



Mogelijke methaanuitstoot bij vernatting van natuurgebieden op organische bodem - een beperkte literatuurstudie

Technische memo

Mogelijke methaanuitstoot bij vernatting van natuurgebieden op organische bodems - Een beperkte literatuurstudie

Achtergrond memo

Auteurs

Cor Jacobs¹, Bart Kruijt² en Jeroen Veraart¹)

¹ Wageningen Environmental Research

² Wageningen Universiteit

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

Wageningen Environmental Research
Wageningen, maart 2020

Gereviewd door:

Paul Vertegaal, specialist water en natuur (Natuurmonumenten)

Akkoord voor publicatie:

Derk Rademaker, teamleider van Climate Resilience

Jacobs, C.M.J., B. Kruijt, J. Veraart, 2020. *Mogelijke methaanuitstoot bij vernatting van natuurgebieden op organische bodem - Een beperkte literatuurstudie*. Wageningen, Wageningen Environmental Research.

© 2020 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research - Onderzoeksmemo

Foto omslag: © Natuurmonumenten

Inhoud

1	Achtergrond	6
2	Methode	7
3	Resultaten	8
	3.1 Algemeen	8
	3.2 Metingen	8
	3.3 Productie en consumptie van methaan in de bodem en relatie met emissie	9
	3.4 Transport van methaan vanuit de bodem naar de atmosfeer	9
	3.5 Substraat en temperatuur	9
	3.6 Gerestaureerde veensystemen	10
	3.7 Nederland, België en Duitsland	10
	3.7.1 Algemeen	10
	3.7.2 Methaanemissies	11
	3.7.3 Mogelijke compensatie van CO ₂ vastlegging	12
4	Discussie en conclusies	16
	Bijlage 1 Zoekopdrachten - resultaten Scopus - lijst van referenties	18

1 Achtergrond

In het kader van het klimaatakkoord wordt overwogen om verdroogd veen weer te vernatten. Het idee is dat daarbij de door verdroging optredende aërobe omstandigheden, die leiden tot oxidatie van veen en de daarbij horende uitstoot (emissie) van CO₂ naar de atmosfeer, grotendeels weer veranderen in anaërobe omstandigheden die verdere oxidatie en de uitstoot van CO₂ voorkómen of zelfs leiden tot vastlegging. De mogelijkheid bestaat echter dat anaërobe omstandigheden bij veengronden leiden tot productie en uitstoot van CH₄ (methaan). Methaan is - geëvalueerd over een periode van 100 jaar - een ongeveer 28 maal sterker broeikasgas dan CO₂ (IPCC, 2013). Daarom kan een eventuele extra methaanemissie de emissiereductie van CO₂ deels of zelfs helemaal weer teniet doen - het "methaanlek". Bestaat een dergelijk methaanlek ook voor weer vernatte veengebieden in Nederland en zo ja, hoe groot is dat dan?

2 Methode

Om bovenstaande vraag te beantwoorden hebben we een beperkte literatuurstudie uitgevoerd. Uitsluitend via *Scopus* is gezocht naar Engelstalige, gereviewde wetenschappelijke literatuur op het gebied van methaanemissies uit natte gebieden met een overwegend organische bodem. Verder hebben we ons beperkt tot onderzoek naar emissies vanuit zoetwatersystemen naar de atmosfeer, behalve waar brak- of zoutwatersystemen aanvullende relevante inzichten bieden in methaanemissies vanuit zoetwatersystemen (met name in sommige review-artikelen).

Voor dit literatuuronderzoek zijn twee zoekopdrachten gedefinieerd. De eerste zoekopdracht betrof uitsluitend review artikelen vanaf het jaar 2009. Deze geven een beeld van de algemene wetenschappelijke stand van zaken op het gebied van methaanemissies uit natte gebieden. Via de tweede opdracht hebben we de zoektocht uitgebreid naar reguliere onderzoeksartikelen over alle periodes, maar regionaal toegespitst op Nederland, België en Duitsland. Mogelijke relevante artikelen werden uit de resultaten van de zoekopdrachten geselecteerd op basis van de beschrijvingen in de abstracts. Daarbij is gezocht naar analyses van directe metingen aan de methaanuitwisseling (bij natte organische bodems meestal emissie) op basis van fluxkamers of de eddy-covariantiemethode. De zoekopdrachten en de zoekresultaten na selectie op basis van de abstracts zijn gegeven in Bijlage 1. Als in de gevonden literatuur nog andere relevante artikelen of rapporten met een mogelijke meerwaarde genoemd werden die niet uit de *Scopus* zoekopdracht naar voren kwamen zijn die ook betrokken in het overzicht.

3 Resultaten

In dit beperkte literatuuroverzicht bespreken we eerst de kennis over de mogelijke methaanproblematiek in internationale context, waarbij we vooral gebruik maken van de bredere internationale reviews. Daarna beschrijven we de voor onze regio (Nederland, België, Duitsland) specifieke bevindingen voor mogelijke effecten van vernatting van veengebieden op methaanemissies.

3.1 Algemeen

Volgens de huidige inzichten zijn zogenoemde wetlands op wereldschaal de belangrijkste natuurlijke bron van methaan in de atmosfeer (Reay et al., 2018; Whalen, 2005). Interjaarlijkse veranderingen in de uitstoot van deze systemen zijn dan ook een belangrijke oorzaak van de variabiliteit van de methaanconcentratie in de atmosfeer (Reay et al., 2018). De diversiteit in wetlands en het bijbehorende beheer is echter groot. Vooral de invloed van veranderende vegetatie en neerslag van nutriënten op methaanemissies van de diverse systemen is erg onzeker (Haddaway et al., 2014; Reay et al., 2018). Ook over de effecten van veranderingen in temperatuur en neerslag door klimaatverandering bestaat een grote onzekerheid, waardoor toekomstprojecties van methaanemissies en -concentraties in de atmosfeer relatief onbetrouwbaar zijn (Reay et al., 2018). Gezien de grote verschillen tussen wetlands zijn de emissieverschillen tussen de wetland klassen over wat langere periode bezien eigenlijk verrassend beperkt (Lafleur, 2009). De onzekerheden zijn over het algemeen echter groter dan de gemiddelden (Abdalla et al., 2016; Lafleur, 2009).

3.2 Metingen

Tot nu toe kwamen de meeste meetgegevens over methaanemissies uit metingen met fluxkamers (Lafleur, 2009; Haddaway et al., 2014), maar het aantal metingen op basis van micrometeorologische technieken waaronder eddy-covariantie neemt toe (Nicolini et al., 2013). In Nederland is vooral tussen 2005 en 2010 een aantal metingen op basis van eddy-covariantie uitgevoerd, zij het op een beperkt aantal percelen (Hensen et al., 2010).

