

8

Samenvatting, conclusies en aanbevelingen voor management

8.1 Introductie

Dit proefschrift beschrijft de kwantificering van de totale broeikasgasbalans van een verlaten veenweidegebied, de effecten van waterstandmanipulatie als managementtool ten behoeve van broeikasgas mitigatie en innovatie van meettechnieken. De ruimtelijke en temporele variabiliteit van methaan- en koolstofdioxidefluxen wordt uiteengezet, en de relatieve invloed van omgevingsfactoren (vegetatie, bodemeigenschappen, klimaat) op de methaanfluxen in het onderzoeksgebied beschreven. Vervolgens is de variabiliteit van lokale netto koolstof- en broeikasgasbalansen onderzocht, evenals de effecten van management en klimaat hierop. Deze samenvatting bevat een overzicht van de resultaten van het onderzoek per onderzoeksthema, voorafgegaan door de algemene achtergrond en de onderzoeksdoelen en -aanpak. Daarna volgt een puntsgewijs overzicht van de onderzoeksconclusies. In de afsluitende paragraaf, worden aanbevelingen gedaan voor management met betrekking tot broeikasgasmitigatie in (voorheen) gemanagede veenweidegebieden.

8.2 Achtergrond

Gedurende de laatste 100 jaar is de gemiddelde oppervlaktetemperatuur op aarde relatief snel gestegen met $0.74\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ en zijn de neerslagpatronen op aarde significant veranderd (Le Treut et al., 2007). Deze klimatologische veranderingen worden, tenminste gedeeltelijk, veroorzaakt door de impact van menselijke activiteiten op het natuurlijke broeikaseffect van de atmosfeer. Dit versterkte broeikaseffect is voornamelijk het gevolg van een sterke stijging van broeikasgassen met een lange levensduur (koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en lachgas (N_2O)). Deze broeikasgassen worden geproduceerd en uitgestoten in de atmosfeer door menselijke activiteiten, zoals industriële processen, energieproductie, landbouwactiviteiten, verbranding van biomassa en afvalverwerking. De atmosferische CO_2 -concentratie stijgt echter slechts met ongeveer de helft van de snelheid berekend op basis van de antropogene emissies. De rest van deze emissies wordt momenteel opgenomen door de oceanen en terrestrische ecosystemen.

De stijging van broeikasgassen heeft een verhoogde absorptie van thermale straling tot gevolg, waardoor de temperatuur van de troposfeer en het aardoppervlak stijgen. De relatieve bijdrage aan het versterkte broeikaseffect door emissies van broeikasgassen wordt meestal vergeleken met het effect van CO_2 op het broeikaseffect. Hiertoe wordt de *Global Warming Potential* (GWP) index gebruikt, uitgedrukt in CO_2 -equivalenten, waarbij de atmosferische verblijftijden van de verschillende gassen in acht worden genomen. De GWPs van CH_4 (~25, met een tijdhorizon van 100 jaar) en N_2O (~298, met een tijdhorizon van 100 jaar) zijn significant hoger dan de GWP van CO_2 (1, per definitie) (Forster et al., 2007). Wanneer in de onderstaande tekst over de broeikasgasbalans of –

uitstoot wordt gesproken, wordt hiermee dan ook de broeikasgasbalans of –uitstoot in CO₂-equivalenten bedoeld.

Veengebieden in regio's met een gematigd klimaat en in Arctische gebieden spelen een belangrijke rol in de terrestrische koolstofcyclus. Ondanks de relatief lage opnamesnelheden, is sinds de laatste ijstijd ongeveer de helft van de totale huidige hoeveelheid atmosferische koolstof (455Gt g C) geaccumuleerd in veengebieden (Gorham, 1991). Zowel antropogeen landgebruik als klimaatverandering kan veengebieden echter veranderen in aanzienlijk bronnen van broeikasgasemissies. Bij een verlaging van de waterstand, ten gevolge van drainage of opwarming van het klimaat, wordt de waterstand in veenweidegebieden verlaagd, waardoor zuurstof de grond in kan dringen. Dit zorgt voor oxidatie van organisch materiaal, dat naast bodemdaling ook als gevolg heeft dat grote hoeveelheden CO₂ in de atmosfeer worden uitgestoten. Echter, wanneer de waterspiegel hoog staat, vindt er nauwelijks oxidatie van organisch materiaal plaats. Het hoopt zich juist op, waardoor op langere termijn het veen aangroeit. De anaërobe toestand van het veen heeft echter als nadeel dat er meer CH₄ wordt uitgestoten, omdat dit juist in zuurstofloze omgevingen wordt geproduceerd (Drösler et al., 2008). Ondanks dat draslanden en moerassen, inclusief veengebieden, slechts 5-6% van het aardoppervlak bedekken, worden ze beschouwd als de grootste natuurlijke bron van atmosferisch CH₄ (Denman et al., 2007).

In Nederland bestaat ruim 11 % (3850 km²) van de ondiepe ondergrond uit veen of venige bodems. In West-Nederland zijn dit vooral gedraineerde veenweide gebieden, waarop landbouw wordt bedreven (Joosten, 1994). Gedurende de laatste 6.000 jaar hebben zich in West-Nederland dikke veenpakketten (>8 m) gevormd door continue relatieve zeespiegelstijging en geleidelijke afsluiting van de kustlijn. Ten gevolge van inpolderingen en drainage van het grondwater, vindt echter vanaf de 10de eeuw landdaling plaats als gevolg van decompositie en inklinking van het veen. Dit proces werd nog versneld vanaf de 15e eeuw door de beschikbaarheid van molens (en later elektrische pompen) voor het draineren van het grondwater. Op veel plaatsen is meer dan 2 meter veen verdwenen, waarbij grofweg 0.2 Gt CO₂-C is uitgestoten in de atmosfeer (Van den Bos, 2003). Momenteel is in Nederland 85% van het aanwezige veengebied in agrarisch gebruik (Joosten, 1994). Gemiddeld in Europa is 50% van de veengebieden onderhevig aan verschillende vormen van landgebruik, vaak in combinatie met drainage van het grondwater. In geïndustrialiseerde landen leiden landgebruikactiviteiten in veengebieden momenteel tot een verhoging van broeikasgasemissies van 2.3% tot 4.5% van de totale emissie van een land. Een reductie van broeikasgasemissies kan wellicht worden bereikt met herstel van verstoorde veengebieden. Betrouwbare schattingen van emissies en emissiefactoren ontbreken echter nog, en het effect van landgebruik en het beëindigen van landgebruik, drainage en klimaatverandering op fluxen van CO₂, CH₄ en N₂O in veengebieden wordt nog onvoldoende begrepen (Drösler et al., 2008).

Het onderzoek dat wordt gepresenteerd in dit proefschrift maakt onderdeel uit van een deelproject van het Nederlandse onderzoeksprogramma Klimaat voor Ruimte (www.klimaatvoorruimte.nl). De focus van dit onderzoeksprogramma ligt op het tot stand brengen van klimaatverandering en klimaatvariabiliteit als een van de leidende principes

voor de ruimtelijke ordening in Nederland. Het doel van het subproject is het uitvoeren van geïntegreerde observaties en modellering om broeikasgasbudgetten te verkrijgen van verschillende typen ecosystemen. Het onderzoek beschreven in dit proefschrift maakte ook deel uit van het CarboEurope_IP onderzoeksprogramma. Dit onderzoek stelt zich tot doel de huidige terrestrische koolstofbalans van Europa de onzekerheden hierin op lokale, regionale en continentale schaal te begrijpen en te kwantificeren.

