

De broeikasgasbalans van het landschap

Broeikasgasbalans
Bottom-up benadering
Top-down benadering
NIR
Verificatie

Dual constraint methode voor verificatie

Nederland is verplicht om in het kader van het Kyoto protocol elk jaar haar broeikasgasemissies aan de UNFCCC te rapporteren. De huidige rapportage is niet zozeer gebaseerd op directe metingen maar op inventarisaties. Emissiebronnen en (-putten) worden vastgesteld en vermenigvuldigd met emissiefactoren die bepaald zijn voor Nederland. Dit artikel schetst een raamwerk voor verificatie van de nationale rapportages en geeft elementen aan die voor verbetering op termijn kunnen zorgen.

De meest simpele methode voor de nationale rapportage, Tier 1 genaamd, maakt gebruik van mondiale standaardgegevens. Iets complexere methodes maken gebruik van landenspecifieke gegevens (Tier 2) en de complexere procesmodellen worden aangeduid met Tier 3 (IPCC, 2006). Landen die extra inspanningen leveren om betere methoden te ontwikkelen en toe te passen dan op Tier 1-niveau, mogen er uiteraard ook gebruik van maken als het in hun eigen voordeel uitpakt.

Nationale rapportages tot nu toe

De huidige berekening van de Nederlandse broeikasgasbalans is niet zozeer gebaseerd op directe emissiemetingen met bijvoorbeeld meetkamers, meetmasten en vliegtuigmetingen, maar is gebaseerd op een inventarisatiemethode. De broeikasgasfluxen uit het Nationaal Inventarisatierapport (Van der Maas et al., 2009) worden bepaald op grond van handelsstatistieken en tellingen van emissiebronnen (activiteitendata), bijvoorbeeld koeien, auto's en fabrieken en van emissieputten. De belangrijkste bronsectoren van het landschap staan in tabel 1. Alle activiteitendata worden verder onderverdeeld en vermenigvuldigd met meestal landenspecifieke emissiefactoren die gebaseerd zijn op directe broeikasgasmetingen aan een emitterend proces (Van der Maas et al., 2009). Deze emissiefactoren kunnen met voortschrijdend inzicht aangepast worden, bijvoorbeeld aan

nieuwe ontwikkelingen als methaanbesparend koeienvoer of gebruik van CH_4 uit afvalbergen.

Zo komen we al tellend op een getal voor heel Nederland met een vrij grote onzekerheid. Het Nationaal Inventarisatierapport (NIR) berekent op Tier 1-niveau over 2007 een onzekerheid van slechts 4,3%. Dit komt doordat CO_2 -uitstoot door energieverbruik en -opwekking een groot aandeel heeft in de totale broeikasgasuitstoot en deze bron behoorlijk accuraat kan worden berekend. De onzekerheid van deze emissies is groter voor de activiteitendata dan voor de emissiefactoren (Olivier et al. 2009) Voor landbouwemissies, vooral N_2O , is de onzekerheid veel hoger (rond de 60%) en juist voor de emissiefactoren veel groter dan voor de activiteitendata. De onzekerheid van de Nederlandse broeikasgasemissie is voor het jaar 2004 ook op Tier 2 uitgerekend en bedraagt 3,9% (Ramírez et al. 2008). De berekening van broeikasgassen met procesmodellen is eveneens erg onzeker. Hierbij zit de onzekerheid niet zozeer in het modelconcept zoals bij de Tier 1- en Tier 2-methoden, maar in de gedetailleerde model- en inputparameters.

De gegevens voor activiteitendata zijn in Nederland vaak vrij goed bekend omdat we accurate statistieken hebben, bijvoorbeeld van het CBS (CBS, 2010). Maar de emissiefactoren die gebruikt worden zijn vaak erg onzeker omdat ze gebaseerd zijn op een beperkt aantal metingen, uitgevoerd onder bepaalde omstandigheden waarvan vaak

LINDA NOL, ROLF NEUBERT, ALEX VERMEULEN, OLAF VELLINGA, ANTOON MEESTERS, LIESELOTTE TOLK, JOS OLIVIER, WOUTER PETERS, JAN PETER LESSCHEN, RONALD HUTJES & EDDY MOORS

Drs. L. Nol CAH Dronten University of Applied Science, Drieslag 1, 8251 JZ Dronten l.nol@cah.nl

Dr. R.E.M. Neubert Rijksuniversiteit Groningen, Centrum voor Isotopenonderzoek
Dr. A.T. Vermeulen ECN, Biomassa, Kolen & Milieuonderzoek

Ing. O.S. Vellinga Wageningen UR Alterra, Earth System Science – Climate Change

Dr. A.C.G.A. Meesters VU, Hydrology and Geo-environmental Sciences

Drs. L.F. Tolk VU, Hydrology and Geo-environmental Sciences
Dr. J.G.J. Olivier Planbureau voor de Leefomgeving

Dr. W. Peters Wageningen UR, Meteorologie en luchtkwaliteit

Dr. Ir. J.P. Lesschen Wageningen UR Alterra, Centrum Bodem

Dr. R.W.A. Hutjes Wageningen UR Alterra, Earth System Science – Climate Change

Ir. E.J. Moors Wageningen UR Alterra, Earth System Science – Climate Change

Foto **Harry van Oosterhout** bvbeeld.nl. Sloop van kassen.

moeilijk te achterhalen is of de uiteindelijke emitterende processen er wel aan voldoen. Zo hangt bijvoorbeeld de emissiefactor van een koe als methaanbron sterk af van de samenstelling van het voer. De toegepaste grootte en onzekerheid van de emissiefactoren zijn te vinden in de protocollen van de NIR (VROM, 2010).

De totale Nederlandse broeikasgasemissie zoals gerapporteerd in de laatste NIR (Van der Maas et al., 2009) is 207,5 Tg CO₂-equivalenten per jaar. De onderverdeling hiervan in verschillende gassen en in verschillende bronnen is te zien in figuur 1. De grootste bronnen, zoals energie en industrie, zijn behoorlijk accuraat te meten en berekenen, omdat het puntbronnen zijn. Diffuse bronnen zoals landbouw, landgebruik en landgebruikverandering zijn veel moeilijker te berekenen.

