

Variabiliteit in ruimte en tijd ontrafeld

Broeikasgasemissies
Variabiliteit
Natuurlijke en
agro-ecosystemen
Beheer
Landgebruikscenario's

Broeikasgasemissies uit Nederlandse landschappen

De uitstoot van broeikasgassen door het landschap varieert enorm in tijd en ruimte doordat landschappelijke omstandigheden als bodem, grondwater, vegetatie en weer ook enorm variëren in tijd en ruimte. Gebrek aan inzicht hierin beperkt de betrouwbaarheid van emissieschattingen en maakt kwantificering van mitigatie via ingrepen in het landschap tot een hachelijke zaak. Wat is bekend over de variabiliteit van de broeikasgasfluxen binnen en tussen verschillende landschapselementen, en wat gebeurt er bij verandering in het landgebruik?

De landschapsschaal is de schaal waarop de interactie tussen mensen en hun leefomgeving het sterkst zichtbaar is (Veldkamp et al., 2001; Millennium Ecosystem Assessment, 2005). In het Nederlandse landschap uit dit zich bijvoorbeeld in ingrepen die leiden tot vernatting, verdroging, verschraling, veranderingen in de landbouwsector, uitbreidingen van stedelijk gebied en aanleg van nieuwe natuurgebieden. Zulke ingrepen beïnvloeden de broeikasgasflux. Dit betekent dat broeikasgasemissies gestuurd kunnen worden via ingrepen in het landschap. De grootte van de broeikasgasfluxen en het soort broeikasgas dat uitgewisseld wordt, hangen af van allerlei factoren zoals de samenstelling van de organische stof in de bodem, bodemtype (McLauchlan, 2006), grondwaterdynamiek, vegetatietype, landgebruik, beheerfactoren zoals bemesting en begrazing (Jarecki & Lal 2003; Jandl et al., 2007) en het weer. Deze factoren variëren sterk in de tijd en de ruimte en leiden zo tot een enorme temporele en ruimtelijke variabiliteit van de broeikasgasemissies. Veranderingen in de tijd kunnen instantaan optreden of jaren op zich laten wachten (Schimel et al., 1993). Tevens kunnen fluxen al sterk variëren op schalen vanaf enkele centimeters (Velthof et al., 1996). Deze variabiliteit leidt tot een lage signaal/ruis verhouding, wat problematisch is bij het meten van broeikasgasemissies. Door het gebrek aan inzicht in deze variabiliteit en haar oorzaken ontstaan grote onzekerheden in schattingen van broeikasgasemissies.

Belangrijker gevolg van deze onzekerheid is nog dat mitigerende maatregelen niet geformuleerd kunnen worden en evaluatie van maatregelen moeilijk is.

Om de broeikasgasflux van een heel landschap te schatten, wordt doorgaans gewerkt met emissiefactoren: de emissie wordt per landschapselement berekend uit een gemakkelijk te bepalen grootte. Een landschapselement is een onderdeel van een landschap dat (quasi-) homogeen is wat betreft landgebruik, bodem, grondwaterstand, beheer en andere mogelijk relevante factoren voor broeikasgasemissies. Een voorbeeld van het gebruik van een emissiefactor is de berekening van de jaarlijkse N_2O -emissie uit grasland als zijnde 1% van de jaarlijkse stikstofgift. Gebruik van emissiefactoren gaat grotendeels voorbij aan zowel temporele als ruimtelijke verschillen in emissie tussen en binnen landschapselementen. In formele rapportages van emissies van broeikasgassen worden zeer algemene emissiefactoren gebruikt. Voor N_2O -emissies bijvoorbeeld maakt men internationaal alleen onderscheid tussen minerale gronden en veengronden en tussen gebieden met en zonder beheer door de mens (IPCC, 2006). Doordat de emissiefactoren zo algemeen zijn, kunnen effecten van beheeringrepen op broeikasgasfluxen niet betrouwbaar geëvalueerd worden.

Stratificatie van het landschap in landschapselementen gecombineerd met emissieberekeningen op basis van in de tijd variërende sturende factoren zou inzicht in fluxen

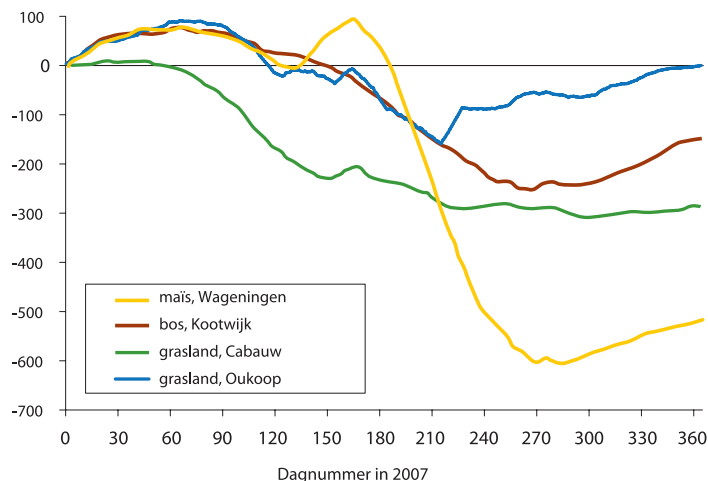
NYNKE SCHULP, COR
JACOBS, JAN
DUYZER, CHRISTY
VAN BEEK, FRED
BOSVELD, ANDRE
DIAS, WILMA JANS,
ARINA SCHRIER-
UIJL, JAN VERMAAT

Dr. Ir. C.J.E. Schulp
Wageningen University, leer-
stoelgroep Landdynamiek.
Huidige adres: Planbureau
voor de Leefomgeving,
Antonie van Leeuwenhoek-
laan 9, 3721 MA Bilthoven
nynkeschulp@me.com
Dr. Ir. C.M.J. Jacobs
Wageningen UR Alterra, Earth
System Science – Climate
Change
Dr. J.H. Duyzer TNO Bouw en
Ondergrond
Dr. Ir. C.L. van Beek
Wageningen UR Alterra,
Bodemkwaliteit en
Nutriënten
Dr. F.C. Bosveld Koninklijk
Nederlands Meteorologisch
Instituut
Dr. A.T.C. Dias Vrije
Universiteit, Department of
Ecological Sciences
W.W.P. Jans Wageningen UR
Alterra, Earth System Science
– Climate Change
Ir. A.P. Schrier-Uijl
Wageningen University, leer-
stoelgroep Natuurbeheer en
plantenecologie
Prof. Dr. Ir. J.E. Vermaat
Vrije Universiteit, Faculty
of Earth and Life Sciences,
Earth Sciences and Economics

Foto **Barend Hazeleger**
bvbeel.nl. Veenweide in de
buurt van Kanis

Figuur 1 Gemeten cumulatieve CO₂-flux in 2007 voor een maïsperceel bij Wageningen, een naaldbos bij Kootwijk, een grasland bij Cabauw en een grasland bij Oukoop. Negatieve fluxen geven CO₂-opname aan, positieve fluxen uitstoot. Totalen aan het einde van het jaar: -520 gC m⁻² (Wageningen), -283 gC m⁻² (Cabauw), -148 gC m⁻² (Kootwijk) en -1 gC m⁻² (Oukoop).

