



Aanbevelingen voor directe kwantificering van broeikasgas-balansen van natte natuurgebieden

Technische adviesmemo

Bart Kruijt
Cor Jacobs



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Aanbevelingen voor directe kwantificering van broeikasgas-balansen van natte natuurgebieden

Technische adviesmemo

Auteurs

Bart Kruijt¹

Cor Jacobs²

1 Wageningen Universiteit, leerstoelgroep Water Systems and Global Change

2 Wageningen Environmental Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Universiteit en Wageningen Environmental Research in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend voor de Klimaatenvolpe, onderzoeksthema Klimaatslim Bos en Natuurbeheer (projectnummer BO-53.001-019)

Wageningen, februari 2020

Gereviewd door:

Jeroen Veraart (Wageningen Environmental Research)

Inhoud

1	Inleiding	5
2	Methoden	7
	2.1 kamermetingen	7
	2.2 Eddy covariantie	7
	2.3 Metingen van fluxen met een vliegtuigje	8
	2.4 Betrouwbaarheid en onzekerheden van fluxmetingen	9
	2.4.1 Inherente nauwkeurigheid van de meetapparatuur	9
	2.4.2 Representativiteit van het bemeten oppervlak	9
	2.4.3 Representativiteit van de gemeten periode	10
	2.5 Mogelijkheden in ontwerp en analyse methoden	10
3	Opzet van en benodigdheden voor metingen	13
	3.1 Hoe en hoe lang zou er gemeten moeten worden.	13
	3.2 Benodigde apparatuur	13
	3.3 Logistiek en personeel	13
	3.4 Aanvullend onderzoek	14
	3.5 Globale kostenramingen	15
4	Referenties	16
	Bijlage 1 Broeikasgassen uit ecosystemen	17

1 Inleiding

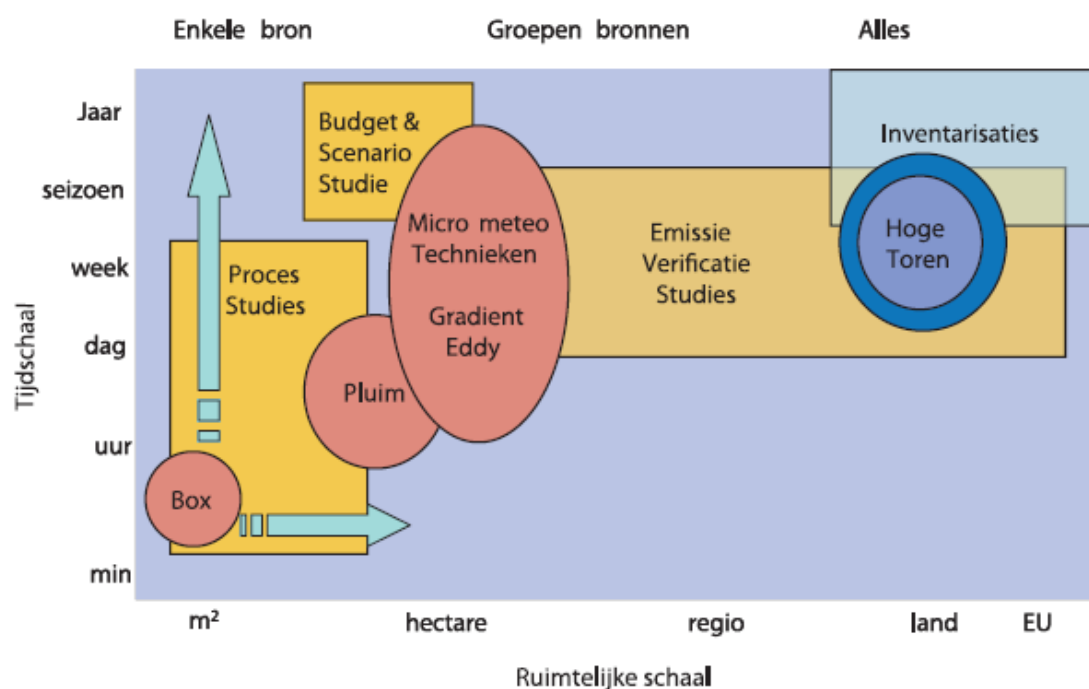
Kwantificering voor rapportage/klimaatakkoord

Er is een groeiend belang om van alle typen landoppervlak de bijdrages aan de broeikasgasbalans te kwantificeren. Voor landelijke en internationale rapportage is het nodig om goed onderbouwde broeikasgas-kengetallen te produceren voor de diverse sectoren en landschapstypen. De broeikasgasbalans betreft opname en uitstoot van CO₂ en CH₄, en uitstoot van N₂O. CO₂ wordt in natuur opgenomen bij fotosynthese en groei van planten, en uitgestoten door dezelfde planten, maar ook door bodemorganismen, dieren en via chemische oxidatie van organische stof. In een ecosysteem waar de biomassa toeneemt, wordt over het algemeen netto CO₂ vastgelegd, en omgekeerd is een degraderend systeem of een systeem waar de bodem is verstoord vaak een bron van CO₂ naar de atmosfeer. Methaan wordt meestal uitgestoten in zuurstofloze, natte omgevingen (bv moerassen), en in mindere mate weer geoxideerd (dus opgenomen) waar de bodem zuurstofrijk is. N₂O wordt vooral uitgestoten in (te) voedselrijke omgeving, en is voor natuurgebieden waarschijnlijk minder relevant.

Kwantificering voor evaluatie beheersmaatregelen/Green Deal

Het kan nuttig zijn om beheersmaatregelen, gericht op het verminderen van broeikasgas-uitstoot, te evalueren met directe metingen van de broeikasgasbalansen in betrokken gebieden. Bijvoorbeeld in Green-Deal maatregelen zal men moeten kunnen aantonen dat genomen maatregelen ook echt werken. Daaraan gekoppeld kan het belangrijk zijn om de bijkomende effecten van beheer te monitoren, zoals veranderende waterbalansen, zich uitend in verdamping.

Beschikbare methoden



Figuur 1: schematische groepering van beschikbare methoden voor broeikasgas-bepalingen.

Benamingen wijken hier en daar af van wat er in deze notitie besproken wordt: 'Box' is bijvoorbeeld equivalent met 'Kamer' metingen (Uit Hensen et al, 2010).

Zowel voor het kwantificeren en monitoren van broeikasgasbalansen als voor het evalueren van beheersmaatregelen in het veld is er een reeks methoden beschikbaar die (vrijwel) niet-destructief, niet-invasief en (semi-) automatisch zijn. Deze methoden richten zich op het direct meten van de 'flux' van de betreffende gassen van het oppervlak naar de lucht erboven, en omgekeerd. Het is nuttig

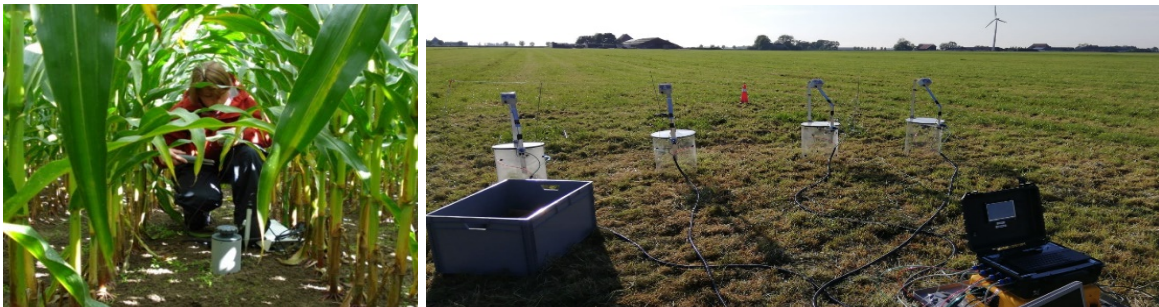
om zulke metingen te combineren met waarnemingen aan omgevingsfactoren en/of remote-sensing informatie, om interpolatie en extrapolatie te vergemakkelijken. Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van zinvolle benaderingen afhankelijk van de tijd -en ruimteschaal waarop er gekwantificeerd moet worden.