Dual constraint

Een uitdaging voor het onderzoek is om met nieuwe methoden te komen die onafhankelijk op hetzelfde resultaat uitkomen. Daarmee kunnen wederzijdse lacunes in de

methoden worden aangevuld en de resultaten geverifieerd. Hierbij is het goed om te realiseren dat acceptatie door de UNFCCC van een nieuwe methode jaren kan duren. In de tussentijd kan een dergelijke methode natuurlijk wel uitstekend dienst doen als extra verificatie. Binnen het Klimaat voor Ruimteproject (KvR) is gekozen voor een *dual constraint* benadering.

Deze benadering combineert een *bottom-up* methode en een *top-down* methode. Bottom-up methoden schalen metingen op kleine schaal op naar grotere schalen, die van het landschap of heel Nederland. Top-down methoden schalen metingen van grote schaal, bijvoorbeeld van satellieten, neer naar kleinere schalen en naar de bronnen van emissie. Als het goed is ligt de gerapporteerde emissie tussen de waarden berekend met beide methoden. Zie Hensen (dit nummer) voor de meetmethoden die aan de basis van deze berekeningen liggen.

Bij het opschalen (*bottom-up*) en neerschalen (*top-down*) is de totale omvang van het gebied (ruimtelijk) en de totale duur (temporeel) van belang, dit wordt ook wel *extent*

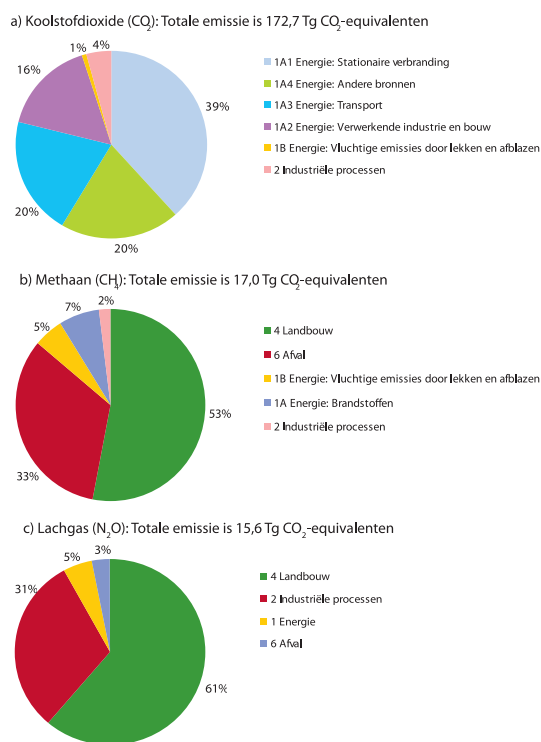
Tabel 1 Sleutelbronnen (alleen landgebonden bronnen) en onzekerheden daarin volgens de Nederlandse nationale emissieregistratie (NIR)

Sector code	Gas	Sector	rapportage niveau (tier)	Emissie in 2007 (Gg CO ₂ -eq/yr)	Aandeel (% CO ₂ -eq)	Onzekerheid activity data (%)	Onzekerheid emissie factor (%)	Onzekerheid emissies (%)
4A	CH ₄	Landbouw: Maagfermentatie bij rundvee	2-3	6318	3%	5	20	21
4B	N ₂ O	Landbouw: Mest management	1-2	872	0%	10	100	100
4B	CH ₄	Landbouw: Mest management van rundvee, varkens, pluimvee en andere dieren	2	2553	2%	10	100	100
4D	N ₂ O	Landbouw: Directe en indirecte emissies van landbouwbodems en door dieren op landbouwbodems	1-2	8595	4%	direct: 10 indirect: 50	60 200	61 206
5A	CO ₂	Landgebruik, landgebruikverandering en bos: Bos blijft bos en omzetting naar bos	2	-2742	-2%	25	62	67
5C	CO ₂	Landgebruik, landgebruikverandering en bos: Gras blijft gras en omzetting naar grasland	2	4800	3%	25	50	56

Table 1 Key land-based sources and uncertainties in the Dutch National Inventory Report (NIR)

genoemd. Verder zijn aantal, vorm, volume en/of oriëntatie van de monsters of meetpunten van belang, de support genoemd. Als laatste zijn de celafmeting (ruimtelijk) en de tijdstap (temporeel) van de inventarisatiemethode of het computermodel belangrijk, dit wordt ook wel resolutie genoemd. Niet-lineaire opschaling en neerschalig van gegevens zorgt voor de introductie van onzekerheden (Openshaw, 1983), ook wel het schaalprobleem genoemd. De onzekerheid hangt ook vaak samen met de extent, support en resolutie van de bottom-up en top-down methoden. De onzekerheid van de methoden is een belangrijke kwestie, en wordt behandeld in Schulp *et al.* (dit nummer). Het onderzoek naar broeikasgassen richt zich niet alleen op grote emissiebronnen, maar focust vooral op een combinatie van grote en onzekere emissiebronnen. Een voorbeeld: in gebieden met hoge, maar zekere emissies, dus met weinig temporele en ruimtelijke variatie moet ongeveer even vaak en op even veel plekken gemeten worden als in gebieden met lage, maar onzekere emissies.

In het KvR-project ligt veel nadruk op het meten en modelleren van zogenaamde diffuse emissiebronnen als landbouw, landgebruik en landgebruikverandering. Hoewel deze bronnen slechts voor 15% van de totale uitstoot zorgen, is een goede schatting van deze emissies van groot belang, omdat ze tot nu toe erg onzeker zijn (Olivier *et al.*, 2009). In de nationale rapportage zijn de grootte van de bronnen vermenigvuldigd met de onzekerheid van de bronnen (in %) om een schatting te maken van het belang van de bron en de prioriteit die daaraan gegeven moet worden. Daaruit blijkt dat diffuse bronnen, waarvan er zeven in de top 10 staan, belangrijk zijn (Van der Maas *et al.*, 2009). Bovendien willen we ook bij diffuse bronnen kunnen aantonen wat het verschil in emissies is voor en na toepassing van beleidsmaatregelen (zie Kroon *et al.*, dit nummer).