Beide typen meettechnieken hebben voor- en nadelen. Op perceelschaal of ecosysteemschaal leveren ze uiteindelijk vergelijkbare resultaten op zolang kamermetingen zorgvuldig worden opgeschaald en bij de micrometeorologische technieken een goede "footprintanalyse" wordt uitgevoerd (Nicolini et al., 2013). Een goede footprintanalyse betekent ook dat de specifieke invloed van alle representatieve landschapselementen (bijvoorbeeld sloten, rietkragen, droge stukken, natte stukken) in de footprint moet worden meegewogen naar rato van hun voorkomen (Schrier-Uijl et al., 2010). Een ander aandachtspunt is de representativiteit in de tijd. Eddy-covariantiemetingen zijn quasi-continu, maar kamermetingen zijn vaak discontinu. Dit kan ertoe leiden dat de kamermetingen minder representatief zijn voor alle tijdsperiodes dan eddy-covariantiemetingen. Zo werden tijdens emissiemetingen in de Horstermeerpolder in Nederland minder kamermetingen in de nacht uitgevoerd dan overdag, terwijl de eddy-covariantiemetingen dag en nacht doorgingen. Omdat methaanemissies in de nacht gemiddeld lager waren, leidde de ondervertegenwoordiging van kamermetingen in de nacht waarschijnlijk tot hogere seizoenstotalen van methaanemissies op basis van kamermetingen dan op basis van eddy-covariantie (Hendriks et al., 2010).

3.3 Productie en consumptie van methaan in de bodem en relatie met emissie

Sinds langere tijd is bekend dat methaan zowel geproduceerd als geconsumeerd wordt door micro-organismen in de bodem. Methanogene micro-organismen produceren methaan als de beschikbare hoeveelheid zuurstof beperkt is. Methanotrofe micro-organismen consumeren methaan onder zuurstofrijke omstandigheden (Lafleur, 2009; Reay et al., 2018). Productie van methaan in planten onder invloed van ultraviolette straling blijkt gering te zijn (Reay et al., 2018).

Eén van de oorzaken van gebrek aan zuurstof in de bodem is de aanwezigheid van water. Wanneer water vlak onder het maaiveld staat wordt methaan tot vlakbij het bodemoppervlak geproduceerd. Daarbij blijft de zone met zuurstofrijke omstandigheden juist beperkt in omvang, zodat methanotrofe micro-organismen weinig kans hebben voor afbraak van methaan. Volgens dit principe moet er een vrij sterke relatie bestaan tussen methaanemissies en grondwaterstand (Abdalla et al., 2016; Lafleur, 2009). Daarnaast speelt temperatuur een belangrijke rol, omdat die de snelheid beïnvloedt waarmee micro-organismen methaan kunnen produceren of consumeren (Abdalla et al., 2016; Lafleur, 2009; Reay et al., 2018).

Toch blijkt de relatie tussen de hiervoor genoemde grootheden en de methaanemissie vaak lang niet zo duidelijk als op grond van bovenstaande eerste analyse verwacht zou mogen worden. Vaak is alleen een duidelijke relatie met grondwaterstand detecteerbaar op tijdschalen van seizoenen tot jaren (Lafleur, 2009).

3.4 Transport van methaan vanuit de bodem naar de atmosfeer

Eén van de redenen van de complexe relatie tussen omgevingsfactoren en methaanemissies is het bestaan van verschillende transportmechanismen van methaan vanuit de bodem naar de atmosfeer:

- 1) Moleculaire diffusie is een relatief traag proces waarbij methaan vanuit anaerobe productiezones via aerobe consumptiezones de atmosfeer bereikt (Abdalla et al., 2016; Hendriks et al., 2010; Lafleur, 2009; Whalen, 2005).
- 2) Met name in natte gebieden voorzien sommige planten met hun aërenchym in een uitlaat naar de atmosfeer waardoor methaan rechtstreeks vanuit productiezones naar de atmosfeer getransporteerd wordt, zonder tussenkomst van de methanotrofe micro-organismen (Hendriks et al., 2010; Laanbroek, 2010; Lafleur, 2009; Whalen, 2005). Het aërenchym van waterplanten is bedoeld om de wortelzone van zuurstof te voorzien. Dit onderdrukt enerzijds de methaanvorming enigszins. Anderzijds laten de openingen in de planten ook het in de bodem geproduceerde methaan dóór voor direct transport naar de atmosfeer (Whalen, 2005; Laanbroek, 2010). De fauna kan deze route via begrazing sterk beïnvloeden (Dingemans et al., 2011). Voor natte Europese veengebieden op gematigde breedten is er een zeer sterk verband tussen de aanwezigheid van planten met aërenchym en gemeten methaanemissies (Couwenberg et al., 2011).
- 3) Vorming van methaanhoudende gasbellen en hun transport via water naar de atmosfeer (ebullitie) treedt op wanneer de anaërobe, waterige productiezone oververzadigd raakt met methaan (Lafleur, 2009; Whalen, 2005). De temporele en ruimtelijke variaties in dit proces zijn enorm. Wel lijkt het erop dat de rol van ebullitie toeneemt met een toenemende temperatuur (Hendriks et al., 2010).

3.5 Substraat en temperatuur

De beschikbaarheid en kwaliteit van het substraat in de bodem is een belangrijke oorzaak van variabiliteit en onzekerheid in methaanproductie en -emissie in anaërobe systemen (Whalen, 2005).

Die factoren kunnen afhangen van de diepte in de organische laag van de bodem (bijv. Van Den Pol van Dasselaar en Oenema, 1999) en van de aanwezige vegetatie (Abdalla et al., 2016; Laanbroek, 2010; Lafleur, 2009). De toevoeging van nutriënten zoals stikstof, fosfor en glucose speelt ook een belangrijke rol (bijv. Aerts en Toet, 1997). Planten hebben in de wortelzone een sterke invloed op de hoeveelheid en de samenstelling van het substraat en op de zuurstofhuishouding, waardoor methaanproductie zowel gestimuleerd als beperkt kan worden (Laanbroek, 2010). De invloed is sterk soortafhankelijk en het uiteindelijke effect op het niveau van het ecosysteem is dan ook sterk afhankelijk van de soortensamenstelling (Laanbroek, 2010) en mogelijk van de fauna (Dingemans et al., 2011). Toch lijkt de aanwezigheid van plantenwortels de methaanproductie over het algemeen te stimuleren (Laanbroek, 2010; Lafleur, 2009).

Het effect van de temperatuur is in de praktijk zeer variabel. Terwijl in het laboratorium gekweekte methanogene micro-organismen optimaal groeien en substraat afbreken bij een temperatuur tussen 30 en 40 °C worden onder veldcondities veel lagere optimumtemperaturen en een grote variatie daarin gerapporteerd. De gevoeligheid voor temperatuur (productietoename per graad temperatuurstijging) loopt nog veel verder uiteen. De relatief weinige gegevens over het effect van temperatuur op methaanoxidatie lijken te wijzen op een veel beperktere variatie van de temperatuurgevoeligheid van methanotrofe organismen (Whalen, 2005). Een belangrijke factor is de zuurgraad, die óók de temperatuurgevoeligheid kan beïnvloeden (Abdalla et al., 2016; Lafleur, 2009).

3.6 Gerestaureerde veensystemen

Onder gerestaureerde veensystemen verstaan we hier hoogvenen of laagvenen die eerst zijn drooggelegd via drainage of droog komen te staan bij droogte en daarna weer vernat worden. Lagere grondwaterstanden door drainage of droogte leiden tot een vergroting van de aërobe zone waarin methaan geconsumeerd wordt en daarmee tot een verlaging van de methaanuitstoot; het omgekeerde effect - meer uitstoot na vernatting - treedt vaak op na 1-3 jaar (Haddaway et al., 2014), maar mogelijk is dit effect kleiner dan het verdrogingseffect (Abdalla et al., 2016). Deze algemene conclusies lijken stevig, maar naar methaanemissies na vernatting van veen is relatief weinig onderzoek verricht (Haddaway et al., 2014). Daardoor is kwantificering in de praktijk lastig.

