



Broeikasgasemissies uit veen sloten, bronnen en processen

D. van Rotterdam

L. Moria

Referaat

Van Rotterdam en Moria, 2024, Broeikasgasemissies uit veensloten, bronnen en processen, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2029.N.24.1, pp 17

Rapport in het kort

In opdracht van het NOBV en STOWA zijn in deze notitie de belangrijkste (koolstof)bronnen die leiden tot broeikasgas (BKG)emissies uit veenweidesloten beschreven. Om de belangrijkste bronnen goed te duiden zijn huidige emissies uit veenweidesloten en sturende processen daarbij ook beschreven. Broeikasgasemissies zijn de resultante van afbraakprocessen in met name de bagger op de slootbodem. Erosie van geoxideerd veen zonder structuur is de belangrijkste koolstofbron van bagger in veensloten. Erosie vindt veelal onder de waterlijn plaats. Ook algen en woekerende planten kunnen een bron van koolstof zijn. BKG-emissies worden sterk bepaald door de ecologische toestand en de factoren die van invloed zijn op deze toestand. Een geringe waterdiepte, beperkt lichtklimaat, hoge nutriëntenbelasting en gevoeligheid voor versturende dieren (kreeften en woelende vissen) resulteren in een slechte (ecologische) waterkwaliteit. Al deze kenmerken leiden samen tot de ideale omstandigheden voor methaan ebullitie en daarmee tot hoge broeikasgasemissies uit veensloten.



© 2024 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Dhr. Jansen, NOBV

digitaal

Samenvatting

In opdracht van het NOBV en STOWA, staat in deze notitie de volgende onderzoeksvraag centraal: Wat zijn de belangrijkste bronnen van de stoffen die voor broeikasgasemissies uit veenweidensloten zorgen? Er is geen simpel antwoord op de onderzoeksvraag en de achterliggende processen zijn niet alleen complex, maar ook nog eens zeer plaatsspecifiek. Desalniettemin doen wij een aanzet om op basis van literatuur en ervaring de processen te ontrafelen en hierin hoofdzaak en bijzaak te onderscheiden. Om BKG-emissies uit veensloten te duiden zijn de volgende bouwstenen onderscheiden:

- Broeikasgasemissies
- Koolstofbronnen van bagger/ slib
- Koolstofbronnen van (opgelost) koolstof in water
- Ecologische toestand (aeroob of anaeroob) als drijfveer voor BKG-emissies
- Omstandigheden die bepalend zijn voor de ecologische toestand

Broeikasgasemissies

Broeikasgasemissies (CO_2 , CH_4 , en N_2O) komen vrij als organische materiaal wordt afgebroken. Het redoxpotentiaal is zeer bepalend voor de snelheid van afbraak en voor de daarbij gevormde broeikasgassen. Om organische moleculen af te breken hebben micro-organismen een elektronen-acceptor nodig, in volgorde van energetisch meest gunstige is dit zuurstof, nitraat, mangaan (IV), ijzer(III), sulfaat en als laatste CO_2 . Als CO_2 wordt gebruikt voor de afbraak komt methaan vrij, dit wordt methanogenese genoemd.

Om de belangrijkste bronnen en processen in sloten goed te duiden zijn de emissies zelf een goed uitgangspunt. De gemeten emissies van de broeikasgassen CO_2 en methaan (CH_4) variëren sterk tussen sloten en gedurende het jaar. De totale BKG-emissies zijn hoger in de zomer/ lente dan in de winter/ herfst. In veensloten is de gemiddelde jaarlijkse emissie van CH_4 vergelijkbaar met, of iets hoger dan de emissie van CO_2 en lijkt de bijdrage van N_2O aan de totale BKG-emissies beperkt (Hendriks et al., 2023). CH_4 komt vooral vrij door ebullitie. CH_4 -ebullitie vindt vooral in de zomer/ lente plaats en CO_2 -diffusie vooral in de winter. CH_4 -diffusie treedt het hele jaar door op, maar de relatieve bijdrage lijkt in veensloten minder relevant dan in minerale sloten.

Organische koolstofbronnen

Het organische materiaal dat wordt afgebroken en waarbij broeikasgassen vrijkomen is aanwezig in het water als opgeloste koolstofmoleculen, (micro)algen, planten, en in het slib (bagger) op de bodem van de sloot. De volgorde waarin deze organische bronnen zijn genoemd, is – onder normale omstandigheden – ook de volgorde waarin de hoeveelheid koolstof per oppervlakte-eenheid toeneemt. Hoe groter de koolstofvoorraad, hoe meer materiaal in potentie beschikbaar is voor afbraak. De afbraaksnelheid van het organisch materiaal is afhankelijk van de complexiteit van dit organische materiaal en de fysische omstandigheden (temperatuur, zuurstof). Algen breken sneller af dan waterplanten en die breken weer sneller af dan intact veen (Vahatalo et al., 2010; West et al., 2012; Van Bergen et al., 2019). Ontwaterd, veraard veen breekt sneller af dan matig tot onveraard veen (Zak en Gelbrecht, 2007).

Organisch koolstof in de waterkolom bestaat uit particulier materiaal ($<45\text{ }\mu\text{m}$) en opgelost materiaal. Het particuliere materiaal bestaat uit (**micro**)algen die in de waterkolom leven en **microdeeltjes** die qua samenstelling vergelijkbaar zijn met het slib. Deze laatste bron is het particulier materiaal dat in stilstaand of langzaam stromend water bezinkt en door wind of vissen kan dit weer opwerfelt. Opgelost organisch koolstof (DOC) dat uitspoelt uit de ontwaterde aerobe veenbodem bestaat voornamelijk uit stabiele organische moleculen; aromatische en complexe verbindingen zoals humuszuren (Höll et al.,

2009). Deze moleculen ontstaan bij de aerobe afbraak van organisch materiaal en zijn zelf moeilijk afbreekbaar. Na vernatting van het veen neemt de concentratie DOC in het bodemprofiel af, maar neemt de bijdrage van moleculen die relatief makkelijk afbreken toe (Höll et al., 2009). Micro-algen zijn daarentegen gemakkelijk afbreekbaar (Grasset et al. 2018).

Het effect van DOC en particulier materiaal op de directe broeikasgasemissies is naar verwachting beperkt omdat de hoeveelheid koolstof per emitterend wateroppervlak relatief klein is in verhouding tot de hoeveelheid koolstof in organisch slib en het (deels) een relatief lage afbraaksnelheid heeft. Wat de bijdrage is van primaire productie, door micro-algen, aan de emissie van broeikasgassen is onbekend. In een watersysteem dat rijk is aan micro-algen is de snelle afbraaksnelheid en de relatief kleine hoeveelheid koolstof (uitgedrukt in kg koolstof per oppervlak water) de reden om aan te nemen dat microalgen zelf waarschijnlijk niet een belangrijke koolstofbron zijn en ook niet substantieel bijdragen aan de baggerlaag. (Micro)algen hebben, net als DOC en particulier materiaal in de waterkolom wel indirect een groot effect op afbraak en emissies omdat ze het redoxpotentiaal beïnvloeden en het doorzicht beperken (zie paragraaf ecologische toestand).

Biomassaproductie in de sloot lijkt in de huidige omstandigheden in veensloten een relatief beperkte koolstofbron te zijn (Van Bergen, 2019). In de meeste sloten in het veenweidegebied is de biomassaproductie van (onder)waterplanten beperkt, maar staan er wel waterplanten langs de oever. De planten die er nog staan worden aan het eind van het groeiseizoen veelal verwijderd tijdens het jaarlijkse 'slootschonen'. Sloten met een hoge biomassaproductie die niet jaarlijks wordt verwijderd, zijn hier een uitzondering op. In sloten met woekerende kroossoorten, draadalgen, krabbenscheer of flab kan de interne biomassa-productie wel een belangrijke koolstofbron zijn. In deze sloten zijn de verwachte BKG-emissies (zeer) hoog omdat deze planten niet alleen grote hoeveelheden gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal vormen, maar ook het wateroppervlak afsluiten waardoor zuurstofloze omstandigheden ontstaan. Gedurende het groeiseizoen is de aanwas van biomassa groter dan de afbraak hiervan waardoor het deel gaat uitmaken van de bagger op de slootbodem.