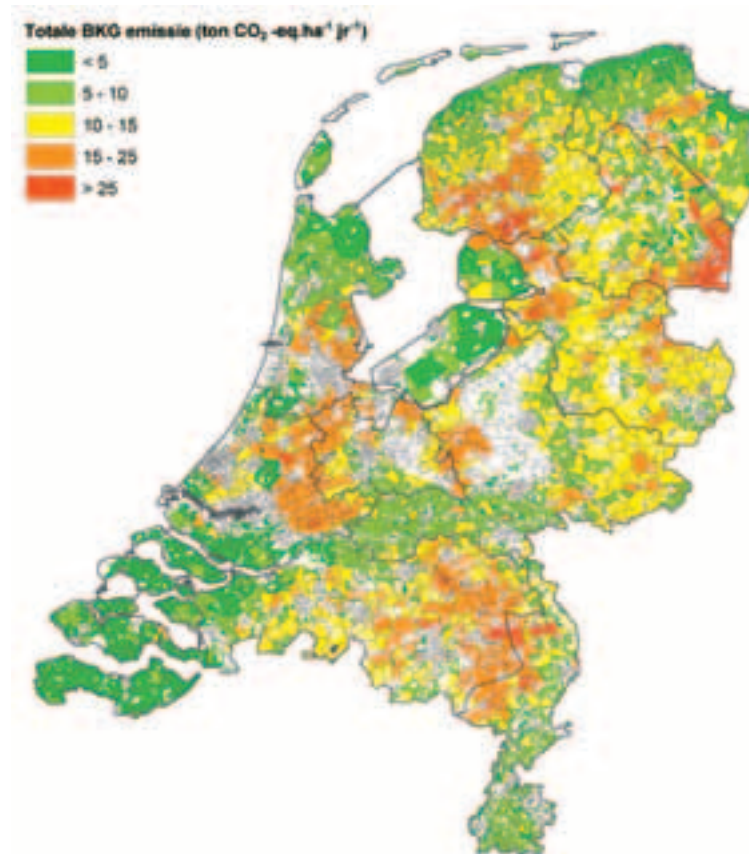


Figuur 1 Totale jaarlijkse emissie en een onderdeling naar bronnen van a) CO₂, b) CH₄ en c) N₂O, (in CO₂-equivalenten) in Nederland zoals gerapporteerd in de NIR (Van der Maas *et al.*, 2009)

Figure 1 Total annual emission and a division of sources of a) CO₂, b) CH₄ and c) N₂O (in CO₂-equivalents) in the Netherlands as reported in the NIR (Van der Maas *et al.*, 2009).

Bottom-up methoden

Kenmerkend voor bottom-up methoden is dat deze gebruik maken van metingen op kleine schaal, bijvoorbeeld met behulp van meetkamers, of micrometeorologische technieken (zie Hensen *et al.*, dit nummer). Het opschalen van deze metingen naar een gebiedsdekkende emissiebepaling kan gebeuren met behulp van vrij simpele rekensommen tot complexe procesmodellen. Voorbeeld van een relatief eenvoudige opschalingmethodiek is de emissiekaart van Nederland in figuur 2. Hierbij is de broeikasgasemissie berekend voor de verschillende broeikasgassen (CO₂, CH₄ en N₂O) en als totaal uitgedrukt in CO₂-equivalenten. Er is gebruik gemaakt van het



Figuur 2 Totale jaarlijkse emissie CO₂, CH₄ en N₂O, (in CO₂-equivalenten) uit de landbouw per postcodegebied berekend voor 2006 met het Miterra model.

Figure 2 Total annual emission CO₂, CH₄ and N₂O (in CO₂ equivalents) per zip area, calculated for 2006 with the Miterra model.

Miterramodel (Lesschen *et al.*, 2009), waarvan de berekeningen zijn gebaseerd op de systematiek van het IPCC en het Nationaal Systeem. Daarmee is het een mengeling van een Tier 1- en Tier 2-systeem.

De onzekerheid in het opschalen naar landschapsschaal en nationale schaal met behulp van een dergelijk systeem zal afnemen door zoveel mogelijk verschillende landschapselementen, op zoveel mogelijk verschillende bodems met verschillend landgebruik te meten. Voorwaarde is wel dat de landschapselementen goed in kaart

zijn gebracht. Het blijkt dat in landschappen met veel langwerpige elementen, fouten in de oppervlakteberekeningen van ongeveer 20% kunnen zitten (Nol *et al.*, 2008). Een voorbeeld van een dergelijk landschap is het westelijk veenweidegebied. Verder wordt er door de Nederlandse landgebruikkaarten geen onderscheid gemaakt tussen intensief en extensief beheerd grasland, terwijl de emissie-eigenschappen van beide sterk verschillen (Jacobs *et al.*, 2007, Nol *et al.*, 2008; Schrier-Uijl *et al.*, 2010). Ook is het van belang dat de meeste metingen worden uitgevoerd voor de meest onzekere en meest substantiële bronnen van broeikasgasuitstoot en dat de hoeveelheid metingen in verhouding staat tot de aanwezigheid van de betreffende bron in Nederland. Het Nederlandse westelijk veenweidegebied neemt slechts 8% van de oppervlakte van Nederland in beslag, maar is wel een grote en onzekere bron van broeikasgasemissie. Daarom is er ook veel aandacht voor dit gebied en zijn er veel metingen uitgevoerd. Dit gebied bestaat voor het grootste deel uit weilanden die beheerd worden door melkveehouders. De grootste emissie in het gebied wordt veroorzaakt door het oxideren van de veenbodems en het bemesten van de weilanden met kunstmest en drijfmest. Veenoxidatie wordt veroorzaakt door ontwatering van het gebied. Wanneer het veen in aanraking komt met lucht, worden de broeikasgassen CO₂ en N₂O uitgestoten. Wanneer het gebied heel nat is wordt juist CH₄ uitgestoten. Verder wordt de uitstoot van N₂O sterk beïnvloed door het beheer, vooral stikstofaanvoer door bemesting en begrazing. De onzekerheid in deze uitstoot heeft te maken met meet- en representatieonzekerheden en fouten die ontstaan door het opschalen. Door de onzekerheid goed in kaart te brengen en kennis op te doen van de variabiliteit in tijd en in ruimte van de verschillende broeikasgassen kan een goede meetstrategie worden opgesteld en de grootte van de emissiebron goed geschat.