De uitdaging met dergelijke methoden is in natuurgebieden, anders dan in landbouwgebied, over het algemeen dat natuur zeer divers, dynamisch en ruimtelijk heterogeen is, zowel in begroeiingstype als in hoogte van de vegetatie. Een goede bemonsteringsstrategie is essentieel.

2 Methoden

2.1 kamermetingen

Binnen de directe fluxmetingen kunnen we twee benaderingen onderscheiden. Ten eerste kan de netto flux van een gas uit of in de bodem worden bepaald met een 'kamer' of 'cuvette': men zet een omgekeerde 'doos' of 'kamer' op de grond en meet hoe snel de gasconcentraties daarin veranderen (fig 2). Deze methode kan worden toegepast op elk gas dat stabiel is en waarvoor een meetapparaat beschikbaar is. Er zijn vele variaties in typen kamermetingen. Sommige zijn sterk handmatig, maar mobiel (men bemonstert de bodem op diverse plekken), sommige zijn automatisch maar meer statisch (kamers staan op een beperkt aantal plekken maar meten zonder dat er bediening nodig is). Nadelen van deze benadering zijn 1) de verstoring aan het te bemeten object; 2) de kleine 'voetafdruk' (men bemeet niet méér grond dan het doorgaans kleine oppervlak van de kamer) en 3) de vaak nogal arbeidsintensieve bediening, waardoor de bemonstering beperkt blijft. Voordeel is daarentegen dat de methode bijna overal kan worden toegepast waar een kamer kan staan, zodat de volle heterogeniteit in principe kan worden bemonsterd. Een bijkomend nadeel is dat grote planten en bomen zich niet in een kamer laten stoppen. Daarvoor moet dan een methode worden gebruikt waarbij kamer-metingen aan individuele bladeren worden opgeschaald en opgeteld naar het hele ecosysteem. Dit is mogelijk, maar vereist diverse aannames en bijkomende metingen (zoals een schatting van de hoeveelheid geabsorbeerd licht voor fotosynthese).



Figuur 2: foto's van kamermetingen. Links: handmatig, rechts: automatisch

2.2 Eddy covariantie

De tweede en zeer krachtige mogelijkheid is om met één set apparatuur een voetafdruk tot enkele hectares te bemeten. Deze voetafdruk kan dan een deel van de heterogeniteit in een gebied 'dekken'. Deze fluxmetingen met eddy covariantie (ook wel minder exact aangeduid met 'eddy correlatie') worden gedaan met snelle, gevoelige apparatuur die luchtbeweging en concentraties van gassen registreert en combineert¹, doorgaans op een mastje op enige hoogte boven het oppervlak waar de gasuitwisseling plaatsvindt (fig 3).

In tegenstelling tot metingen met 'kamers' biedt Eddy covariantie het voordeel dat een veel groter oppervlak (wind opwaarts van de sensors) in één keer wordt bemeten, dat deze voetafdruk niet betreden hoeft te worden en dat de metingen geheel geautomatiseerd en continu plaatsvinden. Afhankelijk van de meethoogte (minimaal 1.5 m) kan een voetafdruk vanaf 50-70 m tot enkele kilometers wind opwaarts (breedte ongeveer 20 m) worden 'gezien'.

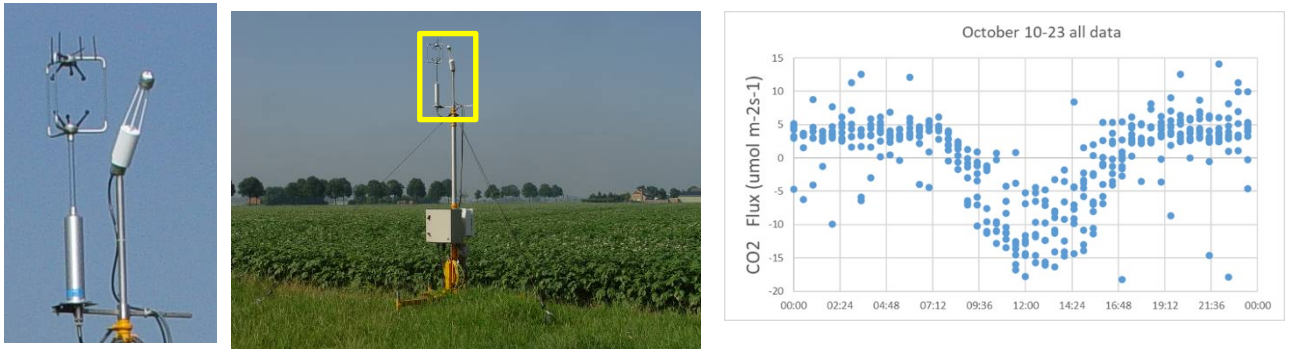
Het bijbehorende nadeel is dat ruimtelijke variatie binnen die voetafdruk alleen is te herleiden uit de variatie van fluxen met de windrichting. Een goede interpretatie van die variatie vraagt vaak extra schattingen binnen de voetafdruk, met behulp van metingen of modellen. Een ander nadeel is het feit dat, net als bij

¹ Het principe is eenvoudig in te zien: hoeveelheid transport (flux) is gelijk aan snelheid maal concentratie. Covariantie van verticale snelheid en concentratie is dus een directe maat voor verticaal transport.

kamers, alleen de gasuitwisseling van het hele, 'bulk' ecosysteem wordt gemeten: de metingen 'zien' niet gescheiden de opname (fotosynthese) en uitstoot (bv oxidatie van organische stof, ademhaling van wortels en andere organismen in de bodem).

Wel is het zo, dat fotosynthese alleen overdag in het licht plaatsvindt, en dat van deze variatie over de tijd gebruik kan worden gemaakt om vastlegging door fotosynthese en uitstoot te onderscheiden. De uitdaging is dan ook:

- het beheersen van de voetafdruk binnen het gebied van interesse en
- het deduceren van de processen waar we in geïnteresseerd zijn (effecten van maatregelen) uit tijdreeksen waar dag en nacht, vegetatie en aard van de voetafdruk (variërend met de windrichting) elkaar afwisselen en variëren. Bosjes of bosranden in of nabij de voetafdruk van een laag mastje vormen een bijkomende uitdaging. Eddy covariantie werkt het beste met een voetafdruk waarin de hoogteverschillen, relatief ten opzichte van de afmeting van de voetafdruk, niet te groot zijn.