3.7 Nederland, België en Duitsland

3.7.1 Algemeen

In Nederland en België is vooral eind jaren negentig van de vorige eeuw aan aantal veldstudies uitgevoerd naar methaanemissies. Het betrof in die tijd uitsluitend kamermetingen en laboratoriummetingen. Vervolgens is volgens *Scopus* rond het jaar 2010 relatief veel gepubliceerd in de gerefereerde wetenschappelijke literatuur. Dit waren deels ook studies op ecosysteemschaal, op basis van eddy-covariantiemetingen (Hensen et al., 2010). Uit de tijd daarna vindt *Scopus* maar één artikel over emissie van methaan uit het Nederlandse landschap (Krause et al. 2015) en dit artikel gaat vooral in op productie en consumptie van methaan op basis van karakteristieken van methanogene en methanotrofe populaties van micro-organismen. Veel Duitse literatuur is van recentere datum, inclusief een overzicht van Duitse methaanemissies (Tiemeyer et al., 2016). *Scopus* vond op basis van de hier gebruikte zoektermen maar één mogelijk relevant artikel uit België (Boeckx en van Cleemput, 1987).

Op basis van de gevonden literatuur is een overzicht samengesteld van gerapporteerde methaanemissies die grotendeels of helemaal zijn gebaseerd op emissiemetingen in het veld (Tabel 1). Het overzicht betreft studies naar methaanemissies uit verschillende veensystemen en de daarbij horende landschapselementen. Modelstudies en laboratoriumstudies zijn niet in het overzicht opgenomen. Verder is geselecteerd op onderzoeken waarin jaartotalen of seizoenstotalen zijn gerapporteerd. Vaak gaat het om kamermetingen waarvan de resultaten via gevonden relaties met omgevingsvariabelen zijn geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd en volgens gesommeerd over langere

periodes. Deze werkwijze is vergelijkbaar met die van Couwenberg et al. (2011), die emissiegegevens van natte veensystemen op gematigde breedten in Europa hebben verzameld. Daarbij zijn ook relatief hoogkwalitatieve, ongepubliceerde data en gegevens uit de grijze literatuur betrokken. De resulterende database bestond -na kwaliteitscontrole- voor een groot deel uit Nederlandse en Duitse gegevens, die deels overlapt met de gegevens die op grond van de hier uitgevoerde zoekopdracht is samengesteld. Waar relevant worden de resultaten in dit memo met die van Couwenberg et al. (2011) vergeleken.¹

Van sommige locaties zijn meerdere publicaties beschikbaar op basis van dezelfde metingen. Om dubbele data te vermijden is daaruit één artikel gekozen zodat van elk systeem slechts één representatief jaartotaal is opgenomen. Vaak worden die jaartotalen door de auteurs zelf gegeven. Als in een publicatie geen representatief jaartotaal uit langjarige reeksen werd bepaald is uit de gegevens het rekenkundige gemiddelde van de emissie bepaald, samen met het geometrische gemiddelde van de bijbehorende onzekerheden (indien beschikbaar). Waar beschikbaar zijn ook gegevens over CO₂ uitstoot en - opname in de tabel opgenomen zodat een vergelijking op basis van Global Warming Potential (GWP) mogelijk wordt. De GWP van methaan is daarbij op 28 gesteld (IPCC, 2013). Deze is mogelijk nog hoger als rekening wordt gehouden met interacties tussen de mondiale koolstofcyclus en het klimaat (Reay et al., 2018).

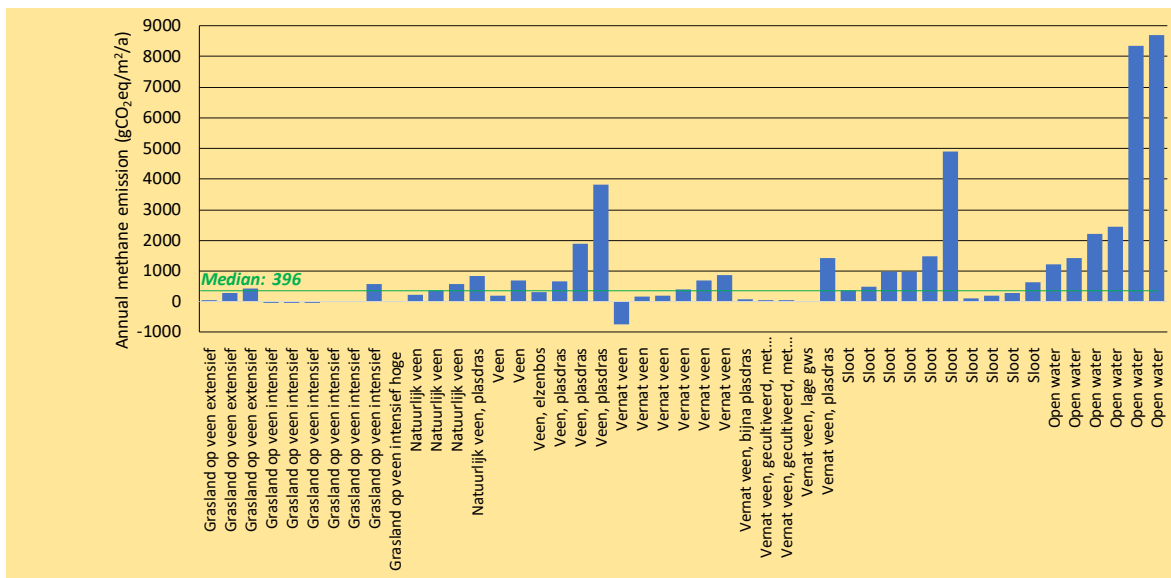
Naast de meetgegevens van methaanemissies geeft de tabel ook een karakterisering van de onderzochte systemen (bijv. "sloot", "grasland op veen", "plasdras"). Deze karakterisering is in veel gevallen een grove inschatting op basis van de algemene beschrijvingen in de publicaties. Net als Couwenberg et al. (2011) constateren wij dat voor ons doel relevante details van de meetlocaties vaak ontbreken, zodat een goede karaktering lastig is. Zo is het vaak niet duidelijk of het gaat om een plasdras systeem of een systeem met zeer hoge grondwaterstand. Verder is het landgebruik en het management van graslanden op veen meestal niet heel precies omschreven en is vaak onduidelijk in hoeverre een systeem als "natuurlijk" moet worden beschouwd. Bij een systeem dat vernat is ontbreekt vaak informatie over de mate van vernatting, zoals oude versus nieuwe grondwaterstand, tijdpad en seizoensfluctuaties. De in de tabel genoemde gegevens zijn dus niet geschikt voor gedetailleerde kwantificering van effecten op basis van de genoemde eigenschappen, maar ze lenen zich soms wel voor groepering (bijvoorbeeld open water versus land; natte systemen versus droge systemen).