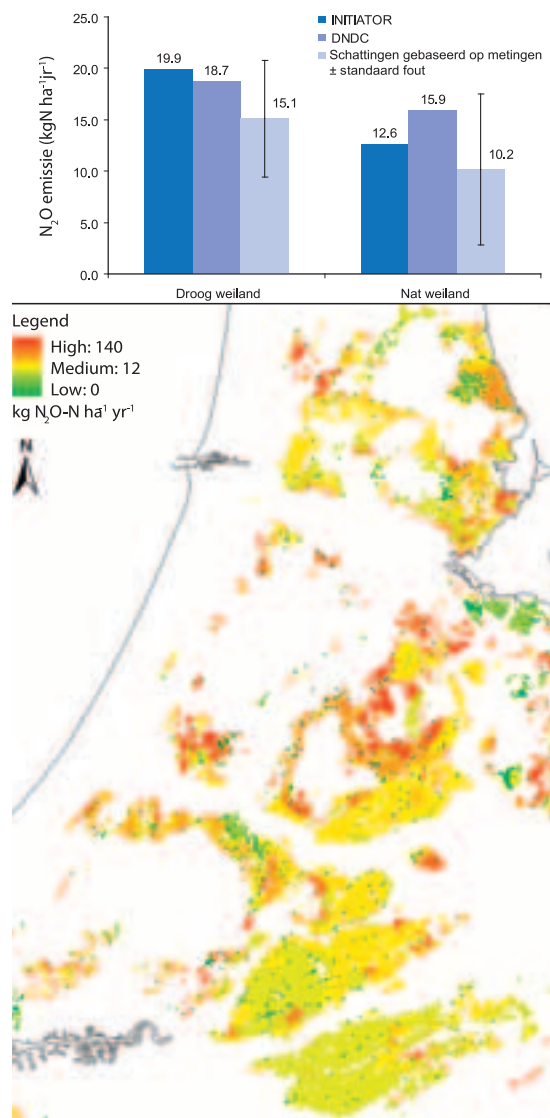
Onzekerheden in bottom-up modellen

De onzekerheden in de bottom-up methode worden voor een belangrijk deel bepaald door de keuze van het model dat gebruikt wordt voor de opschaling. Ter illustratie hiervan worden twee modellen vergeleken voor het schatten van de N_2O -emissies uit het veenweidegebied.

INITIATOR is, vergeleken met andere veelgebruikte modellen voor broeikasgasmodellering, een vrij simpel computermodel om inzicht te krijgen in stikstofstromen binnen Nederland en hun onzekerheden (De Vries et al., 2001; De Vries et al., 2003). Het heeft bijvoorbeeld een temporele resolutie van een jaar, terwijl de meeste andere modellen broeikasgasfluxen op dag- of zelfs op uurbasis berekenen.

DNDC is een voorbeeld van een complexer procesmodel (Levy et al., 2007). DNDC kan koolstof en stikstof simuleren in agro-ecosystemen.

Voor twee intensief beheerde weilanden in Zegveld, waarvan veel gegevens bekend zijn, zijn beide modellen doorgerkend en vergeleken met kamermetingen in het veld (Nol et al., 2009). De resultaten staan in figuur 3. De grote onzekerheid in de kamermetingen valt direct op. Dit komt door de grote ruimtelijke en temporele variatie. Het droge weiland stoot meer N_2O uit dan het natte weiland, omdat onder droge omstandigheden meer veen oxideert. Schulp et al. (dit nummer) hebben ook grotere lachgasemissies gemeten op een droog weiland dan op een nat weiland. Verder laat INITIATOR een groter verschil zien tussen de weilanden dan DNDC. Dit blijkt voor berekeningen van andere jaren (2001 t/m 2006) nog duidelijker te zijn. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat INITIATOR de N_2O -emissie sterk relateert aan de grondwaterstand (hoe dieper het grondwater, hoe groter de N_2O -emissie). DNDC baseert de N_2O -emissie sterker op het vochtgehalte van de bodem, waarbij een vochtgehalte van ongeveer 60-70% voor de grootste N_2O -emissie



Figuur 3a (boven) Totale jaarlijkse N_2O emissies voor de periode 1 juli 2001 t/m 30 juni 2002 gemodelleerd met INITIATOR, DNDC en schattingen gebaseerd op metingen. **3b (beneden)** Totale jaarlijkse N_2O emissies voor het westelijk veenweide gebied gemodelleerd met INITIATOR.

Figuur 3a (upper part) Total annual N_2O emissions for the period 1 July 2001 through 30 June 2002 estimated with INITIATOR, DNDC and estimates based on measurements. **3b (lower part)** Total annual N_2O emissions for the western peat meadow area modelled using INITIATOR.

zorgt. Uit de metingen blijkt dat de trends gesimuleerd door INITIATOR beter op de werkelijkheid lijken (Nol et al., 2009). Uit de vergelijking tussen beide modellen blijkt

verder dat simpele modellen (zoals INITIATOR) die de emissie op jaarbasis uitrekenen, verbeterd zouden kunnen worden door rekening te houden met de hoeveelheid regen in de zomer.

