

SAMENVATTING RAPPORTAGE JAAR 3

NATIONAAL ONDERZOEKSPROGRAMMA BROEIKASGASSEN VEENWEIDEN

NOBV-onderzoeksconsortium, definitieve versie d.d. 14 juni 2023

Dit is de samenvatting van de 14 hoofdstukken die in het voorjaar van 2023 door het onderzoeksconsortium van het NOBV zijn opgeleverd. Deze samenvatting beperkt zich tot de inhoud van de 14 hoofdstukken en is daarmee geen review van alle bestaande kennis. De tekst in deze samenvatting is uitsluitend opgesteld op basis van de informatie uit deze hoofdstukken. Bij onduidelijkheden in de samenvatting of indien behoefte is aan meer diepgang, is het aan te raden om de onderliggende hoofdstukken te raadplegen.

In deze samenvatting wordt eerst gekeken naar de effecten van waterinfiltratiesystemen op de grondwaterstanden, de bodembeweging, de biogeochemie en op de uitstoot van CO₂. Vervolgens wordt de relatie tussen CO₂ uitstoot en grondwaterstand besproken en worden de effecten van paludicultuur behandeld. Ook is er informatie opgenomen over de andere broeikasgassen die vrijkomen in veengronden, methaan (CH₄) en lachgas (N₂O), en hoe die zich tot CO₂ verhouden. De samenvatting gaat verder met de resultaten van de metingen vanuit vliegtuigen en de resultaten uit de modelstudies. De samenvatting sluit af met bodemkenmerken: de koolstofgehaltebepalingen, de basisrespiratiemetingen en de lange termijn bodemdalingsbepalingen met zakplaatjes.

Voor de meeste analyses die zijn uitgevoerd in de hoofdstukken geldt dat deze gebaseerd zijn op ca 2 jaar aan meetdata, in sommige gevallen op 1 jaar. Tegelijkertijd is het duidelijk dat er aanzienlijke weersinvloeden zijn op de broeikasgasdynamiek en ook bijvoorbeeld op de bodembeweging. Dit betekent dat met meer meetjaren de uitkomsten zullen gaan veranderen. Gezien de plaatselijke variatie die voorkomt zullen de uitkomsten ook veranderen als er meer meetlocaties worden toegevoegd. Bij meer meetgegevens neemt de mogelijkheid toe om de statistische betrouwbaarheid van de uitkomsten te vergroten. Het is daarom belangrijk om de metingen voort te zetten en de beschikbare data te vergroten. Alleen dan kunnen locatie-specifieke patronen en variaties in uitstootgetallen van jaar tot jaar worden verklaard.

De onzekerheid en variatie in de bepaalde uitstoot en het beperkte aantal gekoppelde locaties vraagt verder om zorgvuldigheid met het trekken van conclusies in deze fase en dit is terug te lezen in deze samenvatting.

1. Effecten van waterinfiltratiesystemen en andere grondwaterstandmaatregelen

Grondwaterstand

Het effect van passieve en actieve waterinfiltratiesystemen op de dynamiek van de freatische grondwaterstand is getest op vijf locaties in het Nederlandse veenweidegebied. Infiltratiesystemen zijn ontworpen om de verlaging van de freatische grondwaterstand in de zomer te beperken en de freatische grondwaterstand in de winter te verlagen. Uit de resultaten (over de periode zomer 2020-eind 2022) blijkt dat op drie van de vijf locaties (Aldeboarn, Assendelft, Zegveld) de gemiddelde freatische zomergrondwaterstand in het waterinfiltratiesysteem perceel minder diep uitzakte dan in het referentieperceel, met verschillen tussen 4 en 27 cm. Op één locatie werd slechts gedurende één

(droge) zomer een gering effect waargenomen (Vlist). Op de vijfde locatie, die gelegen is in een gebied met opwaartse kwel (Rouveen), stimuleerde het infiltratiesysteem de drainage van grondwater, waardoor de freatische grondwaterstand in de zomer dieper daalde dan in het referentieperceel. Het effect op de winterdrainage is minder uitgesproken, uitgaande van de gemiddelde wintergrondwaterstanden. Toch is in veel situaties de gemiddeld hoogste wintergrondwaterstand in het maatregelenperceel wat lager dan in het referentieperceel, wat erop wijst dat in de winter extra drainage plaatsvindt.

Uit deze resultaten wordt duidelijk dat waterinfiltratiesystemen over het algemeen het uitzakken van de zomer freatische grondwaterstanden beperken. In een droge zomer, zoals die in 2022 is het effect van de infiltratiesystemen op de freatische grondwaterstanden het duidelijkst. Verder tonen onze bevindingen aan dat slootwaterbeheer (vooral dat het slootwaterpeil in de zomer minimaal 20 cm boven de draandiepte moet liggen) en drainonderhoud van groot belang zijn voor het bereiken van een substantiële verhoging van de freatische grondwaterstanden en dus het gewenste effect van een waterinfiltratiesysteem. Daarnaast zijn de hydrologische condities (kwel, wegzijging) en de drainafstand bepalend voor de effectiviteit van de infiltratiesystemen. Uit de resultaten lijken de actieve waterinfiltratiesystemen effectiever te werken dan de passieve infiltratiesystemen, en dit lijkt met name een resultaat van de grotere overdruk die bij actieve infiltratiesystemen wordt behaald. Mogelijk kan eenzelfde effectiviteit worden behaald met een passief infiltratiesysteem in combinatie met een relatief hoog slootpeil.