Figure 1 Observed cumulative CO₂ flux in 2007 for a maize plot near Wageningen, a coniferous forest near Kootwijk, a grassland near Cabauw and a grassland near Oukoop. Negative fluxes denote CO₂ uptake, positive fluxes emission. All annual sums: -520 gC m⁻² (Wageningen), -283 gC m⁻² (Cabauw), -148 gC m⁻² (Kootwijk) and -1 gC m⁻² (Oukoop).



uit het landschap kunnen verbeteren. Dit zou kunnen leiden tot verbetering van emissieschattingen voor rapportages en geeft aanknopingspunten voor mitigatie door veranderingen in landgebruik en voor verificatie van gerapporteerde mitigatie-effecten.

Dit artikel gaat daarom in op de temporele en ruimtelijke variatie van de broeikasgasemissies binnen het Nederlandse landschap. De grootte van de variabiliteit wordt geanalyseerd, samen met de achterliggende oorzaken. Op basis van de aanknopingspunten voor mitigatie uit onze analyses zullen Kroon et al. (dit nummer) maatregelen formuleren en de effecten daarvan schatten. De informatie is afgelopen jaren verzameld via uiteenlopende meetmethodes. We bespreken de resultaten van directe fluxmetingen via de eddy-covariantiemetingen, representatief op de schaal van een perceel, naast metingen op de schaal van meters of minder met behulp van fluxkamers. Zie Hensen et al. (dit nummer) voor meer details over deze meetmethodes. Daarnaast zijn metingen van koolstofvoorraden, en uit temporele variaties daarin afgeleide fluxen, verkregen via inventarisaties. Dit zijn

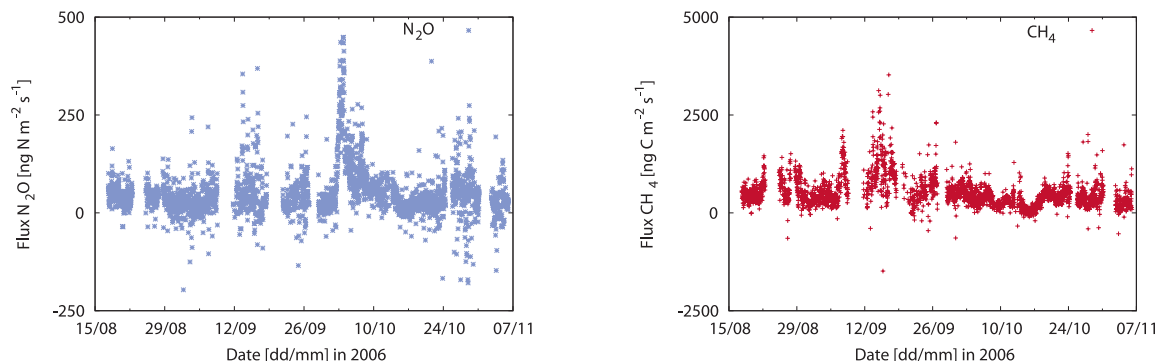
periodieke bemonsteringen van biomassa, bijvoorbeeld staand hout in bossen en organische stof in strooisel en bodem, waarmee met behulp van allometrische relaties de totale koolstofvoorraad van het betreffende systeem geschat wordt (Nabuurs et al., 2005). Op basis van deze metingen worden meer specifieke, gestratificeerde emissiefactoren afgeleid.

Variabiliteit binnen een jaar

De CO₂-opname vertoont een duidelijke seizoensfluctuatie die per vegetatie verschilt en door beheer te beïnvloeden is. Figuur 1 toont de netto cumulatieve CO₂-flux voor vier meetlocaties waar in 2007 gelijktijdig metingen zijn uitgevoerd. In alle gevallen is sprake van netto vastlegging van CO₂ (negatieve cumulatieve flux), maar de verschillen tussen de ecosystemen zijn groot. De netto opname over 2007 verschilde een factor 3.5 tussen de bosopstand en het maïsperceel.

Bij beide graslanden vindt het grootste deel van de netto CO₂-opname plaats in het eerste deel van het groeiseizoen (maart-juni). Deze opname wordt verstoord door een korte, maar opvallende periode met uitstoot rond dagnummer 160. Dit is waarschijnlijk het effect van begrazing (Cabauw) of maaaien (Oukoop) waardoor het totale bladoppervlak afneemt en de opname van CO₂ door fotosynthese tijdelijk vermindert (Veenendaal et al., 2007). In het geval van Oukoop leidt een dergelijke gebeurtenis rond dag 225 een lange periode met netto uitstoot in. Bij Cabauw ontbreekt een dergelijke lange periode met een duidelijke uitstoot. Al met al zijn de verschillen in de jaartotalen voor de graslanden groot: nauwelijks opname of uitstoot bij Oukoop en een flinke opname van 283 gC m⁻² bij Cabauw.

Het naaldbos stoot in de herfst en de winter CO₂ uit maar legt van maart tot ongeveer september CO₂ vast. Bij de maïs is nog duidelijker dan bij het bos en de graslanden sprake van een groeiseizoen. In maïselden kan de op-



Figuur 2 Temporele variabiliteit van CH_4 (rechts) en N_2O (links) fluxen in polder Oukoop gedurende vier maanden in 2008, respectievelijk 2006. Fluxen zijn elke 30 minuten gemeten (Kroon *et al.*, 2007).

Figure 2 Temporal variability of CH_4 (right) and N_2O (left) fluxes in Oukoop during four months in 2008 and 2006, respectively. Fluxes are recorded every 30 minutes (Kroon *et al.*, 2007).

name van CO_2 tijdens de groei enorm zijn. De oogstkarakteristieken – wat blijft achter op het perceel – en het beheer buiten het groeiseizoen bepalen echter voor een belangrijk deel de netto jaarlijkse CO_2 -vastlegging op het perceel (Jans *et al.*, geaccepteerd). Volgens de Nederlandse regelgeving moet kale grond buiten het groeiseizoen zo snel mogelijk weer bedekt worden. Op het maïsperceel bij Wageningen is daarom na de oogst rogge ingezaaid. Daardoor is al vóór het groeiseizoen van de maïs (juni-september) sprake van CO_2 -opname. Vlak voor het inzaaien van de maïs is de rogge ondergeploegd, wat een tijdelijke toename van de CO_2 -uitstoot vanuit de (vrijwel) kale grond veroorzaakt tussen dag 130 en 160.

Figuur 2 geeft de temporele variabiliteit van CH_4 - en N_2O -fluxen weer in een meetreeks waarbij de fluxen iedere 30 minuten zijn bepaald in een gebied van enkele hectaren in polder Oukoop. De figuur illustreert de enorme variabiliteit op korte tijdschaal die karakteristiek is voor deze gassen (Kroon *et al.*, in druk). Naast de getoonde verschillen op korte tijdschalen (dag tot seizoen) kunnen er ook tussen jaren grote verschillen optreden (zie volgende paragraaf). De continu uitgevoerde metingen van CH_4 laten een grillig patroon zien. Binnen een dag blijkt de CH_4 -uitstoot het hoogst in de late middag. De dagelijkse

CH_4 -emissies zijn positief gecorreleerd met bodemtemperatuur en windsnelheid: deze variabelen verklaren 60% van de totale variatie in CH_4 -emissie.

