de afbraak echter ook vanwege de waterbehoefte van de bodemfauna en microben (Säurich et al., 2019); dit is ook in het model opgenomen.
- **Priming effect:** bij een sterke toename van de hoeveelheid snel afbreekbaar organische materiaal (mest, exudaten) kan ook de afbraak van trager afbrekend materiaal toenemen (o.a. Subke et al., 2012).
- bodemfauna en microben (Säurich et al., 2019); dit is ook in het model opgenomen.
- **Priming effect:** bij een sterke toename van de hoeveelheid snel afbreekbaar organische materiaal (mest, exudaten) kan ook de afbraak van trager afbrekend materiaal toenemen (o.a. Subke et al., 2012).

- Bodemchemie: Lage zuurgraad kan de afbraak sterk remmen en wordt per laag gespecificeerd in de profielbeschrijving van de bodem. Overige chemische eigenschappen, zoals de concentratie zuurstof, redoxpotentiaal en anaerobe oxidanten (nitraat, ijzer- en mangaanoxiden, sulfaat) zijn (nog) niet opgenomen in het model; deze worden al geacht verrekend te zijn in de opgegeven afbraaksnelheden.

Bij het omzettingsproces van de organische stof wordt een gedeelte ervan omgezet in microbiële biomassa, een deel in CO_2 en een deel aan het stabiele humus reservoir toegevoegd (Fig. 9)

Vanwege verschillen in benodigde energie voor de omzetting is voor anaerobe omzetting in microbiële biomassa veel meer organische stof nodig dan voor aerobe omzetting.



Figuur 10. Schema van methaan productie- en transportprocessen

De fractie die overblijft voor CO_2 is $1 - \text{microbiële biomassa} - \text{fractie stabiele humus}$. Bij omzetting naar CO_2 wordt uitgegaan van zogenaamde 1^e orde afbraak volgens de vergelijking $dQ/dt = kQ$, waarbij de hoeveelheid omgezet materiaal afhankelijk is van de hoeveelheid aanwezig substraat. De snelheidsconstante k wordt per organische stof reservoir afzonderlijk gespecificeerd.

De methaan-module van het model verschilt van de aerobe en anaerobe omzetting naar CO_2 . Voor methaanvorming, een veel energie vergend proces vergeleken met aerobe afbraak, komen alleen de meest labiele organische stof reservoirs in aanmerking – wortel exudaten, dood plantenmateriaal, mest (Fig. 10). Methaanvorming wordt uitgevoerd door een andere groep van micro-organismen (Archeae) dan de overige anaerobe afbraakprocessen (door bacteriën). Aerobe afbraak wordt uitgevoerd door bacteriën, schimmels, en overige bodemorganismen. De temperatuurgevoeligheid is hoger. Verder is methaan slecht oplosbaar in water waardoor bellen gevormd worden die naar het oppervlak opstijgen (ebullitie), en vindt actief transport van methaan plaats via planten. Dit zijn vooral typische moerasplanten met holle stengels, die methaan uit de bodem transporteren en zuurstof voor de wortels erin; bijvoorbeeld Riet en Zegge-soorten. Bij het transport via planten vindt ook oxidatie van een deel van de CH_4 naar CO_2 plaats. Boven de grondwaterspiegel vindt in de bodem ook oxidatie van CH_4 plaats door methanotrofe bacteriën. Hierdoor is de methaanflux bij bodems met een grondwaterstand beneden 20-25 cm onder het oppervlak doorgaans verwaarloosbaar, en kan de aanwezigheid van methanotrofe bacteriën zelfs leiden tot een geringe opname van CH_4 in de bodem. In het model wordt transport van CH_4 via ebullitie en planten berekend.

Parametrisatie van het model is eenvoudig wat betreft de invoer van weer- en waterstands-tijdreeksen en een deel van de gegevens van het bodemprofiel. Voor veel van de parameters zijn echter geen exacte gegevens bekend, alleen een bereik van waarden waarin de parameter moet liggen, tenzij meetgegevens beschikbaar zijn van op locatie genomen monsters. Voorbeelden

hiervan zijn de relatie tussen stijghoogte van water boven de grondwaterspiegel en watergehalte van de bodem (pF curve), en de exacte grootte, basale respiratie (afbraaksnelheid, k waarde) en temperatuurgevoeligheid (Q10) van de organische stof-reservoirs.

Op zich zijn deze parameters goed te meten op lokaal verzamelde monsters, maar de meetmethoden zijn tijdrovend, duur, en hebben vaak een grote meetonzekerheid (bijvoorbeeld k, Q10). Hiervoor worden laboratorium incubaties gebruikt waarbij de emissie van CO₂ of CH₄ over een bepaalde tijd onder constante temperatuur gemeten worden. Vaak betreft dit gehomogeniseerde monsters met metingen bij temperaturen die hoger zijn dan in natuurlijke omstandigheden in de bodem, waardoor de monsters uit het natuurlijke bodemmilieu zijn gehaald en daarmee afwijkende resultaten kunnen geven die afwijken van materiaal in natuurlijke staat (Waldrop et al., 2010; Treat et al., 2015). De basale respiratie kan bovendien afhankelijk zijn van voorgeschiedenis; korte perioden van blootstelling van veen aan zuurstof kunnen de respiratie sterk doen toenemen, ook nadat anaerobe omstandigheden weer teruggekeerd zijn (Brouns et al., 2014). Desondanks zijn deze analyses te gebruiken als een eerste indicatie van het bereik van waarden die voor het model relevant zijn. Ook zijn de verschillende organische stof reservoirs alleen met uitgebreide analyse van de chemie van de organische stof van elkaar te scheiden. Dat geldt zeker in de bovengrond van bodemprofielen waar langdurige bodemvorming heeft plaatsgevonden (Hefting et al., 2023).

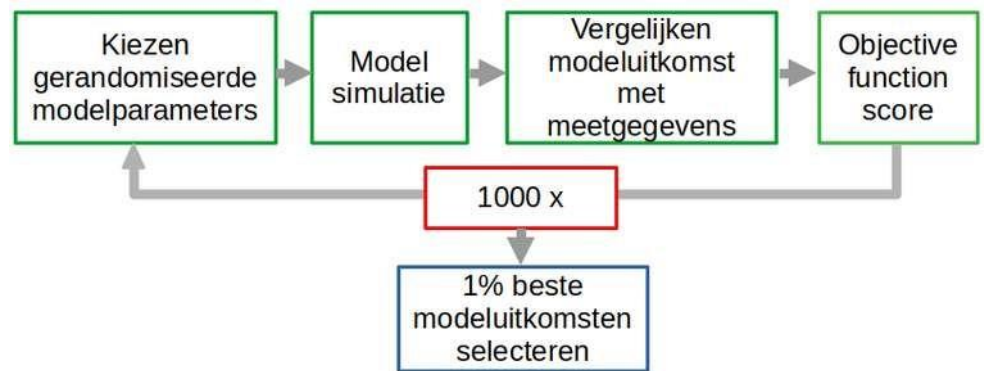
Voor de polder Bloemendaal zijn metingen beschikbaar op locatie in de rapportage over 2022 (Van Huissteden, 2023), maar die gaan niet verder dan bulk dichtheid, organische stof gehalte. Er kon wel gebruik gemaakt worden van metingen van de basale respiratie op verschillende NOBV-sites waaruit het bereik van waarden voor veen kan worden afgeleid (Weidner et al., in prep). Om deze redenen heeft het model voor verschillende parameters een parameter-onzekerheid waarmee rekening gehouden moet worden (Van Huissteden et al., 2009).

Voor de invoer van de grondwaterstand is gebruik gemaakt van metingen van Acacia Water op de referentie- en maatregel locaties (Van Hateren en Hoogland, 2024); de broeikasgasmetingen waren op enkele meters van de peilbuizen gesitueerd. Aangezien deze metingen op 30-3-2022 gestart zijn, zijn deze gegevens voorafgaand aan deze datum gesimuleerd met de grondwatermodule van Peatland aan de hand van neerslag- en verdampingsgegevens van weerstation Cabauw Mast van KNMI.

10.3.3.2 Aanpak parameter onzekerheid van het model.

Uit de parameter-onzekerheid blijkt dat er geen sprake kan zijn van een enige, deterministisch juiste modelsimulatie als voor de belangrijkste parameters slechts een bereik van mogelijke waarden beschikbaar is. Er kan ook parameter-interactie optreden, bijvoorbeeld wanneer lage waarden van de ene parameter gecompenseerd kunnen worden door hogere waarden van een andere parameter. Goed presterende modelsimulaties (bij vergelijking met metingen) kunnen dan bereikt worden met sterk verschillende parameter sets. Dat is overigens geen probleem zolang een model vooral gebruikt wordt voor interpolatie tussen metingen.

Een techniek die in deze gevallen wordt toegepast, is het gebruik van montecarlo simulaties. Anders dan de naam suggereert heeft dit niets met gokpaleizen te maken, maar is het een manier om de onzekerheid in



Figuur 11. Schema optimalisatie- en kalibratie methode voor het Peatland-VU model.

de parameters in de modelresultaten te verdisconteren met behulp van willekeurig gekozen parameter waarden, binnen een bepaald bereik. Bij montecarlo simulaties wordt het model een groot aantal malen doorgerekend. Daarbij wordt voor de meer onzekere parameters voor iedere modelberekening een willekeurige waarde gekozen voor iedere parameter. Het model draait dus steeds met een andere waarde voor de verschillende parameters. Vervolgens worden de modeluitkomsten vergeleken met de waarnemingen (in dit geval de CO₂- en CH₄ metingen) en een getal berekend dat aangeeft hoe goed het model de waarnemingen benadert. In dit geval is een methode gebruikt die bekend staat als Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), een methode die veel toegepast is op hydrologische modellen (Beven, 2009; Van Huissteden et al., 2009). Deze methode werkt als volgt (Fig. 11).

De modeluitkomsten worden vergeleken met waarnemingen en wordt een getal ('objective function') bepaald dat aangeeft hoe goed het model met de metingen overeenkomt. Die overeenkomst zal nooit perfect zijn, zelfs al zijn de juiste parameter waarden precies bekend, vanwege alle meetonzekerheden. Een goede overeenkomst tussen model en metingen betekent echter wel dat het model in staat is, om ook op dagen waarvoor geen metingen beschikbaar zijn voorspellingen te doen omtrent de te verwachten meetwaarde, die beduidend beter zijn dan een schatting op basis van het gemiddelde van de metingen.

Er zijn verschillende keuzes van objective function mogelijk, afhankelijk van welke eisen men stelt aan de overeenkomst tussen het model en de gegevens (Gupta et al., 2009; Knoben et al., 2019):

- een zo goed mogelijke correlatie tussen meetgegevens en het model
- een zo goed mogelijke overeenkomst tussen de variantie van de meetgegevens en het model
- of een zo goed mogelijke overeenkomst in gemiddelde van gegevens en model.

De door Gupta et al. (2009) voorgestelde objective function ("Kling-Gupta efficiency", KGE), die hier gebruikt wordt, is een combinatie van deze drie, waarbij een wat groter gewicht is toegekend aan correlatie en minimaliseren van de verschillen tussen waarneming en model, en wat minder gewicht aan overeenkomst in gemiddelden.

Zonodig kunnen als volgende stap het bereik van de parameter waarden aangepast worden om een beter modelresultaat te verkrijgen, maar nooit meer dan wat (op basis van relevante literatuurgegevens) aannemelijke waarden zijn. In dat geval kan bovenstaande procedure herhaald

worden. Voor een inschatting van parameterwaarden zijn voornamelijk gegevens gebruikt van het NOBV-onderzoeksproject (Weidner et al., in voorbereiding; Hefting et al., 2023; Van de Craats et al., 2023).

Tenslotte worden de best presterende modelsimulaties uitgekozen om de modelresultaten te berekenen. Per tijdstap wordt een gemiddelde en een standaarddeviatie van deze modeluitkomsten berekend; de standaarddeviatie geeft de modelonzekerheid aan.

Behalve over de onzekerheid van de modeluitkomsten biedt de GLUE-methode ook de mogelijkheid om:

- Het model te kalibreren en een optimale waarde voor de parameters te vinden voor de meetlocaties, en zo de parameterwaarden in te schatten. Interactie tussen parameters is hierbij echter beperkend.
- De gevoeligheid van het model voor veranderingen in de parameters te analyseren (zo blijkt bijvoorbeeld, niet onverwacht, het Peatland-VU model gevoelig te zijn voor veranderingen in de k-waarde en de productie van wortellexudaten).
- Interactie tussen parameters te analyseren – verandering van de waarde van de ene parameter heeft invloed op de waarde die voor een andere parameter moet worden aangenomen. (Beven, 2009).

In het geval van de hier uitgevoerde Peatland-VU simulaties is er nog een extra complicatie. Er is niet één modeluitkomst waarmee vergeleken moet worden, maar drie. De eerste is de nachtelijke ecosysteem respiratie (R_{eco} hierna), die uitsluitsel kan geven over de mate waarin referentie en maatregel perceel meer of minder CO_2 uitstoten. Ten tweede moet ook het vegetatiemodel goede resultaten opleveren; dit wordt afgemeten aan het 24 uren gemiddelde van de metingen (Netto Ecosysteem Uitwisseling, NEU) waarin zowel de plantenrespiratie als de fotosynthese zijn opgenomen.

Ten derde is ook de methaanemissie een afzonderlijke modeluitkomst. Er is interactie tussen anaerobe CO_2 vorming en methaanvorming, omdat ze dezelfde labiele koolstofreservoirs gebruiken. Voor ieder van deze drie modeluitkomsten is een aparte objective function berekend die vervolgens gecombineerd is tot één waarde met een gewogen gemiddelde.

Voor de toepassing van GLUE is de volgende opzet gekozen:

- Per modeluitkomst is de Kling-Gupta efficiency gebruikt, waarbij de model-observatie correlatie niet is meegewogen, wel de verschillen in variantie van model en data en het verschil in gemiddelden van model en data (model bias). Voor meewegen van de correlatie zijn meer meetgegevens nodig, en voor de hoofdvraag hier zijn vooral de gemiddelde waarden en variantie belangrijk.
- In de combinatie van de KGE-waarden voor de verschillende modeluitkomsten (R_{eco} , NEE en CH_4 flux) is het hoogste gewicht gelegd op R_{eco} (verhouding 0.4 : 0.3 : 0.3).
- Modeluitkomsten voor productiemodel van de vegetatie 3 en 4 zijn afzonderlijk getest.
- De eerste GLUE-runs zijn uitgevoerd met een relatief groot aantal parameters en een groot aantal modelsimulaties (2500) voor een screening van de meest relevante modelparameters. Hierna is een selectie gemaakt welke parameters van voldoende invloed zijn om verder te testen.

Vervolgens zijn met deze parameters per vegetatiemodel en per meetlocatie GLUE-simulaties gemaakt voor het eindresultaat, met een kleine (15 - 20) parameter set en 1000 modelsimulaties.

10.4 Resultaten.

10.4.1 Het bodemprofiel. (zie hoofdstuk 8.2)

10.4.2 Biomassa.

De bovengrondse biomassa is bemonsterd op 31/8/2022, 1 dag voor de maaidatum voor de tweede snede, door gras zo kort mogelijk op het bodemoppervlak af te knippen op de kamerlocaties en te drogen bij 105 °C. Dit leverde voor de referentieplot een hoeveelheid van 501 g/m² op, voor maatregel 536 g/m², 7% meer bovengrondse biomassa op maatregel dan op referentie. In 2023 is de grasopbrengst geschat door telling van het aantal balen na het maaien door Dhr. van der Eijk. Bij de eerste snee op 13 juni was de opbrengst op het maatregelperceel ±10% minder dan op referentie, waarschijnlijk door het koude en natte voorjaar. Bij de tweede snede (6 september) had maatregel een ±20% hogere opbrengst dan referentie. Het gedraineerde deel ligt lager dan het referentiedeel, met name de middenstrook. Dit verklaart mede waarom de grasgroei minder snel is gestart en de grasproductie tot aan de eerste snee achter is gebleven in 2023.

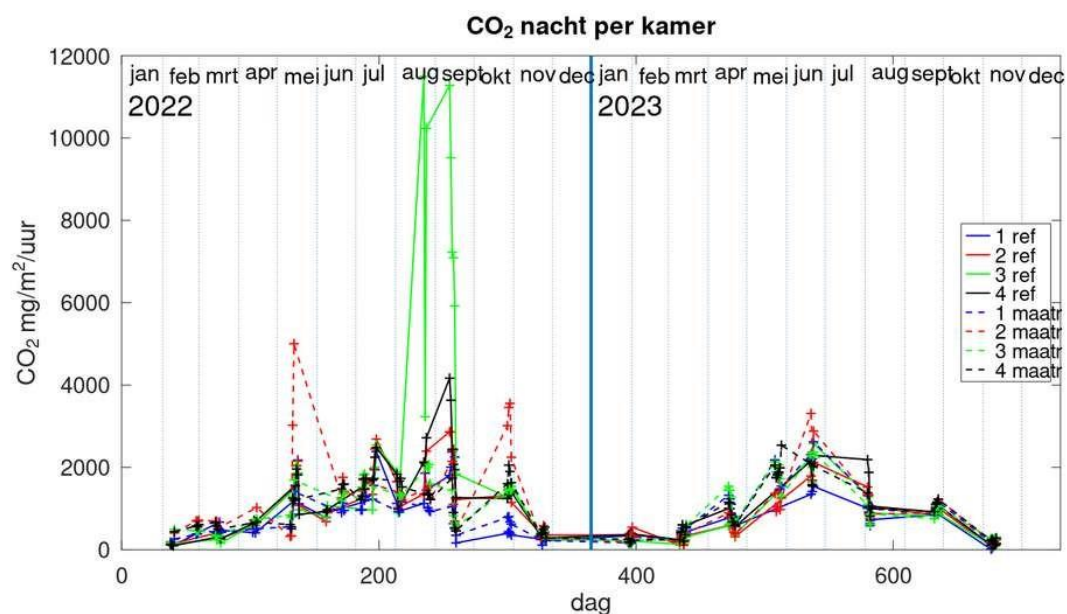
10.4.3 Broeikasgasmetingen.

10.4.3.1 Beschrijving van de metingen.

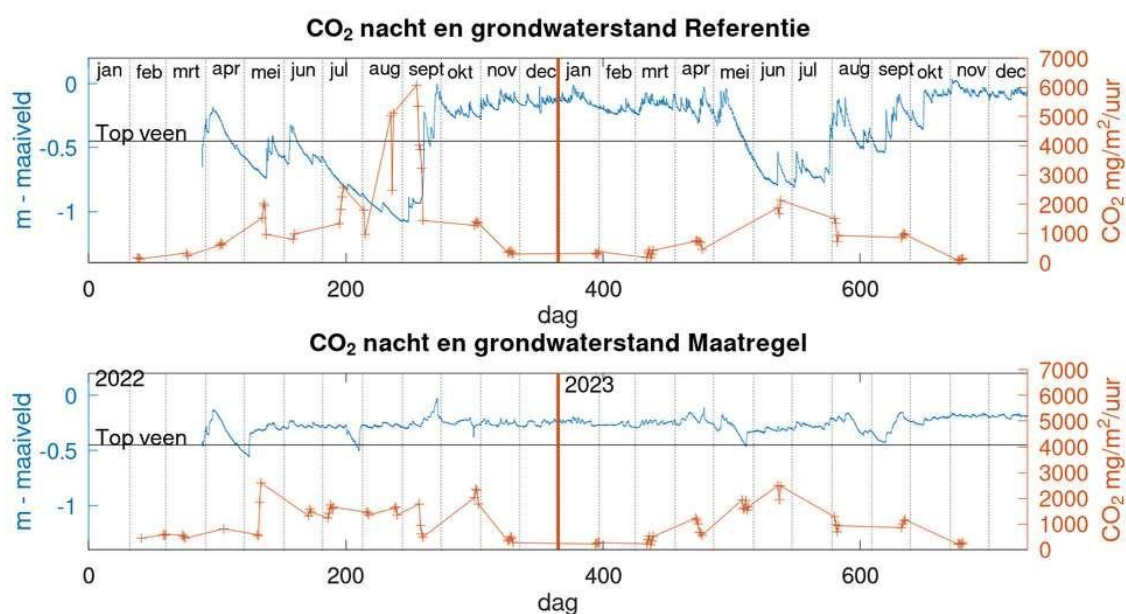
Voor analyse van de meetgegevens zijn de resultaten van de metingen van 2022 nogmaals nagekeken op mogelijke meetproblemen door niet goed sluiten van de automatische kamers. Dit heeft geleid tot aanpassing van de nachtelijke meetresultaten van 25/8/22 op de referentieplot, toen een van de kamers mogelijk niet goed gefunctioneerd heeft. De automatische CH₄ metingen zijn in 2023 gestopt vanwege slecht functioneren van de gasanalyser, en vervangen door extra CO₂ metingen. Er is in augustus 2023 nog wel een korte meetcampagne uitgevoerd met een handbediende kamer om te verifiëren of de verschillen in CH₄ emissie uit 2022 tussen referentie en maatregel in 2023 ook optreden.

De nadruk in de bespreking van meetresultaten ligt op de nachtelijke metingen (R_{eco} , ecosysteemrespiratie) en het dagelijkse gemiddelde van de CH₄ metingen. Deze worden het meest direct beïnvloed door de maatregel en geven de meeste informatie over de effecten ervan. De metingen overdag komen aan de orde in de modelresultaten en inschatting van de bijdrage van snel afbreekbare koolstofverbindingen.

De onderlinge variatie in de gemiddelde nachtelijke CO₂-emissie tussen de kamers is groot, vooral in de droge zomer van 2022. In 2023 is dit aanzienlijk minder al zijn de verschillen tussen referentie en maatregel ook groot. Ook tussen naast elkaar geplaatste kamers kunnen aanzienlijke verschillen zijn, die samenhangen met lokale, vaak subtiele verschillen in bodemsamenstelling en dichtheid van vegetatie en doorworteling. Vooral kamer 3 in de zomer van 2022 springt eruit, met in de periode van de diepste grondwaterstand een CO₂-uitstoot die 2-3 keer zo hoog is als die van de andere kamers. Deze hoge uitstoot blijkt ook snel te variëren (periode 24-26 augustus). De hoge emissie uit deze kamer trekt ook het gemiddelde van alle kamers op de referentieplot omhoog. De hoge waarden voor kamer 3 worden herhaald in september, vlak voor het einde van de droge periode, om vervolgens snel te dalen bij regen en stijging van de grondwaterstand (Fig. 15). Deze normale reactie van de CO₂ fluxen wijst erop dat de hoge CO₂-uitstoot op de locatie van deze kamer geen artefact zijn.

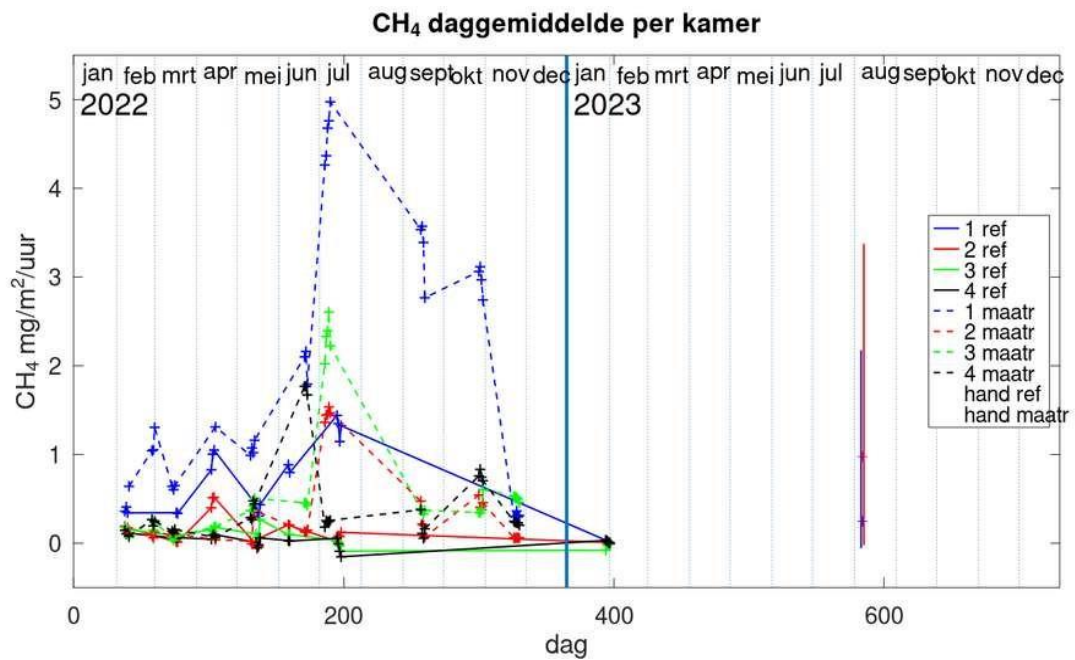


Figuur 15. Gemeten nachtelijke CO₂ emissie per kamer in beide jaren; gemiddelde per kamer gedurende de nacht. De plaatsing van kamer 1 wijkt af in 2022 ten opzichte van 2023; in 2022 is deze kamer op de greppelrand geplaatst.



Figuur 16. Grondwaterstanden en gemiddelde nachtelijke CO₂ uitstoot. Grondwaterstanden zijn ter beschikking gesteld door Acacia Water.

De oorzaak van de snelle wisseling van de CO₂-emissies in augustus kon niet worden vastgesteld; de afzonderlijke metingen zijn extra gecontroleerd maar dat gaf geen aanwijzing voor meetfouten. Wel bleek in september de kamer op een kleine scheur in de bodem te hebben gestaan, waardoor mogelijk extra zuurstof beschikbaar was voor oxidatie van organische stof.



Figuur 17. Methaan-emissie per kamer. Alleen in 2022 en januari is methaan gemeten met automatische kamers. De verticale blauw en rode lijnen geven het gemiddelde en standaardafwijking aan van de transectmetingen met een handbediende kamer op 8 augustus 2023.

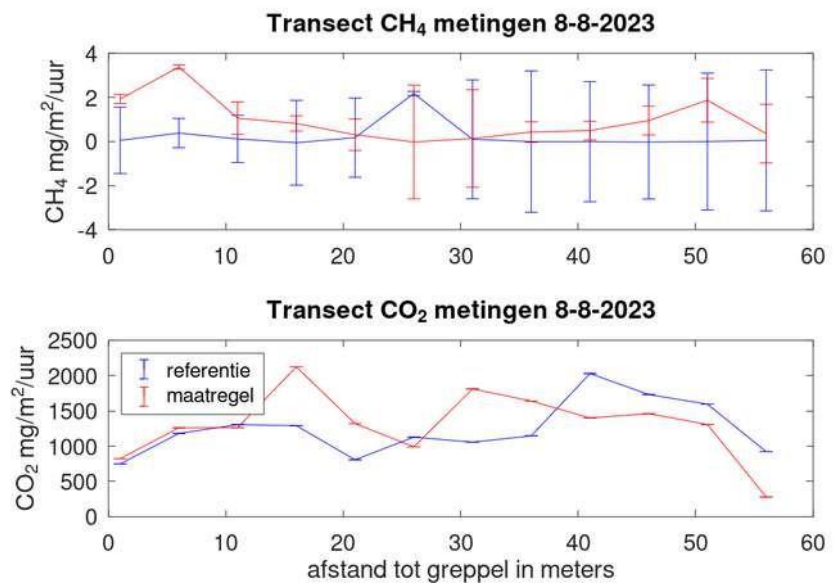
	Gemiddelde referentie mg/m ² /uur	Gemiddelde maatregel mg/m ² /uur	Vershil referentie- maatregel CO ₂ mg/m ² /uur	Significant?	p waarde	Vershil referentie- maatregel CO ₂ equivalenten mg/m ² /uur	percentage verschil CO ₂ tov referentie
CO ₂ nacht land	1530.0	1138.1	391.98	ja	< 0.001	363.39	-25.62
CO ₂ nacht greppel	874.90	665.67	209.23	ja	< 0.001	179.09	-23.91
CH ₄ land	0.4948	0.8486	-0.3539	ja	< 0.001		71.52
CH ₄ greppel	0.4806	0.8535	-0.3729	ja	< 0.001		77.60
CO ₂ Transecten 8-8-'23	1245.1	1306.5	-61.3	nee	0.30 (n=12)		4.9
CH ₄ Transecten 8-8-'23	0.246 niet detecteerbaar	0.9748	0.7873	ja			296

Tabel 3. Verschillen tussen gemiddelden van de gemeten CO₂ en CH₄ fluxen. Significantietest: Student's T-test.

Ook de methaanuitstoot vertoont sterke variatie per kamer op iedere locatie en iedere meetdag (Fig. 17). Daarbij is de methaanemissie het laagst op de referentieplot. Zowel op de referentie als op de maatregelplot heeft kamer 1 (op de greppelrand) de hoogste emissie. Ook de CH₄ emissie uit de greppelrand is op de maatregelplot hoger dan op de referentieplot.

Figuur 18. Errorbar plot van transecten loodrecht op de greppel en sloot gemeten met de

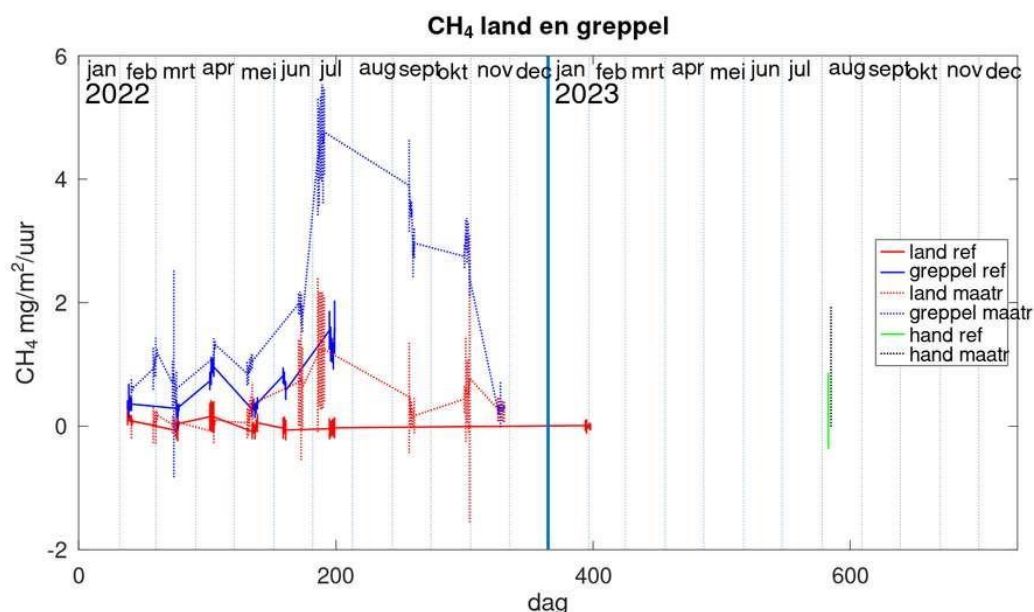
Los Gatos microportable CO₂/CH₄ analyzer en een met de hand bediende kamer (metingen met verduisterde kamer). De verticale lijnen in de grafiek geven per meting de statistische meetonzekerheid aan; doordat de CH₄ fluxen laag zijn ten opzichte van de nauwkeurigheid van de apparatuur. Voor de CO₂ metingen is de onzekerheid zeer laag ten opzichte van de gemeten flux.



De greppel op de referentieplot droogde in de zomer uit, terwijl de greppel op de maatregelplot nat bleef. Tabel 3 laat significante verschillen zien tussen de gemeten nachtelijke CO₂-emissie en de gemiddelde dagelijkse CH₄ emissie in 2022. De CO₂-emissie uit de maatregelplot is aanzienlijk lager dan uit de referentieplot; de CH₄ emissie uit de maatregelplot is een factor 2 hoger dan uit de referentieplot. De CH₄ uitstoot op de maatregelplot en in de greppel op de referentieplot is het hoogst in de zomer, ondanks de droogte, wat erop wijst dat bodemtemperatuur naast grondwaterstand een belangrijke factor is.

De CH₄ gemiddelden van de transectmetingen op 8-8-2023 (Fig. 18) verschillen niet veel van de metingen in 2023 en suggereren dat de emissie bij benadering hetzelfde is als 2022 (Tabel 3). De metingen in 2023 zijn echter een momentopname zijn van 1 dag in hoogzomer wanneer de emissie hoog is door de hoge bodemtemperatuur, met bovendien een ander neerslag/droogtepatroon, terwijl de gemiddelden in Tabel 3 metingen door het hele jaar 2022 betreffen. Voor de referentieplot zijn de fluxen niet detecteerbaar door de hoge meetonzekerheid (zie onder) en moet worden aangenomen dat ze gelijk aan 0 zijn. Ook voor de maatregelplot is de meetonzekerheid hoog (Fig. 18, 19).

De CO₂ metingen van de transecten zijn in dezelfde orde van grootte als de CO₂ metingen van de automatische kamers op dezelfde datum (vergelijk Tabel 3 en Fig. 14). Verschillen in terreinhoogte zijn in de transecten duidelijk zichtbaar. De transecten begonnen beide op de randzone van de greppel, en eindigden in de randzone van de sloot. Daar is de maaiveldhoogte lager dan het gemiddelde. In de greppelrand en slootrand zijn de CO₂ fluxen het laagst. Dit patroon is ook zichtbaar in Tabel 3 (CO₂ fluxen in de greppelrand aanzienlijk lager dan daarbuiten) en Fig. 18.



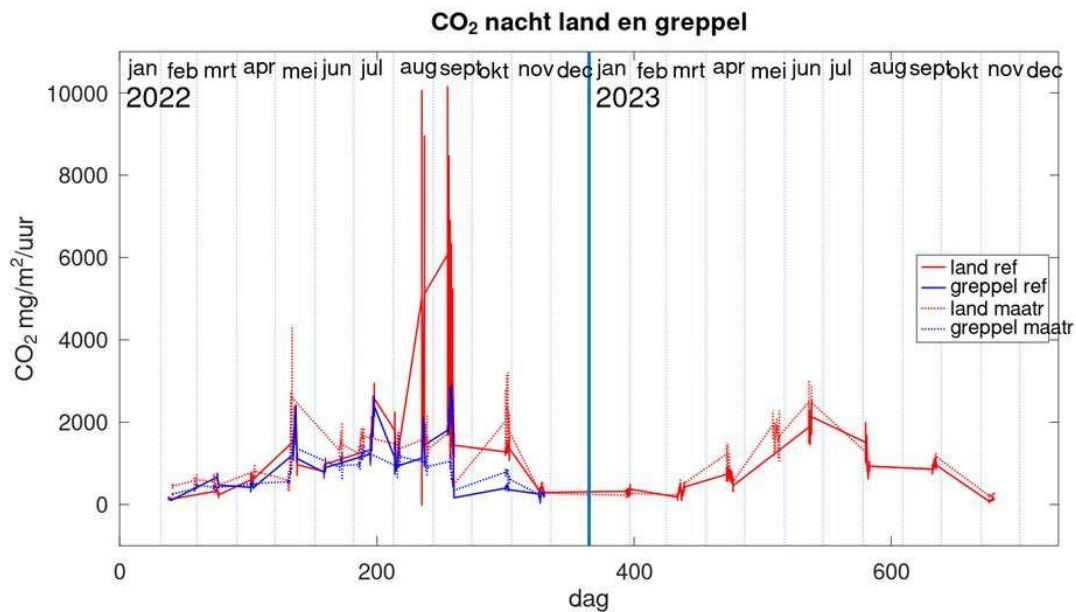
Figuur 19. CH_4 metingen op land en in de greppel met elkaar vergeleken. De verticale lijnen geven de standaarddeviatie van het gemiddelde (over alle betrokken kamers) over 1 dag aan.

Het hoogteverschil tussen de locatie waarop meestal met kamer 1 gemeten werd ten opzichte van het overige landoppervlak waarop met de andere drie kamers gemeten werd, bedraagt slechts 14 cm voor de referentieplot en 10 cm voor de maatregelplot. De randzone van de greppel is 1.8 – 1.9 m breed gerekend vanaf het midden van de greppel. Het gemiddelde verschil in nachtelijke CO_2 uitstoot met de landmetingen over alle greppelmetingen in 2022 is $676 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{uur}$ voor referentie, en $441 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{uur}$ voor maatregel, respectievelijk 44% en 41% van de uitstoot op land. In de CH_4 metingen van de transecten zijn echter geen duidelijke verschillen te zien tussen de randzones van greppel en sloot en de overige metingen.

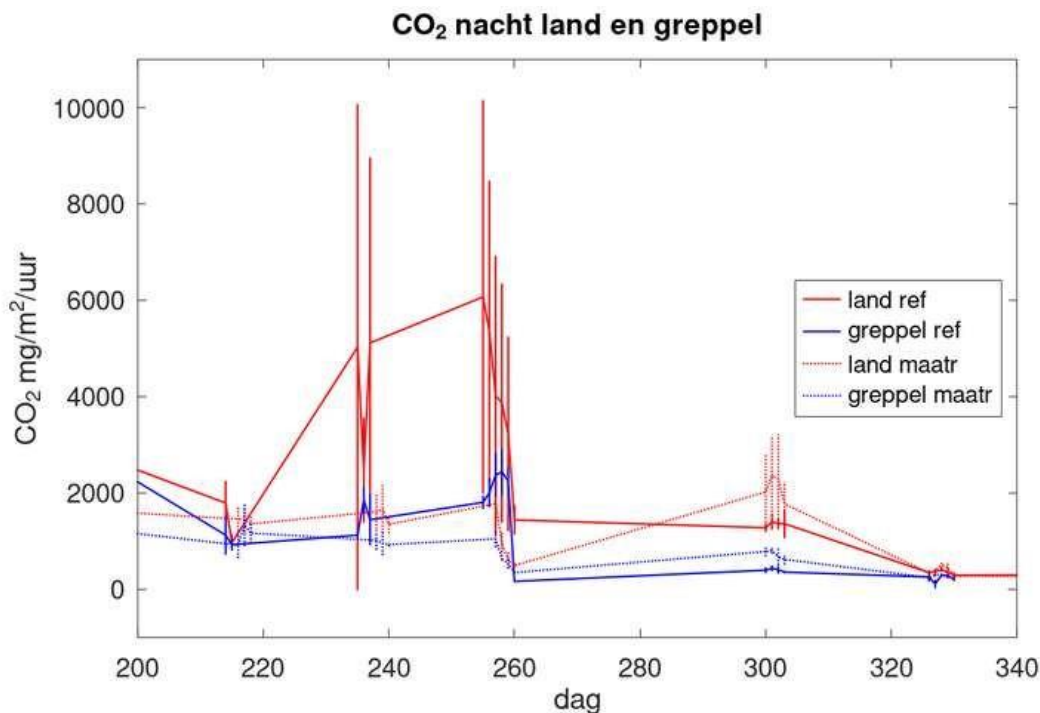
10.4.3.2 Statistische analyse.

In Fig. 20 is aan de lengte van de verticale staven voor iedere meetdag te zien, dat de standaarddeviatie

(spreiding) van de gemiddelde R_{eco} sterk varieert per meetdag, vooral op de referentieplot. Hoe hoger R_{eco} , hoe groter de standaarddeviatie. In Fig. 21 is dat in meer detail te zien voor het tweede halfjaar van 2022. Omdat dit het gemiddelde over meerdere kamers betreft, is dit een gevolg van ruimtelijke variatie over de afstand tussen de kamers (1-10 meter). Bij de greppelmetingen (1 kamer) is de spreiding veel minder sterk, en vooral het gevolg van de variatie tussen de opeenvolgende metingen. Op de maatregelplot is de ruimtelijke variatie veel minder dan op de referentieplot; de spreiding van de metingen met meerdere kamers is er geringer.



Figuur 20. CO₂ metingen (nachtelijke ecosysteemrespiratie, R_{eco}) op het land en in de greppel met elkaar vergeleken. De verticale lijnen geven de standaarddeviatie van het gemiddelde (over alle betrokken kamers) over 1 dag aan.



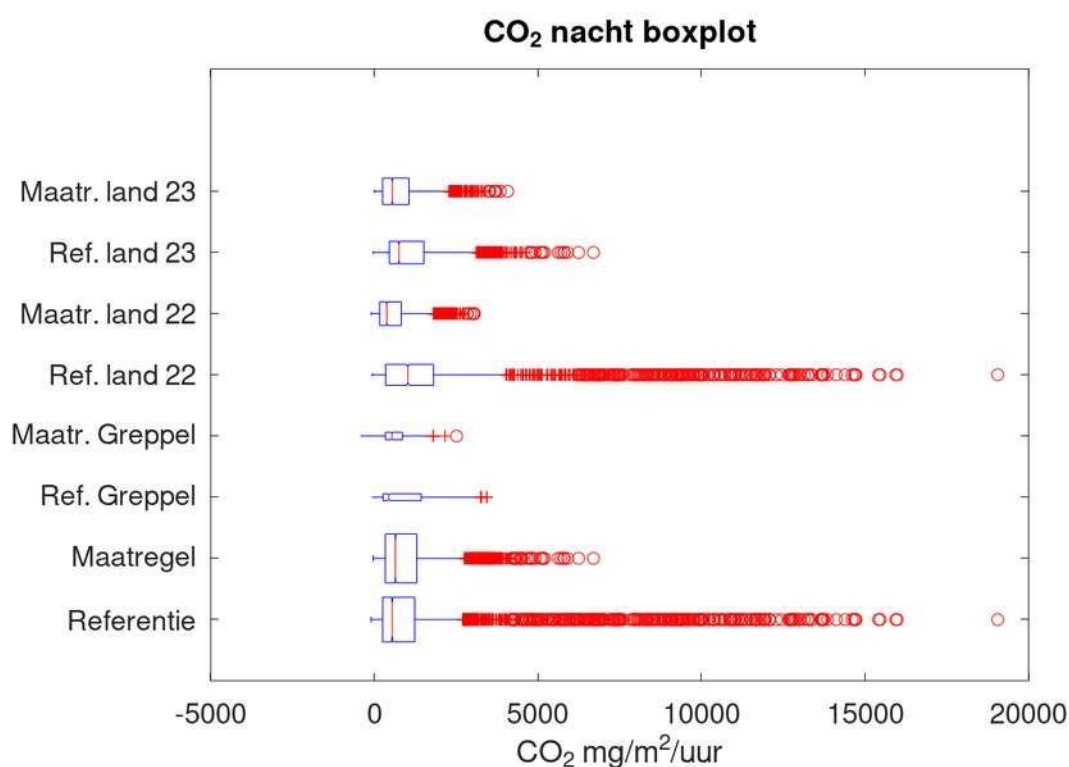
Figuur 21. Detail van figuur 20 voor het 2e halfjaar van 2022.

Hieruit blijkt dat de ruimtelijke variatie van de fluxen versterkt wordt zodra er meer organisch materiaal beschikbaar is voor aerobe afbraak door microbiële activiteit. Verschillende processen kunnen hiervoor verantwoordelijk zijn: verschillen in productie van organische stof (wortellexudaten) door fotosynthese, verschillen in organische stofgehalte van de bodem en verschillen in diffusie van zuurstof in de bodem (zie Discussie).

De boxplot in Fig. 22 laat zien dat de toename van spreiding met de hoogte van de metingen voor alle

CO₂ metingen geldt, zowel voor referentie als maatregel, en optreedt in zowel 2022 als (in mindere mate) in 2023. Er is sprake van een scheve kansverdeling, met vooral voor de landmetingen op de referentieplot grote uitschieters naar de hoge kant. Voor de CH₄ metingen geldt dit minder (Fig. 23); daar is statistische meetonzekerheid van de instrumentatie en fluxberekening het belangrijkste, vooral bij de lage meetwaarden buiten de greppel waarbij ook uitschieters naar de lage kant optreden.

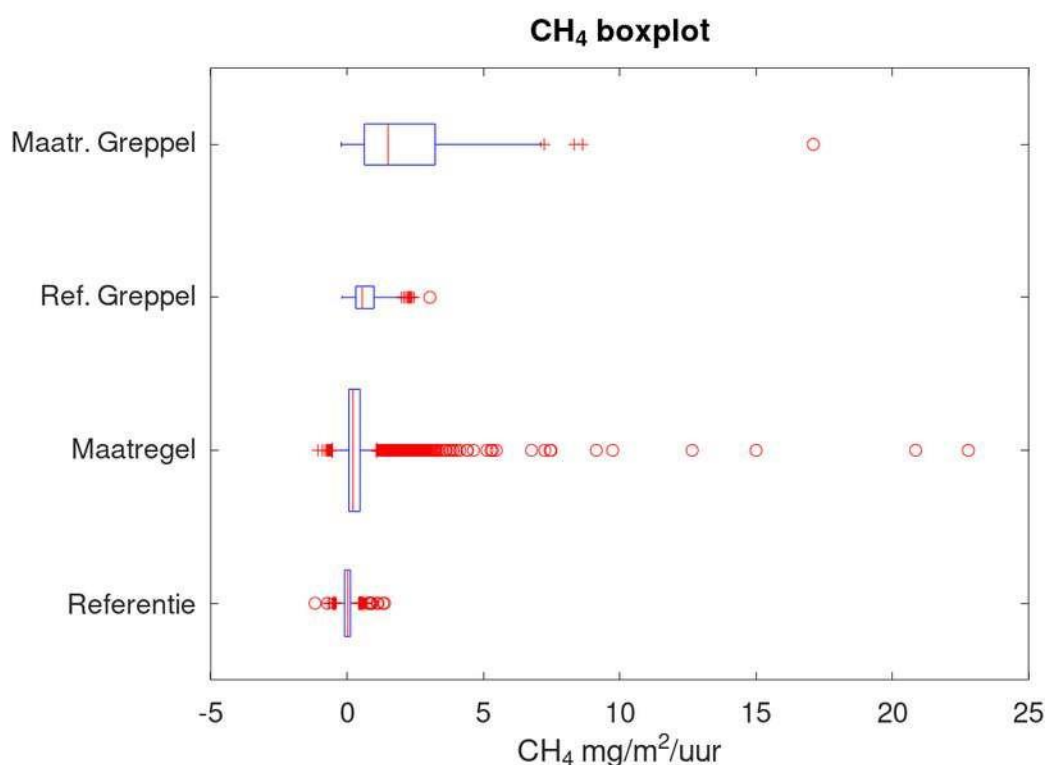
De boxplot in Fig. 22 laat zien dat de toename van spreiding met de hoogte van de metingen voor alle CO₂ metingen geldt, zowel voor referentie als maatregel, en optreedt in zowel 2022 als (in mindere mate) in 2023. Er is sprake van een scheve kansverdeling, met vooral voor de landmetingen op de referentieplot grote uitschieters naar de hoge kant. Voor de CH₄ metingen geldt dit minder (Fig. 23); daar zijn statistische meetonzekerheid van de instrumentatie en fluxberekening het belangrijkste, vooral bij de lage meetwaarden buiten de greppel waarbij ook uitschieters naar de lage kant optreden.



