

Chapter 8

Nederlandse samenvatting

8.1 De onderzoeksvragen en hypothesen

Dit proefschrift behandelt de methaanemissies in noordelijke moerassen tijdens de laatste ijstijd. Deze emissies vonden plaats onder snelle opwarming van het klimaat, vergelijkbaar met de huidige omstandigheden. Doordat moerassen een belangrijke bron van atmosferisch methaan vormen, spelen moerassen nu, evenals in het verleden, een sleutelrol in de mondiale koolstofkringloop. Boreale en arctische moerassen hebben daarbij de grootste invloed vanwege de omvang van deze gebieden en omdat zij bovenop de permafrost liggen. Om het inzicht in de huidige opwarmingsprocessen en de bijbehorende klimaatveranderingen te kunnen begrijpen, is het daarom zeer belangrijk om informatie over de bijdrage van de noordelijke moerassen aan de atmosferische samenstelling in het verleden te verzamelen. Wetenschappers en beleidsmakers zijn bezorgd over het effect van een temperatuurstijging op deze noordelijke milieus. Bij het ontstaan van dooimeren kan mogelijk koolstof vrijkomen, dat voornamelijk in de bodem werd vastgehouden door de aanwezigheid van permafrost. Desalniettemin is er discussie over het belang van dooimeren in deze regionen - de meren zijn mogelijk gedurende het Holoceen veranderd van bronnen naar opslagen van koolstof [?].

De initiële onderzoeksvragen waren gericht op het vinden van een plausibele verklaring voor de enorme hoeveelheid methaan die is vastgelegd in de EPICA ijskerngegevens. Zulke grote hoeveelheden van gassen die versneld in de atmosfeer terecht zijn gekomen, ondersteunen de mogelijkheid dat er meer dan één enkele bron was. De hypothesen waren:

1. De “moeras methaan hypothese”, waarbij de emissies worden toegeschreven aan de noordelijke moerassen;
2. De “tropische moerassen hypothese”, waarbij ervan uitgegaan wordt dat de grootste bron van methaan op het zuidelijk halfrond ligt;
3. De “clathrate gun hypothese”, waarbij voorgesteld wordt dat methaanhydraten of -clathraten vanuit de zeebodem vrijkomen;
4. De “deglaciatie hypothese”, waarbij verondersteld wordt dat geologische bronnen de methaanfluxen hebben veroorzaakt.

Deze initiële mogelijkheden zijn onderzocht en gesorteerd op basis van plausibiliteit. Twee van de vier alternatieven zijn afgefallen doordat de grootte van het betreffende effect niet overeenkwam met de ijskernmetingen van het LGM. De deglaciatie hypothese, die uitgaat van geologische bronnen, wordt gezien als een geringe bijdrage aan de emissies. De clathrate gun hypothese is eerder een mogelijk gevolg van een opgewarmde aarde dan de belangrijkste oorzaak. Van de twee overgebleven alternatieven, de noordelijke en tropische moerassen, hebben wij ons gericht op de noordelijke. Moerassen worden inderdaad onderkend als belangrijkste factor, hoewel hun effect door verschillende snelheden wordt bepaald: De tropische moerassen laten de snelste emissieverhoging zien, maar door de geringe omvang van deze moerasgebieden is het totale effect beperkt. In de basis hebben de tropische moerassen een hoger emissiepercentage, maar over een beperkt volume. Daartegenover is door het uitgestrekte voorkomingsgebied van de noordelijke moerassen, hun bijdrage aan het totale volume van emissie behoorlijk, ook al neemt de uitstoot minder snel toe.

Juist omdat de noordelijke moerassen potentieel het grootste en het meest verstorende effect op het mondiale klimaat zouden kunnen hebben, mocht de opwarming van de aarde een exponentiele spiraal van methaanemissies in gang zetten, is dit onderzoek op die ecosystemen gericht. Het onderzoek was er op gericht het begrip van het functioneren van het ecosysteem te vergroten, door zowel een modelmatige benadering als door het uitvoeren van veldonderzoeken.

8.2 Belangrijkste resultaten van dit onderzoek

- De originaliteit van dit onderzoek ligt in de innovatieve benadering. Deze bestaat uit het gebruik van multidisciplinaire gegevensbronnen, ten eerste om het begrip van het functioneren van moerassen te vergroten, en ten tweede om deze te integreren in een modelparametrisatie.
- Het belang van dit onderzoek ligt in de bijdrage aan het evalueren van terugkoppelmechanismen gerelateerd aan de methaanemissie van noordelijke moerassen, in het kader van huidige en toekomstige klimaatverandering. Veel aandacht is uitgegaan naar het begrijpen van het ontstaan en de evolutie van thermokarst-meren in de noordelijke toendra gebieden.
- De gevoeligheidsanalyse, uitgevoerd met het PEATLAND-VU model, leidt tot een verbeterde structuur die het mogelijk maakt de rol van enkele sleutelparameters nader te beoordelen. Deze verbeteringen resulteren in een betrouwbaardere modeluitkomst.
- Het begrip van sleutelfactoren is vergroot door te concentreren op de vegetatiebedekking in het moeras-ecosysteem. Hierbij is met name gekeken naar de verschillende effecten van de voor methaanfluxen dominante soorten: *Carex* spp. heeft een positief en *Sphagnum* mossen een negatief effect.
- De rol van de bacteriële gemeenschappen gerelateerd aan deze *Sphagnum* mossen wordt belicht als zijnde een relevante factor, belangrijk genoeg om als parameter op te nemen in elk model dat methaanfluxen poogt te voorspellen met een

nauwkeurigheid die voldoende is om een vergelijking met gemeten velddata mogelijk te maken.