8.3 Onderzoeksdoelen en -aanpak

Het centrale doel van dit proefschrift was het onderzoeken van het effect van veranderingen in omgevingsfactoren en landgebruik op broeikasgasfluxen (CO₂, CH₄, N₂O) in veenweidegebied. Om de schatting van de bijdrage van veenweidegebieden op de broeikasgasuitstoot van Nederland te verbeteren, was het eerste doel de totale broeikasgasbalans van een verlaten veenweidegebied te kwantificeren. Het tweede doel was te onderzoeken of waterstandmanipulatie gebruikt kan worden als hulpmiddel bij mitigatie van broeikasgasemissies in veengebieden. Het derde doel was het effect van klimaatverandering op broeikasgasemissies van veenweidegebieden te bestuderen. Het laatste doel was het verbeteren van de kennis over de mechanismen die de broeikasgasfluxen in veenweidegebieden sturen en de relatieve invloed van vegetatie, bodem en klimaatfactoren. Hierbij was vegetatie een belangrijk punt van interesse, aangezien vegetatie zowel de productie van CH₄ in de bodem als het transport van CH₄ van de bodem naar de atmosfeer beïnvloedt.

De aanpak van dit onderzoek was om op integrale wijze de totale broeikasgasbalans te kwantificeren en de effecten van omgevingsfactoren en landgebruik op broeikasgasfluxen in veenweidegebied te bepalen. De broeikasgasfluxen werden gedurende een periode van vier jaar tegelijkertijd gemeten. Hierbij werd gebruik gemaakt van een combinatie van meettechnieken. Ook werden, naast de uitwisseling van gassen tussen bodem en atmosfeer, de fluxen van broeikasgassen via water gemeten en geanalyseerd. Ter verbetering van de CH₄-fluxobservaties op ecosysteemschaal werd een nieuwe micrometeorologische meettechniek ontwikkeld en geëvalueerd. Vervolgens werd deze nieuwe techniek gecombineerd met bestaande methoden. Op deze manier konden de kwaliteit en resultaten van de methoden worden vergeleken en werden de CH₄-fluxen op verschillende schalen onderzocht. Als laatste, om het inzicht van de relatieve invloed van vegetatie-, bodem- en klimaatkarakteristieken op broeikasgasemissies te verbeteren, werd een grondige analyse van het ecosysteem gemaakt. Voor dit doel werden gedurende twee groeiseizoenen metingen gedaan van een aantal vegetatie-, bodem en klimaatvariabelen.

8.4 Veldcondities: eutrofiëring, landelementen en vegetatie patronen

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift werd uitgevoerd in de Horstermeerpolder, een voormalig landbouwgebied in een gedraineerd meer in het Nederlandse veenweidegebied. De agrarische activiteiten in het onderzoeksgebied werden bijna 15 jaar geleden stopgezet, en het gebied heeft zich ontwikkeld tot een seminatuurlijk grasland. De twee meter dikke bodem bestaat uit veen met daarop meerafzettingen rijk aan organisch materiaal, en ligt boven een eolisch zandpakket gevormd tijdens het Pleistoceen. Na het

stopzetten van de agrarische activiteiten werd de waterstand in de sloten verhoogd tot ongeveer 10 cm onder maaiveld. In grote delen van de Horstermeerpolder vindt kwelstroming vanuit de omliggende Pleistocene stuwwallen plaats. Op de onderzoekslocatie, die aan de rand van de polder ligt, is de kweldruk echter relatief laag en vindt zelfs af en toe infiltratie plaats. Ondanks het stoppen van landbouwactiviteiten en bemesting bijna 15 jaar geleden, is de bodem zeer eutroof gebleven. Eerder onderzoek in soortgelijke gebieden heeft aangetoond dat vernatting met natuurlijk kwelwater de stikstofcyclus niet beïnvloed, als gevolg van interne eutrofiëring. Wel namen decompositiesnelheden en fosforbeschikbaarheid toe, met als belangrijkste oorzaak een stijging van de bodem pH waarden tot ongeveer 7 (Van Dijk et al., 2004). De blijvend eutrofe condities veroorzaken hoge productiviteit van de vegetatie en hoge microbiële activiteit, resulterend in hoge broeikasgasfluxen (zowel opname als uitstoot). De eutrofe omstandigheden en het maaien en grazen tijdens de periode van agrarische activiteit hebben geleid tot lage soortenrijkdom van de aanwezige flora.

Op basis van de hydrologische condities konden verschillende landelementen worden onderscheiden: sloten (10% van het landoppervlak), land met permanent waterverzadigde bodem (10-20% van het oppervlak, vooral langs de sloten) en land met een relatief droge en luchtdoorlatende bodem (70-80% van het oppervlak). Het relatief droge land werd later nog verder onderverdeeld in gebieden waar de planten onder het grondwater wortelen (30-40% van het oppervlak) en gebieden met planten die in de luchtdoorlatende top laag wortelen (30-40% van het oppervlak). De verdeling van de vegetatie was fragmentarisch en het landoppervlak kon ook onderverdeeld worden in zeven verschillende vegetatietypen, welke min of meer overlaptten met de ruimtelijke verschillen in hydrologische condities. Eutrofe draslandplanten bedekten ongeveer 36% van het gebied en kwamen voor langs de sloten en op relatief natte locaties in andere delen van het gebied. Grassen en andere kleine bloeiende planten karakteristiek voor voedselrijke, vochtige gebieden bedekten 64% van het gebied. Verschillende plantensoorten die voorkomen in het gebied (o.a. *Typha latifolia*, *Juncus effusus* en *Phragmites australis*) zijn typerend voor verstoorde ecosystemen.

8.5 Meettechnieken

Gedurende het onderzoek werden veel verschillende type metingen en analyses uitgevoerd en meettechnieken gebruikt. Naast observaties van de broeikasgasfluxen werden ook waterstanden, afvoer, neerslag en verdamping en andere meteorologische variabelen gemeten. Ook is een aantal eigenschappen van bodem en vegetatie gemeten, bemonsterd en geanalyseerd. In tegenstelling tot de broeikasgasfluxmetingen waren de technieken die hiervoor werden gebruikt echter bewezen meet- en analyse technieken. Tijdens dit onderzoek was daarom vooral de verdere ontwikkeling van verschillende typen van gasfluxmetingen van CH₄, CO₂ en N₂O van belang.

8.5.1 Fluxkamermetingen

Met de fluxkamertechniek kunnen broeikasgasfluxen worden gemeten op een kleine schaal (~1 m²). Fluxkamermetingen zijn metingen van broeikasgasuitwisseling gebaseerd

op het afsluiten van een klein deel van de bodem en vegetatie van de omgeving door middel van het plaatsen van een meestal luchtdichte doos (kamer). Op deze manier wordt het luchtvolume voor uitwisseling van gassen over het bodem en vegetatieoppervlak beperkt en kan de netto emissie van of opname van de ingesloten gassen worden gemeten als de verandering van concentratie in de kamer (Livingston and Hutchinson, 1995). Voor dit onderzoek werd voor het meten van CO₂-, CH₄- en N₂O-fluxen een draagbare fotoakoestische gasmonitor met dunne slangen aangesloten op een luchtdichte, donkere kamer van waaruit de luchtmonsters werden aangezogen. Doordat de fluxkamer donker is, vindt tijdens de metingen geen fotosynthese plaats in de kamer. Tijdens de fluxkamermetingen van CO₂ wordt daardoor alleen de uitstoot van CO₂ gemeten, de ecosysteem respiratie (R_{eco}). Om het mengen van de lucht in de kamer te bevorderen werd een ventilator aangebracht in de kamer. Daarnaast werd het effect van signaalverstoring door het andere gassen beperkt door aanbrengen van gasfilters bij de inlaat van de gasmonitor. In het Horstermeer onderzoeksgebied werden tien fluxkamerlocaties op land geïnstalleerd en twee op de sloten. De fluxkamerlocaties lagen in de nabijheid van de eddy-covariantiemast en vormden een afspiegeling van de ruimtelijke variabiliteit van de landelementen en de vegetatietypen.