Figuur 22. Boxplot van alle nachtelijke CO₂ metingen (R_{eco}). Deze plot geeft de mediaanwaarde van de metingen en de spreiding ervan rond de mediaan. De rode lijn in het midden van de blauwe rechthoeken geeft de mediaan (50% percentiel) aan, de lengte van de rechthoeken geeft het verschil tussen de 25% en 75% percentiel. De hoogte van de rechthoeken is geschaald naar het aantal metingen per groep. De horizontale blauwe lijnen geven 1,5 x het verschil tussen de 25% en 75% percentiel aan. De rode symbolen geven metingen aan die buiten dat bereik liggen en dus sterk afwijken van de mediaan.

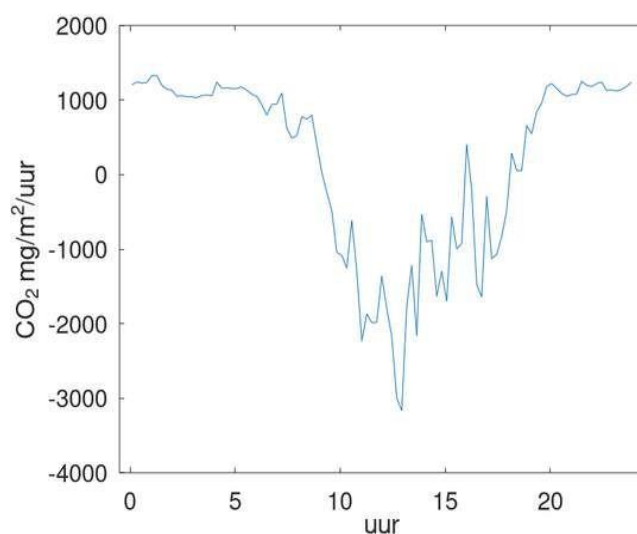
Correlatie- en regressieanalyse kan iets meer zeggen over de processen die verantwoordelijk zijn voor de variatie van de metingen in de tijd. Er zijn helaas te weinig gegevens om de ruimtelijke variatie te onderzoeken, er is maar één bodemprofiel beschikbaar. Belangrijke variabelen voor de

ruimtelijke variatie zijn biomassa en de hoeveelheid en eigenschappen van de organische stof in de bodem. Belangrijke variabelen in de tijd die ter plaatse gemeten konden worden zijn de temperatuur, neerslag, grondwaterstand en de hoeveelheid zonnestraling (als benadering van de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling). De actuele hoeveelheid fotosynthese kan benaderd worden door de CO₂ opname binnen de kamers te schatten. Dit is het verschil tussen nachtelijke ecosysteemrespiratie en de CO₂ flux rond de hoogste zonnestand overdag (2 uur voor tot 2 uur na de middag), ofwel de amplitude van de dagelijkse gang van de CO₂ flux (Fig. 24).



Figuur 23. Boxplot van alle CH₄ metingen. Deze plot geeft de mediaanwaarde van de metingen en de spreiding ervan rond de mediaan. Voor verdere uitleg zie figuur 19.

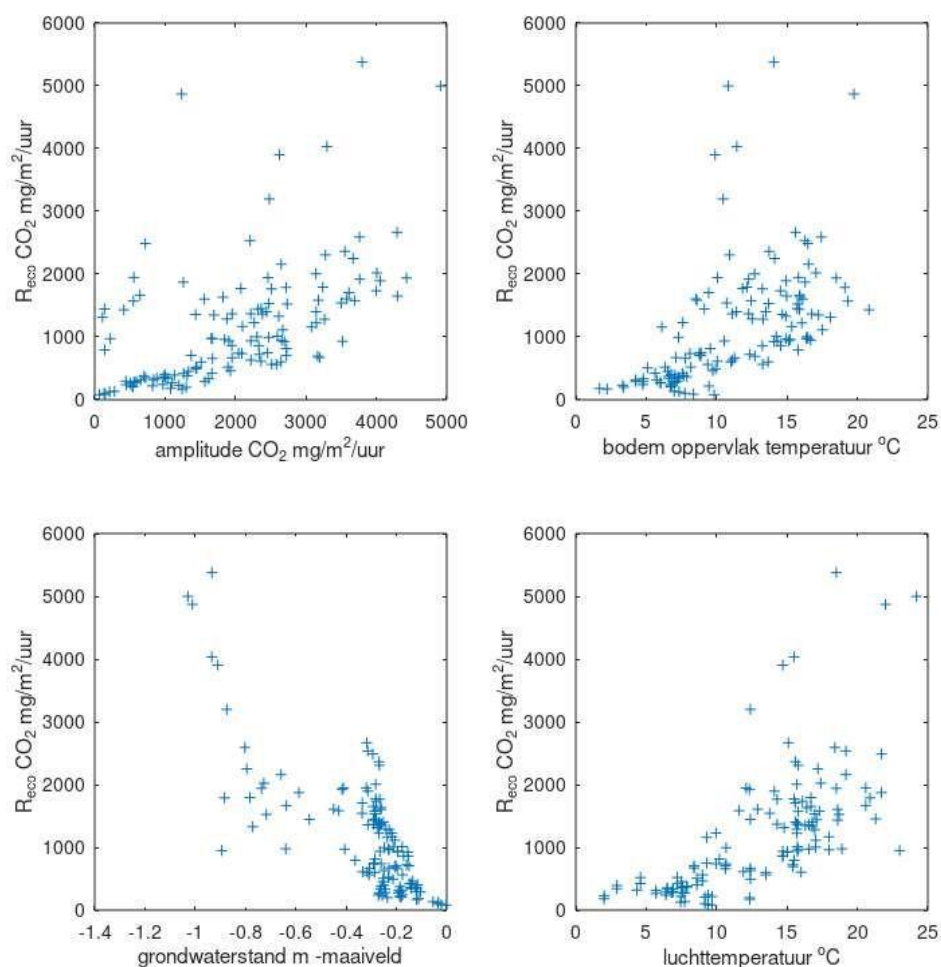
Blijkens Fig. 25 correleren deze variabelen met R_{eco} . Tabel 4 geeft de correlaties tussen de variabelen R_{eco} , grondwaterstand, oppervlaktetemperatuur van de bodem, luchttemperatuur, globale straling en dagnacht amplitude CO₂ flux, voor alle meetdagen met 24 uur gegevens, op zowel maatregel als referentie. Voor dag-nachtamplitude en globale straling zijn de waarden van de dag voorafgaand aan de meetdag genomen, omdat de verse, door fotosynthese geproduceerde organische stof niet onmiddellijk in de bodem beschikbaar is.



Figuur 24. CO₂ flux van 1 kamer op een zonnige dag op de maatregelplot (20/4/2023).

	R_{eco}	grondwater	bodem T	lucht T	straling	amplitude	eenheid
R_{eco}	1.00	-0.76	0.54	0.67	0.45	0.55 mg/m ² /uur	
grondwater		1.00	-0.44	-0.56	-0.47	-0.43 m	
bodem T			1.00	0.87	0.59	0.35 °C	
lucht T				1.00	0.61	0.46 °C	
straling					1.00	0.55 J/cm ²	
amplitude						1.00 mg/m ² /uur	

Tabel 4. Correlatiecoëfficiënten van R_{eco} met grondwaterstand, temperatuur bodemoppervlak (bodem T), luchttemperatuur (lucht T), globale straling en dag-nacht amplitude CO_2 flux.



Figuur 25. Puntenwolken van R_{eco} , uitgezet de amplitude van de CO_2 flux, oppervlaktetemperatuur, grondwaterstand en luchttemperatuur.

Alle gevonden correlaties zijn significant. In Fig. 25 zijn de correlaties tussen R_{eco} en een selectie van deze variabelen weergegeven. Opvallend is de sterke correlatie tussen R_{eco} en grondwaterstand, maar ook de correlatie tussen de andere variabelen is sterk. Dat geeft aan dat de grondwaterstand niet de enige verklarende variabele kan zijn.

Vervolgens is een regressieanalyse van R_{eco} op deze variabelen uitgevoerd met een algemeen lineair model (GLM, General Linear Model. James et al., 2021). Hierbij is ervan uitgegaan dat alle verbanden van R_{eco} met deze variabelen lineair zijn. Dit geldt bij benadering voor alle variabelen

(Fig. 25). Het verband R_{eco} - bodemtemperatuur is in principe niet lineair maar exponentieel; toch kan dit als nagenoeg lineair benaderd worden binnen het bereik van de waarden in Fig. 25. Regressievergelijkingen met alle mogelijke combinaties van deze variabelen zijn uitgetoetst, voor zowel alle gegevens, referentieplot en maatregelplot. De regressievergelijkingen hebben de vorm $R_{eco} = constante0 + constante1 \times variabele1 + constante2 \times variabele2 + constante3 \times variabele3$ etc.

Vergelijking			Alle		Referentie		Maatregel	
Var 1	Var 2	Var 2	G.O.F.	F test	G.O.F	F test	G.O.F	F test
grondwater				0.58 182.9	0.72	159.8	0.31	30.2
bodem T				0.29 52.3	0.25	20.2	0.43	50.5
lucht T				0.44 103.4	0.43	45.1	0.53	76.5
amplitude				0.31 57.8	0.39	39.7	0.28	26.5
grondwater	bodem T			0.64 112.2	0.73	79.2	0.63	55.1
grondwater	lucht T			0.67 128.3	0.72	79.0	0.69	73.4
grondwater	amplitude			0.65 117.8	0.73	82.7	0.45	26.5
bodem T	amplitude			0.44 51.0	0.45	24.3	0.58	45.9
lucht T	amplitude			0.52 70.4	0.52	32.7	0.62	53.5
grondwater	bodem T	amplitude		0.68 90.1	0.74	54.9	0.70	49.8
grondwater	lucht T	amplitude		0.70 97.5	0.73	54.3	0.73	57.4

Tabel 5. Termen in de regressievergelijkingen van GLM, Goodness-of-fit (G.O.F.) en F (variantie ratio) test van de regressievergelijking voor alle gegevens, referentie en maatregel. De goodness of fit (ofwel R^2) geeft aan in hoeverre de data afwijken van de regressievergelijking, en de F-test geeft aan in hoeverre de variantie in de gegevens verklaard worden door de variabelen in de regressievergelijking. Alle F-test waarden zijn statistisch significant ($p < 0.01$).

De globale straling is op voorhand buiten de beschouwing gelaten in de regressieanalyse. De correlatie met R_{eco} is niet hoog, de variabele is voor alle kamers gelijk, en opname van amplitude in de vergelijkingen geeft een benadering van de organische productie waarin ook lokale verschillen tussen de kamers meegenomen wordt. Ook de temperatuur van het bodemoppervlak en de luchttemperatuur zijn sterk aan elkaar gecorreleerd. In principe is echter de bodemtemperatuur directer van invloed op de processen in de bodem dan de luchttemperatuur. De correlatie van R_{eco} met de luchttemperatuur is echter beter, en uit de regressievergelijkingen blijkt dat toevoegen van de luchttemperatuur aan de vergelijkingen in bijna alle gevallen tot een betere goodness-of-fit en een betere F-test waarde leidt dan de bodemtemperatuur (Tabel 5). De bodemtemperatuur wordt daarom verder buiten beschouwing gelaten.

Bij de regressievergelijkingen met één variabele is de grondwaterstand de belangrijkste sturende factor voor alle waarnemingen en de referentieplot, met de hoogste bijdrage aan de goodness-of-fit en de hoogste F-test waarde. Voor de maatregelplot geldt dat niet; daar is de luchttemperatuur de belangrijkste, met grondwater op de tweede plaats. De geringere variatie van de grondwaterstand op de maatregelplot is hiervan de oorzaak; daardoor worden de temperatuursveranderingen door de jaarlijkse seizoensvariatie vanzelf belangrijker als verklaring voor R_{eco} . Temperatuur is voor alle

waarnemingen en de referentieplot de tweede factor. De primaire productiefactor dag-nacht amplitude draagt het minst bij.

Toevoegen van temperatuur of dag-nacht amplitude naast grondwater aan de regressievergelijking verbetert voor alle waarnemingen en de goodness-of-fit en de F-test waarde aanzienlijk. Voor de referentieplot draagt de dag-nacht amplitude iets meer bij dan de temperatuur. Voor de maatregelplot verbetert vooral toevoegen van de temperatuur de regressievergelijking. Bij alle drie variabelen komt in alle gevallen de goodness-of-fit op 0.7 tot 0.73 (1.0 is de maximaal mogelijke waarde).

De referentie- en maatregelplot gedragen zich daarmee duidelijk verschillend in hun reactie op sturende variabelen van R_{eco} . Voor referentie is de grondwaterstand de belangrijkste sturende variabele van R_{eco} , voor maatregel de temperatuur. Voor de referentieplot zijn zowel temperatuur als amplitude (primaire productie) belangrijke variabelen, voor maatregel de grondwaterstand en pas in de laatste plaats primaire productie. De veel geringere variatie van de grondwaterstand op de maatregelplot is de meest voor de hand liggende verklaring voor dit patroon. Mogelijk geldt ook eenzelfde soort verklaring voor de primaire productie; op de maatregelplot is dit waarschijnlijk gelijkmatiger verdeeld over het terrein dan op referentie.

10.4.3 Modelleren van de broeikasgasfluxen met Peatland-VU.

Het Peatland-VU model is toegepast om de broeikasgasfluxen te kunnen interpoleren tussen de meetcampagnes, en te schatten wat de bijdrage is van veenoxidatie aan de gemeten CO_2 -fluxen. Dit wordt vanzelfsprekend beperkt door de capaciteiten van het model en de mogelijkheid om het model te kalibreren op de gemeten gasfluxen. Bij de kalibratie moet rekening worden gehouden met zowel de onzekerheid in de metingen (zie Methoden), de onzekerheid in de parameters van het model, en welke bodemprocessen het model kan simuleren. Voor de meetonzekerheid is vooral de onzekerheid door de ruimtelijke variatie in bodem en vegetatie groot, terwijl het model met slechts één uniform bodemprofiel werkt, waarin de (onbekende) ruimtelijke variaties op de schaal van meters niet kunnen worden betrokken. Voor CH_4 komt daar nog de meetonzekerheid van de instrumentatie bij. Het model kan daardoor alleen al nooit een exacte overeenkomst tussen metingen en veldgegevens bereiken. De kalibratie gaat uit van een zo goed mogelijke overeenkomst tussen het model en alle beschikbare waarnemingen.

Zoals beschreven in de Methoden sectie, wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde Kling-Gupta efficiency (KGE-waarde hierna) om de prestaties van het model te berekenen. Daarbij is het hoogste gewicht gegeven aan minimalisatie van verschillen tussen gegevens en model, en een zo goed mogelijke overeenkomst in variatie van model- en data in de tijd. Een KGE-waarde tussen 0 en 1 geeft aan dat het model de waarnemingen in ieder geval beter volgt dan een schatting op basis van het gemiddelde van de waarnemingen; hoe hoger de waarde, hoe beter het model presteert en de waarnemingen volgt. De KGE-waarden van de beste simulaties lagen tussen 0.50 en 0.85.

Tabel 6. Model-parameters gebruikt in de kalibratie van het model. De met een grijze achtergrond gemarkeerde parameters zijn in de uiteindelijke simulaties gebruikt. Enkele parameters zijn specifiek voor een van de gebruikte vegetatiemodellen, in de beschrijving aangeduid met 'Model A' en 'Model B'. Voor de modelruns met alleen aerobe afbraak zijn de KAnaerobic parameters niet gebruikt, wel is de methaanvorming meegerekend.

Parameter naam	Groep	Functie
Kdecay(4)	Aerobe afbraak	k exudaten
Kdecay(5)		k plantenresten
Kdecay(7)		k humus
Kdecay(1)		k veen
PrimingCorrection		verhoging afbraaksnelheid priming
AerobicQ10		temperatuurgevoeligheid veenoxidatie
HalfSatPoint	Anaeroob	correctie afbraaksnelheid voor hoge waterverzadiging
T_ref		referentietemperatuur temperatuurcorrectie
Q10Anaerobic		temperatuurgevoeligheid anaerobe afbraak
MethaneQ10		Temperatuurgevoeligheid CH ₄ vorming
MethaneR0		omzettingsfractie CH ₄
MethanePType		vegetatiefactor plantentransport CH ₄
KAnaerobic(1)		anaerobe afbraaksnelheid veen
KAnaerobic(4)		anaerobe afbraaksnelheid exudaten
KAnaerobic(5)		anaerobe afbraaksnelheid plantenresten
Phenology(2)		minimum temperatuur groei
Phenology(3)	Vegetatieontwikkeling	growing degree days bij maximum vegetatie ontw.
Phenology(4)		maximum LAI
Phenology(6)		minimum LAI
RespFac(1)		Model A blad respiratie
RespFac(2)		Model A wortel/stengel respiratie
LAICarbonFraction		hoeveelheid koolstof per LAI eenheid
PhotoPar(1)		Model B plantenrespiratiefactor
PhotoPar(2)		Model B temperatuurgevoeligheid respiratie
PhotoPar(3)		Model B max. fotosynthese snelheid
PhotoPar(4)		Model B initiele toename fotosynthesesnelheid
ShootsFactor		Fractie bovengrondse primaire productie
ExudateFactor		fractie ondergrondse pproductie naar exudaten
SpringCorrection	Verdeling primaire prod.	correctiefactor exudaten voorjaar
RootSenescence		fractie afsterven wortels per dag
Grazing		fractie begrazing per dag
HarvestCorrection		Model B fractie vegetatie fractie na oogst
HarvestCorrection		Model B teruggroei dagen na oogst

Voor locaties met verschillende grondwaterstand zijn afzonderlijke modelsimulaties uitgevoerd.

Daarbij is ook het effect van beide verschillende vegetatie- en primaire productiemodellen getest (zie Methodes): Biome3, LPJ, Haxeltine & Prentice, 1996) (Model A hierna) en het productiemodel voor graslanden en toendra (Shaver et al., 2007) (Model B hierna). Tenslotte is ook geëxperimenteerd met verschillende waarden voor de snelheid van anaerobe afbraak van organische stof en het aan/uitschakelen van anaerobe afbraak.

In eerste instantie is een groter aantal parameters getest op de mate waarin de modelresultaten er gevoelig voor zijn (Tabel 6). Parameters met een minimale gevoeligheid, en parameters die snel naar een vaste waarde convergeerden voor alle combinaties van vegetatiemodel en gesimuleerde locaties zijn vervolgens buiten beschouwing gelaten. Voor de invoer van de bodemgegevens is de profielbeschrijving van Tabel 1 en 2 gebruikt. Voor de bovenste horizont van het toemaakdek is aangenomen, dat een relatief klein deel een fractie van de organische stof nog als 'veen' beschouwd kan worden, omdat er nog herkenbare plantenresten in te zien zijn; de rest bestaat exudaten, recente wortelmassa en humus. Het percentage veen in de organische stof neemt af van 70% aan de basis van het toemaakdek tussen 25 en 45 cm naar 10% in de bovenste 10 cm.

Beste Kling-Gupta Efficiencies

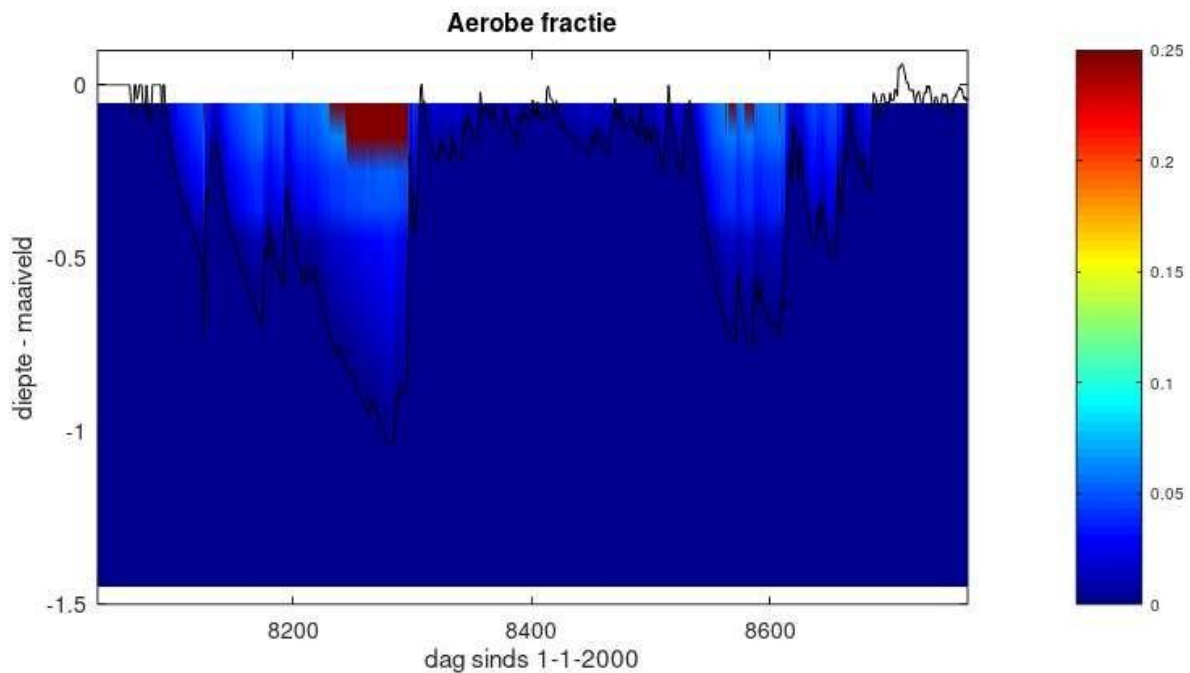
		locatie				
		Referentie		Maatregel		
	Simulatie	Model A	Model B	Model A	Model B	Gemiddeld
	Aeroob	0,559	0,653	0,599	0,568	0,595
	Aeroob Laag	0,543	0,595	0,661	0,537	0,584
	Anaeroob Hoog	0,702	0,722	0,524	0,503	0,613
	Greppel	0,650	0,716	0,664	0,723	0,688
	Gemiddeld	0,613	0,672	0,612	0,583	

Tabel 7. Kling-Gupta Efficiencies van de montecarlo simulaties van Peatland-VU voor de verschillende locaties en modelvarianten. De maximale KGE-waarden van de modelsimulatie van iedere variant zijn weergegeven.

Montecarlo simulaties volgens de GLUE-methode (zie Methodes) zijn uitgevoerd voor de volgende locaties en modelvarianten:

1. Referentie en Maatregel (land, exclusief greppel), alleen aerobe CO₂ en CH₄ uitstoot ("**Aeroob**" hierna)
2. Referentie en Maatregel (land, exclusief greppel), aerobe en anaerobe CO₂ en CH₄ uitstoot waarin ook anaerobe CO₂ vorming onder de grondwaterspiegel wordt gesimuleerd ("**Anaeroob Laag**" hierna)
3. Referentie en Maatregel (land, exclusief greppel), aerobe en anaerobe CO₂ en CH₄ uitstoot omzettingssnelheid waarbij ook gedeeltelijke anaerobe condities boven de grondwaterstand wordt gesimuleerd ("**Anaeroob Hoog**" hierna)
4. Referentie en Maatregel greppel (met 10-14 cm hogere grondwaterstand, dunner toemaakdek, parametrisatie voor anaeroob laag).

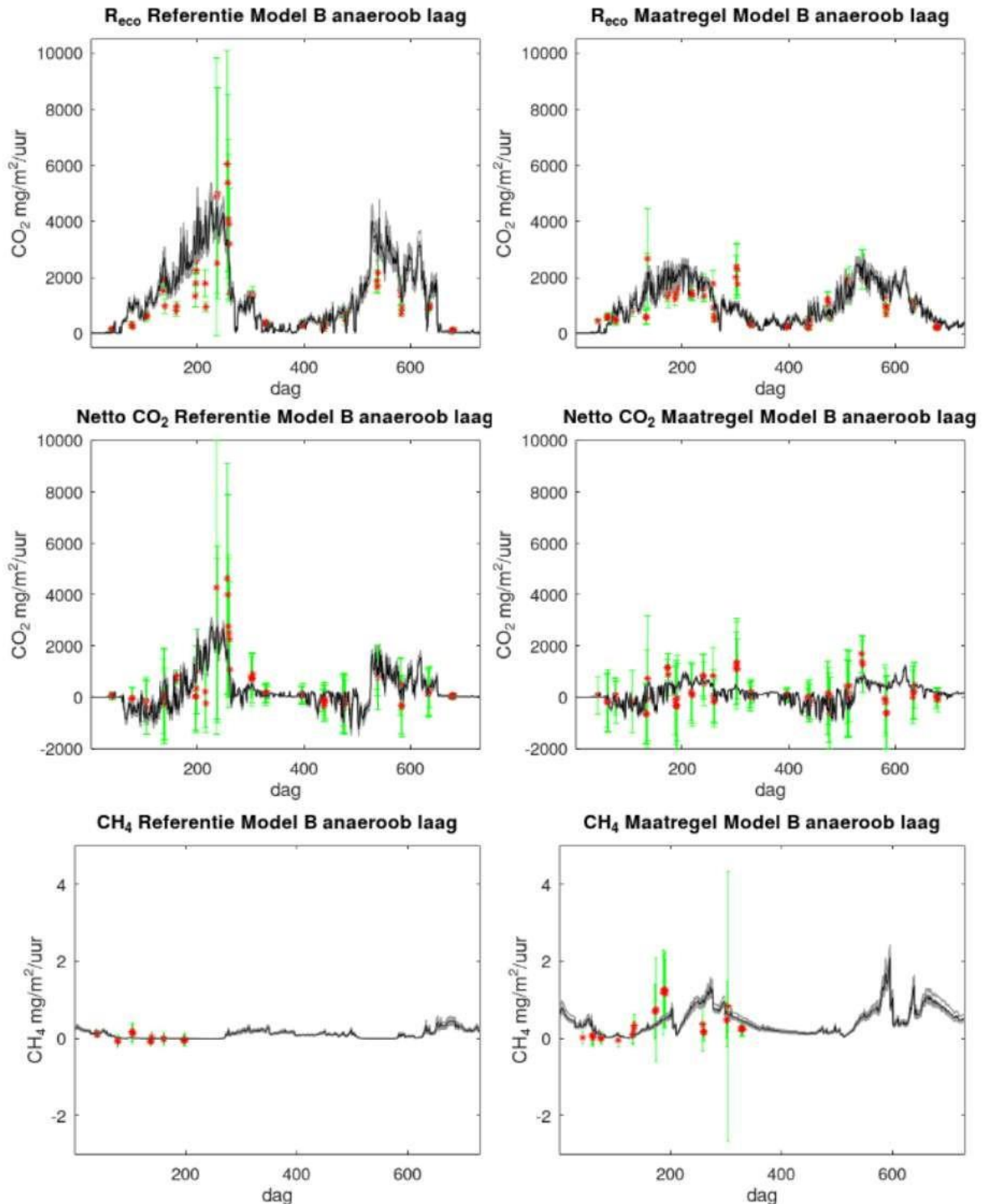
De kalibratiegegevens zijn voor R_{eco} het nachtelijke gemiddelde van alle CO₂ metingen van 1 uur na zonsondergang tot 1 uur voor zonsopkomst, voor de Netto Ecosysteem Uitwisseling (NEU) de dag + nacht gemiddelden van alle CH₄ metingen, voor CH₄ de dag + nacht gemiddelden van alle CH₄ metingen. Voor de greppel en CH₄ zijn minder kalibratiegegevens beschikbaar omdat de metingen nagenoeg tot 2022 beperkt zijn; de kalibratiegegevens voor de greppel zijn bovendien beperkt tot metingen van één kamer.



Figuur 26. Voorbeeld van de effecten van partiële anaerobie in de Anaeroob Hoog simulaties voor Referentie. De kleuren geven de aerobe fractie van de bodem aan, met de diepte n in de loop van de tijd; donkerblauw is volledig anaeroob, rood volledig aeroob. De zwarte lijn is de grondwaterstand.

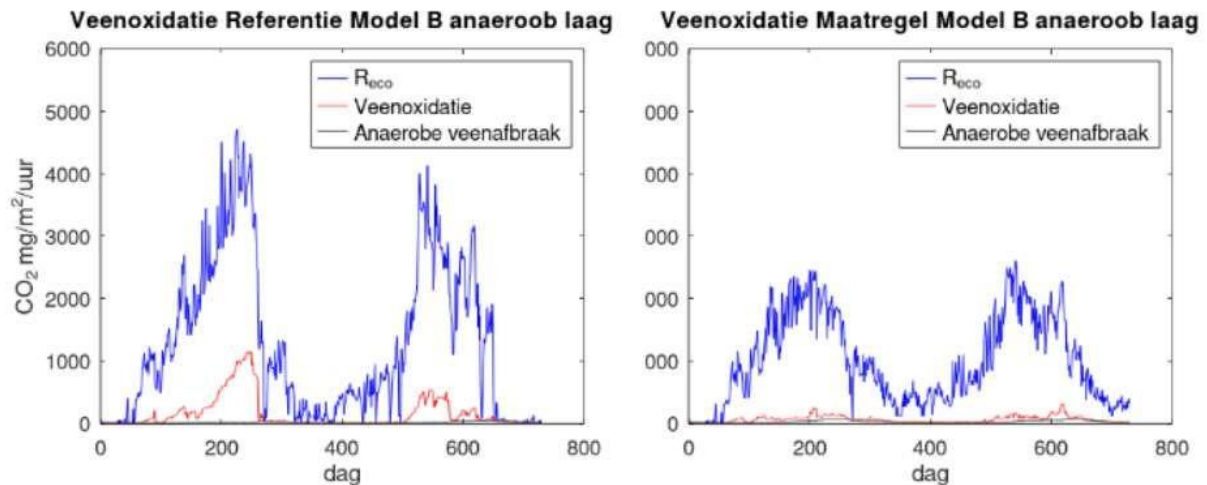
Voor ieder van de model tests zijn montecarlo modelsimulaties volgens de GLUE-methode gedaan met 1000 afzonderlijke model runs. Invoer bestond uit de weergegevens en de lokaal gemeten grondwaterstanden. De modelruns starten op 1-1-2000, met 21 spinup-jaren. Tot aan de beschikbaarheid van de lokaal gemeten grondwatergegevens, zijn door het model gegenereerde grondwatergegevens gebruikt, gekalibreerd op de tot november '23 beschikbare metingen van de grondwaterstand van de referentieplot. Voor de dagen dat er geen lokaal beschikbare weergegevens beschikbaar waren, zijn weergegevens van KNMI-weerstation Cabauw-mast gebruikt (luchttemperatuur op 2 m hoogte, neerslag, inkomende globale straling, verdamping). De gemeten zonnestraling van het lokale weerstation in 2023 zijn gekalibreerd op de gegevens van Cabauw-mast.

In het model is zeer recent de optie opgenomen om partiële anaerobie zoals weergegeven in Fig. 2 (Boonman et al., 2024) te simuleren. Dit is lineair afhankelijk gemaakt van de waterverzadiging van iedere bodemlaag in het model. Een fractie van de waterverzadigde porieruimte (weergegeven met de modelparameter Partial Anaerobe) wordt geacht voldoende anaeroob te zijn voor het optreden van anaerobe reacties. Het effect daarvan is weergegeven in Fig. 26. Net als in Fig. 2, is er een aanzienlijke anaerobe fractie boven de grondwaterspiegel in het model.

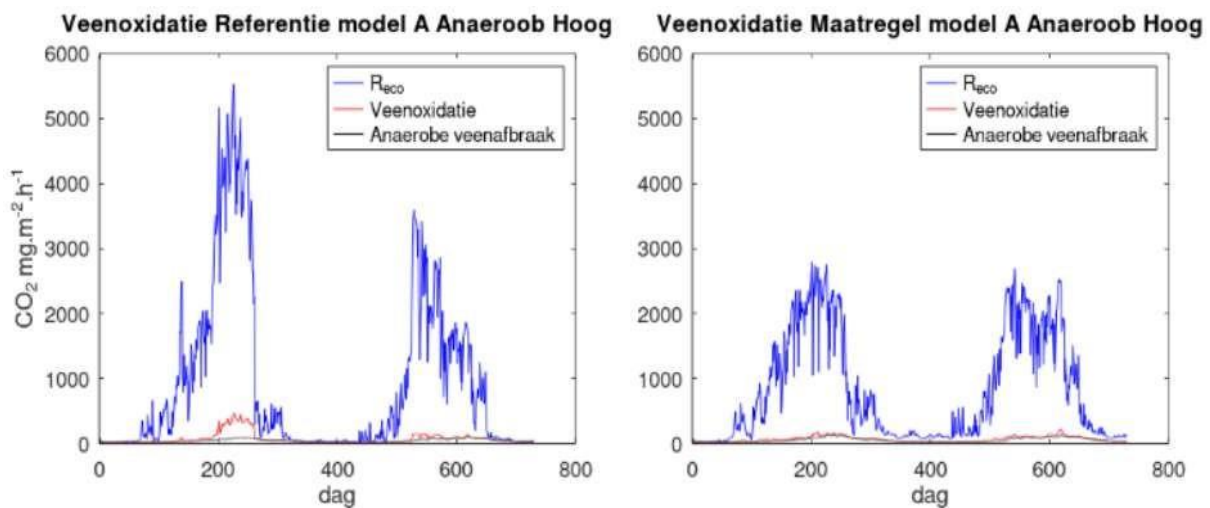


Figuur 27. Modelresultaten voor R_{eco} , NEU , CH_4 , referentie en maatregel, Anaeroob Laag, vegetatiemodel B. Rode sterren vertegenwoordigen de metingen, groene verticale lijnen hun standaarddeviatie. De zwarte lijn is het gemiddelde van de 10 beste modelsimulaties; afzonderlijke simulaties zijn in grijs weergegeven.

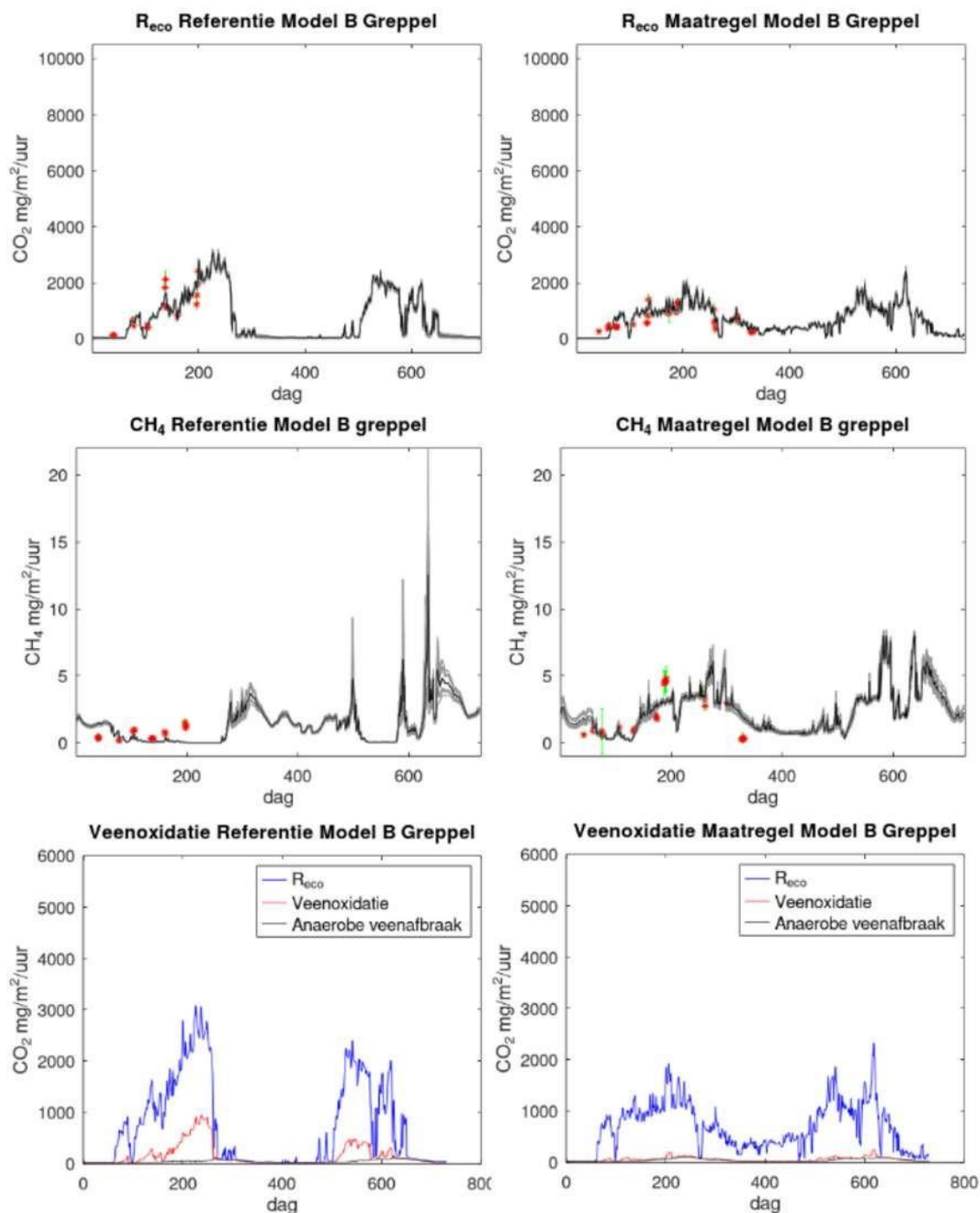
De mate waarin model en data verschillen worden weergegeven door de Kling-Gupta Efficiencies (KGE), zie Tabel 7. De KGE's van de modelvarianten A en B verschillen niet significant van elkaar. Model B lijkt voor de referentie-plot wat betere resultaten te geven, model A voor de maatregelplot, al zijn de verschillen niet significant.



Figuur 28. Aandeel van aerobe veenoxidatie (rode lijn) in R_{eco} (blauwe lijn) van de modelconfiguratie in Fig. 27 en de anaerobe omzetting van veen (zwarte lijn). Alleen het gemiddelde van de 10 beste simulaties zijn getoond.



Figuur 29. Aandeel van aerobe veenoxidatie (rode lijn) in R_{eco} (blauwe lijn) en de anaerobe omzetting van veen (zwarte lijn) bij aanname van gedeeltelijk anaerobe condities boven de grondwaterspiegel.



Figuur 30. Modelresultaten voor R_{eco} , CH_4 en veenoxidatie (anaeroob laag) van de greppel.

Systematische afwijkingen tussen model en data zijn vooral te zien in de zomer van 2022 (kort na dag 200, Appendix 1 en Fig., 27) voor Referentie, en in het najaar van 2022 voor Maatregel; in beide gevallen onderschat het model R_{eco} . Dit is het geval bij alle modelvarianten en simulaties (Appendix 1).

De gemeten R_{eco} fluxen op Referentie zijn zo hoog in de extreem droge zomerperiode periode, dat het model dit niet kan volgen. Waarschijnlijk is de scheurvorming op het hoogtepunt van de droge periode in 2022 de oorzaak. Dit proces is niet opgenomen in het model, en kan een abnormaal hoge afbraak van organische stof door sterke toename van de beschikbaarheid van zuurstof veroorzaken

(Vahedifard et al., 2024). De afwijking in het najaar van 2022 in Maatregel is moeilijker te interpreteren; voor de Referentie benadert het model wel de metingen correct. Het valt samen met een toename van de grondwaterstand na een wat drogere periode in de herfst.

Tabel 7 suggereert dat het toevoegen van anaerobe CO₂ vorming boven de grondwaterspiegel (Anaeroob Hoog) het model verbetert voor Referentie. De KGE's voor Anaeroob Hoog zijn beduidend hoger. Dit is echter niet het geval voor Maatregel. De maximaal bereikbare KGE-waarden zijn lager dan die voor de Aeroob en Anaeroob Laag simulaties. Alleen wanneer anaerobie boven de grondwaterspiegel uitgeschakeld wordt, verbeteren deze modelsimulaties aanzienlijk. Dit geeft aan dat partiële anaerobie boven de grondwaterspiegel alleen een groot effect heeft in perioden met lage grondwaterstand, zoals Fig. 2 en 26 ook aangeven. Om deze redenen zijn de Anaeroob Hoog simulaties voor Maatregel niet opgenomen in de jaarbalansen, en worden in plaats daarvan de Anaeroob simulaties gebruikt.

In Fig. 28 is het aandeel van CO₂ afkomstig uit afbraak van veen weergegeven volgens de modelsimulaties. De anaerobe veenafbraak is in deze modelconfiguratie laag (nauwelijks zichtbaar in Fig. 28) voor referentie in 2022; in 2023 bij hogere grondwaterstanden wat hoger. Voor maatregel is het totaal aan veenoxidatie in beide jaren veel lager dan bij referentie, en het aandeel anaerobe CO₂ uit veen hoger. Bij inschakelen van de anaerobe CO₂ module neemt het aerobe aandeel in veenoxidatie af. Dit is vooral goed te zien bij de Anaeroob Hoog modelsimulaties (Fig. 29) waarin gedeeltelijke anaerobie boven de grondwaterspiegel is aangenomen. Voor de referentieplot tijdens de droge periode in 2022 is er een aanzienlijke anaerobe bijdrage. Op het moment dat in het najaar de grondwaterspiegel stijgt, overheerst de anaerobe component. In de maatregelplot is bijna alle omzetting van veen anaeroob.

De optimalisatie van de Anaeroob Hoog simulaties geven ook duidelijk verschillen in de parameter PartialAnaerobe die de mate van anaerobie boven de grondwaterspiegel bepaalt. Voor Referentie is de waarde ± 4 , wat betekent dat $\frac{3}{4}$ van de waterverzadigde porieruimte als anaeroob wordt beschouwd. Voor Maatregel ligt de waarde dichtbij 1, wat betekent dat in waterverzadigde porieruimte aeroob is. Dat is ook te verwachten als de grondwaterspiegel dichtbij het oppervlak ligt, waar sneller diffusie van zuurstof in de bodem plaatsvindt. In feite presteert het model voor Maatregel wat beter als partiële anaerobie wordt uitgeschakeld; simulatie van partiële anaerobie is kennelijk alleen zinvol bij diepere grondwaterstanden.

De waarden voor anaerobe afbraaksnelheid die zijn aangenomen zijn echter onzeker. De meeste gegevens hierover zijn afkomstig van situaties onder duidelijk mariene invloed met aanvoer van veel sulfaat (Van Huissteden & Van de Plassche, 1998; Middelburg et al., 1996), en overschatten waarschijnlijk de waarden in polder Bloemendaal waar de sulfaatconcentraties veel lager zijn (zie ook Discussie hieronder). De bij de montecarlo simulaties gevonden range van waarden voor de anaerobe k factor voor veen liggen tussen 0.0007 – 0.0010 dag⁻¹ (als maximale waarde werd 0.0010 dag⁻¹ aangenomen). De montecarlo-simulaties toonden een duidelijke gevoeligheid van het model voor deze parameter.

De greppel viel op de referentieplot in 2022 droog, in 2023 niet. De greppel op de maatregelplot had ook in 2022 een grotendeels waterverzadigde bodem. Het model (Fig. 30) simuleert voor R_{eco}, NEU (niet in Fig. 30, zie Appendix I) en CH₄ waarden die dichtbij de waarnemingen liggen. De geringere meetonzekerheid in de gegevens (weinig ruimtelijke variatie met gegevens uit slechts 1 kamer) draagt bij aan redelijk hoge KGE-waarden voor de model-efficiëntie. De gemodelleerde R_{eco} neemt snel toe in de Referentie-greppel tijdens de droge zomer van 2022, en bereikt hogere

waarden dan dezelfde locatie in 2023, en in de Maatregel-greppel in 2022. Volgens het model vindt in de Referentie-greppel in droge perioden nog aerobe veenoxidatie plaats.

Het CH₄ model simuleert in 2023 echter abnormaal hoge waarden voor de greppel, die niet gecontroleerd kunnen worden wegens gebrek aan gegevens. De oorzaak hiervan ligt mogelijk aan de aannames omtrent plantentransport van CH₄. Van het model is bekend dat bij waterstanden boven het oppervlak aannames omtrent plantentransport erg nauw luisteren, en het hogere emissiepieken kan genereren bij laag plantentransport. De vegetatie in de greppel op de locatie waar gemeten is, is echter geen typische moerasvegetatie met hoge transportcapaciteit voor methaan, reden waarom geen hoge transportfactor voor de planten is opgenomen.

In Fig. 27-30 en voor de berekening van de jaarbalans zijn voor iedere modelconfiguratie de tien best presterende modelruns (10 hoogste KGE-waarden) genomen. Daarvan is het gemiddelde en de standaardafwijking per dag berekend als indicatie voor de modelonzekerheid. Deze standaarddeviaties zijn met behulp van de gebruikelijke formules voor foutenvoortplanting doorberekend in de jaarbalans.

De simulaties voor vegetatiemodel A en B laten systematische verschillen zien, met name voor Referentie. Over het algemeen geven de simulaties met model B hogere CO₂ uitstoot voor R_{eco}, en A hogere waarden voor het aandeel van veen daarin. De verschillen in netto ecosysteem uitwisseling zijn geringer. De oorzaak van dit verschil ligt in de wijze waarop beide modellen het aandeel van plantenrespiratie in R_{eco} berekenen; voor model B leidt dit tot een hoger plantenrespiratie-aandeel. Daardoor ontstaat ook modelonzekerheid in het aandeel van veenafbraak in R_{eco}. Voor de Anaeroob Hoog / Referentie simulaties leidt dit echter tot onaanvaardbaar grote verschillen (tot 67%) in de hoeveelheid veenafbraak boven de grondwaterspiegel. Omdat model A voor deze simulaties duidelijk beter presteert (Tabel 7) is ervoor gekozen om de resultaten van Model A hiervoor niet te gebruiken.

Een keuze voor een van beide modellen is moeilijk te maken, beide hebben hun voor- en nadelen. Model A is complexer, en geschikt voor een groter bereik aan vegetatietypen; Model B is meer specifiek voor geschikt voor lage vegetaties. Het is gebruikelijk om bij verschillen in modelstructuur het gemiddelde te berekenen van de modelresultaten (o.a. IPCC-rapporten; van de Craats et al., 2023); dat is hier ook gedaan voor Model A en B voor verdere analyse van de jaarbalansen, behalve voor de Anaeroob Hoog / Referentie simulaties.