3.7.2 Methaanemissies

De in de tabel opgenomen gegevens over methaanemissies zijn ook grafisch weergegeven in Figuur 1, in CO₂ equivalenten. De emissies zijn zo goed mogelijk gegroepeerd naar type (zie opmerkingen boven over onzekerheden in de omschrijving van de types). De mediane emissie bedraagt 14 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹, ofwel 396 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹. De variatie binnen en tussen systemen is echter enorm, vooral als open water in een adem met land samen wordt beschouwd. De mediane jaaremissie van methaan vanaf land is voor de in de tabel getoonde systemen 24 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (672 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹) voor natte tot zeer natte systemen en 6 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (168 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹) voor drogere systemen. Voor sloten en ander open water bedraagt de mediane emissie volgens deze gegevens 39 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (1537 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹).

De regionale studies bevestigen in grote lijnen het beeld dat geschetst is aan de hand van de meer internationaal georiënteerde literatuurreviews sinds 2009 (zie paragraaf 3.1-3.6) en met de meer gespecialiseerde reviews (Höper et al., 2008; Tiemeyer et al., 2016; zie ook Couwenberg et al., 2011). Dit betekent dat ook in Nederlandse en Duitse veensystemen de methaanemissie doorgaans zal afnemen met dalende grondwaterstand en weer toenemen met stijgende grondwaterstand. Uit eerdere overzichten blijkt dat methaanemissies grotendeels voorkomen worden wanneer het grondwater het maaiveld niet te dicht nadert (bijv. Langeveld et al., 1997; Höper et al., 2008; Couwenberg et al., 2011). Soms vindt zelfs enige methaandepositie plaats (Van den Dasselaar en Oenema, 1995; zie negatieve waarden in de Tabel 1 en Figuur 1).

¹ Deze studie was gericht op de ontwikkeling van indicatoren voor broeikasgasemissies op basis van vegetatiekarakteristieken, maar begint met een korte review van, onder andere, methaanemissies.



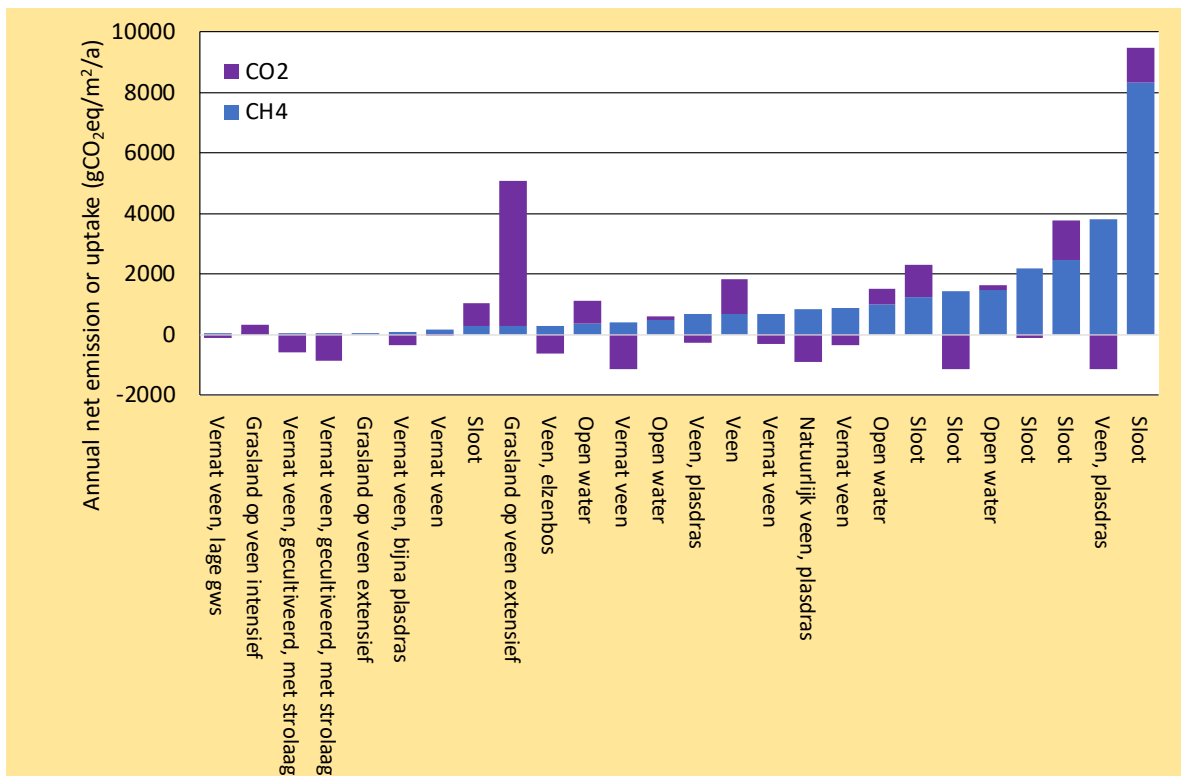
Figuur 1. In de wetenschappelijke literatuur gerapporteerde methaanemissies bij veensystemen. De groene lijn geeft de mediane waarde.

Een relatief dunne aerobe laag met een (jaar of seizoens) gemiddelde dikte in de orde van 10-20 cm lijkt voldoende te zijn om de methaanemissie aanzienlijk te reduceren of te voorkomen (Höper et al. 2008). Couwenberg et al. (2011) vonden op basis van methaanemissies van Europese veengebieden op gematigde breedten (waaronder Nederland, België en Duitsland) een sterke toename van de methaanemissies voor een grondwaterstand hoger dan 20 cm onder het maaiveld. Bij zulke gemiddelde waterstanden is het belangrijk dat het vermogen tot oxidatie zo goed mogelijk behouden blijft, ook bij fluctuaties in grondwaterstand. Zodra methaan kan ontsnappen via aërenchym wordt oxidatie voorkomen. Couwenberg et al. (2011) laten zien dat de toename van methaanemissies als functie van grondwaterstand tussen 20 en 0 cm onder het maaiveld vooral optreedt bij aanwezigheid van planten met aërenchym. Graslanden en bossige systemen zonder zulke planten vertonen een dergelijk verband nauwelijks of niet. Daarnaast rapporteren zij voor natte systemen een sterk lineair verband tussen methaanemissie per oppervlakte-eenheid en de bladbedekking door planten met aërenchym. Daarnaast speelt ook het substraat een rol bij het behoud van oxidatie. Krause et al. (2015) vonden dat de oxiderende eigenschappen van de methanotrofe gemeenschap van micro-organismen weinig verschilde tussen de aerobe zones van de door hen onderzochte gedraineerde of herstelde veengebieden met fluctuaties in de grondwaterstand. Zij concludeerden dat daarom ook in de wat nattere gebieden bij fluctuerende grondwaterstanden een belangrijke reductie van methaanemissies bereikt kan worden, maar waarschijnlijk mag het grondwater het maaiveld niet te vaak en te dicht naderen.