Bodembeweging/Bodemdaling

De effecten van infiltratiesystemen op verticale bodembewegingen zijn geëvalueerd, op basis van gegevens van de eerder genoemde vijf locaties in het veenweidegebied van Nederland voor de jaren 2021 en 2022. De jaarlijkse verticale beweging van het maaiveld, dat wil zeggen de seizoensgebonden bodemdaling en -stijging, is in de orde grootte van meerdere centimeters. De grootste seizoensgebonden daling die in deze studie werd gemeten was bijna 10 cm, gemeten in de droge zomer van 2022 in een gebied met een relatief dikke (6 m) veenlaag.

De seizoensdaling is ongeveer een orde van grootte hoger dan de lange termijn daling, die in de Nederlandse gedraineerde veengebieden meestal in de orde grootte van mm per jaar ligt. Daarom zijn meerjarige meetreeksen nodig om de seizoensgebonden dynamiek eruit te filteren en de bodemdaling op lange termijn te schatten. Op dit moment zijn de meeste meetreeksen nog te kort om lange termijn bodemdaling vast te stellen. Op een aantal meetlocaties is de meetreeks inmiddels wel (net) lang genoeg (>4 jaar) voor het bepalen van de lange termijn bodemdaling. In Rouveen is een lange termijn bodemdaling gemeten van 5 mm per jaar in het referentieperceel en 13 mm per jaar in het perceel met waterinfiltratiesysteem. Hier heeft het infiltratiesysteem met name een drainerende werking, dat zorgt voor lagere grondwaterstanden en een grotere bodemdaling. In Vlist is de lange termijn bodemdaling (>10 jaar) 5,5 mm per jaar (zie verder bij paragraaf modellering). In Zegveld is de lange termijn bodemdaling (>50 jaar) tussen de 4,5 en 6,3 mm jaar⁻¹ (wordt besproken bij hoofdstuk lange termijn bodemdalingmetingen). De genoemde snelheden van 4-6 mm per jaar passen goed bij het beeld dat voor West-Nederland bestaat van de lange termijn bodemdaling in de veenweidegebieden bij regulier beheer.

Bodembewegingen op korte termijn (dagelijks tot maandelijks) zijn positief gerelateerd met veranderingen in de freatische grondwaterstand. Opmerkelijk is de grote rol van poroelastische

deformatie (elastische veranderingen in de grootte van de bodemporiën) van de verzadigde ondergrond (dieper dan ~0.80 m onder maaiveld), aangedreven door veranderingen van de freatische grondwaterstand. De bijdrage van deze poroelastische deformatie aan de totale maaiveldbeweging bedraagt tussen de 30 en 95%, vaak dus op deze tijdschalen meer dan de processen in de onverzadigde zone (krimp/zwel en veenafbraak).

Waterinfiltratiesystemen, mits goed aangelegd, gebruikt en beheerd, beperken de dynamiek in de grondwaterstand. Door het beperken van het uitzakken van de grondwaterstand in de zomer worden in de onverzadigde zone krimp en zwel beperkt en in de verzadigde zone de poroelastische respons. Daarmee verlagen waterinfiltratiesystemen de bodembeweging door het jaar. Op langere termijn wordt ook een vermindering van de fysische lange termijn bodemdaling verwacht, omdat de kans op permanente krimp, consolidatie en kruip verminderd wordt. Ook wordt minder bodemdaling door veenafbraak verwacht bij hogere grondwaterstanden.

Biogeochemie

De effecten van waterinfiltratiesystemen op de poriewatersamenstelling van de bodem zijn onderzocht op zeven onderzoeklocaties van het NOBV om te bepalen hoe deze infiltratiesystemen de biogeochemische processen in de bodem beïnvloeden. Van 2020 tot 2022 werden oppervlaktewater-, drainwater- en poriewatermonsters verzameld in vijf gepaarde onderzoeklocaties met maatregelen- en referentiepercelen en twee onderzoeklocaties waarin infiltratie werd gecombineerd met verhoogde oppervlaktewaterniveaus. De watersamenstelling in referentiepercelen weerspiegelde de dominantie van oxidatieprocessen tijdens droge perioden in de bovenste bodemlagen (bovenste 75 cm), met hoge concentraties zwavel, calcium en magnesium, lage concentraties ijzer, fosfor en ammonium en een lage pH. De percelen met infiltratiesystemen werden daarentegen gedomineerd door reductieprocessen in de bovenste bodemlagen, met hogere concentraties ijzer-ijzer, fosfor, ammonium en methaan dan de referentiepercelen, zowel tijdens natte als droge perioden. Onze resultaten tonen aan dat waterinfiltratiesystemen leiden tot een stabielere redoxzonering en dominantie van anaerobe afbraak van organisch materiaal en bodemprocessen, zoals sulfaatreductie en methanogenese, gedurende het hele jaar. De effecten zijn het sterkst tijdens droge perioden, dicht bij de infiltratiebuis en wanneer actieve waterinfiltratiesystemen werden toegepast. Opmerkelijk is dat zelfs in diepere bodemlagen (~120 cm diepte) effecten van de waterinfiltratiesystemen worden waargenomen.

Effecten op CO₂ emissies

Door het NOBV wordt met geautomatiseerde transparante kamers op 12 veenweidepercelen in Nederland gemeten om de netto ecosysteem koolstofbalans (NECB; de koolstofbalans op jaarbasis; uitstoot (positief getal) of opname (negatief getal)) te bepalen op jaarbasis. De gegevens wijzen op een verlaging van de NECB in de meeste gevallen met 3,8 ton CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ door de waterinfiltratiesystemen in de afgelopen 2 jaren met een droge (2022) en een normale tot natte zomer (2021), hoewel het bewijs statistisch gezien zwak is ($p = 0.071$). Het berekende 95% betrouwbaarheidsinterval varieert van -0,3 tot 7,8 ton CO₂ per ha per jaar. Dit betekent dat het effect van de waterinfiltratiesystemen variërend van een lichte toename van CO₂-uitstoot tot een grote reductie van CO₂-uitstoot redelijkerwijs wordt ondersteund door onze gegevens. De getallen die verder afdalen van de genoemde 3,8 ton (en alle waarden die daar dicht bij in de buurt liggen) zijn daarbij veel onwaarschijnlijker.