10.4.1 Jaarbalans.

De jaarbalans is bepaald uit de modelsimulaties door integratie van de gemodelleerde R_{eco}, NEU, CO₂ uit veenafbraak en CH₄ per dag over de jaren 2022 en 2023 voor alle modelconfiguraties. Op de dagen waarvoor metingen van R_{eco}, NEU en CH₄ beschikbaar zijn, zijn eerst de gemodelleerde dagwaarden vervangen door de gemeten waarden voordat integratie plaatsvond. Appendix III geeft een uitgebreid overzicht van de jaartotalen voor alle modelconfiguraties; Tabel 8 een samenvatting hiervan. In Tabel 8, en voor de discussie hieronder is de modelconfiguratie Anaeroob Laag met alleen anaerobe afbraak onder de grondwaterspiegel buiten beschouwing gelaten. Alleen voor de greppel locaties is Anaeroob Laag wel in de jaarbalans betrokken; voor de greppellocaties voegt de Anaeroob Hoog simulatie niets toe. De resultaten van de modelconfiguraties met vegetatiemodellen A en B zijn ook gemiddeld in Tabel 8, als model ensemble, behalve voor Anaeroob Hoog; daarin is alleen model A gebruikt vanwege de slechtere prestaties van model B. Alle resultaten zijn omgerekend van de modeluitkomsten van mg/m²/uur naar ton gas per hectare per jaar.

De verschillen tussen Referentie- en Maatregel-locaties zijn aanzienlijk in 2022. R_{eco} is op de Referentie in 2022 113 ton CO_2 /ha, tegen 83 ton/ha voor Maatregel, een verschil van 31 ton of een factor 1.4 (Tabel 8, Aeroob). Voor Aeroob Hoog zijn deze waarden voor R_{eco} respectievelijk 97 en 64 ton/ha (factor 1.5 verschil) door een lagere CO_2 -emissie uit de bodem ten gevolge van een groter aandeel tragere, anaerobe omzetting van organische stof.

Voor de berekende aerobe veenoxidatie zijn de verschillen nog groter, 17.3 tegen 3.5 ton/ha, ofwel een factor 5 hoger op Referentie dan op Maatregel. Als het model echter ook anaerobe veenafbraak boven de grondwaterspiegel meeneemt zijn de verschillen aanzienlijk kleiner in 2022: Referentie 5.6 ton/ha en Maatregel 1.8 ton/ha, een factor 3.1 verschil. Verschillen zijn er ook voor de greppel-locaties in 2022, zij het minder groot. R_{eco} voor Referentie is 75 ton/ha tegen 56 ton/ha voor Maatregel (factor 1.3 hoger), aerobe veenoxidatie een toch nog aanzienlijke 13.6 ton/ha op Referentie, 1.5 ton/ha voor Maatregel, met referentie een factor 9 hoger. Mogelijk zijn de relatief hoge emissies te danken aan het dunnere toemaakdek ter plaatse.

Voor CH_4 in 2022 heeft Referentie gezien de meetonzekerheid een uitstoot van 0, voor Maatregel is dit 0.04 ton CH_4 /ha. Voor CH_4 heeft de Referentie-greppel een 2 x lagere uitstoot dan Maatregelgreppel. Gezien de onzekerheden in metingen en model voor lage CH_4 metingen moet hieraan echter niet te veel waarde gehecht worden.

In 2023 zijn de verschillen tussen Referentie en Maatregel veel geringer, door het extreem natte voorjaar en najaar. Daardoor bleef ook in het grootste deel van het jaar de grondwaterstand in Referentie hoog. Het verschil in R_{eco} tussen Referentie en Maatregel bedroeg 5 ton/ha (87 t.o.v. 82 ton/ha), Referentie is een factor 1.06 hoger. Voor de aerobe veenoxidatie is het verschil hoger, maar veel minder sterk dan in 2022: 7.0 ton/ha voor referentie en 3.4 ton/ha voor maatregel, een factor 2.1 hoger. CH_4 is in 2023 niet gemeten, en de modelsimulaties daarvoor van Referentie zijn voor 2023 ook minder betrouwbaar. In de greppelrand is R_{eco} voor Maatregel in 2023 4 ton/ha hoger dan voor referentie; veenoxidatie is echter beduidend lager (1.4 ton/ha voor Maatregel, 5.6 ton/ha voor Referentie).

Samenvatting jaarbalans ton CO₂/ha/jaar

Aeroob en Anaeroob Laag: gemiddeld model A en B

Anaeroob hoog: alleen model A

Alleen aerobe veenafbraak

	R _{eco}		NEU		Totaal veenafbraak		% Anaeroob		CH ₄		
	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom		jaarsom	st. afw.	
Referentie	2022	113.03	0.26	32.30	0.24	17.26	0.06	0	0	0.0076	0.0000
	2023	87.33	0.26	16.93	0.23	7.04	0.02	0	0	0.0130	0.0001
Maatregel	2022	82.69	0.26	13.79	0.11	3.52	0.01	0	0	0.0399	0.0002
	2023	82.31	0.25	14.50	0.12	3.38	0.01	0	0	0.0442	0.0002

Totaal CO₂ equivalenten – afname fossiel CO₂ + toename CH₄

Schatting bodemdaling door veenafbraak mm/jaar

Op basis van aerobe veenoxidatie

	100 jaar GWP		20 jaar GWP				
	CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.			
	2022	12.86	0.40	11.13	Referentie	2022	7.71
	2023	2.81	0.40	1.13		2023	3.14
Gemiddeld		7.83	0.29	6.13	Maatregel	2022	1.57
						2023	1.51

Anaeroob Hoog: Inclusief anaerobe veenafbraak boven grondwaterspiegel

	R _{eco}		NEU		Veenafbraak > GWS		% Anaer.	Aeroob afbraak		CH ₄	
	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	2022	97.19	0.48	40.17	0.48	5.55	0.09	21.88	4.33	0.09	0.0072
	2023	63.45	0.57	11.15	0.57	1.71	0.03	43.06	0.98	0.03	0.0109
Maatregel	2022	73.74	0.15	14.28	0.09	1.76	0.01	32.32	1.19	0.01	0.0437
	2023	72.60	0.15	14.38	0.09	1.67	0.01	32.59	1.13	0.01	0.0494

Totaal CO₂ equivalenten – afname fossiel CO₂ + toename CH₄

Schatting bodemdaling door veenafbraak mm/jaar

Op basis van aerobe en anaerobe veenafbraak boven grondwaterspiegel

	100 jaar GWP		20 jaar GWP				
	CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.			
	2022	2.79	0.41	0.83	Referentie	2022	3.46
	2023	-1.01	0.40	-0.15		2023	2.11
Gemiddeld		0.89	0.29	0.34	Maatregel	2022	2.55
						2023	2.64

Greppel

Anaeroob Laag

	R _{eco}		NEU		Totaal veenafbraak		% Anaer.	Aeroob veenoxidatie		CH ₄	
	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	2022	75.18	0.17	24.27	0.16	18.02	0.12	24.31	13.64	0.11	0.0837
	2023	50.43	0.17	14.66	0.15	11.02	0.10	49.24	5.59	0.03	0.1726
Maatregel	2022	55.89	0.12	8.88	0.07	4.98	0.03	70.96	1.45	0.01	0.1770
	2023	54.50	0.12	11.46	0.07	5.09	0.03	72.13	1.42	0.01	0.2021

Totaal CO₂ equivalenten – afname fossiel CO₂ + toename CH₄

Op basis van aerobe veenoxidatie

	100 jaar GWP		20 jaar GWP		
	CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.	
	2022	9.66	0.41	4.66	
	2023	3.37	0.41	1.79	
Gemiddeld		6.51	0.29	3.23	

Tabel 8. Samenvatting van de jaarbalans. Zie ook Appendix III.

De netto ecosysteem uitwisseling (NEU) is voor alle jaren positief volgens het model, dat wil zeggen dat bodem en vegetatie netto koolstof verliezen aan de atmosfeer over het hele jaar heen. Voor Referentie in 2022 is dit 2.4 – 2.8 keer zo hoog dan voor maatregel; voor 2023 zijn de verschillen veel kleiner. Dat is dan nog exclusief het maaien en afvoeren van het gras en ganzenzenvraat of beweiding. Op basis van de bovengrondse biomassa-bepalingen en twee snedes per jaar zou, omgerekend naar CO₂, de oogst in de orde van 12 – 15 ton/ha moeten bedragen.

Correctie voor 14% greppel/slootrand

		R _{eco}		NEU		Veenafbraak > GWS		Aeroob		CH ₄	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	2022	94.11	0.41	37.94	0.41	1.91	0.02	5.64	0.08	0.0179	0.0001
	2023	61.63	0.49	11.64	0.49	0.78	0.00	1.62	0.02	0.0335	0.0003
Maatregel	2022	71.24	0.13	13.52	0.07	0.20	0.00	1.23	0.01	0.0623	0.0001
	2023	70.06	0.13	13.97	0.08	0.20	0.00	1.17	0.01	0.0708	0.0002
Totaal CO ₂ equivalenten – afname fossiel CO ₂ + toename CH ₄											
Op basis aerobe veenafbraak											
		100 jaar GWP		20 jaar GWP		Op basis van anaerobe en aerobe veenafbraak > grondwaterspiegel					
		CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.	100 jaar GWP		20 jaar GWP			
		CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.	CO ₂ eq.	st. afw.		
		2022	12.41	0.35	10.23	0.28	2022	3.75	0.35	1.37	0.28
		2023	2.89	0.35	1.22	0.28	2023	-0.39	0.35	0.12	0.28
		Gemiddeld	7.65	0.25	5.73	0.20	Gemiddeld	1.68	0.25	0.74	0.20

Tabel 9. Correctie van de CO₂ en CH₄ fluxen voor 14% slootrand en greppel oppervlak in het onderzoeksperceel.

Het percentage greppel en slootrand van het onderzoeksperceel bedraagt een niet verwaarloosbare 14% van het oppervlak. Gezien de aanzienlijke verschillen in veenoxidatie tussen greppel en landoppervlak (Tabel 8) is het zinvol hiervoor een correctie te berekenen (Tabel 9).

CO₂ en CH₄ zijn beide broeikasgassen, maar met een verschillend effect op het klimaat. CH₄ draagt per molecuul een factor 28 meer bij aan het broeikaseffect dan CO₂, door de hogere absorptie van warmtestraling, maar heeft een veel kortere levensduur in de atmosfeer doordat het snel geoxideerd wordt tot CO₂ (levensduur gemiddeld 12 jaar, t.o.v. eeuwen voor CO₂, Forster et al., 2021). Hoewel er de laatste jaren veel discussie is over methoden om het effect van beide broeikasgassen gezamenlijk te berekenen is berekenen van het Global Warming Potential (afgekort GWP) nog steeds de meest gebruikelijke methode voor het omrekenen van beide gassen naar CO₂-equivalenten. Het is voor een goede analyse wel nuttig om dit voor verschillende tijdschalen te doen (Van Huissteden, 2023).

Het is ook essentieel dat de juiste componenten van de CO₂ flux uit het ecosysteem worden meegerekend in de broeikasgasbalans, Wat betreft de bodem is dit met name CO₂ afkomstig uit oude, stabiele koolstofreservoirs omdat dit een netto toevoeging van broeikasgas aan de atmosfeer oplevert (Van Huissteden, 2023). Hieronder is dat afbraak van veen boven de grondwaterspiegel; zie ook Discussie hoofdstuk hieronder.

Het GWP voor een bepaald gas is de bijdrage aan de opwarming van de atmosfeer van een kortdurende puls-uitstoot van een massa gas, vergeleken met dat van CO₂. Dit wordt berekend over een bepaalde tijdschaal; gebruikelijk zijn tijdschalen van 20 en 100 jaar. Het GWP van CO₂ is per definitie 1. Dat van CH₄ is 27.2 ± 11 voor het GWP over 100 jaar, en 80.8 ± 25.8 voor het GWP over 20 jaar. Het verschil tussen 20 en 100 jaar is het gevolg van de korte levensduur van CH₄ in de atmosfeer. In het laatste IPCC-rapport zijn ook de (aanzienlijke) onzekerheden aan deze getallen toegevoegd die hier ook zijn overgenomen (Forster et al., 2021). Deze onzekerheden zijn ook meegerekend in de standaarddeviaties van de CO₂ equivalenten in Tabel 8 en 9.

Op basis van alleen de aerobe veenoxidatie en de modelsimulaties met alleen aerobe veenafbraak draagt voor 2022 de maatregel bij aan een reductie van 12.4 ton/ha in CO₂ equivalenten, gerekend volgens de in beleidsstudies meestal gebruikte 100 jaar GWP. Voor 2023, zonder langdurige droge zomerperiode, is de reductie in broeikasgasuitstoot 2.9 ton/ha CO₂ eq. (Tabel 9). Met een 20 jaar GWP worden deze getallen lager, 10.2 en 1.2 ton/ha CO₂ eq., omdat daarin met een hoger GWP voor CH₄ gerekend moet worden. Als anaerobe CO₂ vorming uit veen boven de grondwaterspiegel in het model wordt opgenomen, veranderen de resultaten voor 2022 substantieel ten opzichte van de simulaties zonder anaerobe bijdrage: 3.8 ton/ha CO₂ eq. (GWP 100) en 1.4 ton/ha CO₂ eq. (GWP

20). Over 2023 is het verschil tussen Referentie en Maatregel verwaarloosbaar, en binnen de foutenmarge van de modelonzekerheid (met zelfs een negatieve bijdrage voor Referentie; er is echter gezien de NEU geen opname van CO₂).

Samenvattend, over beide jaren heeft de maatregel een aanzienlijk effect gehad op de broeikasgasemissie in 2022; dat effect is echter in 2023 gering of verwaarloosbaar, afhankelijk van niet of wel meerekenen van anaerobe CO₂ modellering boven de grondwaterstand. In de Discussie hieronder wordt daar nader op ingegaan.

10.4.2 Bodemdaling.

Aan de hand van het koolstofverlies uit de veenmatrix kan ook het effect op de bodemdaling geschat worden. Op basis van het bodemprofiel kan de gemiddelde dichtheid van het veen onder het toemaakdek geschat worden op 149.3 kg/m³, bij een porositeit van 91% , een organische stofgehalte van 82% met een koolstofgehalte in de organische stof van 45.5%. Omgerekend van CO₂ naar C, kan hiermee het dikteverlies van het veenprofiel berekend worden, Daarbij moet dan in principe ook de anaerobe omzetting van veen onder de grondwaterspiegel meegenomen worden. Voor de alleen aerobe simulaties is dit niet mogelijk. Een onzekerheid in deze berekening is de porositeit na veenoxidatie.

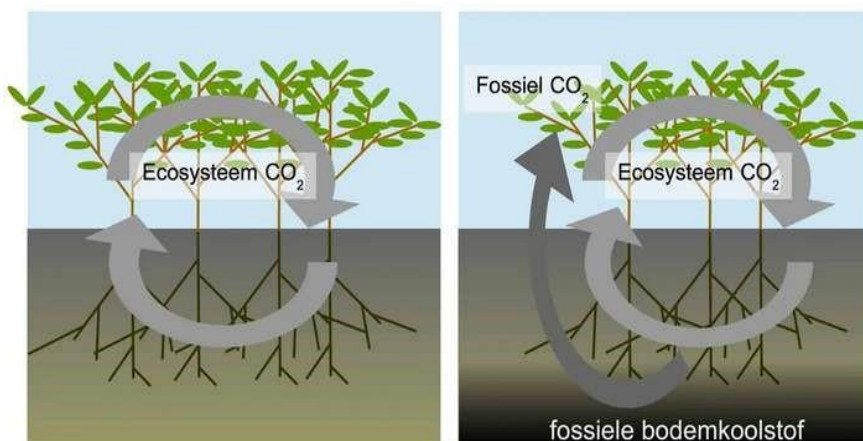
Het resultaat geeft een sterke bodemdaling voor Referentie in 2022: Aeroob 7.7 mm/jaar, Anaeroob Hoog 3.5 mm/jaar), een verschil met een factor van ruim 2. In 2023 is de geschatte bodemdaling op Referentie (Aeroob) aanzienlijk lager, 3.1 mm/jaar, maar nog altijd 2 x zo hoog als Maatregel (Aeroob), 1.6 mm/jaar. Voor de Aeroob Hoog simulaties is er slechts 0.9 mm /jaar verschil tussen Referentie en maatregel. In 2023 zijn de verschillen tussen Referentie en Maatregel verwaarloosbaar voor de Aeroob Hoog simulaties. Dit is het effect van de veel grotere hoeveelheid tragere anaerobe omzetting van veen in de Anaeroob Hoog simulaties. Aan de andere kant zijn de Anaeroob Hoog schattingen voor 2023 weer wat hoger dan de Aeroob schattingen voor 2023. Dat wordt veroorzaakt door de bijdrage van anaerobe veenafbraak onder de grondwaterspiegel, die hier wel meegerekend wordt.

10.5 Discussie.

10.5.1 Welke emissie uit de bodem?

Welke posten op de koolstofbalans van de bodem meegerekend moeten worden bij het bepalen van het succes van een maatregel om organische stof in de bodem te conserveren, hangt af van het perspectief. Gaat het om de reductie van uitstoot van broeikasgassen, om bodemdaling, om 'carbon credits' op de koolstofmarkt of, om het even cru te zeggen, greenwashing? Voor klimaatdoeleinden is de emissie van CO₂ en CH₄ hoofdzaak, maar ook de emissie van het sterke broeikasgas N₂O (distikstofoxide ofwel lachgas), dat geen koolstof bevat maar afkomstig is uit de stikstofcyclus. Voor carbon credits betreft het vooral het behoud van bodemkoolstof. Voor bodemdaling is het verlies van de veenmatrix van de bodem belangrijk, naast compactie door het landgebruik en ontwatering. Een voorbeeld van greenwashing is de reclameslogan 'Ons gras neemt CO₂ op'. Dat klopt, maar door de oogst en consumptie als veevoer verdwijnt het ook weer in de atmosfeer in als CO₂, en deels als het sterkere broeikasgas methaan via fermentatie in het spijsverteringsstelsel van vee. In de volgende discussie wordt ervan uitgegaan dat hoofddoelen van de maatregel klimaatdoelstellingen en bodemdaling zijn

Wat het eerste doel betreft is het ontbreken van N₂O metingen een gemis, maar die zijn nog



kostbaarder en moeilijker uit te voeren dan CH₄ metingen. Bovendien zijn in het weinig bemeste onderzoeksperceel geen hoge N₂O emissies te verwachten. (Hendriks et al., 2007); N₂O emissie treedt vooral op in natte perioden na bemesting (Velthof et al., 2023).

Figuur 30. Onderscheid tussen CO₂ uit kort-cyclische uitwisseling van koolstof door ecosystemen en CO₂ door verlies van fossiel bodemkoolstof uit veen en overige organische stof in de bodem.

Voor klimaatdoelstellingen is van belang of er extra koolstof uit fossiele reservoirs (in het verleden aan de atmosfeer onttrokken koolstof) weer terugkeert naar de atmosfeer als broeikasgas, door menselijk handelen (Fig. 30). 'In het verleden' is vaag en onderwerp van debat, bijvoorbeeld als het gaat om energie uit biomassa. Een voorbeeld: als bodem-organische stof die enkele tientallen jaren geleden is opgeslagen in de bodem in de vorm van plantenresten of humus weer als CO₂ of CH₄ in de atmosfeer verdwijnt door menselijk ingrijpen (bijvoorbeeld kappen van bos, bodembewerking of bosbrand) is dat ook een verlies van bodemkoolstof dat het klimaat schade doet, net zo goed als wanneer duizenden jaren oud veen tot turf wordt verwerkt en opgestookt. De grens tussen fossiel en niet fossiel koolstof is arbitrair. Europese milieupolitiek is echter duidelijk: de huidige trend van verlies van koolstof uit bodems door menselijke activiteit moet gereduceerd omgekeerd worden (<https://www.eea.europa.eu/publications/soil-carbon>) om klimaatdoelstellingen te halen en bodemvruchtbaarheid te behouden.

De nadruk ligt in dit onderzoek op directe emissie van CO₂ uit veen. In het schema van de koolstofbalans van Fig. 5 is echter ook een post opgenomen die bestaat uit verlies van opgelost organisch en inorganisch koolstof (inorganisch: opgelost CO₂) via grond- of drainagewater naar sloten. Deze post is voor dit rapport niet gemeten maar kan zeker bijdragen aan CO₂-emissie, als opgelost koolstof weer omgezet wordt in CO₂ in het oppervlaktewater. Er wordt hier van uit gegaan dat deze post door de slechte waterdoorlatendheid van het veen relatief gering is en ook voor een groot deel uit recent gevormd organisch materiaal bestaat. Voor het maatregelperceel zou deze post op de koolstofbalans echter groter kunnen zijn dan voor het referentieperceel, vanwege de aanwezigheid van drainage.

10.5.2 Onzekerheden.

Een belangrijke onzekerheid betreft het effect van de maatregel op de vegetatie. Het meten van de nachtelijke ecosysteemrespiratie R_{eco} op zowel een Maatregel- als Referentieperceel is onvoldoende om te beoordelen of er verlies van fossiel koolstof uit de bodem optreedt. In Fig. 6 en 30 is aangegeven dat er aanzienlijk grotere koolstofstromen zijn die direct gerelateerd zijn aan de vegetatie, en bestaan uit zeer recent gevormde en direct weer afgebroken organische stoffen, zoals worteluitscheidingsproducten en dood plantenmateriaal. De maatregel zelf kan ook aanzienlijke verschillen veroorzaken in de productie hiervan, bijvoorbeeld door betere waterbeschikbaarheid in

droge perioden. Zo kan droogte in de referentieplot leiden tot meer wortelgroei en meer exudaten in de referentieplot (Reid & Crush, 2013; Buttler et al., 2019), wat dan vervolgens leidt tot hogere R_{eco} , met versterking of afzwakking van de verschillen in R_{eco} tussen referentie en maatregel tot gevolg. Het verschil in bodemtemperatuur, bodemvochtgehalte en de geringere variatie daarvan in de tijd kan de productie van verse organische stof en de omzetting daarvan in de wortelzone ook beïnvloeden. In Friesland werd bijvoorbeeld met R_{eco} -metingen geen verschil gevonden tussen Referentie- en Maatregel-percelen met onderwaterdrainage (Weideveld et al., 2021). Het is noodzakelijk om hetzij door directe metingen (C isotopen) of met modellering het aandeel van veenaafbraak in R_{eco} afzonderlijk te bepalen.

Een tweede onzekerheid is de parametrisatie van het model, en dan met name de anaerobe veenaafbraak daarin. De aanname van een bijdrage van anaerobe CO_2 -vorming (naast CH_4 emissie) is gerechtvaardigd, omdat dit zowel bijdraagt aan CO_2 uitstoot via drainage en bodemdaling door verlies van veen. De keuze om in het model partiële anaerobie te relateren aan het watergehalte boven de grondwaterspiegel ligt voor de hand maar het is niet zeker of dit een lineaire relatie is. Het is vooral ook een 'black-box' benadering, zonder modellering van de bio/geochemische processen van zuurstofdiffusie en -consumptie zelf. Hierboven werd ook al aangegeven dat er onzekerheid is over de gekozen waarden van de anaerobe afbraaksnelheden. De goede resultaten van de model fit aan de gegevens met de Anaeroob Hoog simulaties, geven echter vertrouwen dat de aanpak bijdraagt tot een beter resultaat en beter begrip van de processen die zich in de bodem afspelen, vooral in situaties waarin de grondwaterstand diep kan zakken zoals op de Referentie-locatie. Ook de gemodelleerde verdeling van de anaerobe fractie in het model lijkt redelijk overeen te komen met die van de redoxmetingen van Boonman et al. (2024), zie Fig. 2 en 26.

Voor de Anaeroob Laag simulaties is tijdens de droogteperiode in de zomer van 2022 in Referentie de anaerobe bijdrage relatief laag. Vervolgens stijgt de anaerobe bijdrage abrupt op het moment dat na de droogte ook de grondwaterstand snel stijgt, en vormt dan het overgrote deel van de CO_2 bijdrage uit veen. In Maatregel is de anaerobe bijdrage nagenoeg de totale bijdrage uit veen; aerobe oxidatie is zeer gering. Wanneer anaerobe condities ook boven de grondwaterstand gemodelleerd worden (Anaeroob Hoog) verbeteren de modelresultaten voor Referentie aanzienlijk (zie KGE-waarden in Appendix II en Tabel 7) en is er ook bij lage grondwaterstand een grotere anaerobe bijdrage uit veen aan de CO_2 uitstoot. Dit leidt tevens tot een verlaging van de totale uitstoot door oxidatie van veen, ten opzichte van de alleen aerobe simulaties, doordat de anaerobe processen een veel lagere afbraakconstante hebben dan de aerobe processen.

Het lijkt tegen de intuïtie in te gaan dat er bij lage grondwaterstand ook veel aerobe afbraak optreedt, maar het werk van Boonman et al. (2024) toont het belang hiervan wel aan. De geringe permeabiliteit van veen verhindert niet alleen waterstroming, maar ook diffusie van zuurstof. Dit kan ook een gedeeltelijke verklaring zijn van het gebrek aan verschil in R_{eco} tussen percelen met en zonder onderwaterdrainage dat soms gevonden wordt (Weideveld et al., 2021), naast het feit dat R_{eco} alleen geen goede maat is voor het succes van onderwaterdrainage in het beperken van veenoxidatie.

Het is echter de vraag in hoeverre de CO_2 geproduceerd door anaerobe afbraak van veen meegerekend moet worden voor het klimaat effect. Ook zonder antropogene invloed treedt er in veenbodems anaerobe afbraak van organische stof op, met zowel CH_4 als CO_2 vorming op in veenbodems, op alle diepten beneden de grondwaterspiegel. Afhankelijk van de chemie van het grondwater is de bijdrage van CO_2 ten opzichte van CH_4 groter of kleiner (o.a. Middelburg et al., 1996). De bijdrage van veen hieraan is gering, maar niet nihil (Clymo, 1984). Volgens de richtlijnen

voor rapportage van nationale broeikasgas-inventarisaties (IPCC, 2006) is de vraag of de uitstoot door menselijke activiteiten veroorzaakt wordt bepalend.

Eerder onderzoek (Vermaat et al., 2013) en het werk van Boonman et al. (2024) en Harpenslager et al. (2024) in het Nederlandse veenweidegebied toont aan, dat er in anaerobe omzetting van veen ook een antropogene component aanwezig is. In de eerste plaats door beïnvloeding van de waterkwaliteit:

aanvoer van nitraat door bemesting en via oppervlaktewater, en aanvoer van sulfaathoudend water uit verschillende bronnen, waaronder pyriethoudend oxiderend veen (Vermaat et al., 2013). In de tweede plaats, doordat bij diepere grondwaterstanden gereduceerd stikstof, ijzer, mangaan en zwavel opnieuw geoxideerd kunnen worden, waardoor deze oxidatoren weer opnieuw een bijdrage aan veenafbraak kunnen leveren wanneer de grondwaterstand stijgt na droogte. Dit is een regeneratie-effect, vergelijkbaar met het opladen van een accu, veroorzaakt door de ontwatering van het veen. Op basis hiervan is het gerechtvaardigd om de anaerobe afbraak van veen naar CO₂ wel mee te rekenen, zeker als het gaat om anaerobe afbraak boven de grondwaterspiegel zoals in de Anaeroob Hoog simulaties.

De bijdrage van sulfaatreductie aan veenafbraak in het Nederlandse veenweidegebied wordt door Vermaat et al. (2013) geschat op 5%; Hendriks en Van den Akker (2012) komen op basis van modelberekeningen op 3 tot 5% bij een drooglegging tot 60 cm, en 10% bij een drooglegging tot 40 cm. Dit suggereert dat het door Peatland-VU gesimuleerde aandeel van anaerobe afbraak, ook bij de anaeroob-lage simulaties, van 22-43% (Tabel 8) te hoog is. De grondwaterstand in de maatregelplot is echter doorgaans hoger dan de -40 cm van Hendriks en van den Akker (2012) en dus is meer anaeroob CO₂ te verwachten; bovendien gaat het niet alleen om sulfaatreductie, maar ook nitraat- en ijzerreductie. In natte perioden komt de grondwaterstand vaak dicht aan op het oppervlak tot plas dras, dus geheel anaeroob. In de Peatland-VU simulaties blijken zonder de anaerobe CO₂ module de *aerobe* CO₂-emissies uit veen duidelijk te hoog; bij de montecarlo simulaties zijn hogere waarden van de decompositiesnelheid k nodig voor een goede model fit dan volgens de gegevens van Weidner et al. (in prep.) gerechtvaardigd zijn.

Een anaerobe component is dus wel nodig voor een goede model simulatie, en is ook in overeenstemming met de werkelijkheid (Boonman et al., 2024). Ook de bruine kleur van het veen onder het toemaakdek in een diepe profielkuil, gegraven tijdens de droogste periode, wijst erop dat ondanks de lage grondwaterstand, het vers afgestoken onveraaide veen in de kuilwand nog grotendeels anaeroob is; bij toetreding van zuurstof verandert de kleur snel naar zwart. Dit duidt erop dat er nog geen of nog onvoldoende vrije zuurstof aanwezig was (D. van der Eijk, pers. comm.).

In de modelsimulaties zijn er ook verschillen tussen Referentie en Maatregel in de bij kalibratie gevonden vegetatieparameters zoals het percentage wortellexudaten en de verhouding bovengrondse/ondergrondse biomassa; ze zijn echter niet consistent (Appendix II). De gevonden beste plantenrespiratie parameters zijn steeds wat hoger voor Maatregel dan Referentie. Dat kan erop wijzen, dat R_{eco} verschillen tussen Referentie en Maatregel versterkt worden door aanpassing van de vegetatie aan verschillen in standplaatsfactoren, maar het kan ook een gevolg zijn van parameter-equivalentie in het model; veranderingen in de ene vegetatie-parameter compenseert dan veranderingen in de andere.

De referentieplot had in 2022 6.6% minder bovengrondse biomassa dan de maatregelplot; bij het maaien van de tweede snede in 2023 was de opbrengst in de op het maatregelperceel ook groter dan op het referentieperceel. Dit wijst wel op verschillen in vegetatie. De gemeten verschillen in R_{eco} tussen greppel en het naastgelegen normale oppervlak zijn ook een aanwijzing voor de grote rol

van verschillen in respiratie in de wortelzone; 10 -14 cm verschil in hoogte cq. dikte van de onverzadigde zone veroorzaakt een verschil van 41-44% in R_{eco} . Op basis van alleen verschillen in R_{eco} wordt daarom een onzeker en te groot klimaateffect berekend (Appendix III) en is het beter om de gemodelleerde veenaafbraak als uitgangspunt te nemen.

Een derde bron van onzekerheid is de scheiding tussen de organische koolstofreservoirs in de bodem. Wanneer is spreken we van veen, veraard veen en wanneer van humus? Deze grenzen zijn gradueel, en de koolstofreservoirs in modellen zijn meer een mathematisch concept dan bodem-werkelijkheid. In de praktijk van een profielkuil wordt vooral naar de aanwezigheid van herkenbare plantenresten gekeken. Dat gaat redelijk op voor veen op grotere diepte, maar hoe dicht bij het oppervlak, hoe moeilijker het onderscheid tussen veen, humus en recent plantenmateriaal wordt. Ook de bijbehorende afbraaksnelheden van veen veranderen met de diepte, met toenemende afbraaksnelheden in ondiepere bodemhorizonten (Weidner et al. (in prep), wat wijst op bijmenging van sneller afbreekbaar materiaal. Dit is de reden dat voor de modelsimulaties een aanzienlijk aantal spinupjaren worden toegevoegd, met de bedoeling een evenwicht tussen de verschillende organische stofreservoirs te bereiken, maar in feite is betere biogeochemische karakterisering van het organische materiaal nodig.

Tenslotte is de scheurvorming, die zo prominent aanwezig was in de extreem droge periode van de zomer van 2022, niet in het model opgenomen en een bron van onzekerheid. Scheurvorming introduceert extra porositeit en betere zuurstofaanvoer in de bodem (Vahedifard et al., 2024), maar het bemoeilijkt ook de metingen met kamers (kans op lekkage) en het veroorzaakt een grote ruimtelijke variatie op de vierkante meter in de meetlocaties. Dit was in 2022 in de metingen op de referentieplot goed te zien, en veroorzaakte ook problemen met de modelkalibratie. Het model was in geen enkele configuratie in staat de emissiepieken in de droge periode van 2022 te volgen (de Anaeroob Hoog simulaties presteerden het best, Tabel 7). Scheuren en verse plantenwortels reikten in 2022 tot onder het toemaakdek in het veen, wat op toevoer van zuurstof via de scheuren wijst (D. van der Eijk, pers. comm.). In de maatregelplot waren in 2022 nauwelijks scheuren aanwezig, en in 2023 kwam het helemaal niet tot scheurvorming op zowel het referentie- als maatregelperceel. In 2023 en in de maatregelplot in 2022 zijn daarom zowel de modelsimulaties als de metingen betrouwbaarder dan die van de referentieplot in 2022. Het verdient aanbeveling om in een volgende droogteperiode te meten met een Eddy covariantie systeem, dat minder gevoelig is voor ruimtelijke variatie op de schaal van de kamers. Het Peatland-VU model kan wat het proces van scheurvorming ook verbeterd worden.

10.5.3 Bodemdaling.

De Bodemdalingskaart (<https://bodemdalingskaart.nl/nl/>) rapporteert op grond van INSAR-satellietmetingen een bodemdaling van ca. 2 mm/jaar in de omgeving van het onderzoeksperceel. Dat maakt aannemelijk, dat met name de Anaeroob Hoog simulaties een realistisch beeld geven (Tabel 8). Ook de hoogste schattingen voor 2022 (7.7 mm) zijn echter niet onwaarschijnlijk gezien de droge periode en scheurvorming. De twee belangrijkste onzekerheden hierin zijn:

- de vraag in hoeverre volumeverlies optreedt (hier is aangenomen dat een volume veen evenredig aan het koolstofverlies compleet verdwijnt)
- welk deel van het volumeverlies irreversibel is en in hoeverre herstel optreedt na herstel van de grondwaterstand in de winter.

Omdat ook anaerobe omzetting van veen onder de grondwaterspiegel bijdraagt aan afbraak van de veenmatrix, zal bodemdaling door veenafbraak waarschijnlijk nooit helemaal gestopt kunnen worden met maatregelen die alleen de grondwaterstand in het veenpakket beïnvloeden. Toevoegen van (organisch) materiaal aan de bodem, hetzij natuurlijk (veengroei), hetzij kunstmatig op- of inbrengen in de bodem zijn opties om bodemdaling te stoppen.

10.6 Conclusies en aanbevelingen.

De veenbodem in Polder Bloemendaal bij Gouda is typerend voor veel veenweidebodems in het westen van Nederland. De bodem heeft een grotendeels uit klei bestaand toemaakdek van ± 45 cm dikte; als de grondwaterspiegel dieper zakt dan dit dek wordt het onderliggende bosveenpakket blootgesteld aan oxidatie. De aanleg van het onderwaterdrainagesysteem op een proefperceel heeft geleid tot een reductie van broeikasgasemissies uit de veenbodem en geringere bodemdaling.

Dit is gekwantificeerd door periodieke metingen van CO_2 - en methaanemissies uit de bodem op het proefperceel en op een naastgelegen referentieperceel zonder maatregel. Hiervoor is een automatisch meetsysteem ingezet bestaande uit automatische kamers en gasanalyse-apparatuur. Daarnaast is door modellering van bodemprocessen met het Peatland-VU model een schatting gemaakt van het aandeel van veenoxidatie in de emissies.

Voor een juiste schatting van het aandeel van veenoxidatie in de CO_2 uitstoot uit de bodem is het nodig om een combinatie van metingen en modellering te gebruiken. De metingen alleen, die niet continu konden worden uitgevoerd geven onvoldoende informatie over de uitstoot door het hele jaar heen. Met behulp van het model, gekalibreerd op de beschikbare metingen, kan een jaarbalans van de uitstoot voor zowel CO_2 als CH_4 berekend worden.

Tevens kan met het model een schatting berekenen van de hoeveelheid CO_2 die daadwerkelijk uit oxidatie van veen afkomstig is, en daarmee bijdraagt aan bodemdaling en klimaatverandering. Een probleem van de metingen is namelijk, dat de maatregel zelf niet alleen de veenoxidatie beïnvloedt, maar ook de vegetatie en daarmee kort-cyclische koolstofstromen. Het meetresultaat dat het dichtst bij een dergelijke schatting komt zijn verschillen in nachtelijke CO_2 -emissie; daarin zit echter nog steeds een belangrijke component aan respiratie van planten en snelle omzetting van verse organische stof in de wortelzone in de bodem. Deze component kan verschillen in ecosysteemrespiratie die veroorzaakt worden door veenoxidatie versterken of geheel maskeren.

Een tweede probleem is het voorkomen van anaerobe afbraak van veen zonder vrije zuurstof, veroorzaakt door anaerobe omzetting van veen door nitraat-, metaaloxiden- en sulfaatreductie. Dit domineert de vorming van CO_2 en CH_4 onder de grondwaterspiegel, maar komt ook, in veel grotere mate dan voorheen werd aangenomen, boven de grondwaterspiegel voor. Bij lage grondwaterstanden kunnen de door veenoxidatie gereduceerde anaerobe oxidatoren weer opnieuw geoxideerd worden, en daardoor bij stijging van de grondwaterstand een nieuwe cyclus van anaerobe veenoxidatie veroorzaken. Deze anaerobe processen dragen daarmee bij aan zowel klimaatgevoelige CO_2 -emissies als aan bodemdaling. Hiervoor is recent het Peatland-VU model aangepast, en in dit rapport is deze aanpassing voor het eerst met succes toegepast om deze anaerobe component van veenafbraak afzonderlijk te modelleren.

Een derde probleem voor zowel metingen als modellering is de scheurvorming die in de droogste periode optrad in het referentieperceel. De scheurvorming verhoogt de ruimtelijke variabiliteit van de emissies sterk en bemoeilijkt metingen met een automatisch kamersysteem. Scheurvorming

verhoogt ook indringing van zuurstof in de bodem, tot op dieptes waarop veel veen aanwezig is. In het Peatland-VU model is dit proces nog niet opgenomen.

In 2022, kort na de aanleg van het drainagesysteem, was de emissiereductie hoog doordat een langdurige droge periode optrad waarin de grondwaterstand in het referentieperceel tot een meter onder het oppervlak wegzakte, en in het maatregelperceel op peil bleef. Doordat het Peatland-VU model ook zelf in staat is om grondwaterstanden te modelleren, kon ook de broeikasgasbalans in de periode voor de start van de drainage op het Maatregel perceel (5-5-2022) gemodelleerd worden. De vermeden broeikasgasemissie bedroeg 3.8 ton CO₂ equivalent per hectare (rekening houdend met een licht verhoogde CH₄ emissie op het maatregelperceel, en gebaseerd op een Global Warming Potentiaal met tijdschaal van 100 jaar) of 1.4 ton/ha CO₂ eq. (Global Warming Potentiaal 20 jaar). Deze schatting is gebaseerd op modellering van aerobe en anaerobe omzetting van veen, en is gecorrigeerd voor 14% greppel- en slootkant op het perceel, met lagere CO₂ en hogere CH₄ emissie.

Wanneer alleen de omzetting van veen met aerobe oxidatie wordt gemodelleerd, vallen de emissies veel hoger uit: 12.4 ton CO₂ equivalent per hectare (GWP 100 jaar) en 10.2 ton CO₂ equivalent per hectare (GWP 20 jaar). Deze schatting komt redelijk overeen met de schatting van 10 ton CO₂/ha in het projectvoorstel voor het onderzoek in de polder. Het echter, gezien de recente inzichten over anaerobe processen boven de grondwaterspiegel in veenbodems, een overschatting van de veenoxidatie. Het model presteert ook slechter voor het Referentie-perceel zonder anaerobe omzetting. De schatting met modellering van anaerobe processen (Referentie 3.5 mm/jaar, Maatregel 2.6 mm/jaar) komt ook beter overeen met een bodemdaling van 2 mm/jaar, gemeten met radarsatellieten (INSAR-methode, Bodemdalingskaart Nederland).

In het natte jaar 2023 waren de verschillen in waterstand tussen het referentie- en maatregelperceel aanmerkelijk minder, en is er eigenlijk geen verschil in de gemodelleerde emissie (inclusief anaerobe processen) tussen Referentie en Maatregel. Maatregel heeft dan, door de wat hogere CH₄ emissie een wat grotere netto emissie in CO₂ equivalenten dan Referentie (0.4 ton/ha, 100 jaar GWP), maar dit verschil is verwaarloosbaar gezien de standaarddeviatie van de schatting. Hieruit blijkt dat de emissiereductie sterk afhankelijk is van de jaarlijkse weersomstandigheden. Wat dat betreft kunnen beide meetjaren mogelijk als extremen gelden waartussen de jaarlijkse emissiereductie ligt bij andere weerpatronen door het jaar.

De emissieschattingen van totaal CO₂ uit veen (Aeroob + anaeroob boven de grondwaterspiegel) voor Referentie in 2023 komen goed overeen met die voor Maatregel in 2022 en 2023. Alle liggen rond 1.7 ton CO₂/ha/per jaar. De resultaten voor 2023 kunnen daarmee een gezien worden als een basis-scenario

voor de emissie tijdens een jaar met relatief veel neerslag. De effectiviteit van de maatregel onderwaterdrainage is dan relatief gering. Hogere emissies treden op bij minder neerslag en meer/langere droogteperiodes, de effectiviteit van de maatregel in het reduceren van bodemdaling en broeikasgasemissies is dan duidelijk aanwezig. De effectiviteit hangt dus sterk af van het weerpatroon door de jaren heen. Dit heeft ook belangrijke implicaties voor toekomstige klimaatscenario's en waterbeheer. Bij klimaatscenario's met meer droogte en hitte valt zonder maatregelen hogere broeikasgas-uitstoot en sterkere bodemdaling te verwachten.

De volgende aanbevelingen kunnen worden gedaan voor verder onderzoek, hetzij in Polder Bloemendaal, hetzij elders:

- Voor CO₂-metingen op veenweiden in droge perioden is inzet van een Eddy-covariantie systeem, dat niet gevoelig is voor scheurvorming en de ruimtelijke variatie beter uitmiddelt, aan te bevelen.
- Verbetering van modellering van het verlies van fossiel bodemkoolstof is noodzakelijk, omdat alleen metingen onvoldoende uitsluitsel geven omtrent de fossiele en niet-fossiele component.
- Betere kwantificering van koolstofverlies via grond- en oppervlaktewater is noodzakelijk omdat dit mogelijk een niet verwaarloosbare component van de koolstofbalans vormt bij onderwaterdrainage.
- Verbetering van de kwantitatieve kennis over anaerobe CO₂ vorming is nodig, met name met betrekking tot afbraaksnelheden, de aanwezigheid van anaerobe oxidatoren en redoxcondities in de veenbodem bij lage grondwaterstand.

Dankbetuiging.

Allereerst wil ik het bestuur van de Stichting Weids Bloemendaal bedanken voor hun niet aflatende inspanning om dit onderzoek tot stand te brengen en te steunen. In het bijzonder Dirk van der Eijk wordt bedankt voor zijn directe betrokkenheid, hulp bij de metingen in het veld en discussies over de resultaten. Dochter en mede-firmant Corine van Huissteden en echtgenote Jet van Huissteden-Rootlieb worden bedankt voor hun hulp bij transport en installatie van de meetapparatuur. Drs. Tanya Lippman heeft de eerste versie van dit rapport kritisch doorgelezen op het gebied van de modelsimulaties, als mede-ontwikkelaar van het Peatland-VU model. Mijn collega's van de Vrije Universiteit en andere instellingen die bij het NOBVeenweiden project betrokken zijn hebben indirect veel bijgedragen door de wetenschappelijke discussies binnen het project en binnen de onderzoeksgroep aan de VU. Met name Merit van den Berg en Ype van der Velde hebben de verdere ontwikkeling van het Peatland-VU model gestimuleerd. De eigenaar en pachter van het onderzoeksperceel worden bedankt voor hun medewerking.

Literatuur.

Aerts, R. (2006). The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 94(4), 713-724.

Beven KJ. 2009. Environmental Modelling: An Uncertain Future? Routledge: London.

Bronswijk, J.J.B. and Evers-Vermeer, J.J., 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 38(2), pp.175-194.

Brouns, K., Verhoeven, J. T., & Hefting, M. M. (2014). Short period of oxygenation releases latch on peat decomposition. *Science of the Total Environment*, 481, 61-68.

Boonman, J., Harpenslager, S. F., van Dijk, G., Smolders, A. J., Hefting, M. M., van de Riet, B., & van der Velde, Y. (2024). Redox potential is a robust indicator for decomposition processes in drained

agricultural peat soils: A valuable tool in monitoring peatland wetting efforts. *Geoderma*, 441, 116728.

Buttler, A., Mariotte, P., Meisser, M., Guillaume, T., Signarbieux, C., Vitra, A., ... & Gavazov, K. (2019). Drought-induced decline of productivity in the dominant grassland species *Lolium perenne* L. depends on soil type and prevailing climatic conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 132, 47-57.

Cheng, W., Gershenson, A., (2007). Carbon fluxes in the Rhizosphere. In: Cardon, Z.G., Whitbeck, J.L.: The Rhizosphere. Elsevier Academic Press Burlington, MA, p. 31-56.

Clymo, R. S. (1984). The limits to peat bog growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 303(1117), 605-654.

Craats, D. van, van den Berg, M., van Huissteden, J., van de Velde, Y., Boonman, J. 2023. Processbased modelling of CO₂ fluxes in Vlist. Chapter 11 Rapport NOBVveenweiden 2022, 47 p., https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2023/08/11.-VandenBerg_Model_FINAL_2.pdf

Fagerland, M.W., 2012. t-tests, non-parametric tests, and large studies—a paradox of statistical practice?. *BMC medical research methodology*, 12(1), pp.1-7. van Huissteden, J., van den Bos, R. and Alvarez, I.M., 2006. Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄ fluxes from peat soils. *Netherlands Journal of Geosciences*, 85(1), pp.3-18.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J. L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, T H. Zhang (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity (2021). In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment C Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. E Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge J University Press.

Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz, G.F. Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.

Harpenslager, S. F., van Dijk, G., Boonman, J., Weideveld, S. T., van de Riet, B. P., Hefting, M. M., & Smolders, A. J. (2024). Rewetting drained peatlands through subsoil infiltration stabilises redoxdependent soil carbon and nutrient dynamics. *Geoderma*, 442, 116787.

Hateren, T. van, Hoogland, F, (2024). Hydrologische analyse Bloemendaal. Tussenrapportage 2e meetjaar polder Bloemendaal. Acacia Water, Gouda, 40 p.

Haxeltine, A., Prentice, I.C. (1996). Biome3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles* 10(4), 693-709.

Hefting, M.M., van Asselen, S., Keuskamp, J.A., Harpenslager, S.F., Erkens, G. (2023): Carbon stocks in sight: High-resolution vertical depth profiles to quantify carbon reservoirs in the NOBV research sites. Chapter 12 Rapport NOBVveenweiden 2022, 37 p.,

https://www.nobveenweiden.nl/wpcontent/uploads/2023/06/12.-Hefting_Koolstofvoorraad_FINAL.pdf

Hendriks, D.M.D, van Huissteden, J., Dolman, A.J., van der Molen, M.K. (2007). The full greenhouse gas balance of an abandoned peat meadow. *Biogeosciences* 4, 411-424.

Hendriks, R.F.A. & J.J.H. van den Akker (2012). Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden. Wageningen. Alterra-rapport 2354

Huissteden, J. van (2023). Climate effect of combined CH₄, N₂O and CO₂ emission change by land use or ecosystem transition. Chapter 7 Rapport NOBVeenweiden 2022, 25 p., https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2023/06/7.Huissteden_verschillendeGHG_FINAL.pdf

Huissteden, J. van, Plassche, O. van de (1998). Sulphate reduction as a geomorphological agent in tidal marshes ('Great Marshes' at Barnstable, Cape Cod, USA). *Earth Surface Processes and Landforms* 23(3), 223-236.

Huissteden, J. van, van den Bos, R. and Alvarez, I.M., 2006. Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄ fluxes from peat soils. *Netherlands Journal of Geosciences*, 85(1), pp.3-18.

Huissteden, J. van, Petrescu, A. M. R., Hendriks, D. M. D., & Rebel, K. T. (2009). Sensitivity analysis of a wetland methane emission model based on temperate and arctic wetland sites. *Biogeosciences*, 6(12), 3035-3051.

IPCC (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan*.

James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2021. An introduction to statistical learning (2nd edition). Springer Texts in Statistics, Springer Nature, New York, 607 p.

Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331.

Lopez-Capel, E., Sohi, S.P., Gaunt, J.L., Manning, D.A., 2005. Use of thermogravimetry–differential scanning calorimetry to characterize modelable soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal*. 69, 136–140.

Mi, Y., Van Huissteden, J., Parmentier, F. J. W., Gallagher, A., Budishchev, A., Berridge, C. T., & Dolman, A. J. (2014). Improving a plot-scale methane emission model and its performance at a northeastern Siberian tundra site. *Biogeosciences*, 11(14), 3985-3999.

Middelburg, J. J., Klaver, G., Nieuwenhuize, J., Wielemaker, A., de Haas, W., Vlug, T., & van der Nat, J. F. (1996). Organic matter mineralization in intertidal sediments along an estuarine gradient. *Marine Ecology Progress Series*, 132, 157-168.

Nakhli, S.A.A., Panta, S., Brown, J.D., Tian, J. and Imhoff, P.T., 2019. Quantifying biochar content in a field soil with varying organic matter content using a two-temperature loss on ignition method. *Science of The Total Environment*, 658, pp.1106-1116.

Petrescu, A. M. R., Van Huissteden, J., De Vries, F., Bregman, E. P. H., & Scheper, A. (2009). Assessing CH₄ and CO₂ emissions from wetlands in the Drenthe Province, the Netherlands: a modelling approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, 88(2), 101-116.

Petrescu, A. M. R., Van Beek, L. P. H., Van Huissteden, J., Prigent, C., Sachs, T., Corradi, C. A. R., ... & Dolman, A. J. (2010). Modeling regional to global CH₄ emissions of boreal and arctic wetlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4).

Reid, J. B., & Crush, J. R. (2013). Root turnover in pasture species: perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Crop and Pasture Science*, 64(2), 165-177.

Säurich, A., Tiemeyer, B., Dettmann, U., & Don, A. (2019). How do sand addition, soil moisture and nutrient status influence greenhouse gas fluxes from drained organic soils?. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 71-84.

Shaver, G. R., Street, L. E., Rastetter, E. B., Van Wijk, M. T., & Williams, M. (2007). Functional convergence in regulation of net CO flux in heterogeneous tundra landscapes in Alaska and Sweden. *Journal of Ecology*, 802-817.

Sonneveld, F. (1954). Het slootkanteffect in het klei-op-veengebied in Zuid-Holland. *Boor en Spade* 7:181-188.

Subke, J. A., Heinemeyer, A., Vallack, H. W., Leronni, V., Baxter, R., & Ineson, P. (2012). Fast assimilate turnover revealed by in situ ¹³CO₂ pulse-labelling in Subarctic tundra. *Polar Biology*, 35, 1209-1219.

Treat CC, Natali SM, Ernakovich J, Iversen CM, Lupascu M, McGuire AD, Norby RJ, Roy Chowdhury T, Richter A, Šantrůčková H (2015) A pan-Arctic synthesis of CH₄ and CO₂ production from anoxic soil incubations. *Global change biology* 21 (7):2787-2803

Vahedifard F, Clay Goodman C, Paul V, AghaKouchak A (2024) Amplifying feedback loop between drought, soil desiccation cracking, and greenhouse gas emissions. *Environment Research Letters* 19: 031005

Velthof, G., van 't Hull, J., Aben, R., Fritz, C., Harpenslager, S.F. (2023). Temporal variation in nitrous oxide emission from grassland on drained peat soil. Chapter 9 Rapport NOBVeenweiden 2022, https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2023/06/9.-Velthof_N2O_FINAL.pdf, 29 p.

Vermaat, J. E., Harmsen, J. O. O. P., Hellman, F. A., Van der Geest, H., De Klein, J. J. M., Konsten, S., ... & Ouboter, M. (2013). Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap. *Landschap: tijdschrift voor Landschapsecologie en Milieukunde*, 30(1), 5-13.

Weideveld, S. T. J., Liu, W., Berg, M., Lamers, L. P. M., & Fritz, C. (2021). Conventional subsoil irrigation techniques do not lower carbon emissions from drained peat meadows. *Biogeosciences*, 18, 3881–3902.

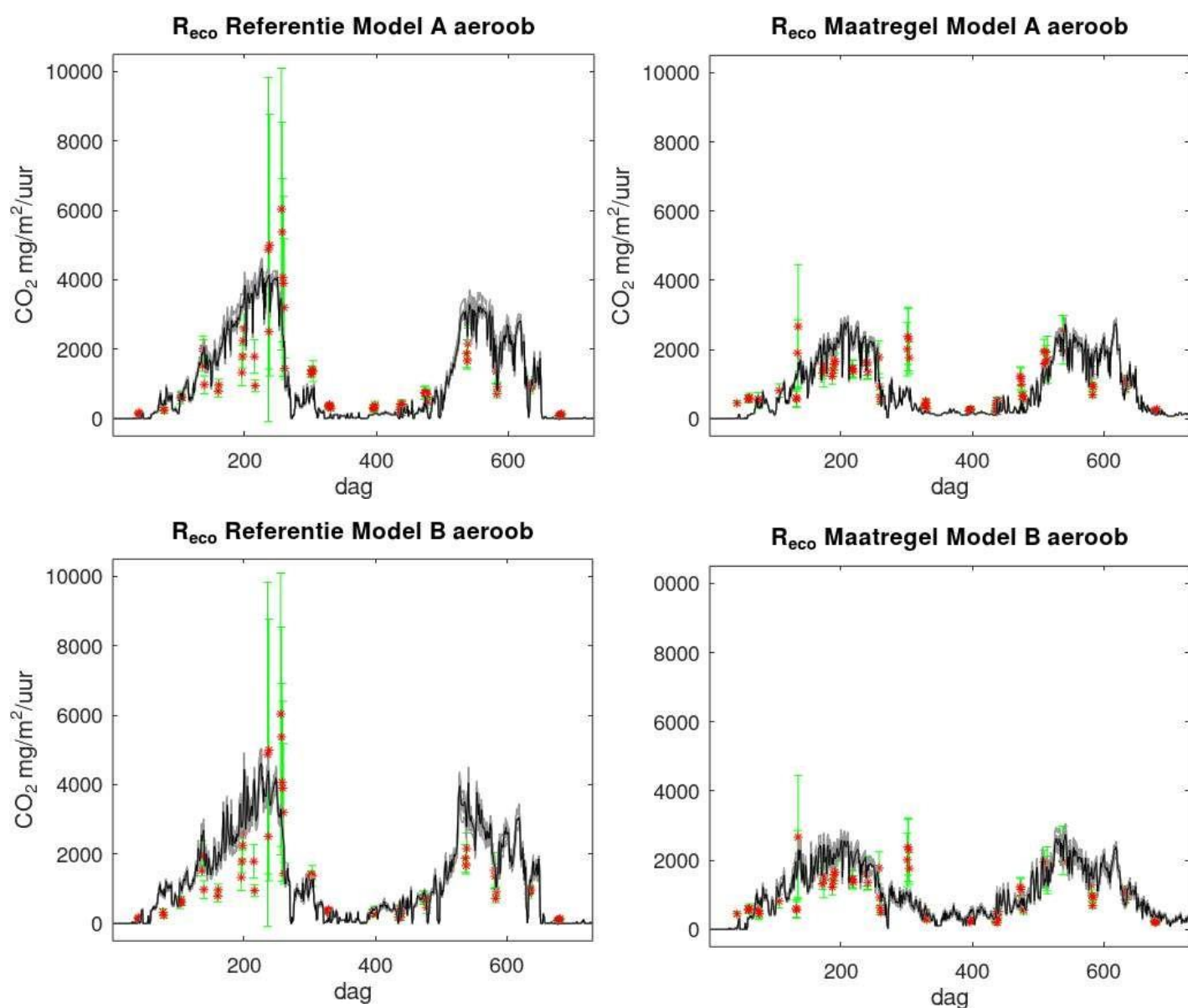
Weidner, S., Keuskamp, J.A., Harpenslager, S.F., Hefting, M. (publikatie in voorbereiding).
Vulnerability of oxidation – basal respiration and organic matter stability partitioning. Chapter 6
Rapport NOBVeenweiden 2022, in voorbereiding.

Waldrop MP, Wickland KP, White III R, Berhe AA, Harden JW, Romanovsky VE (2010) Molecular investigations into a globally important carbon pool: Permafrost-protected carbon in Alaskan soils. *Global change biology* 16 (9):2543-2554

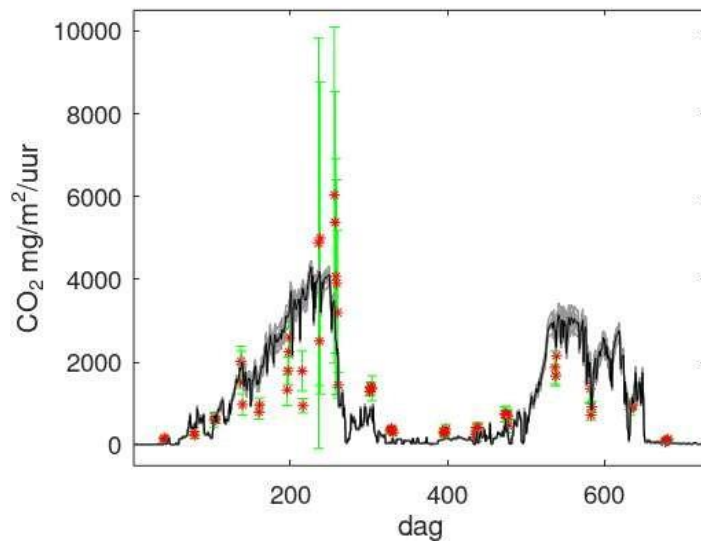
Wagner, D., Pfeiffer, E. M., & Bock, E. (1999). Methane production in aerated marshland and model soils: effects of microflora and soil texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(7), 999-1006.

Appendix I.

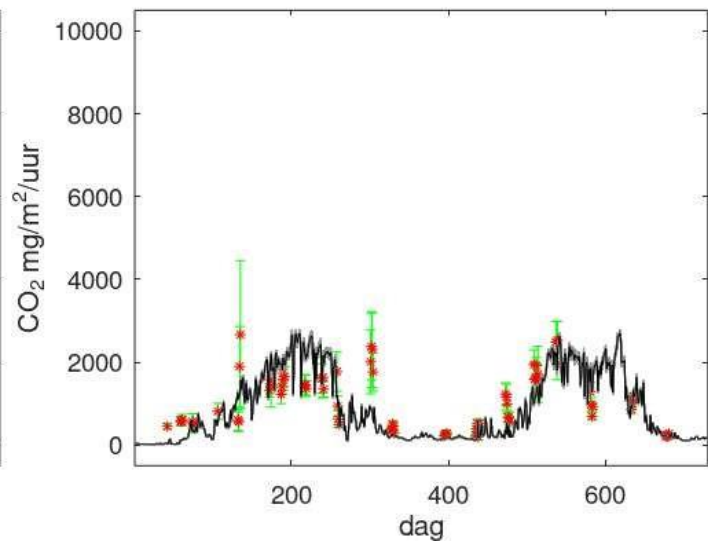
Modelresultaten voor R_{eco} , NEU , CH_4 , voor alle Peatland-VU model configuraties. Rode sterren vertegenwoordigen de metingen, groene verticale lijnen hun standaarddeviatie. De zwarte lijn is het gemiddelde van de 10 beste modelsimulaties; afzonderlijke simulaties zijn in grijs weergegeven. Voor de Veenoxidatie grafieken: aandeel van aerobe veenoxidatie (rode lijn) in R_{eco} (blauwe lijn) van de modelconfiguraties en de anaerobe omzetting van veen (zwarte lijn), op basis van het gemiddelde van de 10 beste simulaties.



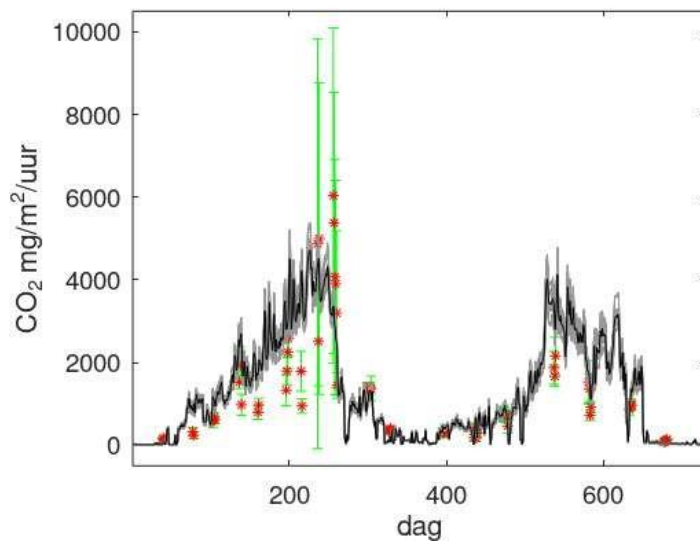
R_{eco} Referentie Model A anaeroob laag



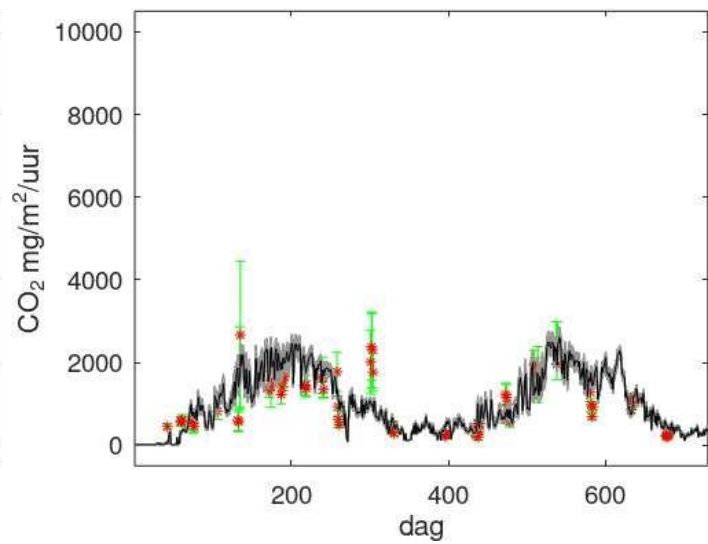
R_{eco} Maatregel Model A anaeroob laag

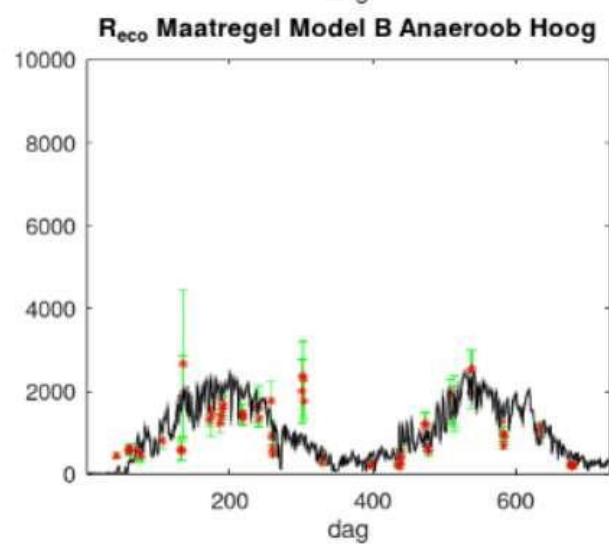
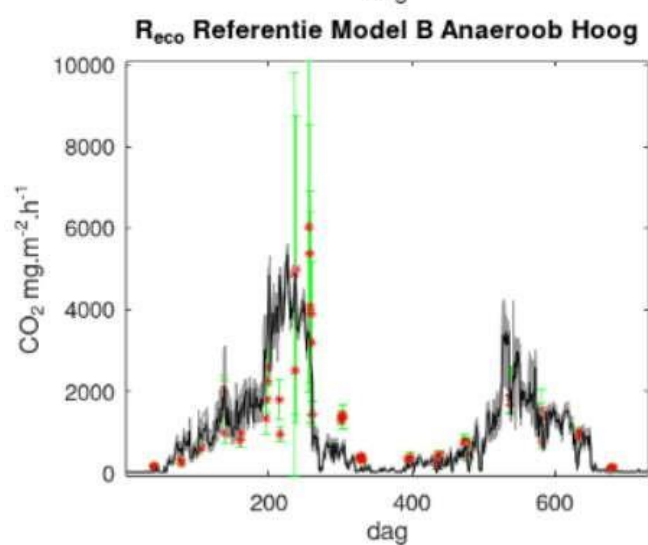
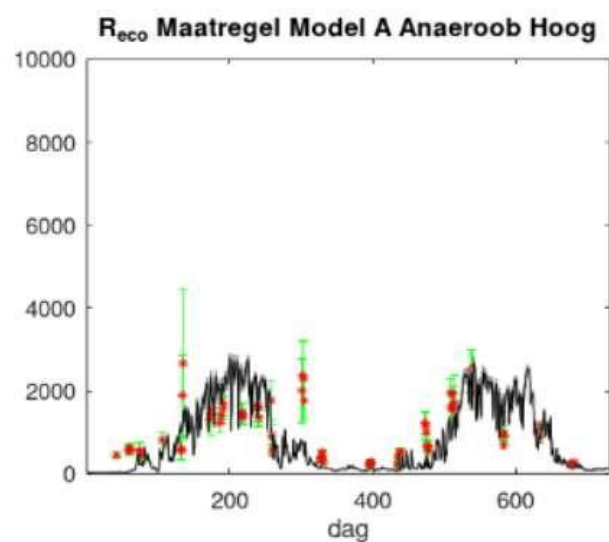
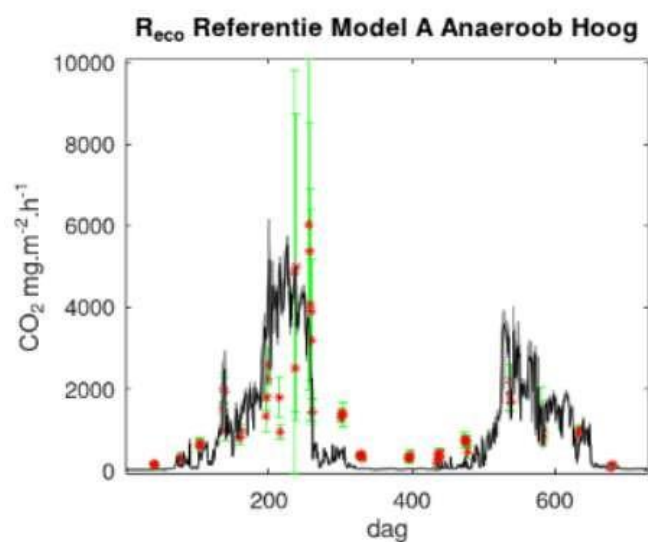


R_{eco} Referentie Model B anaeroob laag

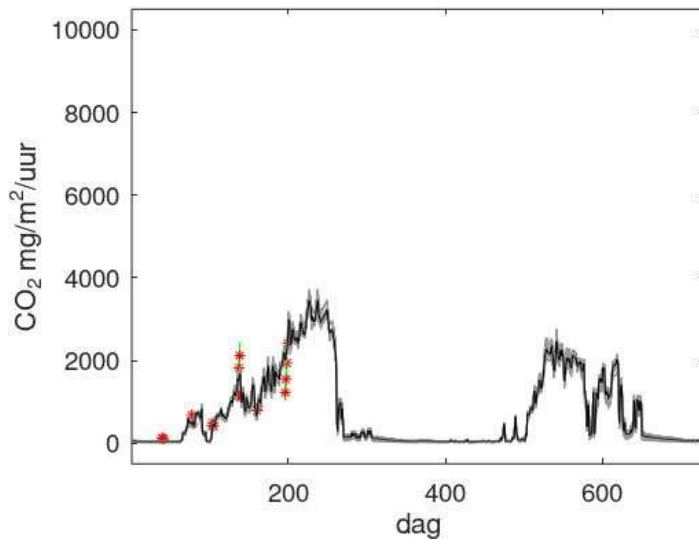


R_{eco} Maatregel Model B anaeroob laag

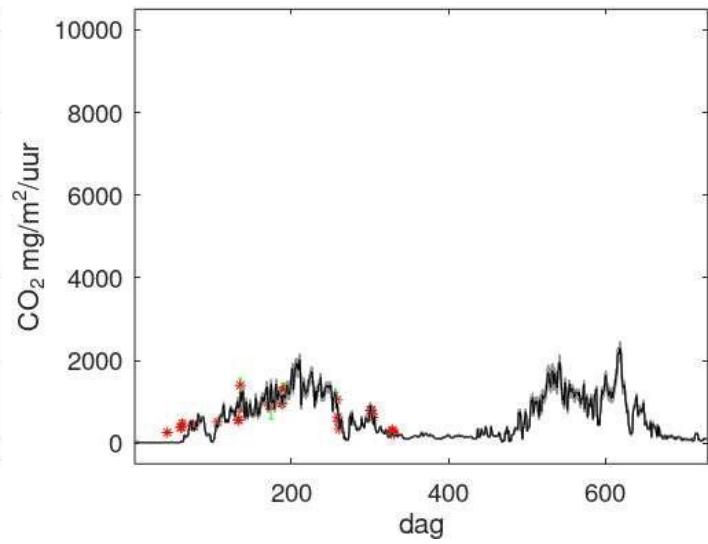




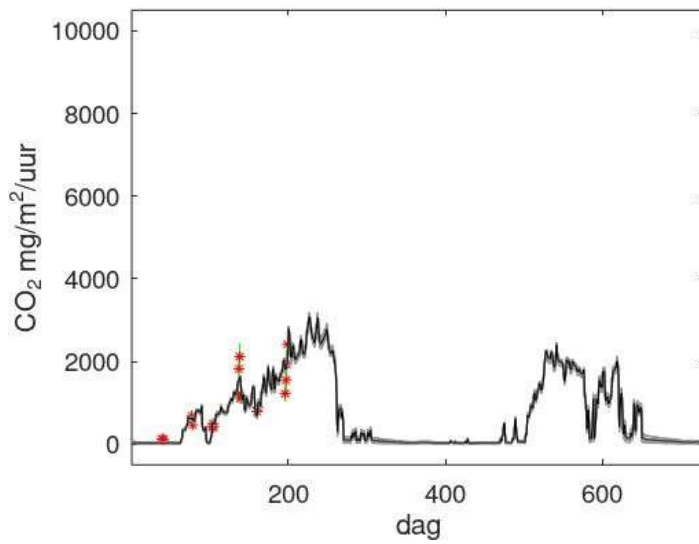
R_{eco} Referentie Model A Greppel



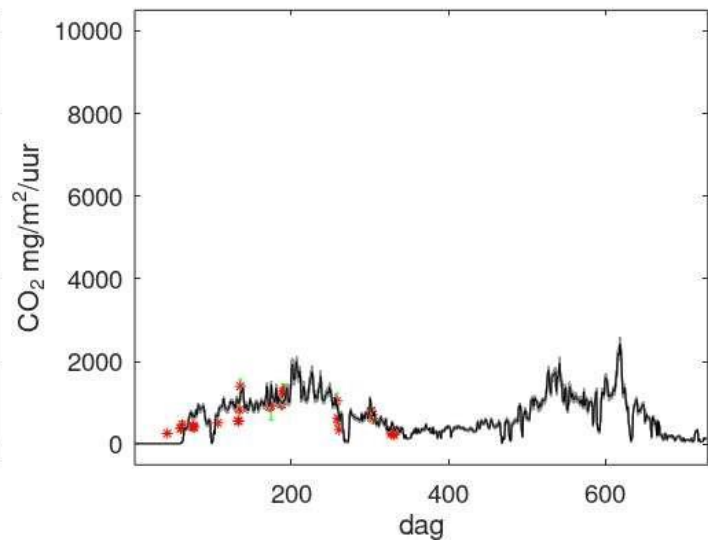
R_{eco} Maatregel Model A Greppel

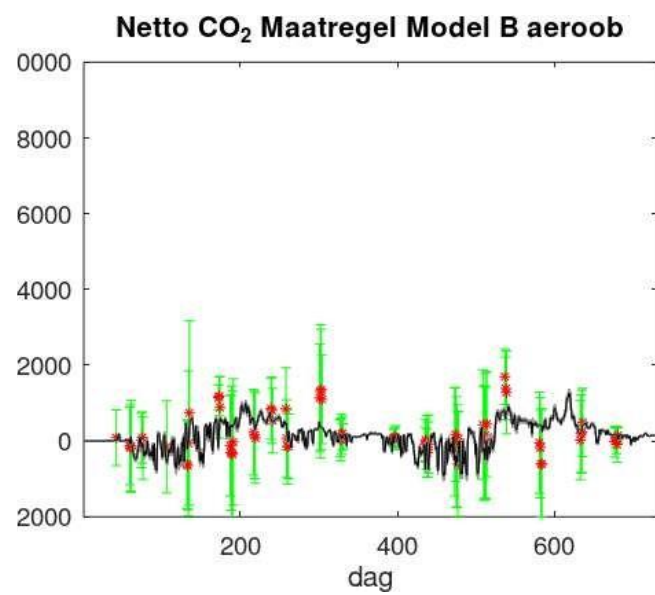
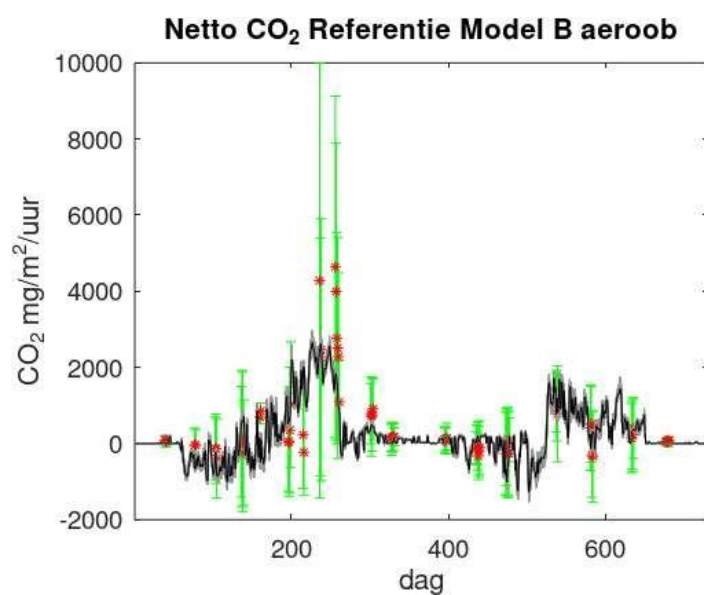
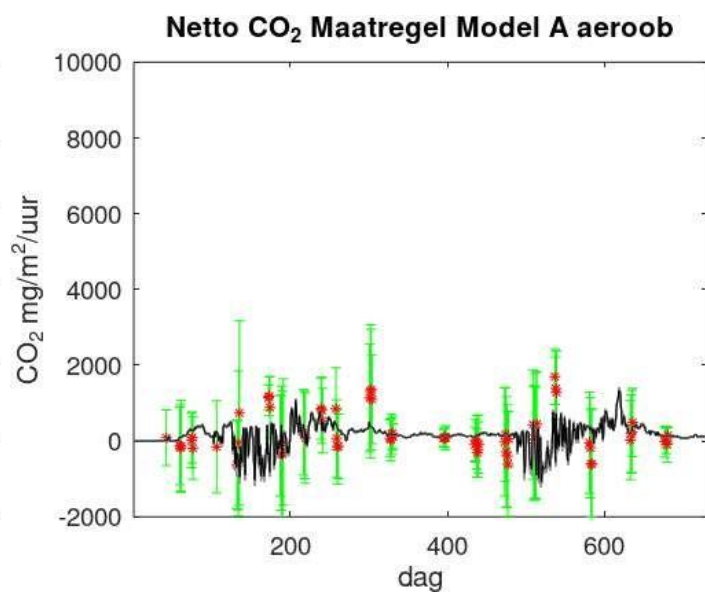
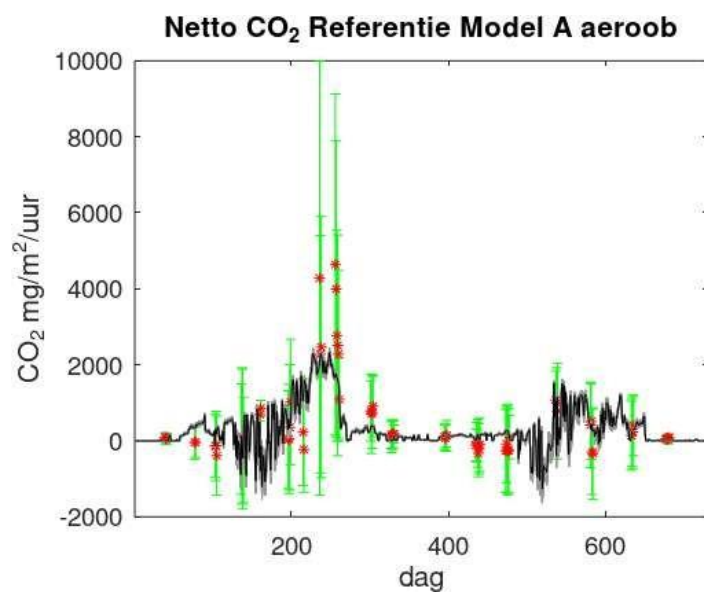


R_{eco} Referentie Model B Greppel

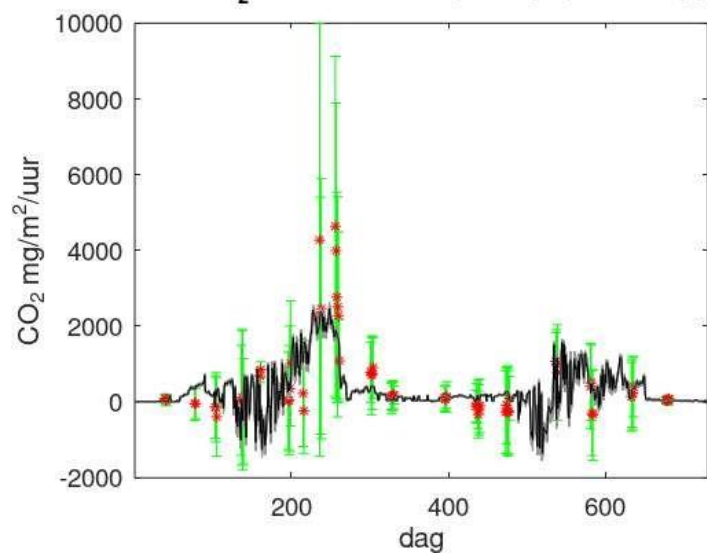


R_{eco} Maatregel Model B Greppel

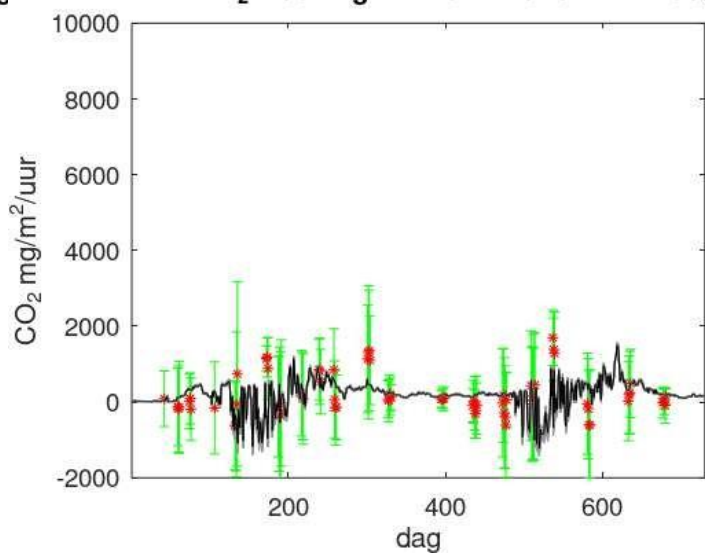




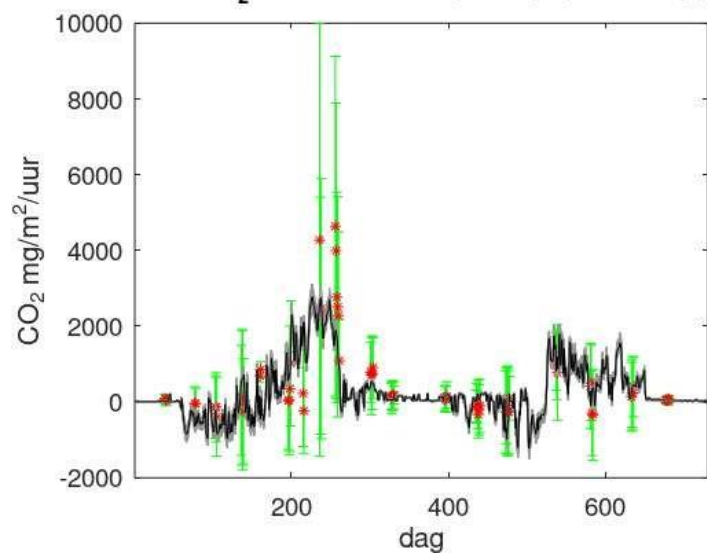
Netto CO₂ Referentie Model A anaeroob laag



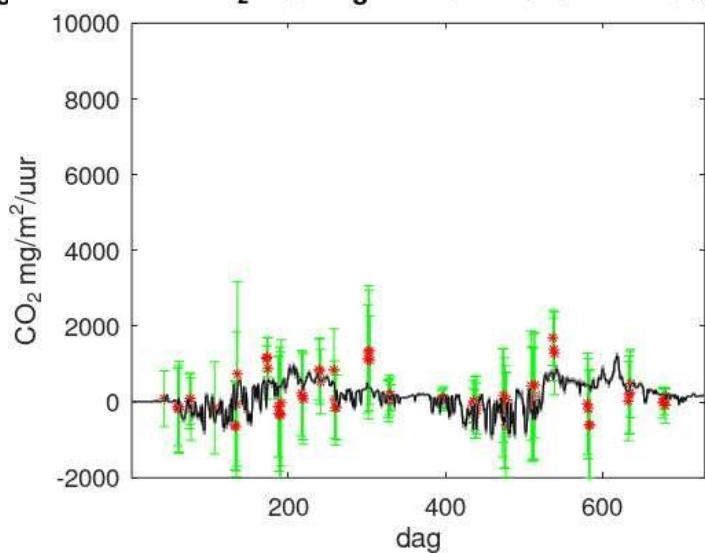
Netto CO₂ Maatregel Model A anaeroob laag

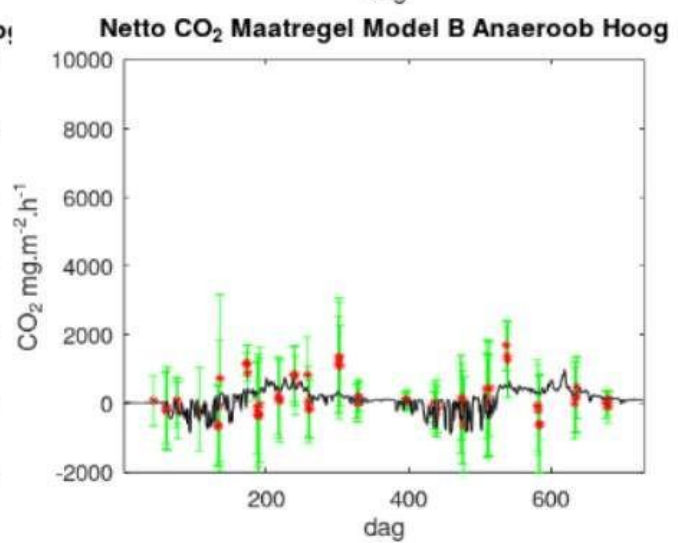
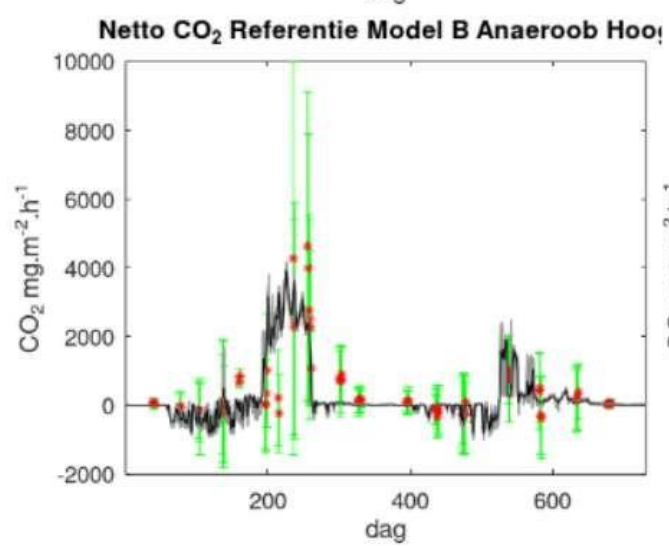
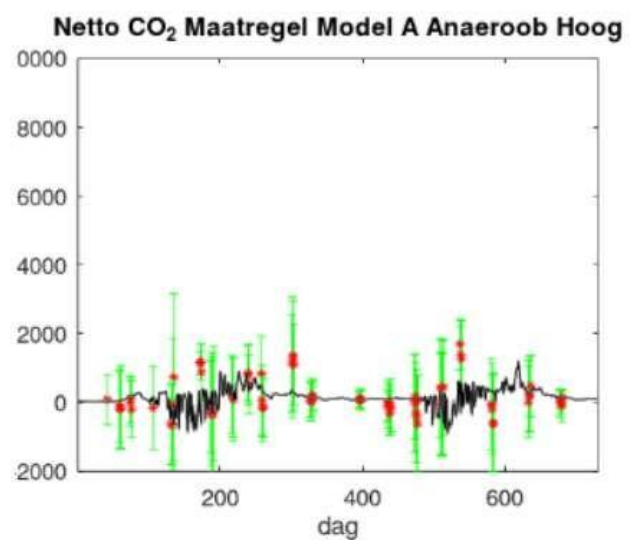
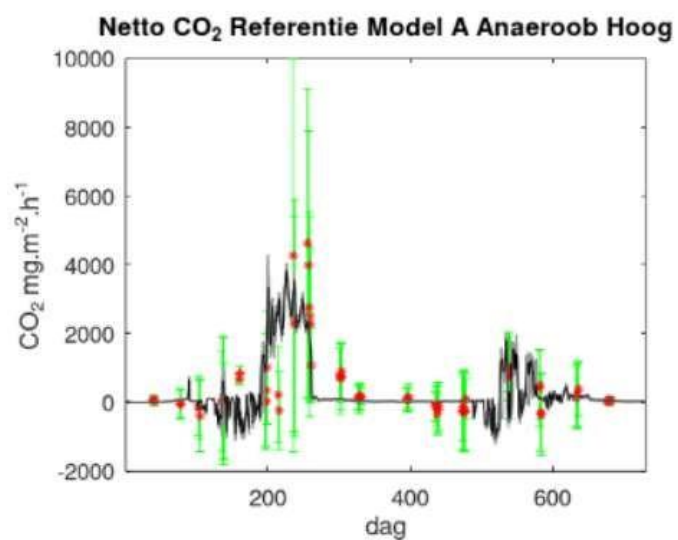


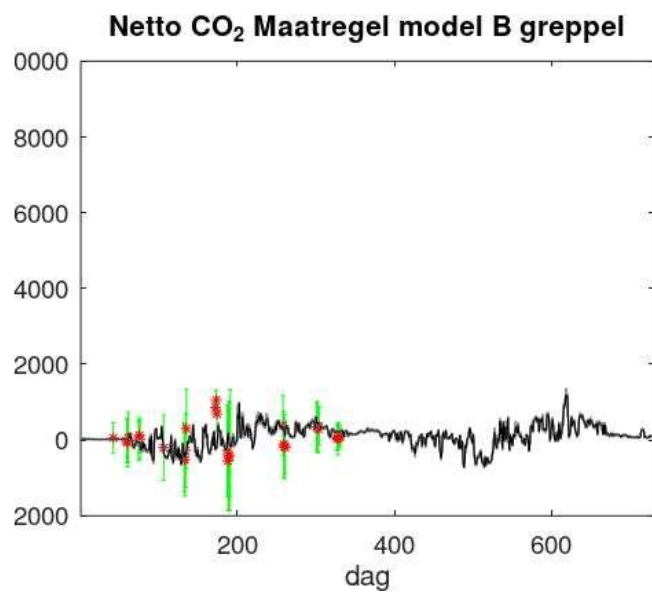
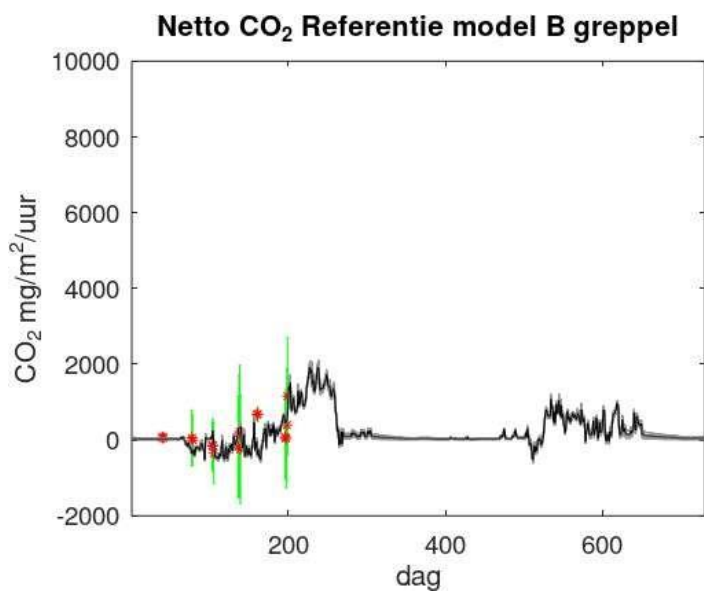
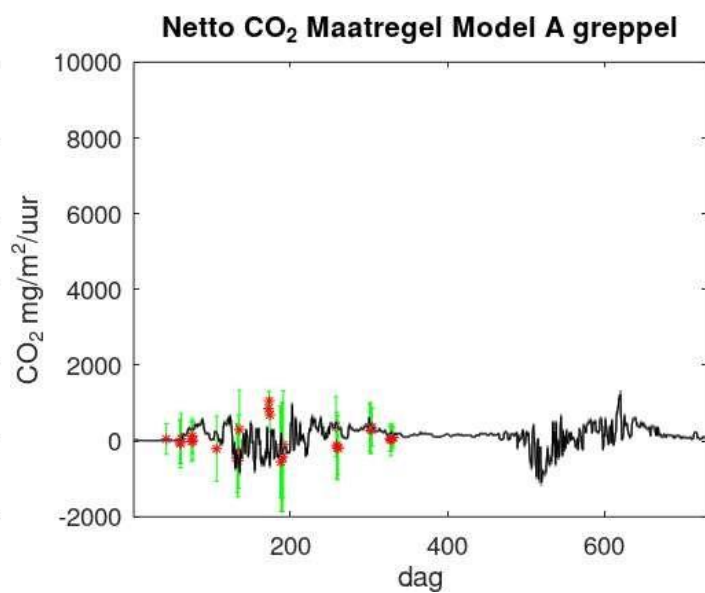
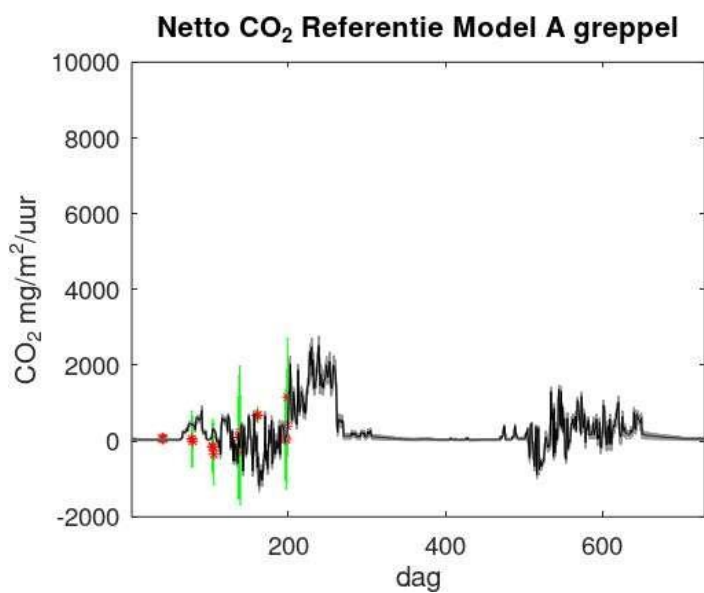
Netto CO₂ Referentie Model B anaeroob laag