Een aantal locaties is geclassificeerd als "vernat veen". De mediane CH₄ emissie van deze groep bedraagt 6 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (174 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹) en sluit aan bij die van de van alle als droog geclassificeerde veensystemen. De meeste als vernat geclassificeerde systemen vallen op grond van de beschrijving in de categorie met relatief droge systemen. Dat zou een beperkte vernatting betekenen. Mogelijk heeft dat te maken met de voorgeschiedenis van de bemeten systemen, of specifieke kenmerken zoals cultivering met een strolaag. Een als plasdras geclassificeerd vernat systeem springt eruit binnen deze groep met een CH₄ emissie van 51 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (1414 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹). Om eerder genoemde redenen is de classificatie van de locaties echter zeer onzeker.

3.7.3 Mogelijke compensatie van CO₂ vastlegging

De resultaten voor de in Tabel 1 opgenomen systemen waarbij tijdens CH₄ emissiemetingen ook een schatting van de CO₂ uitwisseling is gemaakt zijn grafisch weergegeven in Figuur 2. Daarin worden CO₂ en CH₄ uitwisseling rechtstreeks vergeleken en opgeteld tot jaartotalen in gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹. Emissies staan boven de nullijn, opnames daar beneden. De figuur is gesorteerd naar grootte van de CH₄ emissie. Te zien is dat niet alleen de variatie groot is (zoals verwacht op basis van de eerder gevonden CH₄ missies), maar ook dat lang niet altijd sprake is van CO₂ vastlegging, met name bij open water systemen. Voor de hier getoonde sites is de netto mediane emissie 467 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹.



Figuur 2. Uitwisseling van CO₂ en CH₄ volgens de metingen in Tabel 1. Balkdelen onder de nullijn geven opname aan, daarboven uitstoot. De data zijn gesorteerd naar CH₄ emissie (oplopende naar rechts).

Sloten en ander open-water systemen dragen sterk bij aan het feit dat er binnen de hier beschouwde studies sprake is van netto uitstoot in plaats van opname.

De mediane CH₄ uitstoot voor alle hier genoemde landsystemen (16) waarvoor gedurende dezelfde meetperiode ook een schatting van de CO₂ uitwisseling is gemaakt bedraagt 288 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹. Voor deze set van locaties bedraagt de mediane CO₂ opname van 332 gCO₂eq m⁻²jaar⁻¹. Bij de bepaling van deze mediane waarden zijn de gegevens als onafhankelijk behandeld, dus als het ware ontkoppeld. Op basis van gekoppelde metingen en in termen van CO₂ equivalenten was in 7 van de 16 rapportages sprake van netto opname, in 9 van de 16 van uitstoot. De resultaten van de gekoppelde CH₄ en CO₂ metingen leiden tot een mediane netto emissie van 102 gCO₂eq m⁻² jaar⁻¹.

Deze resultaten geven aan dat er bij veensystemen een gerede kans bestaat op het zogenoemde methaanlek. Natte systemen stoten op basis van de mediane waarde bijna tweemaal zoveel methaan uit in termen van GWP dan aan CO₂ wordt opgenomen. Iets drogere systemen lijken ongeveer in evenwicht. De verschillen zijn echter bijzonder groot. Zo blijken sommige natte systemen ook nog CO₂ uit te stoten, waarschijnlijk omdat daar de veenoxidatie nog overheerst (Van den Bosch, 2003). Ook bevestigen de individuele studies op zichzelf al de grote onzekerheid via een grote range in de getallen en de door de auteurs bijgeleverde onzekerheden.

Bij de vernatte systemen in de groep (8) en in termen van GWP is er sprake van een mediane netto opname van broeikasgas (CH₄ en CO₂) van 196 gCO₂eq m⁻² jaar⁻¹. Dit bevestigt dat vernatting kan werken als mitigatiemaatregel zolang de vernatting niet te ver wordt doorgevoerd. De systemen in deze groep werden immers uiteindelijk niet als "nat" geïdentificeerd. Zoals eerder opgemerkt is de classificatie op grond van de beschrijving in de literatuur echter hoogst onzeker.

Een relatief groot aantal van de Nederlandse studies betreft grasland op veen, in het Westelijke Veengebied, met een agrarisch gebruik of een voorheen agrarisch gebruik. Dit roept de vraag op in hoeverre deze data representatief zijn voor natuurlijke landschappen. Zo laat Lafleur (2009) zien dat de resultaten van de studie van Hendriks et al. (2007) in de Horstermeerpolder door de voorgeschiedenis van de locatie mogelijk afwijken van het meer gangbare internationale beeld. Waarschijnlijk was het perceel ten tijde van de metingen, 10 jaar na het einde van het agrarisch

gebruik, nog niet representatief voor meer natuurlijk grasland op veen. In Nederland komt een dergelijke voorgeschiedenis vaak voor.

Open water verdient speciale aandacht, zeker als dat gekoppeld is aan veengebieden met voorheen agrarisch gebruik. Sloten blijken vaak zowel CO₂ als CH₄ uit te stoten, zeker bij nutriëntentoevoer vanuit aangelegen percelen naar de sloten. De emissies per oppervlakte-eenheid zijn vaak groot. Het is al met al belangrijk om rekening te houden met de inrichting van een vernet gebied zodra sloten gebruikt worden (Günther et al., 2017). De mediane CH₄ emissie uit de hier opgenomen watersystemen bedroeg 47 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹, ofwel 1326 gCO₂ equivalenten. Voor sloten was de mediane emissie 65 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (1816 gCO₂ equivalenten) en voor ander open water 26 gCH₄ m⁻²jaar⁻¹ (736 gCO₂ equivalenten). Bijbehorende mediane CO₂ emissies zijn 647, 914 en 351 gCO₂ m⁻²jaar⁻¹. Op basis van GWP en per oppervlakte-eenheid overstijgt de emissie van methaan dus die van CO₂ volgens de hier beschouwde studies.

Desondanks wordt de bijdrage van met name sloten vaak relatief klein geacht, met het argument dat zij een relatief klein aandeel van een landschap uitmaken (bijvoorbeeld Couwenberg et al., 2011). Zowel Saarnio et al. (2009) als Schrier-Uijl et al. (2009) wijzen echter op een mogelijke onderschatting van de bijdragen van sloten. Zij concluderen dat water mogelijk niet alleen een grote emissie kent, maar dat met name het slootoppervlak slecht bekend is en dus aandacht verdient. Verder zijn ook voor emissies uit open water zowel de verschillen in emissies tussen locaties als de onzekerheid per locatie groot.

De hier opgenomen studies laten geen systematische analyse van de rol van vegetatie toe. De resultaten lijken die van de internationale reviews in ieder geval niet tegen te spreken. Een duidelijk en specifiek resultaat komt uit de studie van Huth et al. (2018). Deze auteurs laten zien dat de aanplant van elzen in een vernet veengebied in Duitsland tot een sterke verlaging van de methaanemissie kan leiden. Verder wijzen Couwenberg et al. (2011) op een sterke relatie tussen CH₄ emissie bij systemen met hoge grondwaterstanden en het aandeel vegetatie met aërenchym.

Tabel 1. Overzicht van in de literatuur op basis van metingen gerapporteerde methaan- en CO₂ emissies. Zie hoofdstekst voor beschrijving van de methodiek.