Op basis van de set aan gegevens hier gebruikt is de kans dat de waterinfiltratiesystemen de uitstoot vergroten in plaats van reduceren desalniettemin klein: ca 3%. Hierbij moet worden aangetekend dat bij het bepalen van deze getallen data van vier van de vijf gepaarde meetlocaties met een referentie- en maatregelperceel zijn gebruikt. Data van de locatie met opwaartse kwel (Rouveen) zijn weggelaten, aangezien dit systeem voornamelijk drainerend werkt. De grote variatie van jaar tot jaar en gebied tot gebied van de NECB vereist meerjarige metingen per locatie en vervolgens een verdiepende analyse om de effecten van waterinfiltratiesystemen op CO₂-uitstoot verder vast te stellen.

Ook met de eddy covariance (EC) meetmethode zijn netto-ecosysteemkoolstofbalansen bepaald voor plaatsen waar maatregelen zijn genomen. Hierbij is niet alleen gekeken naar waterinfiltratiesystemen zoals onderwaterdrainage en drukdrainage. De EC meetdata tot nu toe, over slechts een (droog) meetjaar en voor steeds slechts één gepaarde meetlocaties (maatregel en referentie) laten voor greppelinfiltratie en passieve waterinfiltratiesystemen een duidelijke afname van emissies zien ten opzichte van de referentie, maar voor het zogenaamde HAKLAM (hoog als het kan, laag als het moet) een toename. In beide gevallen is de kans dat het effect tegengesteld was minder dan 5%. Ook voor een EC meetlocatie met drukdrainage werd een relatief hoge, in plaats van een gereduceerde uitstoot, waargenomen (hier was geen referentie EC-meting aanwezig). De metingen suggereren dat de aanwezigheid van een kleidek in 2022 geassocieerd was met lagere emissies.

Informatief is de situatie in Rouveen. Hier zorgt het waterinfiltratiesysteem voor drainage en niet of nauwelijks voor infiltratie, met name omdat de opwaartse kwel op deze locatie door de infiltratiesystemen wordt afgevangen. De metingen in Rouveen suggereren dat het waterinfiltratiesysteem in een kwelsituatie de grondwaterstand verlaagt, de bodembeweging vergroot, de bodemdaling versterkt en de CO₂-uitstoot vergroot.

Variatie in CO₂ emissies in het landschap

De gegevens laten zien dat de gemeten NECB's met kamersystemen aanzienlijk varieerden, van -3 (wat wijst op netto opname) tot 23 ton uitstoot van CO₂ per hectare per jaar. Uit de meetgegevens verkregen met de EC methode blijkt een hoge opname en uitstoot door natte vormen van landgebruik, resulterend in een netto opname van CO₂. Bemeste natte teelten lieten geen consistent hogere opname zien, hoewel deze wel hogere bruto opname en uitstoot lieten zien dan de minder voedselrijke natuurlijke wetlands. Daarentegen zijn graslanden op veen over het jaar in het algemeen netto-emitterend. Gedurende het begin van de zomer nemen deze locaties koolstof op, maar door de uitstoot gedurende de rest van het jaar is er netto uitstoot als naar de jaarbalans wordt gekeken.

De relatie tussen grondwaterstanden en de NECB

Met grote zekerheid is te zeggen dat er een relatie bestaat tussen zowel de jaar- als zomergemiddelde grondwaterstand en de NECB. De relatie laat zien dat hogere grondwaterstanden leiden tot een lagere NECB (lagere uitstoot). Op basis van deze gegevens is er een kans kleiner dan 5% dat hogere grondwaterstand juist tot hogere emissies van CO₂ leiden.

Dit bewijs is statistisch sterk als de verschillende datasets (kamermetingen, EC metingen en mobiele metingen) worden gecombineerd. Op basis van losse datasets is dit bewijs minder sterk: van matig tot geen bewijs. Zo is de NECB op basis van de EC metingen voor alle locaties (met een grotere

diversiteit) slechts zwak gerelateerd aan de gemiddelde jaarlijkse grondwaterstanden (en nog zwakker met zomergemiddelde grondwaterstanden). Bij meer meetpunten in tijd en ruimte kan de zekerheid waarmee een relatie wordt vastgesteld vergroot worden.

Op basis van alleen de kamermetingen is sprake van een lineaire relatie tussen de zowel jaar- als zomergemiddelde grondwaterstand en NECB. Het (statistische) bewijs voor de relatie tussen de jaargemiddelde grondwaterstand en NECB is matig en er is statistisch weinig bewijs voor een relatie tussen zomergemiddelde grondwaterstand en NECB. Wanneer alle NECB's uit de kamermetingen worden meegenomen, geven onze gegevens het meeste bewijs voor een reductie van 2,9 ton CO₂ per ha per jaar per 10 cm stijging van de jaargemiddelde grondwaterstand. Het is 95% zeker dat deze relatie zit tussen 0,4 en 5.3 ton CO₂ per ha per jaar CO₂.

Op basis van de metingen met EC-masten laat de gevonden relatie zien dat elke 10 cm grondwaterstandsverhoging de uitstoot met gemiddeld 2,2 ton CO₂ per ha per jaar vermindert, echter de bandbreedte rondom deze getallen is groot.