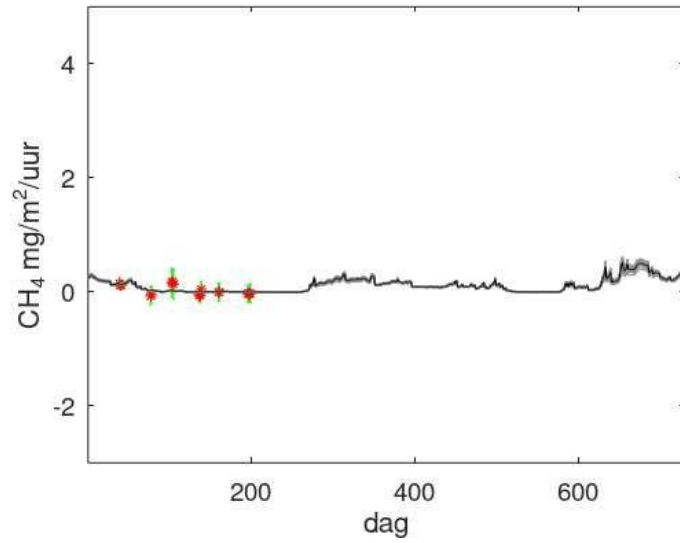
Netto CO₂ Maatregel Model B anaeroob laag



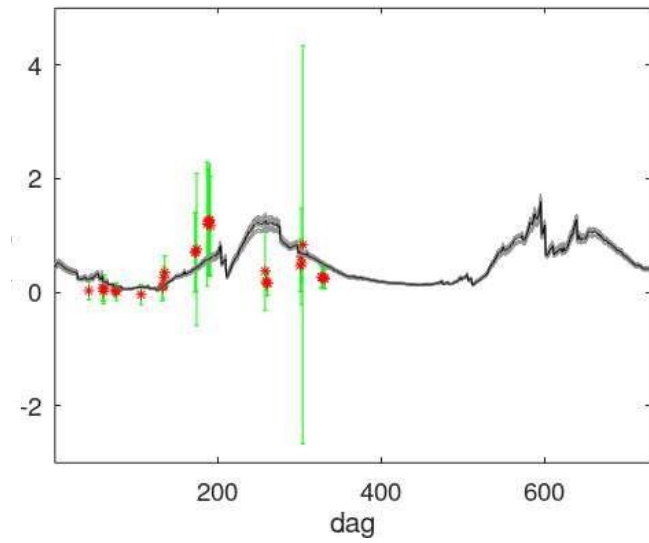




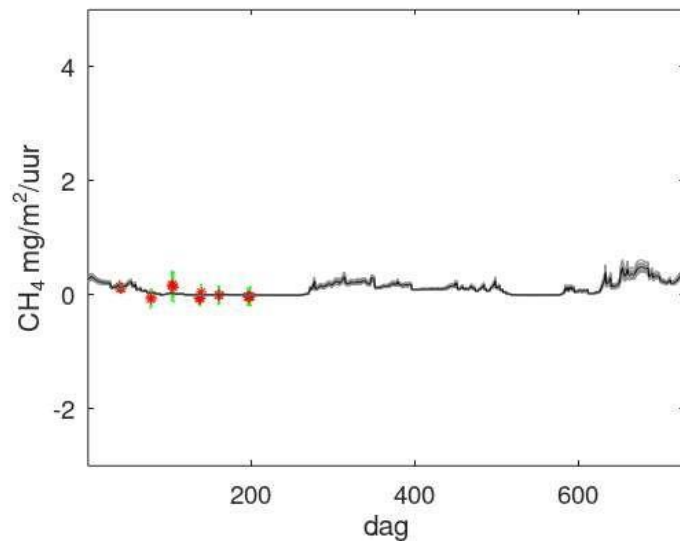
CH₄ Referentie Model A aeroob



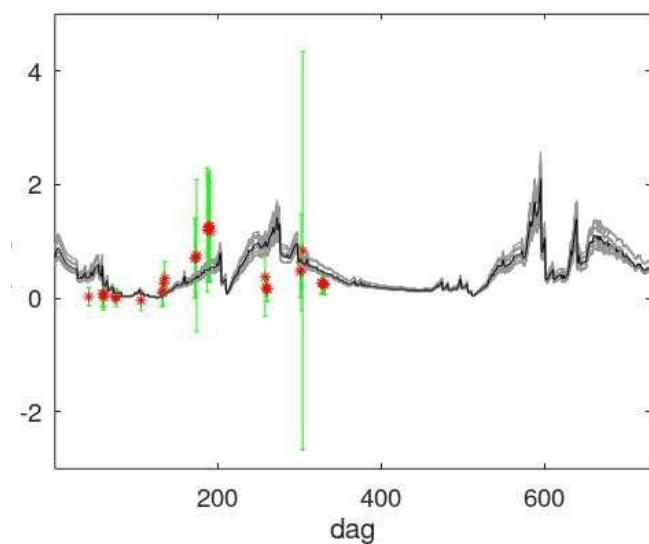
CH₄ Maatregel Model A aeroob

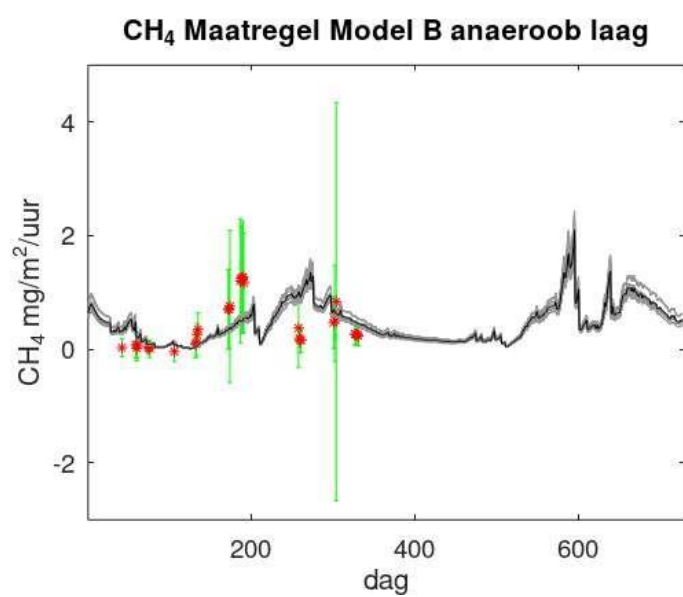
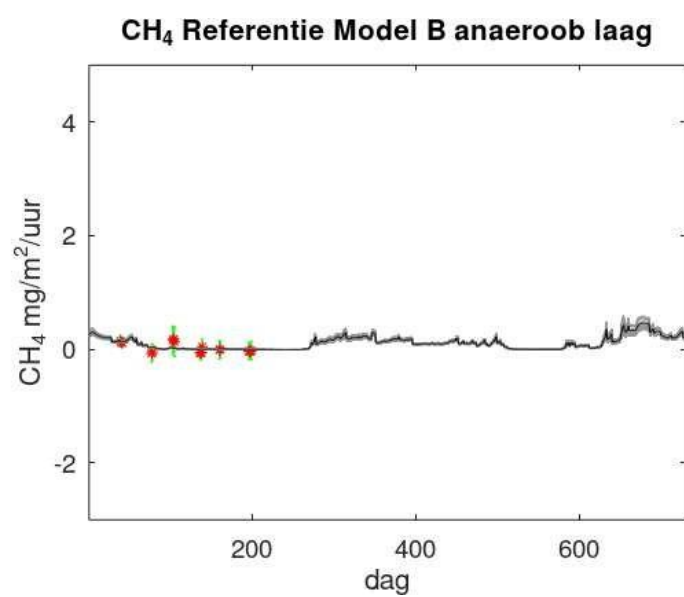
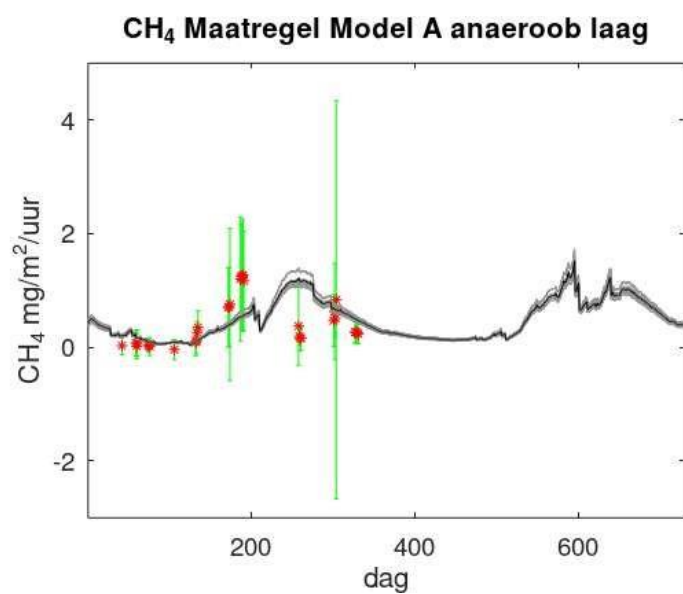
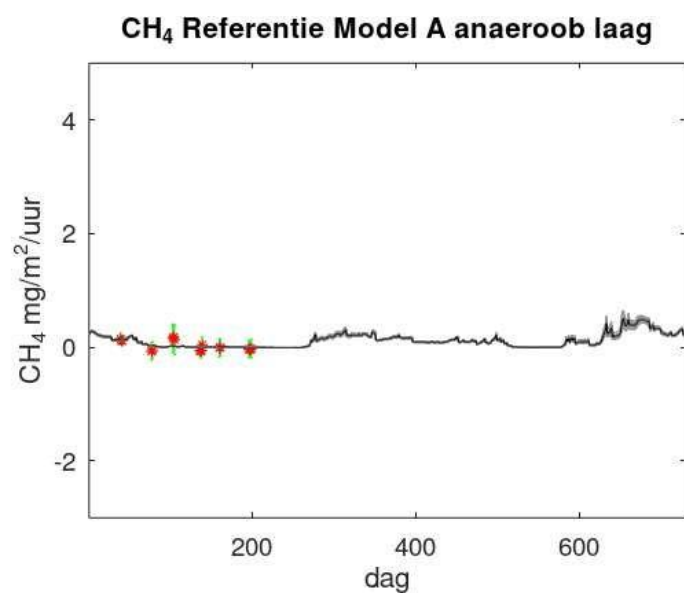


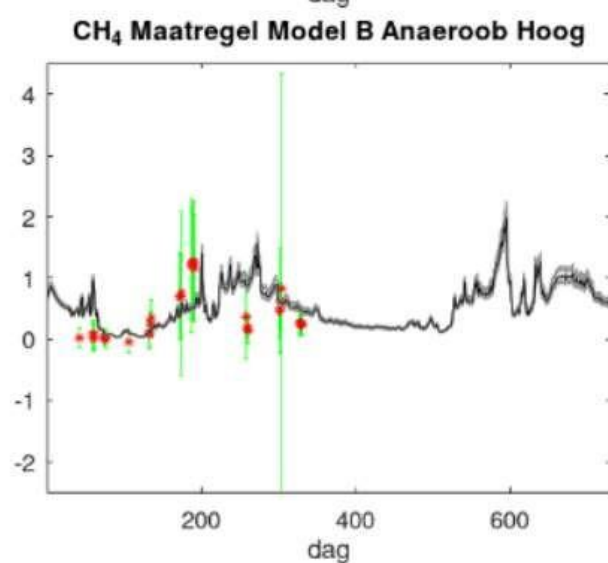
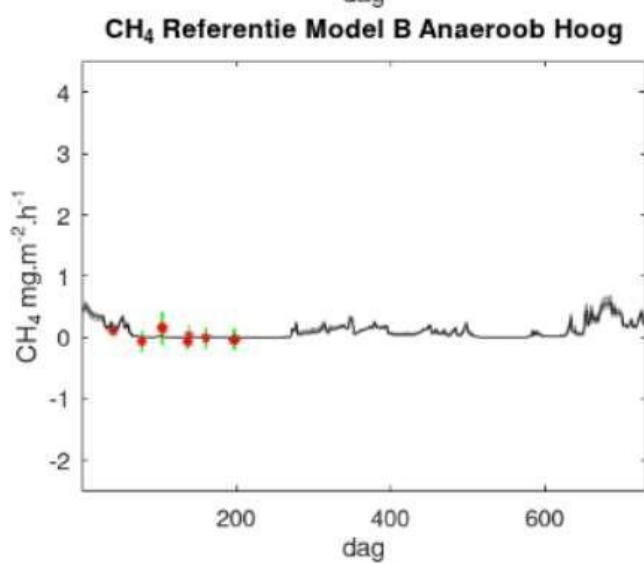
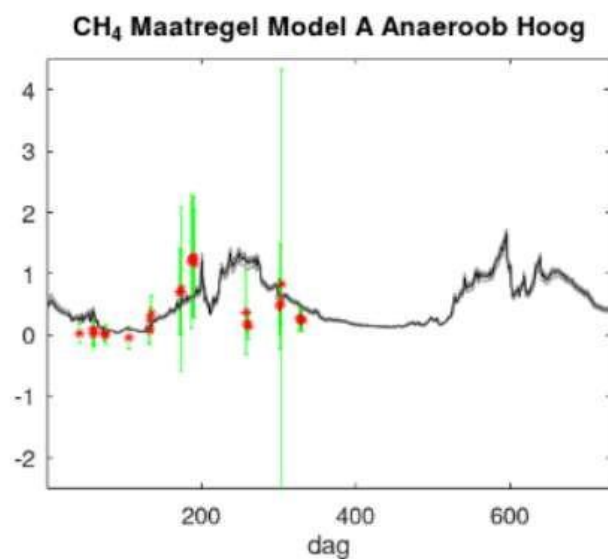
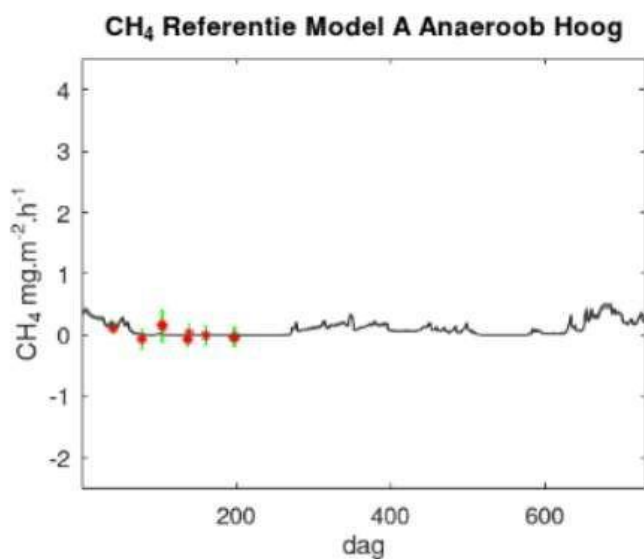
CH₄ Referentie Model B aeroob

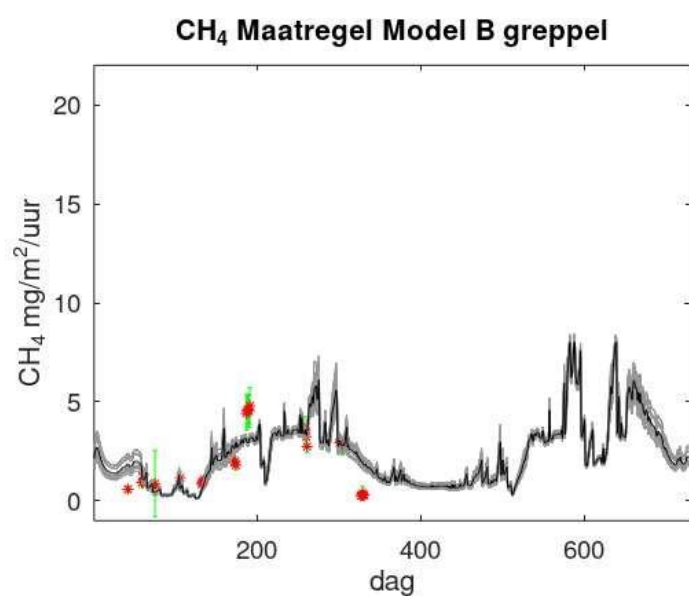
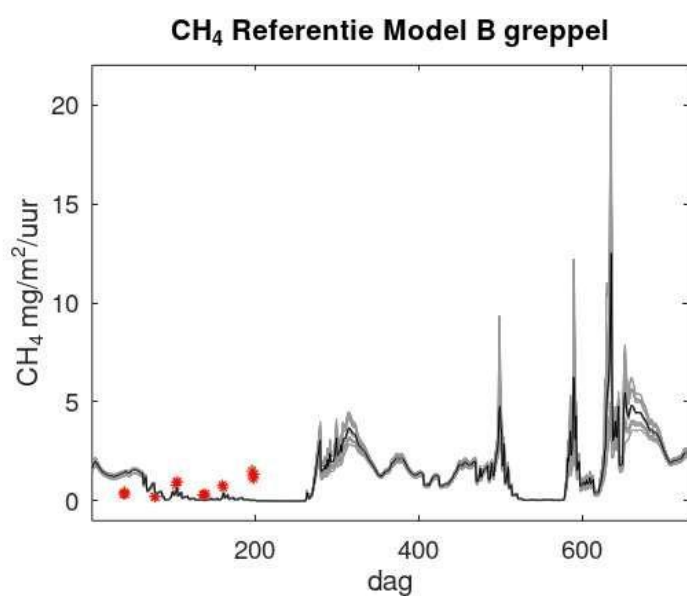
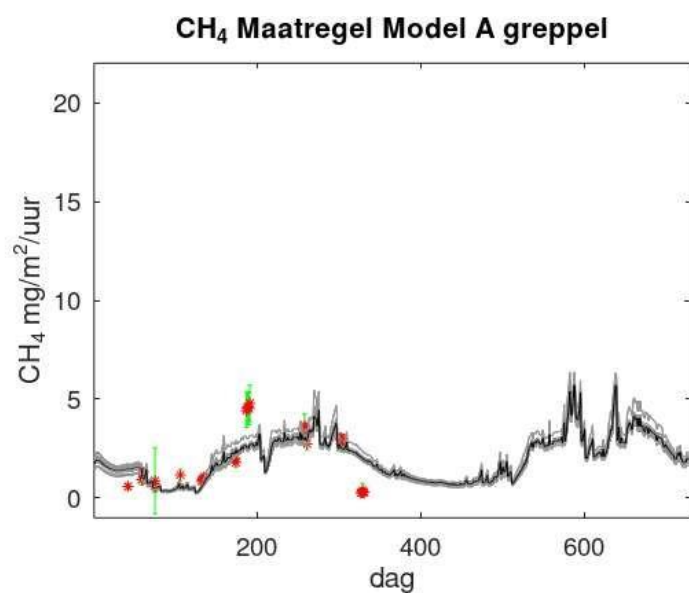
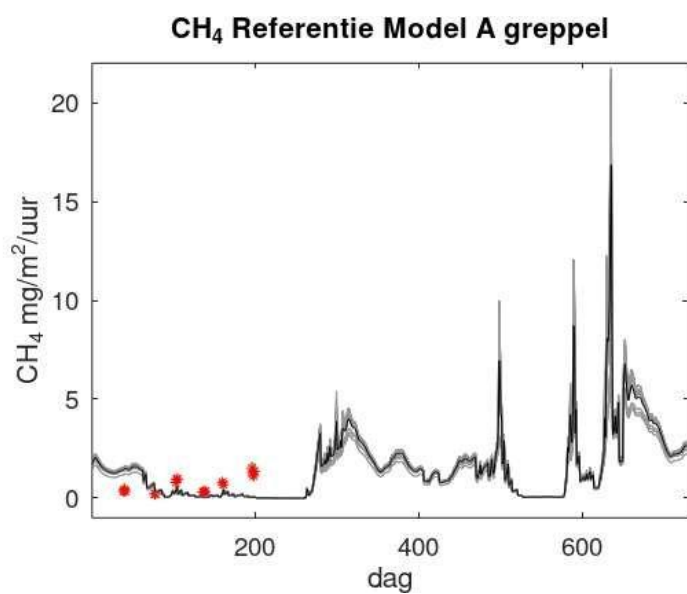


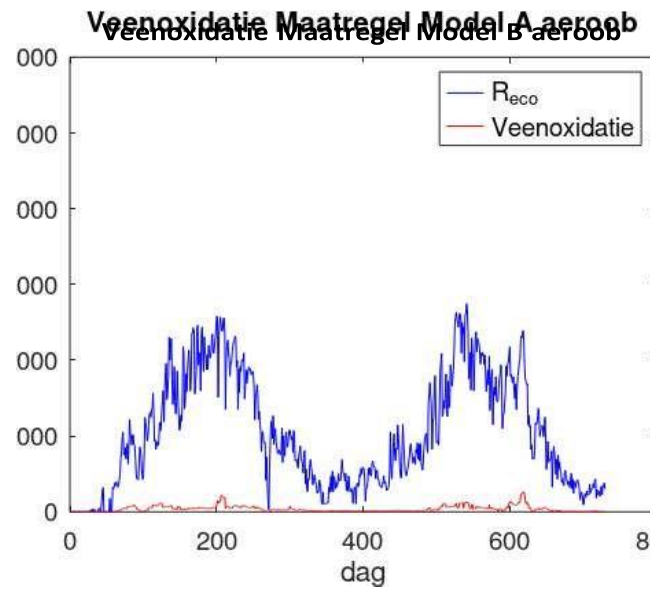
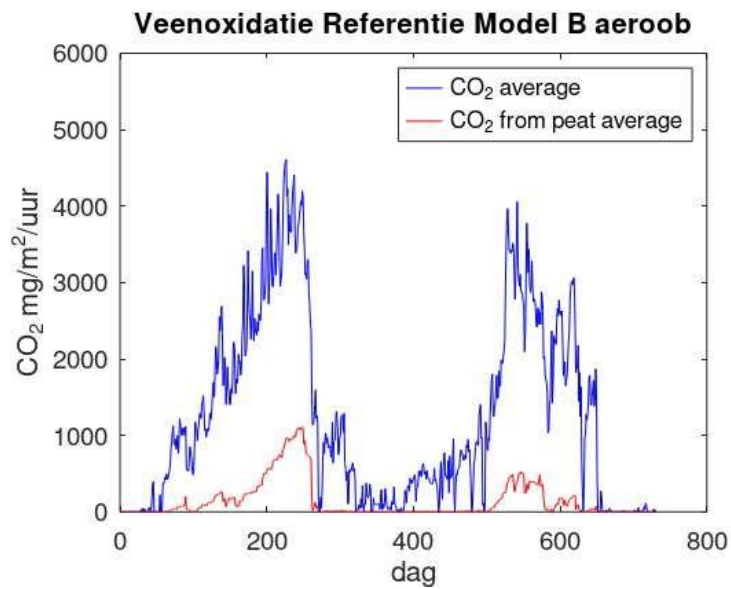
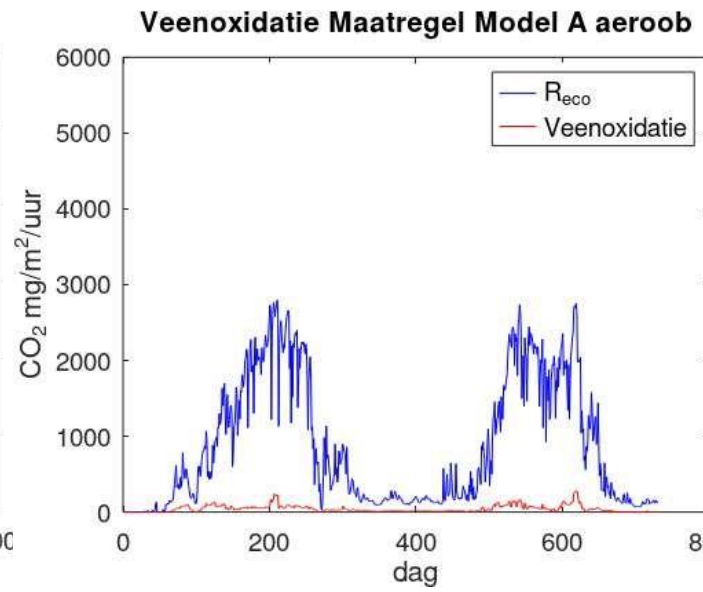
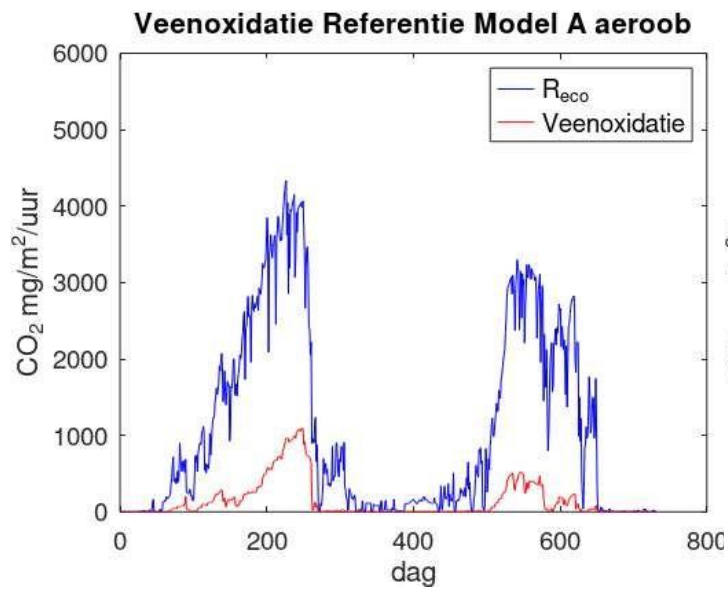
CH₄ Maatregel Model B aeroob



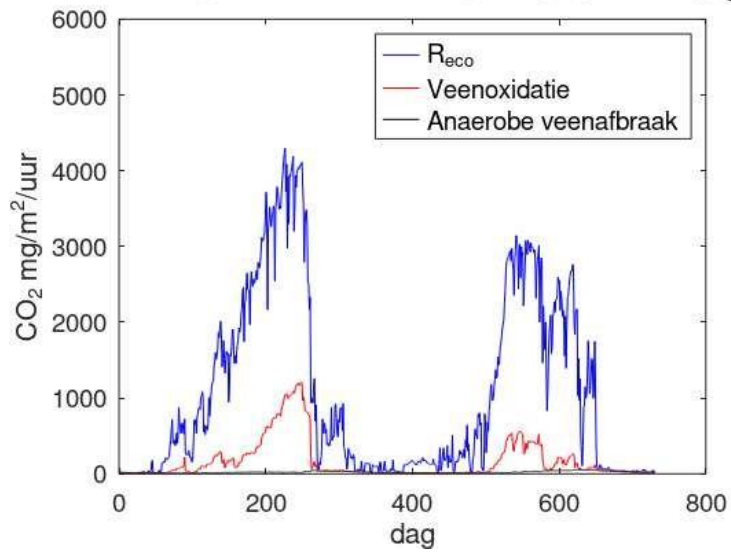




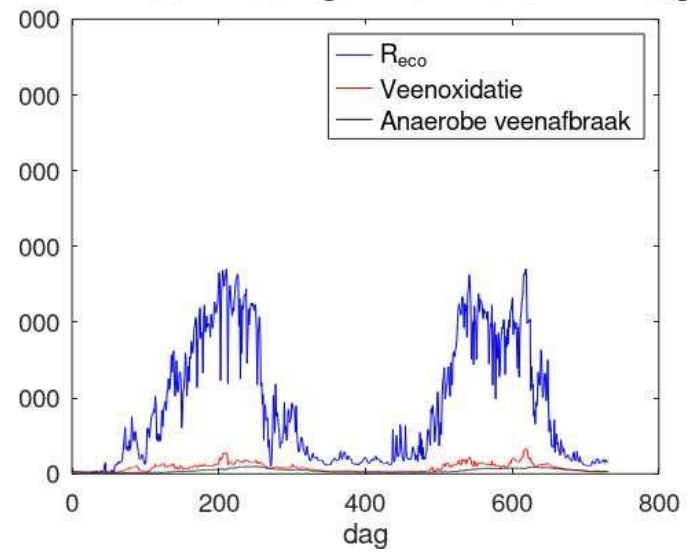




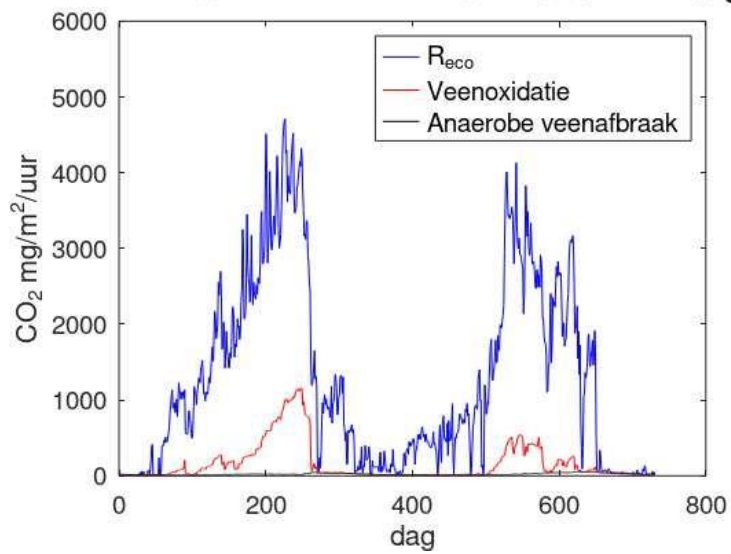
Veenoxidatie Referentie Model A anaeroob laag



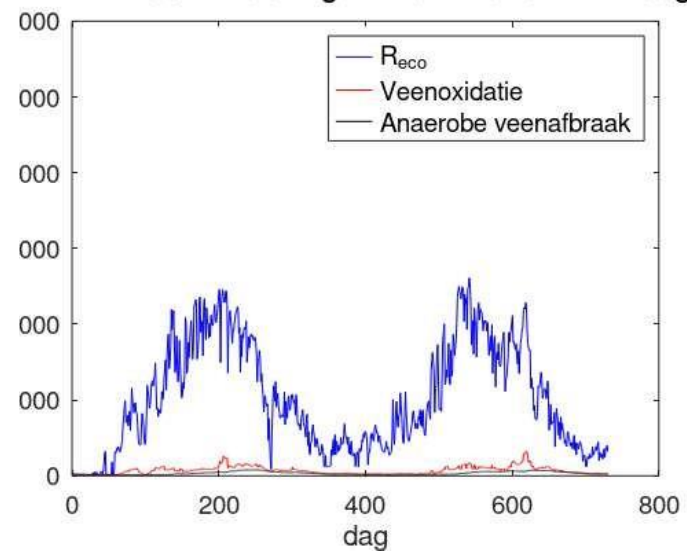
Veenoxidatie Maatregel Model A anaeroob laag

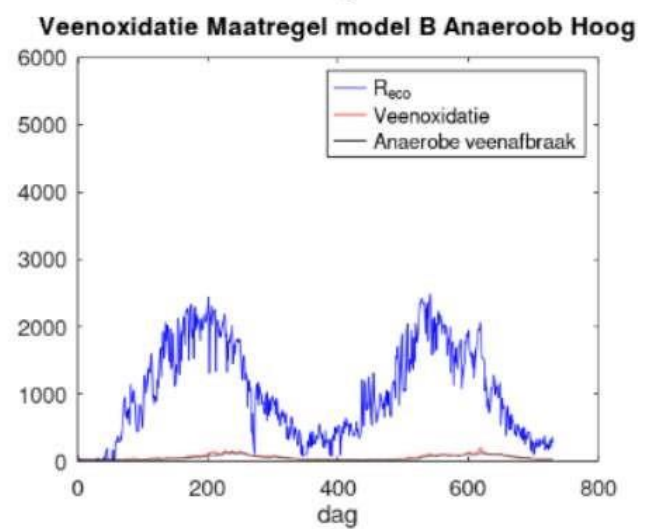
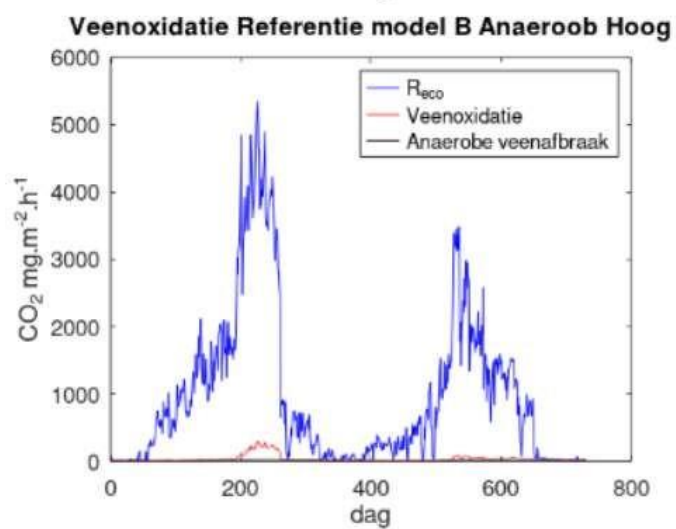
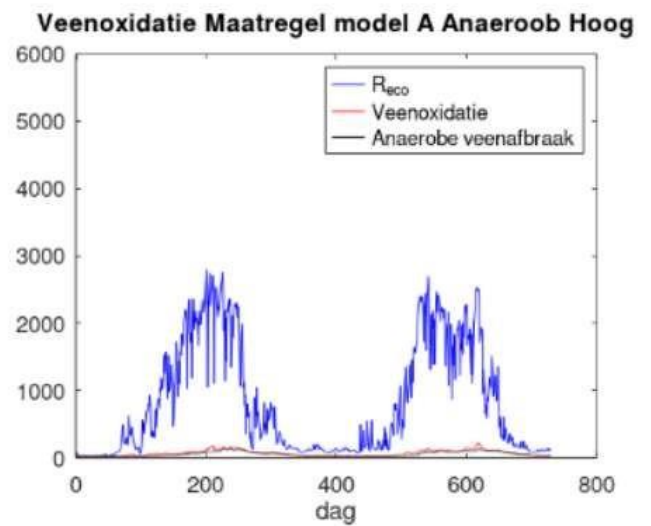
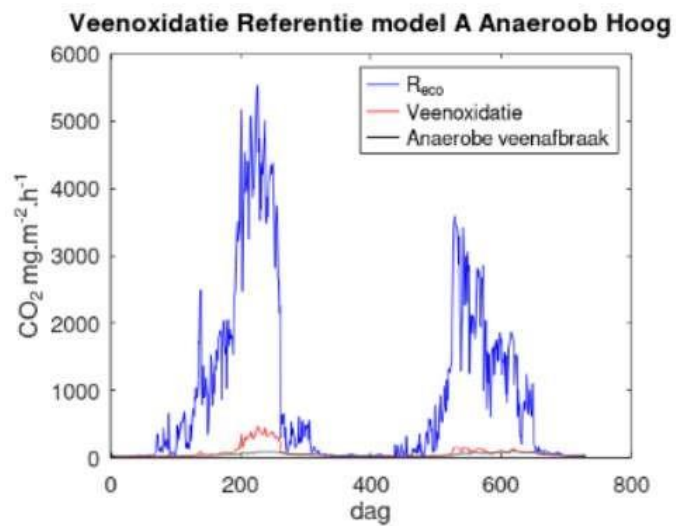


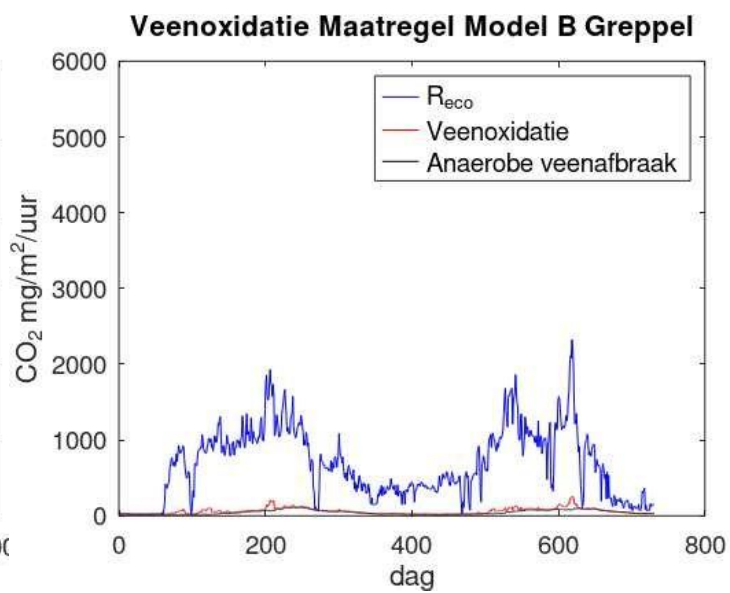
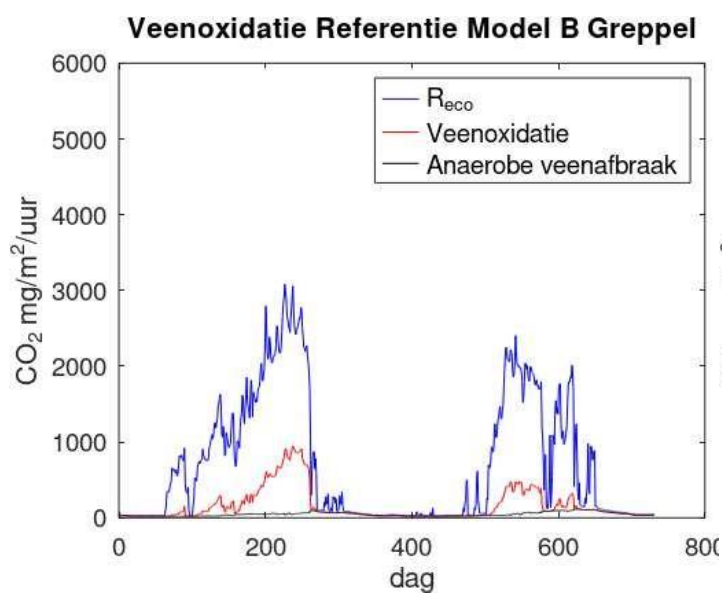
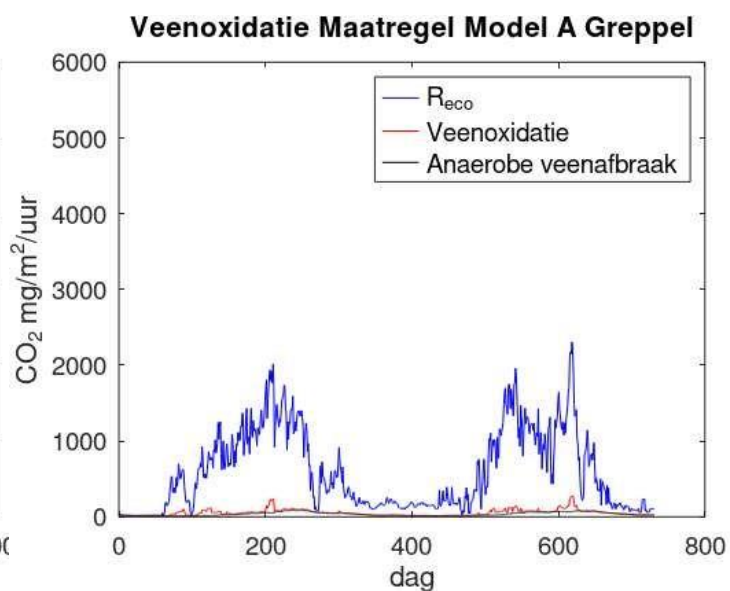
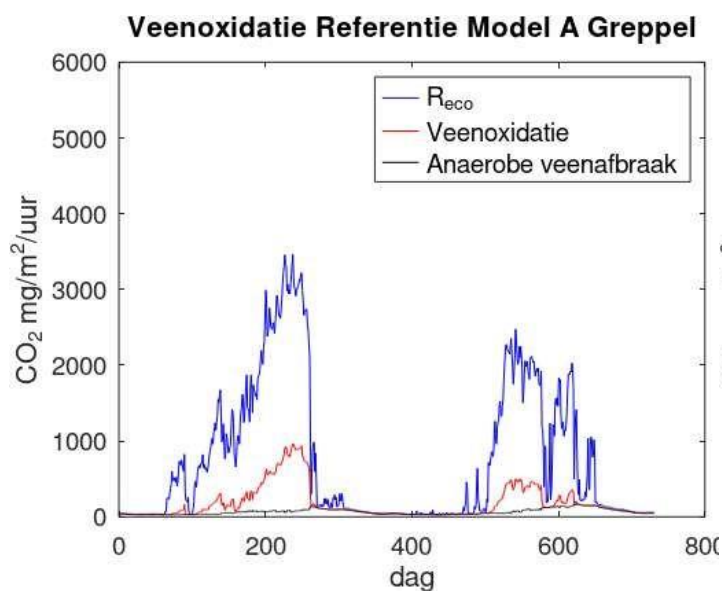
Veenoxidatie Referentie Model B anaeroob laag



Veenoxidatie Maatregel Model B anaeroob laag







Appendix II.

Parameterwaarden voor de beste modelsimulaties voor alle model configuraties.

Beste parameters alleen anaeroob CO ₂		Model A		Model B		Eenheid	
		Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel		
Beste Kling-Gupta Efficiency		0.5595	0.5989	0.6005	0.5680		
k exudaten		0.2192	0.2145	0.3746	0.2618	1/dag	
k plantenresten		0.4750	0.3995	1.0938	1.1275	1/dag	
k humus		0.0515	0.0417	0.0348	0.0360	1/dag	
k veen		0.1117	0.0775	0.1323	0.0964	1/dag	
minimum temperatuur groei		7.7563	7.0139	6.7935	8.7063	°C	
maximum LAI		1.9171	1.8126	1.7271	1.6046	fractie	
omzettingsfractie CH ₄		0.0007	0.0020	0.0014	0.0069	μMol /mMol C/uur	
blad respiratie		0.0026	0.0286	0.0127	0.0465	fractie	
wortel/stengel respiratie		0.1115	0.0784			fractie	
temperatuurgevoeligheid CH ₄		9.7707	14.2760	0.7255	13.1350	Q10 (dimensieloos)	
verhoging afbraaksnelheid door priming		0.0169	0.7428	0.3273	0.3702	fractie	
fractie exudaten ondergrondse productie		0.4496	0.3919	0.4272	0.4425	fractie	
fractie bovengrondse primaire productie		0.2058	0.2699	0.5856	0.3222	fractie	
correctiefactor exudaten voorjaar		0.4495	0.1755	0.1212	0.3140	fractie	
Model B plantenrespiratiefactor				22.6470	0.4767	μmol/m ² /sec	
Model B temperatuurgevoeligheid respiratie				0.0569	0.1551	1/°C	
Model B max. fotosynthese snelheid				0.1567	15.4010	μmol/m ² /sec	
Model B initiele toename fotosynthesesnelheid				0.1567	0.0651	μmol CO ₂ /μmol fotonen	

Beste parameters inclusief anaeroob CO ₂		Anaeroob Laag		Anaeroob Hoog		Eenheid	
		Model A		Model B			
		Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel
Beste Kling-Gupta Efficiency		0.5426	0.6611	0.5955	0.5367	0.7018	0.5237
k exudaten		0.3823	0.9912	0.4733	0.4402	0.5087	0.8344
k plantenresten		0.4645	0.6090	0.7510	0.7658	0.5963	0.4060
k humus		0.0722	0.0178	0.0808	0.0080	0.0749	0.1195
k veen		0.1325	0.0722	0.1286	0.0680	0.1084	0.1260
minimum temperatuur groei		6.3917	7.1731	7.5173	8.4088	7.9808	9.4607
maximum LAI		2.4598	1.5286	2.0072	1.6844	1.7683	1.5173
omzettingsfractie CH ₄		0.0009	0.0059	0.0013	0.0086	0.0006	0.0011
blad respiratie		0.0126	0.0096	0.0297	0.0167	0.0611	0.0549
wortel/stengel respiratie		0.0797	0.0618			0.0735	0.1171
temperatuurgevoeligheid CH ₄		9.0528	12.8130	5.6003	14.8100	4.6021	15.2450
verhoging afbraaksnelheid door priming		0.3032	0.1825	0.2241	0.6370	0.3188	0.5025
fractie exudaten ondergrondse productie		0.4461	0.2747	0.4377	0.3383	0.2677	0.4340
fractie bovengrondse primaire productie		0.3541	0.2949	0.3108	0.3155	0.2722	0.2487
k anaeroob CO ₂ veen		0.0007	0.0009	0.0007	0.0009	0.0008	0.0010
k anaeroob CO ₂ exudaten		0.0061	0.0052	0.0094	0.0028	0.0008	0.0040
k anaeroob CO ₂ plantenresten		0.0089	0.0086	0.0084	0.0032	0.0005	0.0069
Model B plantenrespiratiefactor				0.8147	0.6237		0.6030
Model B temperatuurgevoeligheid respiratie				0.1032	0.1274		0.1251
Model B max. fotosynthese snelheid				15.4410	15.3170		11.1790
Model B initiele toename fotosynthesesnelheid				0.0644	0.0541		0.0591
correctiefactor exudaten voorjaar		0.5693	0.3066	0.1211	0.4665	0.3910	0.5550
partiële anaerobie factor						4.0817	1.0324

Beste parameters greppel		Model A		Model B		Eenheid	
		Referentie	Maatregel	Referentie	Maatregel		
Beste Kling-Gupta Efficiency		0.6500	0.6636	0.7157	0.7232		
k exudaten		0.8824	0.8959	0.5904	0.7238	1/dag	
k plantenresten		0.8375	0.8920	0.4735	0.4217	1/dag	
k humus		0.2316	0.0220	0.0749	0.0114	1/dag	
k veen		0.1090	0.0781	0.0863	0.0442	1/dag	
minimum temperatuur groei		7.9558	6.7372	6.8585	6.5353	°C	
maximum LAI		1.2248	1.2911	1.3397	2.3757	fractie	
omzettingsfractie CH ₄		0.0049	0.0086	0.0056	0.0104	μMol /mMol C/uur	
blad respiratie		0.0010	0.0305	0.0046	0.0424	fractie	
wortel/stengel respiratie		0.0063	0.0188			fractie	
temperatuurgevoeligheid CH ₄		9.0562	14.6710	12.2060	14.9400	Q10 (dimensieloos)	
verhoging afbraaksnelheid door priming		0.1801	0.1289	0.1933	0.1199	fractie	
fractie exudaten ondergrondse productie		0.4854	0.3648	0.4332	0.4292	fractie	
fractie bovengrondse primaire productie		0.3600	0.2811	0.4534	0.2669	fractie	
k anaeroob CO ₂ veen		0.0011	0.0008	0.0007	0.0014	1/dag	
k anaeroob CO ₂ exudaten		0.0033	0.0006	0.0034	0.0020	1/dag	
k anaeroob CO ₂ plantenresten		0.0015	0.0099	0.0042	0.0061	1/dag	
Model B plantenrespiratiefactor				0.6588	0.4697	μmol/m ² /sec	
Model B temperatuurgevoeligheid respiratie				0.0216	0.0417	1/°C	
Model B max. fotosynthese snelheid				15.9300	8.9278	μmol/m ² /sec	
Model B initiele toename fotosynthesesnelheid				0.0535	0.0509	μmol CO ₂ /μmol fotonen	
correctiefactor exudaten voorjaar		0.8724	0.6831	0.8939	0.6591	fractie	

Appendix III.