Slib (bagger) is naar verwachting verreweg de belangrijkste koolstofbron voor de BKG-emissies uit veensloten. Bij het onderhoud van sloten wordt in het veenweidegebied voor de baggercyclus uitgegaan van een baggeraanwas van 2 tot 5 cm per jaar, afhankelijk van het gebied (Westerman pers. com., Joosten et al. 2015). Dit is (meer dan) het dubbele van dan de baggeraanwas die wordt aangehouden in sloten met een minerale bodem (persoonlijke communicatie baggerplanners waterschap AGV). In voedselrijke watersystemen met een vergelijkbare biomassaproductie, maar andere grondslag (mineraal of veen) is de slibaanwas dus niet vergelijkbaar; deze is groter in veensloten. Het is daarom waarschijnlijk dat het veen zelf een belangrijke bron is. In het veld is dit ook te zien (zie Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Typische veensloot met 50 cm bagger (links). Rechts is te zien dat deze bagger voornamelijk uit veen zelf bestaat (bruine kleur). Op de toplaag van de bagger zijn nog resten te zien van door plantmateriaal (zwarte kleur). Op de achtergrond is te zien dat veel van het plantmateriaal in het najaar is verwijderd en op de kant ligt. Onder de graszode is de oever onderholt en erodeert het geoxideerde veen vanuit de diepere bodemlaag van het perceel tot bagger.

Op de uitzondering van een hoge interne biomassa-productie na, is bagger in het veenweidegebied vooral het erosieproduct van het veen zelf. In veenbodems is de teeltlaag en de laag onder de teeltlaag, maar boven de grondwaterspiegel (sterk) veraard (gemineraliseerd) door de indringing van zuurstof in het bodemprofiel. Veraarding zorgt voor veranderingen in de fysieke eigenschappen waarbij het veen zijn structuur verliest en als bagger in de sloot terecht kan komen (Smolders et al. 2013). Veraard veen breekt ook gemakkelijker af dan matig tot onveraard veen (Zak en Gelbrecht, 2007). Dit veen erodeert veelal van onder de waterlijn. Zelfs in sloten waar ogenschijnlijk vegetatie langs de oever staat, is bij nader onderzoek de oever vaak onderholt. Veen wordt vanuit het perceel richting de sloot gedrukt. De mate van erosie en de afbraaksnelheid is afhankelijk van het veentype, van de bodemstructuur en belasting en mogelijk ook van de mate waarin dit veen (historisch) door ontwatering is geoxideerd. De afbraaksnelheid van het geërodeerde veen en de factoren die deze afbraaksnelheid van het veen bepalen is nog een kennishiaat.

Het 'wegdrukken' van veen naar de sloot wordt veroorzaakt door de fysieke belasting in combinatie met schuifspanning. De schuifspanning van het veen neemt af als het verzadigd is met water (Tuukkanen et al., 2014) en schuift naar de plek met de minste weerstand; de sloot. Langdurig natte omstandigheden leiden daarom tot een (grote) aanwas van bagger. Veengebieden met een kleine drooglegging (<30cm) worden gekenmerkt door een hoge baggeraanwas (ervaring natuurgebieden met peilopzet). Langs sloten met een relatief kleine drooglegging (<50cm) en met beweiding is vaak een 1,5m brede verzakte oeverzone zichtbaar. Deze verzakte zone is zeer gevoelig voor erosie, weer vooral van onder deze zone en niet zozeer door oppervlakkige afspoeling. Stevig wortelende, inundatietolerante vegetatie is essentieel om oevers te beschermen en erosie te beperken. Oevervegetatie die in de onderwaterbodem wortelt is ook belangrijk om de oever te beschermen tegen erosie. Deze vegetatie zou in een smalle beschermende strook langs de oever juist aan het eind van het groeiseizoen moeten blijven staan, in plaats van standaard in het najaar te worden verwijderd tijdens het jaarlijks 'slootschonen'. In de winter worden vaak ook de slootpeilen verlaagd waardoor de onbegroeide oever op/ onder de waterlijn zwart ligt en kan eroderen.

Ecologische toestand

Binnen de literatuur bestaat consensus dat de ecologische waterkwaliteit (hoeveelheid en soortenrijkdom van planten en dieren in de sloot) bepalend is voor de BKG-emissies uit de sloot; BKG-emissies zijn relatief laag in een voedselarm systeem dat wordt gedomineerd door ondergedoken waterplanten en relatief hoog in een voedselrijk, algen of kroos gedomineerd systeem (Aben et al., 2022; van Bergen et al. 2019; Davidson et al. 2018, deltafact STOWA). De hoogste emissies zijn gemeten in systemen die worden gedomineerd door kroos (Aben et al., 2022).

Broeikasgasemissies zijn een resultante van de hoeveelheid en afbreekbaarheid van organische stof en van het redoxpotentiaal. In sloten met een goede waterkwaliteit zorgen de waterplanten ervoor dat de waterkolom en waterbodem langer zuurstofrijk (aeroob) blijft, waardoor BKG-emissies relatief laag zijn. Ondergedoken planten produceren zuurstof in de waterkolom en sommige waterplanten transporteren zuurstof naar de sliblaag/ waterbodem. Ondanks dat waterplanten zorgen voor een relatief hoge biomassa-productie, bestaan ze uit complexere organische moleculen met een relatief lage afbraaksnelheid (Van den Berg et al., 2012; Deng et al, 2023).

Kroos en algen breken makkelijk af en kunnen watergangen volledig bedekken en afsluiten van licht en lucht, waardoor geen transport van zuurstof vanuit de lucht naar het water en waterbodem meer optreedt. De waterbodem wordt dan snel zuurstofloos en het redoxpotentiaal daalt tot het punt waarbij methanogenese plaatsvindt. Dominantie van kroos creëert naast een zuurstofloos watersysteem ook grote hoeveelheden biomassa waardoor BKG-emissies hoog zijn (Aben et al. 2017; Velthuis et al. 2018; Davidson et al. 2018). (Micro)algen hebben wel een hoge afbraaksnelheid, maar de bijdrage aan slibaanwas is waarschijnlijk lager dan in een kroos gedomineerd systeem. Algen leiden wel tot een anaeroob systeem, dat afhankelijk van de samenstelling van het slib/ bagger tot hoge BKG-emissies

kan leiden. De omslag van een planten gedomineerd systeem naar een kroos of algen gedomineerd systeem is ook het omslagpunt waarbij BKG-emissies sterk toenemen (Deltafact STOWA).

Omstandigheden die de waterkwaliteit bepalen

Algen en kroos (gaan) domineren bij een hoge nutriëntenbelasting en bij een lange verblijftijd van het water (weinig stroming). Niet de nutriëntenconcentratie maar de belasting is bepalend voor de waterkwaliteit. De concentratie geeft aan hoeveel op een bepaald moment beschikbaar is, en is onder meer een resultante van de ecologische toestand. Een hoge belasting geeft aan dat er een continue aanvoer van nutriënten is waardoor algen zich kunnen blijven vormen. Naast nutriëntenbelasting en verblijftijd is waterdiepte een belangrijke factor omdat in sloten met een beperkte waterdiepte de temperatuur sneller kan oplopen. De snelheid waarmee biologische afbraakprocessen plaatsvinden neemt toe bij hogere temperaturen. Door versnelde afbraak wordt de waterbodem eerder zuurstofloos in ondiep water dan in dieper water. Verwijdering van planten uit de sloot is nog een factor die bepalend is voor de ecologische waterkwaliteit. Wanneer er te rigoureus planten worden verwijderd – dit kan door kreeften, door de mens of een combinatie – wordt de stabiliserende en bufferende factor verwijderd. Hierdoor verandert de zuurstofdynamiek, verdwijnt de buffering van nutriënten (planten nemen nutriënten op), vindt er minder bezinking van bodemdeeltjes plaats en wervelt het slib op de bodem makkelijker op. Opwerveling en algen zorgen voor een slecht doorzicht, wat plantengroei remt. Wanneer een systeem is verstoord kan het omslaan van een goede naar een slechte waterkwaliteit en kunnen BKG-emissies sterk toenemen. De omstandigheden moeten echter beter zijn voor de omslag terug naar een goede waterkwaliteit.