- Het dooimeer-model is het eerste tweedimensionale model dat geschikt blijkt om het ontstaan en de ontwikkeling van dergelijke meren in permafrostgebieden te reproduceren.
- Drainage speelt een relevante rol in het beperken van de uitbreiding van dooimeren en de daarmee gepaard gaande bijdrage aan methaanemissies in toendragebieden.
- Er is een lineair verband tussen klimaatfactoren en milieufactoren, zoals bij neerslag dat het ontstaan en de drainage van meren reguleert, of de gemiddelde luchttemperatuur die het hernieuwd aangroeien en bevriezen van de dooimeren beïnvloedt.
- Er zijn twee hoofdredenen waarom het bestuderen van de evolutie van het paleo-dooimeer bijzonder belangrijk is:
 1. Het toont een onaangetaste, complete en unieke opeenvolging van vijf dooimeren bovenop elkaar, en geeft daarmee directe informatie over de gehele levenscyclus;
 2. Het geeft inzicht in de paleo-klimaatssystemen en de belangrijkste parameters, en laat zien hoe weinig er veranderd is metertijd.

8.3 Huidige status van modellering methaanfluxen

De huidige klimaatopwarming is naar verwachting het sterkst in boreale en arctische gebieden [250] en de eerste hypothese identificeert deze gebieden als een belangrijke bron van methaan. Enkele recente onderzoeken hebben echter sommige eerdere conclusies over de effectiviteit van de invloed van de noordelijke moerassen in twijfel getrokken [93]. De uitstoot van methaan vanuit ondergelopen gebieden die ontstaan zijn door dooiend permafrost en vervolgens zijn opgewarmd en gegroeid in oppervlakte, lijkt kleiner dan verwacht, wanneer deze met antropogene emissies wordt vergeleken [93], zelfs als geïsoleerde waterlichamen, gevormd door thermokarst processen, in de berekening worden meegenomen.

De toegenomen methaanemissie als gevolg van de aanwezigheid van moerassen, laat in de huidige tijd bij wijze van terugkoppeling een zwakke toename in klimaatopwarming zien. Voorgaande onderzoeken [8, 73, 277] impliceren ook een kleine terugkoppeling van arctische meren en moerassen op de klimaatopwarming als gevolg van biochemische processen. Riley [219] heeft veel tekortkomingen en onzekerheden in bestaande methaanproductie en -emissiemodellen besproken. Fundamentele processen die resulteren in kleinschalige inundaties (bijvoorbeeld de dynamiek van thermokarst-meren) kunnen sterk toenemen en zouden grote gevolgen kunnen hebben voor de methaanfluxen [263]. Bufferende effecten door de drainage van meren worden niet expliciet meegenomen, echter deze effecten zouden de nu al kleine terugkoppeling alleen maar verder doen afnemen [18, 277].

8.4 Samenvatting

Moerassen zijn één van de meest complexe ecosystemen op aarde. De bepalende processen worden nog niet volledig begrepen en de ecosystemen passen zich constant aan klimaatverandering aan. Het onderzoek naar het gedrag van deze ecosystemen gedurende het LGM is daarom een erg gecompliceerde, maar zonder twijfel ook een uitdagende puzzeltocht. Om maar enkele complicerende aspecten te benoemen: er zijn weinig beschikbare gegevens over de paleogeografie tijdens deze specifieke periode, kennis over de omvang van de kleinere ijskappen ontbreekt, en de grootte van de Laurentide ijskap gedurende het MIS3 is onbekend.

Dit waren de meest urgente aanleidingen om dit onderzoek op het Europese continent te richten, hoewel tot dusverre zelfs ook in Europa slechts enkele locaties onderzocht zijn. Verschillende aannames moesten dus gemaakt worden over de omvang van de moerassgebieden, wanneer het ging om het selecteren van geschikte invoerdata voor het moeras-model.

Net als bij een puzzel waar stukken ontbreken of nog niet beschikbaar zijn, vroeg dit onderzoek om een innovatieve benadering. Hierbij is naast het gebruik van modellen ook gezocht naar nieuwe gegevens om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen. Een modelmatige benadering vraagt om een aantal beslissingen omtrent de keuze en het gebruik van invoergegevens. Dit wordt voor een groot deel bereikt door de initiële bepalingen die altijd samengaan met het gebruik van een model: de keuze van de benodigde parameters, de minimale en maximale waarden hiervan, en de bepaling welke parameters constanten zijn. Alle invoer dient vervolgens zodanig te worden afgestemd dat het model het te onderzoeken systeem zo goed mogelijk weergeeft. De modelafstellingen herbergen daarmee echter wel een bepaalde mate van onzekerheid en fouten, die tezamen de betrouwbaarheid van de resultaten zullen beperken. Het koppelen van meerdere modellen vergroot deze fouten. De eerste drie hoofdstukken van dit proefschrift besteden hier aandacht aan, waarbij een herevaluatie van het effect van de modelstructuur en de keuze van parameters is uitgevoerd. Dit heeft geleid tot een verbeterde nauwkeurigheid van de resultaten in de eerste twee hoofdstukken, en een volledig nieuw en werkend dooimeer-model in het vierde hoofdstuk. Naarmate het werk vorderde leek het logisch om het onderzoek door middel van nieuwe inzichten en data te verdiepen omtrent het functioneren van moerassystemen en de belangrijkste factoren daarin. Hier werd door verschillende onderzoekers om gevraagd, om zo de onzekerheden rondom de bijdrage van moerassgebieden aan de mondiale methaanbudgetten te verkleinen [178]. Hoofdstukken 5 en 6 laten nieuwe gegevens zien van dezelfde ecosystemen, maar dan als het ware in de vorm van een spiegelbeeld van het verleden en het heden, waarbij het mogelijk wordt om de overeenkomsten en verschillen aan te wijzen. Het eerste hoofdstuk beschrijft de algemene richtlijnen en de achtergronden van dit onderzoek, evenals een overzicht van de onderzoeksvragen. Het laatste hoofdstuk vat de belangrijkste resultaten samen.