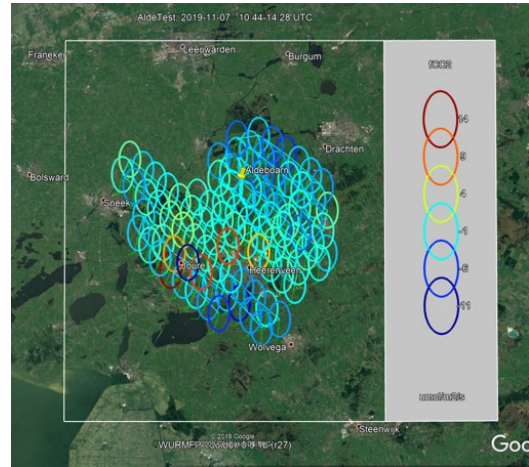
Figuur 3: Links en midden: typische eddy covariantie -opstelling in landbouwperceel. Rechts: typische gemiddelde dagelijkse gang van CO₂ fluxen, in dit geval boven veenweide. Negatieve waarden staan voor opname.

Een vereenvoudigde uitleg van de werking van deze techniek is omschreven in bijlage 2 .

2.3 Metingen van fluxen met een vliegtuigje

Het is mogelijk eddy covariantie metingen ook uit te voeren vanaf een klein vliegtuig, dat laag (vanaf 60 m) en langzaam (100 km/uur) over het landschap vliegt. Hierbij kan met een ruimtelijke resolutie van ongeveer 2 km de netto flux (uitstoot of opname) worden gemeten met een 'voetafdruk' die enige kilometers wind opwaarts reikt. Met statistische methoden kan ook deze totale flux worden uitgesplitst naar de belangrijkste landgebruik- en bodemtypen, en grondwaterpeilen. Als de schaal van het landschap en beheersmaatregelen voldoende is, en de meetdichtheid groot genoeg kan het effect van dergelijke maatregelen worden onderscheiden.

Vliegtuigmetingen kunnen niet 's nachts worden uitgevoerd (het vliegtuig moet 'op zicht' vliegen), waardoor pure emissie-fluxen altijd moeten worden afgeleid uit de variatie van fluxen overdag. Deze benadering is sterk complementair aan lokale fluxmetingen op de grond. Een mogelijke meetstrategie is om volgens 'grid-patronen' te vliegen en dan de fluxen in een landschap van enige tientallen kilometers in het vierkant in kaart te brengen met een resolutie van ongeveer 2 km (fig 4).



Figuur 4 – (links) het Wageningse eddy covariantie vliegtuigje in actie en (rechts) voorlopige resultaten van gridded flight in Friesland, oktober 2019. De kleurschaal geeft de grootte van de flux aan (blauw is opname, bruin is uitstoot).

2.4 Betrouwbaarheid en onzekerheden van fluxmetingen

De betrouwbaarheid van fluxmetingen valt te schatten aan de hand van drie aspecten:

- 1- Inherente nauwkeurigheid van de meetapparatuur in relatie tot de specifieke locatie van de metingen
- 2- Representativiteit van het bemeten oppervlak voor het gebied waar interesse voor is
- 3- Representativiteit van de gemeten periode voor de tijdschaal en tijdsperiode waar interesse voor is

2.4.1 Inherente nauwkeurigheid van de meetapparatuur

Hoewel de apparatuur zelf meestal zeer nauwkeurig, precies en goed geijkt is, treden er soms storingen op en leidt de interactie met de omgeving tot een zekere mate van onzekerheid. Voor kamers heeft dit te maken met bijvoorbeeld (tijdelijke) lekken, vocht of hoge temperatuur in de kamer en beïnvloeding van de lichtinval, en in het algemeen een verstoring van het te bemeten object. Bij eddy covariantie is er een kwantificeerbare, inherente onzekerheid vanwege de interactie met turbulente luchtbeweging die gemeten moet worden: het meetvolume en de tijdrespons zijn niet oneindig klein. Daarnaast leiden sterk veranderende meteorologische omstandigheden en lage turbulentie-intensiteit (bijvoorbeeld s'nachts) tot hogere onzekerheid in de berekende fluxen. Onder ideale omstandigheden wordt de inherente onzekerheid van een half-uur gemiddelde flux met eddy covariantie meestal op 10% geschat. Voor elke situatie rekent de software een kwaliteitslabel uit, aan de hand waarvan de gebruiker kan kiezen welk betrouwbaarheidsniveau nodig is. Meetnauwkeurigheid uit zich ook in 'ruis' en 'outliers' in de gemeten en berekende data, waardoor nauwkeurigheid ook aan de hand van standaardfouten redelijk te kwantificeren is. Onder (nachtelijke) stabiele atmosfeer is de fout groter, terwijl de fout afneemt naarmate er over meer tijd/datapunten gemiddeld wordt – dus dagtotalen of jaartotalen hebben een grotere betrouwbaarheid.

2.4.2 Representativiteit van het bemeten oppervlak

Meetkamers hebben een zeer beperkte voetafdruk – meestal minder dan een vierkante meter. Hoewel metingen gedaan worden met meerdere kamers tegelijkertijd, of, handmatig, op meerdere plekken, is de representativiteit van de meetpunten dus van cruciaal belang. In sterk heterogene gebieden is dit lastig, en ook homogene gebieden kunnen zeer heterogeen zijn wat de bodem betreft. De betrouwbaarheid valt dan redelijk te kwantificeren uit de statistische variatie in een goed bemonsterd gebied. Eddy covariantie metingen hebben meestal juist een grote voetafdruk, soms zelfs groter dan het gebied waar interesse voor is. Alhoewel kleinschalige variatie dan wordt uitgemiddeld, zoals vereist, hangt de grootte en richting van de voetafdruk af van meteorologische omstandigheden en

overlapt in variabele mate het gebied. Dit veroorzaakt variatie, enige ruis en uitbijters in de data. De voetafdruk wordt geschat met de metingen zelf en datapunten met een voetafdruk buiten het gebied van interesse kunnen worden uitgefilterd. Lange reeksen met eddy covariantiemetingen bevatten meer variatie in de voetafdruk en kunnen gebruikt worden om de onzekerheid te verkleinen en de variatie binnen de voetafdruk te bestuderen.

2.4.3 Representativiteit van de gemeten periode

Voor temporele variatie geldt in statistische zin hetzelfde als voor ruimtelijke variatie: er moet een representatief aantal uren/dagen gemeten worden en de betrouwbaarheid is statistisch kwantificeerbaar. Voor fluxen van CO₂ zijn er belangrijke verschillen tussen dag en nacht. Deze moeten beide goed worden bemonsterd. Voor kamers moet er dan ofwel automatisch gemeten worden, of wel voldoende vaak met de hand. Voor eddy covariantie komt daar bij dat 's nachts de turbulentie vaak slecht ontwikkeld is waardoor verticaal transport minder efficiënt verloopt en de voetafdruk minder goed gedefinieerd is. Ook hier is filteren van te grote voetafdrukken de beste manier om de betrouwbaarheid van de data te verhogen.

In de praktijk is het mogelijk om eddy covariantie data zodanig te behandelen dat er voldoende datapunten overblijven met een betrouwbaarheidsinterval van 10-30% per half uur. Door te middelen over langere tijd neemt de betrouwbaarheid uiteraard toe.

2.5 Mogelijkheden in ontwerp en analyse methoden

Welke gasfluxen kunnen gemeten worden.

Kamermetingen kunnen relatief eenvoudig worden ingezet voor elk willekeurig, niet-reactief gas, zolang er een analyse-apparaat voor voorhanden is dat onder veldomstandigheden gebruikt kan worden (robuustheid en stroomgebruik zijn hierbij belangrijk). Bij eddy covariantie wordt standaard de flux van warmte, waterdamp (verdamping) en CO₂ gemeten. Meten van andere gasfluxen kan altijd, maar de sensoren moeten snel en compact zijn en langere tijd onafhankelijk in het veld kunnen functioneren. Voor methaan is deze technologie tegenwoordig zonder veel technische kennis toepasbaar en beschikbaar, terwijl voor bijvoorbeeld N₂O deze techniek nog net op de rand van 'experimenteel' verkeert. Dit zal echter in de komende jaren snel verbeteren.