Kwantificering

BKG-emissies zijn moeilijk te kwantificeren omdat:

- De afbraaksnelheid van de verschillende koolstofbronnen belangrijk is, maar het onbekend is wat de exacte samenstelling is van het organische stof in het slib – vooral de afbraaksnelheid van het geërodeerd veen is nog een kennishiaat.
- Er veel lokale variatie is in emissies door de verhouding tussen vastlegging en vrijkomen van koolstof in bagger, de verhouding tussen de verschillende externe koolstofbronnen (erosie en interne productie) en variatie in lokale omstandigheden (nutriëntenbelasting, waterdiepte, verblijftijd van water, vegetatie, lokaal (historisch) beheer, effect van drains, kwel en opbarsting).

Conclusie

Broeikasgasemissies zijn de resultante van afbraakprocessen in met name de bagger. Erosie van geoxideerd veen zonder structuur is de belangrijkste koolstofbron van bagger. Erosie vindt vooral onder de waterlijn plaats. Het type veen, de (historische) drooglegging, fysieke belasting van oever en de aanwezigheid van vegetatie zijn belangrijke factoren voor de aanwas van bagger. Biomassaproductie *in* de sloot lijkt in de huidige omstandigheden in veensloten een beperkte koolstof bron te zijn. Uitzonderingen zijn sloten met een hoge biomassaproductie die niet jaarlijks integraal wordt verwijderd, bijvoorbeeld met woekerende kroos, krabbenscheer of flab.

De snelheid waarmee broeikasgassen ontstaan, de vorm (CO_2 , CH_4 (N_2O is veelal onbekend)) en emissieroute (CO_2 -diffusie of CH_4 -ebullitie) worden vooral bepaald door de ecologische waterkwaliteit.. In een systeem gedomineerd door onderwaterplanten blijft er relatief lang zuurstof beschikbaar in de waterbodem en komt CO_2 door diffusie vrij. In een algen of kroos gedomineerd systeem leidt de hoge afbraaksnelheid en beperkte doorzicht tot gereduceerde omstandigheden in de waterbodem waardoor methaan vrijkomt, met name door ebullitie.

Factoren die bepalend zijn voor de ecologische waterkwaliteit, en daarmee voor de BKG-emissies, zijn: nutriëntenbelasting, verblijftijd, temperatuur, waterdiepte, overmatige verwijdering door kreeft en/ of mens en verstoring door bijvoorbeeld woelende vissen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave	6
1 Aanpak	7
2 Emissies van broeikasgassen uit veenweidensloten	8
2.1 Vrijkomen BKG	8
2.2 Seizoensfluctuaties	9
3 Koolstofbronnen	10
3.1 Koolstofbronnen van oppervlaktewater	10
3.2 Biomassa als koolstofbron	11
3.3 Koolstofbronnen van slib	11
4 Ecologische toestand	13
4.1 Broeikasgasemissies en de ecologische toestand	13
4.2 Omstandigheden die de ecologische toestand bepalen	14
5 Conclusie	17
Literatuur	18

1 Aanpak

In deze notitie staat de onderzoeksvraag centraal: Wat zijn de belangrijkste bronnen van de stoffen die voor broeikasgasemissies uit veenweidensloten zorgen?

Er is geen simpel antwoord op de onderzoeksvraag en de achterliggende processen zijn niet alleen complex, maar ook nog eens zeer plaatsspecifiek. Desalniettemin doen wij een aanzet om op basis van literatuur en ervaring de processen te ontrafelen en hierin hoofdzaak en bijzaak te onderscheiden. Dit is gedaan op basis van een literatuur onderzoek en op basis van expert judgement.

Om BKG-emissies uit veensloten te duiden zijn de volgende bouwstenen onderscheiden in de volgende hoofdstukken:

- Gemeten broeikasgasemissies
- Koolstofbronnen waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen bagger/ slib, biomassaproductie en (opgelost) koolstof in de waterkolom
- Ecologische toestand (aeroob of anaeroob) als drijfveer voor BKG-emissies
- Omstandigheden die bepalend zijn voor de ecologische toestand

2 Emissies van broeikasgassen uit veenweidensloten

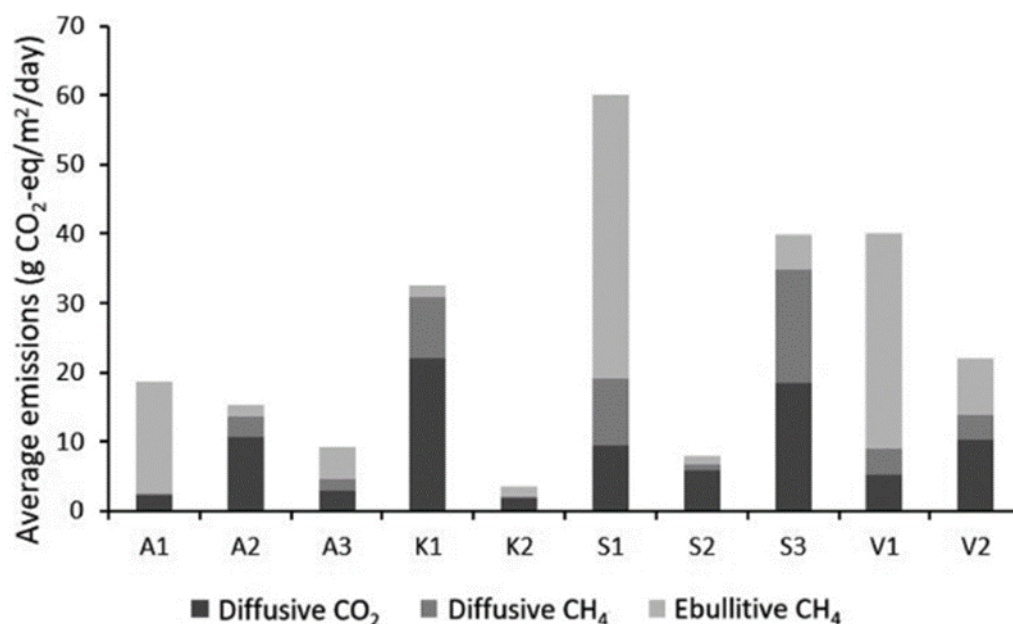
2.1 Vrijkomen BKG

Om de belangrijkste bronnen en processen goed te duiden zijn de emissies zelf een goed uitgangspunt. Broeikasgasemissies uit veensloten omvatten CO₂, CH₄ en N₂O. Alle drie deze gasen komen vrij in de atmosfeer als gevolg van een diffusieflux vanuit het water. Methaan komt ook vrij vanuit ebullitie wanneer de anaërobe, waterige productiezone oververzadigd raakt met methaan (Lafleur, 2009; Whalen, 2005).

In intensief gebruikte veengebieden varieert de gemiddelde jaarlijkse BKG-emissie uit sloten sterk (Figuur 2-1, Hendriks et al., 2023). Hendriks et al. (2023), vinden dat gemiddeld 43% van de totale BKG-emissies werd veroorzaakt door CO₂ en 16% door diffuus CH₄. Ebullitie van CH₄ maakte bijna de helft uit van de totale uitstoot van broeikasgassen (40%). Een recente studie (Niu et al., 2024) naar sloten in agrarisch gebied (niet specifiek veengebieden) toont aan dat 86% van de BKG-emissies uit het slootsysteem wordt geëmitteerd als CH₄, waarvan 81% kan worden toegeschreven aan diffusie en 5% aan ebullitie. In veensloten lijkt CH₄-ebullitie de belangrijkste emissieroute.

Over de emissie van N₂O is weinig bekend. Hendriks et al. (2023) heeft op een aantal momenten N₂O gemeten. De uitstoot van N₂O was toen overwegend laag. Bij agrarische slootsystemen is bekend dat na heftige buien tijdelijk hoge N₂O-emissies kunnen optreden als gevolg van onvolledige denitrificatie in het uit- en afspoelwater (Veraart et al. in prep.).