8.4.1 Hoofdstuk 2

De bijdrage aan methaanemissies vanuit noordelijke moerassen heeft mogelijk een cruciale invloed gehad op zowel de klimaatopwarming gedurende de laatste 800.000 jaar als op de huidige fase van opwarming. Modellen van het systeem Aarde worden veel toegepast om te onderzoeken hoe de terugkoppelmechanismen tussen klimaat en atmos-

ferische samenstelling ontstaan. Het tweede hoofdstuk onderzoekt daarom de gevoeligheid van het gebruikte model PEATLAND-VU. Dit model is gebaseerd op de processen in het moerassysteem en simuleert de methaanfluxen. De gevoeligheidsanalyse richt zich op zowel de formulering van het model zelf, als op de gebruikte parameterwaarden, en de invloed hiervan op de resulterende simulaties. Het model is gebruikt om methaanemissies vanuit continentaal Europa te simuleren voor zowel voorgaande glaciële klimaten als voor het huidige klimaat.

Dit hoofdstuk onderzoekt de gevoeligheid van de gemodelleerde glaciële terrestrische methaanfluxen voor:

- a. De parameters die de draaiknoppen van het model zijn,
- b. De verschillende benaderingen om de grondwaterstand te modelleren, en
- c. De modelstructuur

De modelstructuur is vergeleken met een eenvoudiger modelbenadering gebaseerd op het met een vegetatiemodel (BIOME 3.5) schatten van de primaire productie van moerassen. Dit is gedaan door het afstellen van de productiesnelheid en de temperatuur-gevoeligheid van methaan uit labiele organische koolstof. De modelresultaten lieten onverwacht zien dat de gemodelleerde fluxen relatief ongevoelig bleken voor de hydrologische situatie, maar vrij gevoelig waren voor de microbiële parameters in het model en de modelstructuur. Glaciële klimaatemissies zijn ook zeer gevoelig voor de omvang van de ijsbedekking en de blootgestelde zeebodem. Aangenomen werd ook dat de uitbreiding van moeras op stukken blootgelegde zeebodem met laag reliëf compenseerde voor de afname van moerasgebieden als gevolg van continentale ijsbedekking. Echter, het modelleren van fluxen voor verschillende klimaten wordt door deze verschillen niet op een evenredige manier beïnvloed, waardoor de uitdaging van deze taak nog groter wordt. De kleinere veranderingen tussen glaciële klimaten en een groter contrast tussen glaciële interstadiale klimaten met het huidige, warme klimaat, is het gevolg van een eenvoudige NPP-gebaseerde aanpak. Het hydrologische deel van de modelketen heeft een kleiner effect. Het modelleren van de positie van de grondwaterspiegel en de omvang van de moerasgebieden dient zo realistisch mogelijk te zijn, gegeven de beschikbaarheid van topografische en bodemgegevens. Bovendien zou het de juiste momenten van minimum, maximum en gemiddelde grondwaterstanden moeten weergeven. Kleinere tijdsintervallen lijken echter geen opvallend effect te hebben.

Een andere belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat paleogeografie een aanzienlijke invloed lijkt te hebben op de gemodelleerde emissies, aangezien het model laat zien dat de bijdrage van moerassen op drooggevallen zeebodems groot kan zijn. Hiervoor zijn twee mogelijke redenen:

1. Het moerasgebied is verkleind door de uitbreiding van het ijsdek in glaciële klimaten;
2. Het moerasgebied is vergroot door moerassen op de drooggevallen zeebodem.

Dit waardevolle resultaat geldt voor glaciële klimaten vooraf aan het LGM. Tijdens het LGM is de omvang van ijskappen, glaciële meren en kustlijnen relatief goed bekend. Voor oudere stadialen en interstadialen is de paleogeografie minder precies gedefinieerd. Uit zorgvuldigheid zijn ook de basale parameters die microbiële methaanproductie en -oxidatie relateren aan het klimaat meegenomen. Het effect van methanogenese Q_{10} is echter relatief gering. De uiteindelijke resultaten convergeren in een reeks van waarden die suggereert dat, ondanks de onzekerheden van grootschalige methaanfluxmodellering, een "orde van grootte" aanpak door het modelleren van methaanfluxen onder verschil-

lende klimaatomstandigheden mogelijk is. Dit onderzoek heeft zich beperkt tot Europa, omdat het als gevoeligheidsanalyse dient. Een volledige vergelijking van gemodelleerde waarden zou ook de glaciële moerassen op de Aziatische en Noord-Amerikaanse continenten moeten meenemen. Dit zou echter extra onzekerheid aan dit werk toevoegen omdat hierdoor de paleogeografische onzuiverheden, met name omtrent de omvang van de ijskap, versterkt zouden worden.