Aanvullende metingen inclusief remote sensing

Naast directe fluxmetingen is het over het algemeen verstandig om routinematig lokale weersvariabelen, met name regenval en instraling, te meten. Dit stelt ons in staat de waarnemingen te extrapoleren en te interpoleren in de tijd. Echte aanvullende gegevens kunnen bestaan uit satellietbeelden van teruggekaatste straling, bijvoorbeeld indices als NDVI. Deze kunnen worden gebruikt om de fotosynthese-activiteit van de vegetatie te schatten, en met die informatie kan uit fluxmetingen aan de grond dan weer gemakkelijker de emissiecomponent worden bepaald uit de gemeten netto flux.

Vooruitblik op 'vereenvoudigde' en goedkopere meetmethoden

Eddy covariantie en kamermetingen zijn de meest directe en nauwkeurige meetmethoden. Deze zijn echter relatief duur en/of arbeidsintensief. Dit maakt ze minder geschikt om grootschalig in te zetten in meerdere representatieve gebieden. Daarom evalueren we alternatieven, die gebruik maken van goedkopere en eenvoudiger apparatuur. Dit onderzoek is nog in volle gang. We bestuderen onder andere een aantal methoden die al enige decennia geleden zijn voorgesteld, maar nooit routinematig in praktijk gebracht. Met name concentreren wij ons op methoden waarbij alleen de variantie, of standaarddeviatie van een langzamer gemeten concentratie wordt bepaald (van een van de broeikasgassen). Deze is meestal, onder bepaalde weersomstandigheden, goed gecorreleerd met de eddy covariantie-flux. Een ander, iets ingewikkelder alternatief is het analyseren in detail van de variatie over de tijd van hoogfrequente concentratie-signalen, waarbij de opname of uitstoot puur uit

plotselinge af- respectievelijk toenames te herleiden is. In beide gevallen zou slechts een concentratiesensor en een standaard windmeter in plaats van een snelle nodig zijn.

Het combineren van de puzzelstukjes dan wel kiezen van een indicator

In kleinschalige, sterk heterogene natuurgebieden zal een strategie moeten worden gekozen bestaande uit een combinatie van eddy covariantie over het meest dominante oppervlaktetype, bodemkamers voor diverse afwijkende 'patches' en een schatting van de fotosynthese van struiken en bomen, gebaseerd op puntsgewijze bemonstering van fotosynthese en licht-doorval. Er kan ook voor gekozen worden om te focussen op een dominant oppervlaktetype.

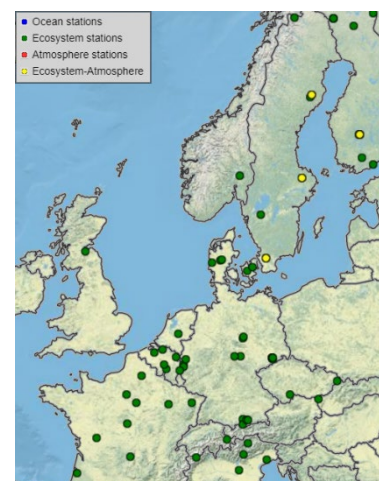
Gebruik maken van al bestaande (internationale) datasets

Naast het direct bemeten van gebieden is het altijd zinvol om bestaande datasets te analyseren. Bestaande data kunnen informatie geven over geschiktheid van een bepaald type oppervlak voor eddy covariantie, over te verwachten orde-grootte en variatie van fluxen, of voor het genereren van meer specifieke hypothesen waarop bij nieuwe metingen gefocust kan worden. Voor (nieuwe, natte) natuur zijn beperkt data beschikbaar uit vroegere projecten. In Nederland zijn er relatief veel fluxmetingen gedaan binnen de 'Klimaat Voor Ruimte' projecten (<http://www.klimaatvoorruimte.nl>, 2006-2012, zie ook Hensen et al., 2010), waaronder in een uit gebruik genomen veenweidegebied (het Horstermeer, Hendrix et al., 2010) en andere in veenweiden (Veenendaal et al, 2007), andere graslanden (Jacobs et al, 2007) en akkerland op minerale gronden (Moors et al, 2010). Langer geleden is er ook gemeten in het Fochteloërveen (Nieveen et al, 1998). Er is meer (recent) werk op dit gebied gedaan in Noord-Duitsland, Ierland en het VK. De meeste van de bijbehorende datasets zijn toegankelijk voor derden om te bestuderen.

Daarnaast is er een grote en groeiende internationale verzameling van lange-termijn meetsites (honderden), vaak in bos maar ook in landbouw-gerelateerd landgebruik. Data hiervan zijn beschikbaar onder databases zoals Fluxnet (<https://fluxnet.fluxdata.org/>), Carboeurope (<http://www.europe-fluxdata.eu/>), en het recent ingerichte ICOS carbonportal (<https://www.icos-cp.eu/>, zie fig 6).

Wageningen-UR (i.c. het voormalige Alterra, tegenwoordig WENR) heeft in 1996 de tot nu toe langst lopende fluxdata-serie opgezet, in een dennenbos op de Veluwe (het Loobos bij Kootwijk, zie www.climatexchange.nl, Elbers et al, 2011). Met deze data, onderdeel van alle eerder genoemde netwerken, is grote ervaring opgedaan met de eddy covariantie techniek. Vele kleinere en grotere projecten in zowel binnen- als buitenland (Amazonia, Siberie, Spanje) hebben diverse datasets opgeleverd die beschikbaar zijn via Wageningen UR.

Figuur 5: ICOS-carbon portal Ecosystem sites (fluxdata)



Analysemogelijkheden.

De meeste metingen die in dit advies beschreven staan hebben een hoge tijdsreolutie (uren tot dagen), maar kunnen lang volgehouden worden, door alle seizoenen en meerdere jaren heen. Dit biedt de mogelijkheid om de metingen voor diverse doeleinden te gebruiken:

- Kwantificering van broeikasgas-budgetten op seizoens- of jaarbasis door alles op te tellen en waar nodig te interpoleren
- Analyse van het functionele gedrag van het object (het natuurgebied, de vegetatie als geheel) als 'black box': bijvoorbeeld de afhankelijkheid van temperatuur, vocht en instraling.
- Bovenstaande analyses kunnen worden gebruikt om voorspellende modellen te parameteriseren of te valideren.
- Daarnaast kunnen nieuwe, meer lokale en vegetatie-specifieke metingen op jaarbasis gebruikt worden om nieuwe berekenings-standaarden te maken, zoals emissie-factoren per vegetatietype.
- Uiteindelijk kan een gestandaardiseerde en gevalideerde eddy covariantie installatie routinematig, door landbeheerders gebruikt worden voor rapportage van broeikasgasbalansen of effect van maatregelen. Hierbij is dan beperkte technische ondersteuning nodig van specialisten.