Ondanks dat de fluxkamertechniek de meest gebruikte methode is om CO₂-, CH₄- en N₂O-fluxen te meten over oppervlakken met kale bodem of lage begroeiing (Christensen, 2003; Drösler et al., 2008), komen er veel verschillen voor in de meetopstellingen en de instrumenten die worden gebruikt (Kutzbach et al., 2007). Deze verschillen kunnen leiden tot onder- of overschatting van de fluxen. Om de betrouwbaarheid van de meetopstelling en het instrument die zijn gebruikt tijdens dit onderzoek testen is een vergelijking gedaan met andere meetopstellingen en instrumenten tijdens een meetcampagne. Uit de vergelijking bleek dat de verschillende opstellingen en instrumenten vergelijkbare resultaten gaven. De gebruikte fluxkamertechniek voor CH₄-fluxen en R_{eco} werden daarom als betrouwbaar beschouwd. Ook werd de lineaire fluxberekingsmethode vergeleken met niet-lineaire berekeningsmethoden, om zeker te stellen dat deze methode geen onderschatting van de fluxen opleverde.

Tijdens dit onderzoek zijn de fluxkamermetingen gebruikt om de ruimtelijke en temporele variabiliteit van CH₄-fluxen en R_{eco} te bepalen. Ook werd de totale jaarlijkse CH₄-emissie van het veenweidegebied bepaald aan de hand van de fluxkamergegevens in combinatie met statistische modellen. De fluxkamergegevens bleken het meest geschikt te zijn voor het detecteren en analyseren van ruimtelijke verschillen. De ruimtelijke variabiliteit van bodem- en vegetatiekarakteristieken bleek erg belangrijk bij het opschalen van de fluxkamermetingen. De experimentele opstelling was daarom zo ontworpen dat alle verschillende landelementen (droog land, waterverzadigd land, sloten) en alle vegetatietypen werden bemeten en bemonsterd. Bij het berekenen van gemiddelden voor het veenweidegebied werden de oppervlakfracies van de landelementen of de vegetatietypen in acht genomen. Opschaling over de tijd werd gedaan met behulp van statistische modellen, welke echter relatief grote onzekerheden vertoonden. Deze hoge onzekerheid was het gevolg van de relatief lage meetfrequentie (één maal per twee weken) en de matige relaties van CH₄-fluxen met bodemvariabelen (temperatuur, waterstand, R_{eco}) in het onderzoeksgebied.

De onzekerheid van de gemeten N₂O-fluxen was 70% of hoger. Daarnaast waren de fluxen verwaarloosbaar klein vergeleken met de fluxen van CO₂ en CH₄ (tussen -0.1 en 0.1 mg m⁻² u⁻¹). De N₂O observaties zijn daarom niet meegenomen in verdere analyses. Om de variabiliteit in N₂O concentratie van deze ordegrootte te kunnen detecteren en meten, moeten andere instrumenten worden gebruikt. Waarschijnlijk beschikken tunable diode lasers en quantum cascade lasers over voldoende precisie en accuratesse voor dit doel.

8.5.2 Eddy-covariantie metingen

Met de eddy-covariantietechniek is een atmosferische fluxmeettechniek om verticale turbulente fluxen in de grenslaag van de atmosfeer te berekenen uit metingen in de grenslaag. Het is een statistische techniek die wordt gebruikt in de meteorologie en andere applicaties waarbij hoogfrequente wind en scalaire atmosferische dataseries worden geanalyseerd, met als resultaat de fluxen van deze eigenschappen tussen een ecosysteem en de atmosfeer. De techniek vereist een instrument waarmee concentraties van gassen en temperatuur met hoge snelheid en grote precisie, accuratesse en systeemstabiliteit kunnen worden gemeten. Daarnaast zijn metingen van de windsnelheid in drie dimensies benodigd voor het berekenen van de fluxen. Alle instrumenten worden doorgaans geplaatst op een mast, een eind boven de top van de vegetatie. Op die manier kunnen de gemiddelde fluxen van een ecosysteem continue worden gemeten. Op de Horstermeer onderzoekslocatie was de eddy-covariantiemast 4.3 m hoog, waardoor een gebied van 100-1000 m² (afhankelijk van de windsnelheid en turbulentie) werd bemeten.

Voor metingen van netto CO₂-fluxen (NEE), waterdamp en de latente- en voelbare warmtestroom (LE en H) is de eddy-covariantie techniek relatief goed ontwikkeld (Baldocchi, 2008). Echter, de methodologie voor het zeker stellen van de kwaliteit van de observaties is nog altijd in ontwikkeling (Aubinet et al., 2000, Lee et al., 2004). In dit onderzoek wordt een drievoudige test voorgesteld om de kwaliteit van de eddy-covariantiemetingen zeker te stellen. Deze kwaliteitstest bestaat uit (1) het berekenen van de sluiting van de energiebalans aan de hand van een combinatie van energiefluxen LE en H (gemeten met eddy-covariantie) en metingen van de kort- en langgolvlige inkomende en uitgaande straling en de bodemwarmtestroom in de nabijheid van de eddy-covariantiemast; (2) analyse van spectrale en co-spectrale fluctuaties van temperatuur en broeikasgassen geassocieerd met turbulent transport; (3) vergelijking met fluxkamermetingen in de nabijheid van de eddy-covariantiemast. Gebieden in gematigd klimaat met een vlakke topografie, turbulente omstandigheden in de grenslaag zijn over het algemeen ideaal voor het doen van eddy-covariantiemetingen. In de Horstermeerpolder zijn deze omstandigheden aanwezig, en de eddy-covariantietechniek gaf dan ook goede resultaten voor CO₂-fluxen, waterdamp, H en LE en het aantal onderbrekingen van de meetreeksen was relatief klein.

Voor CH₄-fluxen is de eddy-covariantietechniek nog sterk in ontwikkeling en zijn de bestaande meetopstellingen zeer arbeidsintensief en kostbaar. Daarnaast ondervinden de bestaande technieken problemen met de stabiliteit, precisie en accuratesse van de metingen. Dit komt vooral door de lage CH₄-concentraties in de atmosfeer, waardoor adequate concentratiemetingen worden bemoeilijkt. Instrumenten met voldoende hoge

precisie, accuratesse en systeemstabiliteit én hoge monsternamesnelheden ($\geq 10\text{Hz}$) en korte responstijd ($\geq 0.1\text{ s}$) zijn zeldzaam. Tijdens dit onderzoek werd voor het eerst een *Fast Methane Analyser* (FMA) onderzocht voor toepasbaarheid in een eddy-covariantieopstelling. De FMA werkt volgens het principe van geïntegreerde uitvoerspectroscopie waarbij een laserstraal scheef in een meetcel wordt geschoten en vervolgens duizenden keren gereflecteerd wordt door hoogreflectieve spiegels aan beide zijden van de meetcel. Door de grote lengte van de laserstraal die zo ontstaat (2 – 20 km) en de eigenschappen van de laserstraal, is het mogelijk de hoeveelheid CH_4 in de meetcel nauwkeurig en met grote accuratesse te bepalen. Om de hoge meetsnelheid te kunnen bereiken die nodig is voor de eddy-covariantietechniek, werd de FMA aangesloten op een scrollpomp die zeer hoge luchtstroomsnelheden genereert. De FMA bleek, in combinatie met de scrollpomp, aan de eisen voor gebruik in een eddy-covariantieopstelling te voldoen. Ook waren de bediening en het onderhoud relatief gebruikersvriendelijk en waren de kosten laag vergeleken met bestaande eddy-covariantieopstellingen waarin *Tunable Diode Lasers* of *Quantum Cascade Lasers* worden gebruikt. Momenteel worden vergelijkbare eddy-covariantieopstellingen geïmplementeerd op steeds meer locaties voor onderzoek naar CH_4 -fluxen op landschapsschaal.