In alle type sloten draagt de methaanemissies in belangrijke mate bij aan de totale BKG-emissies. In veensloten lijkt dus vooral de ebullitie van methaan hierin relatief belangrijk.



Figuur 2-1 Gemiddelde CO₂ en CH₄-emissies uit 10 sloten in het veenweidegebied in Friesland gemeten tussen mei 2017 en mei 2018 (Hendriks et al., 2023).

2.2 Seizoensfluctuaties

Zowel Hendriks et al., 2023 als Niu et al., 2024 tonen aan dat zowel de diffusieve als ebullitieve fluxen sterk variëren tussen sloottypen, tussen sloten en seizoenen. BKG-emissies zijn hoger in de zomer dan in de winter. In het onderzoek naar veensloten (Friesland) laten Hendriks et al., 2023 zien dat de CO₂-emissies hoger waren in de wintermaanden, terwijl de CH₄-uitstoot door ebullitie hoger was in de lente en vooral in de zomer. Diffuse CH₄-emissies vertoonden geen seizoensgebonden patroon.

De hoge CH₄-emissies door ebullitie in de lente en met name de zomer (Hendriks et al., 2023) kan worden verklaard door de hoge watertemperatuur (Niu et al., 2024). Hendriks et al. (2023) vonden een matig verband tussen organische stofgehalte van de bagger en CH₄-ebullitie. Ze suggereren dat afbraaksnelheid van het organische materiaal van de bagger bepalend is of CH₄ wordt geëmitteerd door diffusie of ebullitie. Sloten met warmere temperaturen en eutrofe systemen worden gekenmerkt door hogere ebullitie (Aben et al. 2017). Het vrijkomen van CH₄ door diffusie is jaarrond met weinig seizoenseffecten. Mogelijk dat in de zomer wel meer CH₄ in het sediment wordt geproduceerd maar dat dit in aerobe zones in de waterbodem en de waterkolom weer wordt geoxideerd (Abdalla et al., 2016; Hendriks et al., 2010; Lafleur, 2009). De seizoensvariatie in CO₂-emissies, waarbij vooral in de wintermaanden de emissie hoog is kan volgens Hendriks et al. (2023) worden verklaard door een hogere primaire productie tijdens de lente- en zomermaanden (algen- en/of plantengroei), gecombineerd met een netto lage aanvoer vanuit percelen door een neerslagtekort op het land en hoge slootwaterpeilen in de zomer. Daarnaast zijn de metingen alleen overdag gedaan, en worden de totale CO₂-fluxen onderschat omdat de CO₂-emissie die gedurende de nachten plaatsvindt als gevolg van een hoge primaire productie niet meegenomen.

Niu et al., 2024 laten zien dat in middelgrote sloten diffusie de CH₄-emissie domineerde en in brede sloten ebullitie domineerde. Hierbij werd diffusie voornamelijk veroorzaakt door de aanvoer van voedingsstoffen, terwijl hydrologische factoren zoals watertemperatuur en diepte bepalend waren voor de ebullitie.

3 Koolstofbronnen¹

De meeste BKG-emissies uit oppervlaktewater komen vrij als het organische materiaal in het water en slib (bagger) op de bodem van de sloot wordt afgebroken (Algesten et al. 2003). Het organische materiaal dat wordt afgebroken en waarbij broeikasgassen vrij kunnen komen is aanwezig in het water als opgeloste koolstofmoleculen, (micro)algen, planten, en in het slib (bagger) op de bodem van de sloot. Deze volgorde is – onder normale omstandigheden – ook de volgorde waarin de hoeveelheid koolstof uitgedrukt per oppervlak water toeneemt. Hoe groter de koolstofvoorraad, hoe meer materiaal in potentie beschikbaar is voor mineralisatie (afbraakproces van het organisch materiaal).

De afbraaksnelheid van het organisch materiaal is afhankelijk van de complexiteit van dit organische materiaal, de diversiteit van aanwezige bacteriepopulaties, en de fysische omstandigheden (temperatuur, zuurstof) waarin organisch materiaal wordt afgebroken. Algen breken bijvoorbeeld sneller af dan waterplanten (Vahatalo et al., 2010; West et al., 2012; Van Bergen et al., 2019) en die breken weer sneller af dan intact veen. Terrestrisch materiaal bestaat vaak uit complexe organische bindingen, waardoor dit materiaal langzamer afbreekt dan waterplanten of algen (Grasset et al. 2018). Ook blijkt dat koolstof afkomstig uit algen gemakkelijker wordt omgezet in methaan dan andere bronnen van koolstof (West et al., 2012). Ontwaterd, veraard veen breekt sneller af dan matig tot onveraard veen (Zak en Gelbrecht, 2007).

Bij het beter duiden van de verschillende koolstofbronnen en de verwachte relatieve bijdrage aan de totale BKG-emissies uit de sloot, worden de volgende bronnen onderscheiden: koolstofbronnen van oppervlaktewater, biomassaproductie en van slib. Deze worden in de volgende paragrafen één voor één behandeld

3.1 Koolstofbronnen van oppervlaktewater

Organisch koolstof in de waterkolom bestaat uit particulier materiaal (<45 µm) en opgelost materiaal. Het particuliere materiaal bestaat uit (micro)algen die in de waterkolom leven en microdeeltjes die qua samenstelling vergelijkbaar zijn met het slib. Deze laatste bron is het particulier materiaal dat in stilstaand of langzaam stromend water bezinkt en door wind of vissen kan dit weer opwervelt. Opgelost organisch koolstof (DOC) dat uitspoelt uit de ontwaterde aerobe veenbodem bestaat voornamelijk uit stabiele organische moleculen; aromatische en complexe verbindingen zoals humuszuren (Höll et al., 2009). Deze moleculen ontstaan bij de aerobe afbraak van organisch materiaal en zijn zelf moeilijk afbreekbaar. Na vernatting van het veen neemt de concentratie DOC in het bodemprofiel af, maar neemt de bijdrage van moleculen die relatief makkelijk afbreken toe (Höll et al., 2009). Micro-algen zijn daarentegen gemakkelijk afbreekbaar.

Het effect van DOC en particulier materiaal op de directe broeikasgasemissies is naar verwachting beperkt omdat de hoeveelheid koolstof per emitterend wateroppervlak relatief klein is in verhouding tot de hoeveelheid koolstof in organisch slib en het (deels) een relatief lage afbraaksnelheid heeft.

Wat de bijdrage is van particulier organisch materiaal in de waterkolom, waaronder in de vorm van micro-algen aan de emissie van broeikasgassen is onbekend. In een watersysteem dat rijk is aan micro-algen is de snelle afbraaksnelheid en de relatief kleine hoeveelheid koolstof (uitgedrukt in kg koolstof per oppervlak water) de reden om aan te nemen dat microalgen zelf waarschijnlijk niet een belangrijke koolstofbron zijn en ook niet substantieel bijdragen aan de baggerlaag. (Micro)algen hebben, net als

¹ Veel van de teksten in dit hoofdstuk zijn in meer of mindere mate gekopieerd uit de Deltafact van STOWA: [Broeikasgasemissies uit zoetwater | STOWA](#) en de bijbehorende achtergronddocumenten zoals "Relevante processen".

DOC en particulier materiaal in de waterkolom wel een groot indirect effect op afbraak en emissies omdat ze het redoxpotentiaal beïnvloeden en het doorzicht beperken (zie onder kopje ecologische toestand).

3.2 Biomassa als koolstofbron

De koolstofkringloop in watersystemen begint met de primaire productie. Hierbij nemen planten en algen overdag CO_2 op en binden deze in organische vorm (alg- /plantmateriaal). In het donker stoten de planten en algen weer CO_2 uit. Nadat de biomassa afsterft wordt dit ook deels omgezet in CO_2 of CH_4 . De vorm en omvang van de primaire productie is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van licht en de beschikbaarheid van nutriënten (voornamelijk stikstof (N) en fosfor (P)), die tegelijkertijd door planten worden opgenomen.