3 Opzet van en benodigdheden voor metingen

3.1 Hoe en hoe lang zou er gemeten moeten worden.

Voor de heterogene en natte natuurgebieden meetlocaties lijken metingen op basis van eddy covariantie het meest geschikt. Dergelijke metingen zouden voor een periode van minstens een jaar, inclusief de winterperiode, moeten worden uitgevoerd. Een enkel meetjaar geeft een eerste indicatie van de grootte van mogelijke verschillen en geeft een grootte-orde van de broeikasgasbalans. Verschillen van jaar tot jaar kunnen echter belangrijk zijn. Het ene jaar kunnen verschillen tussen locaties groter zijn dan het andere jaar, bijvoorbeeld als het ene jaar extremer is in temperatuur of droogte dan het andere. Metingen gedurende meerdere jaren geven dus een (veel) nauwkeuriger kwantificering van zowel de balans als de verschillen, vooral als de meetjaren de jaarlijkse variatie in weersomstandigheden min of meer dekken.

3.2 Benodigde apparatuur

Een eddy covariantie systeem bestaat tenminste uit 1) een snelle 3-d windmeter (bijvoorbeeld de sonische anemometer Gill Windmaster), een snelle, infrarood gas analyser voor H_2O en CO_2 (bv een Licor 7500DS) en een interface (bv Licor of een snelle datalogger) waarin de signalen samen gesynchroniseerd en opgeslagen worden. Deze twee sensoren worden zo dicht mogelijk bij elkaar op een uithouder gemonteerd, op minstens 1.5 m boven de gemiddelde vegetatiehoogte, meestal op een mast(je). Eddy covariantiemetingen van methaan vereisen een snelle methaansensor. De meest voor de hand liggende keuze hierin is de Licor 7700 sensor. Deze is groter dan de H_2O/CO_2 sensor en vraagt meer onderhoud en iets meer stroom. Meten van lachgasfluxen (N_2O) vereist grotere en aanzienlijk duurdere apparatuur, die ook meer onderhoud en stroom vergt.

Ten slotte is het om interpolatie, extrapolatie, en toepassen van modellen mogelijk te maken, verstandig om eddy covariantie te combineren met een automatisch weerstation. Hierin moeten dan bij voorkeur worden meegenomen: de stralingsbalans (kortgolvig (essentieel), langgolvig en fotosynthetisch actief (PAR), inkomend en teruggekaatst), temperatuur en relatieve vochtigheid, neerslag (essentieel), bodem (of water-)temperatuur, bodemwarmteflux, bodemvocht en grondwaterstand (belangrijk in natte gebieden). Daarnaast is het nuttig om bijvoorbeeld windsnelheid, windrichting, oppervlaktetemperatuur (infrarood), temperatuur en vocht op meerdere hoogtes, en bodemtemperatuur/vocht op meerdere dieptes te meten. De gegevens moeten dan minstens eens per half uur opgeslagen worden op een aparte datalogger.

3.3 Logistiek en personeel

Het geheel moet gemonteerd zijn op een mast of andere stabiele stellage, die de wind zo min mogelijk verstoort. Er zijn diverse mogelijkheden, afhankelijk van de meethoogte. Stroomvoorziening kan plaats vinden via accu's en zonnepanelen, eventueel aangevuld met een kleine windgenerator. Indien netspanning in de buurt beschikbaar is, zou de stroomvoorziening daarop gebaseerd kunnen worden. Stroomvoorziening via netspanning biedt met name in de late herfst en winter grote voordelen.

Toegang tot het mastje is belangrijk voor onderhoud. In een moerasgebied kan een plankier toegepast worden om de bodem niet te verstoren bij onderhoudswerkzaamheden. Data-opslag kan met geheugenkaartjes en USB sticks, maar aanvullende on-line datatransmissie via snelle modems is zeer aan te bevelen, om problemen vroegtijdig te kunnen opsporen en arbeids(reis-)tijd te besparen. De data kunnen on-line opgeslagen worden en semi-definitieve resultaten kunnen bijna real-time beschikbaar komen. Standaard onderhoud vergt over het algemeen een site-bezoek van een keer per

maand, plus desktop-werk van bij elkaar een dag per week. Data analyse en rapportage kosten meer tijd, afhankelijk van de vraagstelling: voor routinematige broeikasgas-rapportage is iemand nodig die de metingen in rapportage kan omzetten, voor proces-analyse en toepassen van modellen is een onderzoeker nodig. Voor veel standaard-analyse (gaten vullen, jaartotalen bepalen, voetafdruk schatten) is software beschikbaar.

3.4 Aanvullend onderzoek

Het is meestal erg nuttig om, naast de metingen vanuit een meetmast, het gebied in de voetafdruk zo veel mogelijk te karakteriseren. Kartering van vegetatie, waterpartijen bodemeigenschappen en -chemie is kan vaak eenmalig worden uitgevoerd, waarbij remote sensing producten of drone-fotografie kunnen helpen. Daarnaast is monitoring van de hydrologie in de voetafdruk zeer nuttig. Waar mogelijk kunnen ook kamermetingen van bodem-emissies en fotosynthese worden uitgevoerd, ter ondersteuning van de interpretatie. In beheerd gebied is het voor een goede interpretatie van koolstofbalansen essentieel om zaken als oogst, begrazing (bv via video of wildcamera's), bemesting etc te registreren.

Aanvullende vliegtuigmetingen

In een dag kan een gebied tot drie keer worden bemeten, hetgeen een redelijk beeld geeft van de dagelijkse gang. In de praktijk zullen meerdere vliegdagen nodig zijn voor een statistisch bruikbaar resultaat, en dit zal herhaald moeten worden voor een beeld van de variatie over seizoenen. Dus voor een goed beeld van het 'groeizeizoen' zou voor ongeveer 10 vluchten moeten worden gebudgetteerd. Wetenschappelijk personeel is daarnaast nodig om de geproduceerde fluxkaarten te duiden.

Vliegtuigmetingen in de praktijk

Omdat de fluxmetingen vanuit een vliegtuig grover zijn wat betreft ruimtelijke schaal, zijn deze metingen het meest geschikt om de ruimtelijke contrasten in fluxen te karakteriseren tussen bijvoorbeeld de Onlanden of Polder Oosterland en hun omgeving. Hiervoor kan een rechthoekig patroon gekarteerd worden.

Voor Polder Camphuis en Westbroek is de schaal van een enkele vliegtuigmeting aan de grote kant. Vliegtuigmetingen zijn ook erg geschikt om binnen een regio de gemiddelde verschillen in kaart te brengen tussen de diverse landgebruikstypen, en daarmee te helpen bij het opschalen van meetpunt naar regio.



Foto: Polder Oosterland (boven) en Polder Camphuis

3.5 Globale kostenramingen

De investeringskosten voor Eddy Covariance zijn relatief hoog, maar daar staat tegenover dat een dergelijk systeem, eenmaal geïnstalleerd, weinig onderhoud nodig heeft en lang mee gaat. De ervaring leert dat de belangrijkste lopende kosten zitten in het op peil houden van de stroomvoorziening (accu's verwisselen als er geen netspanning is of bij onvoldoende zonne-energie), en in minder mate in het bewaken en organiseren van de datastroom.