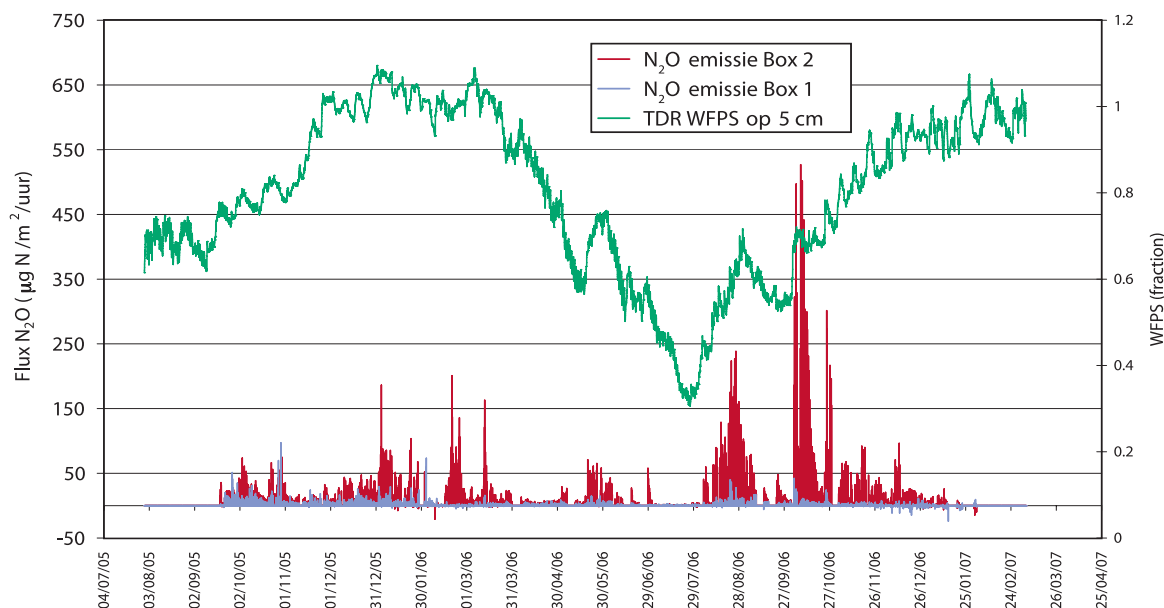
De N_2O -emissies worden gekenmerkt door lange periodes met een lage flux, de achtergrondemissies, afgewisseld door korte periodes met een hoge flux, de piekemissies. Dit patroon doet zich voor bij bossen, graslanden en bouwlanden.

In het Speulderbos op de Veluwe wordt de achtergrondemissie geschat op $63 \text{ g N}_2\text{O hectare}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ met piekemissies tot $630 \text{ g N}_2\text{O hectare}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$. In een sparrenopstand in Duitsland bleek 73% van de jaaremmissie plaats te vinden via één enkele piek, gekoppeld aan het invallen van de dooi. Na langdurige droogte of vorst zou ophoping van dode biomassa kunnen leiden tot een hoge emissie door de beschikbaarheid van hoge concentraties substraat. In het algemeen hangt in bossen de achtergrondemissie van N_2O sterk samen met de neerslag en de hoeveelheid stikstof daarin (depositie). Hoe hoger het N- en vochtgehalte in de bodem, hoe hoger de emissie. Dit blijkt uit metingen op verschillende locaties in Europa (Papen & Butterbach-Bahl, 1999).

In 2006-2008 zijn in polder Oukoop continu N_2O -emissies gemeten in een bemest grasland. De achtergrond-

Figuur 3 De N_2O -emissie vanuit het grasland in Stein (linker as) en het watergehalte op 5 cm diepte als fractie van de poriën in de bodem gevuld met water (water filled pore space) op de rechter as. Zie Stolk *et al.* (ingediend) voor een beschrijving van de methode.

Figure 3 N_2O emission from a meadow in Stein and the waterfilled pore space on the right axis. See Stolk *et al.* (submitted) for a description of the methods.



emissie is ongeveer $17 \text{ kg } N_2O \text{ hectare}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ terwijl piek-emissies op circa $5 \text{ kg hectare}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ uitkomen. Samen met indirecte emissies door uitspoeling en runoff levert dit een N_2O -emissie van gemiddeld $24 \text{ kg hectare}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ op (Kroon *et al.*, in druk). Piekemissies volgen op bemesting in combinatie met regenval. Bodemtemperatuur en windsnelheid blijken ook hier de variaties in de achtergrondemissie het beste (28%) te kunnen verklaren; hoe hoger de temperatuur en de windsnelheid, hoe hoger de emissie. In Stein zijn in een niet bemest veenweidenperceel eveneens continu emissies van N_2O (figuur 3) en CH_4 bepaald. Ook zonder bemesting is het verloop grillig en worden de emissies van N_2O door neerslag beïnvloed: afname van emissie in droge periodes en piekemissies na regenval, bijvoorbeeld in juni 2006. Dit patroon wordt echter niet steeds teruggevonden. In sommige periodes treed na regen geen verhoogde emissie op. Opvallend is ook de piek-

emissie na een eenmalige mestgift in box 2 in oktober 2006. Voor CH_4 worden naast emissies – op plekken met de hoogste grondwaterstand – ook perioden met opname waargenomen. De mestgift heeft slechts weinig invloed op de emissie van CH_4 .

Variabiliteit tussen jaren

Naast de variatie van de broeikasgasfluxen binnen een jaar is er vaak ook sprake van variatie tussen jaren. Uit metingen van de CO_2 -flux van een naaldbos bij Kootwijk op de Veluwe in 1997-2009 blijkt dat de jaarlijkse koolstofopname in die periode varieerde tussen 280 en 580 g m^{-2} . Beheerfactoren, weersomstandigheden, fysiologische factoren, gebeurtenissen als stormschade en mogelijk ook stikstofdepositie spelen hier een, nog niet goed kwantificeerbare, rol. Dergelijke verschillen kunnen ook optreden bij graslanden. Het weer in combinatie met eco-fysiolo-



Foto **Bert Kers**
Uitzicht vanaf de meet-
toren Lutjewad: zeedijk,
kwelder, op achtergrond
Lauwersmeergebied

gische karakteristieken zoals de gevoeligheid van fotosynthese voor licht en die van respiratie voor temperatuur veroorzaken de verschillen in belangrijke mate (Jacobs *et al.*, 2007). Ook beheerfactoren als maaien en begrazingsintensiteit spelen een rol (Veenendaal *et al.*, 2007). Voor akkerbouwgewassen is beperkt informatie beschikbaar over verschillen in jaarlijkse netto CO₂-fluxen en blijken deze verrassend genoeg niet te correleren met de oogst-opbrengst (Moors *et al.*, geaccepteerd). In een veenweidenpolder bij Zegveld zijn gedurende vier jaar intensief N₂O-fluxen gemeten op een relatief droog en een relatief nat perceel met een gemiddelde grondwaterstand van 55 respectievelijk 40 cm beneden het maaiveld. De percelen werden beide intensief beheerd via begrazing en maaien, en bemest met 370 kg N hectare⁻¹ jaar⁻¹ (Van Beek *et al.*, 2010). Uit deze metingen blijkt een aanzienlijke variatie in emissies tussen de jaren (tabel 1).