Biomassaproduktie in de sloot lijkt in de huidige omstandigheden in veensloten een relatief beperkte koolstofbron te zijn. In de meeste sloten in het veenweidegebied is de biomassaproduktie van (onder)waterplanten beperkt, vaak is er nog wel vegetatie langs de oever. Voordat planten zelf een bron van BKG-emissies worden nemen veel aquatische planten en algen juist CO_2 of bicarbonaat op uit het water. Daarnaast worden de planten die er nog staan aan het eind van het groeiseizoen veelal verwijderd tijdens het jaarlijkse 'slootschonen'. Uit een studie van een kleine stedelijke vijver met minerale bodem bleek dat primaire produktie slechts een kleine rol speelde in het produceren van koolstof die later als broeikasgassen geëmitteerd worden en dat broeikasgasemissies vooral gerelateerd konden worden aan allochtone input van koolstof uit de aangrenzende bodem (Van Bergen, 2019).

Sloten met een hoge biomassaproduktie die niet jaarlijks wordt verwijderd, zullen hier naar verwachting een uitzondering op zijn. In sloten met woekerende kroossoorten, draadalgen, krabbenscheer of flab kan de interne biomassa-produktie wel een belangrijke koolstofbron zijn. In deze sloten zijn de verwachte BKG-emissies (zeer) hoog omdat deze planten niet alleen grote hoeveelheden gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal vormen, maar ook het wateroppervlak afsluiten waardoor zuurstofloze omstandigheden ontstaan. Gedurende het groeiseizoen is de aanwas van biomassa groter dan de afbraak hiervan waardoor het deel gaat uitmaken van de bagger op de slootbodem.

3.3 Koolstofbronnen van slib

Koolstofbronnen van slib in veensloten kunnen bestaan uit aangevoerd (terrestrisch) organisch bodemmateriaal, afgestorven kroos, algen en waterplanten en gemineraliseerde slootbodem. Organisch materiaal wordt aangevoerd vanuit veenpercelen door erosie en uitspoeling en afstroming van deeltjes. Afgestorven algen en planten groeien in de waterkolom en zinken naar de bodem (detritus) waar ze vervolgens accumuleren of afbreken. Het type en de hoeveelheid primaire produktie is van invloed op de voorraad aan organisch koolstof in het slib.

Betrouwbare gegevens over de relatieve bijdrage van de verschillende koolstofbronnen van het slib, de fractionering (afbreekbaarheid) hiervan en de invloed van processen welke de beschikbaarheid en de vorm van koolstof beïnvloeden ontbreken nog, maar zijn essentieel om de input van koolstof in watersystemen en de uitstoot van broeikasgasemissies in te kunnen schatten. Hieronder onderbouwen we waarom erosie van organisch bodemmateriaal naar verwachting de belangrijkste bron is.

Er is wel ervaring en beperkte (grijze) literatuur beschikbaar over de aanwas van bagger in het veenweidegebied (Westerman pers. com., Joosten et al. 2015). Bij het onderhoud van sloten wordt in het veenweidegebied voor de baggercyclus uitgegaan van een baggeraanwas van 2 tot 5 cm per jaar, afhankelijk van het gebied. Dit is (meer dan) het dubbele van dan de baggeraanwas die wordt aangenomen in sloten met een minerale bodem (persoonlijke communicatie baggerplanners waterschap Amstel, Gooi en Vecht). In voedselrijke watersystemen met een vergelijkbare

biomassaproductie, maar andere grondslag (mineraal of veen) is de slibaanwas dus niet vergelijkbaar; deze is groter in veensloten. Het is daarom aannemelijk dat het veen zelf een belangrijke bron is.

Dat bagger in het veenweidegebied vooral het erosieproduct van het veen zelf is, is in het veld ook duidelijk zichtbaar (Figuur 3-1). Veensloten kenmerken zich door een relatief dikke baggerlaag (vaak meer dan 30cm) en aan de bruine kleur van de bagger is te zien dat dit vooral veraard veen betreft en niet het zwarte product van plantenresten. In veenbodems is de teeltlaag en de laag onder de teeltlaag maar boven de grondwaterspiegel deels veraard door de indringing van zuurstof in het bodemprofiel. Veraarding zorgt voor veranderingen in de fysieke eigenschappen van het veen waarbij het overgebleven veen zijn structuur verliest (Smolders et al. 2013). Baggervorming in sloten of na vernatting is een gevolg van het structuurverlies van veen na veraarding/oxidatie (Smolders et al. 2013). Dit veen erodeert veelal van onder de waterlijn. Zelfs in sloten waar ogenschijnlijk vegetatie langs de oever staat, is bij nader onderzoek de oever vaak onderholt. Veen wordt richting de sloot gedrukt. De mate van erosie en de afbraaksnelheid is afhankelijk van het veentype, van de bodemstructuur en mogelijk ook van de mate waarin dit veen (historisch) door ontwatering is geoxideerd. De afbraaksnelheid van het geërodeerde veen en de factoren die deze afbraaksnelheid van het veen bepalen is nog een kennishiaat.

Het 'wegdrukken' van veen naar de sloot wordt veroorzaakt door de fysieke belasting in combinatie met schuifspanning. De schuifspanning van veen (de energie die nodig is deeltjes te laten schuiven) neemt af met een toenemende mate van bevochtiging en de mate van veraarding van het veen (Tuukkanen et al., 2014) en schuift naar de plek met de minste weerstand; de sloot. Langdurig natte omstandigheden leiden daarom tot een (grote) aanwas van bagger. Veengebieden met een kleine drooglegging (<30cm) worden gekenmerkt door een hoge baggeraanwas (ervaring natuurgebieden met peilopzet). Erosie vindt ook plaats vanuit verzakte oeverzones. Langs sloten met een relatief kleine drooglegging (<50cm) en met beweiding is vaak een 1,5m brede verzakte oeverzone zichtbaar. Deze verzakte zone is zeer gevoelig voor erosie – weer vooral van onder deze zone en niet zozeer door oppervlakkige afspoeling.

Stevig wortelende, inundatietolerante vegetatie op het terrestrische deel van de oever is essentieel om de oever te beschermen en erosie te beperken. Oevervegetatie in de aquatische oeverzone die in de onderwaterbodem wortelt is ook belangrijk om de oever te beschermen tegen erosie. Vooral om erosie vanonder de vegetatie op de terrestrische oever te beperken. Deze vegetatie zou in een smalle beschermende strook langs de oever juist aan het eind van het groeiseizoen moeten blijven staan, in plaats van standaard te worden verwijderd tijdens het jaarlijks 'slootschonen'.



Figuur 3-1 Typische veensloot met 50 cm bagger (links). Rechts is te zien dat deze bagger voornamelijk uit veen zelf bestaat (bruine kleur). Op de toplaag van de bagger zijn nog resten te zien van door plantmateriaal (zwarte kleur). Op de achtergrond is te zien dat veel van het plantmateriaal in het najaar is verwijderd en op de kant ligt. Onder de graszone is de oever onderholt en erodeert het geoxideerde veen uit het perceel tot bagger.

4 Ecologische toestand

4.1 Broeikasgasemissies en de ecologische toestand

De actuele ecologische toestand in de sloot is bepalend voor BKG-emissies uit de sloot; BKG-emissies zijn relatief laag in een voedselarm systeem dat wordt gedomineerd door ondergedoken waterplanten en relatief hoog in een voedselrijk, algen of kroos gedomineerd systeem (Aben et al., 2022; van Bergen et al. 2019; Davidson et al. 2018, deltafact STOWA). Een goede ecologische toestand wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een diversiteit aan flora en fauna en een diversiteit aan groeivormen van waterplanten. Met name planten die onder water groeien zijn dus niet alleen bepalend voor de ecologische toestand, maar ook voor de BKG-emissies.