4 Referenties

- Elbers, J.A., Jacobs, C.M., Kruijt, B., Jans, W.W. and Moors, E.J., 2011. Assessing the uncertainty of estimated annual totals of net ecosystem productivity: A practical approach applied to a mid latitude temperate pine forest. *Agricultural and forest meteorology*, 151(12), pp.1823-1830.
- Hendriks, D. M. D., et al. (2010). "Multi-technique assessment of spatial and temporal variability of methane fluxes in a peat meadow." *Agricultural and Forest Meteorology* 150(6): 757-774.
- Hensen, A.R.J.A.N., Kroon, P.S., van Huissteden, J., Dolman, A.J., Veenendaal, E.M., Duyzer, J.H., Elbers, J.A., Beek, C.V. and Mosquera, J.U.L.I.O., 2010. Meten van broeikasgassen in het landschap. *Landschap: tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde*, 27(2), pp.57-65.
- Jacobs, C.M.J., A.F.G. Jacobs, F.C. Bosveld, D.M.D. Hendriks, A. Hensen, P. Kroon, E.J. Moors, L. Nol, A. Schrier-Uijl and E.M. Veenendaal, 2007: Variability of annual CO₂ Exchange from Dutch Grasslands. *Biogeosciences* 4, 803-816.
- Jacobs, C. M. J., E. Moors, and H. Dolman. 2008. Broeikasgassen in en uit ecosystemen. *geografie* 9: 20-23.
- Moors, E.J., Jacobs, C., Jans, W., Supit, I., Kutsch, W.L., Bernhofer, C., Béziat, P., Buchmann, N., Carrara, A., Ceschia, E. and Elbers, J., 2010. Variability in carbon exchange of European croplands. *Agriculture, ecosystems & environment*, 139(3), pp.325-335.
- Nieveen, J.P., Jacobs, C.M. and Jacobs, A.F., 1998. Diurnal and seasonal variation of carbon dioxide exchange from a former true raised bog. *Global Change Biology*, 4(8), pp.823-833.
- Veenendaal, E.M., Kolle, O., Leffelaar, P.A., Schrier-Uijl, A.P., Van Huissteden, J., Van Walsem, J., Möller, F. and Berendse, F., 2007. CO₂ exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils.

Bijlage 1 Broeikasgassen uit ecosystemen

Bijlage 2 is gepubliceerd als artikel in het tijdschrift Geografie (<https://geografie.nl/tijdschrift>) .

Het dient als volgt geciteerd te worden:

Jacobs, C. M. J., E. Moors, and H. Dolman. 2008. Broeikasgassen in en uit ecosystemen. *geografie* 9: 20-23.

Broeikasgassen in en uit ecosystemen

In het kader van het Klimaatverdrag van de VN moeten alle landen broeikasgasemissies rapporteren. Behalve uitstoot door industrie en verkeer tellen ook emissies van natuurlijke en landbouwecosystemen mee. Nu worden die nog geschat volgens een internationale standaard. Maar de cijfers zijn erg onbetrouwbaar en houden geen rekening met lokale omstandigheden. Een consortium van Nederlandse onderzoekers probeert door metingen de globale schattingen te verfijnen en de onzekerheid in de emissiedata van de landgebonden ecosystemen met de helft terug te brengen.

Natuurlijke en landbouwecosystemen vervullen een grote rol in de broeikasgasbalans van regio's en landen. De belangrijkste broeikasgassen voor deze ecosystemen zijn kooldioxide, lachgas en methaan. Zo waren landbouwgronden in Nederland in 2006 verantwoordelijk voor naar schatting ongeveer de helft (27,6 Gg) van de uitstoot van lachgas. In drassige gebieden kan methaan vrijkomen, maar in gebieden waar het grondwater wat dieper onder het maaiveld staat, kan methaan juist worden opgenomen. Het is algemeen bekend dat bossen een rol spelen in het opnemen en vastleggen van kooldioxide, maar dat ze onder bepaalde omstandigheden ook een netto bron van kooldioxide kunnen zijn, weten veel minder mensen.

In het kader van de afspraken in het Klimaatverdrag van de Verenigde Naties (UNFCCC, United Nation's Framework Convention on Climate Change) moeten alle landen broeikasgasemissies rapporteren. Daarbij gaat het niet alleen om de uitstoot van broeikasgassen door industrie en verkeer. Ook landgebonden emissies moeten in de rapportages betrokken worden – zeker daar waar veranderend landgebruik of gebieds-

beheer de emissies kan beïnvloeden. Een bekend voorbeeld is het veenweidegebied. Hier kan het verhogen van de grondwaterstand de oxidatie van veen vertragen, zodat er minder kooldioxide vrijkomt. Tegelijkertijd kan de uitstoot van methaan en lachgas toenemen.

Hoeveel lachgas, methaan en kooldioxide er per locatie vrijkomt of wordt opgenomen, hangt af van veel factoren en is nog moeilijk precies te voorspellen. Dit maakt het lastig emissiebeperkende maatregelen te ontwerpen en te verifiëren. Mede daarom is er nog volop discussie over de wijze waarop emissies uit landbouwgronden en natuurgebieden gerapporteerd moeten worden.

Momenteel wordt voor bijna elk type ecosysteem (zoals maïs en grasland) een

Bossen kunnen niet alleen CO₂ opnemen en vastleggen, maar ook een netto bron van CO₂ zijn.



wereldwijde of nationale standaardwaarde van broeikasgasemissies aangehouden. Maar deze schattingen houden geen rekening met regionale en lokale omstandigheden. Een Limburgs grasland kent heel andere omstandigheden in bijvoorbeeld weer, bodemcondities en biologische bodemprocessen dan een Friese wei, en stoot daardoor minder broeikasgassen uit. Toch krijgen alle graslanden, net als andere landbouwgronden, dezelfde emissiewaarden mee. Naast ruimtelijke variaties zijn er verschillen van jaar tot jaar. Omdat het lastig is de emissie per areaal te bepalen en de effectiviteit van maatregelen te voorspellen, is de onzekerheid in de emissieschattingen vaak meer dan 50 procent.

In het licht van klimaatverandering is ook van belang hoeveel koolstof er op lange termijn (decennia tot eeuwen) wordt vastgelegd. Vastlegging begint met een netto opname van kooldioxide. Dit is het verschil tussen opname via fotosynthese en uitstoot via ademhaling door planten en afbraak van dood organisch materiaal. Daarnaast voeren allerlei natuurlijke en door de mens veroorzaakte verstoringen koolstof af of aan. Denk aan afvoer door bosbranden en oogst, en aanvoer door het opbrengen van dierlijke

mest of plantenmaterialen. We richten ons in dit artikel alleen op de netto emissie binnen termijnen tot een jaar. Dit sluit goed aan bij de huidige rapportageverplichtingen op jaar-basis.

Meettechnieken

Tot nu toe zijn veel gegevens over broeikasgasemissies uit landoppervlak gebaseerd op waarnemingen met *fluxkamers*. Het principe is eenvoudig: er wordt een gesloten kamertje op het oppervlak gezet en de emissie wordt afgeleid uit het concentratieverloop in het kamertje. Deze metingen zijn representatief voor oppervlakten van een vierkante decimeter tot een vierkante meter (puntmetingen). We weten dat de emissie van broeikasgassen, vooral van lachgas en methaan, binnen een perceel enorm kan variëren. Om toch een representatief beeld van een perceel te krijgen zijn vele (bijna-)gelijktijdige kamermetingen nodig. Dit type waarnemingen is dus erg arbeidsintensief en daarom gebruiken de UNFCC-rapportages de internationaal overeengekomen standaardwaarden.

Kamermetingen worden vaak op een relatief beperkt aantal momenten uitgevoerd, bijvoorbeeld na een bemesting. Hierdoor

Eddy-covariantiemetingen op een aardappelperceel in Noord-Brabant. A = sensor die de windsnelheid in drie richtingen bepaalt, B = sensor die de kooldioxideconcentratie meet.

vallen de emissies in de tussenliggende perioden buiten de waarnemingen. Dit is een probleem omdat het overgrote deel van de emissie van vooral lachgas en methaan maar in enkele korte perioden per jaar plaatsvindt.