Ondanks alle voordelen, werden ook minpunten aan de nieuwe techniek ontdekt. In gebieden met een sterke mate van luchtverontreiniging, vervuilden de spiegels in de meetcel zeer snel. Hierdoor verminderde de reflectiviteit van de spiegels, met als gevolg dat de precisie en accuratesse van de metingen sterk omlaag ging. Daarnaast was het energieverbruik van de meetopstelling hoog. Echter, wanneer een goede stroomvoorziening ontbreekt, kan het energieverbruik van de opstelling wellicht worden verminderd door metingen te doen zonder de scrollpomp. In dit geval zal wel een andere meettechniek met een lagere monsternamesnelheid moeten worden gebruikt. Uit een experiment met synthetische data bleek dat de zogenaamde ‘disjunct’ eddy-covariantietechniek het meest betrouwbare alternatief is voor de 10Hz eddy-covariantietechniek. Echter, in acht genomen moet worden dat deze voor methode een extra monsternameinstrument vereist is, welke zelf ook een bepaalde hoeveelheid energie zal vergen.

8.5.3 Vergelijken van technieken

Naast het vergelijken van de eddy-covariantietechniek en de fluxkamertechniek, werd de fluxkamertechniek vergeleken met fluxberekeningen uit CH_4 -concentratiegradiënten in de bodem. Op een relatief droge locatie, leverden deze twee technieken zeer goed vergelijkbare resultaten. Op locaties met een anaerobe bodem en/of diep wortelende planten waren de CH_4 -emissies gemeten met de kamertechniek relatief hoog vergeleken met de gradiëntmethode en vertoonden een ander patroon. Dit suggereerde dat de technieken alleen vergelijkbaar zijn wanneer diffusie het belangrijkste transportmechanisme is. Wanneer andere gastransportmechanismen belangrijker waren voor de emissie van CH_4 (planttransport of transport via gasbellen) wordt de CH_4 uitstoot waarschijnlijk onderschat door de gradiëntmethode.

Bij het vergelijken van eddy-covariantie- en fluxkamergegevens, is het van cruciaal belang om de voetafdruk (het landoppervlak nabij de toren in de overheersende windrichting) van

de eddy-covariantiemast in acht te nemen. Fluxkamerlocaties moeten in deze voetafdruk liggen en moeten representatief zijn voor de ruimtelijke variabiliteit en de landelementen en/of vegetatietypen die voorkomen in de voetafdruk van de mast. In dit onderzoek is de vergelijkbaarheid van de fluxkamermetingen en de eddy-covariantiemetingen op drie manieren geëvalueerd: (1) een vergelijking van gelijktijdige eddy-covariantie- en fluxkamermetingen; (2) een analyse van de voetafdruk van de eddy-covariantiemast gebaseerd op de drie landelementen (droog land, nat land, sloten); (3) vergelijking van de eddy-covariantiegegevens en een statistisch model gebaseerd op de fluxkamergegevens. Uit alle drie de vergelijkingen bleek een grote mate van vergelijkbaarheid van de twee fluxmeettechnieken.

De vergelijking van de fluxmeettechnieken benadrukte ook de voor- en nadelen van beide technieken. Doordat de fluxen gemeten door de eddy-covariantieopstelling op een relatief grote schaal (100-1000 m²) en continue over de tijd plaatsvonden, werd heterogeniteit op kleine schaal uitgemiddeld en was het mogelijk de gemiddelde broeikasgasflux over een langere periode voor het gehele ecosysteem te bepalen. Door de hoge meetfrequentie was het daarnaast mogelijk de temporele variabiliteit gedetailleerd te observeren te analyseren. Ruimtelijke variabiliteit van de gasfluxen was echter niet eenvoudig te bepalen en kennis van gebieden met hoge en lage broeikasgasemissies verkregen met de fluxkamertechniek was onmisbaar voor een goede analyse van de variatie in de voetafdruk van de eddy-covariantiemast. Ruimtelijke variabiliteit werd het beste waargenomen met de fluxkamertechniek. Opschaling kan echter leiden tot relatief grote onzekerheden wanneer kennis van de ruimtelijke variabiliteit in hydrologische omstandigheden, bodem en vegetatie ontbreekt. Als laatste kan transport via gasbellen in de bodem (ebullitie) een sterke ruimtelijke en temporele variabiliteit van in de fluxen veroorzaken. De eddy-covariantietechniek neemt deze variabiliteit grotendeels mee in de metingen. Door kamermetingen wordt de variabiliteit veroorzaakt door ebullitie echter voor een groot deel gemist en vormt het een grote bron van onzekerheid.

8.6 De complete broeikasgasbalans van een verlaten veenweidegebied

Het samenstellen van de complete broeikasgasbalans en zijn onzekerheden vereiste aanzienlijke experimentele inspanningen. Niet alleen de uitwisseling van broeikasgassen tussen bodem en planten en de atmosfeer werden bepaald, ook de fluxen van opgeloste broeikasgassen via het water en de GWPs werden meegenomen in de broeikasgasbalans. Uit dit onderzoek kon worden geconcludeerd dat het verlaten veenweidegebied met verhoogd slootwaterpeil netto een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ ($-311 \pm 58 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) en koolstof ($-262 \pm 86 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) opnam, maar slechts een kleine hoeveelheid broeikasgassen ($-71 \pm 490 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ CO₂-equivalenten wanneer beschouwd in GWPs) opnam. De gemiddelde jaarlijkse CH₄-emissie was aanzienlijk ($31 + 21 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) en vormde 23.2% van de broeikasgasbalans. De onzekerheid van de koolstof- en broeikasgasbalansen was relatief hoog, voornamelijk als gevolg van de grote onzekerheden bij het opschalen van de fluxkamermetingen van CH₄. Uit een modelstudie voor het Horstermeer onderzoeksgebied en vergelijking met andere veenweidegebieden in West-Europa waar nog wel landbouwactiviteiten plaatsvinden, bleek dat de CH₄-emissies zijn toegenomen sinds de waterstandverhoging.

Sinds het stoppen van de landbouwactiviteiten en de waterstandverhoging zijn CO₂-emissies in het gebied significant verminderd, zodat er nu sprake is van een netto opname. Het verminderen van de broeikasgasemissies, en dus de verminderde decompositie van organisch materiaal, betekent ook dat de bodemdaling in het gebied waarschijnlijk grotendeels tot stilstaan is gebracht. Doordat dood organisch materiaal zich, als gevolg van de verhoogde waterstand, vrij snel onder zuurstofloze omstandigheden bevindt, kan de huidige situatie op termijn zelfs leiden tot hernieuwde veenaangroei. Echter, ten gevolge van de blijvend eutrofe bodemcondities zijn zowel de fotosynthese als de R_{eco} hoog gebleven. De N₂O emissies waren zeer laag, waardoor de netto uistoot van broeikasgassen sterk werd verlaagd ten opzichte van gebieden met agrarisch landgebruik. De fluxen van (opgeloste) broeikasgassen via het water waren relatief klein (<5%). In veenweidegebieden, met een vlakke topografie, compacte bodems en gecontroleerde afvoer van water wordt de waterbalans gedomineerd door neerslag en verdamping. Dit heeft tot gevolg dat in- en uitstroom van (opgeloste) broeikasgassen via uitstromend, infiltrerend of opkwellend water beperkt is vergeleken met heuvelachtige en bergachtige veengebieden zoals in Groot-Brittannië.

Wanneer broeikasgasbalansen van natuurlijke, gemanagede en herstelde veengebieden worden vergeleken, moeten in de gebieden met landbouwactiviteiten andere dan de natuurlijke fluxen worden beschouwd. Broeikasgasemissies die het directe gevolg zijn van menselijke activiteiten, zoals bemesting (koolstof en stikstof opname), maaien en begrazing (koolstofemissie), CH₄-emissies uit mestopslag en koeien, en hoge pieken in N₂O uitstoot als gevolg van bemesting, moeten worden opgenomen in de balans. De uitstoot van broeikasgassen wordt hierdoor dramatisch verhoogd in deze landbouwgebieden. Een eerste schatting op basis van gegevens van een Nederlands veenweidegebied met intensieve agrarische activiteiten toont aan dat zulke gebieden een grote bron van broeikasgassen vormen: netto emissie van 4 tot 5 kg m⁻² j⁻¹ CO₂-equivalenten wanneer beschouwd in GWPs (persoonlijke communicatie: E. M. Veenendaal and A. P. Schrier-Uijl).