Jaarbalansen voor alle modelconfiguraties en berekening van CO₂-equivalente emissies (inclusief CH₄).

Aeroob

Alleen aerobe veenoxidatie

		ton CO ₂ of CH ₄ per ha per jaar							
		R _{eco}		NEU		Totaal veenafbraak		CH ₄	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	Model A 2022	107.00	0.30	37.96	0.30	17.23	0.06	0.008	0.0001
	Model B 2022	119.06	0.43	26.65	0.36	17.30	0.11	0.008	0.0001
	Model A 2023	81.32	0.31	17.29	0.31	7.19	0.01	0.013	0.0001
	Model B 2023	93.34	0.42	16.58	0.34	6.89	0.03	0.013	0.0001
Maatregel	Model A 2022	76.94	0.21	14.41	0.13	3.74	0.01	0.041	0.0002
	Model B 2022	88.43	0.47	13.17	0.18	3.30	0.01	0.039	0.0004
	Model A 2023	75.94	0.22	14.55	0.14	3.59	0.02	0.047	0.0002
	Model B 2023	88.69	0.46	14.45	0.18	3.18	0.01	0.041	0.0004

Verschillen model A en B: % (A-B) / gemiddelde A en B

		%		%		%		%	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	2022	-10.7		35.0		-0.4		0.1	
	2023	-13.8		4.2		4.3		7.2	
Maatregel	2022	-13.9		9.0		12.3		6.8	
	2023	-15.5		0.7		12.0		12.9	

Gemiddelde Model A en B

		R _{eco}		NEU		Totaal veenafbraak		CH ₄	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
Referentie	2022	113.03	0.26	32.30	0.24	17.26	0.06	0.008	0.0000
	2023	87.33	0.26	16.93	0.23	7.04	0.02	0.013	0.0001
Maatregel	2022	82.69	0.26	13.79	0.11	3.52	0.01	0.040	0.0002
	2023	82.31	0.25	14.50	0.12	3.38	0.01	0.044	0.0002

Verschil referentie-maatregel

		R _{eco}		NEU		Totaal veenafbraak		CH ₄	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
	2022	30.34	0.18	18.51	0.13	13.74	0.03	-0.032	0.0001
	2023	5.02	0.18	2.43	0.13	3.66	0.01	-0.031	0.0001

Totaal CO₂ equivalenten – afname fossiel CO₂ + toename CH₄ ton/ha/jaar

		Op basis van aerobe veenoxidatie				Op basis van R _{eco}			
		100 jaar GWP		20 jaar GWP		100 jaar GWP		20 jaar GWP	
		jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.	jaarsom	st. afw.
2022		12.86	0.40	11.13	0.32	29.47	0.44	10.25	0.37
	2023	2.81	0.40	1.13	0.32	4.17	0.44	0.28	0.37

Schatting bodemdaling door veenafbraak mm/jaar

Referentie	2022	7.71
	2023	3.14
Maatregel	2022	1.57
	2023	1.51

11.1 Maaiveldhoogtemeting klassieke methode.

Arie-Jan heeft 3 keer gemeten: op 19 april 2022; 29 april 2023 en op 20 april 2024. De meetresultaten in cm boven slootpeil zijn weergegeven in onderstaande tabellen 1, 2 en 3.

Tabel 1: Maaiveldhoogte (droogligging) in cm ten opzichte van slootpeil 19-04-2022.

Plaats: elke 25 mtr in oost west richting een meting, uitsluitend breed deel van het perceel:		noord zijde greppel 1, 3 meter uit sloot noordzijde	noord zijde greppel 2, 15 meter uit sloot noordzijde	noord zijde greppel 1, 22 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 1, 30 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 2, 39 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 3, 47 meter uit sloot noordzijde		
12,5	m1	32	27	30	32	32	43		
37,5	m1	38	25	20	25	26	41		
62,5	m1	40	27	24	27	27	40		
sensoren referentie:									
87,5	m1	42	26	24	27	27	41		
112,5	m1	40	26	25	27	28	43		
137,5	m1	42	32	29	29	31	41		
162,5	m1	42	30	27	28	29	43		
187,5	m1	43	30	28	27	29	43		
sensoren 1 in proef locatie									
212,5	m1	44	26	27	24	20	43		
237,5	m1	44	26	28	25	28	42		
262,5	m1	40	27	27	24	31	43		
287,5	m1	41	28	24	27	28	41		
312,5	m1	40	24	21	16	27	40		
337,5	m1	42	24	19	19	26	40		
362,5	m1	39	22	18	14	24	38		
387,5	m1	38	22	19	16	23	39		
412,5	m1	38	20	16	12	17	27		
sensoren 2 in proef locatie									
437,5	m1	39	25	16	12	18	33		
462,5	m1	35	20	21	16	22	36		
		759	487	443	427	493	757		
		39,9	22,1	20,1	22,5	25,9	39,8	170,5	28,41
basis punt: op hoek uitwijkplaats.									
Hoogte water bij uitwijkplaats gemeten afstand: 72 cm tot oppervlakte water		72							

Tabel 2: Maaiveldhoogte (droogligging) in cm ten opzichte van slootpeil 29-04-2023.

Plaats: elke 25 mtr in oost west richting een meting, uitsluitend breed deel van het perceel:		noord zijde greppel 1, 3 meter uit sloot noordzijde	noord zijde greppel 2, 15 meter uit sloot noordzijde	noord zijde greppel 1, 22 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 1, 30 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 2, 39 meter uit sloot noordzijde	Zuidzijde greppel 3, 47 meter uit sloot noordzijde		
12,5	m1	39	32	29	29	32	37		
37,5	m1	39	26	24	21	24	38		
62,5	m1	40	27	24	25	28	40		
sensoren referentie:									
87,5	m1	41	30	25	23	26	42		
112,5	m1	43	30	25	28	30	43		
137,5	m1	43	33	29	28	30	45		
162,5	m1	45	33	27	28	30	42		
187,5	m1	45	31	29	24	34	44		
sensoren 1 in proef locatie									
212,5	m1	45	32	29	27	33	47		
237,5	m1	46	31	30	29	35	48		
262,5	m1	48	30	30	29	35	52		
287,5	m1	47	30	30	28	33	46		
312,5	m1	46	28	27	24	31	45		
337,5	m1	47	29	25	28	36	47		
362,5	m1	48	30	30	26	34	43		
387,5	m1	46	31	29	26	33	45		
412,5	m1	48	30	31	23	30	42		
sensoren 2 in proef locatie									
437,5	m1	47	31	28	26	33	44		
462,5	m1	44	32	30	25	29	42		
		847	576	531	497	596	832		
		44,6	26,2	24,1	26,2	31,4	43,8	196,2	32,70
basis punt: op hoek uitwijkplaats.									
Hoogte water bij uitwijkplaats gemeten afstand: 72,3 cm tot oppervlakte water		72,3							

Tabel 3: Maaiveldhoogte (droogligging) in cm ten opzichte van slootpeil 20-04-2024.

De jaren zijn vergeleken door de hoogteverschillen per punt te berekenen. De veranderingen in maaiveldhoogte tussen 2022 en 2024 zijn weergegeven in Tabel 4.

		3 m	15 m	22 m	30 m	39 m	47 m	Som Raai
	raai							
referentie	12,5 m	0	-4	-5	-7	-5	-11	-32
referentie	37,5 m	-5	-4	-1	-7	-7	-8	-32
referentie	62,5 m	-5	-3	-3	-3	-3	-13	-30
referentie	87,5 m	-7	-3	-1	-3	-6	-4	-24
referentie	112,5 m	-3	-2	-2	-4	-3	-5	-19
referentie	137,5 m	-2	-1	1	-3	-3	-3	-11
gedraineerd	162,5 m	-4	-4	-3	-4	-5	-7	-27
gedraineerd	187,5 m	-4	-5	-3	-8	-2	-5	-27
gedraineerd	212,5 m	-3	-2	-6	-4	-2	-3	-20
gedraineerd	237,5 m	-3	-2	-1	-3	-2	-4	-15
gedraineerd	262,5 m	-1	-2	-3	-2	-4	3	-9
gedraineerd	287,5 m	-3	-3	-1	-1	0	-1	-9
gedraineerd	312,5 m	-4	-1	-2	1	-1	-2	-9
gedraineerd	337,5 m	1	0	1	5	4	0	+11
gedraineerd	362,5 m	2	0	0	1	3	-3	+3
gedraineerd	387,5 m	4	2	0	4	2	-1	+11
gedraineerd	412,5 m	4	0	3	2	-1	1	+9
gedraineerd	437,5 m	1	-2	1	5	3	-1	+7
gedraineerd	462,5 m	-2	-1	0	1	0	-3	-5
Referentie gemiddeld								-4,11111
Drains gemiddeld								-1,02564
Drains-refer gemiddeld								3,08547

Tabel 4: Veranderingen in maaiveldhoogte (droogligging) in cm tussen april 2022 en april 2024 voor referentie en gedraineerd deel proefveld. Daling is weergegeven met een negatief getal.

Uit tabel 4 blijkt dat tussen april 2022 en april 2024 het maaiveld zowel op de referentie als het gedraineerde deel van het perceel gedaald was. Op de referentie was de daling gemiddeld 4,1 cm en op het gedraineerde deel 1,0 cm. Door infiltratie zou dan 3,1 cm bodemdaling zijn voorkomen. Dit past in de verwachting dat infiltratie de veenafbraak en de daarmee samengaan- de bodemdaling beperkt.

De bodemdaling is gemeten over 2 jaar, waarbij 2022 extreem droog was en 2023 nat begon en de zomer minder lang droog was dan 2022. Verwacht mag worden dat het grootste deel van de daling over 2 jaar dan een gevolg was van de droogte in 2022. De veranderingen in maaiveldhoogte tussen april 2022 en april 2023 zijn weergegeven in Tabel 5. Uit deze tabel blijkt de daling in deze periode groot was. Op de referentie was de gemiddelde daling 4,4 cm en op het gedraineerde deel 6,4 cm. Opmerkelijk is dat het maaiveld op het gedraineerde deel met gemiddeld 1,9 cm meer was gedaald dan op de referentie.

		3 m	15 m	22 m	30 m	39 m	47 m	Som Raai
	raai							
referentie	12,5 m	-7	-9	-4	-4	-5	-5	-34
referentie	37,5 m	-6	-5	-5	-3	-5	-5	-29
referentie	62,5 m	-5	-3	-3	-1	-4	-13	-29
referentie	87,5 m	-6	-7	-2	1	-5	-5	-24
referentie	112,5 m	-6	-6	-2	-5	-5	-5	-29
referentie	137,5 m	-3	-2	1	-2	-2	-7	-15
gedraineerd	162,5 m	-7	-7	-3	-4	-6	-6	-33
gedraineerd	187,5 m	-6	-6	-4	-5	-7	-6	-34
gedraineerd	212,5 m	-4	-8	-8	-7	-15	-7	-49
gedraineerd	237,5 m	-5	-7	-3	-7	-9	-10	-41
gedraineerd	262,5 m	-9	-5	-6	-7	-8	-6	-39
gedraineerd	287,5 m	-9	-5	-7	-2	-5	-6	-34
gedraineerd	312,5 m	-10	-5	-8	-7	-5	-7	-42
gedraineerd	337,5 m	-4	-5	-5	-4	-6	-7	-29
gedraineerd	362,5 m	-7	-8	-12	-11	-7	-8	-53
gedraineerd	387,5 m	-4	-7	-10	-6	-8	-7	-42
gedraineerd	412,5 m	-6	-10	-12	-9	-14	-14	-65
gedraineerd	437,5 m	-7	-8	-11	-9	-12	-12	-59
gedraineerd	462,5 m	-11	-13	-9	-8	-7	-9	-57
Referentie gemiddeld								-4,44444
Drains gemiddeld								-6,35897
Drains-refer gemiddeld								-1,91453

Tabel 5: Verandering maaiveldhoogten in cm tussen april 2022 en april 2023 voor referentie en gedraineerd deel proefveld. Daling is weergegeven met een negatief getal.

In Tabel 6 zijn de resultaten van 2023 en 2024 met elkaar vergeleken. Najaar 2023 en winter en voorjaar 2024 waren extreem nat. Uit tabel 6 blijkt dat maaiveld tussen april 2023 en april 2024 niet gedaald was, maar gestegen. Op de referentie met gemiddeld 0,3 cm en op het gedraineerde deel met gemiddeld 6,4 cm. Opmerkelijk is dat het maaiveld op het gedraineerde deel met gemiddeld 6,1 cm meer was gestegen dan op de referentie.

		3 m	15 m	22 m	30 m	39 m	47 m	Som Raai
	raai							
referentie	12,5 m	7	5	-1	-3	0	-6	2
referentie	37,5 m	1	1	4	-4	-2	-3	-3
referentie	62,5 m	0	0	0	-2	1	0	-1
referentie	87,5 m	-1	4	1	-4	-1	1	0
referentie	112,5 m	3	4	0	1	2	0	10
referentie	137,5 m	1	1	0	-1	-1	4	4
gedraineerd	162,5 m	3	3	0	0	1	-1	6
gedraineerd	187,5 m	2	1	1	-3	5	1	7

gedraineerd	212,5 m	1	6	2	3	13	4	29
gedraineerd	237,5 m	2	5	2	4	7	6	26
gedraineerd	262,5 m	8	3	3	5	4	9	32
gedraineerd	287,5 m	6	2	6	1	5	5	25
gedraineerd	312,5 m	6	4	6	8	4	5	33
gedraineerd	337,5 m	5	5	6	9	10	7	42
gedraineerd	362,5 m	9	8	12	12	10	5	56
gedraineerd	387,5 m	8	9	10	10	10	6	53
gedraineerd	412,5 m	10	10	15	11	13	15	74
gedraineerd	437,5 m	8	6	12	14	15	11	66
gedraineerd	462,5 m	9	12	9	9	7	6	52
Referentie gemiddeld								0,33333
Drains gemiddeld								6,42307
Drains-refer gemiddeld								6,08974

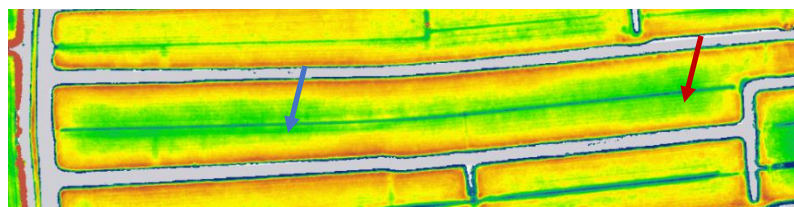
Tabel 6: Verandering maaiveldhoogten in cm tussen april 2023 en april 2024 voor referentie en gedraineerd deel proefveld. Daling is weergegeven met een negatief getal.

11.2. Maaiveldhoogtemeting Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)

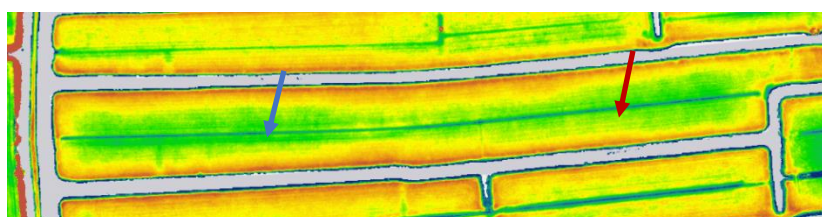
Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is een digitale hoogtekartaar voor heel Nederland. Het bevat gedetailleerde en precieze hoogtegegevens met gemiddeld tien hoogtemetingen (pixels) per vierkante meter. AHN is een samenwerking van de provincies, Rijksoverheid en de waterschappen.

De gegevens voor het AHN zijn verzameld met Airborne LiDAR technologie (Lit. 20.). Met lasertechnologie is vanuit helikopters en vliegtuigen 3D hoogte-informatie van het maaiveld verzameld. Zo is van elke vierkante meter in Nederland tot op 5 centimeter nauwkeurig de hoogte op maaiveldniveau bekend. Nederland is opgedeeld in kaartbladen. Polder Bloemendaal en omgeving ligt in Kaartblad 31 CZ2.

Voor Polder Bloemendaal en omgeving zijn op 7 april 2020 en 2 april 2023 metingen uitgevoerd. Het betreft de 4^{de} en de 5^{de} meting, aangeduid met AHN4 en AHN5. Het AHN4 beeld is in figuur 1 weergegeven alsmede in hoofdstuk 2.4.1. t.b.v. de selectie van het proefperceel. De AHN5 meting is weergegeven in figuur 2.



Figuur 1: AHN4 beeld van het proefperceel 7 april 2020. Blauwe pijl gedraineerd deel, bruine pijl, referentie.



Figuur 2: AHN5 beeld van het proefperceel 2 april 2023. AHN5 DTM 50cm (beta).

Door het AHN5 beeld te vergelijken met het AHN4 beeld kan zichtbaar worden gemaakt in hoeverre de hoogteligging van het maaiveld ten opzichte van NAP tussen april 2020 en april 2023 is veranderd. De kleurschakeringen in de figuren 1 en 2 zijn relatief en hebben elk een eigen schaling. Hierdoor kunnen aan de kleurschakering geen conclusies worden verbonden. Wat wel inzicht kan geven in de verandering is het berekenen van het verschil tussen en metingen (AHN5-AHN4) op pixelniveau en daarvan een beeld maken. Mark Kramer en zijn collega's bij het Hoogheemraadschap Rijnland hebben ten behoeve van het pilotproject Bodemdaling Polder Bloemendaal van de Regiodeal bodemdaling Groene Hart de pixelberekeningen uitgevoerd en daarvan onderstaand beeld gemaakt



Legend

Value

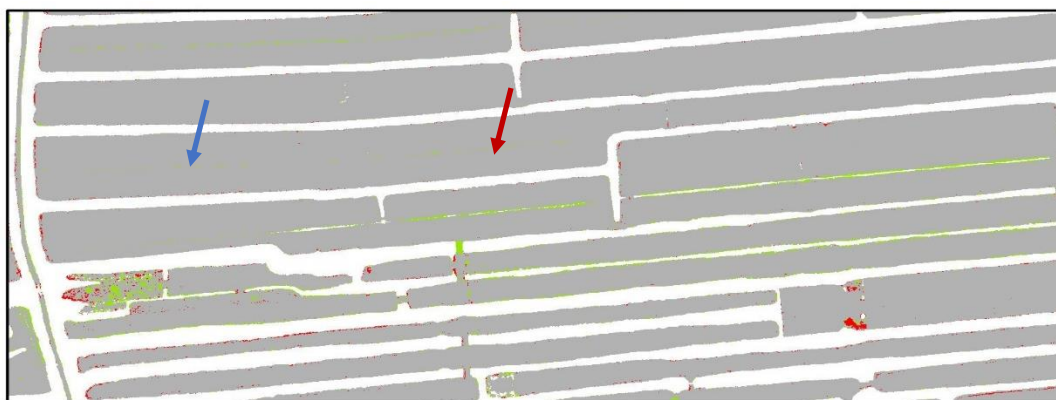
■	daling
■	0
■	stijging

Figuur 3: AHN5-AHN4 beeld, vergelijking op pixelniveau van het proefperceel en aangrenzende percelen. De rode pixels geven aan waar AHN5 een lagere waarde (daling) geeft dan AHN4 en de groene pixels geven aan dat de AHN5 een hogere waarde geeft dan AHN4 (stijging). Blauwe pijl: gedraineerd deel van het proefperceel; Bruine pijl, niet gedraineerd deel (referentie) van het perceel.

De vergelijking van AHN5 en AHN4 levert bijzondere resultaten op. De AHN4 laat op veel plekken lagere waarden zien dan de AHN5. In veengebieden mag worden verwacht dat mede door de droogte in 2022 de AHN5 lagere waarden laten zien. Dat blijkt niet het geval.

Dit geldt ook voor polder Bloemendaal met inbegrip van het proefperceel, waar ook meer groene dan rode pixels zichtbaar zijn. Als per pixel wordt gekeken, iets wat overigens afgeraden wordt door de leverancier van het AHN, blijkt dat er volgens AHN-5 sprake is van een algemene bodemstijging t.o.v. AHN4, zie figuur 3.

Zoals gezegd wordt het door de leverancier van de AHN ten zeerste afgeraden om zo'n 1 op 1 vergelijking tussen de datasets met elkaar te doen. Dat heeft onder andere te maken met de nauwkeurigheid van de datasets. Voor beide datasets (AHN4 en AHN5) wordt een nauwkeurigheid van +/- 5 cm aangegeven. Dat geeft een totale bandbreedte van 10 centimeter. Indien rekening wordt gehouden met een bandbreedte van 10 cm om daling en of stijging uit te drukken, blijkt dat er geen conclusies kunnen worden getrokken voor dit perceel. In figuur 4 is zichtbaar dat op enkele uitzonderingen na de veranderingen binnen de bandbreedte van 10cm blijven. Dit geldt ook voor het proefperceel.



Legend

Value

■	daling >10cm
■	beweging binnen 10 cm
■	beweging binnen 10 cm
■	stijging >10cm

Figuur 4: Vergelijking met bandbreedte 10cm. Blauwe pijl: gedraineerd deel van het proefperceel; Bruine pijl, niet gedraineerd deel (referentie) van het perceel.

11.3 Maaiveldhoogtemeting Satelliet Radar Interferometrie (InSAR)

Bij de voorbereiding van de pilot is verkend in hoeverre Satelliet Radar Interferometrie (InSAR) kan worden gebruikt om de bodemdaling te volgen. Daarvoor is enkele malen contact geweest met Ramon Hansen van de TU-Delft om de mogelijkheden te verkennen om met deze radarbeelden zowel de seizoensgebonden als de meerjarige bodemdaling te volgen. Het beschikbare budget voor de pilot liet niet toe om deze data te ontsluiten, bewerken en te interpreteren. De digitale Bodemdalingskaart rapporteert op grond van InSAR-satellietmetingen een bodemdaling van ca. 2 mm/jaar in de omgeving van het onderzoekperceel (zie hoofdstuk 10.5.3). De methodologie voor het schatten van de maaiveldbeweging met deze veelbelovende technologie wordt verder ontwikkeld (Lit.20.). De resultaten tot 2022 zijn verwerkt in de digitale bodemkwaliteitskaart 2.0 van Nederland (Lit.21.).

11.4 Discussie

Voor het interpreteren van de maaiveldhoogte metingen zijn de nauwkeurigheid van de metingen en de veldomstandigheden van belang.

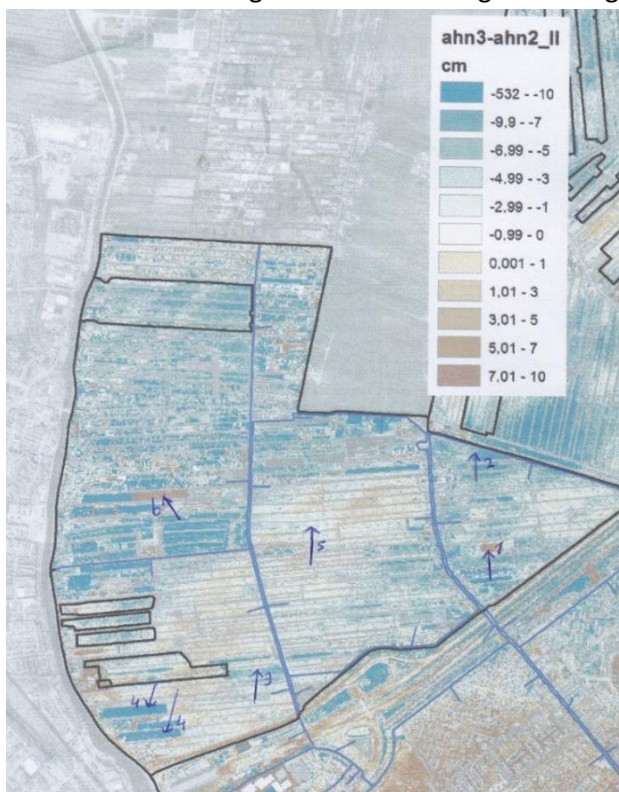
11.4.1 Nauwkeurigheid metingen

AHN-metingen

Voor de AHN-metingen wordt een nauwkeurigheid van +5/-5 cm aangegeven. Het is daarom begrijpelijk om de data terughoudend te gebruiken, in het bijzonder voor het veenweidegebied waar het veen kan krimpen en zwellen afhankelijk van de weers- en veldomstandigheden. Om de AHN-metingen verantwoord te kunnen vergelijken, zouden de metingen eigenlijk onder dezelfde omstandigheden moeten worden uitgevoerd. Daar kan wel naar worden gestreefd, maar ideale omstandigheden doen zich zelden voor. Dat geldt des te meer voor het veenweidegebied.

Wanneer wordt verondersteld dat veldomstandigheden gelijk zijn, hoeft alleen rekening gehouden te worden met de nauwkeurigheid van de metingen. Dan is het niet nodig om voor het verschil tussen de AHN-metingen een marge van 10 cm aan te houden en pas aandacht te besteden aan het verschil wanneer dit groter is dan 10 cm. Door het grote aantal metingen is het gerechtvaardigd om aan een geringer verschil ook aandacht te geven. Bij een AHN-meting worden gemiddeld 10 pixels per m² gemeten. Voor het proefperceel van ca 25.000 m², betekent dit dat er 250.000 data beschikbaar zijn. Dat is een omvangrijke dataset, ook wanneer wordt gewerkt met de gemiddelde waarde per m² is sprake van een omvangrijke dataset. Hoe groter een dataset is, des te meer kunnen geringe verschillen significant blijken te zijn. Aangenomen mag worden dat de verschillen tussen 2 metingen normaal verdeeld zijn. Dit maakt een vergelijking tussen AHN5 en AHN4 mogelijk en kan statisch worden getoetst of een eventueel verschil in de gemiddelde waarden significant is.

Ten tijde van de uitvoering van het project Weids Bloemendaal van 2014 tot 2018 heeft Rijnland een kaart gemaakt van de verschillen tussen AHN3 en AHN2. Deze kaart is weergegeven in figuur 5. Hierin zijn de hoogteverschillen met kleurschakering weergegeven in intervallen van 2 en 3 cm. Hoe blauwer, hoe meer daling. Hoe bruiner, hoe meer stijging. De kaart levert een interessant beeld op, dat evenwel zonder gebiedskennis niet goed te begrijpen is. Van alle percelen in Polder Bloemendaal



is gebiedskennis aanwezig. Met inbreng van deze kennis kan veel worden verklaard. Veel verschillen zijn ontstaan door verandering van het gebruik, zoals door de sanering van sierteelt- en glastuinbouwbedrijven en het omvormen naar weiland (pijl 4); ophoging met bagger (weilanddepot, pijl 1); uitgraven van een deel van een perceel en aanbrengen van de grond op ander deel van het perceel in het kader van de reconstructie van het sierteeltgebied, ten noorden van de Molenvliet (pijl 6); sterke daling door zetting na opbrengen grond voorafgaand aan de AHN2 meting (pijl 3); of door sterke onderbemaling (pijl 2). Het proefperceel is aangegeven met pijl 5. Op basis van de verschillen tussen AHN3 en AHN2 heeft Rijnland geconcludeerd dat de bodem in Polder Bloemendaal gemiddeld met 3 cm was gedaald. Daarop is besloten het polderpeil met 3 cm te verlagen, van -2,29 m naar -2,32 m NAP.

Figuur 5: AHN3-AHN2 beeld van Polder Bloemendaal. Indien in figuur 5 een marge van 10cm grijs zou zijn gemaakt, zoals in figuur 4, zou veel gebiedsinformatie niet aan het licht gekomen zijn.

Klassiek meten

Bij klassiek of traditioneel meten is de nauwkeurigheid groter dan bij het AHN meten. Klassiek meten m.b.v. een lazer vanaf een vast punt is gebruikelijk in de bouw en bij grond- en waterwerken. De drains zijn door Barth drainage met behulp van lazer op de gewenste diepte onder slootpeil gelegd. Aandachtspunt bij deze manier van meten is, in hoeverre het lukt om de metingen in de achtereenvolgende jaren op dezelfde plekken uit te voeren. Arie-Jan Broere heeft op 114 punten gemeten. Dat is voldoende groot voor het volgen van de veranderingen in de droogligging.

Satelliet Radar Interferometrie (InSAR)

Met data verkregen m.b.v. Interferometrische Synthetic Aperture (InSAR) kunnen bodembewegingen van enkele mm's worden gedetecteerd. Dit biedt de mogelijkheid om de jaarlijks bodembeweging en de langjarige bodemdaling te monitoren en de effectiviteit van bodemdalingsbeperkende maatregelen te beoordelen (Lit.20.).

11.4.2 Veldomstandigheden metingen

Om de voortgaande bodemdaling in het veenweidegebied te kunnen volgen is het verstandig om metingen in de verschillende jaren zoveel mogelijk onder dezelfde veldomstandigheden uit te voeren. Voor veenweide percelen is begin van het voorjaar daarvoor de beste periode. Na de winter is de veenbodem doorgaans verzadigd met water en daardoor maximaal gezwollen. Bovendien is het gras kort door begrazing met schapen en/of door vraat van met name van ganzen en smienten. De AHN4 en AHN5 metingen op 7 en 2 april zijn daarmee in lijn. Aanvullend kunnen ook neerslag gegevens van de KNMI-weerstations uit de regio worden gebruikt om informatie over de veldomstandigheden af te leiden.

Ook voor de klassieke metingen is het voorjaar een goed moment. De bovengrond is dan doorgaans voldoende opgedroogd om het veld te kunnen belopen en het baken zonder indrukking op het maaiveld te plaatsen. Aanvullend kunnen grondwaterstanden indien beschikbaar worden betrokken bij de keuze van het moment van meten. Bij de aanleg van onderwaterdrainage is het gebruikelijk om ook de grondwaterstand in het veld te meten. Voor de pilot zijn de grondwaterstanden op het moment van meten geregistreerd. Deze zijn weergegeven in Tabel 7.

	19-04-2022	29-04-2023	20-04-2024
gedraineerd	-2,39	-2,30	-2,27
referentie	-2,42	-2,21	-2,16

Tabel 7: grondwaterstanden in meters min NAP op de datums van de maaiveldmetingen.

In Tabel 7 zijn de grondwaterstanden van de middenstrook en de randstrook samengenomen en gemiddeld. In 2022 waren de grondwaterstanden lager dan in 2023 en 2024. Op 19 april 2022 was de infiltratie nog niet gestart. Dit verklaart waarom op het gedraineerde deel de grondwaterstand lager is dan het slootpeil/polderpeil (-2,32 m NAP) en verklaart ook het geringe verschil met de referentie. In 2023 werd in de dagen voorafgaand aan 29 april geïnfiltreerd en in 2024 in de dagen voorafgaand aan 20 april gedraineerd. Dit verklaart waarom grondwaterstanden op het gedraineerde deel in 2023 en 2024 nabij het polderpeil liggen. In 2023 en 2024 waren door de vele regen in winter en voorjaar de grondwaterstanden op de referentie hoger dan het polderpeil. Dat geldt in het bijzonder voor het extreem natte voorjaar in 2024.

Aannemende dat daling van de grondwaterstand tot daling van het maaiveld leidt, mag worden verwacht dat vanaf half april 2022 het maaiveld al op 19 april al wat gedaald zal zijn geweest. Dit betekent dat de maaiveld daling tussen april 2022 en april 2024 mogelijk groter is geweest, dan in Tabel 4 is weergegeven. Aannemende dat stijging van de grondwaterstand tot verhoging van het maaiveld leidt, is het opmerkelijk dat de stijging van het grondwater in de winter en voorjaar 2023 niet heeft geleid tot stijging van het maaiveld tussen april 2022 en april 2023 (tabel 5). Mogelijk dat het effect van de extreme droogte in 2022 nog heeft doorgewerkt tot in het voorjaar van 2023 en pas is weggenomen in 2024 na de extreem natte winter en voorjaar 2024. In die periode was de bodem doorweekt met langdurige plasvorming op het perceel, zowel op de referentie als op het gedraineerde deel.

Opmerkelijk is dat het maaiveld tussen april 2022 en april 2023 meer was gedaald op het gedraineerde deel dan op de referentie (Tabel 5). Dit is niet te verklaren uit de grondwaterstanden.

De grondwaterstand is immers op het gedraineerde deel door infiltratie nagenoeg op slootpeil/polderpeil gebleven, terwijl deze op de referentie aanzienlijk gedaald was. Opmerkelijk is dat de daling na de extreem natte winter van 2023 en voorjaar 2024 weer is weggenomen en dat het meer is weggenomen op het gedraineerde deel dan op de referentie (Tabel 6). Per saldo over 2 jaar gemeten levert het een resultaat op dat past bij de verwachting.

Dit kan ook evenwel ook toeval zijn, veroorzaakt door andere veldomstandigheden voor en tijdens de metingen in de verschillende jaren. In de zomer voorafgaand aan de metingen kan de bovengrond onder natte omstandigheden bij de grasoogst zijn verdicht en in winter kan de bovengrond in meer of mindere mate zijn opgevroren. Verder kunnen de slootwaterstand en de grasconditie op het moment van meten verschillend zijn geweest. Het slootpeil wordt door Rijnland gehandhaafd op polderpeil (-2,32 m NAP) met een marge van +/- 2 cm. De grascondities en daarmee de basis voor het maaiveld wordt bepaald door de weersomstandigheden in winter, zoals begrazing door schapen en vraat van ganzen. Deze veldomstandigheden zullen de resultaten beïnvloeden hebben. De mate waarin is onduidelijk. Dit vraagt om terughoudendheid bij het interpreteren van de resultaten.

Conclusie

Bodemdaling van veengronden is een relatief langzaam proces. Grondwaterbeheer is een maatregel om bodemdaling te beperken. Om de effectiviteit van het grondwaterbeheer te kunnen vaststellen is een langjarige monitoring noodzakelijk. (Lit. 22). Het programma voor de Regio Deal bodemdaling Groene Hart had een beperkte looptijd en daarmee ook de pilot. Dat is te kort om de dalende trend in bodemdaling en de effectiviteit van de maatregelen voldoende zichtbaar te maken en eenduidige conclusies te trekken.

Aanbevelingen

Na afronding van de pilot, zal het beheer van het systeem worden overgedragen aan Niels de Jong. Aangeraden wordt na de overdracht de monitoring van de bodemdaling voort te zetten, om te kunnen beoordelen in hoeverre door infiltratie verdere bodemdaling wordt beperkt.

Om een goede basis te leggen wordt aangeraden Arie-Jan Broere te vragen in april 2025 een 4^{de} meting te doen en deze op dezelfde wijze uit te voeren als de eerdere metingen en daarbij de meetpunten voor derden terug vindbaar vast te leggen.

Aan Niels is toegezegd om na afronding van de pilot de referentie te draineren en de drains aan te sluiten op het in 2021 aangelegde drainagesysteem. Aannemende dat dit in 2025 wordt uitgevoerd wordt aanbevolen de bodemdaling van het perceel te volgen met Satelliet Radar Interferometrie (InSAR) en met AHN-metingen. Door reflecterende plaatjes op de 114 meetpunten van Arie-Jan te leggen kunnen de metingen op deze plekken worden gedaan om een trendreeks op te bouwen. De Satelliet Radar metingen worden automatisch wekelijks gemaakt en de AHN-metingen worden met een meerjarige frequentie uitgevoerd. Door de volgende AHN-metingen ook begin april te laten uitvoeren is de kans op vergelijkbare veldomstandigheden bij het meten groot. Door aan te sluiten bij de frequentie van de AHN-metingen en op die momenten reflecterende plaatjes neer te leggen kan tegelijkertijd ook een Satelliet Radar meting worden benut en eventueel ook een klassieke meting worden gedaan. Door na de meting de plaatjes weg te halen en op te slaan wordt het weilandbeheer niet belemmerd en kunnen de plaatjes bij een volgende meting weer worden gebruikt.

12 Onderhoud en beheer

Een veenweide veehouder heeft veel hectares met enorm veel meters aan slootkant.

Deze vragen aandacht en onderhoud. Het onderhoud wordt door een veehouder op zo extensief mogelijke wijze in gevuld.

Om zo dicht mogelijk bij de praktijk te blijven is de insteek geweest zo extensief mogelijk onderhoud te plegen.

12.1 Monitoringssysteem en meetplekken

De 6 plekken voor het monitoren van de bodemparameters waren gedurende de pilot omheind ter bescherming van de apparatuur tegen schapen en maaaien (*zie foto in hoofdstuk 9.2.2*). Om ervoor te zorgen dat de veldomstandigheden op de meetplekken vergelijkbaar bleven met de omgeving en de energievoorziening voor de registratie met zonnepaneeltjes gewaarborgd bleef, is het gras op de meetplekken na de eerste en tweede grassnede geknipt en verwijderd. Door de vele kabeltjes en door het bijplaatsen van apparatuur om op enkele plekken de jaarlijkse bodembeweging te volgen, was het knippen van het gras een aandacht vragende opgave. De 2 infiltratieputten waren niet omheind. Beweiding met schapen heeft geen problemen gegeven. Het gras rond de infiltratieputten is na de grassnede met een boschmaaier gemaakt, om de putten voldoende zichtbaar te houden.

12.2 Infiltratie- en drainagesysteem

Bij het realiseren van het project is er enorme druk op de leveranciers gezet om te leveren. De juiste componenten waren niet leverbaar. Onder druk van het project is er voor een alternatief gekozen waar we achteraf niet gelukkig mee zijn. Door veel eiken en her-eiken is het einde van het project gehaald.

De kleppen om het midden en rand systeem te besturen zijn gedurende het project vervangen voor een ander model. Nog steeds op solar energie gestuurd 100% off grid.

1^e instantie is er met een pneumatisch gestuurde schuif afsluiter gewerkt, bij de modificatie is er naar een verlengde vlindermotorklep omgeschakeld.

De in en uittrede van het drainagesysteem is gerealiseerd met een geperforeerde buis. Op zich een prima keuze er zijn geen kreeften in het systeem gekomen. Nadeel is dat je ze jaarlijks aan de binnen en buitenkant grondig moet reinigen om geen belemmering voor de doorgang van het water te hebben.

12.3 Energiesysteem

Op de hoogste delen van de solar panelen zijn vogel werende voorzieningen aangebracht. Deze doen goed zijn werk. Wat niet wegneemt dat er regelmatig vogelpoep op de panelen terecht kwam door overvliegende vogels, met name van ganzen. De regen loste dit veelal op. Om een voldoende winterzon te ontvangen op de panelen waren ze in een hoek geplaatst van 50° wat gunstig is voor het schoon regenen. De verankering van de energiesystemen vraagt periodiek aandacht. Je wilt vanwege het perceel onderhoud van de perceelslootkanten zo minimaal mogelijk verbinding hebben met de perceelslootkant. De borging van het systeem moet dan ook plaatsvinden op het energieproductie systeem. Achteraf hebben we geconcludeerd dat we hier meer budget voor hadden moeten reserveren. Het is nu goed gegaan maar had beter gekund.

12.4 Weilandbeheer

In het najaar en winter voorafgaand aan de proef is het weiland beweid geweest door schapen. Mede door vraat van ganzen en smienten, was na de natte herfst en winter bij de start van de proef in het voorjaar van 2022 nog maar weinig gras aanwezig, zie foto 1.



Foto 1: Graslandvegetatie middenstrook 31 januari 2022, Op het gedraineerde perceel achter zijn mollenritten zichtbaar, zie ook foto in hoofdstuk 6.2.

Het perceel is in 2022, 2023 en 2024 tweemaal gemaaid. Vanwege het weidevogelbroedseizoen en de daarop gebaseerde beheerovereenkomst mag het perceel pas na 8 juni worden gemaaid. In 2022 is het perceel op 11 juni en 30 augustus gemaaid en in 2023 op 14 juni en 6 september. In de dagen daarna werd het gras geschud en gewierst en vervolgens gebaald. Doorgaans werden de balen binnen een week opgehaald. Tijdens het maaien en het ophalen van de balen



heeft het infiltratiesysteem open gestaan en stond het grondwater in het gedraineerde deel van het perceel dicht onder het slootpeil. Bij een droogligging van 20 tot 30 cm in de middenstrook van het perceel is dit een kwetsbare situatie. Ondanks deze hoge grondwaterstand was er na de oogst geen insporing en bodemverdichting zichtbaar (zie foto 2).

Foto 2: Proefperceel na grasoogst 7 september 2002.

Dat veenweidepercelen kwetsbaar zijn onder natte omstandigheden is gebleken in 2024. Na de extreem natte herfst, winter en voorjaar bleven de koeien lang op stal en werd de eerste grassnede uitgesteld vanwege de drassige bodem. Daar waar wel werd gemaaid leidde dit op meerdere percelen in het westelijk veenweidegebied tot insporing, structuurschade en bodemverdichting. Onder andere op het perceel grenzend aan de noordzijde het proefperceel (zie foto 3 links). Dit perceel heeft een vergelijkbare droogligging als het proefperceel (zie AHN-beelden in hoofdstuk 4 en 11.2.). De insporing en verdichting ontstonden bij het ophalen van het gras. Op een ander vergelijkbaar perceel aan de Bloemendaalseweg ontstond de insporing en structuurschade al bij het maaien en wiersen van het gras (zie foto 4 rechts).



Foto 3: Links (24 juni 2024): Insporing en verdichting na grasoogst aangrenzend perceel. Gras gemaaid op 22 juni en opgehaald op 24 juni 2024. Foto 4: Rechts (21 juli 2024): insporing en verdichting na maaien en wiersen op 20 juli 2024 op perceel andere zijde bloemendaalseweg.

Op het proefperceel is in 2024 niet direct na 8 juni gemaaid. Niels de Jong laat het gras maaien door Dave van Zanten. Dave, ook veehouder, verzorgt de grasoogsten ook bij andere veehouders in het westelijk veenweidegebied. Afhankelijk van hoe het groeiseizoen verloopt en de beheerovereenkomsten, plant hij zijn werkzaamheden. In 2022 en 2023 is voor het maaien geen rekening gehouden met het infiltratiesysteem. Dit is goed uitpakkt. Het oogsten tijdens infiltratie leidde niet tot insporing en ogenschijnlijk ook niet tot bodemverdichting (foto 2).

Voor 2024 is hiervoor zover mogelijk wel rekening mee gehouden. Vanwege de drassige weilanden is het maaien uitgesteld en heeft Dave voorrang gegeven aan het oogsten van het gras op andere percelen in het veenweidegebied met een gunstiger droogligging. Uiteindelijk is het proefperceel pas op 17 juli gemaaid, maar ook toen waren de veldomstandigheden nog niet goed. Op dat moment stond het grondwater nog boven slootpeil (referentie -2.22 m NAP; drainerende deel - 2,24m NAP), stond er water in de greppel en waren op de laagste delen nog plasresten aanwezig.

Door onder deze ongunstige omstandigheden vakkundig te maaien en door slim vanuit de meest kwetsbare middenstrook naar de randstroken te wiersen en daar te balen, kon insporing worden voorkomen en bodemverdichting ogenschijnlijk worden beperkt (zie foto 5). Op de meest kwetsbare plekken zijn de rijsporen echter wel zichtbaar, terwijl deze in 2022 en 2023 nagenoeg niet zichtbaar waren. Het ophalen van de balen, wat het meest risicovol is voor insporing en bodemverdichting, moest op dat moment nog plaatsvinden. De tweede snede is in 2024 op 20 september gemaaid. Ook toen waren de veldomstandigheden niet gunstig doordat de grondwaterstanden nabij het slootpeil waren. Anders dan 2022 en 2023 ontwikkelde zich tot eind juli geen neerslagtekort (zie hoofdstuk 9.3.1, figuur 4) Op 1 oktober sloot 2024 af met een neerslagoverschot van 25 mm.



Foto 5: Grasoogst proefperceel 20 juli 2024. Gras is gebaald. Foto is genomen op de referentie bij het meetpunt in de middenstrook (refplasdras 02, zie hoofdstuk 9.2.2). De is de meest kwetsbare plek van het perceel. De grondwaterstand stond hier op 20 juli op -2,30 m NAP. Dit is 21 cm onder maaiveld.

Weilandbeheer in relatie tot het schuifbeheer.

Veenweidepercelen zijn onder natte omstandigheden kwetsbaar voor insporing en bodemverdichting. Omdat door infiltratie de bodem ook bij droogte vochtig blijft, zijn weilanden met een infiltratiesysteem ook bij droogte kwetsbaar. Om dit risico te beperken kan overwogen worden om enkele dagen voor het maaien de schuiven dicht te zetten en dicht te houden tot na het ophalen van het gras, hetzij als los gras om in te kuilen, of in de vorm van balen. Na dichtzetten van de schuiven zal bij droog weer het grondwater dalen en daarmee ook de draagkracht verbeteren. In 2022 en 2023 zijn de schuiven niet dicht gezet, maar pakte het goed uit. In 2024 had het geen zin om de schuiven dicht te zetten, omdat het neerslagoverschot op het gedraineerde deel nog via de drains uitstroomde en op de referentie via de greppel.