8.4.2 Hoofdstuk 3

De volgende vraag was hoe sterk de vegetatie invloed heeft op de methaanemissies. Deze vraag is behandeld in hoofdstuk 3. Het antwoord is gevonden in de mossen en de bacteriën die daarmee in symbiose leven. Een van de resultaten is een Europese database van ongerepte moerasesystemen, op basis waarvan het model effectief is gevalideerd. De nadruk lag op de Marine Isotope Stage 3 (MIS 3) interstadialen, die worden gekenmerkt door een sterke toename in atmosferische methaanconcentraties, zoals blijkt uit ijskernen. Zoals eerder opgemerkt, wordt aangenomen dat moerassen de belangrijkste bron zijn van deze methaanuitstoot.

Vegetatie effecten worden doorgaans op een algemene wijze meegenomen bij het modelleren van methaanfluxen. Toch hebben planten invloed op de uitwisseling van methaan tussen bodem en atmosfeer, en op de productie van organisch materiaal als substraat voor methanogenen. Om de methaanfluxen vanuit de noordelijke moerassen in het verleden te kunnen modelleren, blijken aannames over vegetatie zeer belangrijk, aangezien paleobotanische gegevens laten zien dat er grote verschillen zijn tussen de samenstelling van de moerasvegetatie gedurende de laatste ijstijd (LG) en nu. Niet alleen was de vegetatie tijdens het LG meer koude-bestendig, ook bleek *Sphagnum* mos gedurende grote delen van het LG veel minder dominant voor te komen dan nu. Dit beïnvloedt met name de processen van methaanoxidatie en -transport.

Om het effect van de vegetatieparameters goed te evalueren, is het PEATLAND-VU model gebruikt om moerasemissies in continentaal Europa te simuleren gedurende het LG en in het huidige klimaat. De effecten van de parameters die het oxidatieproces beïnvloeden tijdens planttransport (f_{ox}), vegetatie netto primaire productie (NPP, parametersymbool P_{max}), plant transportsnelheid (V_{transp}), maximale worteldiepte (Z_{root}) en afscheidingsnelheid vanuit de wortels (f_{ex}), zijn uitgebreid getest. De resultaten laten zien dat methaanfluxen met name gevoelig zijn voor f_{ox} en Z_{root} . De effecten van P_{max} , V_{transp} en f_{ex} zijn minder relevant, terwijl interactie met de grondwaterstandsmodellering significant is voor V_{transp} .

Voor de volledigheid zijn verschillende moerasvegetatietypen voor de MIS 3 stadiële en interstadiale klimaten en het huidige klimaat gekoppeld aan hoge resolutie klimaatmodelsimulaties van Europa. Experimenten waarbij dominantie van één vegetatietype (*Sphagnum* versus *Carex* versus struiken) werd aangenomen, laten zien dat *Carex*-gedomineerde vegetatie kan leiden tot een methaanemissie toename van 50% tot 78% vergeleken met dat van een *Sphagnum*-gedomineerde vegetatie, afhankelijk van het gemodelleerde klimaat. Struiken laten een toename zien tussen de 42% en de 72%. Dergelijke experimenten laten succesvol zien dat in Pleistocene klimaten de methaanfluxen gevoelig waren voor de vegetatiekarakteristieken van het moeras: oxidatie bij de bodem-vegetatie-atmosfeer uitwisseling, NPP, worteldiepte en de door de plant bemiddelde transportsnelheden. Oxidatie was aantoonbaar een belangrijke parameter voor het effectief aanpassen

van deze fluxen. De variaties in fluxen tussen *Carex*-gedomineerde en *Sphagnum*-gedomineerde moerassen kunnen groot zijn, 50% tot 78% ten opzichte van *Sphagnum*. De resultaten lieten wel zien dat veranderingen in moerasvegetatie de methaanfluxen drastisch kunnen veranderen. Als gevolg daarvan zouden de methaanemissies tijdens het LG in de noordelijke moerassen vergelijkbaar geweest kunnen zijn met de huidige, zelfs al was het klimaat toen kouder. Het biedt ruimte voor speculatie dat deze mossen een "milieu-tool" zouden kunnen zijn om de huidige opwarming tegen te gaan. Verschuivingen in dominante moerasvegetatie zouden veranderingen in methaanfluxen kunnen hebben aangedreven in het verleden, en zouden dus mogelijk hetzelfde effect in de toekomst kunnen sorteren.

8.4.3 Hoofdstuk 4

In het vierde hoofdstuk wordt toegelicht hoe alle achtergrondstudies over moerasescosystemen en hun ingebedde processen zijn gecombineerd om een meer-model te creëren. Alle basale parameters die effect kunnen hebben op het ontstaan en levensduur van een meer, zijn succesvol samengevoegd in een model dat het vormen van nieuwe dooimeren simuleert. Hierbij is rekening gehouden met drainage en andere belangrijke verstoringen, wind en hoogteverschillen. Dooimeren in permafrostgebieden zijn bronnen van methaan [207, 196, 1, 305, 257, 163], aangezien zij zich voornamelijk ontwikkelen in sedimentaire laaglanden met permafrost en een groot overschot aan grondijsvolume. Hierdoor ontstaan grote gebieden bedekt met dooimeren en gedraineerde dooimeer-bassins (DTLBs) [119, 50]. De uitbreiding van deze meren wordt versterkt door klimaatopwarming en resulteert in een toename van methaanemissies, zo een positieve terugkoppeling bijdragend aan toekomstige klimaatverandering [1, 305, 163].