De grote verschillen kunnen grotendeels (74%) verklaard worden uit de N-aanvoer vanuit de landbouw en de grondwaterstand (van Beek *et al.*, 2009). De resterende variatie wordt verklaard door piekemissies die in sommige gevallen samen vielen met extreme weersomstandigheden (onweer, dooi na een vorstperiode en dergelijke). In het natte perceel is de temporele variabiliteit (uitgedrukt als $\sigma/\mu \cdot 100\%$) gelijk aan 110%; op het droge perceel is deze veel lager (50%). Op het natte perceel verklaarde een dagemissie bijna de helft van de gemiddelde jaaremmissie over vijf jaar, op het droge perceel ‘slechts’ een kwart.

Jaar	Nat perceel	Droog perceel
2006	16 ± 11	50 ± 25
2007	9 ± 11	36 ± 20
2008	24 ± 28	36 ± 13
2009	20 ± 27	30 ± 19

Tabel 1 Jaarlijkse N₂O emissies (kg N₂O hectare⁻¹ jaar⁻¹ ± een standaarddeviatie) voor een relatief nat en relatief droog perceel op het proefbedrijf Zegveld.

Table 1 Annual N₂O emissions (kg N₂O hectare⁻¹ year⁻¹ ± one standard deviation) in a wet and a dry field at the Zegveld experimental farm.

Deze piekemissies kunnen niet duidelijk gerelateerd worden aan gemeten omgevingsfactoren (van Beek et al., 2010). Deze resultaten geven aan dat op relatief natte percelen een hogere meetfrequentie gehanteerd zou moeten worden dan op relatief droge.

De jaargemiddelde N_2O -flux kan ook in bos aanzienlijk variëren. Zo varieerde de N_2O -emissie in het Speulderbos in twee jaar tussen 0.24 en 0.48 kg N_2O hectare⁻¹ jaar⁻¹. In andere bossen zijn de verschillen tussen jaren op een enkele uitschieter na vergelijkbaar (Kesik et al., 2005).

Bovengenoemde resultaten laten zien hoe broeikasgasfluxen op korte en lange tijdschaal enorm variëren en samenhangen met het landgebruik, de mestgift, neerslag en de grondwaterspiegel. Deze temporele variabiliteit illustreert de problemen die ontstaan bij het schatten van broeikasgasemissies in het landschap op basis van eenvoudige emissiefactoren. Voor een betrouwbare interpretatie zijn daarom lange meetreeksen met een hoge tijdsolutie nodig. Tegelijkertijd geeft inzicht in de oorzaken van temporele variabiliteit aanknopingspunten bij het ontwikkelen van mitigatiebeleid.

Variabiliteit binnen landschapselementen

In emissierapportages wordt aangenomen dat de netto CO_2 -opname van een akkerbouwperceel gemiddeld nul is. Om deze aanname te verifiëren, zijn pogingen gedaan om de netto koolstofopname te schatten uit jaarlijkse fluxmetingen, in combinatie met metingen aan de koolstofstromen die met oogst, bemesting en andere beheerfactoren samenhangen (Ceschia et al., ingediend). De netto flux minus de afvoer van koolstof bij oogst geeft echter al een goede eerste indruk van de mogelijke netto koolstofopslag in de bodem op jaarbasis. Moors et al. (geaccepteerd) hebben in Europees verband een analyse uitgevoerd van zulke data, over 45 groeiseizoenen van 10 gewassoorten op 17 locaties. Gemiddeld was er sprake

van een kleine emissie, van 38 g C m⁻² per jaar. Maar de variatie was enorm: de standaardafwijking, hier gebruikt als een maat om variabiliteit te kwantificeren, bedroeg 251 g C m⁻² per jaar. Schattingen voor de Nederlandse locaties in deze studie (vier gewassen, één groeiseizoen per gewas) lieten een netto opname zien. Op Europese schaal blijkt de emissievariabiliteit bij akkerbouwpercelen, gemeten over het groeiseizoen, voornamelijk op de gewassen locatiekeuze terug te voeren. Daarnaast beïnvloeden vooral meteorologische omstandigheden (droogte) de variabiliteit van emissies (Moors et al., geaccepteerd). Maar opvallend is dat over een jaar gezien juist de periode buiten het groeiseizoen en specifieke managementfactoren, zoals de keuze om al dan niet gewasresten onder te ploegen, bepalend lijken te zijn voor de uiteindelijke koolstofbalans over een kalenderjaar (zie bijvoorbeeld Jans et al., geaccepteerd). De exacte bijdrage van deze factoren is vooralsnog echter bijzonder lastig te kwantificeren (Ceschia et al., ingediend).

Bossen worden gezien als landschapselementen waarin koolstof kan worden vastgelegd. Bosbeheer speelt daarom een belangrijke rol in mitigatiebeleid. Omdat slechts op een beperkt aantal plaatsen fluxmetingen zijn uitgevoerd is over ruimtelijke variatie tussen Nederlandse bossen of binnen een bos op basis van zulke metingen weinig bekend. Aan de hand van inventarisaties van koolstofvoorraden in biomassa, strooisellaag en bodem is wat meer te zeggen over de verschillen in opname van CO_2 . In het Speulderbos zijn koolstofvoorraden in bodem en strooisellaag geïnventariseerd. Deze bleken in bosopstanden van gelijke leeftijd maar met verschillende boomsoorten een factor 2 te verschillen: 66 tegen 128 ton hectare⁻¹ (Schulp et al., 2008). Dit suggereert dat de cumulatieve opname van CO_2 door verschillende boomsoorten significant verschilt. Nabuurs et al. (2005) laten dit ook zien.

Het Nederlandse cijfer voor CO₂-emissies uit grasland op organische bodems (519 gC m⁻²) is gebaseerd op de afbraaksnelheid van veen in het veenweidegebied (Brandes et al., 2007). Graslanden op minerale bodems worden als koolstofneutraal beschouwd. Fluxmetingen hebben echter grote verschillen tussen de jaarlijkse CO₂-fluxen van graslandpercelen aangetoond, ook binnen het veenweidegebied. Bij grasland op veenbodems was inderdaad sprake van uitstoot. Het gemiddelde op jaarbasis was 220 gC m⁻², met een standaarddeviatie van 90 gC m⁻². Op minerale bodems was op jaarbasis sprake van een gemiddelde opname van 90 gC m⁻², met eveneens een standaarddeviatie van 90 gC m⁻². Deze cijfers contrasteren sterk met het officiële, voor de rapportages gebruikte, jaarcijfer. De precieze oorzaak van het gevonden verschil is nog niet opgehelderd (Jacobs et al., 2007).