12.5 Schuifbeheer

In hoofdstuk 4.2 is beschreven waarom in de pilot is gekozen voor het schuifinfiltratie en drainage systeem en niet voor passieve drainage en drukdrainage. Wanneer bij droogte het grondwater te ver daalt onder het slootpeil, wordt water ingelaten en bij te veel regen wordt water afgevoerd om plasvorming te voorkomen. Dit gaat onder vrij verval, dus zonder tussenkomst van een pomp, met op afstand bestuurbare schuiven. Dit roept de vraag op hoe dit uit te voeren. Welke indicatoren worden gekozen en welke grenswaarden worden daarbij afgesproken. In het 2022 is dit verkend en in 2023 en 2024 is daarmee ervaring opgedaan.

12.5.1 Indicatoren en grenswaarden

Doel is om veenaafbraak zoveel mogelijk te voorkomen. Dan is het van belang om bij aanhoudende droogte te voorkomen dat het grondwater daalt tot in het nog onveraaarde veen. Op basis van de profielbeschrijving begint het onveraaarde veen onder het toemaakdek. Dit dek reikt tot ca 40 á 45 cm diepte (zie hoofdstuk 8.2.) en is over het gehele perceel in vergelijkbare dikte aanwezig (zie hoofdstuk 4.). Vanwege de holle ligging van het perceel ligt in de middenstrook de ondergrens van het toemaakdek onder het polderpeil (-2,32 m NAP), maar in de randstroken erboven, met name in de randen hiervan. Het gesegmenteerde infiltratiesysteem biedt de mogelijkheid om de middenstrook en randstroken apart te infiltreren.

Om te voorkomen dat er bij aanhoudende regen plassen worden gevormd, dient tijdig te worden overgeschakeld op de drainerende functie van het systeem. Vanwege de holle ligging (zie AHN-profiel in hoofdstuk 4), kan bij extreme regenval en mede door run-off plasvorming in de middenstrook ontstaan. Het gesegmenteerde drainagesysteem biedt de mogelijkheid om middenstrook en randstroken apart te draineren.

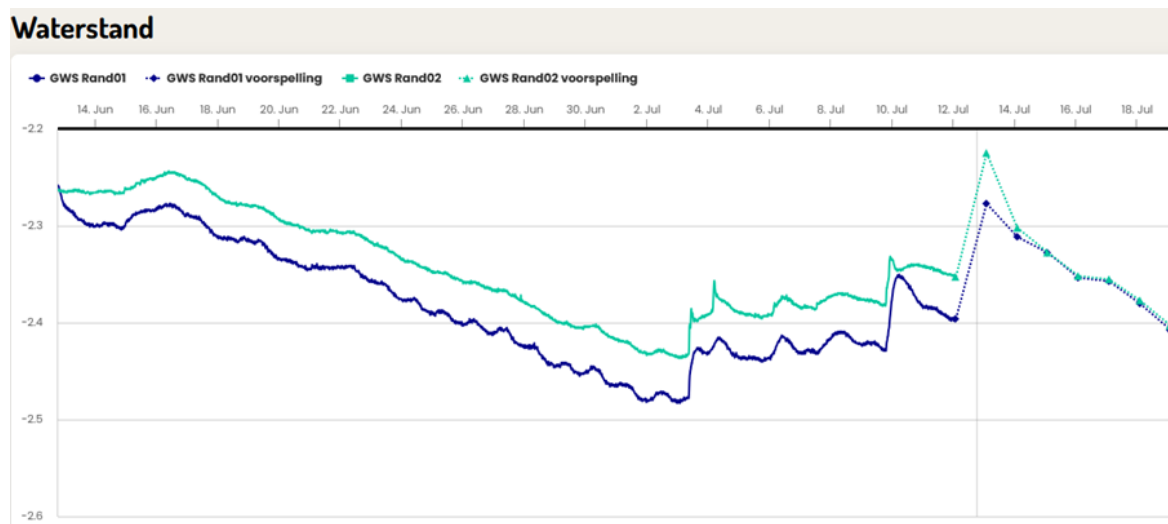
Verder is het van belang om zuinig om te gaan met water. Dus pas infiltreren wanneer dit bij aanhoudende droogte nodig is en pas draineren wanneer na regenval plassen blijven staan. Droge periodes in de zomer kunnen worden onderbroken door regenbuien. Stijgt het grondwater dan boven het slootpeil, zal de infiltratie omslaan naar drainage. Wanneer daarna de droogte door zet, had de uitstroom van het water kunnen worden voorkomen door de schuiven dicht te zetten. Door dit water te sparen hoeft bij aanhoudende droogte minder snel water te worden ingelaten. Dit vraagt om een slim actief grondwaterbeheer. Als indicatoren hiervoor zijn gekozen: 1) *het verloop van de grondwaterstand*; 2) *de omslag van infiltratie naar drainage*; 3) *plaspvorming* en 4) *de weersverwachting*. Voor elke indicator is aangegeven hoe deze wordt gesignaleerd en welke grenswaarden of beoordelingscriteria zijn bedacht om te kunnen beslissen wanneer de schuiven worden open of dicht gezet voor infiltratie dan wel voor drainage. Voor de middenstrook en de randstroken is dit weergegeven in onderstaande tabel. Aanleiding om onderscheid te maken tussen beide stroken komt voort uit de holle ligging van het perceel in combinatie met het gegeven dat het toemaakdek over het gehele perceel voorkomt in ongeveer dezelfde dikte.

		Middenstrook	Randstrook	Signalering
Infiltratie	Start	Schuif openen bij daling grondwaterstand tot onder 15 cm onder slootpeil en drogend weer wordt verwacht	Schuif openen bij daling grondwaterstand tot onder 5 cm onder slootpeil en drogend weer wordt verwacht	Dashboard Acaciawater
	Stop	Schuif dicht zetten bij start uitstroom	Schuif dicht zetten bij start uitstroom	Dashboard Broere- Irrigatie
Drainage	Start	Schuif openen wanneer plassen enkele dagen blijven staan en meer regen wordt verwacht	Schuif openen wanneer grondwaterstand stijgt tot 20 cm boven slootpeil en meer regen wordt verwacht	Veld Dashboard Acaciawater
	Stop	Schuif dicht zetten wanneer plassen zijn verdwenen en grondwaterstand gedaald is tot onder 5 cm boven slootpeil en drogend weer wordt verwacht	Schuif dicht zetten wanneer grondwaterstand gedaald is tot onder 10 cm boven slootpeil en drogend weer wordt verwacht	Veld Dashboard Acaciawater

Tabel 1: voorlopige indicatoren met grenswaarden voor het schuifbeheer en wijze van signaleren voor middenstrook en randstrook, juli 2023. Slooppeil is verondersteld gelijk te zijn aan polderpeil (-2,32 m NAP)

Grondwaterstand

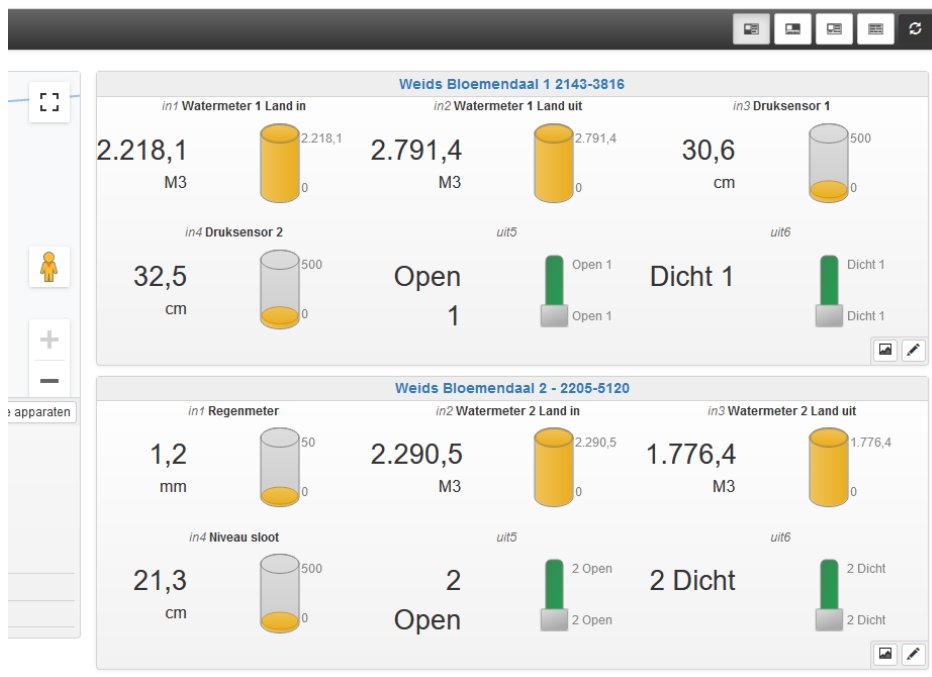
Het verloop van de grondwaterstanden kon worden gevolgd met het dashboard van Acaciawater dat gebruik maakte van Fixeau. Dit geeft inzicht in het verloop van de grondwaterstanden op de 6 meetpunten vanaf de start van de metingen en maakt het mogelijk uitsneden te maken van de laatste maand, laatste week en laatste dag. Bovendien geeft het een voorspelling voor de komende dagen op basis van de weersverwachting. Als voorbeeld zijn de grondwaterstanden op de 2 meetpunten in de randstrook in figuur 1 weergegeven. De verschillen tussen de meetpunten zijn gering en systematisch. Op 50 meter zijn ze 3 tot 5 cm hoger dan op 150 m afstand van het infiltratiepunt. Voor de middenstrook is er ook een gering systematisch verschil, maar dan omgekeerd, dan zijn de grondwaterstanden op 50 m enkele cm lager dan op 150 m afstand van het infiltratiepunt. Doordat de dashboard weergave op 150 m in de middenstrook niet meer functioneerde in 2024, is dit niet grafisch weergegeven. Voor het schuifbeheer is als criterium gebruikt dat op beide meetpunten binnen de strook aan de grenswaarde moet worden voldaan. Voor de middenstrook kon vanwege het systematische verschil het meetpunt op 50 m daarin voorzien.



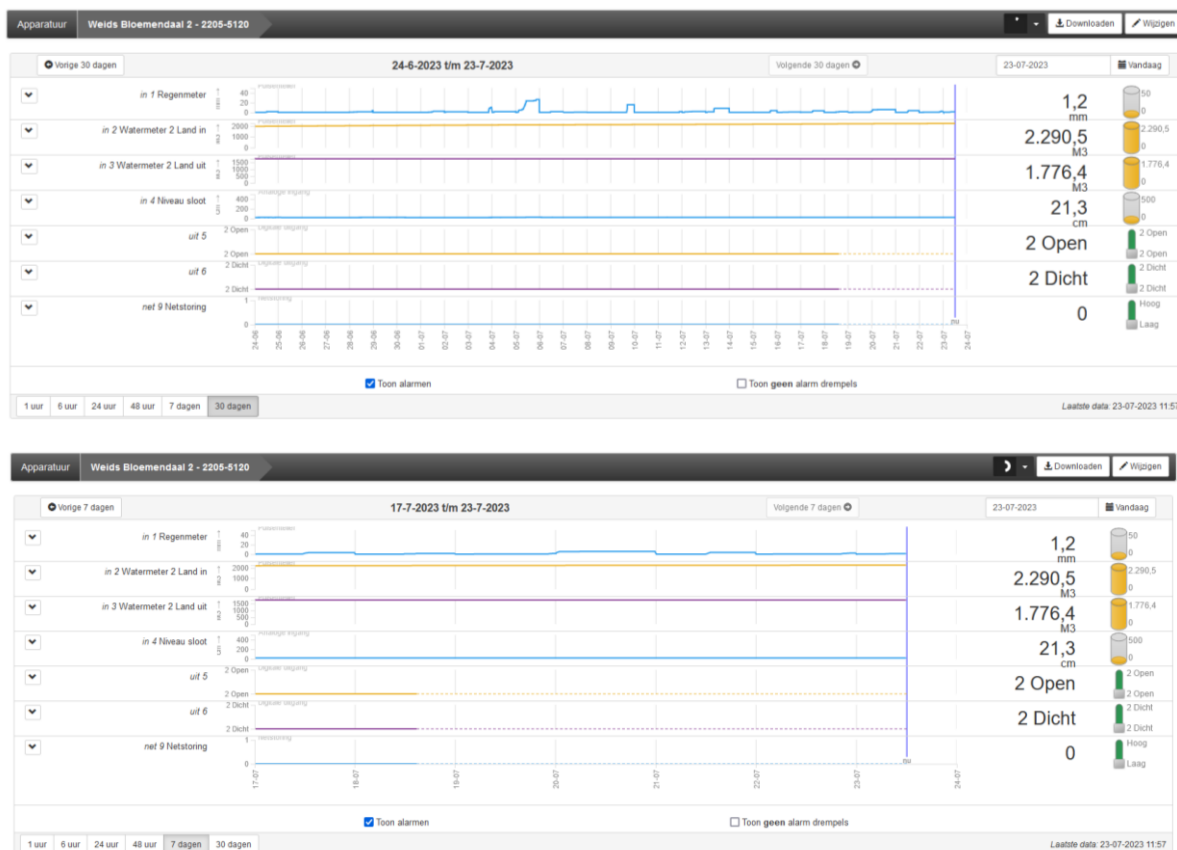
Figuur 1: Verloop grondwaterstanden in de randstrook van het gedraineerde deel van 14 juni tot 12 juli 2024 in m-NAP. Rand01 en Rand02 liggen respectievelijk op 150 en 50 m van het infiltratiepunt. Schuif heeft van 24 juni tot 12 juli dicht gestaan om onnodige infiltratie te voorkomen, waardoor de bovengrond kon 'droog groeien'.

Omslag van infiltratie naar drainage

Wanneer de schuiven openstaan voor infiltratie en er een regenbui valt, kan de grondwaterstand die al hoog staat door de infiltratie stijgen tot boven het slootpeil. Bij een grote bui zal dit tot uitstroom van water leiden. Dit is onnodig wanneer de droogte daarna voortzet. Het is dan zinvol om de schuiven dicht te zetten om zo water te sparen. Inzicht in de putwaterstanden en slootwaterstand of inzicht in de in- en uitstroom kan gebruikt worden om dit omslagmoment te herkennen en daarop te handelen. Broere-irrigatie maakt gebruik van het dashboard van meetcentrale.nl. Dit geeft voor het proefveld de volgende informatie.



Data meetcentrale.nl 23 juli 2023



Data meetcentrale.nl 23 juli 2023: boven 30 dagen, daaronder 1 week

In deze figuren zijn de putwaterstanden en het verloop daarin echter niet zichtbaar. Bovendien is het niet duidelijk of schuiven open of dicht staan en of er water in- of uitstroomt. Ook ontbreekt inzicht in de slootwaterstanden.

Doordat het dashboard dit inzicht niet bood, is verondersteld dat bij openstaande schuiven water zal uitstromen wanneer de grondwaterstand boven polderpeil staat en instromen wanneer de grondwaterstand eronder staat. Het polderpeil is -2,32m NAP en wordt door het Hoogheemraadschap van Rijnland gehandhaafd met een marge van + 2 en - 2 cm. Onder normale omstandigheden is het slootpeil ongeveer gelijk aan het polderpeil, maar na een extreme regenbui stijgen deze tijdelijk substantieel, door toestroom van water uit het verstedelijkte Goudse deel van Polder Bloemendaal. Het Waddinxveense landelijk deel van Polder Bloemendaal heeft een polderpeil dat 10 cm lager is dan het Goudse deel. Bij extreme regenval worden de stuwen tussen beide delen gestreken om het water uit het Goudse deel snel via het Waddinxveense deel door te voeren naar het poldergemeel aan de Gouwe in het Waddinxveense deel van de polder.

Plasvorming

Op hol liggende weilanden ontstaan na een intense regenbui gemakkelijk plassen. Bij aanhoudende regen zullen plassen langer blijven staan en tot schade en opbrengstderving leiden. In Polder Bloemendaal wordt dit verstrekt door ganzen, zwanen en smienten, die onder het grazen bovendien de bodem dichtlopen en doen verslempen. Ook meeuwen worden aangetrokken door het makkelijk bereikbare bodemleven (voedsel) op de drassige weilanden en dragen door de grote aantallen in de winter bij aan het dichtlopen en verslempen van de bodem met inbegrip van de bodem van de greppel.

Weersverwachting

Het betrekken van de weersverwachting is logisch en vanzelfsprekend. Het heeft immers geen zin om bij droogte de schuiven open te zetten voor infiltratie, wanneer regen wordt verwacht. Evenzo heeft het geen zin om na een natte winter in het voorjaar de schuiven dicht te zetten om verdere uitstroom van water te voorkomen, wanneer regen wordt verwacht.

12.5.2 Ervaringen

Grondwaterstand in relatie tot infiltratie

De grondwaterstanden zijn sinds 30 maart 2022 gemeten. Na de droogte in maart waren de grondwaterstanden laag ca -2,50m NAP en op het nog weinig begroeide oppervlak was sprake van beginnende korst- en scheurvorming. Na de regenval begin april stegen de grondwaterstanden tot ca - 2,15 m NAP op 7 april. Daarna zette opnieuw een droge periode in en daalden de grondwaterstanden. Bij de start van de infiltratie op 5 mei waren ze gedaald tot ca -2,60 m NAP. Op basis van de grenswaarden in Tabel 1 had de infiltratie eerder en ook al in maart kunnen starten. Voor de middenstrook is de grenswaarde 15 cm onder slootpeil (-2,47 m-NAP) en voor de randstrook 5 cm onder slootpeil (-2,37 m NAP). De vergaande daling vormde ook een risico voor het infiltratiesysteem. De drains zijn in de randstroken en middenstrook gelegd op dieptes van respectievelijk 40 en 30 cm onder slootpeil (-2,32m NAP). Op basis hiervan mag worden verwacht dat de drains nog net niet waren drooggefallen en de infiltratie nog net op tijd was gestart om luchtvorming in de drains te voorkomen. Dit had tot stagnatie van de infiltratie kunnen leiden. Dit is blijkbaar niet gebeurd. Al binnen enkele dagen waren de grondwaterstanden gestegen tot ca -2,36 m NAP en gedurende de droogtes in 2022 en 2023 lukte het om de grondwaterstand stabiel te houden op ca 3 tot 5 cm onder het slootpeil. Dit betekent dat de infiltratiecapaciteit voldoende is geweest om de verdamping te compenseren (zie hoofdstuk 9).

Na de start van de infiltratie is de korst- en scheurvorming niet verder doorgedaan, maar ook niet verdwenen zoals zichtbaar op onderstaande foto's een week na de start van de infiltratie en stijging van het grondwater tot aan het slootpeil. Dit wijst erop dat in de uitgedroogde bovengrond de capillaire werking te beperkt was om deze weer vochtig te maken. Wanneer de infiltratie eerder had

kunnen starten, was deze situatie mogelijk niet ontstaan. Tijdens de droogte in 2022 hebben de schuiven open gestaan, behoudens in de laatste week van juli, waardoor de grondwaterstanden weer daalden. Dit keer tot een diepte van ca - 2,55 m NAP.



Foto 6: Korst- en scheurvorming in de middenstrook van het gedraineerde perceel 12 mei 2022. Door de onvolledige grasbedekking is het bodemoppervlak gevoelig voor uitdroging en scheurvorming. 7 dagen na de start van de infiltratie op 5 mei waren de droge korst en de ondiepe scheuren nog aanwezig.

Grondwaterstand in relatie tot drainage en plaspvorming

De droogte in 2022 werd enkele malen onderbroken door regenbuien. Door de hoge grondwaterstand vanwege de infiltratie, steeg na sommige regenbuien het grondwater tot boven het slootpeil en is regenwater tijdelijk uitgestroomd. De droogte heeft geduurd tot in september. Door de vele regen tussen 26 en 28 september (ca 55 mm), waaronder op 28 september een wolkbreuk met een spectaculaire windval met slagregens en hagel zijn de eerste ervaringen opgedaan met de drainagecapaciteit van het systeem. Na deze intense bui stond de middenstrook over het gehele perceel blank. Op de dag erna laten de foto's zien dat de greppel nog volstaat met water zowel op de referentie (Foto 7a), als ook op het gedraineerde deel (Foto 8a). Op de referentie was het water na 2 dagen verdwenen (Foto 7b). Een deel was uitgestroomd via de greppel en een ander deel was via de scheuren weggezakt en heeft op de referentie geleid tot een sterke stijging van de grondwaterstand (zie figuur 14 in hoofdstuk 9.3.2.3.). Op het gedraineerde deel, waar de greppel ten behoeve van de pilot was afgesloten, was na 2 dagen nog maar een deel van water in de greppel en in de plassen in de bodem weggezakt (Foto 8b). Pas na 7 dagen was de greppel drooggevallen (Foto 9a), maar resteerde naast de greppel nog een kleine plas (foto 9b).



*Foto 7: Wateroverlast op referentie na wolkbreuk op 28 september 2022.
Foto 7a: links 1 dag na wolkbreuk. Foto 7b: rechts 2 dagen na wolkbreuk.*



Foto 8: Wateroverlast op gedraineerd deel na wolkbreuk op 28 september 2022.

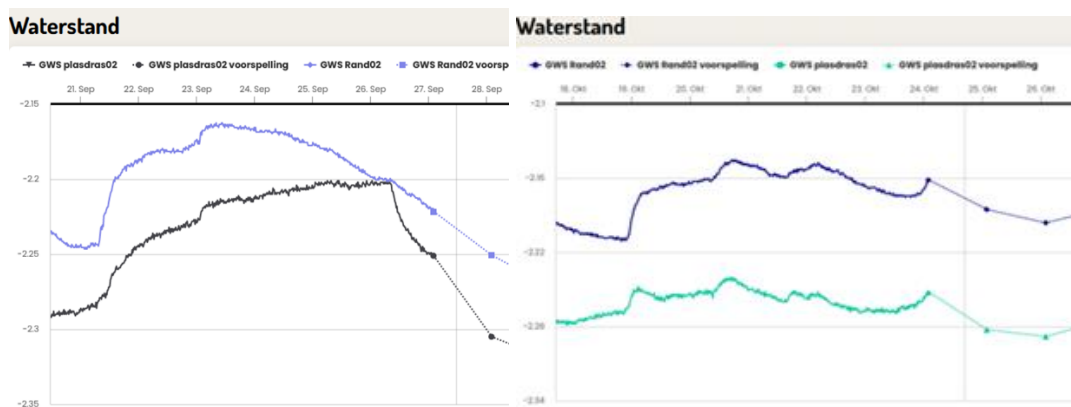
Foto 8a: links 1 dag na wolkbreuk. Foto 8b: rechts 2 dagen na wolkbreuk.



Foto 9: Wateroverlast op gedraineerd perceel na wolkbreuk op 28 september 2022

Foto 9a: links 7 dagen na wolkbreuk in greppel. Foto 9b: rechts 7 dagen na wolkbreuk naast greppel.

In 2023 viel er in augustus voldoende regen om de infiltratie te beëindigen. De schuiven zijn dicht gezet op 11 augustus. In september viel er zoveel regen dat op basis van Tabel 1 besloten werd om de schuif voor de middenstrook op 26 september open te zetten. De grondwaterstand in de middenstrook daalde daarop direct, zoals te zien is aan de knik in de zwarte lijn in de figuur 2a. In 1 dag daalde de grondwaterstand met 5 cm van -2,20 naar -2,25 m NAP. De blauwe lijn geeft de grondwaterstand in de randstrook weer. Op 21 oktober is ook de schuif voor de randstroken opengezet. Dit resulteerde niet in een duidelijke knik in de blauwe lijn (figuur 2b). De grondwaterstand daalde met slechts 1 cm van -2,15 naar -2,16 m NAP. Na putinspectie bleek dat de uitstroom vanuit de put naar de sloot verminderd was.



Figuur 2: Verloop grondwaterstanden in middenstrook en randstrook.

*Figuur 2a: Links van 21 tot 27 september 2023
Zwart middenstrook, blauw randstrook.*

*Figuur 2b: Rechts van 18 oktober tot 24 oktober 2023.
groen middenstrook, blauw randstrook.*

Nadat de beide schuiven waren opengezet zijn de grondwaterstanden na september 2023 tot in het voorjaar 2024 hoog gebleven en hebben regelmatig lang plassen gestaan in de middenstrook, waarbij soms ook de meetplek plasdras 01 in het water heeft gestaan, zoals zichtbaar is op foto 10.



Foto 10: Plasvorming in middenstrook gedraineerd deel perceel 23 oktober 2023.

Het verschijnsel dat de greppel en de plassen naast de greppel langzaam droogvallen, manifesteerde zich in het najaar 2023 sterker dan in het najaar van 2022. Op 12 oktober 2023 viel er een extreme

regenbui. Sindsdien is er tot in het voorjaar 2024 extreem veel regen gevallen. Na vrijwel elke bui raakte de greppel vol water en ontstonden er plassen naast de greppel, die langdurig bleven staan. Onderstaande foto's 11a en 11b van 27 april 2024 laten zien dat bij extreem natte weersomstandigheden de drainage beperkend is geweest voor een voldoende vlotte afvoer van het overtollige regenwater.



Foto 11: Plassen op gedraineerd perceel in middenstrook 27 april 2024.

Foto 11a: links minder langdurend. Foto 11b: rechts langdurend met grasschade tot gevolg.

De onvoldoende afvoer kan meerdere oorzaken hebben; 1) *verminderde doorlatendheid van de bovengrond*; 2) *verminderde instroom vanuit de drains naar de drainageputten*; 3) *onvoldoende functioneren van de schuiven* en 4) *verminderde uitstroom vanuit de putten naar de sloot*.

Verminderde doorlatendheid bovengrond

De verminderde doorlatendheid van de bovengrond is zeker een belangrijke oorzaak. Plassen in combinatie met een grondwaterstand die lager is dan het maaiveld (schijngrondwaterspiegel), duiden op verdichting /verslumping van de toplaag van de bodem. Op foto 10 is meetpunt plasdras01 zichtbaar. Op 23 oktober 2023 stond het grondwater op dit punt op -2,25 m NAP. Dit is 16 cm -maaiveld (maaiveldhoogte is -2,25 m NAP (Appendix 1 hoofdstuk 6). In hoeverre de andere oorzaken mede van belang zijn kan beoordeeld worden door het verloop van de putwaterstanden, slootwaterstanden en grondwaterstanden met elkaar te vergelijken. Blijkt hieruit dat de verschillen tussen grondwaterstanden, putwaterstanden en slootwaterstand groter zijn geworden gedurende het project, dan is dit een indicatie dat er weerstanden zijn ontstaan in het drainagesysteem en kan bekend worden wat daarvan mogelijk de oorzaak is. De data van Broere- Irrigatie van najaar 2022 en najaar 2023 en 2024 van de putwaterstanden en slootwaterstanden in combinatie met de grondwaterstanden van Acaciawater kunnen uitsluitsel geven. Grondwaterstanden zijn geregistreerd vanaf 30 maart 2022, putwaterstanden vanaf februari 2022 en slootwaterstanden vanaf juli 2022. (zie Hoofdstuk 9).

Weersverwachting

Het betrekken van de weersverwachting is zinvol. De werkelijkheid is evenwel weerbarstig. Zowel in het voorjaar van 2023 en 2024 werd regelmatig droog weer voorspeld en bleek de voorspelling vaak niet uit te komen. Na het dichtzetten van de schuiven om verdere uitstroom tegen te gaan en om te voorkomen dat de infiltratie te vroeg zou starten, was het door de regen nodig de schuiven weer open te zetten en over te schakelen op draineren.

In 2023 zijn de schuiven op 5 april dichtgezet, maar in de weken daarna nog 2 maal opengezet om het teveel aan water via de drainage af te voeren. Op 16 mei zijn de schuiven dicht gezet en hield de droge periode aan. Op 26 mei zijn de schuiven opengezet voor infiltratie.

In 2024 zijn de schuiven op 11 mei dichtgezet en daarna weer 2 maal opengezet vanwege extra regen. De schuiven zijn op 13 juli opengezet voor drainage en daarna open blijven staan tot eind 2024. Tijdens de korte droogte in juli hadden de schuiven even dicht gezet kunnen worden om water te sparen en om daarna onnodige infiltratie te voorkomen. Ze zijn open blijven staan en na de regenval begin september is het systeem weer drainerend gaan werken tot het einde van 2024.

12.5.3 Evaluatie

De extreem natte periode sinds de herfst van 2023 heeft zichtbaar gemaakt dat de drainerende functie meer aandacht nodig heeft. Het idee dat door de aanleg van een infiltratiesysteem ook een drainagesysteem wordt gerealiseerd, waarmee op hol liggende veenweidepercelen de traditionele midden greppel kan komen te vervallen moet worden losgelaten. Het drainagesysteem kan de waterafvoerende functie van een greppel niet geheel overnemen. Plasvorming op holle percelen zonder greppel is niet uit te sluiten en naarmate de plassen langer blijven staan raakt de bovengrond verder verdicht en verslemt, waardoor het water steeds langzamer inzijgt naar de drains. Lang staande plassen leiden ook tot opbrengstderving en tot een verhoogd risico op insporing en bodemverdichting bij de grasoogst en op vertrapping van de graszode bij beweiding. Om te zorgen dat het infiltratiesysteem de drainerende functie beter ondersteunt is het zinvol om de grenswaarde voor het starten van de drainage in de tabel te verlagen.

In het voorjaar van 2023 en 2024 is geprobeerd water te sparen, door bij een verwachte droogte de schuiven die in de winter openstonden al dicht te zetten voordat de grondwaterstanden gedaald waren tot aan het slootpeil. In de praktijk is dit lastig uitvoerbaar gebleken omdat de verwachte droge periodes uitbleven, waardoor de schuiven na de onverwachte regen weer moesten worden opengezet.

De vraag is of het zinvol is om dit te blijven proberen. Hoeveel regenwater kan hiermee worden gespaard? of met hoeveel dagen kan de infiltratie worden bekort en zo worden bespaard op het verbruik van slootwater voor infiltratie. Uit de door Broere-Irrigatie verzamelde infiltratiedata is gebleken dat tijdens droogte de infiltratiesnelheid oploopt tot 40 m³/dag (zie hoofdstuk 9.3.2; figuren 6 en 7). Uit de data van de grondwaterstanden van Acaciawater (figuur 5 in hoofdstuk 9.3.2 en Appendix A1; figuur A1) kan worden afgeleid dat tijdens droogte de grondwaterstanden met een snelheid van ca 1,55 cm per dag kunnen dalen (april tot begin mei 2022). Op basis van de grenswaarden in de Tabel 1 in hoofdstuk 9.3.1 zou dan voor de middenstrook en de randstrook de schuiven op respectievelijk op 5 en 10 cm boven het slootpeil worden dichtgezet. Hierdoor zouden respectievelijk 3,3 (5/1,5) en 6,7 (10/1,5) dagen bespaard kunnen worden op de infiltratie. Dit komt overeen met een bespaard infiltratie volume van 400 m³ (uitgaande van 50 m³/dag (zie hoofdstuk 9.3.2.2, waterbalans tabellen 1 tot 4). Per ha is dit ca 270 m³. Op de schaal van het veenweidegebied van de polder (ca 300 ha) is dit een substantiële hoeveelheid. Bij 300 ha is dit 81.000 m³.

Dit lijkt aantrekkelijk om op in te zetten, maar is in de praktijk niet zinvol om dit komende uit een winter te doen. Voor de grasgroei is het beter om het grondwater eerst uit te laten dalen tot het slootpeil en pas dan de schuiven dicht te zetten. Zo wordt weliswaar geen regenwater gespaard, maar wordt onnodige infiltratie van slootwater voorkomen. De grond kan dan 'droog groeien' zoals veehouders in deze streek zeggen. Daarmee wordt een proces in gang gezet waardoor de in de winter zacht en slap geworden bodem weer structuur en draagkracht krijgt en sneller opdroogt en opwarmt, dan wanneer de schuiven dichtgezet zouden worden bij de grenswaarden of de schuiven open zouden blijven staan als de grondwaterstanden onder het slootpeil zouden dalen. Dit laatste gebeurt bij passieve infiltratie. Deze vorm van infiltratie is om die reden niet geschikt voor veenweiden met een geringe droogligging.

Het is wel aan te bevelen om later in het groeiseizoen water te sparen. Wanneer tijdens droogte wordt geïnfiltreerd en een regenbui valt, waarbij het grondwater stijgt tot boven het slootpeil is het zinvol om de schuiven dicht te zetten en deze dicht te houden totdat de grenswaarden voor infiltratie worden bereikt. Als er later in het groeiseizoen kleine buien vallen kunnen de schuiven dicht blijven, evenals bij korte droogtes. In 2023 is dit geprobeerd. Op 11 augustus zijn de schuiven dichtgezet en pas op 24 september (middenstrook) en 21 oktober (randstrook) opengezet. In deze periode is regenwater gespaard en infiltratiewater bespaard. In een 'gemiddeld' jaar met zomers waarin regelmatig kleine buien vallen, kan infiltratie achterwege blijven. De schuiven kunnen dan in het voorjaar worden dichtgezet en in het najaar weer opengezet om de natuurlijke drainage of de greppeldrainage te ondersteunen.

Keuze van de indicatoren

In de tabel is gekozen voor de grondwaterstanden. De grondwaterstand is en blijft een belangrijke indicator voor het beheer door de landgebruiker van het perceel na beëindiging van de pilot. Volstaan kan worden met in elk van de stroken 1 meetpunt, omdat binnen een strook de verschillen gering en systematisch zijn. Het is wenselijk ook de putwaterstanden en slootwaterstand als indicatoren te gebruiken. Hierdoor is een directere sturing van de schuiven mogelijk. Het is zinvol als ook de stroomrichting (in- of uitstroom) en stroomsnelheid kunnen worden gevolgd. Hierdoor kan voeling worden gehouden met het functioneren van het systeem voor infiltratie en drainage en

kunnen storings /verstoppingen tijdig worden gesignaleerd. Om dit mogelijk te maken is een ander dashboard nodig dan dat van meetcentrale.

12.5.4 Handelingsperspectief proefperceel

Eén van operationele doelen van de pilot is het ontwikkelen van een handelingsperspectief voor eigenaren en gebruikers van veenweidepercelen. In eerste instantie is dit gedaan voor het proefperceel met zijn specifieke bodemkenmerken en het gesegmenteerde drainagesysteem. Na beëindiging van de pilot kan dit als advies worden meegegeven aan Niels de Jong en aan Dave van Zanten die de oogstwerkzaamheden uitvoert. In tweede instantie zijn de ervaringen van de pilot gebruikt voor het maken van een algemener en breder handelingsperspectief voor eigenaren en gebruikers van andere veenweidepercelen, die overwegen hun percelen te voorzien van een schuifinfiltratie- en drainagesysteem. Hierin zijn, naast adviezen over het grondwaterbeheer ook adviezen opgenomen over het ontwerpen en aanleggen van de onderwaterdrainagesysteem en welke indicatoren gebruikt kunnen worden voor het actief beheren van het grondwater. Het handelingsperspectief is als Bijlage in de eindrapportage opgenomen en komt ook als apart document beschikbaar.

Voortgang grondwaterbeheer proefperceel na beëindiging pilot.

Gebruik het systeem om in de winter te draineren en gebruik het systeem voor infiltratie wanneer de grondwaterstanden zijn gedaald tot aan de onderzijde van het toemaakdek. Dit wordt bereikt wanneer de grondwaterstanden zijn gedaald tot ca -2,35 m NAP en -2,45 m NAP voor respectievelijk randstrook en middenstrook. Wanneer het slootpeil zoals gebruikelijk op polderpeil staat komt dit overeen met respectievelijk ca 3 en 13 cm onder slootpeil. Bij aanhoudende droogte daalde de grondwaterstand bij dicht staande schuiven in april 2022 met ca 1,5 cm per dag en in juli 2022 met ca 2 cm per dag. Door hierop te anticiperen kunnen de schuiven ook al wat eerder worden opengezet. Het risico dat drains door onoplettendheid droog vallen wordt hiermee verkleind.

Ervan uitgaande dat de eigenaar kan beschikken over een dashboard waarop het verloop van de uit- en instroom van water en de grondwaterstanden, putwaterstanden en slootwaterstanden t.o.v. NAP zichtbaar zijn, wordt aangeraden het systeem als volgt te gebruiken.

Komend vanuit de winter waarin de schuiven open staan voor drainage, zet dan de schuiven dicht wanneer de uitstroom van water stopt om zo te voorkomen dat er onnodig vroeg water infiltreert. Indien deze indicator ontbreekt gebruik dan de putwaterstand of de grondwaterstand als indicator, De relaties tussen slootwaterstand, putwaterstanden en grondwaterstanden bij drainage en infiltratie zullen beschikbaar komen na analyse van de data van Broere-Irrigatie. Gebruik zolang deze relaties niet bekend zijn en inzicht in de in- en uitstroom ontbreekt, de grondwaterstand als indicator.

Voor het handelingsperspectief is afgezien van het actualiseren van de Tabel 1 in hoofdstuk 12.5. De tabel is nogal complex en daardoor lastig te gebruiken. Geconstateerd is dat drainage en infiltratie een jaarlijkse cyclus hebben. Een beschrijving in fases sluit dan waarschijnlijk beter aan bij de praktijk van de landgebruiker. Over een jaar gezien kunnen 3 fasen in het schuifbeheer worden onderscheiden.

Fase 1 drainerende fase (Winter)

Schuiven staan open om het neerslagoverschot af te voeren

Fase 2 drainerend afbouwende fase (overgang naar voorjaar)

Schuiven staan dicht, maar worden na regen weer open gezet

Wanneer na de winter de grondwaterstand is gedaald tot onder -2,32m NAP (polderpeil), zet dan de schuiven dicht om onnodige infiltratie te voorkomen en om het opdrogen van de bovengrond, ook wel het 'droog groeien' van de bodem genoemd, te bevorderen.

Wanneer daarna het drogend weer niet doorzet, maar wordt onderbroken door regen waarbij de grondwaterstand stijgt tot boven het slootpeil, worden de schuiven tijdelijk weer opengezet om de drainerende functie voort te zetten en weer dichtgezet wanneer de uitstroom overgaat naar instroom. Dit is bedoeld om de bovengrond 'droog' te laten groeien en daarmee weer structuur en draagkracht te geven. Geadviseerd wordt om Fase 2 te laten duren tot en met de eerste grasoogst of tot aan de start van beweiding met koeien. De bovengrond krijgt dan de mogelijkheid om voldoende droog te worden en weer voldoende structuur en draagkracht te krijgen.

Wanneer na dicht zetten van de schuiven de droogte wel doorzet, daalt de grondwaterstand snel. Op het proefperceel daalde de grondwaterstand in het extreem droge jaar 2022 met 1,5 cm per dag in april en tot 2 cm per dag in juli. Voorkomen dient te worden dat de drains droogvallen en dat door het ontstaan van luchtbellen in de drains, de werking verloren gaat. De drains liggen op een diepte van -2,72 m NAP in de middenstrook en -2,62 m NAP in de randstrook. Houd rekening met een veiligheidsmarge omdat bij het leggen van de drains de diepte enigszins zal hebben gevarieerd. Gelet op deze variatie en snelle daling van de grondwaterstand bij sterk drogend en groeizaam weer wordt aangeraden een marge van ca 10 cm aan te houden. Om die redenen wordt aangeraden de grondwaterstanden nooit te laten dalen tot onder -2,60 m NAP in de middenstrook en tot onder -2,70 m NAP in de randstrook.

Voor het proefperceel worden voor het starten van de infiltratie de volgende grenswaarden geadviseerd. Voor de middenstrook een grenswaarde van -2,50 m NAP en voor de randstrook een grenswaarde van -2,40 m NAP.

Deze grenswaarden zijn gebaseerd op de ligging van de ondergrens van het toemaakdek. Uitgaande van een dikte van het toemaakdek van ca 43 cm (*zie beschrijving bodemprofiel in hoofdstuk 8.2.*), en van de maaiveldhoogtemeting van Broere irrigatie (*Tabel 1 hoofdstuk 11*) wordt de ligging van de ondergrens van het toemaakdek in de middenstrook geschat op -2,43 tot -2,44 m NAP en in de randstrook op -2,28 tot -2,35 m NAP. Omdat het veen direct onder het toemaakdek nog niet geheel veraard is (*zie profielbeschrijving in hoofdstuk 8.2*) en om het capillaire contact met de onderzijde van het toemaakdek te behouden wordt als grenswaarde voor de start van de infiltratie voor de middenstrook -2,50 m NAP en voor de randstrook -2,40 m NAP geadviseerd. Zet bij daling tot aan deze grenswaarden de schuiven open om te infiltreren. Hiermee start Fase 3. Houd deze open zolang de droogte aanhoudt en zolang na regen de grondwaterstand niet zover stijgt dat deze uitkomt tot boven slootpeil (-2,32 m NAP) en de instroom overgaat in uitstroom van water.

Fase 3 infiltrerende fase (voorjaar - zomer)

Schuiven staan open voor infiltratie.

Bij aanhoudende droogte blijft de grondwaterstand bij infiltratie naar verwachting stabiel op ongeveer 5 cm onder het slootpeil.

Om bij het oogsten van het gras de bodem voldoende draagkracht te geven om insporing te voorkomen en verdichting te beperken, wordt aangeraden om tijdig, denk aan 1 week, voor het

maaïen de schuiven dicht te zetten. Houd de droogte aan, zet dan na de oogst de schuiven weer open.

Doorgaans wordt een droge periode tijdelijk onderbroken door regen. Dit kan een kleine, grote of een extreem grote bui zijn met veel regen in korte tijd, of meerdere kleine buien gedurende enkele dagen. Schuifinfiltratie biedt dan de mogelijkheid om regenwater te sparen en te besparen op infiltratie van slootwater.

Bij een kleine bui stijgt de grondwaterstand niet tot boven het slootpeil en gaat er geen regenwater verloren. Bij een grote bui kan dit wel. Naar verwachting stijgt bij een bui van meer dan ca 20 mm bij openstaande schuiven het grondwater tot boven het slootpeil. Door op dat moment de schuiven dicht te zetten wordt onnodig verlies van regenwater voorkomen. Valt er echter zoveel regen dat wateroverlast dreigt, dan is het wenselijk de schuif tijdelijk weer open te zetten voor drainage. Aangeraden wordt bij een grenswaarde van ca 10 cm boven het slootpeil de schuiven open te zetten en deze na daling van de grondwaterstand tot net boven het slootpeil weer dicht te zetten om zo nog een deel van het regenwater te sparen en daarmee het moment van open zetten voor infiltratie uit te stellen.

Verdere besparing in Fase 3 is mogelijk door gebruik te maken van het concept van het eb- en vloedstelsel dat sommige glastuinders bij het telen van potplanten op vloeren in hun kassen toepassen. Dit kan ook worden toegepast op een veenweideperceel met dit drainagesysteem en wel op de volgende wijze. Na starten van de infiltratie stijgt de grondwaterstand snel en stabiliseert na enkele dagen tot nabij het slootpeil. Wanneer deze stabiel is, zet dan de schuif dicht en zet deze weer open wanneer de grenswaarden voor infiltratie worden bereikt. Door toepassing van dit systeem wordt de buffercapaciteit van de bodem optimaal benut om regenwater te sparen en wordt bespaard op het gebruik van oppervlaktewater voor infiltratie.

Bij een zomer met wisselvallig weer, waarbij neerslag en verdamping elkaar in balans houden en de grondwaterstanden variëren binnen de bandbreedte van de grenswaarden en het slootpeil, kunnen de schuiven dicht blijven staan. Deze situatie kan soms tot het einde van een zomer duren. Met name in deze fase manifesteert zich het voordeel van het schuifinfiltratiesysteem boven het open passieve infiltratiesysteem m.b.t. het sparen van regenwater en het besparen op infiltratiewater.

Worden de grenswaarden voor infiltratie niet meer bereikt, dan blijven de schuiven dicht en worden deze pas in het najaar opengezet wanneer de grondwaterstanden gestegen zijn tot boven het slootpeil. Gedurende de winter blijven de schuiven open staan. Hiermee is de jaarlijkse cyclus rond.

Aanvullende tips

- Vanwege de holle ligging van het perceel wordt geadviseerd de greppel weer uit te frezen zoals voorheen gebruikelijk is geweest.
- Bij een extreem droog voorjaar zoals in 2022 wordt aangeraden alert te zijn op korstvorming en beginnende scheurvorming (*zie Foto 6 in hoofdstuk 12.5.2*). Onder die omstandigheden wordt aangeraden te starten met infiltratie zodra de grondwaterstanden gedaald zijn tot onder het slootpeil.

Terugblikkend

De pilot is gebruikt om ervaringen op te doen voor het maken van een handelingsperspectief voor het schuifbeheer. Nu het er is kan worden teruggeblikt op 2022, 2023 en het voorjaar 2024.

2022

Maart 2022 was extreem droog. Eind maart was de grondwaterstand gedaald tot onder -2,50 m NAP. Veronderstellend dat het infiltratiesysteem al op dat moment was geïnstalleerd, zouden in de loop van maart de schuiven zijn opengezet voor infiltratie. Fase 3 was dan al in maart bereikt. Dit is extreem vroeg. De regen van begin april zou voor een deel gespaard en met de tweede infiltratieperiode had later in april gestart kunnen worden. Op 5 mei werd de infiltratie gestart en daarmee werd direct Fase 3 van toepassing. De extreem droge zomer werd af en toe onderbroken door regen, soms met zoveel regen dat er tijdelijk water is uitgestroomd. Dit regenwater had gespaard kunnen worden. Op 29 september zijn de schuiven open gezet voor drainage. Hiermee was in 2022 de cyclus rond.

2023

In 2023 was het voorjaar lang nat. Hierdoor liep Fase 1 door tot 5 april en Fase 2 tot 27 mei. Pas op dat moment was het nodig om te starten met infiltratie (Fase 3). Op 11 augustus is de infiltratie gestopt. Voor de middenstrook is de schuif op 26 september open gezet voor drainage en voor de randstrook op 21 oktober. Hiermee was in 2023 de cyclus rond.

2024

In 2024 was het nat tot in juli. Over de gehele zomer beschouwd, 1 april tot 1 oktober was er een neerslagoverschot van 25 mm (KNMI-meetstation Rotterdam). De natte periode duurde extreem lang. Fase 1 liep daardoor door tot 10 mei en Fase 2 tot 27 juli. Nadien zijn de schuiven open blijven staan tot eind 2024. Tijdens de tijdelijke droogte in augustus is een beperkte hoeveelheid water geïnfiltreerd. Na de regenval in september is de instroom overgegaan naar uitstroom van water in drainage. Hiermee was in 2024 de cyclus rond.