INITIATOR is vervolgens gebruikt om met de lachgasemissie voor het hele westelijke veenweidegebied te modelleren (figuur 3b). De hoge N_2O emissies komen vooral voor op plaatsen waar de veenbodem diep ontwaterd wordt.

Top-down methodes

Na emissie komen de broeikasgassen in de atmosfeer terecht. Omdat broeikasgassen stabiel zijn en een lange verblijftijd in de atmosfeer hebben (van enkele tot duizenden jaren) raken ze uiteindelijk verdund en enigszins gelijkmatig verspreid over de hele aardse atmosfeer. CH_4 heeft een korte leeftijd van rond de 12 jaar en wordt in de atmosfeer geleidelijk afgebroken onder vorming van CO_2 en water, N_2O wordt langzaam afgebroken in de stratosfeer. Wat rest zijn kleine gemiddelde concentratieverschillen afhankelijk van breedtegraad en positie op het continent. Deze verschillen hangen samen met het feit

dat de broeikasgasemissies het grootst zijn op noordelijke breedten – het zuidelijk halfrond heeft relatief weinig landmassa – en rond de meest dichtbevolkte gebieden.

Door de verschillen in concentraties te meten weten we of er een toename dan wel een afname van broeikasgassen in de atmosfeer heeft plaatsgevonden. Helaas zijn er geen duidelijke emissiegebieden met (lands)grenzen af te bakenen. Ook methaan uit Siberische moerasgebieden komt hier langs.

De concentratieverschillen van broeikasgassen in ruimte en tijd bedragen in de atmosfeer ondanks alle dynamiek maximaal enkele procenten van de absolute concentratie, en vaak ook maar enkele promillen. Om dit goed te kunnen meten is dus een zeer goede precisie en accuraatheid van de metingen van belang (zie Hensen *et al.*, dit nummer). Het Europese en mondiale meetnetwerk is in staat om deze minieme verschillen te bepalen en op deze metingen is veel van onze huidige kennis over het mondiale budget voor alle broeikasgassen gebaseerd (zie bijvoorbeeld Peters *et al.*, 2010; Van der Laan-Luijkx *et al.*, 2010).

De hoge masten in Europa kunnen wel emissies van heel Nederland detecteren, maar meten alleen concentraties,

Koolstofopname

CO_2 neemt een bijzondere positie in: het is het enige broeikasgas dat ook voor tijdschalen korter dan een jaar belangrijke putten heeft die de concentratie plaatselijk sterk kunnen verminderen. Deze opname vindt plaats door planten als gevolg van fotosynthese of door de oceaan door opname van CO_2 in fysische en biologische processen. Toch wordt CO_2 niet afgebroken maar blijft het in de mondiale koolstofkringloop circuleren. Na een periode van grofweg één tot honderd jaar vergaan bladeren en bomen weer en komt de koolstof als CO_2 weer terug in de atmosfeer. Wordt het in de oceaan opgenomen, dan duurt het typisch 5.000 jaar voordat een waterpakket weer aan de oppervlakte komt en CO_2 kan uitwisselen. Op deze mondiale schaal bestaan alleen nog de drie reservoirs: atmosfeer, oceaan en de landbiosfeer, inclusief de bodems en de voorraad fossiele brandstoffen. Ook op deze grootste tijdelijke en ruimtelijke schaal participeert Nederland in onderzoek, bijvoorbeeld naar zuurstof- en isotopenmetingen op Lutjewad (Sirignano *et al.*, 2010). Een bijdrage aan een duurzame verwijdering van koolstof uit de actieve kringloop kunnen alleen de oceanen leveren door sedimentatie van kalk (schelpen), of de bodems door vastlegging van koolstof. Op nationale schaal gaat het dus om de vraag of we de bodems zo kunnen beheeren dat er meer koolstof wordt opgenomen dan vrijkomt, zie ook Kroon *et al.* & Schulp *et al.* (dit nummer).

en die moeten met behulp van modellen of met een parallel gemeten verklikker voor luchttransport (*tracer*) nog naar fluxen van specifieke bronnen ‘vertaald’ worden. Daarom is gewerkt aan een set top-down methoden, van simpel ‘modelvrij’ tot wiskundig heel geavanceerd om het dynamische gedrag van de atmosfeer te kunnen verklaren. Omdat de broeikasgasconcentraties ook op mondiale schaal variaties vertonen, moeten Nederlandse modellen ‘genest’ worden in mondiale. De Nederlandse broeikasgasemissie drijft als het ware in een achtergrondconcentratie van broeikasgassen die met de wind worden aangevoerd.

Voor N_2O en CH_4 , met ruimtelijk relatief homogene diffuse emissies, blijken ‘modelvrije’ methoden aardig te werken. ‘Modelvrij’ wil in dit verband zeggen dat er geen (meteorologisch) transportmodel van de atmosfeer aan te pas komt. Gemeten broeikasgasconcentraties worden gecorreleerd aan de concentraties van een inerte spoorstof. Van der Laan *et al.* (2009) combineren Radon als *tracer* met methaan- en lachgasmetingen in Lutjewad. Het radioactieve ^{222}Rn ontstaat in alle bodems en continu komt er gemiddeld 0,3 atoom per cm^2 en seconde van vrij in Nederland. Variaties in gemeten Radonconcentraties zijn door de constante productie alleen gevolg van variaties in het transport naar het meetpunt, en daarmee vooral een maat voor de menging van de atmosfeer. Omdat het transport van de broeikasgassen op dezelfde manier verloopt, kunnen de gezochte variaties in de broeikasgasemissies uit de concentraties ‘gefilterd’ worden. Dit is de vertaalslag van concentratie naar flux. De op deze manier verkregen emissieschattingen van Van der Laan *et al.* (2009) voor geheel Nederland van $15,2 \pm 5,3$ ton per km^2 per jaar voor CH_4 en $0,9 \pm 0,3$ ton per km^2 per jaar voor N_2O zijn iets (maar niet significant) lager dan de schattingen uit de NIR.