In systemen die rijk zijn aan onderwaterplanten is de gemeten BKG-emissies lager dan in systemen waar geen ondergedoken waterplanten voorkomen (Aben et al., 2022). Waterplanten sterven in de winter af en worden onderdeel van de sliblaag. Het afbraakproces van waterplanten verloopt relatief langzaam, omdat de plantenresten veelal grof zijn, complex qua structuur en weinig nutriënten bevatten (hoog C:N ratio, Van den Berg et al., 2012; Deng et al, 2023). Daarnaast brengen planten zuurstof in de waterkolom en sommige planten ook in de sliblaag/ waterbodem. Hierdoor blijft er relatief lang zuurstof beschikbaar in de onderwaterbodems, waardoor de afbraakprocessen aeroob kunnen plaatsvinden en er dus hoofdzakelijk CO₂ wordt geproduceerd. Waterplanten zijn bepalend voor de BKG-emissies door hun invloed op de zuurstofdynamiek en het redoxpotentiaal (zie kader) in het water en de waterbodem.

Redoxpotentiaal

Welke microbiële organismen de mineralisatie uitvoeren, is een belangrijke factor voor de ordegrrootte van de totale BKG-emissies. Welk type organisme actief is wordt bepaald door de beschikbaarheid en samenstelling (lees afbreekbaarheid) van het organische materiaal, de lokale omstandigheden en de beschikbaarheid van elektronenacceptoren. Om organische moleculen af te breken hebben micro-organismen moleculen nodig die elektronen kunnen opnemen. In volgorde van energetisch meest gunstig, zijn deze elektronenacceptoren: zuurstof, nitraat, mangaan (IV), ijzer (III), sulfaat en CO₂. Voor micro-organismen is het mineraliseren van makkelijk afbreekbare organische moleculen energetisch het meest gunstig als ze zuurstof kunnen gebruiken. Dit wordt aerobe afbraak genoemd waarbij CO₂ vrijkomt. Pas als het zuurstof op is worden afbraakprocessen anaeroob en vindt afbraak plaats waarbij gebruik wordt gemaakt van: nitraat, mangaan, ijzer en sulfaat, en in deze volgorde. Pas nadat deze elektronenacceptoren beperkt tot niet meer beschikbaar zijn vindt methanogenese plaats waar methaan bij vrijkomt, CO₂ wordt hierbij gebruikt als elektronacceptor. De aanwezigheid van elektronenacceptoren wordt geduid als het redoxpotentiaal en is sterk bepalend voor de afbraak van organische stof en welke stoffen hierbij vrijkomen.

De aanwezigheid van elektronenacceptoren wordt beïnvloed door de ontwateringsdiepte en de herkomst (samenstelling) van het veen (Zak et al. 2010, Aggenbach et al. 2013). In het westen van Nederland bevat het laagveen relatief veel zwavel en bij lage grondwaterstanden zal er aerobe oxidatie van pyriet (FeS₂) optreden waarbij makkelijk oplosbaar ijzer (Fe²⁺) en sulfaat (SO₄²⁻) wordt gevormd. Dit sulfaat kan gemakkelijk naar het oppervlaktewater uitspoelen (Vermaat et al., 2016). Wanneer veen vernat en anoxisch wordt zal er minder sulfaat uitspoelen, omdat zwavel niet meer oxideert en sulfaat wordt gereduceerd en samen met ijzer pyriet vormt. Dit betekent dat de beschikbaarheid van de elektronenacceptor sulfaat afneemt na vernatting en er sneller methanogenese kan optreden (o.a. Smolders et al, 2013).

In veenweidesloten met een slechte ecologische toestand wordt de primaire productie gedomineerd door (micro-)algen of kroos, terwijl waterplanten meestal helemaal ontbreken door een gebrek aan licht. De volgorde van processen is dat de hoge nutriëntenbelasting kan leiden tot een sterke kroos of algengroei waardoor het lichtklimaat voor waterplanten wordt beperkt. De hoogste BKG-emissies zijn gemeten in systemen die worden gedomineerd door kroos (Aben et al., 2022). Algen en kroos sterven snel af in verhouding tot waterplanten omdat ze bestaan uit makkelijk afbreekbaar organisch materiaal, waardoor het zuurstof in de onderwaterbodems snel opdraait (Aben et al. 2017; Velthuis et al. 2018; Davidson et al. 2018). Algen en kroos kunnen ook het wateroppervlak in zijn geheel afsluiten waardoor de waterkolom snel zuurstofloos en donker wordt. De hoge BKG-emissies zijn zowel het directe gevolg van de hoge productie snel afbreekbaar organisch materiaal als het indirecte gevolg door de anaerobe omstandigheden die leiden tot een slechte waterkwaliteit (Aben et al., 2022).

De snelle afbraak van de algen zorgt ervoor dat de afbraak anaeroob wordt waarbij uiteindelijk methanogenese plaatsvindt (zie kader). Hierbij komt op den duur dus CH_4 vrij en in sommige gevallen N_2O vrij. Ook wanneer er wel planten aanwezig zijn in voedselrijke systemen kunnen grote hoeveelheden algen er voor zorgen dat plantenresten sneller worden afgebroken (Deng, et al., 2023). Als de temperatuur én de nutriëntenbelasting verhoogd zijn, treedt een versterkend effect op, waarbij de BKG-emissies verder toenemen (Davidson et al. 2018).

4.2 Omstandigheden die de ecologische toestand bepalen

Verschillende **slooteigenschappen** zijn belangrijk voor de ecologische waterkwaliteit en de primaire productie in de sloot. Dit zijn de nutriëntenbelasting, het lichtklimaat, verblijftijd en waterdiepte.

Voldoende licht op de waterbodem is de belangrijkste voorwaarde voor de groei van onderwaterplanten. Het lichtklimaat voor ondergedoken planten wordt niet alleen beïnvloed door (micro-)algen of kroos die het wateroppervlak afsluiten, maar ook door opwervende slibdeeltjes en humuszuren (DOC). Wanneer veel kleine particuliere deeltjes en humuszuren in het water zitten wordt het licht uitgedoofd.

Woelende vissen en kreeften doen veel schade in veensloten. Ze vreten alle vegetatie weg, maar doen ook veel schade aan oevers. Woelende vissen leiden tot opwerveling van slib waardoor het lichtklimaat verslechtert. Wanneer minder licht beschikbaar is voor plantengroei kan een watersysteem makkelijker omslaan naar een algen gedomineerd watersysteem. Opwerveling en algen zorgen voor een slecht doorzicht wat plantengroei remt. Wanneer een systeem is verstoord kan het omslaan van een goede naar een slechte waterkwaliteit. De omstandigheden moeten echter beter zijn voor de omslag terug naar een goede waterkwaliteit.

Bij een **hoge nutriëntenbelasting** kunnen algen en kroos (gaan) domineren bij en bij van het water (weinig stroming). Niet de nutriëntenconcentratie maar de belasting is bepalend voor de waterkwaliteit. De concentratie geeft namelijk aan hoeveel op een bepaald moment beschikbaar is en is meer een resultante dan sturend voor de ecologische toestand. Bijvoorbeeld omdat waterplanten nutriënten opnemen. Een hoge belasting is wel bepalend, omdat dit aangeeft dat er ook een continue aanvoer van nutriënten is waardoor algen zich kunnen blijven vormen.

Naast de nutriëntenbelasting heeft ook **verblijftijd** een groot effect op de productie van algen. Bij een lange verblijftijd van het water in een sloot met een hoge nutriëntenbelasting hebben algen en kroos de tijd om te groeien. Bij een korte verblijftijd – hoge doorspoeling – is de ontwikkeling van algen beperkt (Schip, 2015).

De snelheid waarmee mineralisatieprocessen plaatsvinden is naast de samenstelling van het organische materiaal en het redoxpotentiaal ook afhankelijk van **temperatuur**. Biologische processen, zowel de primaire productie als mineralisatie, gaan sneller bij hogere temperaturen (Abdalla et al., 2016; Lafleur, 2009; Velhuizen et al., 2018; Van Bergen et al., 2019).

Waterdiepte is een sleutelfactor voor de algehele (ecologische) waterkwaliteit en BKG-emissies omdat het van invloed is op de temperatuur, het redoxpotentiaal, de nutriëntenbelasting en de verblijftijd. Ondiepe sloten warmen in de zomer sneller op dan diepere sloten. Door versnelde afbraak wordt de waterbodem eerder zuurstofloos. Hierdoor ontstaan omstandigheden waarbij de nutriëntenbelasting, en in veengebieden met name de fosforbelasting, sterk kan toenemen als gevolg van interne eutrofiëring (Smolders et al., 2009).