Over emissies uit open water is relatief weinig bekend. Onderzoek van Hendriks et al., (2007) en Schrier-Uijl et al. (2010a) suggereert dat sloten in het veenweidegebied mogelijk hotspots van methaanemissies zijn. De zuurstofloze, grotendeels organische, onderwaterbodem kan een belangrijke bron van methaan zijn (Le Mer & Roger, 2001). Metingen van Schrier-Uijl et al. (2010b) en Vermaat et al. (ingediend) laten zien dat zowel sloten als meren fungeren als broeikasgasbronnen. Slechts een enkel waterlichaam fixeert koolstof. De CH₄-emissie uit sloten is significant hoger dan uit open water. Vooral in ondiepe sloten in intensief gebruikt landbouwgebied zijn hoge methaanemissies gemeten (figuur 4). Voor CO₂ is er ook een verschil, maar door de grote variatie is dit niet significant (figuur 4).

Een groot gedeelte (87-89%) van de variatie in emissie tussen waterlichamen in de dataset van Schrier-Uijl et al. (2010b) kan worden gerelateerd aan de samenstelling van het water en van het sediment in sloten en meren. De diepte van het water, fosfaat- en ijzergehalte, pH en de

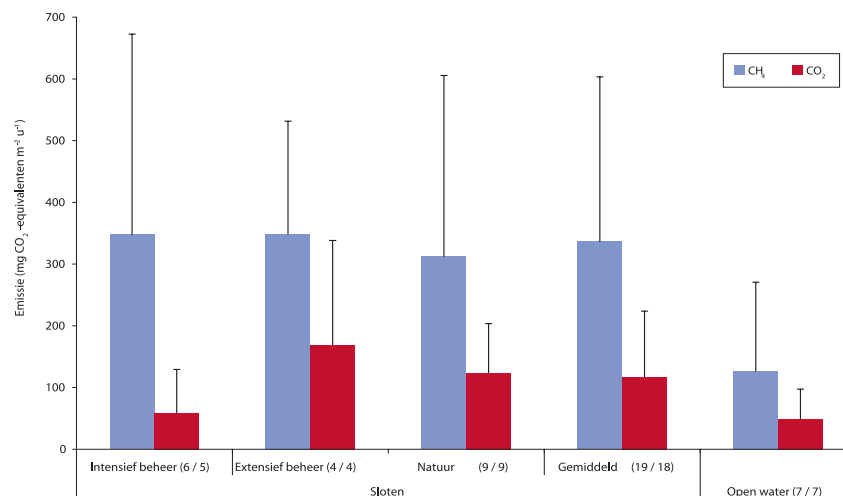
elektrische geleidbaarheid van het water blijken een groot deel van de variaties in de CO₂- en CH₄-emissie te verklaren. Dit hangt waarschijnlijk samen met de aanvoer van gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal en nutriënten vanuit de directe omgeving. In gebieden met kwel speelt de aanvoer van nutriëntenrijk grondwater van verder weg mogelijke een belangrijke rol. Het is aannemelijk dat de emissies zullen afnemen als toevoer van nutriënten vanuit de omgeving vermindert. Het door Vermaat et al. (ingediend) gevonden directe verband tussen intensiteit van het agrarische gebruik en CH₄-emissie uit de aanliggende sloten ondersteunt die hypothese.

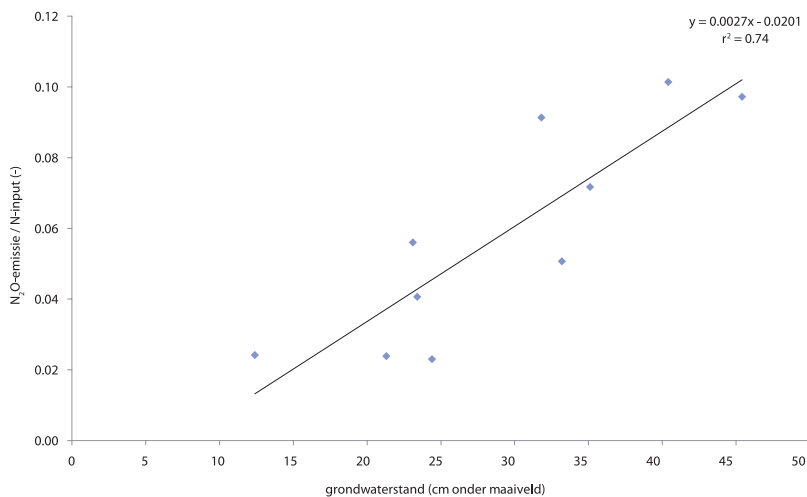
De rol van grondwater

De invloed van grondwaterstand op emissies van broeikasgassen is een belangrijk onderwerp van onderzoek in het veenweidegebied. Sturing van broeikasgasemissies via manipulaties van de grondwaterstand zou een overweging kunnen zijn bij het formuleren van een visie op de inrichting van het veenweidegebied (Woestenburg,

Figuur 4 Gemiddelde CH₄ en CO₂-fluxen uit Nederlandse veenwateren als een functie van de intensiteit van het landgebruik. De getallen tussen haakjes geven de steekproefgrootte aan.

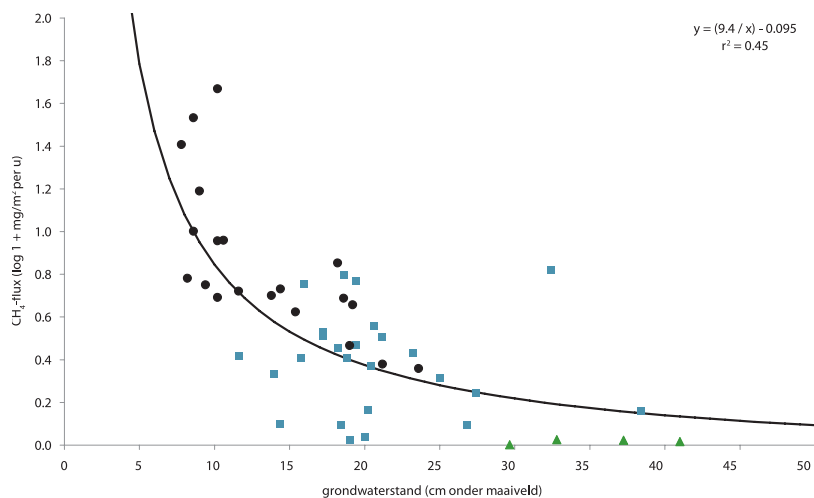
Figure 4 Average CH₄ and CO₂ fluxes from Dutch peat waters as a function of land use intensity. Numbers between brackets correspond to the sample size.





Figuur 5a Relatie tussen jaargemiddelde grondwaterstand en N_2O -emissie per eenheid N-aanvoer (bemesting en grazend vee) in Zegveld.

Figure 5a Relation between annual average groundwater level and N_2O emission (manure and grazing cattle) in Zegveld.