De onzekerheden rondom deze relaties zijn aanzienlijk, onder andere doordat het vaststellen van de voor de berekening benodigde grasopbrengst en mestinput op perceelschaal erg onzeker was. Maar belangrijk is ook dat er daadwerkelijk een grote aanwezige (fysisch-bepaalde) variatie is in NECB's bij een bepaalde grondwaterstand. Omstandigheden zoals bodemvocht, bodemtemperatuur, koolstofgehalte van de bodem, toestand van de bodemkoolstof en redoxomstandigheden bepalen allemaal mede de NECB bij een bepaalde grondwaterstand. Hiermee is de gevonden relatie ook niet zaligmakend: er zijn immers vele relaties te vinden tussen grondwaterstand en NECB binnen de aanwezige variatie. Belangrijker is het daarentegen om begrip op te bouwen over de redenen die de variatie kunnen verklaren. Op basis van deze redenen (mechanistisch begrip) kan vervolgens de variatie ook voorspeld worden.

Op basis van zowel de kamermetingen als van de EC metingen is duidelijk dat de nachtelijke CO₂ uitstoot van ecosystemen sterk afhangt van de bodemtemperatuur en de cumulatieve bruto primaire productie (fotosynthese) van de voorafgaande dag, en niet van de grondwaterstand lijkt af te hangen. Mogelijk is een eventueel effect van grondwaterstand door ruis of door de correlatie met temperatuur niet detecteerbaar. Wij stellen een potentieel interessante methode voor om deze respiratiecomponent uit te sluiten en de bodemrespiratie component van de gemeten NEE (netto ecosysteemitwisseling, zonder aan- of afvoer van koolstof) te modelleren, die we kunnen associëren met de respiratie en emissie uit alleen veen en ander dood organisch materiaal. Deze relatie liet zien dat ook op kortere tijdschalen van weken tot seizoenen deze emissie op een logisch verklaarbare manier van temperatuur en grondwaterdiepte afhing in vrijwel alle meetlocaties. De relatie met grondwaterdiepte lijkt op deze tijdschalen wel af te vlakken bij grotere grondwaterdiepte.

Verhoudingen tot eerder gevonden waarden

Opmerkelijk is dat de grondwaterstand-NECB-relatie in deze studie over het algemeen lagere NECB's voorspelt dan de meeste relaties die in de literatuur zijn gerapporteerd en lager dan diegenen die eerder in Nederland zijn gemeten. De NECB's zijn ook lager dan de IPCC-emissiefactoren voor gecultiveerde, gedraineerde organische bodems in de gematigde klimaatzone (ook inclusief nutriënt-arme organische bodems). Aan de andere kant zijn de gevonden NECB's hoger dan NECB's en relaties uit gebieden waarbij ook is gemeten in voedselarme (oligotrofe) veenaangroeigebieden.

Deels kunnen deze verschillen daarmee het gevolg zijn van daadwerkelijke fysische verschillen tussen gebieden waar wordt gemeten. Daarnaast is vastgesteld dat bij niet-continue metingen die in het verleden elders zijn gebruikt, de benodigde gap-filling om tot continue fluxen te komen, aanzienlijke over- of onderschattingen kunnen optreden van de jaarlijkse flux. Deze bevindingen wijzen ook op de noodzaak van aanvullend onderzoek, met inbegrip van methodologische vergelijkingen, om de waargenomen verschillen te verklaren.

2. Effecten van paludicultuur

Binnen het NOBV wordt op drie paludicultuur locaties gemeten, die nog niet allemaal volledig als paludicultuur functioneren: nat grasland met aanzienlijk deel open water met ontwikkeling naar veenmossengroei en eventueel teelt (Ilperveld), en twee locaties met lisdoddeteelt (Ankeveen en Zegveld).

In de paludicultuurlocaties waren de jaargemiddelde grondwaterstanden 29 tot 39 cm verhoogd in vergelijking met de bekeken waterinfiltratiepercelen. De CO₂-opname door vegetatie (GPP - gross primary production) was het hoogst in de beide lisdoddelocaties (Ankeveen, Zegveld). De ecosysteemrespiratie (R_{eco}) was lager dan uit gedraineerde grasland, daardoor lieten beide lisdodde locaties de laagste netto ecosysteemuitwisseling (NEE) zien. Beide locaties met lisdodde bleken koolstof op te slaan (een opname van 2,3 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ en 4,6 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ voor respectievelijk Zegveld en Ankeveen). Het natte grasland (Ilperveld) had een kleinere seizoensamplitude in totale CO₂-flux en de beide fluxen (GPP, R_{eco}).

De geanalyseerde paludicultuurlocaties stootten aanzienlijke hoeveelheden CH₄ uit in 2021/2022. De methaanemissie correleerde goed met de bodemtemperatuur, maar weinig met de grondwaterstand. De hoogste CH₄-emissie werd waargenomen in juni/juli, wanneer de pompactiviteiten het grootst waren (Zegveld) en er veel open water was (Ilperveld). Vooral deze hoge zomeremissies dragen bij aan de totale jaarlijkse CH₄-emissies (10,3 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹ en 14,7 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹ voor respectievelijk Ilperveld en Zegveld).

Als de netto CO₂ en CH₄ samen worden genomen (uitgedrukt in CO₂ equivalenten) dan rangschikken de locaties Ankeveen/lisdodde (2,8 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹) << Zegveld/lisdodde (13,1 t CO₂e) = Ilperveld/nog zonder veenmos (14,3 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹) = Langeweide/passieve waterinfiltratie (14,0 t CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹) << Assendelft/actieve waterinfiltratie (22,4 t CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹). De export van CO₂ (oogst) is voor alle percelen meegerekend, er wordt geen koolstofvastlegging in de geoogste biomassa aangenomen. De uitstoot van Ilperveld, Zegveld en Ankeveen was even hoog of duidelijk lager dan EC metingen op graslandpercelen met waterinfiltratiesystemen (0-19,6 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹). Extra meetjaren zijn nodig om deze bevindingen verder te bevestigen en te onderbouwen.