Bij interne eutrofiëring neemt de fosfor (P)-beschikbaarheid sterk toe onder anaerobe omstandigheden wanneer micro-organismen ijzer (Fe III) gaan gebruiken. Het gedrag van fosfaat in het watersysteem is namelijk (deels) afhankelijk van de capaciteit van de slootbodem om fosfaat te binden. Fosfaat bindt aan ijzer(hydr)-oxides waarin ijzer aanwezig is als Fe(III). Wanneer Fe(III) wordt gereduceerd naar Fe(II) gaan de Fe(hydr)-oxides (deels) in oplossing; de oplosbaarheid van Fe(II) is veel hoger dan van Fe(III). Het gevolg is dat het fosfaat dat aan het oppervlak van deze Fe(hydr)oxide gebonden zat vrij komt (Patrick en Khalid, 1974). De directe P beschikbaarheid neemt daardoor sterk toe. Naast P komt ook het gereduceerde Fe(II) in oplossing.

Sulfaat speelt een belangrijke rol in dit proces omdat het de beschikbaarheid van P beïnvloedt. Sulfaat kan in anaerobe (sloot)bodems ook fungeren als electronenacceptor. De reductie van sulfaat is energetisch iets ongunstiger maar treedt ook op als Fe-reductie nog optreedt. Bij sulfaatreductie wordt sulfide gevormd. Dit reageert met het gereduceerde ijzer in de bodem waarbij moeilijk oplosbare ijzersulfiden (FeS_x) worden gevormd (Lamers et al., 1998; Smolders et al., 2006). Wanneer het gereduceerde ijzer reageert met het sulfide kan het Fe(II) niet meer oxideren tot Fe(hydr)oxide wanneer de omstandigheden weer oxidisch worden. Hierdoor gaat er bindingsoppervlak voor fosfaat blijvend verloren. De vrijgekomen P blijft nu mobiel.

De capaciteit van de slootbodem om fosfaat te binden en na te leveren wordt geschat op basis van de verhouding tussen ijzer en fosfaat en tussen ijzer en sulfaat in het porievocht van de slootbodem en/of het sediment (Geurts et al., 2010; Dijkstra et al., 2013; Poelen et al., 2012). Verschillende drempelwaarden zijn hierbij afgeleid waaronder het risico op fosfaatsnauwelijking laag is.

Verwijdering van planten en bagger uit de sloot is nog een factor die bepalend is voor de ecologische waterkwaliteit. Planten en bagger worden primair verwijderd om een goede afwatering in de wintermaanden te waarborgen. Verwijdering van planten (slootschonen) en van bagger is in principe ook goed voor de ecologie door het creëren van voldoende waterdiepte en omdat daarmee ook nutriënten worden verwijderd zodat het watersysteem niet eutrofieert. Wanneer planten echter te rigoreus worden verwijderd – dit kan door kreeften, door de mens of een combinatie – wordt de stabiliserende en bufferende factor verwijderd (Teurlinx, 2018). Hierdoor verandert de zuurstofdynamiek en wordt het water sneller zuurstofloos. Daarnaast verdwijnt de buffering van nutriënten (planten nemen nutriënten op), vindt er minder bezinking van bodemdeeltjes plaats en wervelt het slib op de bodem makkelijker op. Wanneer te rigoreus wordt gebaggerd kan dit leiden tot een verergering van afkalving of erosie van oevers. Dit leidt potentieel tot de vicieuze cirkel waarbij een extra aanwas van koolstof en nutriënten leidt tot een slechtere waterkwaliteit en hogere BKG-emissies

Er is een precair evenwicht in sloten in het veenweidegebied. Een goed evenwicht waarbij emerse en terrestrische oevervegetatie zorgt voor stabiliteit van de oever en een beperkte erosie onder de waterlijn, leidt tot voldoende doorzicht en waterdiepte in de sloot voor ondergedoken watervegetatie dat zuurstof in de waterkolom en waterbodem brengt. Ondanks de grote hoeveelheid aan potentieel afbreekbaar organisch materiaal, zijn broeikasgasemissies laag. Dit systeem kan alleen zo blijven door terughoudend beheer; alleen verwijdering wanneer nodig om eutrofiëring en eventueel verlanding te voorkomen en de sloot op voldoende waterdiepte te houden. Dit goede evenwicht kan om allerlei redenen gemakkelijk worden verstoord.

In de huidige praktijk zijn veensloten veelal gedomineerd door (micro-)algen of kroos en als er al ondergedoken waterplanten aanwezig zijn, dan worden deze jaarlijks verwijderd (slootschonen). Langs

oevers staat bijna overal emerse oevervegetatie maar deze wordt ook jaarlijks verwijderd. Als gevolg is de oever in de wintermaanden op en vooral onder de waterlijn niet begroeid en niet beschermd waardoor structuurloos geoxideerd veen gemakkelijk van onder de terrestrische oevervegetatie weg kan spoelen. Beheer van de terrestrische oever bepaalt in sterke mate of er de gewenste inundatietolerante en stevig wortelende vegetatie staat. Wanneer tot de waterlijn intensief wordt gemaaid, staat er veelal alleen grasvegetatie die weinig bescherming biedt aan de oever. Belasting met vee is dan vaak hoger dan de draagkracht, vooral op verzakte oeverzones. Veensloten worden vaak gekenmerkt door grote hoeveelheden bagger in de sloot en een (te) beperkte waterdiepte. De hoge nutriëntenbelasting uit (water)bodem, slecht doorzicht en hoge temperaturen in de zomermaanden leiden tot de omstandigheden waarbij de ecologische waterkwaliteit slecht is en broeikasgasemissies uit sloten hoog zijn door ebullitie van methaan.

5 Conclusie

BKG-emissies zijn moeilijk te kwantificeren omdat:

- De afbraaksnelheid van de verschillende C-bronnen belangrijk is, maar het onbekend is wat de exacte samenstelling is van het organische stof in het slib – vooral de afbraaksnelheid van het geërodeerd veen is nog een kennishiaat.
- Er veel lokale variatie is in emissies, door de verhouding tussen vastlegging en vrijkomen van koolstof in bagger, de verhouding tussen de verschillende externe koolstofbronnen (erosie en interne productie) en de lokale omstandigheden (nutriëntenbelasting, waterdiepte, verblijftijd van water, vegetatie, lokaal (historisch) beheer, effect van drains, kwel en opbarsting).

Broeikasgasemissies zijn de resultante van afbraakprocessen in voornamelijk slib/ bagger en soms ook van deeltjes in de waterkolom. Erosie van geoxideerd veen zonder structuur is de belangrijkste koolstof bron van bagger in veensloten. Erosie vindt vooral onder de waterlijn plaats. Het type veen, de drooglegging en fysieke belasting zijn belangrijke factoren voor de aanwas van bagger. Primaire productie *in* de sloot lijkt in de huidige omstandigheden in veensloten een beperkte koolstof bron te zijn. Uitzonderingen zijn sloten met een hoge biomassaproductie dat niet jaarlijks integraal wordt verwijderd, bijvoorbeeld met woekerende kroos, krabbenscheer of flab. Primaire productie van met name kroos en (micro-)algen en uitspoeling van humuszuren uit percelen zijn vooral indirect van invloed op de BKG-emissies omdat ze bepalend zijn voor de omstandigheden waaronder broeikasgassen vrijkomen.

De snelheid waarmee broeikasgassen ontstaan, de vorm (CO_2 , CH_4 (N_2O is veelal onbekend)) en emissieroute (CO_2 -diffusie of CH_4 -ebullitie) worden vooral bepaald door de waterkwaliteit in de waterkolom; is deze gedomineerd door waterplanten of door kroos of algen. In een onderwaterplanten gedomineerd systeem blijft er relatief lang zuurstof beschikbaar in de waterbodem en komt CO_2 door diffusie vrij. In een algen of kroos gedomineerd systeem leidt de snelle afbraaksnelheid van het slib dat wordt gevormd door algen en kroosbiomassa tot gereduceerde omstandigheden in de waterbodem waardoor methaan vrijkomt, met name door ebullitie.