8.7 Ruimtelijke variabiliteit van methaanfluxen: vegetatie en waterstand

CH₄-fluxen en R_{eco} vertoonden sterke ruimtelijke variaties: binnen een klein gebied (één hectare) werden vier land elementen met significant verschillende CH₄-fluxen onderscheiden. Verreweg de hoogste emissies werden gemeten in het waterverzadigde deel van het gebied nabij de sloten waar de vegetatie werd overheerst door *Typha latifolia*. Middelhoge emissies werden waargenomen vanaf het slootoppervlak. Het droge land in het midden van het gebied waar de vegetatie werd overheerst door *Urtica dioica*, *Holcus lanatus* en *Phalaris arundinacea* produceerde de laagste emissies. Ook werd hier in de winter regelmatig opname van CH₄ waargenomen. Enigszins hogere emissies werden gemeten op iets nattere locaties met diep wortelende planten (*Glyceria maxima*, *Phragmites australis*, *Juncus effusus*). De gemiddelde CH₄-emissie over de 3.5 jaar durende meetperiode was respectievelijk 23.08 mg m⁻² u⁻¹, 7.59 mg m⁻² u⁻¹, 1.16 mg m⁻² u⁻¹ en 4.13 mg m⁻² u⁻¹ voor deze vier landelementen. Uit verdere analyse bleek dat de ruimtelijke variatie van CH₄-fluxen vooral werd veroorzaakt door wortelkarakteristieken en grondwaterstand, terwijl grondwaterstand en wortelkarakteristieken onderling ook

gerelateerd waren. Naast dat waterstand en worteldiepte de productie en oxidatie van CH₄ beïnvloeden, hebben waterstand in combinatie met worteldiepte en wortelmassa een sterke invloed op het transport van CH₄ door aerenchyma van vasculaire planten. Dit resulteerde in hoge CH₄-emissies op locaties met een hoge waterstand en diep wortelende planten.

8.8 Temporele variabiliteit van methaanfluxen

Sterke temporele variabiliteit van CH₄-fluxen werd geobserveerd op verschillende schalen en werd veroorzaakt door de interactie tussen bodem- en vegetatievariabelen. De CH₄-fluxen vertoonden een sterke dagelijkse gang tijdens alle seizoenen en dag-tot-dag variabiliteit, seizoenale variatie en verschillen tussen de meetjaren.

De dagelijkse gang werd waargenomen met de continue eddy-covariantietechniek en vertoonde hoge CH₄-emissies gedurende de dag en lage CH₄-emissies gedurende de nacht. De hoogste dag-emissies werden geobserveerd in de zomer en lagere, maar vergelijkbare dag-emissies werden geobserveerd in het voor- en najaar. De overeenkomst met de dagelijkse gang van inkomende straling, NEE en LE en het verschil met de dagelijkse gang van bodemtemperatuur, suggereerde dat de dagelijkse gang van CH₄-fluxen vooral werd veroorzaakt door stomatale opening en convectieve gasstroming door holle delen van vasculaire planten. Van verschillende plantensoorten die voorkwamen in het gebied (o.a. *Typha latifolia* en *Phragmites australis*) is bekend dat ze beschikken over de capaciteit om ondergrondse delen te ontgassen door gasstroming veroorzaakt door druk- en temperatuurverschillen (Whiting and Chanton, 1996; Brix et al., 1996). Nachtelijke CH₄-emissies waren redelijk stabiel door het jaar: ongeveer 0.90 mg m⁻² u⁻¹. Dit was wellicht als gevolg van relatief constante diffusiesnelheden door bodem en water vanuit de diepere, met CH₄ verzadigde bodemlagen.

Variatie in de daggemiddelden van de continue CH₄-fluxen waargenomen met de eddy-covariantietechniek waren het sterkst gerelateerd aan een combinatie van grondwaterstand en bodemtemperatuur op 40 cm diepte (onder de grondwaterspiegel). Deze variabelen verklaarden samen meer dan 65% van de dag-tot-dag variabiliteit van de CH₄-fluxen gedurende het jaar. De grondwaterstand was, in tegenstelling tot de verwachting, invers gecorreleerd met de CH₄-flux. Dit suggereerde dat, in relatie met CH₄-fluxen, de grondwaterstand waarschijnlijk de mate van verdamping gastransport door planten representeerde, en niet zozeer de temporele variatie van de dikte van de aerobe toplaag van de bodem. De bodemtemperatuur onder de grondwaterspiegel had waarschijnlijk een grote invloed op de CH₄-productie en op de vorming van gasbubbels in diepere, anaerobe lagen van de bodem. Dag-tot-dag variaties van de CH₄-flux waargenomen met de fluxkamertechniek werden het beste verklaard door R_{eco} in combinatie met de hoeveelheid dode biomassa (57% van de variabiliteit) voor de fluxkamerlocaties op het land. Een uitleg voor deze statistische relatie is wellicht dat R_{eco} sterk gerelateerd was aan meerdere variabelen die van belang zijn voor CH₄-emissie (planttransport, de hoeveelheid koolstof in de bodem, bodemtemperatuur, vochtcondities). Daarnaast vormt dode biomassa volgens eerder onderzoek een belangrijke bron van makkelijk afbreekbaar materiaal voor methanogenen (Van Huissteden et al., 2006) en was niet gerelateerd aan R_{eco}. In het permanent waterverzadigde gebied werd 92% van de variantie in de CH₄-flux gegevens

verklaard door pH van de bodem. In dit type gebied met anaerobe bodem en vegetatie met goede transportmogelijkheden, werd de CH₄-emissie waarschijnlijk vooral bepaald door de CH₄-productie in de bodem. Aangezien andere factoren gerelateerd aan CH₄-productie, zoals beschikbaarheid van nutriënten en koolstof, niet limiterend waren, was pH waarschijnlijk de enige beperkende factor. In het Horstermeer onderzoeksgebied werden pH-waarden van 6 en hoger waargenomen; CH₄-fluxen waren lager bij een stijgende pH. Ondanks de verschillen in verklarende variabelen tussen de eddy-covariantietechniek en de fluxkamertechniek, suggereerden beide methoden dat de dag-tot-dag variaties van CH₄-fluxen werden veroorzaakt door een combinatie van omgevingsfactoren. Zowel plantgastransport als bodemcondities bleken belangrijke bepalende factoren van kleinschalige temporele variabiliteit van CH₄-fluxen in een veenweidegebied.

Zowel fluxkamermetingen als eddy-covariantiemetingen vertoonden de hoogste CH₄-emissies gedurende de zomer, de laagste emissies in de herfst en winter en middelmatige emissies in de lente. Deze seizoenale trends waren vergelijkbaar met een overvloed aan eerder onderzoek en waren waarschijnlijk het resultaat van seizoenale veranderingen in plantgastransport en in productie en oxidatie van CH₄ in de wortelzone. Met betrekking tot het plantgastransport, was de daglengte ook een belangrijke factor op de seizoenale schaal: langere daglichtperioden tijdens de zomer en het einde van de lente resulteerden in hogere gemiddelde CH₄-emissies.