Referentie	Meetjaar	Land	Meetmethode	Site	Typering	CH ₄ (g.m ⁻² .jaar ⁻¹)	SE	GWIP(CH4)	CO ₂ (g.m ⁻² .jaar ⁻¹)	SE
Beetz et al. (2013)	2008	GE	Fluxkamers	Extensief grasland op gedegreerde veen	Grasland op veen extensief	2	1	45	0	162
Schrier-Uijl et al. (2010)	2006-2008	NL	Fluxkamers	Stein, intensively managed grassland on peat	Grasland op veen extensief	16	6	440		
Van den Bosch (2003)	1999	NL	Fluxkamers	Guisveld, grasland op veen, wetland-nature, gwl ~10cm	Grasland op veen extensief	10		270	4800	
Beetz et al. (2013)	2008	GE	Fluxkamers	Intensief grasland op gedegreerde veen	Grasland op veen intensief	0	0	9	303	200
Langeveld et al. (1997)	1994	NL	Fluxkamers	Veenweidegebied, Zegveld, gemaaid, gwt -0.3m	Grasland op veen intensief	0	0	-1		
Langeveld et al. (1997)	1994	NL	Fluxkamers	Veenweidegebied, Zegveld, begraasd, gwt -0.5m	Grasland op veen intensief	0	0	-1		
Langeveld et al. (1997)	1994	NL	Fluxkamers	Veenweidegebied, Zegveld, gemaaid, gwt -0.5m	Grasland op veen intensief	0	0	-1		
Schrier-Uijl et al. (2010)	2006-2008	NL	Fluxkamers	Ookoop, intensively managed grassland on peat	Grasland op veen intensief	20	6	568		
Van Dassel et al. (1995)	1994	NL	Fluxkamers	Grasland op veen, intensief, gwl <35 cm	Grasland op veen intensief	0	0	1		
Langeveld et al. (1997)	1994	NL	Fluxkamers	Veenweidegebied, Zegveld, begraasd, gwt -0.3m	Grasland op veen intensief hoge	0	0	0		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999a,b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl	Natuurlijk veen	8	9	224		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999a,b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl	Natuurlijk veen	13	11	364		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999a,b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl	Natuurlijk veen	20	12	560		
Van den Berg et al. (2016)	2013-2014	GE	Eddy Covariance	Federseemoor, Hoogveen, met delen laagveen en moeras	Natuurlijk veen, plasdras	30		840	-894	
Broeckx (1997)	-	BE	Fluxkamers	Veengebied	Veen	7		200		
Huth et al. (2018)	2010-2012	GE	Fluxkamers	Vochtige weide op veen	Veen	24	4	679	1151	106
Huth et al. (2018)	2010-2012	GE	Fluxkamers	Nat elzenbos	Veen, elzenbos	11	1	306	-642	169
Hendriks et al. (2007)	2005	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, plasdras	Veen, plasdras	137	56	3827	-1140	
Hendriks et al. (2010)	2006-2007	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, plasdras	Veen, plasdras	67	40	1889		
Huth et al. (2018)	2010-2012	GE	Fluxkamers	Natte weide op veen	Veen, plasdras	24	1	665	-253	99
Beetz et al. (2013)	2008	GE	Fluxkamers	Vrijwel natuurlijk weer vernaat veen	Vernaat veen	6	1	174	-14	75
Beyer en Höper (2015)	2010/2011	GE	Fluxkamers	Turfwinningengebied, vernaat in 1983	Vernaat veen	24	2	679	-315	424
Beyer en Höper (2015)	2010/2011	GE	Fluxkamers	Turfwinningengebied, vernaat in 1983	Vernaat veen	31	1	870	-348	83
Hendriks et al. (2007)	2005	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, droog	Vernaat veen	14	37	396	-1140	
Hendriks et al. (2010)	2006-2007	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, droog	Vernaat veen	-26	26	-736		
Osterloh et al. (2018)	2010-2014	GE	Fluxkamers	"Transition bog"	Vernaat veen	7	6	190		74
Beyer en Höper (2015)	2010/2011	GE	Fluxkamers	Agrarisch tot 2000, daarna turfwinningengebied, vernaat in 2004	Vernaat veen, bijna plasdras	3	1	90	-362	74
Günther et al. (2017)	2011-2013	GE	Fluxkamers	Sphagnum palustre farm	Vernaat veen, gecultiveerd, met strolaag	1	0.4	34	-588	132
Günther et al. (2017)	2011-2013	GE	Fluxkamers	Sphagnum papillosum farm	Vernaat veen, gecultiveerd, met strolaag	2	1	44	-881	140
Beyer en Höper (2015)	2010/2011	GE	Fluxkamers	Turfwinningengebied, vernaat in 1983	Vernaat veen, lage gws	0	0	3	-122	156
Osterloh et al. (2018)	2010-2014	GE	Fluxkamers	"Transition bog"	Vernaat veen, plasdras	51	41	1414		
Vermaat et al. (2011)	2008-2009	NL	Drijvende kamers	Open water	Open water	18	18	491	131	
Dingemans (2011)	2009	NL	Drijvende kamers	Begraasde rietkraag waterleidingplas	Open water	175	35	4906		
Schrier-Uijl et al. (2011)	2009	NL	Drijvende kamers	Meren	Open water	35	9	981		61
Franz et al. (2016)	2013-2014	GE	Eddy Covariance	Shallow lake on former fen grassland	Open water	53		1484	158	
Franz et al. (2016)	2013-2014	GE	Eddy Covariance	Shallow lake on former fen grassland	Open water	13		364	750	
Vermaat et al. (2011)	2008-2009	NL	Drijvende kamers	Sloten rond grasland voor intensieve veehouderij	Sloot	79	53	2208	-114	
Vermaat et al. (2011)	2008-2009	NL	Drijvende kamers	Sloten rond "rough pastures"	Sloot	88	70	2453	1332	
Vermaat et al. (2011)	2008-2009	NL	Drijvende kamers	Rietkragen, zeggekragen	Sloot	44	9	1226	1069	
Schrier-Uijl et al. (2011)	2009	NL	Drijvende kamers	Drainage sloten	Sloot	298	79	8340	1130	70
Günther et al. (2017)	2011-2013	GE	Fluxkamers	Irrigatiesloten Sphagnum farm	Sloot	10	6	269	759	487
Hendriks et al. (2007)	2005	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, sloot	Sloot	51	21	1426	-1140	
Hendriks et al. (2010)	2006-2007	NL	EC en fluxkamers	Herstellend vernaat veen, sloot en slootkant	Sloot	311	15	8707		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl, sloot	Sloot	23		630		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl, sloot	Sloot	7		204		
Van den Pol-Van Dassel et al. (1999b)	1994-1996	NL	Fluxkamers	Nat.Grasland op veen, hoog gwl, sloot	Sloot	4		118		

4 Discussie en conclusies

Vernatting van veengebieden met een voorheen lage grondwaterstand kan helpen om CO₂ uitstoot van veengebieden te reduceren dan wel vastlegging en veenherstel te bevorderen. Uit het oogpunt van klimaatmitigatie is dit gunstig, maar in dit opzicht is ook voorzichtigheid geboden.

In de eerste plaats is ook in Nederland een zogenoemd methaanlek een reële mogelijkheid. In de hier bestudeerde literatuur op basis van gelijktijdige metingen aan opname van CO₂ en uitstoot van CH₄ bij veen blijkt dat CO₂ opname geheel teniet gedaan kan worden door extra CH₄ uitstoot.