De lage emissie van de paludicultuurlocatie in Ankeveen kan het gevolg zijn van beperkte overstroming en open water en de mate waarin met planten en gewassen gemakkelijk koolstof vastleggen, CH₄ uit de bodem naar de lucht transporten, en CH₄ oxideren (bijvoorbeeld smalbladige lisdodde, zegge). Daarentegen kan de intermediaire broeikasgasemissie in de paludicultuurlocatie in Zegveld verband hebben gehouden met de grote instroom van warm en koolstofrijk water (invoer van makkelijk afbreekbaar organisch materiaal en opgelost CH₄) en het aanwakkeren van CH₄ productie door ter plaatse achtergelaten geoogste biomassa. Het vullen van het open water en de natte delen op het land met methaan-oxiderende *Sphagnum*-mossen zou een lange termijn oplossing zijn om de CH₄-emissie effectief te verminderen.

Deze eerste metingen laten zien dat paludicultuur (in dit geval meer specifiek lisdodde-teelt) onder bepaalde omstandigheden kan samengaan met lage broeikasgasuitstoot (netto < 5 t CO₂e ha⁻¹ jaar⁻¹). Deze lage broeikasgasuitstoot kan bereikt worden als het potentieel voor koolstofvastlegging wordt verwezenlijkt, en tegelijkertijd de uitstoot van methaan laag of gematigd is. In dit meetjaar is dat het geval voor de locatie Ankeveen. Het is belangrijk om dit effect over meerdere jaren vast te stellen.

3. Andere broeikasgassen in veengebieden

Bepalen van het totale opwarmend effect van broeikasgassen

Veranderingen in landgebruik of ecosystemen leiden gewoonlijk tot een verandering van de netto broeikasgasflux van het ecosysteem. Dit kunnen broeikasgassen zijn met verschillende atmosferische levensduren en stralingseigenschappen; naast CO₂ ook CH₄ en N₂O. Reductie van de uitstoot van het ene broeikasgas moet afgewogen kunnen worden tegen eventuele toename van de uitstoot van andere broeikasgassen. Bijvoorbeeld een blijvend hoge emissie van het broeikasgas CO₂ met een lange verblijftijd in de atmosfeer kan schadelijker zijn dan een lichte toename van het veel sterkere, maar kortlevende broeikasgas CH₄ die gepaard gaat met een reductie van CO₂.

Het gangbare gebruik van het Global Warming Potential (GWP) voor de evaluatie van het klimaateffect van een combinatie van broeikasgassen door landgebruik- of ecosysteemtransitie staat echter ter discussie. Het GWP gaat uit van een eenmalige impulsemissie. Het gaat niet in op de min of meer stapsgewijze, aanhoudende veranderingen en geleidelijke overgangen die bij landgebruik- of ecosysteemveranderingen een rol spelen en hanteert tamelijk arbitraire tijdschorsen van 20 of 100 jaar.

Er zijn verschillende wetenschappelijk verantwoorde alternatieven voor het GWP voorgesteld, zoals GWP-ster (GWP*). GWP* vertoont afwijkende resultaten ten opzichte van de andere berekeningsmethoden doordat het effect van CH₄ wordt onderschat. Stralingsmodellering, waarvoor eenvoudig toe te passen modelcode is gepubliceerd, presteert het best. Hiermee kunnen klimaateffecten op verschillende tijdschalen worden berekend zonder de starheid van andere methoden en is een uitgebreide onzekerheidsanalyse mogelijk. GWP blijft de meest beleidsrelevante metriek, omdat dit aansluit bij de bestaande praktijk en onbevooroordeeld is; wel is het aan te bevelen om onzekerheden en verschillen in korte en lange termijn effecten te analyseren, bijvoorbeeld met stralingsmodellering.

Op basis van de voorbeeldberekeningen blijkt dat in alle methoden wordt berekend dat vernatting van veengebieden de uitstoot van broeikasgassen (en de opwarming van het klimaat) vermindert. Voor deze NOBV rapportage is de standaard GWP over 100 jaar gebruikt, om de data vergelijkbaar te houden met eerder gepubliceerde data.

CH₄ emissie

Sinds 2021 wordt door het NOBV in een omvangrijk meetnetwerk CH₄ gemeten met permanente en mobiele eddy covariance systemen en automatische statische kamers. De meetlocaties omvatten melkveehouderijgebieden waar passieve of actieve waterinfiltratiesystemen of hoge

slootwaterpeilen zijn toegepast om hogere grondwaterstanden te bewerkstelligen, locaties met paludicultuurgewassen, vernalde gebieden met natuurlijke vegetatiebegroeiing, oudere semi-natuurlijke veengebieden, en een meer. Voor de meeste waterinfiltratiesystemen locaties zijn referentielocaties aanwezig.

De gegevens voor de meeste locaties bestreken minder dan een jaar, wat onvoldoende is voor definitieve conclusies over broeikasgasfluxen. Een gedetailleerde analyse van de eddy covariance gegevens (testen van gap filling algoritmes, footprint analyse) is nog niet afgerond. Niettemin geeft de hier gepresenteerde voorlopige gegevensanalyse inzicht in verschillen van grootte in CH₄-emissies, die als leidraad kunnen dienen voor verdere strategieën voor gegevensverzameling. Tot dusver konden voor zeven locaties jaarlijkse CH₄ budgetten worden berekend.

In het algemeen bleek uit de CH₄-emissiegegevens dat er sprake is van i) dag- en jaarcyclus van de emissie; ii) een toename van de emissie met toenemende hoogte van de grondwaterspiegel ten opzichte van het oppervlak; iii) een toename van de emissie met toenemende bodem- en luchttemperaturen; en iv) positieve relaties met de CO₂ netto-ecosysteemitwisseling (NEE) overdag en 's nachts. Er waren echter belangrijke verschillen in deze relaties afhankelijk van de locatiemarken zoals vegetatie en waterbeheer.