In het Klimaat voor Ruimte-programma werken we hard aan een methode die deze nadelen kan ondervangen en de kamermetingen kan aanvullen: de *eddy-covariantie*. Deze techniek is afkomstig uit de meteorologie en is gebaseerd op het gegeven dat stijgende luchtpakketjes doorgaans andere eigenschappen hebben dan dalende. Wanneer het oppervlak broeikasgas uitstoot, zal opstijgende lucht gemiddeld meer gas bevatten dan dalende. Neemt het oppervlak broeikasgas op, dan geldt het omgekeerde. Met de eddy-covariantietechniek bepalen we de covariantie tussen de verticale beweging en de broeikasgasconcentratie van de luchtpakketjes. Uit de theorie volgt dat deze covariantie een directe maat is voor het netto verticale transport; in het geval van gassen is dit de opname of uitstoot.

Eddy-covariantiemetingen worden enkele meters boven het oppervlak uitgevoerd (foto). Dit oppervlak kan ook hoge vegetatie zoals een bos zijn. De metingen zijn representatief voor een oppervlakte van een hectare tot een vierkante kilometer. Dit sluit mooi aan bij de perceelschaal die we willen onderzoeken. Bovendien kunnen de systemen in principe lange tijd zelfstandig en continu werken. Het principe van de eddy-covariantiemetingen

De meting van lachgas en methaan staat nog in de kinderschoenen.

Figuur 1: Meetlocaties in Nederland



mag dan eenvoudig zijn, in de praktijk doen zich diverse problemen voor. Om te beginnen zijn per seconde ongeveer tien metingen van windsnelheid én concentratie nodig. Dit vergt nogal wat van de instrumenten, ook al omdat ze zonder veel toezicht en onderhoud ingezet moeten kunnen worden. Voor kooldioxide zijn eddy-covariantiemetingen inmiddels gemeengoed. Maar voor lachgas en methaan is veel gevoeliger instrumentarium nodig en staat de techniek nog in de kinderschoenen. In het programma Klimaat voor Ruimte wordt daar hard aan gewerkt. Zo is onlangs voor het eerst een betrouwbare reeks van methaanemissies op basis van de eddy-covariantietechniek gepubliceerd.

Ten tweede zijn er problemen die te maken hebben met afwijkingen tussen theorie en praktijk. Hierdoor kan de onzekerheid in een meting van de kooldioxide-emissie over een halfuur – afhankelijk van de omstandigheden – oplopen van enkele tientallen procenten tot meer dan 100 procent. Over de oplossing van deze problemen woedt nog een stevige wetenschappelijke discussie. Gelukkig beschikken we over zo veel metingen dat we streng kunnen selecteren op kwaliteit. Daarnaast worden de emissiecijfers snel betrouwbaarder naarmate de lengte van de meetperiode toeneemt. Zo kunnen we de jaarcijfers voor de kooldioxide-emissie binnen een onzekerheidsmarge van zo'n 10 procent vaststellen.

Meetcampagne

Binnen Klimaat voor Ruimte vinden op meerdere locaties metingen plaats, gebaseerd op de hiervoor beschreven methodieken. Een deel van de meetlocaties ligt vast. Deze plekken leveren informatie over de variabiliteit van jaar tot jaar. Daarnaast wordt een aantal 'zwervende' meetstations ingezet, die eens per jaar of twee jaar verplaatst worden. Zij registreren vooral verschillen binnen en tussen ecosystemen. Tot slot zijn er emissie-



Meting van de kooldioxideconcentratie boven een bosperceel.

waarin minstens een half jaar de kooldioxide-emissie is gemeten. Elke dataset bevat ook gegevens van omgevingsvariabelen als windsnelheid, luchttemperatuur, luchtvochtigheid en hoeveelheid zonlicht. Voor elke locatie hebben we uit de metingen een wiskundige relatie afgeleid die de invloed van temperatuur en licht op de kooldioxide-emissies beschrijft. Met de vastgestelde relaties zijn de metingen gecorrigeerd voor verschillen in het weer tussen jaren en tussen locaties. Bovendien hebben we de gevonden relaties gebruikt om emissiereeksen te construeren voor jaren waarin alleen metingen van de temperatuur en het zonlicht beschikbaar zijn.

De reactie van kooldioxideopname op licht, en de reactie van kooldioxide-uitstoot en -opname op de temperatuur varieerden enorm tussen de graslanden. Deze variatie lijkt terug te voeren op bodemkundige verschillen – vooral die tussen organische en minerale bodems. Gemiddeld was er een flinke *uitstoot* op de organische gronden van naar schatting 220 g koolstof per m² per jaar. Bij minerale gronden ging het juist om een *opname* van 90 g koolstof per m² per jaar. Gemiddeld over alle locaties en alle meetjaren bleken de graslanden kooldioxide uit te stoten. Dit is deels toe te schrijven aan het relatief grote aantal graslanden op veengrond in deze studie. Desondanks lieten de schattingen in twee van de vier jaren gemiddeld een netto opname zien. Sommige graslanden vertoon-

den een netto uitstoot, andere een netto opname, en op één locatie wisselden uitstoot en opname op jaarbasis elkaar af.

Zelfs voor de organische gronden wijken onze cijfers sterk af van het officiële emissiecijfer van 518 g koolstof per m² per jaar. De reden is nog volstrekt onduidelijk en onderwerp van verdere studie. Het kan voor een deel liggen aan de verschillen tussen de meetmethoden. Ook speelt wellicht mee dat variaties in luchttemperatuur en zonlicht niet alle variaties in de kooldioxide-emissie kunnen beschrijven. Onze cijfers geven vooral een redelijke indruk van de onderlinge verschillen. De emissieomvang zelf bevat een grotere onzekerheid.

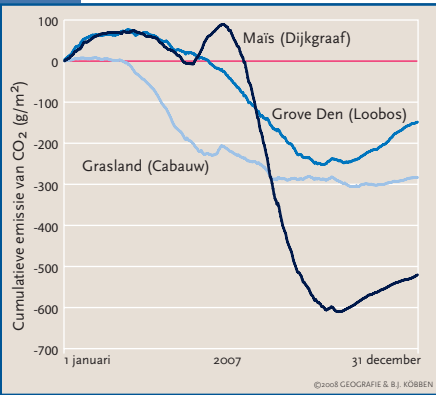
Daarbij beperkt deze analyse zich tot de emissie van kooldioxide uit de graslanden. Voor een schatting van het effect op de atmosfeer is de totale broeikasgasbalans van belang en wegen ook de emissies van lachgas en methaan mee. Verder moeten we rekening houden met aan- en afvoer van materiaal, zoals bemesting en afvoer van gemaaid gras.

Variatie tussen ecosystemen

Figuur 3 toont de cumulatieve kooldioxideopname van een maïsperceel, een graslandperceel en een bos in Nederland. De lijnen tonen het verloop van de totale koolstofopname sinds begin 2007. Het eindpunt is dus de totale netto opname in dat jaar.