Dit is het eerste tweedimensionale model op landschapsschaal dat de gehele levenscyclus van dooimeren omvat, namelijk het ontstaan, de uitbreiding, afwatering en tenslotte de herhaalde vorming van een meer. Het model is toegepast op vroegere en toekomstige uitbreiding van dooimeren in een gebied met continue permafrost in Noord-Siberië. Hieruit blijkt dat de afwatering sterk beperkend is voor de uitbreiding van de meren, ook wanneer continue permafrost aanwezig blijft. Dit beperkt methaanemissie vanuit de dooimeren en verlaagt voorspellingen van toekomstige fluxen als gevolg van dooimeeruitbreiding. Deze simulaties zijn beperkt tot zones met continue permafrost, waar een snelle dooimeervorming waarschijnlijk is [248] en waar de grootste gebieden met ijsrijke permafrost zich bevinden. De afwatering van meren blijkt een kritiek proces. De modelstructuur houdt alleen rekening met de afwatering van een meer in combinatie met de expansie van het meer langs het afwateringssysteem. Actieve afwateringseffecten via geulerosie zijn niet meegenomen, net als ondergrondse afwatering van de meren via taliks (ontdooide delen in de permafrost). Toekomstige opwarming zal resulteren in de omzetting van regio's met continue permafrost in gebieden met discontinue permafrost en plekken waar de permafrost geheel verdwenen is. Naar verwachting zal in deze gebieden ondergrondse afwatering een belangrijker rol gaan spelen [305].

Ondanks het opzettelijk weglaten van procesdetails, maakt het model een schatting van toekomstige arctische methaanfluxen vanuit dooimeerexpansie mogelijk, en laat het zien dat betere kwantitatieve gegevens van ijsverdeling, het ontstaan van dooimeren en de expansie daarvan, cruciaal zijn voor het kwantificeren van toekomstige uitbreiding van arctische dooimeren. Bovendien is aangetoond dat zelfs stabilisatie van antropogene

broeikasgasemissies de transformatie van arctische permafrost landschappen niet kan matigen, wanneer permafrost destabilisatie eenmaal begonnen is. Hoewel de methaanemissies minder alarmerend lijken dan door eerdere inschattingen werd gesuggereerd, zullen meer-uitbreidingen op de schaal voorspeld door deze resultaten diepgaande effecten hebben op de permafrost ecosystemen, met name op de leefgebieden van wilde dieren. Alhoewel dit model werd bekritiseerd als zijnde te simplistisch in zijn aanpak, was het een waardevolle stap naar een beter begrip van zulke complexe materie.

8.4.4 Hoofdstuk 5

Het vijfde hoofdstuk onderzoekt het huidige functioneren van het ecosysteem, door het gebruik van een innovatieve methode die gebaseerd is op een multidisciplinaire aanpak. Het doel is om het perspectief van waaruit naar moerassen wordt gekeken te veranderen, om zo nieuwe inzichten te krijgen in de leidende processen en om nieuwe gegevens beschikbaar te maken voor de wetenschappelijke gemeenschap. Eén van de belangrijkste kwesties in dit werkveld is het feit dat de meeste modellen een ééndimensionale structuur hebben en de moerassen behandelen als een enkele vegetatie, bodem of micro-reliëf eenheid, terwijl de processen die zij proberen te beschrijven in werkelijkheid driedimensionaal zijn. Zulke modellen kunnen daardoor de dynamische reacties op opwarmende condities missen [221], reacties als lokale veranderingen in bodemvocht, vegetatieverschuivingen of interactie van water met het oppervlaktelandschap [228].

Ondanks verschillende oproepen om deze kennissgaten in de dynamiek van veengebieden te dichten [315, 228], is het moeilijk om studies te vinden die pogen een breder overzicht te geven van de manier waarop alle parameters interageren in dit type ecosysteem, om zo de ruimtelijke variatie in methaanemissies gerelateerd aan vegetatie of micro-reliëf aan te tonen. Dit onderzoek volgt juist die richting, waarbij gekozen is voor een specifiek veldgebied: Kytalyk. Dit is een beschermd natuurgebied in Siberië, in een oud ontwaterd stroomgebied van een dooimeer. Dit gebied is goed onderzocht dankzij de bedekking met eddy-covariantie gegevens die de hoge methaanemissies van dit gebied bevestigen, waarden die zelfs uitsteken boven de rest van de omgeving.

De ruimtelijke variatie in vegetatiesoorten heeft een effectieve invloed op de methaanemissies, doordat de vegetatiebedekking gerelateerd is aan de hoeveelheid grondijs en oppervlakte-afvoerpatronen, wat de methaanemissies beïnvloedt. Bodem- en vegetatiekarakteristieken zijn geïdentificeerd als de voornaamste drijvende krachten achter de meeste ruimtelijke variatie, de karakteristieken waarvan gebruikt kunnen worden om te voorspellen welke methaanfluxprocessen waarschijnlijk zullen ontwikkelen in een bepaald moerasesysteem.

Alles wijst op een vegetatiedek die de methaanfluxen sterk kan beïnvloeden, door ze sterk te laten afnemen (zoals in het geval van *Sphagnum mos*) of door ze te laten ontsnappen zonder oxidatie (zoals bij zegge-soorten). Dit komt overeen met de resultaten van hoofdstuk 3: vergeleken met geselecteerde validatielocaties waren de modeluitkomsten nauwkeuriger wanneer de initiële parametrisatie zo ingesteld was, dat rekening werd gehouden met verschillen in het vegetatiedek. Het *Sphagnum mos* moduleert de methaanfluxen in natte gebieden door de grote opnamesnelheid van methanotrofe bacteriën. Deze *Archaea* gemeenschappen spelen een belangrijke rol die onafhankelijk lijkt van de geografische locatie.