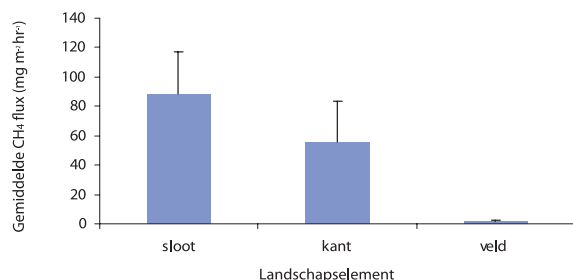


Figuur 5b Relatie tussen jaargemiddelde grondwaterstand en gemiddelde CH_4 -flux in Guisveld en Nieuwkoopse Plassen. De cirkels staan voor alleen maaien, vierkanten voor gemaaid en begraaasd en driehoeken voor gemaaid, begraaasd en bemest.

Figure 5b Relation between annual average groundwater level and average CH_4 flux in Guisveld and Nieuwkoopse Plassen. Circles indicate plots that are only mowed, squares plots that are mowed and grazed and triangles plots that are mowed, grazed and manured.

2009). Bij Zegveld variëren de door kamermetingen bepaalde totale jaaremissies van N_2O tussen 30 en 50 kg N_2O hectare⁻¹ jaar⁻¹ voor het droge perceel en tussen 9 en 24 kg N_2O hectare⁻¹ jaar⁻¹ voor het natte perceel, met piekemissies van meer dan 785 g N_2O hectare⁻¹ dag⁻¹. De N_2O -emissies kunnen slechts in beperkte mate verklaard worden met factoren als bodemeigenschappen (pH, NO_3^- , NH_4^+), temperatuur en neerslag. Dit wijst erop dat de variabiliteit op aggregaatsniveau zich moeilijk laat rijmen met verklarende factoren op perceelsniveau, of op een nog hoger ruimtelijk niveau. Uit de proef bij Zegveld blijkt verder dat bij een verhoging van de grondwaterstand een kleiner percentage van de N-toevoer in N_2O -emissie wordt omgezet (figuur 5a). Bij een onveranderde hoeveelheid bemesting zal de N_2O -emissie dus afnemen wanneer de grondwaterstand verhoogd wordt. In figuur 3 is de ruimtelijke variatie van N_2O -emissies ook goed te zien: De emissie verschilt sterk tussen de twee boxen terwijl die zich binnen enkele meters van elkaar bevinden. Ook de CH_4 -emissie wordt sterk beïnvloed door de grondwaterstand (figuur 5b). Vooral bij een grondwaterstand net onder het maaiveld neemt de emissie sterk toe. Bij lagere grondwaterstanden neemt de emissie snel af en kan zelfs sprake zijn van opname (Pleijter et al., in voorbereiding).

Veenweidenpercelen bestaan uit laaggelegen stukken verzadigde bodem en relatief droge stukken, gescheiden door brede sloten. Uit driejarig onderzoek in drie percelen in drie polders bleek dat de gemiddelde jaaremissies tussen verschillende landschapselementen erg verschillen. Sloten en slootkanten emitteren samen meer dan 60% van de totale jaarlijkse CH_4 -emissie (figuur 6), terwijl N_2O - en CO_2 -emissies juist voornamelijk uit velden blijken te komen (Schrier-Uijl et al., 2010a).



De rol van beheer en landgebruik

Binnen het veenweidegebied zijn er grote verschillen in de intensiteit van het beheer. Dit zou kunnen leiden tot grote verschillen in de broeikasgasflux. In proefgebieden in gras- en rietlanden in de buurt van de Nieuwkoopse Plassen en Guisveld zijn CH₄-fluxen gemeten langs twee transecten waarlangs het aantal jaarlijkse beheeringrepen toeneemt (tabel 2, figuur 5b; Dias *et al.*, 2010). De gemeten fluxen van methaan correleren sterk met de intensiteit van het beheer en het aantal beheeringrepen (tabel 2). Een reden hiervoor is dat de beheerintensiteit is gekoppeld aan de grondwaterstand en zoals eerder besproken correleren de CH₄-fluxen daar sterk mee (figuur 5b). Overeenkomstig onder andere Jacobs *et al.* (2004), Langeveld *et al.* (1997) en Le Mer & Roger (2001), is de flux het laagst bij de laagste grondwaterstand. Waarschijnlijk is de grondwaterstand de belangrijkste sturende factor voor de CH₄-emissie. De veranderingen in het beheer leiden tot veranderingen van productiviteit en beschikbaarheid van nutriënten en CH₄-producerende bacteriën kunnen gelimiteerd worden door koolstof of beschikbaarheid van nutriënten. De vegetatiesamenstelling varieert sterk langs het transect met planten die typisch zijn voor natte, voedselarme tot droge en voedselrijke omstandigheden. Omdat de vegetatiesamenstelling en CH₄-fluxen door dezelfde factoren beïnvloed worden,

Beheer	CH ₄ -flux (mg m ⁻² u ⁻¹)	Grondwater (cm onder maaiveld)
Maaïen	12.44 ± 19.3 (99)	14.9 ± 9.1 (100)
Maaïen en begrazing	2.46 ± 4.6 (125)	19.4 ± 14.1 (125)
Maaïen, begrazing en bemesten	0.03 ± 0.1 (24)	34.7 ± 16.8 (24)

blijkt de vegetatiesamenstelling een goede verklarende variabele te zijn voor de CH₄-fluxen (Dias *et al.*, 2010).

N₂O, CO₂ en CH₄ reageren alle drie op veranderingen in het beheer maar niet noodzakelijkerwijs hetzelfde. Daarom is in drie veenweidenpolders met verschillend beheer (intensief, extensief en geen beheer, zie tabel 1 in Kroon *et al.*, dit nummer) een complete broeikasgasbalans gemeten over 2006 met een combinatie van verschillende technieken (zie Hensen *et al.* en Kroon *et al.*, dit nummer; Schrier-Uijl *et al.*, 2010b). De conclusie is dat de totale broeikasgasemissie van percelen (uitgedrukt in CO₂-equivalenten) afneemt naarmate de bedrijfsvoering minder intensief wordt (Schrier-Uijl *et al.*, in voorbereiding). Bij een analyse op bedrijfsniveau zal echter ook rekening gehouden moeten worden met niet-grondgebonden emissies van bijvoorbeeld opgeslagen mest, koeien in de stal of trekkers. In de polder Oukoop voegen deze nog een aanzienlijk deel toe aan de totale broeikasgasbalans. Het artikel van Kroon *et al.* (dit nummer) gaat hier verder op in.

Ruimtelijke variabiliteit van broeikasgasfluxen hangt dus samen met ruimtelijke variabiliteit van beheer en landgebruik (begrazen, bemesten, maaïen en grondwaterstand) en biedt aanknopingspunten voor verdere stratificatie van emissiefactoren.

Figuur 6 CH₄-emissie vanuit verschillende landschapselementen in Stein, gemiddeld over 2006-2008.

Figure 6 CH₄ emissions from the different land-forms for Stein averaged over 2006, 2007 and 2008.