De melkveehouderijlocaties vertoonden zeer lage tot negatieve emissies uit de bodem bij een lage grondwaterstand en het handhaven van een hoge grondwaterstand verhoogt de CH₄-emissies. De toepassing van waterinfiltratiesystemen resulteerde in de hoogste emissies onder de melkveehouderijlocaties. Toch zijn deze emissies laag, in de orde van grootte van 1 - 2,5 mg CH₄ m⁻² uur⁻¹. De verschillen tussen de waterinfiltratiesysteem-locaties waren echter groot.

De hoogste emissies werden geregistreerd op locaties met natuurherstel, meren en paludicultuur, maar binnen deze groepen waren de verschillen in de gemiddelde emissie eveneens groot. De Ankeveen- en Zegveld lisdodde-paludicultuurlocaties verschilden sterk, waarbij de Zegveldlocatie meer dan tweemaal zo hoog was. De relatief recent vernalde natuurgebieden (Onlanden, Camphuys, Ilperveld) vertoonden een hogere uitstoot dan de semi-natuurlijke Weerribben-site die altijd een mesotrofe (matig voedselrijk) waterrijke locatie is geweest met rietooft. Toekomstig onderzoek moet uitwijzen of waterstanden van 10 tot 20 cm onder het maaiveld voldoende is om zomer CH₄ emissies te reduceren.

N₂O emissie

De microbiële processen nitrificatie en denitrificatie zijn de belangrijkste bronnen van het broeikasgas lachgas (N₂O) dat uit de bodem vrijkomt. De omstandigheden voor N₂O-emissie zijn gunstig in gedraineerde veengronden door de combinatie van ondiepe grondwaterstanden en hoge gehalten aan minerale stikstof (N) en beschikbare koolstof (C). In het onderzoek is de temporele variatie in N₂O-fluxen uit grasland op gedraineerde veengrond vastgesteld. Dit is gebeurd op dag- tot maandschaal met behulp van geautomatiseerde kamers in de winter, en op week- tot jaarschaal met behulp van wekelijkse metingen met statische kamers gedurende vier jaar.

De metingen met geautomatiseerde kamers in de winter lieten relatief lage emissies zien (gemiddeld < 120 µg N m⁻² uur⁻¹), maar met duidelijke dagelijkse schommelingen, waarbij de hoogste fluxen 's nachts optraden. Deze dagelijkse variaties en de correlaties van N₂O-fluxen met CO₂-fluxen en fotosynthetisch-actieve straling verdwenen echter bijna volledig wanneer alleen dagen zonder

atmosferische stratificatie werden beoordeeld. Dit wijst erop dat kamers de achtergrond N_2O -fluxen in niet-turbulente atmosferen sterk kunnen overschatten door verstoring van de N_2O -gradiënt in het bodem-vegetatiesysteem door de kamer, hetgeen tot dusver alleen voor CO_2 is aangetoond. Aangezien atmosferische stratificatie ook de N_2O -productie kan beïnvloeden (bijvoorbeeld door het vochtgehalte te beïnvloeden), zijn gegevens uit langere tijdreeksen nodig om na te gaan of een methodologische bias een overheersende rol speelt in plaats van een werkelijk biogeochemisch effect van atmosferische stratificatie op N_2O -emissies.

Over een periode van 4 jaar werden grote jaarlijkse variaties in N_2O -emissie aangetoond ($10,5$ - $33,5$ $kg\ N\ ha^{-1}\ jaar^{-1}$), veroorzaakt door verschillen in neerslag tijdens het groeiseizoen. Dit omgerekend naar CO_2 equivalenten, komt de hoge N_2O -emissie in dezelfde orde van grootte als de CO_2 emissies ($4,8$ - $15,4$ $t\ CO_2e\ ha^{-1}\ jaar^{-1}$). Hoge N_2O -emissiepieken traden op direct na N-toediening, tijdens natte omstandigheden. Periodes met verhoogde N_2O -emissie werden gedurende vier jaar in minder dan 25% van de metingen geregistreerd, maar omvatten 76% van de totale N_2O -emissie. Aangezien een groot deel van de jaarlijkse N_2O -emissie wordt geproduceerd tijdens relatief korte gebeurtenissen na N-toepassing en neerslaggebeurtenissen, moeten de meetstrategieën gericht zijn op een nauwkeurige kwantificering van deze N_2O -pieken.

4. Opschaling van CO_2 -fluxen

Vliegtuigmetingen

Als aanvulling op de metingen op meerdere locaties op de grond met verschillende technieken, voeren we herhaalde onderzoeken vanuit de lucht uit om de in-situ turbulente CO_2 -uitwisseling te meten. Het propellervliegtuig is uitgerust met een sensor voor turbulente wind, in combinatie met een open-pad gassensor voor eddy covariance (EC) CO_2 -fluxen, aangevuld met PAR- (fotosynthetisch actieve straling) en netto stralingssensoren aan boord. De onderzoekshoogte is nominaal 60 m, waardoor een minimaal verschil in flux tussen oppervlakte en vlieghoogte wordt gegarandeerd. Covarianties werden ruimtelijk geïntegreerd over 2 km.

Van 2020 tot 2022 werd tweemaal per week gevlogen, als het weer het toeliet, om drie belangrijke veenweidelandschappen in Nederland te bestrijken: het Groene Hart in het westen, de Kop van Overijssel en het zuidwesten van de provincie Friesland meer naar het noorden. Vluchtpatronen zorgen voor een volledige ruimtelijke dekking van de respectieve gebieden. Aldus hebben wij een unieke luchtfluxdataset gecreëerd, bestaande uit 129 vluchten (tot december 2022) die 11451 datapunten hebben opgeleverd (2 km geïntegreerde fluxschattingen, ruimtelijk verdeeld). Bovendien werden gegevens van twee EC-torens in de analyse opgenomen.