Als laatste werden er verschillen geobserveerd in CH₄-fluxen tussen een relatief warm en droog jaar en een relatief nat en koel jaar: in het natte, koele jaar was de gemiddelde CH₄-emissie ongeveer 37% hoger. Dit verschil was echter voornamelijk het gevolg van de hogere CH₄-emissies van het waterverzadigde gebied langs de sloot met *Typha latifolia* als dominante plantensoort. De CH₄-emissie van alle andere locaties was juist lager gedurende het relatief natte en koele jaar. Deze bevinding benadrukt het dominerende effect van het waterverzadigde gebied langs de sloten op de totale CH₄-emissie, en suggereert dat de CH₄-emissies nog hoger zijn in jaren met natte én warme omstandigheden.

8.9 Kleinschalige variabiliteit van broeikasgasbalansen

De gebieden met *Typha latifolia*, *Juncus effusus* en *Phragmites australis* als overheersende vegetatie, stootten netto koolstof en broeikasgassen uit, ondanks de relatief anaerobe bodemcondities en de grote hoeveelheden biomassa. In andere gebieden, gedomineerd door vegetatietypen zoals *Holcus lanatus*, *Palaris arundinacea* en *Urtica dioica* vond netto opname van koolstof en broeikasgasequivalenten plaats. Zowel de koolstofbalans als de broeikasgasbalans werden voor een groot deel bepaald door de veranderingen van koolstof in de bodem gedurende het groeiseizoen (Δ CS). De koolstofbalans, de broeikasgasbalans en Δ CS werden het beste verklaard door wortelmassa en worteldiepte: gebieden met draslandvegetatie met diepe wortels en hoge wortelmassa hadden relatief hoge koolstofemissies en een negatieve Δ CS. De wortelsystemen van de planten bevorderen waarschijnlijk het transport van zuurstof naar de diepere, anaerobe bodemlagen, daarbij de oxidatie van organisch bodemmateriaal

stimulerend. Daarnaast functioneerden de diepe wortels waarschijnlijk als een snelle gastransportroute voor CO₂ en CH₄ uit de bodem door holle delen van planten naar de atmosfeer.

Verschillen in koolstofbalans en broeikasgasbalans werden geobserveerd tussen een relatief droog en warm jaar en een relatief nat en koel jaar. Een aantal vegetatietypes vertoonde relatief hoge koolstof- en broeikasgasemissies (of relatief lage opname) gedurende het natte en koele jaar, terwijl andere vegetatietypes relatief hoge koolstof- en broeikasgasemissies (of relatief lage opname) vertoonden gedurende het warme en droge jaar. Ondanks dat eerder onderzoek in veel gevallen heeft aangenomen dat netto koolstofopname wordt gereduceerd onder droge en warme condities (als gevolg van toegenomen R_{eco} en gereduceerde fotosynthese (Reichstein et al., 2007; Ciais et al., 2005)), worden bepaalde vegetatietypen in het verlaten veenweidegebied wellicht juist geremd door verstikking ten gevolge van de zeer hoge bodemvochtgehalten. Het resultaat hiervan is een vermindering van de koolstofopname in natte en koele groeiseizoenen.

Slechts een klein deel van de totale uitgestoten koolstof wordt uitgestoten als CH₄ (F_{CH4}) en sterke verschillen in F_{CH4} tussen vegetatietypen werden waargenomen. Voor ondiep wortelende planten was F_{CH4} ongeveer 0.25%, terwijl F_{CH4} voor diep wortelende planten opliep tot 6.26%. In gebieden met diep wortelende drasland- en moerasvegetatie (zoals *Typha latifolia*, *Glyceria maxima* en *Phragmites australis*) was de hoeveelheid koolstof die werd uitgestoten als CH₄ dus relatief hoog, wat suggereert dat diepe wortelsystemen de emissie van CH₄ relatief meer bevorderden dan R_{eco}.

8.10 Veranderingen in landgebruik en klimaat

De kleine netto opname van broeikasgassen in het verlaten veenweidegebied in de Horstermeerpolder komt overeen met observaties en schattingen voor andere herstelde veengebieden en natuurlijke veengebieden, terwijl veengebieden onder agrarisch landgebruik zijn beschreven als netto bronnen van koolstof en broeikasgasequivalenten. Een vergelijking met modelresultaten toonde aan dat wanneer de waterstand in het onderzoeksgebied 20 cm lager zou staan dan de huidige waterstand, de decompositiesnelheid van het veen verdubbeld. De CO₂-emissie zou stijgen met meer dan 600 g C m⁻² j⁻¹ tot een netto uitstoot van zo'n 330 g C m⁻² j⁻¹. Wel zou de CH₄-emissie van het landoppervlak waarschijnlijk met ongeveer 60% afnemen. De resulterende netto emissie van broeikasgassen zou zo'n 180% hoger zijn dan op dit moment (Van Huissteden et al., 2006). Hierbij moet in acht genomen worden dat de directe effecten van agrarisch landgebruik op de broeikasgasbalans (mesten, koeien, maaien, etc.) en N₂O emissies niet zijn meegenomen in deze analyse. Concluderend kan worden gezegd dat terwijl het onderzoeksgebied momenteel een kleine hoeveelheid broeikasgassen opneemt, het waarschijnlijk een aanzienlijke bron van broeikasgassen was vóór de waterstandverhoging en het stopzetten van de landbouwactiviteiten.

Het stopzetten van landbouwactiviteiten en de verhoging van de waterstand in delen van de Horstermeerpolder is dus effectief gebleken voor het reduceren van de uitstoot van broeikasgassen in deze gebieden. R_{eco} was op de Horstermeer onderzoekslocatie echter vergelijkbaar met veengebieden onder agrarisch landgebruik, wat het resultaat was van de

aanhoudend hoge microbiële activiteit veroorzaakt door het proces van interne eutrofiëring. Als gevolg van de eutrofe omstandigheden was anderzijds de productie van biomassa in het gebied ook erg hoog en de bruto koolstofopname daardoor ook zeer hoog vergeleken met veel natuurlijk veen gebieden (Drösler et al., 2008).

Bij verdere vernatting van eutrofe veenweidegebieden zoals het onderzoeksgebied in de Horstermeer zullen emissies van CH₄ en CO₂ waarschijnlijk toenemen, als gevolg van de hogere CH₄-emissies van locaties met drasland- en moerasplanten én de uitbreiding van diepwortelende drasland- en moerasplanten. Het verlaten veenweidegebied zal in dit geval van een gebied met een kleine broeikasgasopname waarschijnlijk veranderen in een gebied met een netto uitstoot van broeikasgassen. In het geval verdere vernatting tegelijk met opwarming van het klimaat plaatsvindt, zal de stijging van de koolstof- en broeikasgasbalansen nog sterker zijn, als gevolg van de verhoogde microbiële activiteit. De verwachte opwarming ten gevolge van klimaatverandering leidt tot 7-13% stijging van de verdamping (KNMI, 2006). Opwarming zónder vernatting resulteert daardoor in een dikkere aerobe toplaag van de bodem. De CH₄-emissies zullen waarschijnlijk afnemen in dit toekomstscenario, maar verhoogde decompositiesnelheid van het organisch bodemmateriaal in de dan dikke aerobe toplaag zal leiden tot een sterke toename van CO₂-emissies. Het gebied verandert in dit geval in een nog grotere bron van broeikasgassen. Daarnaast zal in dit scenario waarschijnlijk sterke bodemdaling plaatsvinden.

Dit onderzoek toonde aan dat korte termijn veranderingen soms leiden tot schijnbaar tegenstrijdige resultaten, bijvoorbeeld: verhoogde waterstanden leiden alleen tot hoge CH₄-emissies in gebieden met drasland- of moerasplanten, terwijl andere vegetatiesoorten worden beperkt in hun groei door de ongunstige omstandigheden. Alleen wanneer de veranderingen aanhouden over meerdere jaren en de vegetatie zich aanpast aan de nieuwe hydrologische situatie, zullen de CH₄-fluxen, de koolstofbalans en de broeikasgasbalans de verwachte veranderingen vertonen in het hele gebied.

8.11 Conclusies

Het onderzoek in dit proefschrift resulteerde in een aantal duidelijke conclusies met betrekking tot broeikasgasfluxen in veenweidegebieden. Hieronder zijn de belangrijkste conclusies opgesomd.