Dezelfde ‘modelvrije’ methode blijkt voor CO_2 niet zo goed te werken. Koolstof wordt niet alleen uitgestoten



Foto Jan Elbers

maar ook opgenomen (zie kader) en de ruimtelijke variatie van bronnen en putten is veel groter dan die van bronnen alleen. Voor CO_2 moeten we aan de andere zijde van de complexiteit proberen hoge resolutie transportinversies voor Nederland te produceren. In de voor KvR ontwikkelde top-down methode voor CO_2 wordt eerst de koolstofbalans op wereldschaal bepaald, gevolgd door specifieke schattingen van de netto CO_2 -uitwisseling voor Europa. Dit gebeurt in het data-assimilatiesysteem *CarbonTracker Europe* (Peters *et al.*, 2010) waarvan de eerste resultaten zeer goed aansluiten bij bottom-up schattingen van de koolstofbalans van de EU25 (Schulze *et al.*, 2009). Om de resultaten van dit systeem bij de huidige resolu-

Figuur 4 Europese methaanemissies ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$) berekend met het transportmodel COMET en bottom-up methodes voor 2007.

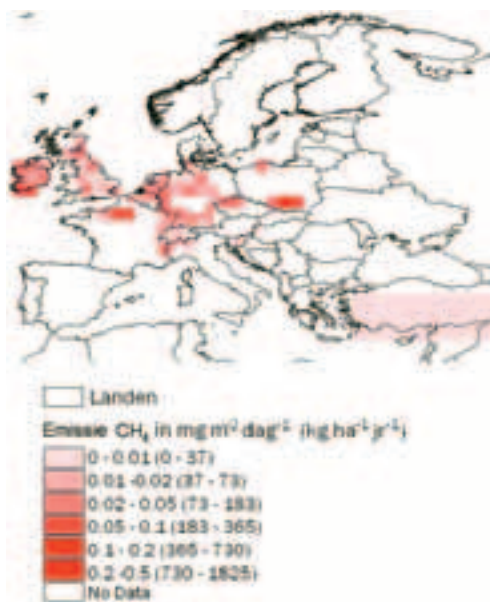


Figure 4 European methane emissions ($\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) simulated with the transport model COMET and bottom-up methodes for 2007.

tie – twintig vegetatietypes voor heel Europa per blok van $100 \times 100 \text{ km}^2$ – te verfijnen tot dat van het Nederlandse landschap gebruiken we een tweede, aan CarbonTracker geschakeld data-assimilatiesysteem. Dit systeem schat de netto koolstofuitwisseling voor Nederland en omliggende landen waarbij alle informatie op een $4 \times 4 \text{ km}^2$ grid wordt verwerkt. Heterogeniteit in landgebruik voedt hierin verschillen in koolstofuitwisseling, maar ook lokaal gedre-

ven atmosferische circulaties die de verspreiding van CO_2 in de atmosfeer beïnvloeden (Tolk et al., 2009).

De eerste resultaten van dit geschakelde top-down systeem geven aan dat de netto koolstofuitwisseling nabij de gemeten atmosferische CO_2 -concentraties al goed geschat kan worden, zie figuur 4. Echter, met de huidige beperkte meetinfrastructuur voor atmosferisch CO_2 (slechts vier meetlocaties) kan de koolstofuitwisseling voor heel Nederland nog niet betrouwbaar worden bepaald. Een uitbreiding van de meetcapaciteit, betere modelbeschrijving van de biologische processen op landschapsniveau en het toevoegen van informatie over landschapsbeheer zijn belangrijke volgende stappen.

Emissieverificatie (on-) mogelijkheden

Momenteel worden voor de nationale rapportage de emissies nog uitgerekend op basis van vrij eenvoudige rekensommen met veel onzekerheden. Aan de hand van de hier gepresenteerde (nieuwe) methodes om emissies op of neer te schalen kunnen we het Nationale Inventarisatie Rapport (NIR) verifiëren.

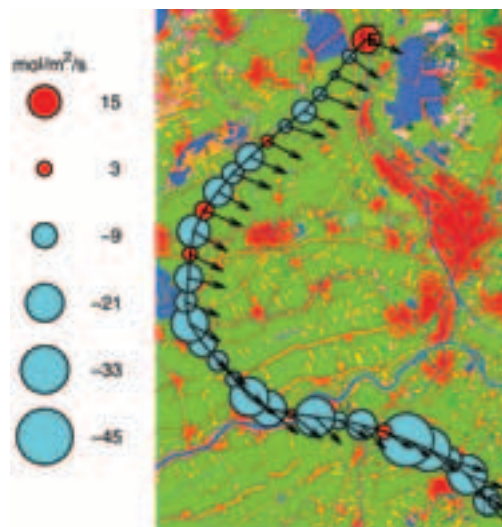


Foto **Barend Hazeleger**
bvbeeld.nl. Mijzijde
bij gemaal Kamerik-
Teylingens, nabij Woerden

Bottom-up methodes zijn in de laatste jaren verbeterd door het meten van broeikasgasemissies van landschapselementen die eerder genegeerd werden en door gebruik te maken van accurate landgebruikkaarten. Wordt gekozen voor een complex procesmodel in plaats van simpele rekenmethodes, dan zullen emissieprocessen vaak beter worden weergegeven, maar dat hoeft niet altijd op te wegen tegen de onzekerheid die ontstaat doordat je extra inputparameters nodig hebt met nieuwe, al dan niet bekende, onzekerheden.