In de huidige data-analyse richtten we ons op het Groene Hart. De CO_2 -fluxen zijn geanalyseerd in relatie tot potentiële voorspellers van vegetatie- en bodemkenmerken, land- en waterbeheer, alsmede het weer, met behulp van algoritmen voor machine learning. Er zijn drie modellen geoptimaliseerd op basis van alleen toren-gebaseerde EC-metingen, alleen EC-metingen vanuit de lucht, of een gecombineerde dataset. Het model op basis van de gecombineerde aanvullende datasets presteerde beter dan de andere twee modellen in termen van correlatie tussen waargenomen en gesimuleerde CO_2 -fluxen.

De belangrijkste factoren die werden geïdentificeerd waren, niet verrassend en in volgorde van belangrijkheid, PAR (actieve (in)straling), vochtigheid, temperatuur en beschikbare wateropslagcapaciteit in de bodem, waarbij de eerste twee de fotosynthese aansturen en de laatste twee de respiratie van het ecosysteem. Andere verklarende variabelen zijn NDVI (indicator voor vegetatie) en specifieke bodembedekkings- en bodemklassen.

Als wij de aldus gemodelleerde effecten van het grondwater op de regionale CO₂-emissies isoleren, berekenen wij dat elke 10 cm stijging van het grondwaterstand een vermindering van de emissies veroorzaakt van $3,3 \pm 0,3$ tot $4,0 \pm 0,1$ t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹, waarbij de variatie afhangt van de gekozen berekeningsmethode en de vastgestelde randvoorwaarden. Door het model te trainen op de volledige dataset hopen wij aanvullende voorspellers aan het licht te brengen en te kwantificeren.

5. Modelling

Om de processen die de CO₂-emissies beïnvloeden te onderscheiden en de bijdrage van de verschillende koolstofbronnen aan de totale uitstoot te bepalen, zijn de proces-gebaseerde modellen PEATLAND-VU en SWAP-ANIMO toegepast op de NOBV-locatie Vlist. CO₂-fluxen en andere omgevingsvariabelen werden gemodelleerd voor zowel het referentieperceel als voor het perceel met het passieve waterinfiltratiesysteem. De modeluitkomsten werden vergeleken met metingen van de CO₂-fluxen in de kamersystemen (met een hoge temporele resolutie) en lange termijn metingen van de bodemdaling, alsmede met de resultaten van de modellen PP2D-AAP (SOMERS, versie 1.0) en HYDRUS-AAP (Boonman et al. 2022) voor dezelfde locatie.

De modelresultaten vertonen over het algemeen een goede overeenkomst met de gemeten hydrologische variabelen en CO₂-fluxen gedurende het hele jaar. Voor het droge jaar (2020) en het natte jaar (2021) werd een reductie in NECB (de koolstofbalans op jaarbasis) in het waterinfiltratieperceel ten opzichte van het referentieperceel gevonden van respectievelijk 6,6 (31%) en 3,1 (25%) t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ met kamermetingen. Voor dezelfde jaren is een reductie in NECB gevonden van 4,8 (24%) en 0,7 (5%) t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ met PEATLAND-VU, en 3,9 (21%) en 0,9 (7%) t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ met SWAP-ANIMO. Reducties van PP2D-AAP (0,6 en -0,5 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹) en HYDRUS-AAP (6,2 en -0,5 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹) vormen de buitenste voorspellingsgrenzen in 2020 en voorspellen een toename van de emissie van het passieve waterinfiltratie perceel in 2021.

Als alleen rekening wordt gehouden met de CO₂-emissie door veenafbraak, is de gemodelleerde emissie iets lager dan de gemodelleerde NECB: 14,1 en 12,9 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ voor het referentieperceel en passieve waterinfiltratiesysteem perceel voor PEATLAND-VU, en 14,9 en 13,4 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ voor het referentieperceel en passieve waterinfiltratieperceel voor SWAP-ANIMO, gemiddeld over de twee jaren. Dit is zeer goed vergelijkbaar met tien jaar bodemdalingmetingen in Vlist omgerekend naar CO₂ uitstoot, met een gemiddelde emissie van 12 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹. De emissiereductie door het passieve waterinfiltratiesysteem van alleen de veenafbraak bedraagt 2,4 en 0,0 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ voor PEATLAND-VU, en 2,8 en 0,3 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ voor SWAP-ANIMO voor 2020 en 2021. Dit is ook vergelijkbaar met de geschatte reductie van 1,1 t CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ op basis van de bodemdaling op lange termijn.

6. Bodemkenmerken

Koolstofvoorraden

Bij het onderzoeken van koolstofemissies uit veengebieden en de doeltreffendheid van verschillende maatregelen is het essentieel om de waargenomen fluxen (netto emissies) te relateren aan de beschikbare koolstofvoorraden in de bodem. Hoge resolutie koolstofprofielgegevens werden bepaald voor alle NOBV-onderzoeklocaties om hun totale koolstofvoorraad te kwantificeren tot een diepte van 2 meter. Daarnaast is de botanische samenstelling, bulkdichtheid, het organische stofgehalte, de chemische samenstelling en de afbraakgraad van het veen bepaald met behulp van extractietechnieken en stabiele isotopen van N (stikstof) en C (koolstof). De analyse van de totale koolstofvoorraad in relatie tot de locatie-specifieke grondwaterdynamiek is gebruikt om de koolstofvoorraden in te delen in verschillende risicoklassen voor aerobe afbraak. Het risico is afhankelijk gemaakt van het aantal dagen dat koolstof zich boven de actuele grondwaterstand bevindt.