Karakteristieken van het veenweidegebied

- Ondanks het beëindigen van landbouwactiviteiten op de Horstermeer onderzoekslocatie bijna 15 jaar geleden, is de bodem zeer eutroof gebleven;
- Gebaseerd op de hydrologische omstandigheden, werd onderscheid gemaakt tussen verschillende landelementen: sloten (10% van het oppervlak), permanent waterverzadigd land (10-20% van het oppervlak), en relatief droog land met een fluctuerende waterstand (70-80% van het oppervlak);
- De vegetatie van het verlaten veenweide gebied is fragmentarisch en bestaat uit vasculaire planten typisch voor eutrofe, vochtige omstandigheden;

- In het onderzoeksgebied werden zeven vegetatieassemblages onderscheiden, waarvan de ruimtelijke verspreiding over het algemeen overeenkwam met de hydrologische landelementen.

Meettechnieken

- Het kwantificeren van de totale broeikasgasbalans van het veenweidegebied is mogelijk, maar vergt aanzienlijke experimentele inspanningen/inzet;
- Bij het kwantificeren van CO₂- en CH₄-fluxen van een gebied, moeten de fluxen van alle aanwezige landelementen (hier: droog land, waterverzadigd land en sloten) en/of de verschillende vegetatietypen in acht worden genomen alsmede het relatieve oppervlakten van de ruimtelijke elementen;
- De FMA bleek toepasbaar in de eddy-covariantieopstelling, leverde goede data en was relatief gebruiksvriendelijk. Een nadeel van het instrument is snelle verontreiniging van de meetcel in gebieden met luchtvervuiling;
- Een drievoudige kwaliteitstest van de eddy-covariantieopstelling bestond uit een energiebalanstest, (co-)spectrale analyse en een vergelijking met fluxkamermetingen in de nabijheid van de eddy-covariantiemast. Deze drievoudige test wees uit dat de continue eddy-covariantiemetingen van CO₂, CH₄, LE en H op de Horstermeer onderzoekslocatie een goede kwaliteit hadden;
- De fluxkamermetingen van CH₄ kwamen goed overeen met de CH₄-fluxen berekend uit de CH₄-gradiënt in de bodem wanneer diffusie het belangrijkste transportmechanisme van CH₄ was;
- De data van de fluxkamertechniek en de eddy-covariantietechniek kwamen zeer goed overeen; dit wijst op betrouwbaarheid van de resultaten;
- De ruimtelijke variabiliteit werd het beste waargenomen met de fluxkamermetingen, terwijl de eddy-covariantietechniek het meest geschikt bleek voor het kwantificeren van gemiddelde en totale fluxen over langere perioden en temporele variabiliteit;
- N₂O-fluxen waren te klein om waargenomen te kunnen worden met de fluxkameropstelling die voor dit onderzoek werd gebruikt;

De complete broeikasgasbalans van een verlaten veenweidegebied

- Het verlaten veenweidegebied met verhoogd slootwaterpeil (ongeveer 10 cm onder maaiveld) nam netto een aanzienlijke hoeveelheid koolstof en een kleine hoeveelheid broeikasgassen op;
- De NEE was significant verminderd ten gevolge van de waterstandverhoging bijna 15 jaar geleden. Echter, ten gevolge van de blijvend eutrofe bodemcondities zijn zowel de fotosynthese als de R_{cco} hoog gebleven;
- De netto koolstofopname betekent waarschijnlijk ook dat de bodemdaling in het gebied grotendeels tot stilstaan is gebracht. De huidige situatie kan op termijn zelfs leiden tot hernieuwde veenaangroei;

- De CH₄-emissies in het verlaten veenweidegebied waren aanzienlijk en zijn verhoogd ten gevolge van de waterstandverhoging;
- N₂O-emissies waren klein in het verlaten veenweidegebied. De totale broeikasgasemissies worden hierdoor sterk beperkt vergeleken met veenweidegebieden waar landbouwactiviteit plaatst vindt;
- Fluxen van koolstof en opgelost CH₄ via het water waren relatief klein (<5% van de totale broeikasgasbalans). Dit was voornamelijk het gevolg van de vlakke topografie, de gecompacteerd veenbodem en de gecontroleerde slootafvoer;
- Slechts een klein deel van de totale koolstofemissies werd uitgestoten als CH₄: van 19% voor ondiep wortelende planten tot 6.26% voor diep wortelende planten;

Ruimtelijke variabiliteit van koolstofluxen

- CH₄-fluxen vertoonden hoge ruimtelijke variabiliteit: vooral de sloten en de waterverzadigde delen van het gebied met drasland- of moerasvegetatie bleken een (potentieel) grote bron van CH₄-emissies;
- Netto koolstofopname en R_{eco} vertoonden hoge ruimtelijke variabiliteit. Het relatief droge land vertoonde de hoogste R_{eco}, maar netto koolstof- en broeikasgasopname. Draslandgebieden met diep wortelende vegetatie vertoonden een middelmatige R_{eco}, maar waren netto een bron van koolstof en broeikasgassen;
- De ruimtelijke variabiliteit van CH₄-fluxen, koolstofbalansen en broeikasgasbalansen op land werd voornamelijk verklaard door wortelkarakteristieken (wortelmassa en -diepte) en het grondwaterpeil. Wortelkarakteristieken en grondwaterpeil vertoonden onderling ook samenhang;

Temporele variabiliteit van CH₄-fluxen

- De CH₄-fluxen vertoonden temporele variabiliteit op verschillende tijdschalen: een dagelijkse gang, dag-tot-dag variabiliteit, seizoenale verschillen en verschillen tussen jaren;
- De dagelijkse gang van de CH₄-fluxen bestond uit hoge emissies gedurende de dag en lage emissies gedurende de nacht. Waarschijnlijk werd het verschil veroorzaakt door stomatale opening van planten en convectieve gasstroming door holle delen van planten gedurende de dag;
- De dag-tot-dag variabiliteit en seizoenale verschillen werden het beste verklaard door een combinatie van variabelen, welke van invloed waren op de CH₄-productie, CH₄-oxidatie en het gastransport door de planten;
- De gemiddelde CH₄-emissie tijdens een relatief nat en koel jaar was 37% hoger dan dat van een relatief droog en warm jaar;
- Onder verzadigde omstandigheden werd de temporele variabiliteit van CH₄-fluxen bijna geheel verklaard door de pH-waarde van de bodem;

Effecten van toekomstig landgebruik en klimaatverandering

- Het stopzetten van landbouwactiviteiten en de verhoging van de waterstand in delen van de Horstermeerpolder is effectief gebleken voor het reduceren van de uitstoot van broeikasgassen in deze gebieden. Desondanks blijkt het gebied een potentiële grote bron van broeikasgassen, als gevolg van de eutrofe condities in het gebied;
- In het geval verlaten veenweidegebieden verder vernat worden, zullen de koolstofbalans en de broeikasgasbalans waarschijnlijk stijgen (hogere emissies). In het geval verdere vernatting tegelijk met opwarming van het klimaat plaatsvindt zal de stijging van de koolstof- en broeikasgasbalansen nog sterker zijn;
- Klimaatverandering (opwarming) zonder vernatting zal leiden tot een dikkere aerobe veenlaag, waardoor R_{eco} toeneemt en de koolstofbalans en de broeikasgasbalans van het veenweide gebied waarschijnlijk ook stijgen. Daarnaast zal waarschijnlijk sterke bodemdaling optreden;
- Verlaging van de nutriëntgehalten in de bodem is essentieel voor broeikasgas mitigatie management en voor verbetering van botanische waarden in (voorheen) gemanagede veengebieden.