13 Algemene Discussie

In de hoofdstukken 9, 10 en 11 zijn de hydrologische analyse, de resultaten van het broeikasgas emissieonderzoek en de maaiveldhoogtemetingen bediscussieerd. In dit hoofdstuk zijn enkele onderwerpen verder belicht.

Systeemkeuze grondwaterbeheer

In de pilot is gekozen voor een actief grondwaterbeheer met een schuifinfiltratie- en drainagesysteem, waarmee naar gelang de weersomstandigheden en de veldomstandigheden kan worden gekozen om oppervlaktewater in te laten of overtollig regenwater af te laten naar het oppervlaktewater, of wanneer neerslag en verdamping in balans zijn de schuif dicht te houden. In hoofdstuk 5 is de keuze toegelicht in relatie tot het passief grondwaterbeheersysteem en het drukdrainagesysteem.

Het schuifstelsel heeft meerdere voordelen in relatie tot de andere systemen.

1 Met het schuifstelsel wordt het regenwater beter benut en er wordt meer bespaard op oppervlaktewater dan met het passieve grondwatersysteem.

Dit kan al worden afgeleid uit de resultaten van 2022. Dat jaar begon met extreem droog weer in maart. Begin april werd de droogte tijdelijk onderbroken door regen en daarna duurde de droogte tot in september met af en toe onderbrekingen door enkele buien. Veronderstel dat de systemen al vanaf begin 2022 operationeel zouden zijn geweest en dat de later proefondervindelijk afgeleide grenswaarden voor het schuifbeheer al beschikbaar waren. In het passieve systeem zou de infiltratie dan al half maart zijn gestart en begin april zijn overgegaan naar drainage en direct na afvoer van het

overtollige regenwater weer zijn overgegaan op infiltratie. In het schuifstelsel zou de infiltratie pas eind maart zijn gestart en zou bij start van de regen de schuif zijn dicht gezet. Het regenwater zou dan zijn gebufferd, waardoor pas later in april zou zijn overgegaan op infiltratie. Verder zouden de enkele regenbuien in juni, juli en begin september gebufferd zijn. Met het passieve stelsel zou dus tot het moment dat het schuifstelsel op 5 mei operationeel werd al meer water zijn geïnfiltreerd en regenwater zijn uitgestroomd, dan met het schuifstelsel

Omdat de registratie van de instroom op 1 juni werd gestart, is het infiltratievolume in mei niet meegenomen in de balans van 2022. Hierdoor blijft onbekend hoeveel water in 2022 is ingelaten, tenzij dit kan worden geschat. Dit kan door gebruik te maken van het verloop van het neerslagtekort en het verloop van de grondwaterstanden in april en mei 2022. Het neerslagtekort is weergegeven in Figuur 4 van hoofdstuk 9.3.1. De grondwaterstanden zijn weergegeven in Figuur A2 in Appendix van hoofdstuk 9 en konden ook worden teruggekeken via dashboard van Fixeau. Uit het verloop van de grondwaterstanden is gebleken dat op alle 4 de meetpunten de grondwaterstanden tussen 13 en 17 april waren gedaald tot -2.32 m NAP (slootpeil). Vanaf dat moment daalden ze verder om na de start van de infiltratie op 5 mei binnen enkele dagen weer te stijgen tot nabij het slootpeil. Het is daarom aannemelijk dat door infiltratie het neerslagtekort van 17 april tot 1 juni is gecompenseerd.

Het neerslagtekort wordt weergegeven in mm en is omgerekend naar m³ met het oppervlak van het gedraineerde deel van het perceel (zie hoofdstuk 9.3.2.2).

infiltratievolume 2022 in m ³			
	midden	rand	samen
mei	501	844	1345
juni	231	230	461
juli	386	439	825
aug	643	664	1307
sept	85	104	189
okt	17	20	37
nov	1	3	4
dec	2	1	3
som	1866	2305	4171

Dit levert voor mei een geschat infiltratie volume op van 1345m³. Wanneer dit volume wordt meegeteld, dan is in het extreem droge jaar 2022 in totaal 4171 m³ geïnfiltreerd. (zie eerste tabel). Over een gedraineerd oppervlak van 15.300 m² is dit 2726 m³/ha.

De volumina infiltratie en drainage die tot en met juli 2024 zijn geregistreerd zijn in het deelrapport van Acaciawater verwerkt en weergegeven, zie hoofdstuk 9.3.2.2. Door de droogte in 2022 is in dat jaar aanmerkelijk meer water geïnfiltreerd dan in 2023 en 2024.

drainagevolume 2022 in m ³			
	midden	rand	samen
mei			
juni	83	72	155
juli	4	0	4
aug	0	0	0
sept	208	168	376
okt	247	206	453
nov	394	344	738
dec	77	79	156
som	1013	869	1882

Deze zijn gesommeerd in de tweede tabel. De verschillen tussen de jaren zijn groot. De infiltratie in 2024 is het gevolg van het schuifbeheer in Fase 2 (zie hoofdstuk 12.5.4). Infiltratie had voorkomen kunnen worden als ook gestuurd had kunnen worden op slootwaterstand en putwaterstand of op de omslag van uitstroom naar instroom.

In de derde en vierde tabel zijn drainage hoeveelheden weergegeven. Daarin is zichtbaar dat 2023 aanmerkelijk natter is geweest dan 2022. De data van 2024 lopen door tot en met juli.

infiltratievolume in m ³			
	midden	rand	samen
2022	1866	2305	4171
2023	859	797	1656
2024	153	25	178
som	2878	3127	6005

drainagevolume in m ³			
	midden	rand	samen
2022	1013	869	1882
2023	2901	1587	4488
2024	910	579	1489
som	4824	3035	7859

2 Het schuifstelsel is meer geschikt voor veenweidepercelen met een geringe droogligging dan het passieve grondwatersysteem

Met het passieve grondwatersysteem wordt de bodem op een perceel met een geringe droogligging minder snel droog dan met het schuifinfiltratiesysteem. Schuifinfiltratie biedt de mogelijkheid om de bodem 'droog' te laten groeien door de schuif dicht te zetten op het moment dat het overtollig regenwater is uitgestroomd. Met het passieve grondwatersysteem kan de bodem te vochtig blijven en daardoor onvoldoende draagkracht krijgen om gras te kunnen oogsten en te kunnen beweiden met koeien. Veenweidepercelen waarvan de droogligging zo gering is geworden, hetzij door de voortgaande bodemdaling of door het opzetten van het polderpeil, kunnen met het schuifstelsel nog wel voldoende droog worden en draagkracht krijgen om gras te oogsten en. Bovendien kan op deze percelen met het schuifstelsel emissie van broeikasgassen en bodemdaling worden verminderd.

3 Het schuifstelsel is ook geschikt voor percelen met een grote droogligging, waardoor de meerwaarde van drukdrainage waarschijnlijk ontbreekt.

In het westelijk veenweidegebied begint het onveraaide veen doorgaans dicht onder het slootpeil, tenzij dit recent is verlaagd door verlaging van het polderpeil of starten van een onderbemaling. Het schuifstelsel biedt de mogelijkheid om dit veen verzadigd met water te houden en zo te beschermen tegen oxidatie. Drukdrainage zal daarvoor geen meerwaarde bieden. Nadeel van drukdrainage is dat het tot lekverliezen kan leiden vanuit de buitenste drains naar de sloten. Naarmate een hoger drukverschil wordt gecreëerd, neemt dit risico toe. Om het hoge peil te handhaven is een pompsysteem nodig en veel energie. In het schuifstelsel is geen pomp nodig. Voor de energievoorziening om de schuif te bedienen en de indicatoren registreren en te volgen kan worden volstaan met een zonnepaneel met energieopslag (zie foto in hoofdstuk 7).

Schuifbeheer

In 2022 is nog niet geëxperimenteerd met het schuifbeheer. Op 5 mei zijn de schuiven opengezet en daarna opengebleven tot eind 2022, op een korte periode na in de laatste week van juli toen ze per abuis tijdelijk hebben dicht gestaan.

Het tijdelijk dicht staan van de schuiven heeft zichtbaar gemaakt dat de grondwaterstand tijdens droogte in het groeiseizoen snel daalt en dat na opening van de schuiven het grondwater binnen enkele dagen weer terugkomt op het peil van voor het dichtzetten, zie *Figuur 11 in hoofdstuk 9.3.2.3*. In de middenstrook van het gedraineerde deel daalde de grondwaterstand tussen 22 juli en 30 juli met ca 16 cm (2 cm/dag) en was de stand na opening van schuif op 1 augustus weer terug op het oude niveau. Dit is een signaal dat de infiltratie en de doorstroming door de drains en daarop aansluitende verdeling van het water in het veen snel verloopt. De daling verliep in juli sneller dan in het voorjaar. Tussen 8 april en 5 mei, was de gemiddelde daling 1,55 cm/dag.

De snelle daling in het groeiseizoen is een aandachtspunt voor de schuifbeheerder. De grenswaarde voor het starten van infiltratie kan snel worden bereikt. Wanneer deze wordt gemist kan ook snel daarna de drains droog komen te liggen en het functioneren van het systeem in gevaar komen.

Segmentering

In de pilot is gekozen voor de aanleg van een gesegmenteerd systeem. Dit is gedaan om na afloop van de pilot de laag gelegen middenstrook van het perceel plasdras te maken voor weidevogels. De

hooggelegen randstrook zou dan voldoende droog blijven voor de weidevogels om daar te broeden. Het perceel ligt in het weidevogelgebied. Niels de Jong is lid van de Agrarische Natuur en Landschap Vereniging Rijn - Gouwe-Wiericke. Omdat het gebruik van slootwater meerdere nadelen heeft (zie hoofdstuk 6.1) is het plan gemaakt om het regenwater vast te houden door de schuif na de winter dicht te houden en zo het water in de plasdras vast te houden en zo nodig een pomp in de put te plaatsen om water in te pompen om desgewenst het grondwater in de middenstrook op te zetten en zo de plas van onderaf in stand te houden om daarmee de nadelen van het direct gebruik van slootwater weg te nemen. De pilot heeft geleerd dat in dit hol liggende perceel bij regen snel plassen ontstaan die zelfs bij openstaande schuif door verslemping van de bodem lang blijven staan. Bij dicht houden van de schuif en dicht houden van de greppel zal een plas nog langer blijven staan. Dit kan evenwel ook worden gerealiseerd met 1 segment en dichthouden van de schuif en greppel en in een droog broedseizoen desgewenst ondersteunen met inpompen van water via de put. Om deze reden is in het handelingsperspectief in de bijlage segmentering niet opgenomen.

Bodemdaling

In de pilot heeft het accent gelegen op de bodemdaling die veroorzaakt wordt door veenafbraak en emissie van broeikasgassen die daar het gevolg van zijn. Er zijn echter meer activiteiten en processen die tot bodemdaling leiden. Eén ervan is belasting van de bodem. Belasting kan dynamisch of statisch zijn. Bij een dynamische belasting gedraagt de veenbodem zich als een waterbed. Dit is voelbaar in een weiland aan drukgolven en trillingen die ontstaan door bijvoorbeeld een langsrijdende kraan, een kudde langs rennende schapen of vaarzen. Het kan worden voelbaar worden gemaakt door bij een veldexcursie de deelnemers in 2 groepen te splitsen en om beurten ritmisch laten springen. Wanneer een dynamische belasting voorbij is, veert de bodem weer terug. Dynamische belasting onder natte omstandigheden kan wel tot vervorming en verdichting van de bodem leiden. In 2024 is dit op sommige weilanden bij het maaien en het ophalen van het gras gebeurd (zie foto's 3 en 4 in Hoofdstuk 12.4). Op het proefveld is geen insporing ontstaan, maar enige bodemdaling is niet uit te sluiten door verdichting van het kleiige toemaakdek (zie hoofdstuk 9.3.2.4). Dit kan doorwerken in de maaiveldmetingen.

Bij statische belasting gedraagt de veenbodem zich als een langzaam lekkend waterbed. Na ophoging zal de bodem dalen. De zuidelijke helft van Polder Bloemendaal is in de jaren 70 opgespoten met zand ten behoeve van de bouw van de woonwijk Bloemendaal in Gouda. Door zetting ligt het oorspronkelijke maaiveld nu ca 2 meter lager dan het maaiveld in de lintbebouwingsstrook langs de Bloemendaalseweg die vrijgehouden werd van de opspuiting. Bij de zetting is veel water uit het veen geperst, zoveel zelfs dat machinist Den Toom van het gemaal aan de Gouwe daarover verbaasd was. Hij heeft na de opspuiting 7 jaar lang veel meer water moeten uitmalen en zelfs in de zomer geen water hoeven inlaten om het slootwater op polderpeil te houden, terwijl dat in de jaren daarvoor in de zomers steeds nodig was (mondelinge informatie).

In het verleden, vanaf de middeleeuwen zijn toemaakmaterialen aangebracht op de percelen in Polder Bloemendaal en aangrenzende veenpolders. Over de jaren heen heeft dit geleid tot een dik toemaakdek in deze gebieden en ook op het proefperceel. Waarschijnlijk heeft dit bijgedragen aan de compactie van het veen en verklaart dit het samengedrukte wilgenhout op de foto in figuur 12 in hoofdstuk 8.2.

Plasvorming

Bij intense regenbuien stroomt het water op hol liggende percelen oppervlakkig af naar het midden van het perceel. In de pilot is gebleken dat de drainerende functie van het systeem in najaar en winter alleen niet voldoende is om plasvorming en de elkaar versterkende negatieve gevolgen van

plassen op een veenweideperceel te voorkomen, zoals: verslemping, verdichting, vertraging neerwaarts watertransport, ontstaan methaanemissie, verlies van bodem bedekkende vegetatie en opbrengstderving. Door de greppel na de pilot weer open te frezen zal plasvorming waarschijnlijk worden voorkomen.

Looptijd van het project

Het project is in 2021 gestart. Het zou aanvankelijk lopen tot eind 2025, maar is in verband met het aflopen van de Regio Deal bodemdaling Groene Hart beperkt tot eind 2024. Dit kan de vraag oproepen of de pilot wel lang genoeg heeft geduurd om bruikbare conclusies te kunnen trekken en aanbevelingen te kunnen doen. Bij de keuze van de looptijd van 5 jaar was de hoop dat er tenminste 1 extreme droge zomer zou voorkomen. Deze hoop is uitgekomen. In de extreem droge zomer van 2022 kon de infiltrerende potentie van het systeem goed worden getest en De droge zomer werd gevolgd door een natte herfst en door een natte winter en voorjaar in 2023. Hierdoor kon drainerende potentie van het systeem goed worden getest. In de zomer van 2023 was er een korte droge periode in juli, waardoor de zomer meer leek op gemiddelde zomer. 2024 was extreem nat, vooral in het voorjaar en het jaar sloot af met een neerslagoverschot.

De extreme weersomstandigheden zijn bijzonder gunstig geweest voor het onderzoek. Ook al heeft het in het voorjaar van 2022 enige tijd geduurd om alle monitorings- en energiesystemen te installeren en zijn de metingen al in 2024 beëindigd, heeft de pilot goed bruikbare conclusies en aanbevelingen opgeleverd. Zo is gebleken dat door de infiltratie de grondwaterstand in de extreem droge zomer niet daalde tot in veen en de emissie van broeikasgassen sterk werd verminderd. Ook kon het recent aangepaste Peatland-VU model voor het berekenen van de emissie van broeikasgassen met succes worden toegepast. Bovendien zijn door de extreme weersomstandigheden nuttige ervaringen met het schuifbeheer opgedaan. Deze zijn gebruikt voor het maken van een handelingsperspectief voor eigenaren en gebruikers van veenweidepercelen om de emissie van broeikasgassen te verminderen. Wat betreft het volgen van de bodemdaling, zijn waardevolle ervaringen opgedaan met de maaiveldhoogtemetingen. De looptijd is echter te kort geweest om eenduidige conclusies te kunnen trekken over de effectiviteit van de maatregelen om de bodemdaling te beperken. Meerjarige metingen zijn nodig om hierover conclusies te kunnen trekken.

14 Conclusies en aanbevelingen

De discussies, conclusies en aanbevelingen van het hydrologische onderzoek en het broeikasgas emissieonderzoek en bodemdaling zijn al opgenomen in de hoofdstukken 9, 10 en 11. In dit hoofdstuk ligt het accent op de toepassingsmogelijkheden van het systeem.

- Het infiltratie-en drainagesysteem dat in het pilotproject bodemdaling Polder Bloemendaal is toegepast biedt een goede basis voor het beperken van veenafbraak en voor het verminderen van emissie van broeikasgassen en bodemdaling in het veenweidegebied.
- Het systeem biedt ook een goede basis om regenwater te sparen en te besparen op het gebruik van oppervlaktewater voor het grondwaterbeheer.
- Met het schuifstelsel wordt het regenwater beter benut en er wordt meer bespaard op oppervlaktewater dan met het passieve grondwatersysteem.

- Het schuifstelsel is meer geschikt voor veenweidepercelen met een geringe droogligging dan het passieve grondwatersysteem.
- Het schuifstelsel is ook geschikt voor percelen met een grote droogligging, waardoor de meerwaarde van drukdrainage waarschijnlijk ontbreekt.
- Om het systeem goed te kunnen gebruiken is inzicht nodig in het verloop van volgende indicatoren:
 - 1) de grondwaterstand in de betreffende veenweidepercelen,
 - 2) de waterstand in de betreffende infiltratie/drainage putten en,
 - 3) de stand van het oppervlaktewater in de betreffende peilvakken van het waterschap.
- De indicatoren dienen continue volgbaar te zijn om tijdig te kunnen inspelen op weersveranderingen en planningen van werkzaamheden op het perceel.
- Voor het schuifbeheer is het nodig voor deze indicatoren perceelspecifieke grenswaarden af te leiden op basis waarvan de eigenaar/gebruiker van het perceel kan besluiten om de schuif open te zetten voor infiltratie of drainage, of dicht te zetten en te houden wanneer geen infiltratie of drainage nodig is.

Aanbevelingen

Handelingsperspectief/ Opschaling

Eén van de operationele doelen van de pilot is het ontwikkelen van een handelingsperspectief voor eigenaren en gebruikers van veenweidepercelen. De kennis en ervaring verkregen met de pilot zijn gebruikt om dit perspectief te maken. Aanbevolen wordt dit te gebruiken om te inventariseren of de betreffende veenweidepercelen geschikt zijn voor dit systeem en hoe het systeem kan worden aangelegd en gebruikt. Het handelingsperspectief biedt een basis voor andere veenweidepercelen van Polder Bloemendaal en van andere veenpolders in het Westelijk veenweidegebied om onderwaterdrainage aan te leggen en te voorzien van een schuifinfiltratie/drainagesysteem. Het handelingsperspectief is als bijlage bijgevoegd. Het is ook apart verkrijgbaar.

Een 2^{de} spoor van opschaling kan ontstaan door te verkennen in hoeverre het mogelijk is om de al aangelegde passieve drainagesystemen te voorzien van een schuifinfiltratie/drainagesysteem.

Waterbalans

Het systeem biedt mogelijkheden om regenwater te sparen en te besparen op het gebruik van oppervlaktewater voor infiltratie. Dit kan worden geoptimaliseerd door gebruik te maken van het concept van het eb- en vloedstelsel. Dit systeem wordt door sommige plantentelers toegepast voor de watervoorziening in hun potplantenteelt op vloeren.

Aangeraden wordt de hoeveelheid infiltratiewater en drainagewater over de jaren te volgen.

Schuifbeheer

Om de indicatoren voor het schuifbeheer continue te kunnen volgen is een dashboard nodig.

Aangeraden wordt gebruik te maken van een dashboard dat dezelfde mogelijkheden biedt als wat Fixeau geboden heeft.

Aangeraden wordt de beslissing voor het open en dicht zetten van de schuif in handen te leggen van de meest bij het veld betrokken persoon. i.c. de eigenaar of de gebruiker van het perceel. Het vraagt om een attente betrokkenheid en regelmatig volgen van de indicatoren op het dashboard om de schuif te beheren.

Inspectie en onderhoud

Inspectie van de put en het schuifstelsel zijn nodig. De ervaring leert dat op de geperforeerde buis in de sloot een zwarte aanslag ontstaat. Hierdoor kunnen de perforaties verstopt raken. De aanslag kan zich gedurende het hele jaar vormen. Aangeraden wordt de geperforeerde buis in de sloot uit voorzorg 2 maal per jaar schoon te maken, bij voorkeur in het voorjaar voor het behoud van de infiltrerende functie en in het najaar voor het behoud van de drainerende functie van het stelsel. De aanslag is lastig te verwijderen. Met een harde borstel kan het lukken.

Aangeraden wordt de relatie tussen de putwaterstand en de slootwaterstand en de relatie tussen de putwaterstand en de grondwaterstand in de gaten te houden. Door het volgen van deze relaties kan stagnatie in infiltratie en drainage tijdig worden gesignaleerd.

Naamgeving

Zover bekend is het schuifinfiltratie en -drainagesysteem alleen aangelegd in het pilotproject Bodemdaling Bloemendaal. Landelijk bestaan er maar 2 smaken: het passieve grondwatersysteem en het drukdrainagesysteem. Hoe dit stelsel te noemen? Het onderscheidt zich van het passieve systeem doordat het niet passief is, maar actief is. Het vraagt om attente en actieve betrokkenheid om de schuif te bedienen om daarmee en het grondwater actief te kunnen beheersen. Het onderscheidt zich van de drukdrainage omdat in dit systeem geen pomp wordt gebruikt, maar gebruik wordt gemaakt van vrij verval en een schuif om het water in of uit te laten stromen. In deze rapportage wordt als naam gebruikt schuifinfiltratie en schuifdrainagesysteem of korter schuifstelsel. Landelijk is voorgesteld dit systeem aan te duiden als 'een bijzondere vorm van een passief waterinfiltratiesysteem' afgekort tot (PWIS). Vervolgens wordt dan uitgelegd wat dit betekent. Deze naam gaat voorbij aan het tweeledig gebruik van het systeem. De drainerende functie is immers ook belangrijk. Verwacht mag worden dat de naam PWIS de opschaling van het systeem niet zal bevorderen. Aangeraden wordt de naam **SchuifInfiltratie en DrainageSysteem** te gebruiken, afgekort **SIDS**, of eventueel systeem Polder Bloemendaal. Polder Bloemendaal is onder veehouders in aangrenzende veenpolders bekend.

Literatuur

1. Manifest Duurzame ontwikkeling Polder Bloemendaal, Projectgroep Weids Bloemendaal, 28 november 2012.
2. Projectvoorstel Bodemdaling Polder Bloemendaal, Stichting Weids Bloemendaal, 30 december 2020
3. Projecten-factsheet Bodemdaling Polder Bloemendaal, Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling, november 2021
4. Voortgangsrapportage 2021 Regio Deal Bodemdaling Groene Hart
5. Voortgangsrapportage 2022 Regio Deal Bodemdaling Groene Hart
6. Film project
<https://collect.wetransfer.com/board/saxwnw9chccedlgqe20221117101549?token=ccd028d2-b90a-4f06-867d-5b84e1c5982b>
7. Innovatieve inzichten voor het beter omgaan met bodemdalingsvraagstukken. Magazine Regio Deal Bodemdaling Groene Hart, februari 2024, blz. 38-39.
8. Publiekssamenvatting Project Bodemdaling Polder Bloemendaal. Tessa van Hateren, Acaciawater februari 2025
9. Hydrologische analyse Bloemendaal. Frouke Hoogland en Tessa van Hateren, Acaciawater, projectnummer AW24_324_FH_211282, 16 december 2024
10. Broeikasgas-fluxen uit een koopveenbodem in Polder Bloemendaal (Waddinxveen, Zuid-Holland), Ko van Huissteden, V.O.F. Kytalyk Carbon Cycle Research, maart 2024.
11. Bakker, H. de en J. Schelling, 1989 - 2e gew. druk bewerkt door J. Brus en C. van Wallenburg. Systeem voor de bodemclassificatie voor Nederland, de hogere niveaus. Pudoc, Wageningen.

12. Bodemkaart van Nederland (1981) Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
13. Jong, J.D de en B.P. Hageman, 1960. De legenda van de holocene afzettingen op de nieuwe geologische kaart van Nederland, schaal 1: 50.000, Geologie en Mijnbouw 39 (N.S. 22), 644-653
14. Berendsen Henk J.A. & Stouthamer Esther (2001) Paleographic development of the Rhine-Meuse delta. The Netherlands, ISBN 90 232 36955
15. Grondwaterkaart van Nederland, Utrecht 31 West Boswinkel J.A. en Cornelissen C.M.L. Dienst Grondwaterverkenningen TNO Delft januari 1980.
16. Beleidskader Bodembeheer Toemaakdek Buitengebied, provincies Zuid-Holland en Utrecht, 2010
17. Historisch Bodemonderzoek, Bestemmingsplan Ruimte voor Ruimte Polder Bloemendaal, Dirk van der Eijk, Vereniging Sierteelt Polder Bloemendaal, 25 februari 2014.
18. [www.bodemloket.nl/Atlas bodeminformatie Midden-Holland](http://www.bodemloket.nl/Atlas%20bodem informatie%20Midden-Holland).
19. Sonneveld, F. (1954). Het slootkanteffect in het klei-op-veengebied in Zuid-Holland. Boor en Spade 7:181-188.
20. Meetstrategie en meetprotocol; Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgasmetingen Veenweiden, blz. 29-34, 27-10-2021.
21. Bodemdalingskaart 2.0; Nederlands Centrum voor Geodesie, 2022.
22. NOBV-jaarrapportage 2024; Integratierapport Bodemdaling versie 2024-09-28, Sanneke van Asselen et al.

Begrippenlijst

Bodemvocht: water in de bodem tussen maaiveld en slootpeil

Droogligging/ drooglegging: de afstand tussen maaiveld en slootpeil

Grondwaterbeheer: het beheer van de grondwaterstand.

Grondwaterbeheer kan worden toegepast om daling van de grondwaterstand in de zomer tot in het onvervaard veen tegen te gaan en zo te voorkomen dat veenafbraak in gang wordt gezet. Dit kan door de aanleg van een infiltrerende onderwaterdrainage. Deze kan door de eigenaar/ gebruiker van het perceel bij aanhoudende droogte in werking worden gesteld wanneer de grondwaterstand te ver onder het slootpeil dreigt te dalen. Er is in deze pilot ervaring opgedaan met een innovatief systeem waarmee zonder tussenkomst van een pomp bij aanhoudende droogte water kan instromen en bij aanhoudende regen water kan uitstromen. Dit wordt gedaan met een schuif in een infiltratieput, die draadloos op afstand kan worden open en dicht gezet.

Veraard veen: veen waarin de oorspronkelijke planten niet meer op het oog herkenbaar zijn.

Veraard veen ontstaat door biologische afbraak van het veen nadat het wordt blootgesteld aan lucht (zuurstof). Veraard veen wordt ook wel zwarte grond genoemd. Deze grond heeft een goede structuur, is rijk aan organische stof en is zeer geschikt voor vollegrondse teelten van groenten en bomen (Boskoop en omgeving).

Onvervaard veen: Dit is het oorspronkelijke veen.

Hierin zijn de planten waaruit het veen is gevormd zichtbaar. Op basis van de plantensamenstelling worden verschillende soorten veen onderscheiden. In Polder Bloemendaal komt overwegend bosveen voor. Bosveen is een eutroof (voedselrijk) soort veen. Wanneer onvervaard veen wordt aangeboord of ontgraven, heeft het doorgaans een bruine kleur die bij blootstelling aan lucht en licht snel verkleurd naar zwart. Onvervaard veen ruikt naar rotte eieren. Dit is de geur van H₂S.

Bijlage: Handelingsperspectief grondwaterbeheer veenweidegebied.

Inleiding

In het kader van de Regiodeal Bodemdaling Groene hart is in het landelijk gebied van Polder Bloemendaal in Waddinxveen een pilotproject met actief grondwaterbeheer uitgevoerd met een schuifinfiltratie- en drainagesysteem (PWIS). Voor dit project is een representatief veenweide perceel geselecteerd. Hierin zijn onderwaterdrains aangebracht om tijdens droogte slootwater via een put te kunnen inlaten en bij regen water te kunnen uitlaten. De in- en uitlaat wordt geregeld met een schuif die op afstand draadloos kan worden open en dicht gezet. Een deel van het perceel is niet gedraineerd en diende als referentie. De metingen zijn uitgevoerd in 2022, 2023 en 2024. De conclusies van het onderzoek zijn dat met dit systeem voorkomen kan worden dat het grondwater daalt tot in het onveraaarde veen, zelfs in de extreem droge zomer van 2022 werd dit voorkomen. Door het niet droogvallen van het veen, wordt de veenafbraak sterk vertraagd en daarmee ook de emissie van CO₂ en naar verwachting ook de bodemdaling. De pilot is beschreven in de Integrale eindrapportage van het pilotproject bodemdaling Polder Bloemendaal (Lit.1.) deze is voorzien van een publiekssamenvatting (Lit. 2). Delen van de studie zijn gepubliceerd in het Magazine Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (Lit. 3.). Delen van de integrale rapportage zijn ook als afzonderlijke deelrapporten uitgebracht, betreffende de hydrologische analyse (Lit. 4.) en de broeikasgas-fluxen (Lit. 5.).

Toepassingsmogelijkheden schuifinfiltratie- en drainagesysteem

Percelen in het westelijk veenweidegebied met overwegend bosveen in de ondergrond zijn geschikt voor infiltratie met een onderwaterdrainage systeem. Deze percelen komen over een groot areaal voor in de veenweidegebieden van Zuid-Holland, Utrecht en Noord-Holland. Het systeem is daarmee in potentie geschikt om ruim toe te passen.

Om te kunnen vaststellen of een specifiek veenweideperceel hiervoor geschikt is, wordt aangeraden enkele verkennende handboringen verspreid over het perceel uit te voeren om te bepalen op welke diepte de overgang naar het onveraaarde veen begint. Veelal valt de overgang ongeveer samen met het polderpeil. Vervolgens wordt aangeraden op een representatieve plek in het perceel een kleine profielkuil te graven tot net in het onveraaarde veen en dan met een guts tot ca 2 m diep te verifiëren of tot die diepte veen aanwezig is. Verifieer op de bodemkaart/ geologische kaart of er onder de veenlaag een kleilaag aanwezig is. In dat geval is de bodem nog beter geschikt voor infiltratie, omdat eventuele wegzijging van infiltratiewater naar de ondergrond dan verwaarloosbaar is. Verifieer in het bodeminformatiesysteem van de Gemeente/Omgevingsdienst of er gedempte sloten of anderszins bodem verontreinigende of bodem verstorende activiteiten zijn geweest.

Aanleg drainagesysteem

Moment van aanleg

Om een veenweide perceel succesvol te kunnen draineren zijn de weersomstandigheden voorafgaand aan het draineren van belang. De bodem dient niet te nat te zijn en ook niet te droog. Hoe natter de bodem, hoe groter het risico op insporing en verdichting van de bodem. Hoe droger de bodem, hoe moeilijker het mes/zwaard, waarmee de drains in de bodem worden gebracht, door de bodem snijdt en hoe groter het risico dat de bovengrond en graszode opstropen en de bodemstructuur beschadigd raakt. Verder is het groeistadium van het gras van belang. Hoe langer het gras, hoe groter het risico op opstropen van de zode en op verlies aan grasopbrengst. Het beste moment om te draineren is na een grasoogst. In weilanden met een uitgestelde maaidatum vanwege een weidevogelbeheerovereenkomst is dit na de eerste grasoogst in juni of juli. Aangeraden wordt om de drains sleufloos aan te laten leggen.

Maatvoering drainagesysteem

Wanneer een middengreppel in het perceel aanwezig is, houd dan een drainafstand aan van 6 m met de greppel in het midden. Aangeraden wordt in het perceel een drainafstand van 4 m aan te houden en zorg dat de buitenste drains niet dichterbij dan 5 m van de sloot komen te liggen. In de pilot is een afstand van 3 m aangehouden. Dit werkt weliswaar goed, maar is een risico in polders met oeverafslag. Door komst van muskusratten, rivierkreeften en ganzen zijn oevers met name in waterrijke veenpolders gevoelig geworden voor oeverafslag. Een afstand van 5 m is dan veiliger voor het langjarig functioneren van het systeem, dan een afstand van 3 meter.

Als lengte van de drains wordt aangeraden een afstand van maximaal 250 m aan te houden. In de pilot is 200 m aangehouden. Tot die lengte functioneerde het systeem zo goed, dat verwacht mag worden dat het ook tot ca 250 m wel goed zal werken. Dit betekent dat één drainage-eenheid een lengte van ca 500 m kan bestrijken, met halverwege op 250 m een dwarsdrain die wordt aangesloten op de put. De dwarsdrain wordt gelegd in een gegraven sleuf en aangesloten op een put met verbinding naar de sloot. De put is voorzien van een schuif of klep die draadloos op afstand kan worden open en dicht gezet.

Aangeraden wordt de drains op een diepte van 40 cm onder het polderpeil /slootpeil aan te leggen. Wanneer op termijn een polderpeilverlaging wordt verwacht, wordt aangeraden een wat grotere diepte aan te houden, bijvoorbeeld 50 cm. Wanneer een polderpeilverhoging wordt verwacht, blijft 40 cm onder het slootpeil een goede diepte. In de pilot is een gesegmenteerd systeem (N.B.) aangelegd waarbij in de laag gelegen middenstrook de drains gelegd zijn op een diepte van 40 cm en in de hoger gelegen randstroken op 30 cm onder slootpeil. In beide stroken komt dit overeen met ca 65 cm onder maaiveld. Voldoende gronddekking is nodig om het drainagesysteem te beschermen bij landwerkzaamheden. Aangeraden wordt tenminste 60 cm aan te houden over het gehele perceel. Een kwetsbare plek is de dwarssleuf. Bij het graven van de sleuf wordt ook onvervaard veen uitgegraven. Bij het aanvullen van de sleuf wordt aangeraden eerst met het onvervaarde veen aan te vullen en daaroverheen de bovengrond terug te brengen. Aangezien dit in de praktijk moeilijk uitvoerbaar is gebleken, komt een deel van de het veen boven het grondwaterpeil te liggen. Door afbraak van dit veen, zal later aanvulling met wat grond nodig zijn om de grondafdekking op de gewenste dikte te houden. Dit is ook van toepassing op de plaatsen waar de draineermachine stuit op oude boomstobben in het bosveen. Na uitgraven van de stobben is grond nodig om de kuil op te vullen en mogelijk ook na te vullen in een later jaar.

Registratiesysteem

Zorg voor een toegankelijk registratiesysteem, waarmee de sloot-, put- en grondwaterstanden continue draadloos kunnen worden gevolgd. In de pilot was dit voor de grondwaterstand mogelijk met behulp van het dashboard van Fixeau dat door AcaciaWater ter beschikking was gesteld. Dit bood de mogelijkheid om het verloop van de grondwaterstand vanaf dag 1 te volgen en in te zoomen op de laatste maand en laatste week. Bovendien gaf het een voorspelling voor de eerstkomende dagen waarin het verloop van de laatste dagen en de weersverwachting zijn meegenomen. Het dashboard bood ook de mogelijkheid om terug te kijken in tijd. Door met de cursor langs de grafiek te schuiven, verscheen de grondwaterstand in beeld op de plaats van de cursor. De sloot- en putwaterstanden werden niet geregistreerd met Fixeau, maar met meetcentrale.nl. Hierdoor kon het verloop in de tijd niet worden gevolgd. Registratie met een dashboard met dezelfde mogelijkheden als Fixeau zijn voor de schuifbeheerder(landgebruiker) noodzakelijk om de verlopen in grondwaterstand, putwaterstand en slootwaterstand in samenhang met elkaar te kunnen volgen en daarop te kunnen besluiten of de schuif wordt opengezet of dicht gehouden.

De putwaterstand in relatie tot de slootwaterstand geeft inzicht in het functioneren van het systeem. De buis tussen put en sloot is in de sloot verbonden met een geperforeerde buis. Op deze buis vormt zich een bruinzwarte aanslag die na verloop van tijd de in- en uitstroom kunnen vertragen en mogelijk blokkeren. Dit kan worden gesignaleerd door de putwaterstand in samenhang met de slootwaterstand en de grondwaterstand te volgen. Loopt tijdens drainage de uitstroom naar de sloot terug, dan zal de putwaterstand ten opzichte van het slootpeil hoger worden en omgekeerd zal deze lager worden wanneer de instroom bij infiltratie terugloopt. Dit is een signaal om de buis en schuif te controleren en schoon te maken. Om dit voor te zijn, wordt aangeraden 2 maal per jaar de buis en schuif schoon te maken, in het voorjaar ter voorbereiding van het infiltraties seizoen en in het najaar voor het drainage seizoen.

De putwaterstand in relatie tot de grondwaterstand geeft inzicht in het functioneren van het systeem in de bodem. Loopt tijdens drainage de instroom van water in de put terug en stijgt daarbij de grondwaterstand ten opzichte van de putwaterstand dan is dit een signaal dat de drainerende functie van het systeem terugloopt. Loopt tijdens infiltratie de instroom in de bodem terug en stijgt daarbij het grondwater minder dan voorheen, dan is dit een signaal dat de infiltrerende functie van systeem terugloopt. Dit is een reden om de bodem van de put en de aansluiting van de verzamel drain op de put te inspecteren. Als dat in orde is, maar twijfel blijft bestaan over het functioneren, wordt aangeraden om met een onderwatercamera de aansluiting de potjes in de dwarsbuis en de aansluitingen van de drains op de potjes te inspecteren. Verstopping in drains zelf is onwaarschijnlijk, omdat de drains in het onveraaarde veen liggen. Bij goed beheer liggen ze dan permanent onder water. Onder deze zuurstofloze omstandigheden vormen zich geen ijzeroxides(roest) in de drains, waardoor anders dan in droogmakerijen schoonspuiten niet nodig is. In de droogmakerijen (polders Noordplas en Zuidplas) is roestvorming in drains een bekend verschijnsel'. Het kwelwater is ijzerhoudend, Bij blootstelling aan lucht oxideert dit in de drains die hier boven het slootwaterpeil liggen. Regelmatig schoonspuiten is daar nodig om de drainerende functie te behouden.

Schuifbeheer

Actief grondwaterbeheer vraagt om adequaat inspelen om veranderende weersomstandigheden en de doorwerking ervan op de grondwaterstanden.

Vragen als wanneer wordt in het voorjaar de schuif dicht gezet om de drainage te stoppen en wanneer wordt bij drogend weer overgeschakeld op infiltratie en hoe te handelen bij tussentijdse zomerse regenbuien tijdens infiltratie, vragen van de landgebruiker een attente en actieve betrokkenheid bij het grondwaterbeheer.

Het schuifbeheer doorloopt een jaarlijkse cyclus. In de winter wordt het systeem gebruikt voor drainage en in de zomer bij aanhoudende droogte voor infiltratie. Op basis van deze cyclus kunnen 4 fasen worden onderscheiden. Als leidraad voor de landgebruiker is deze fasering hieronder uitgewerkt.

Fasering in het schuifbeheer

Fase 1 drainerende fase (Winter)

Schuif staat open om het neerslagoverschot af te voeren

Fase 2 drainerend afbouwende fase (overgang naar voorjaar)

Schuif staat dicht, maar wordt na regen weer open gezet

Komend uit een natte winter zal na overgang naar een droog voorjaar de uitstroom van water overgaan naar instroom van slootwater. Door op dat moment de schuif dicht te zetten, wordt onnodige infiltratie voorkomen.

Wanneer daarna het drogend weer niet doorzet, maar wordt onderbroken door regen waarbij de grondwaterstand stijgt tot boven het slootpeil, wordt de schuif tijdelijk weer opengezet om de drainerende functie voort te zetten en weer dichtgezet wanneer de uitstroom overgaat naar instroom. Dit is bedoeld om de bovengrond 'droog' te laten groeien en daarmee weer structuur en draagkracht te geven. Geadviseerd wordt om Fase 2 te laten duren tot en met de eerste grasoogst of tot aan de start van beweiding met koeien. De bovengrond krijgt dan de mogelijkheid om voldoende droog te worden en weer voldoende structuur en draagkracht te krijgen.

Wanneer na dicht zetten van de schuif de droogte wel doorzet, daalt de grondwaterstand snel. Door zodra de grenswaarde voor infiltratie wordt bereikt, de schuif open te zetten start Fase 3.

Geadviseerd wordt een grenswaarde te kiezen die samenvalt met de diepte waarop de veraarde bovengrond overgaat in het onveraarde veen. Als indicatie; deze overgang begint waarschijnlijk binnen 10 cm onder slootpeil. Bij sterk drogend en groeizaam weer wordt deze grenswaarde snel bereikt. In de pilot daalde de grondwaterstand in het extreem droge jaar 2022 met 1,5 tot 2 cm per dag. Voorkomen dient te worden dat de drains droogvallen en door het ontstaan van luchtbellen in de drains, waardoor de werking verloren gaat.

Een bijzondere situatie kan zich voordoen in een extreem droog voorjaar in combinatie met een niet volledig bodembedekkende vegetatie. De bovengrond is dan gevoelig voor korst- en scheurvorming. Aangeraden wordt de schuif, wanneer dit wordt geconstateerd, al open te zetten, wanneer de grondwaterstand gedaald is tot onder het slootpeil.

Fase 3 infiltrerende fase (voorjaar - zomer)

Schuif staat open voor infiltratie.

Bij aanhoudende droogte blijft de grondwaterstand bij infiltratie naar verwachting stabiel op ongeveer 5 á 10 cm onder het slootpeil.

Om bij het oogsten van het gras de bodem voldoende draagkracht te geven om insporing te voorkomen en verdichting te beperken, wordt aangeraden om tijdig, denk aan 1 week, voor het maaien de schuiven dicht te zetten. Houd de droogte aan, zet dan na de oogst de schuiven weer open.

Doorgaans wordt een droge periode tijdelijk onderbroken door regen. Dit kan een kleine, grote of een extreem grote bui zijn met veel regen in korte tijd, of meerdere kleine buien gedurende enkele dagen. Schuifinfiltratie biedt dan de mogelijkheid om regenwater te sparen en te besparen op infiltratie van slootwater.

Bij een kleine bui stijgt de grondwaterstand niet tot boven het slootpeil en gaat er geen regenwater verloren. Bij een grote bui kan dit wel. Naar verwachting stijgt bij een bui van meer dan ca 20 mm bij openstaande schuif het grondwater tot boven het slootpeil. Door op dat moment de schuif dicht te zetten wordt onnodig verlies van regenwater voorkomen. Valt er echter zoveel regen dat wateroverlast dreigt, dan is het wenselijk de schuif tijdelijk weer open te zetten voor drainage. Aangeraden wordt bij een grenswaarde van ca 10 cm boven het slootpeil de schuif open te zetten en deze na daling van de grondwaterstand tot net boven het slootpeil weer dicht te zetten om zo nog een deel van het regenwater te sparen en daarmee het moment van open zetten voor infiltratie uit te stellen.

Verdere besparing in Fase 3 is mogelijk door gebruik te maken van het concept van het eb- en vloedstelsel dat sommige glastuinders bij het telen van potplanten op vloeren in hun kassen toepassen. Dit kan ook worden toegepast op een veenweideperceel met dit drainagesysteem en wel op de volgende wijze. Na starten van de infiltratie stijgt de grondwaterstand snel en stabiliseert na enkele dagen tot nabij het slootpeil. Wanneer deze stabiel is, zet dan de schuif dicht en zet deze weer open wanneer de grenswaarde voor infiltratie wordt bereikt. Door toepassing van dit systeem wordt de buffercapaciteit van de bodem optimaal benut om regenwater te sparen en wordt bespaard op het gebruik van oppervlaktewater voor infiltratie.

Op hol liggende percelen zonder middengreppel kunnen na een intense regenbui plassen in het midden van het perceel ontstaan. Bij lang aanhoudende plassen, bijvoorbeeld langer dan een week, wordt aangeraden de schuif open te zetten om het overvloedige regenwater via de drains af te voeren en nadat de plassen zijn verdwenen en er geen water meer uitstroomt de schuif weer dicht te zetten. Wanneer wel een middengreppel op het perceel aanwezig is, houd deze dan in stand. Bij intense regenbuien stroomt het water op hol liggende percelen oppervlakkig af naar het midden van het perceel. In de pilot is gebleken dat de drainerende functie van het systeem in najaar en winter, na afsluiting van de greppel, alleen niet voldoende is om plasvorming en de elkaar versterkende negatieve gevolgen van plassen op een veenweideperceel te voorkomen, zoals: verslumping, verdichting, verlies bodembedekkende vegetatie, opbrengstderving. Door de greppel in stand te houden wordt dit vermeden.

Wanneer na regen in de zomer de droogte terugkeert, zet dan de schuif weer open, zodra de grenswaarden voor infiltratie zijn bereikt. Worden deze grenswaarden niet meer bereikt, dan blijft de schuif dicht en wordt deze in het najaar opengezet wanneer de grondwaterstanden gestegen zijn tot boven het slootpeil. Gedurende de winter blijft de schuif open staan. Hiermee is de jaarlijkse cyclus rond.

Literatuur

- 1 Integrale eindrapportage Pilotproject bodemdaling Polder Bloemendaal, Regiodeal Bodemdaling Groene Hart, februari 2025
- 2 Publiekssamenvatting pilotproject bodemdaling Polder Bloemendaal, februari 2025
- 3 Innovatieve inzichten voor het beter omgaan met bodemdalingsvraagstukken. Magazine Regio Deal bodemdaling Groene Hart, februari 2024, blz. 38-39.
- 4 Hydrologische Analyse Bloemendaal; Tessa van Hateren en Frouke Hoogland, Acaciawater, 12 december 2024.
- 5 Broeikasgas-fluxen uit een koopveenbodem in Polder Bloemendaal (Waddinxveen, Zuid-Holland): Ko van Huissteden, Kytalyk Carbon Cycle Research, maart 2024.

PWIS.

Het schuifinfiltratie- en drainagesysteem dat is toegepast in het pilot project wordt landelijk PWIS genoemd. Dit wordt omschreven als een bijzondere vorm van een **Passief WaterInfiltratieSysteem (PWIS)**. In de integrale eindrapportage wordt dit aangeduid als **SchuifInfiltratie- en DrainageSysteem (SIDS)**.

N.B.

Op grond van de ervaringen in de Polder Bloemendaal wordt segmentering ontraden. Het heeft onvoldoende meerwaarde (Lit 1).



Weids Bloemendaal