Tabel 2 Gemiddelde ± standaarddeviatie CH₄-flux (n) en grondwaterstand van sites in de Nieuwkoopse Plassen en Het Guisveld met verschillende intensiteiten van beheer.

Table 2 Average ± standard deviation CH₄ flux (n) and groundwater level under different management intensities in the Nieuwkoopse Plassen and Guisveld sites.

Foto Aat Barendregt,
geo.uu.nl/pictures/
barendregt



Conclusies en aanbevelingen

Rapportages van broeikasgasemissies houden tot dusverre geen rekening met de grote variabiliteit van emissies. Het in dit artikel gepresenteerde onderzoek laat een aantal duidelijke kenmerken zien in ruimtelijke en temporele variabiliteit van broeikasgasfluxen.

De temporele variabiliteit van CO_2 -fluxen vertoont een duidelijke jaarlijkse gang. De emissie van CH_4 vertoont een grillig patroon, terwijl de temporele variabiliteit van N_2O -emissies wordt gekenmerkt door lange perioden van lage achtergrondemissies en hoge pieken. De grilligheid van het emissiepatroon van N_2O en CH_4 benadrukt de

behoefte aan continue en langdurig lopende meetseries en zeer zorgvuldig afgewogen generalisatie van de resultaten.

Ruimtelijke variabiliteit speelt ook een belangrijke rol. In tabel 3 is kwalitatief samengevat hoe emissies van CO_2 , N_2O en CH_4 verschillen tussen verschillende soorten landgebruik, bodem en beheer. In akkerbouwgebieden is het belangrijk om onderscheid te maken tussen verschillende gewassen, in bossen is het onderscheid tussen verschillende boomsoorten nodig en in het algemeen lijkt het geboden om minerale en organische bodems te onderscheiden. Niet alleen de CO_2 -huishouding vertoont

Landgebruik / beheer	Broeikasgas		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gras			
Op minerale bodems	--	?	?
Op veenbodems			
Intensief beheerd	++ ¹	+ ²	+++
Extensief beheerd	0 ¹	+ ²	+
Onbeheerd	--	0 ²	+
Bos	--	-	+
Akker	+	+	+
Open water	+	+	?

¹ Recentelijk uitgevoerd meerjarig onderzoek laat geen significante verschillen zien tussen de CO₂-emissie vanuit intensief en extensief beheerde veenweide.

² Ook de verschillen tussen de flux van CH₄ uit intensief, extensief en onbeheerd grasland blijken niet significant.

ruimtelijke variabiliteit, ook die van N₂O. Loofbossen stoten tweemaal zo veel N₂O uit als naaldbossen (Pilegaard et al., 2006).

In het Veenweidegebied kan met name informatie over de grondwaterstand gebruikt worden om emissiefactoren (voor CH₄ en N₂O) beter te stratificeren en daarmee onzekerheden te verkleinen. Het opstellen van goede emissiefactoren voor open water zal – gezien het grote areaal open water in het veenweidegebied – ook bijdragen aan een betere schatting van de emissies.

Ten slotte biedt kennis van zowel de ruimtelijke als de temporele variabiliteit inzicht in de mogelijkheden van mitigatiebeleid. De in dit artikel gepresenteerde resultaten suggereren dat broeikasgasemissies in het veenweidegebied in principe zijn te sturen door middel van beheer. Kroon et al. (dit nummer) gaan daar verder op in en schetsen ook een aantal scenario's voor mitigatie. Daarvoor is echter een goede kwantificering van de volledige broeikasgasbalans van verschillende landschapselementen essentieel.

Summary

The variability of GHG emissions from Dutch landscapes

Nynke Schulp, Cor Jacobs, Jan Duyzer, Christy van Beek, Fred Bosveld, Andre Dias, Wilma Jans, Arina Schrier-Uijl & Jan Vermaat

Greenhouse gas emissions, variability, natural and agroecosystems, management, land use scenarios

Greenhouse gas emissions are highly variable in space and time. This variability hampers measurements of greenhouse gas emissions and hinders the use of land use and management as mitigation options. We give an overview of explaining factors of temporal and spatial variability of greenhouse gas emissions from Dutch landscapes.

CO₂ fluxes have a regular annual temporal variability. Temporal variability of N₂O emission is characterized by low background emissions and high peaks that are related to precipitation and manure application, while temporal variability of CH₄ fluxes is very irregular. Spatial variability of CO₂ can be explained using the crop type in agricultural land or the tree species in forests. Spatial variability of N₂O and CH₄ is strongly influenced by groundwater and management intensity. Additionally, at the landscape scale there is a significant greenhouse gas emission from ditches and open water. The temporal variability has to be considered in the design of measurement campaigns, while the insight in factors explaining the spatial variability of greenhouse gas emissions can help to improve landscape scale estimates of greenhouse gas emissions and guide management decisions for mitigation.

Tabel 3 Vergelijking van broeikasgasfluxen, opname (-) of emissie (+) van verschillende landgebruiken en beheer. Aantal + / - geven een indicatie van de grootte van de emissie; ? = onbekend; 0 = neutraal.

Table 3 Comparison of greenhouse gas sequestration (-) or emission (+) of different types of land use and management. The number of + / - indicates the emission strength; ? = unknown; 0 = no emission or sequestration.

Foto Aat Barendregt,
geo.uu.nl/pictures/
barendregt



Literatuur

Beek, C.L. van, M. Pleijter, C.M.J. Jacobs, G.L. Velthof, J.W. van Groenigen & P.J. Kuikman, 2010. Emissions of N_2O from fertilized and grazed grassland on organic soil in relation to groundwater level. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 86: 331-340.

Beek, C.L. van, M. Pleijter, J.W. van Groenigen, G.L. Velthof & P.J. Kuikman, 2009. Spatial and temporal variability of N_2O emissions from a drained and grazed grassland on peat soil. Paper presented at NCGG5, June 2009, Wageningen, the Netherlands.

Brandes, L.J., P.G. Ruysenaars, H.H.J. Vreuls, P.W.H.G. Coenen, K. Baas, G. van den Berghe, G.J. van den Born, B. Guis, A. Hoen, R. te Molder, D.S. Nijdam, J.G.J. Olivier, C.J. Peek & M.W. van Schijndel, 2007. Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2005, National Inventory Report 2007. Bilthoven. MNP Report 500080006, Milieu- en Natuur Planbureau (MNP).

Ceschia, E., P. Béziat, J.F. Dejoux, M. Aubinet, Ch. Bernhofer, B. Bodson, N. Buchmann, A. Carrara, P. Cellier, P. Di Tomasi, J.A. Elbers, W. Eugster, T. Grünwald, C.M.J. Jacobs, W.W.P. Jans, M. Jones, W. Kutsch, G. Lanigan, E. Magliulo, O. Marloie, E.J. Moors, C. Moureaux, A. Oliso, B. Osborne, M.J. Sanz, M. Saunders, P. Smith, H. Soegaard & M. Wattenbach, ingediend. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystem and Environment*.