8.12 Aanbevelingen voor management

Dit onderzoek heeft aangetoond dat het stopzetten van landbouwactiviteiten de netto uitstoot van broeikasgassen in veenweidegebied effectief verminderd. Ten gevolge van de blijvend eutrofe omstandigheden, blijft het verlaten veenweidegebied desondanks potentieel een grote bron van broeikasgassen. Succesvolle en blijvende vermindering van koolstoffluxen en CH_4 -emissies in (voorheen) gemanagede veenweidegebieden kan waarschijnlijk alleen worden gerealiseerd wanneer de hoeveelheid nutriënten in de bodem en het grondwater wordt teruggebracht. Door het verlagen van de hoeveelheid nutriënten wordt de productiviteit van planten en de microbiële activiteit teruggedrongen en kan een meer diverse, soortenrijke vegetatie zich ontwikkelen (bv. *Carex* associaties (mesotrofe omstandigheden) of *Sphagnum* associaties (oligotrofe omstandigheden)). Bij verdere vernatting van het gebied, in combinatie met anaerobe en nutriëntarmere bodemcondities, zal R_{eco} vermoedelijk verder worden teruggedrongen. De toename van CH_4 -emissies als gevolg van de anaerobe bodem in het vernatte gebied, wordt in dit geval waarschijnlijk sterk beperkt door de vermindering van nutriënten. In het geval van een successie naar oligotrofe omstandigheden met *Sphagnum* vegetatie, zullen CH_4 -emissies ook sterk worden afgeremd door het zeer beperkte plantgastransport en versterkte oxidatie van CH_4 door dit type vegetatie. Een successie richting zulke nutriëntarme omstandigheden is echter zeer onwaarschijnlijk in eutrofe veenweidegebieden in West-Europa.

Als gevolg van processen van interne eutrofiëring, zal nutriëntreductie in veengebieden waarschijnlijk niet snel worden bereikt door enkel het stopzetten van de agrarische activiteiten. Voor het verminderen van de eutrofe omstandigheden zijn waarschijnlijk meer ingrijpende maatregelen nodig, zoals het verwijderen van de toplaag van de bodem of intensief maaien of begrazen. Hiermee kunnen overtollige nutriënten uit het gebied worden verwijderd (Bakker and Olf, 1995). Het valt echter te betwijfelen, of er herstel

van een diverse, soortenrijke vegetatie zal plaatsvinden door het uitoefenen van deze maatregelen. De kale bodem die ontstaat bij het verwijderen van de toplaag of begrazing, zal waarschijnlijk in eerste instantie worden gekoloniseerd door ongewenste soorten zoals *Juncus effusus*, *Typha latifolia* and *Phragmites australis*. Daarnaast zullen maaien en begrazing alleen op lange termijn de gewenste nutriëntreductie tot stand brengen. Ook is de verwijderde biomassa in de benadering van de complete broeikasgasbalans een emissie van koolstof uit het gebied. Een mogelijkheid zou echter zijn om de biomassa oogst die ontstaat door een intensief maaibeleid te gebruiken als biobrandstof. Hierdoor kunnen broeikasgasemissies uit fossiele brandstoffen weer wat worden teruggedrongen. Als laatste moet worden opgemerkt dat de lange perioden van agrarisch landgebruik de soorten diversiteit en zaadbanken in veenweidegebieden waarschijnlijk sterk hebben uitgedund. Kunstmatige introductie van plantensoorten zou de ontwikkeling naar een mesotroof ecosysteem, met een hogere plantenrijkheid en –diversiteit en grotere opname van broeikasgassen, wellicht kunnen versnellen. Wel moet worden gezegd dat, ondanks dat eutrofe draslandgebieden met plantensoorten als *Juncus effusus*, *Typha latifolia* en *Phragmites australis* botanisch wellicht weinig interessant zijn, deze omstandigheden en vegetatie zeer bevorderlijk zijn voor het ontwikkelen van vogelreservaten.

Watermanagement biedt vermoedelijk slechts beperkte en tijdelijke mogelijkheden voor vermindering of stabilisatie van broeikasgasemissies in eutrofe veenweidegebieden. Ten gevolge van de blijvend nutriëntrijke bodem door de interne eutrofiëring, zal het gebied waarschijnlijk een potentieel grote bron van broeikasgassen blijven. Door de grondwaterstand vlak onder het maaiveld te houden zoals in de verlaten delen van de Horstermeerpolder, of met behulp van meer ingrijpende maatregelen zoals ondiepe drainage en verminderen van het aantal sloten, kunnen de hoge CH₄-fluxen wellicht worden onderdrukt en kan de uitbreiding van de diep wortelende draslandplanten worden beperkt. De grondwaterstandverlaging moet echter zeer zorgvuldig gebeuren, aangezien R_{eco} dramatisch zal toenemen wanneer waterstanden lager zijn dan -0.10 a 0.15 m onder maaiveld, waardoor het gebied alsnog verandert in een bron van broeikasgassen.

Referenties

- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., Vesala, T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, Vol. 30, 113-175.
- Bakker JP, Olf H. 1995. Nutrient dynamics during restoration of fen meadows by hay-making without fertilizer application. In: Wheeler B, Shaw S, Fojt W, Robertson RA. *The restoration of temperate wetlands* pp. 143-163. Wiley, Chichester.
- Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., 1991. Trace Gas-Exchange above the Floor of a Deciduous Forest.1. Evaporation and CO₂ Efflux. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 96, 7271-7285.
- Brix, H., Sorrell, B.K., Schierup, H.H., 1996. Gas fluxes achieved by in situ convective flow in *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*. 54, 151-163.
- Christensen, T.R., Ekberg, A., Strom, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Mats, O., Svensson, B.H., Nykanen, H., Martikainen, P.J., Oskarsson, H., 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*. 30, DOI: 10.1029/2002L016848.
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P, Grunwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Schulze ED, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529-533.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy and X. Zhang, 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Drösler, M., Freibauer, A., Christensen, T.R., Friborg, T., 2008. Observations and status of peatland greenhouse gas emissions in Europe. In: Dolman AJ, Valentini R, and Freibauer A. *Observing the continental scale greenhouse gas balance*. Springer Ecological series 203: 243-262.
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In:

- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gorham, E., 1991. Northern Peatlands - Role in the Carbon-Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecological Applications*. 1, 182-195.
- Kutzbach, L., Schneider, J., Sachs, T., Giebels, M., Nykanen, H., Shurpali, N.J., Martikainen, P.J., Alm, J., Wilmking, M., 2007. CO₂-flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression. *Biogeosciences*. 4, 1005-1025.
- Lee, X., Massman, W., Law, B., 2004. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Livingston, G.P., and Hutchinson, G.L., 1995. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error, In: Matson, P.A., Harriss, R.C. *Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*. Blackwell Publishing, *Methods in Ecology*, 14-51.
- Reichstein M, Ciais P, Papale D, Valentini R, Running S, Viovy N, Cramer W, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Bernhofer C, Buchmann N, Carrara A, Grunwald T, Heimann M, Heinesch B, Knohl A, Kutsch W, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Pilegaard K, Pumpanen J, Rambal S, Schaphoff S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Vesala T, Zhao M. 2007. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology* 13: 634-651.
- Van den Bos, R.M., 2003. Human influences on carbon fluxes in coastal peatlands; process analysis, quantification and prediction. Thesis, Vrije Universiteit, p. 91-110, 2003.
- Van Dijk, J., Stroetenga, M., Bos, L., Van Bodegom, P.M., Verhoef, H.A., Aerts, R., 2004. Restoring natural seepage conditions on former agricultural grasslands does not lead to reduction of organic matter decomposition and soil nutrient dynamics. *Biogeochemistry*. 71, 317-337.
- Van Huissteden, J., van den Bos, R., Alvarez, I.M., 2006. Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄-fluxes from peat soils. *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie En Mijnbouw*. 85, 3-18.
- Whiting, G.J., Chanton, J.P., 1996. Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanisms. *Aquatic Botany*. 54, 237-253.