Voor top-down methodes zijn de vooruitzichten voor onafhankelijke verificatie van de NIR met behulp van transportinversies goed, mits ondersteund door een voldoende dicht en hoognauwkeurig meetnetwerk. Een veel gebruikte techniek is om zogenaamde inversies met de transportmodellen uit te voeren, waarbij door middel van mathematische technieken uit de koppeling van waarnemingen en modelresultaten een verbeterde schatting van de emissies (of opname) wordt verkregen. Recent is al aangetoond dat dit op Nederlandse schaal werkt. Tolk et al. (2009) laten zien dat het in Cabauw gemeten CO₂-signaal ten gevolge van emissies groter is dan de ruis veroorzaakt door transportfouten. Diezelfde studie liet ook zien dat het signaal voor ongeveer 20% bestaat uit emissie van fossiele brandstoffen en voor het overige deel uit opname en uitstoot van CO₂ door vegetatie en bodem. Combineren we dit met het succes van transport inversies op Europese schaal (Peters et al. 2010) dan kunnen we positief zijn over de mogelijkheden voor onafhankelijke verificatie van de NIR.

Naast deze pure top-down en bottom-up methoden, kan er voor verificatiedoelinden ook gebruik worden gemaakt van CO₂-fluxen die gemeten worden met behulp van een meetvliegtuig. In het KvR-project zijn hiermee een aantal representatieve transecten gedurende een volledig seizoen gemeten. Momenteel worden deze vlieg-



Figuur 5 Voorbeeld van CO₂-fluxen gemeten boven het veenweidegebied met de PH-WUR, een vliegtuig dat direct de fluxen van CO₂, waterdamp en warmte meet.

Figure 5 Example of CO₂ fluxes measured over the peat meadow area by the PH-WUR, a small aircraft equipped to measure directly the fluxes of CO₂, water vapor and heat.

tuigmetingen zowel neer- als opgeschaald met behulp van methoden beschreven in Hutjes et al. (2010) en Vellinga et al. (2010). Figuur 5 laat een voorbeeld van een dergelijke meting zien. De grootste moeilijkheid bij deze meettechniek is om goed in te schatten voor welk gebied de resultaten representatief zijn. Deze methode zit qua temporele en ruimtelijke resolutie tussen de eerder genoemde bottom-up en top-down methoden in en kan daarmee goed dienst doen bij de verificatie van elementen van de NIR die op dezelfde schaal worden vastgesteld.

Conclusie

Binnen het KvR-project zijn nieuwe methoden ontwikkeld en is ook een begin gemaakt met de opbouw van de benodigde infrastructuur. Zowel de bottom-up als de top-down methoden en de vliegtuigmetingen die hier zijn gepresenteerd kunnen in potentie goed gebruikt worden voor de verificatie van de NIR. Hierbij kunnen een aantal van de bottom-up methoden op termijn waarschijnlijk opgenomen worden in het Nationaal Systeem waarmee de NIR uitgevoerd wordt. De top-down methode is bij uitstek geschikt als verificatiemethode. De uitdaging is om deze voldoende nauwkeurig te maken. Het begrijpen, meten en sturen van de broeikasbalans van het landschap, van boven en van beneden, is een opgave die in de toekomst continu onze aandacht en grote inspanning zal blijven vragen.

Summary

The GHG balance of the landscape

Linda Nol, Rolf Neubert, Alex Vermeulen, Olaf Vellinga, Antoon Meesters, Lieselotte Tolk, Jos Olivier, Wouter Peters, Jan Peter Lesschen, Ronald Hutjes & Eddy Moors

Greenhouse gas balance, bottom-up approach, top-down approach, NIR, verification

It is difficult to measure or even estimate the Dutch greenhouse gas emissions of the landscape, because we cannot put a flux chamber over the entire Netherlands. Greenhouse gas emissions are usually estimated by bottom-up methods or top-down methods. The Netherlands report most emissions to the Kyoto protocol at Tier 2 level, meaning a bottom-up inventory of emissions by using relatively simple linear methods and country-specific

data. For bottom-up methods it is important to measure, using measurement chambers, on many different landscape elements and to map these landscape elements accurately. In addition, measurements should be conducted on the largest and most uncertain sources in combination with the occurrence of these sources. These methods will help to reduce the uncertainty. Comparison between simple and complex bottom-up methods can help to gain insight into greenhouse gas emission processes. Top-down methods are capable of estimating emissions from large areas; however they struggle with the difficulty of finding the emission footprint, determining country borders and translating greenhouse gas fluxes to emissions. Model-free verification and Radon measurements can help to solve these problems. Using the proposed methods can contribute to the verification of the national inventory and to the reduction of uncertainties.

Literatuur

CBS, 2010. Centraal Bureau voor de Statistiek: Statline, Beschikbaar via <http://statline.cbs.nl> (geverifieerd mei 2010). Voorburg/Heerlen.

Hensen, A., P.S. Kroon, J. van Huissteden, A.J. Dolman, E.M. Veenendaal, J.H. Duyzer, J.A. Elbers, C.L. van Beek, & J. Mosquera, dit nummer. Metingen van broeikasgassen in het landschap. *Landschap* 27/2: 57-65.

Hutjes, R.W.A., O.S. Vellinga, B. Gioli & F. Miglietta, 2010. Disaggregation of airborne flux measurements using footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* (in press).

IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme., IGES, Kanagawa, Japan.

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 & E.M. Veenendaal, 2007. Variability of annual CO₂ Exchange from Dutch Grasslands. *Biogeosciences* 4: 803-816.

Kroon, P.S., A.P. Schrier-Uijl, P.C. Stolck, F.K. van Evert, P.J. Kuikman, A. Hensen & E.M. Veenendaal, dit nummer. Beïnvloeden van landgebonden broeikasgasemissies. Naar een klimaatneutrale(re) inrichting van het landelijke gebied. *Landschap* 27/2: 99-109.

Laan, S. van der, R.E.M. Neubert & H.A.J. Meijer, 2009. Methane and nitrous oxide emissions in The Netherlands: ambient measurements support the national inventories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 9369-9379.

Laan-Luijkx, I.T. van der, U. Karstens, J. Steinbach, C. Gerbig, C. Sirignano, R.E.M. Neubert, S. van der Laan & H.A.J. Meijer, 2010. CO₂, δO₂/N₂ and APO : observations from the Lutjewad, Mace Head and F3 platform flask sampling network. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 10, 13055-13090.