Moerasesystemen met permafrost verschillen in een paar fundamentele aspecten

van andere moerassen door de aanwezigheid van een duidelijk micro-reliëf, ontstaan door een hecht samenspel op kleine schaal van vegetatie, grondijs, de dikte van de actieve laag, de bodemhydrologie en nutriënten. Deze locatie vertoont een aantal afwijkingen vergeleken met een typische polygonale toendra, die in het hoge noorden overal te vinden is in moerassen binnen de continue permafrostzone. Naast hoog- en laag-gecentreerde polygonen lijkt een afwisseling van lage palsas en ondiepe begroeide afwateringskanalen het oppervlaktepatroon te domineren. Bovendien kan het typische laag-gecentreerde polygoonreliëf dat gewoonlijk over grote gebieden van arctische moerassen te zien is, degraderen tot andere moerasoppervlaktetypen zoals het palsa/begroeid kanaal micro-reliëf dat wordt aangetroffen op de veldlocatie van dit onderzoek. Gebaseerd op deze waarnemingen stelt dit onderzoek daarom de hypothese dat deze verschillen een meer volwassen stadium van polygoonontwikkeling zijn, resulterend uit verstoring van de polygonen door een meer volwassen stadium van het ontwateringssysteem.

8.4.5 Hoofdstuk 6

In hoofdstuk zes wordt een successie van meerafzettingen uit het Midden-Weichselien gepresenteerd en bestudeerd. Hierbij worden gegevens van boorkernen gecombineerd met die van secties van de blootgestelde bodem. Een van de boorkernen is heel bijzonder omdat het wel vijf verschillende levenscycli van dooimeren bevat. Dit geeft een ongekend goed overzicht van de ontwikkeling van dooimeren over de verloop van tijd. Dooimeren ontstaan in sedimentaire laaglanden gedurende de dooi van het permafrost, dat rijk aan ijs is. Dit formatieproces kan op gang gebracht worden door elk proces dat de bodemwarmte balans verstoort. Doordat het organische materiaal ontbindt wanneer het permafrost smelt, komen grote hoeveelheden methaan vrij. Een vergelijkbare uitbreiding van dooimeren heeft mogelijk tijdens klimaatopwarmingsfasen aan het einde van de laatste ijstijd (LG) bijgedragen aan sterke toenames van atmosferisch methaan, zoals vastgelegd in ijskernen. Paleo-dooimeren daterend uit het LG (Oxygen Isotope Stage 3 periode) zijn aangetroffen in West- en Oost-Europa. In het zuiden van Nederland hebben oudere afzettingen (ouder dan 400.000 jaar) met vergelijkbare facies waarschijnlijk dezelfde oorsprong. Net zoals huidige arctische dooimeren nu, zijn deze paleo-dooimeren mogelijk belangrijke bronnen van methaan geweest.

De formatie van dooimeren heeft mogelijk over de hele periglaciale zone plaatsgevonden in het Midden-Weichselien, teweeggebracht door klimaatoscillaties in die tijd. Hard bewijs hiervoor ontbreekt echter omdat de geassocieerde paleoklimatologische gegevens gefragmenteerd zijn. Het kan niet worden uitgesloten dat het dooimeersysteem zelf cyclisch gedrag vertoont, hoewel dit minder waarschijnlijk is omdat het permafrost relatief dun geweest kan zijn en door het ontstaan van meer-taliks doordrongen. De degradatie van het permafrost aan het eind van de laatste ijstijd gebeurde in Europa onder drogere omstandigheden dan ten tijde van het Midden-Weichselien.

De analyse van de Hengelose bodemsecties laat zien dat gedurende het Midden-Weichselien dooimeren ontstonden in ijsrijk permafrost, vergelijkbaar met de huidige permafrostgebieden. In minstens één geval is er onmiskenbaar bewijs gevonden van een dooimeer herkomst vanuit lacustriene sedimenten (meerafzettingen), in de vorm van ijswig pseudomorfen direct onder de meerafzettingen. Verdere informatie wordt geleverd door de sedimentstructuren waarmee het meer is opgevuld, die wijzen op de aanwezigheid van actief eroderende oevers, die sediment aanleverden voor plankvormige banken langs

de waterkant. Het meer zou minstens 2,5 meter diep kunnen zijn geweest. Deze meerafzettingen nabij Hengelo zouden het resultaat kunnen zijn van herhaaldelijk nieuw gevormde meren, maar meer waarschijnlijk waren ze onderdeel van een groter merensysteem, dat frequent van vorm is veranderd door te groeien en in te krimpen door de tijd heen. Er zijn indicaties gevonden van inmenging met het fluviale systeem, iets dat ook in huidige dooimeersystemen gebruikelijk is. Meeropvullingen variëren van grotendeels klastische (silt) afzettingen met een klein percentage organisch materiaal tot organische sedimenten (gyttja), of siltafzettingen die verweven zijn met (benthische) mossen. De isotopensamenstelling toont meest organisch materiaal dat niet sterk ontbonden is. Dit ondersteunt de belangrijke rol van deze meren binnen het mondiale methaanbudget.

De processen van vorming en snelle groei van dooimeren zijn over het algemeen gekoppeld aan sterke toenames van atmosferisch methaan. Dit onderzoek heeft succesvol een reeks nieuwe gegevens aangeleverd die een dergelijke bewering ondersteunen. Elk van deze gegevens geeft significante aanwijzingen die helpen om de bepalende processen voor methaanuitstoot beter te begrijpen: de isotoopwaarden die samen met de organische stofgehalten in de monsters gevonden zijn; het drogere klimaat van het Midden-Weichselien; en het sterk veranderende milieu van het onderzochte gebied. Stuk voor stuk vormen zij waardevolle invoer voor toekomstige modelexperimenten, om het klimaat en het milieu van het Midden-Weichselien te reconstrueren. Het bewijs van paleo-dooimeer opeenvolgingen tijdens de laatste ijstijd in Europa, hun sedimentaire facies en hun mogelijke moderne equivalenten, zijn een geldige aanwijzing om de potentiële bijdrage van oudere dooimeren aan de atmosferische methaanfluxen van noordelijke moerassen te evalueren.