Factoren die sterk bepalend zijn voor de ecologische waterkwaliteit in, en broeikasgassen uit de sloot zijn: nutriëntenbelasting, doorzicht, verblijftijd, temperatuur, waterdiepte, overmatige verwijdering door kreeft en/ of mens en verstoring door bijvoorbeeld woelende vissen. Deze factoren zijn dus ook de sleutel tot herstel.

Literatuur

- 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.
- Aben, R.C.H., Barros, N., Van Donk, E., Frenken, T., Hilt, S., Kazanjian, G., Lamers, L.P.M., Peeters, E.T. H. M., Roelofs, J.G.M., de Senerpont Domis, L. N., Stephan, S., Velthuis, M., Van de Waal, D.B., Wik, M., Thornton, B F., Wilkinson, J., DelSontro, T., Kosten, S.** (2017) Cross continental increase in methane ebullition under climate change. *Nature Communications*, 8(1), 1–8.
- Aggenbach, C.J.S., Backx, H., Emsens, W.J., Grootjans, A.P., Lamers, L.P.M., Smolders, A.J.P., Stuyfzand, P.J., Wolejko, L., van Diggelen, R.** (2013) Do high iron concentrations in rewetted rich fens hamper restoration? *Preslia*, 85, 405–420.
- Cauwet G** (2002) "DOM in the Coastal Zone". In: Hansell D and Carlson C (Eds.) *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, pages 579–610, Elsevier. ISBN 9780080500119.
- Deltafact STOWA: [Broeikasgasemissies uit zoetwater | STOWA](#) en de bijbehorende achtergronddocumenten zoals "Relevante processen".
- Davidson, T.A., Audet, J., Jeppesen, E., Landkildehus, F., Lauridsen, T. L., Søndergaard, M., Syväranta, J.** (2018) Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes. *Nature Climate Change* 8, 156–160. doi:10.1038/s41558-017-0063- z.
- Deng, Y, Yan, Y., Wu, Y., Liu, G., Ma, J., Xu, X., Wang, G.** (2023) Response of aquatic plant decomposition to invasive algal organic matter mediated by the co-metabolism effect in eutrophic lakes, *Journal of Environmental Management*, Volume 329, 2023, 117037, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117037>.
- Geurts, J. J., Smolders, A. J., Banach, A. M., van de Graaf, J. P., Roelofs, J. G., & Lamers, L. P.** (2010). The interaction between decomposition, net N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens. *Water Research*, 3487-3495. doi:10.1016/j.watres.2010.03.030
- Grasset, C.,R. Mendonça, G. Villamor Saucedo, D. Bastviken, F. Roland, Sobek, S.** (2018) Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter. *Limnol.Oceanogr.* 63: 1488–1501.
- 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
- Hendriks, L., Weideveld, S., Fritz, C., Stepina, T., Aben, R. C. H., Fung, N. E., & Kosten, S.** (2024) Drainage ditches are year-round greenhouse gas hotlines in temperate peat landscapes. *Freshwater Biology*, 69, 143–156. <https://doi.org/10.1111/fwb.14200>
- Höll B.S., Fiedler S, Jungkunst H.F., Kalbitz K., Freibauer A., Drösler M., Stahr K.** (2009) Characteristics of dissolved organic matter following 20years of peatland restoration. *Sci Total Environment* 15;408(1):78-83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.046.
- Joosten, L., Westerhof, R., Terwan, P.** (2015) Investeren in stabiele oevers, alternatief voor baggeren? Een verkennende studie naar kosten/baten en effecten op waterkwaliteit, klimaat en biodiversiteit in Laag Holland, Projectnummer ORG-ID 080705
- Lamers, L. P., Tomassen, H. B., & Roelofs, J. G.** (1998). Sulfate-Induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. *Environmental Science & Technology*, 32(2), 199-205.
- Lafleur, P. M.** (2009) "Connecting atmosphere and wetland: Trace gas exchange." *Geography Compass* 3(2): 560-585.
- Niu et al.**, 2024
- Patrick W.H., & Khalid, R.A.** (1974). Phosphate release and sorption by soils and sediments: effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science*, 53-55. doi:10.1126/science.186.4158.53
- Schep, S. van der Wal, B. van der Wijngaart, T.** (2015) Ecologische sleutelfactoren voor het herstel van onderwatervegetatie. Toepassing van de ecologische sleutelfactoren 1, 2 en 3 in de praktijk. STOWA

- Smolders A.J.P.; J.M.H. van diggelen; J.J.M. Geurts; M.D.M. Poelen; J.G.M. Roelofs E.C.H.E.T. Lucassen L.P.M. Lamers** (2013) Waterkwaliteit in het veenweidegebied De complexe interacties tussen oever, waterbodem en oppervlaktewater. Landschap 2013-3_145-153.
- Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M., Lucassen, E.C.H.E.T., Van der Velde, G., Roelofs, J.G.M.,** (2006) Internal eutrophication: how it works and what to do about it e a review. *Chemistry and Ecology* 22 (2), 93e111.
- Teurlincx, S., Pot, R., Bakker, E. S., & de Senerpont Domis, L.** (2018) Ecologische sleutelfactor Verwijdering. STOWA
- Tuukkanen T, H Marttila, B Klöve** (2014) Effect of soil properties on peat erosion and suspended sediment delivery in drained peatlands. *Water Resources Research* 50(4)
- Vahatalo, A. V., Aarnos, H., and Mantyniemi, S.** (2010). Biodegradability continuum and biodegradation kinetics of natural organic matter described by the beta distribution. *Biogeochemistry* 100, 227–240. doi: 10.1007/s10533-010-9419-4
- Van Bergen, T. J., Barros, N., Mendonça, R., Aben, R. C., Althuisen, I. H., Huszar, V., Lamers, L.P.M., Lurling, M., Roland, F. & Kosten, S.** (2019) Seasonal and diel variation in greenhouse gas emissions from an urban pond and its major drivers. *Limnology and Oceanography* 64(5):2129-2139.
- Van den Berg, L., Poelen, M.D.M, Jaarsma, N., Geurts, J., Brederveld, R.J., Lamers, L.** (2012) WaterBODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en Nutriënten (BAGGERNUT) - De rol van vissen, planten, zuurstof en temperatuur bij de nalevering van nutriënten. Resultaten experimenten RUN en B-Ware
- Velthuis, M., Kosten, S., Aben, R., Kazanjian, G., Hilt, S., Peeters, E. T. H. M., Van Donk, E. & Bakker, E. S.** (2018) Warming enhances sedimentation and decomposition of organic carbon in shallow macrophyte-dominated systems with zero net effect on carbon burial. *Global change biology*, 24(11), 5231-5242.
- Veraart et al.** in prep
- Vermaat, J.E., Harmsen, J., Hellmann, F.A., van der Geest, H.G., de Klein, J.J., Kosten, S., Smolders, A.J.P., Verhoeven, J.T.A., Mes, R.G., Ouboter, M.** (2016) Annual sulphate budgets for Dutch lowland peat polders: The soil is a major sulphate source through peat and pyrite oxidation. *Journal of Hydrology*, 533, 515–522.
- West, W. E., J. J. Coloso, and S. E. Jones.** 2012. Effects of algal and terrestrial carbon on methane production rates and methanogen community structure in a temperate lake sediment. *Freshwater Biol.* 57: 949–955. doi:10.1111/j.1365-2427.2012.02755.x
- Zak D., Gelbrecht, J.** (2007) The mobilisation of phosphorus, organic carbon and ammonium in the initial stage of fen rewetting (a case study from NE Germany). *Biogeochemistry*, 85:141–151.
- Zak D., Wagner, C., Payer, B., Augustin, J., Gelbrecht, J.** (2010) Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. *Ecological Applications*, 20(5), 1336–1349.



Nutriënten Management Instituut BV
Nieuwe Kanaal 7c
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03
e-mail: nmi@nmi-agro.nl
website: www.nmi-agro.nl