In alle gevallen wordt koolstof opgenomen. Maar de verschillen tussen de ecosystemen zijn groot, niet alleen qua emissie op jaarbasis, maar ook qua dynamiek. Het bos stootte in de herfst en de winter kooldioxide uit, en van maart tot ongeveer september nam het kooldioxide op. Bij het grasland was vrijwel alleen sprake van netto opname (maart-augustus). Maar begin juni was er duidelijk sprake van uitstoot. Mogelijk is dit het effect van begrazing. Begrazing reduceert het totale bladoppervlak, waardoor de opname van koolstof door fotosynthese vermindert. De respiratie van het grasland, die leidt tot uitstoot van kooldioxide, gaat echter onverminderd door. Dit voorbeeld illustreert het belang van het management van de percelen. Bij maïs is nog duidelijker sprake van een groeiseizoen. Buiten het groeiseizoen moet de boer de kale grond zo snel mogelijk weer bedekken. In dit geval is daarom na de oogst rogge ingezaaid. Daardoor is er al vóór het groeiseizoen van de maïs (juni-september)

Figuur 3: Cumulatieve kooldioxide-emissie van maïs (locatie Dijkgraaf, Wageningen), gras (locatie Cabauw) en een naaldbos (grove den, locatie Loobos, Kootwijk) in 2007.



Figuur 4: Gemeten jaarlijkse kooldioxide-emissie van het Loobos, een naaldbos (grove den) bij Kootwijk op de Veluwe in 2007.



gegevens verzameld van andere onderzoeksprogramma's sinds 1994. Figuur 1 (p.21) toont de locaties waarvoor langdurige emissiewaarnemingen van kooldioxide beschikbaar zijn. Van een beperkt aantal locaties hebben we ook gegevens van methaan- en lachgasemissies uit eddy-covariantiemetingen. Tot nu toe gaat het vooral om graslandlocaties, maar het aantal meetlocaties op andere vegetaties breidt zich snel uit.

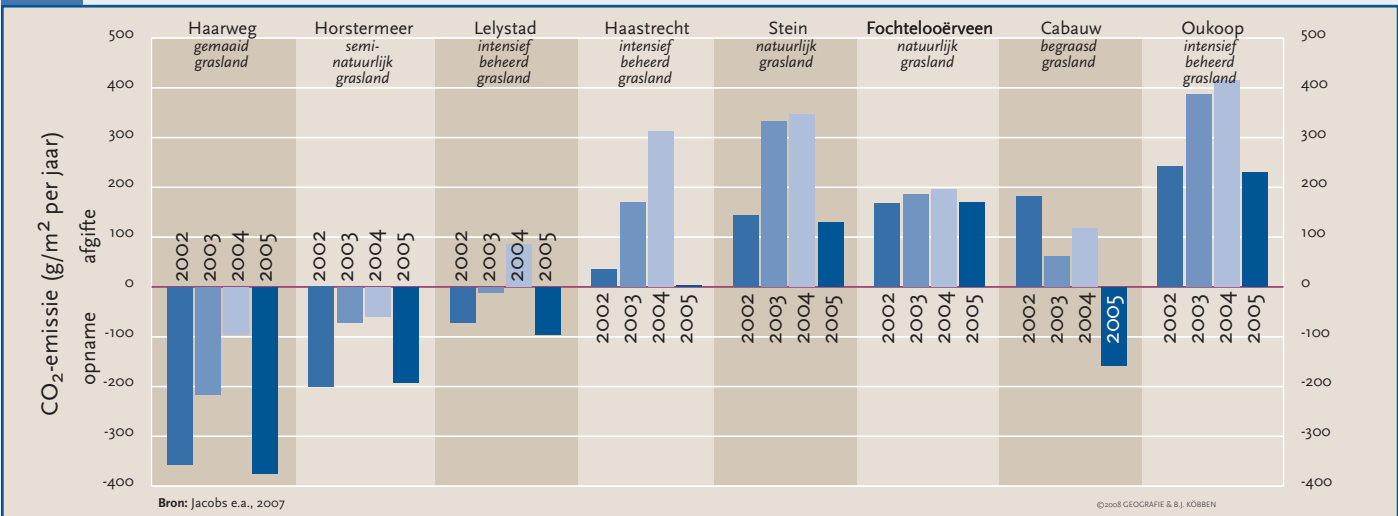
Het is de bedoeling de onzekerheid in de emissies van de landgebonden ecosystemen met de helft terug te brengen. Om dit op landdekkende schaal te kunnen doen, zetten we naast metingen procesmodellen in. Wat hebben de metingen tot nu toe opgeleverd?

Nederlandse graslanden

Graslanden besloegen in 2007 1.017.000 ha – dat is 53 procent van het Nederlandse teeloppervlak. Graslandpercelen komen in allerlei soorten en maten voor, maar de emissierapportages geven maar één emissiecijfer. Dit cijfer is afgeleid uit inklinking van veengronden en geldt alleen voor grasland op organische bodems.

Een analyse van eddy-covariantiedata heeft echter een grote variatie tussen percelen aan het licht gebracht. Dit is te zien in figuur 2, die emissieschattingen voor acht verschillende graslandlocaties toont, variërend van productiegrasland tot natuurlijk grasland op veen. De cijfers stammen uit experimenten

Figuur 2: Variabiliteit van de kooldioxide-emissie van Nederlandse graslanden



sprake van kooldioxideopname. Vlak voor het inzaaien van de maïs wordt de rogge ondergeploegd, waardoor er weer een flinke uitstoot vanuit de kale grond is. Dit verklaart het verloop in de maand mei. Vanaf die tijd begint de maïs flink te groeien. De fysiologische processen van dit gewas verlopen anders dan die bij bos en gras, en de opname van kooldioxide tijdens de groei kan enorm zijn. In de periode na de oogst is de bodem eerst nog vrijwel kaal en wordt kooldioxide uitgestoten.

Jaarlijkse variatie

De landgebonden broeikasgasopname en -uitstoot kunnen van jaar tot jaar behoorlijk verschillen. Figuur 4 toont de gemeten jaarlijkse koolstofopname van een Nederlands naaldbos voor 1997-2007. In geen enkel jaar is sprake van uitstoot. Dit past in het beeld dat bossen koolstof vastleggen. De opname varieert echter sterk. Het verschil tussen het jaar met de grootste opname (1999) en dat met de kleinste opname (2006) bedraagt bijna een factor 8. Met de huidige kennis

over kooldioxide-emissie bij bossen kunnen we dit verschil maar ten dele verklaren.

In de huidige reeks vallen vooral 2003 en 2006 op. Op Europese schaal wordt 2003 beschouwd als een extreem jaar. Door de bijzonder warme en droge zomer was de netto kooldioxideopname van veel bossen sterk gereduceerd. Op de Veluwe was 2003 veel minder bijzonder, en springt vooral 2006 eruit. Dit hangt waarschijnlijk samen met de natte en relatief warme winter in 2006.

De variatie maakt ook duidelijk hoe belangrijk langlopende meetreeksen en continue waarnemingen zijn. Op korte reeksen valt geen zinnig beleid te baseren.

Metingen op basis van moderne technieken kunnen belangrijke informatie leveren over de relatie tussen broeikasgasemissies, landgebruik en beheer. Ze kunnen zo bijdragen aan realistische rapportagemethoden. Bovendien kunnen zulke meetresultaten ingezet worden voor de verificatie van rapportages en maatregelen om broeikasgasemissies te beperken. •

Meer informatie: www.climateXchange.nl

Bronnen

- CBS 2008.
- Granier, A. e.a. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 1-2: 123-145.
- Hendriks, D.M.D., A.J. Dolman, M.K. van der Molen & J. van Huissteden 2008. A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 2: 431-443.
- Jacobs, C.M.J. e.a. 2007. Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*, 4: 803-816.
- Lagergren, F. e.a. 2008. Biophysical controls on CO₂ fluxes of three Northern forests based on long-term eddy covariance data. *Tellus, Series B. Chemical and physical meteorology*, 60:143-152.
- Maas, C.W.M. van der, e.a. 2008. *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006*. MNP, Bilthoven.