De gemiddelde koolstofvoorraad bedroeg 87 kg m^{-2} op basis van een gebruikelijke bodemprofiel diepte van 120 cm, met een variatie van $66\text{-}128 \text{ kg m}^{-2}$. De C:N-verhoudingen van het veen bleken sterk beïnvloed door de botanische oorsprong van het veen. Het gemiddelde koolstofgehalte in de aanwezige organische stof in Nederlandse veengronden is 47%, hetgeen aanzienlijk lager is dan de algemeen gebruikte parameter van 50-58%.

Opvallend is dat de koolstofvoorraden in een moerige grond van Vegelinsoord vergelijkbaar was met een relatief onverstoord veen in Rouveen als gevolg van de hogere dichtheid van het organisch materiaal in de sterk gedegradeerde veenlaag in Vegelinsoord. De koolstofvoorraden in percelen met waterinfiltratiemaatregelen lagen over het algemeen in dezelfde orde van grootte als de voorraden in de referentiepercelen, behalve in Zegveld, waar het waterinfiltratieperceel een aanzienlijk lagere koolstofvoorraad had dan het referentieperceel. Over het algemeen resulteerden de waterinfiltratiemaatregelen in lagere hoeveelheden koolstof die gedurende de meeste dagen van het jaar (>245 dagen) aan aërobe omstandigheden waren blootgesteld en lagere hoeveelheden die gedurende de droge zomermaanden (<30 dagen) waren blootgesteld, maar iets hogere permanent geoxideerde koolstofvoorraden in de bovengrond, als gevolg van drainage in de natte wintermaanden.

Basisrespiratie uit venen

De drainage van veengebieden leidt tot veenoxidatie, een microbiële proces dat de uitstoot van CO_2 verhoogt en bijdraagt aan bodemdaling. Maatregelen om veenoxidatie te verminderen hebben in het algemeen het doel om de grondwaterstand te verhogen waarmee de beschikbaarheid van zuurstof voor afbraak van organische stof wordt verminderd. Om de doeltreffendheid van deze maatregelen en mogelijke aanvullende maatregelen te evalueren, zet het NOBV in op het vergroten van het mechanistisch begrip van de wijze waarop microbiële processen en veenkenmerken bijdragen tot de uitstoot van broeikasgassen.

Als indicator voor potentiële oxidatie is in het laboratorium onder optimale omstandigheden (bij $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ en 70 % watervasthoudend vermogen) de basale respiratie (BR) gemeten van (gehomogeniseerde) bodemmonsters die op de NOBV-monitoring locaties zijn verzameld uit de

geoxideerde, geoxideerd/gereduceerde en gereduceerde zone in het bodemprofiel. De BR-snelheden zijn tussen de locaties vergeleken om het effect van beperkende maatregelen, veentype en landgebruik te bepalen. Bovendien werden deelmonsters genomen waarin labiele koolstof, stikstof of fosfor werd toegevoegd om de substraat geïnduceerde respiratie (SIR) te bepalen. Om de respiratie vanuit labiele en bulk koolstof te scheiden zijn lange termijn basale respiratie metingen opgezet. Zo kunnen ook mogelijke effecten van de afbraakstatus van het veen op de respiratie worden aangegeven.

De toepassing van de beheersmaatregelen had geen invloed op de BR-snelheden. De BR-snelheden lagen op alle locaties binnen hetzelfde bereik en worden beschouwd als een betrouwbare parameter om mee te nemen in de modellering van de nationale broeikasgasemissies van Nederlandse veengebieden. Ondanks het hoge gehalte aan organische koolstof in het veen toonden de SIR-metingen aan dat de activiteit en de groei van de microbiële gemeenschap beperkt bleven, wat erop wijst dat bij microbiële veenoxidatie koolstofkwaliteit naast kwantiteit van belang is. Ten slotte wijzen de respiratiesnelheden op lange termijn erop dat de respiratie niet toeneemt naarmate het veen in de ondergrond meer is afgebroken. Komende analyses van koolstofkwaliteitsindicatoren zullen worden gebruikt om deze bevinding verder te bevestigen of te ontkrachten.

7. Langetermijn bodemdalingmetingen met zakplaatjes

Veenoxidatie in veenweidegebieden veroorzaakt zowel broeikasgasemissies als bodemdaling. Vanwege de jaarlijkse schommelingen van het bodemoppervlak is langdurige monitoring nodig om de netto bodemdaling op lange termijn te bepalen. In de experimentele veenweideboerderij in Zegveld werden in 1970 zakplaatjes geplaatst in een veld met lage slootwaterstand, en in 1973 in een veld met hoge slootwaterstand. De plaatjes werden op 7 verschillende diepten geplaatst, zodat kon worden onderzocht waar in het veenprofiel bodemdaling optrad. Zowel de hoogte van de plaatjes als van het bodemoppervlak werden elk jaar aan het eind van de winter gemeten met een waterpas, zodat een lange tijdreeks beschikbaar is.

Uit analyse blijkt dat het maaiveld in het veld met hoge slootwaterstand in 49 jaar 22 cm daalde ($4,5 \text{ mm jaar}^{-1}$), terwijl dit in het veld met lage slootwaterstand 33 cm was in 52 jaar ($6,3 \text{ mm jaar}^{-1}$). Uit de resultaten blijkt ook dat in het veld met lage slootwaterstand de meeste bodemdaling door permanente krimp en oxidatie plaatsvond tussen 40 en 100 cm diepte, terwijl dit in het andere veld tussen 20 en 40 cm diepte was. Tenslotte werd onder continu verzadigde omstandigheden op 140 cm diepte nog bodemdaling waargenomen. Vermoedelijk is in het beluchte deel van het profiel oxidatie de belangrijkste oorzaak van bodemdaling, terwijl de waargenomen bodemdaling in de verzadigde bodem op 140 cm diepte het gevolg moet zijn van andere processen, zoals consolidatie en kruip.