8.5 Een kritische blik

Onzekerheid in de beantwoording van de onderzoeksvraag ontstaat uit verschillende bronnen: de gesimuleerde grid fractionele verzadiging in modellen met een waterverzadigde bodem, van eerste-orde belang voor methaanemissieschattingen; ruimtelijk heterogene, op veldwaarnemingen gebaseerde methaanemissieflux; parameters die geassocieerd worden met de temperatuurafhankelijkheid van methaanproductie. Een mogelijke stijging van geologische emissies van methaan uit ondiepe onderlagen in de bodem of vanuit hydraatreservoirs als gevolg van het opwarmen van permafrost op land, of onderzeese permafrost, is niet meegenomen. Hoewel de satellietreconstructie een goede schatting levert van mondiale inundatie, is het niet toereikend voor het karakteriseren van kleine, geïsoleerde waterlichamen, inclusief enkele daarvan die door het thermokarstproces zijn gevormd. Andere factoren die belangrijk zouden kunnen zijn, maar niet expliciet zijn meegenomen, zijn: het isolerende veen [160] en brandverstoringen van de dooi van permafrost, maar ook bodemvocht- en vegetatiedynamieken en methaanoxidatie verwijderingsprocessen die gaande zijn in bodems, sedimenten en water. Volgens de modelresultaten voor huidige klimaatverandering zal de extra opwarming niet groter worden dan $0,1^{\circ}\text{C}$ in 2100. Tevens zou voor een verdubbeling van deze temperatuurterugkoppeling (tot ongeveer $0,2^{\circ}\text{C}$) in 2100, minimaal een 25-voudige stijging nodig zijn in de methaanemissie resulterend uit de geschatte permafrostdegradatie [93]. Belangrijke onzekerheden in de vergelijking van vroegere en huidige noordelijke moerassen zijn samengevat in de volgende tabel 8.1 op pagina 140.

8.6 Een vooruitblik

Dit onderzoek verbetert de kennis van permafrost processen in de modellering van het Aardse systeem en draagt bij aan een beter begrip van de rol van arctische landoppervlakken in het klimaatstelsel. Toekomstig modellerwerk zou voordeel hebben bij het opnemen van meer gedetailleerde moerasprocessen gerelateerd aan permafrost [220]. Voor dit doel zijn specifieke gegevens op kleine schaal nodig. De inspanningen om het dooimeer model te valideren heeft inzicht en begrip gebracht over de evolutie van de levensduur van dooimeren en hun omgeving. Echter het benadrukt ook dat er nauwelijks bewijs is van huidige veranderingen van meren in permafrostgebieden. Wat als het mogelijk zou zijn om de evolutie van deze meren te correleren aan klimaatveranderingen? Wat als de belangrijkste parameters – de voornaamste drijvende krachten in het model – gebruikt konden worden als aanwijzers, meetinstrumenten, of zelfs als een proxy voor mondiale opwarming? Speciale aandacht zou uit moeten gaan naar het verder brengen van het begrip van sleutelparameters als Q_{10} en vegetatiebedekking (of plant functionele typen), zowel als naar de bacteriële activiteit gerelateerd aan methanogenese processen.

Wanneer het LGM/MIS3 vergeleken wordt met de huidige situatie, is het mogelijk om één groot verschil in de vegetatie op te merken. Sphagnum mossen waren genoeg afwezig tijdens de laatste ijstijd. Uit een paar voorbeelden van veenoverblijfselen in glaciële successies is bekend dat deze mossen in het Vroeg-Weichselien nog rijkelijk aanwezig waren [27]. Na die periode is er echter maar zeer beperkt fossiele data van sphagnum veen. De afwezigheid daarvan is verklaard als zijnde de invloed van lage atmosferische CO_2 -concentraties, en niet van temperatuurverschuivingen. Inderdaad is de relatie tussen deze mossen en CO_2 niet goed bekend, want hoge CO_2 -concentraties kunnen schadelijk zijn voor ze [104], maar ook hun groei bevorderen [184]. Tegenwoordig komen deze mossen echter wereldwijd voor. Waarom? Werden ze hiertoe aangezet door de mondiale opwarming, als een natuurlijke reactie op de stijgende temperatuur? Een vraag die het waard is om nader onderzocht te worden.

Om de voordelen van deze werkwijze ten volste te benutten, zou het moeten worden toegepast op een groter gebied. Uitgangspunt hierbij zou een locatie zijn met een beschikbare database van methaanemissie of met een monitoringsapparaat zoals een meteorologische toren die methaan- en CO_2 -fluxen kan detecteren en meten. Het zou erg interessant zijn om de multidisciplinaire methodologie van gegevens valideren, verder te brengen, en om de waarden van de factoren en parameters die bij het modelleren gebruikt worden, gedetailleerder af te stellen, om zo een hogere betrouwbaarheid te verkrijgen.