Lesschen, J.P., P.J. Kuikman & I. van den Wyngaert, 2009. Nulmeting emissie broeikasgassen Gelderse land- en tuinbouw. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1891.

Levy, P.E., D.C. Mobbs, S.K. Jones, R. Milne, C. Campbell & M.A. Sutton, 2007. Simulation of fluxes of greenhouse gases from European grasslands using the DNDC model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 121, Issues 1-2, June 2007, Pages 186-192.

Maas, C.W.M. van der, P.W.H.G. Coenen, P.J. Zijlema, L.J. Brandes, K. Baas, G. van den Berghe, G.J. van den Born, B. Guis, G. Geilenkirchen, R. te Molder, D.S. Nijdam, J.G.J. Olivier, C.J. Peek, M.W. van Schijndel & S.M. van der Sluis, 2009. Greenhouse Gas

Emissions in the Netherlands 1990-2007. National Inventory Report 2009, Bilthoven, the Netherlands, Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL).

Nol, L., G.B.M. Heuvelink, W. de Vries, J. Kros, E.J. Moors & P.H. Verburg, 2009. Effect of temporal resolution on N₂O emission inventories in Dutch fen meadows. *Global Biogeochemical Cycles* 23 (GB4003).

Nol, L., P.H. Verburg, G.B.M. Heuvelink & K. Molenaar, 2008. Effect of land cover data on nitrous oxide inventory in fen meadows. *Journal of Environmental Quality* 37: 1209-1219.

Olivier, J.G.J., L.J. Brandes & R.A.B. te Molder, 2009. Uncertainty in the Netherlands' greenhouse gas emissions inventory: Estimation of the level and trend uncertainty using the IPCC Tier 1 approach. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), PBL publication number 500080013.

Openshaw, S., 1983. The Modifiable Areal Unit Problem. *CATMOG (Concepts and techniques in modern geography)* 38, Norfolk, UK, Geo Books.

Peters, W., M.C. Krol, G.R. van der Werf, S. Houweling, C.D. Jones, J. Hughes, K. Schaefer, K.A. Masarie, A.R. Jacobson, J.B. Miller, C.H. Cho, M. Ramonet, M. Schmidt, L. Ciattaglia, F. Apadula, D. Heltai, F. Meinhardt, A.G. Di Sarra, S. Piacentino, D. Sferlazzo, T. Aalto, J. Hatakka, J. Ström, L. Haszpra, H.A.J. Meijer, S. van der Laan, R.E.M. Neubert, A. Jordan, X. Rodo, J.-A. Morgut, A.T. Vermeulen, E. Popa, K. Rozanski, M. Zimnoch, A.C. Manning, M. Leuenberger, C. Uglietti, A.J. Dolman, P. Ciais, M. Heimann & P.P. Tans, 2010. Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02078.x.

Ramirez, A., C. de Keizer, J.P. van der Sluijs, J. Olivier, L. Brandes, 2008. Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990-2004. *Atmospheric Environment*, 42, 8263-8272.

Schrier-Uijl, A.P., P.S. Kroon, P.A. Leffelaar, J.C. van Huissteden, F. Berendse & E.M. Veenendaal, 2010. Methane emissions in two drained peat agro-ecosystems with high and low agricultural intensity. *Plant and Soil* (DOI: 10.1007/s11104-009-0180-1).

Schulze C.J.E., C.M.J. Jacobs, J.H. Duyzer, C.L. van Beek, F.C. Bosveld, A.T.C. Dias, W.W.P. Jans, A.P. Schrier-Uijl & J. E. Vermaat, dit nummer. Variabiliteit in ruimte en tijd ontrafeld. Broeikasgasemissies uit Nederlandse landschappen. *Landschap* 27/2: 67-79.

Schulze E.D., S. Luyssaert, P. Ciais, A. Freibauer, I.A. Janssens, J.F. Soussana, P. Smith, J. Grace, I. Levin, B. Thiruchittampalam, M. Heimann, A.J. Dolman, R. Valentini, P. Bousquet, P. Peylin, W. Peters, C. Rödenbeck, G. Etiope, N. Vuichard, M. Wattenbach, G.J. Nabuurs, Z. Poussi, J.H. Gash & CarboEurope Team, 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NGE0686: 842-850.

Sirignano, C., R.E.M. Neubert, C. Rödenbeck & H.A.J. Meijer,

2010. Atmospheric oxygen and carbon dioxide observations from two European coastal stations 2000-2005: continental influence, trend changes and APO climatology, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1599 - 1615.

Tolk, L.F., W. Peters, A.G.C.A. Meesters, M. Groenendijk, A.T. Vermeulen, G.J. Steeneveld & A.J. Dolman, 2009. Modelling regional scale surface fluxes, meteorology and CO₂ mixing ratios for the Cabauw tower in The Netherlands. *Biogeosciences*, 6: 2265-2280.

Vellinga, O.S., B. Gioli, J.A. Elbers, A.A.M. Holtslag, P. Kabat & R.W.A. Hutjes, 2010. Regional carbon dioxide and energy fluxes from airborne observations using flight-path segmentation based on landscape characteristics. *Biogeosciences*, 7, 1307-1321.

Vries, W. de, J. Kros & O. Oenema, 2001. Modeled impacts of farming practices and structural agricultural changes on nitrogen fluxes in the Netherlands. *TheScientificWorld* 1: 664-672.

Vries, W. de, J. Kros, O. Oenema & J. de Klein, 2003. Uncertainties in the fate of nitrogen II: A quantitative assessment of the uncertainties in major nitrogen fluxes in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 71-102.

Vrom, 2010. Bijvoorbeeld: Protocol 0041 Referentie benadering, t.b.v. NIR 2010, uitgave maart 2010. CO₂ uit verbranding van fossiele brandstoffen (Reference Approach). De monitoring protocollen zijn toegankelijk via <http://www.broeikasgassen.nl>

Western, A.W. & G. Blöschl, 1999. On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 217, 203-224.