In de tweede plaats speelt voorgeschiedenis van een veengebied een belangrijke rol. In sommige veengebieden kan netto uitstoot van CO₂ nog lange tijd doorgaan. In de hier bestudeerde literatuur was weliswaar meestal vaker sprake van CO₂ vastlegging in natte gebieden, maar bij een aantal systemen kwam ook netto CO₂ emissie voor, afhankelijk van het historisch gebruik.

In de derde plaats kunnen sloten een forse, mogelijk onderschatte bijdrage leveren aan de broeikasgasemissies. Dit is van belang wanneer het waterpeil gereguleerd wordt met behulp van sloten. De emissies uit sloten en de variatie daarin zijn groot en hun oppervlak wordt vaak onderschat.

In de vierde plaats is de invloed van klimaatverandering een onzekere factor. Waarschijnlijk gaat temperatuurstijging gepaard met intensivering van een veelheid aan processen die zowel CO₂ als CH₄ uitstoot beïnvloeden, maar de onzekerheden in de temperatuurrepons en het netto resultaat in het veld is groot. Daar doorheen spelen een afwisseling van verdroging en weer plotselinge vernatting bij piekbuien, afhankelijk van het seizoen en het verloop van de klimaatverandering.

Methaanuitstoot van natte veengebieden blijkt vooral bevorderd te worden door zeer hoge waterstanden. Het valt daarom aan te bevelen de waterstand niet verder te verhogen dan tot op 10 cm onder het maaiveld, liever nog iets lager. De hier gerapporteerde metingen aan vernatte, maar als droog geclassificeerde veenlocaties bevestigen dit beeld, met een relatief lage CH₄ uitstoot en een netto broeikasgasopname in termen van GWP. De onzekerheid in de relatie tussen methaanuitstoot en grondwaterstand is echter groot en hangt waarschijnlijk af van de omstandigheden, waaronder klimatologische. De verschillen tussen de systemen zijn dermate groot dat specifieke schattingen per gebied voorlopig wenselijk zijn, bij voorkeur op basis van metingen in combinatie met modellering. Verder is de classificatie van de locaties onzeker. Mogelijk is voor sommige systemen nog een betere classificatie te achterhalen, die verdere kwantificering op basis van onderzoek uit het verleden mogelijk maakt.

Beperkingen in meetmethoden hinderen vaak het benodigde systematisch onderzoek over langere periodes, waarin seizoensvariaties en langzamere trends, bijvoorbeeld door klimaatinvloeden en verandering in vegetatie, in beeld kan worden gebracht. In Nederland is bovendien relatief veel onderzoek uitgevoerd in voorheen agrarische gebieden, zoals het westelijk Veenweidegebied. In de huidige dataset verhindert dit kwantificering van emissieverschillen tussen vernat veen met een voorheen agrarische functie en meer natuurlijke systemen. Mede daarom zal WUR in het kader van de Klimaatvelop in één tot drie natuurgebieden in Noord-Nederland onderzoek doen, via rechtstreekse metingen aan CH₄ - en CO₂ uitwisseling, samen met metingen aan hydrologische en meteorologische variabelen die van belang kunnen zijn.

Methaanemissie worden sterk bevorderd door planten met aërenchym. Voorkomen van de groei van zulke planten is vanuit ecologisch oogpunt wellicht niet wenselijk, maar mogelijk is er een beheerstrategie denkbaar waarbij planten met aërenchym op minder kritische plaatsen "toegestaan" worden. Hiernaar is verder onderzoek nodig. Verder zijn er aanwijzingen dat de aanplant van elzen CH₄ emissie van natte veengebieden kan reduceren.

In gebieden waarin sloten een rol spelen bij de regulering van het waterpeil verdient mogelijke broeikasgasuitstoot door sloten speciale aandacht. Ten eerste is de uitstoot van CH₄ en soms ook van CO₂ per oppervlakte-eenheid relatief groot. Ten tweede wordt het slootoppervlak vaak onderschat. Bij de inrichting dient het slootoppervlak nauwkeurig bepaald te worden en hun broeikasgasuitstoot gemonitord om een eerlijke broeikasgasbalans te kunnen vaststellen. Ontwikkeling van een strategie om dit kosteneffectief te doen en van een beheerstrategie om broeikasgasemissies uit sloten zoveel mogelijk te reduceren is wenselijk. Uitvoeren van metingen en modellering in specifieke situaties kan hierbij helpen.

Bijlage 1 Zoekopdrachten - resultaten

Scopus - lijst van referenties

Bij het literatuuronderzoek naar het "methaanlek" zijn de volgende drie zoekopdrachten in literatuurzoekprogramma Scopus toegepast:

1.

TITLE-ABS-KEY (methane AND (emission OR flux) AND (peat OR bog OR fen OR wetland)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MULT")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Review")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2009))

2.

TITLE-ABS-KEY (methane AND (emission OR flux) AND (peat OR bog OR fen OR wetland) AND (Netherlands OR Belgium)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

3.

TITLE-ABS-KEY (methane AND (emission OR flux) AND (peat OR bog OR fen OR wetland) AND (Germany)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

Resultaten:

Zoekopdracht 1 levert Engelstalige wetenschappelijke reviews (aangegeven als trefwoord) in de aard- en levenswetenschappen met een belangrijke focus op methaan (eveneens vereist trefwoord). Verder is de opdracht beperkt tot relatief recente reviews, vanaf 2009 (maximaal 10 jaar oud). Resultaat na screening van abstracts en titels:

Abdalla, M., et al. (2016). "Emissions of methane from northern peatlands: a review of management impacts and implications for future management options." *Ecology and Evolution* **6**(19): 7080-7102.

Haddaway, N. R., et al. (2014). "Evaluating effects of land management on greenhouse gas fluxes and carbon balances in boreo-temperate lowland peatland systems." *Environmental Evidence* **3**(1).

Laanbroek, H. J. (2010). "Methane emission from natural wetlands: Interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review." *Annals of Botany* **105**(1): 141-153.

Lafleur, P. M. (2009). "Connecting atmosphere and wetland: Trace gas exchange." *Geography Compass* **3**(2): 560-585.

Nicolini, G., et al. (2013). "A literature overview of micrometeorological CH₄ and N₂O flux measurements in terrestrial ecosystems." *Atmospheric Environment* **81**: 311-319.

Reay, D. S., et al. (2018). "Methane and global environmental change." *Annual Review of Environment and Resources* **43**: 165-192.

Zoekopdracht 2 levert Engelstalige wetenschappelijke literatuur over onderzoek naar methaanemissies uit natte gebieden in Nederland en België, ook ouder dan 10 jaar. Gebruik van methaan als trefwoord in de zoekopdracht levert publicaties op die hier expliciet en in grote mate aandacht aan besteden. Na screening van titels en abstract blijven over:

Aerts, R. and S. Toet (1997). "Nutritional controls on carbon dioxide and methane emission from Carex-dominated peat soils." *Soil Biology and Biochemistry* **29**(11-12): 1683-1690.

Best, E. P. H. and F. H. H. Jacobs (1997). "The influence of raised water table levels on carbon dioxide and methane production in ditch-dissected peat grasslands in the Netherlands." *Ecological Engineering* **8**(2): 129-144.