Door boringen over een groter gebied te plaatsen zou aangetoond kunnen worden of laterale veranderingen in de verschillende grondlagen een behoorlijke bandbreedte hebben of dat er slechts lokale variaties aanwezig zijn. Ook zou het de diepte van de actieve laag gedetailleerd in beeld brengen. De uitgenomen boorkernen zouden gebruikt moeten worden voor het nemen van bodemmonsters, deze te labelen naar diepte van voorkomen (oftewel met 5 cm intervallen), te analyseren en vervolgens te gebruiken voor het verkrijgen van een 3D kaart van het gebied, waarin alle verzamelde gegevens zijn opgenomen. Hiermee zouden alle gradiënten in bodemkarakteristieken inzichtelijk worden gemaakt, inclusief ijs, water en gehalte aan organisch materiaal, veranderingen in

Table 8.1: Verschillen tussen vroegere en huidige moerassen.

VERLEDEN	HEEDEN	AANPAK
Moerasverspreiding is onzeker door onbrekende paleogeografische gegevens (ijsbedekking, drooggevallen zeebodem)	Moerasverspreiding is onzeker, met name met het oog op de verspreiding van open water	Paleogeografische gegevens zijn gebruikt wanneer beschikbaar, met de aanname dat geringe hoogteverschil moerassen voortbrengt
Vegetatie kan in het verleden anders zijn geweest (bijvoorbeeld de aan- of afwezigheid van soorten zoals Sphagnum)	Vegetatiecompositie is bekend, maar niet gedetailleerd gebruikt in modellen	Het model is getest met verschillende vegetatie sets die actuele en paleo-botanische gegevens vergelijken
Gedetailleerde klimaatgegevens: temperatuur, neerslag, sneeuwbedekking	Station en re-analyse data zijn beschikbaar	Uitkomsten van paleoklimaat model zijn gebruikt (alleen beschikbaar voor Europa)
De omvang van permafrost is niet exact bekend	De omvang van permafrost is beter gedefinieerd	Het model berekent bodemtemperatuur en de actieve laag
Aanwezigheid van waterlichamen / thermokarst aanwezigheid slecht bekend, alleen hele lokale observaties	Huidige omvang beter gedefinieerd, maar gegevens over de verandersnelheid van meren en hun levenscyclus zijn erg beperkt	Model met basisaanpak gebruikt, inventarisatie van gegevens van paleo-thermokarst meren
De bacteriepopulatie die methaan produceert en oxideert is onbekend	Meer gegevens beschikbaar over productiesnelheid en temperatuurgevoeligheid	Huidige gegevens zijn gebruikt in modellering, verzamelen van data en gevoeligheidsexperimenten
Onzekerheden in bodemhydrologie	Sterke relatie tussen bodemhydrologie, microreliëf, vegetatie en overollig ijsgehalte in de bodem	Bodemijis, vegetatie, hoogteverschillen en hydrologische verbanden zijn bestudeerd in huidige arctische milieus, gevoeligheidsexperimenten met het model
Hydraten en diepe permafrost methaan	Geringe emissies in huidige tijd	Niet gemodelleerd, condities zijn n.v.t.

korrel- grootte en mineralogische compositie, aanwezigheid van bacteriële gemeenschappen, radiodatering en de aanwezigheid van specifieke cryo-structuren. Aan het oppervlak zouden in kaart gebrachte waterlichamen en afwateringspatronen onderzocht kunnen worden in relatie tot de diepte van de actieve laag in de bodem, terwijl hun afwateringssysteem aanwijzingen zou kunnen geven over de evolutie van het gebied. Variaties en ruimtelijke verspreiding van de vegetatiebedekking zou door middel van kamermetingen meegenomen kunnen worden voor methaanemissies. Al deze nieuwe informatie zou dan beschikbaar zijn voor milieumodellen.

Een ambitieuzer doel kan ook bereikt worden. Door het uitvoeren van al deze analyses zou het niet alleen mogelijk zijn om de emissiemetingen van de externe toren te valideren en om milieucorrecties mee te nemen wanneer zij niet goed overeenkomen, ook zou het gebied hiermee volledig zijn beoordeeld in termen van broeikaspotentiala (Green House Potential). In wezen zou de drempelwaarde, het maximale potentiële GHG waarde van het gebied beschouwd als koolstofreservoir zijn bepaald, dus wat er zou kunnen vrijkomen naar de atmosfeer. Het zou gebruikt kunnen worden om een inschatting te maken van de verwachte bandbreedte van emissies, gebaseerd op specifieke milieuparameters zoals neerslag of luchttemperatuur. Het zou een waardevol gereedschap kunnen zijn om betrouwbare gegevens te vergaren, die de moerasemissies onder verschillende mondiale opwarmingsscenario's voorspellen.

Wetenschappelijk netwerk

Dit onderzoek was ingebed in de onderzoeksprogramma's van de Cluster Earth and Climate van de Vrije Universiteit Amsterdam. Als onderdeel van de afdeling Hydrology and Geo-environmental Sciences, was het project aangesloten bij nationale en internationale onderzoeksprogramma's op het gebied van water en de koolstofcyclus waarin de afdeling deelneemt (BSIK MME1 programma, TCOS, CarboEurope, Greencycles, Darwin Research Centre for Biogeology). In sommige gevallen was er nauwe samenwerking met PhD studenten binnen deze programma's. Dit onderzoek was ook verwant aan projecten op het gebied van paleoklimaatmodellering (snelle klimaatopwarming in het verleden) en klimaatinvloeden op riviersystemen. Het project was onderdeel van het onderzoeksprogramma van NSG (Netherlands Research School of Sedimentary Geology), onderzoeksthema's "Lithosphere, Biosphere, Climate and Surface processes" en "Bio-geochemistry and water" en is gefinancierd door NWO, subsidienummer 815.01.007.