Dias, A.T.C., B. Hoorens, R.S.P. van Logtestijn, J.E. Vermaat & R. Aerts, 2010. Plant species composition can be used as a proxy to predict methane emissions in peatland ecosystems after land use change. *Ecosystems*, 13: 526-538. DOI: 10.1007/s10021-01-09338-1.

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

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.

IPCC, 2006. IPCC guidelines for National greenhouse gas inventories. IGES, Japan.

Jacobs, C.M.J., E.J. Moors & F.J.E. van der Bolt, 2004. Invloed van waterbeheer op gekoppelde broeikasgasemissies in het veenweidegebied bij ROC Zegveld. Alterra rapport 840. Wageningen. Wageningen UR Alterra.

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 CO_2 Exchange from Dutch Grasslands. *Biogeosciences* 4: 803-816.

Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D.W. Johnson, K. Minkinen & K.A. Byrne, 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137(3-4): 253-268.

- Jans, W.W.P., C.M.J. Jacobs, B. Kruijt, S. Barendse & E.J. Moors, **geaccepteerd**. Carbon exchange of a maize (*Zea mays* L.) crop: influence of phenology. *Agriculture, Ecosystem & Environment*.
- Jarecki, M.K. & R. Lal, 2003. Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22(5): 471-502.
- Kesik, M., P. Ambus, R. Baritz, N. Brüggemann, K. Butterbach-Bahl, M. Damm, J. Duyzer, L. Horváth, R. Kiese, B. Kitzler, A. Leip, C. Li, M. Pihlatie, K. Pilegaard, S. Seufert, D. Simpson, U. Skiba, G. Smiatek, T. Vesala & S. Zechmeister-Boltenstern, 2005. Inventories of N₂O and NO emissions from European forest soils. *Biogeosciences* 2 (4): 353-375.
- Kroon, P.S., A. Hensen, H.J.J. Jonker, M.S. Zahniser, W.H. van 't Veen & A.T. Vermeulen, 2007. Suitability of quantum cascade laser spectroscopy for CH₄ and N₂O eddy covariance flux measurements. *Biogeosciences* 4, 715-728.
- Kroon, P.S., A.P. Schrier-Uijl, A. Hensen, E.M. Veenendaal & H.J.J. Jonker, in druk. Annual balances of CH₄ and N₂O from a managed fen meadow using eddy covariance flux measurements. *European Journal of Soil Science*.
- Kroon, P.S., A.P. Schrier-Uijl, P.C. Stolk, 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.
- Langeveld, C.A., R. Segers, B.O.M. Dirks, A. van den Pol-Dasselaar, G.L. Velthof & A. Hensen, 1997. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from pasture on drained peat soils in the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7: 35-42.
- Le Mer, J., & P. Roger, 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology* 37: 25-50.
- McLauchlan, K., 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems* 9(8): 1364-1382.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington. Island Press.
- Moors, E.J., C.M.J. Jacobs, W.W.P. Jans, I. Supit, W.L. Kutsch, C. Bernhofer, P. Béziat, N. Buchmann, A. Carrara, E. Ceschia; J.A. Elbers, W. Eugster, B. Kruijt, B. Loubet, M. Enzo, C. Moureaux, A. Oliso, M. Saunders & H. Soegaard, **geaccepteerd**. Variability in carbon exchange of European croplands. *Agriculture, Ecosystem & Environment*
- Nabuurs, G.J., I.J.J. van den Wyngaert, W.P. Daamen, A.T.F. Helmink, W.J.M. de Groot, W.C. Knol, H. Kramer & P.J. Kuikman, 2005. National system of greenhouse gas reporting for forest and nature areas under UNFCCC in the Netherlands. Wageningen. Alterra.
- Papen, H. & K. Butterbach-Bahl (1999). A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany 1: N₂O emissions. *Journal of Geophysical Research*, 104 (D15), 18487-18503.
- Pilegaard, K., U. Skiba, P. Ambus, C. Beier, N. Brüggemann, K. Butterbach-Bahl, J. Dick, J. Dorsey, J. Duyzer, M. Gallagher, R. Gasche, L. Horvath, B. Kitzler, A. Leip, M.K. Pihlatie, P. Rosenkranz, G. Seufert, T. Vesala, H. Westrate & S. Zechmeister-Boltenstern, 2006. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N₂O). *Biogeosciences*, 3 (4): 651-661.
- Pleijter M, C.L. van Beek & P.J. Kuikman, in voorbereiding. Emissie van lachgas uit grasland op veengrond. Monitoring lachgasfluxen op melkvee proefbedrijf Zegveld in de periode 2005 - 2009. Alterra rapport.
- Schimmel, J.P., E.A. Holland & D. Valentine, 1993. Controls on Methane flux from Terrestrial Ecosystems - Agricultural Ecosystem effects on trace gases and Global Climate Change. ASA special publication no.55 p167-182.
- Schrier-Uijl, A.P., P.S. Kroon, P.A. Leffelaar, J.C. van Huissteden, F. Berendse & E.M. Veenendaal, 2010a. Methane emissions in two drained peat agro-ecosystems with high and low agricultural intensity. *Plant Soil* 329: 509-520.
- Schrier-Uijl, A.P., A. Veraart, F. Berendse, P. Leffelaar & E.M. Veenendaal, 2010b. Release of CO₂ and CH₄ from lakes and ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, doi: 10.1007/s10533-010-9440-7.
- Schrier-Uijl *et al.*, in voorbereiding. Agricultural peatlands; towards a greenhouse gas sink.
- Schulp, C.J.E., G.J. Nabuurs, P.H. Verburg & R.W. de Waal, 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management* 256(3): 482-490.
- Stolk, P.C., R.F.A. Hendriks, C.M.J. Jacobs, J. Duijzer, E.J. Moors, J.W. van Groenigen, P.S. Kroon, A.P. Schrier-Uijl, E.M. Veenendaal & P. Kabat, ingediend. Simulation of daily N₂O emissions from managed peat soils. *Vadoze Zone Journal*.
- Veenendaal E.M., O. Kolle, P.A. Leffelaar, A.P. Schrier-Uijl, J. van Huissteden, J. van Walsem, F. Möller & F. Berendse F, 2007. CO₂ exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils. *Biogeosciences* 4: 1027-1040.
- Veldkamp, A., K. Kok, G.H.J. de Koning, J.M. Schoorl, M.P.W. Sonneveld & P.H. Verburg, 2001. Multi-scale system approaches in agronomic research at the landscape level. *Soil and Tillage Research* 58(3-4): 129-140.
- Velthof, G.L., J.G. Koops, J.H. Duyzer & O. Oenema, 1996. Prediction of nitrous oxide fluxes from managed grassland on peat soil using a simple empirical model. *Agricultural Science* 44: 339-356.
- Vermaat, J.E., F. Hellmann, A.T.C. Dias, B. Hoorens R.S.P. van Logtestijn & R. Aerts, ingediend. Greenhouse gas fluxes from Dutch peatland water bodies: are they affected by land use?
- Woestenburg, M., 2009. Waarheen met het Veen. Kennis voor keuzes in het westelijk veenweidegebied. Wageningen. Uitgeverij Landwerk.