Boeckx, P. and O. Van Cleemput (1997). "Methane emission from a freshwater wetland in Belgium." *Soil Science Society of America Journal* **61**(4): 1250-1256.

Dingemans, B. J. J., et al. (2011). "Aquatic herbivores facilitate the emission of methane from wetlands." Ecology **92**(5): 1166-1173.

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.

Krause, S., et al. (2015). "Compositional and functional stability of aerobic methane consuming communities in drained and rewetted peat meadows." FEMS Microbiology Ecology **91**(11).

Kroon, P. S., et al. (2007). "Suitability of quantum cascade laser spectroscopy for CH₄ and N₂O eddy covariance flux measurements." Biogeosciences **4**(5): 715-728.

Kroon, P. S., et al. (2010). "Annual balances of CH₄ and N₂O from a managed fen meadow using eddy covariance flux measurements." European Journal of Soil Science **61**(5): 773-784.

Langeveld, C. A., et al. (1997). "Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from pasture on drained peat soils in the Netherlands." European Journal of Agronomy **7**(1-3): 35-42.

Petrescu, A. M. R., et al. (2009). "Assessing CH₄ and CO₂ emissions from wetlands in the Drenthe Province, the Netherlands: A modelling approach." Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences **88**(2): 101-116.

Schrier-Uijl, A. P., et al. (2010a). "Comparison of chamber and eddy covariance-based CO₂ and CH₄ emission estimates in a heterogeneous grass ecosystem on peat." Agricultural and Forest Meteorology **150**(6): 825-831.

Schrier-Uijl, A. P., et al. (2010b). "Methane emissions in two drained peat agro-ecosystems with high and low agricultural intensity." Plant and Soil **329**(1): 509-520.

Schrier-Uijl, A. P., et al. (2011). "Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands." Biogeochemistry **102**(1): 265-279.

Smolders, A. J. P., et al. (2002). "Peat bog restoration by floating raft formation: The effects of groundwater and peat quality." Journal of Applied Ecology **39**(3): 391-401.

Van Dasselaar, A. and O. Oenema (1995). "Effects of grassland management on the emission of methane from grassland on peat soils." Studies in Environmental Science **65**(PART A): 577-580.

van den Bos, R. (2003). "Restoration of former wetlands in the Netherlands; effect on the balance between CO₂ sink and CH₄ source." Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences **82**(4): 325-332.

Van Den Pol-Van Dasselaar, A., et al. (1999). "Determinants of spatial variability of methane emissions from wet grasslands on peat soil." Biogeochemistry **44**(2): 221-237.

Van Den Pol-Van Dasselaar, A., et al. (1999). "Methane emissions from wet grasslands on peat soil in a nature preserve." Biogeochemistry **44**(2): 205-220.

van Huissteden, J., et al. (2006). "Modelling the effect of water-table management on CO₂ and CH₄ fluxes from peat soils." Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences **85**(1): 3-18.

Vermaat, J. E., et al. (2011). "Greenhouse gas fluxes from dutch peatland water bodies: Importance of the surrounding landscape." Wetlands **31**(3): 493-498.

Zoekopdracht 3 levert Engelstalige wetenschappelijke literatuur over onderzoek naar methaanemissies uit natte gebieden in Duitsland, ook ouder dan 10 jaar. Gebruik van methaan als trefwoord in de zoekopdracht levert publicaties op die hier expliciet en in grote mate aandacht aan besteden. Na screening van titels en abstract blijven over:

Augustin, J., et al. (1998). "Factors influencing nitrous oxide and methane emissions from minerotrophic fens in northeast Germany." Biology and Fertility of Soils **28**(1): 1-4.

Beetz, S., et al. (2013). "Effects of land use intensity on the full greenhouse gas balance in an Atlantic peat bog." Biogeosciences **10**(2): 1067-1082.

Beyer, C. and H. Höper (2015). "Greenhouse gas exchange of rewetted bog peat extraction sites and a Sphagnum cultivation site in northwest Germany." Biogeosciences **12**(7): 2101-2117.

Franz, D., et al. (2016). "High net CO₂ and CH₄ release at a eutrophic shallow lake on a formerly drained fen." Biogeosciences **13**(10): 3051-3070.

Günther, A., et al. (2017). "Greenhouse gas balance of an establishing sphagnum culture on a former bog grassland in Germany." Mires and Peat **20**.

Huth, V., et al. (2018). "The climate warming effect of a fen peat meadow with fluctuating water table is reduced by young alder trees." Mires and Peat **21**.

Kormann, R., et al. (2001). "Eddy flux measurements of methane over the fen 'Murnauer Moos', 11°11'E, 47°39'N, using a fast tunable diode laser spectrometer." *Atmospheric Environment* **35**(14): 2533-2544.

Osterloh, K., et al. (2018). "Changes of methane and nitrous oxide emissions in a transition bog in central Germany (German National Park Harz Mountains) after rewetting." *Wetlands Ecology and Management* **26**(1): 87-102.

Tiemeyer, B., et al. (2016). "High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils." *Global Change Biology* **22**(12): 4134-4149.

Van Den Berg, M., et al. (2016). "The role of Phragmites in the CH₄ and CO₂ fluxes in a minerotrophic peatland in southwest Germany." *Biogeosciences* **13**(21): 6107-6119.

Wen, X., et al. (2018). "Predominance of methanogens over methanotrophs in rewetted fens characterized by high methane emissions." *Biogeosciences* **15**(21): 6519-6536.

Witte, S. and L. Giani (2016). "Greenhouse Gas Emission and Balance of Marshes at the Southern North Sea Coast." *Wetlands* **36**(1): 121-132.

Overige gebruikte Literatuur

Couwenberg, J., A. Thiele, F. Tanneberger, J. Augustin, S. Bärtsch, D. Dubovik, N. Liashchinskaya, D. Michaelis, M. Minke, A. Skuratovich, and H. Joosten (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674, 67-89.

Hensen, A., P.S. Kroon, A.J. Dolman, E.M. Veenendaal, J.H. Duyzer, J.A. Elbers, C.L. van Beek and J. Mosquera, (2010). Meten van broeikasgassen in het landschap. *Landschap*, 27, 57-65.

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

Höper, H., and Coauthors, 2008: Restoration of peatlands and greenhouse gas balances. *Peatlands and Climate Change*, M. Strack, Ed., International Peat Society, 182-210.

Krause, S., P. A. Niklaus, S. B. Morcillo, M. M. Franke, C. Lüke, A. Reim, and P. L. E. Bodelier, 2015: Compositional and functional stability of aerobic methane consuming communities in drained and rewetted peat meadows. *FEMS Microbiology Ecology*, 91.

Saarnio, S., W. Winiwarter, and J. Leitao, 2009: Methane release from wetlands and watercourses in Europe. *Atm. Env.*, 43, 1421-1429

Van den Bos, R., and O. van de Plassche, 2003: Variables influencing present-day emission of methane and carbon dioxide from coastal peatlands in the western Netherlands. Van den Bos RM: Human influence on carbon fluxes in coastal peatlands; process analysis, quantification and prediction. Thesis, Vrije Universiteit (Amsterdam), 35-66.