

Achtergronddocument relevante processen

Inleiding

De Deltafact "Broeikasgasemissies uit zoetwater" beschrijft de huidige stand van kennis op het gebied van broeikasgasproductie en uitstoot uit aquatische systemen. Hierbij ligt de focus op meren en plassen. Deze bijlage geeft nadere informatie over de onderliggende relevante processen van de aquatische koolstofkringloop.

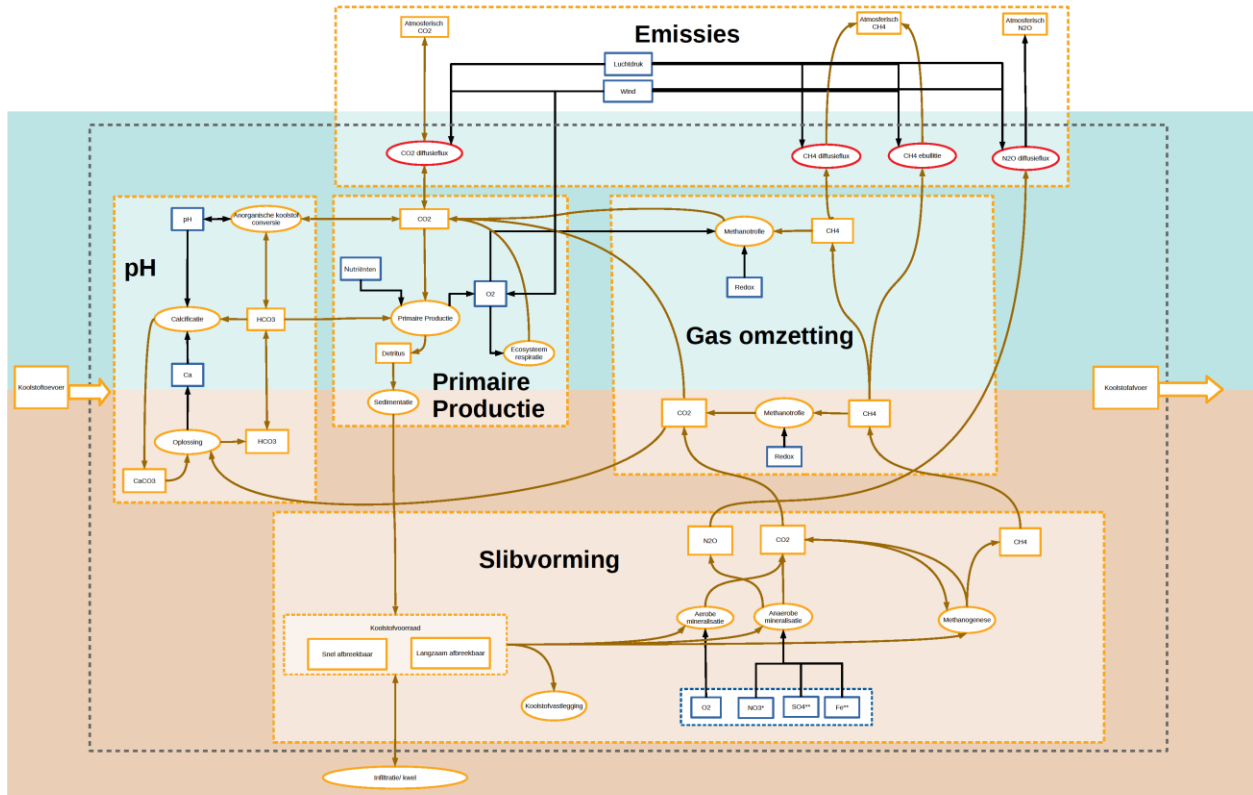
Processen van de aquatische koolstofkringloop

De koolstofkringloop van meren en plassen is complex. Het is dan ook belangrijk om inzicht te krijgen in de relevante processen. In de Deltafact "Broeikasgasemissies uit zoetwater" is reeds beschreven dat de systeemtoestand bepalend is voor de mate van broeikasgasuitstoot. Om tot een handelingsperspectief te komen is het belangrijk om de onderliggende processen beter te begrijpen, die de toestand en emissie bepalen. Hierbij is vooral de samenhang tussen de nutriënten- en koolstofcyclus van belang.

In dit achtergronddocument zijn deze sturende processen verder toegelicht (zie ook afbeelding 1):

- De **Primaire productie/ trofiegraad** is bepalend voor de mate en type van organisch materiaal dat tot slibvorming leidt.
- De **zuurgraad (pH)** is één van de sturende processen voor de anorganische koolstofomzetting.
- **Mineralisatie** is het afbraakproces van organisch materiaal, waarbij broeikasgassen vrij komen. De mineralisatie is afhankelijk van de hoeveelheid slib en beschikbaarheid van elektronen acceptoren.
- **Methaan oxidatie** kan onder zuurstofrijke condities optreden, waarbij reeds gevormd CH₄ omgezet wordt naar CO₂ en zo de uitstoot naar de lucht verminderd.
- **Emissies naar de lucht** dragen bij aan klimaatverandering. Het totale opwarmpotentieel is afhankelijk van de hoeveelheid en type broeikasgas dat uitgestoten wordt.
- **Externe organische belasting** is een externe bron in aanvulling aan de systeeminterne productie van organisch materiaal. De externe organische belasting draagt bij aan de slibvorming en kan dus tot hogere emissies leiden.

- **Temperatuur** is een sturende factor voor de snelheid van de biologische processen. Onder warmere temperaturen als gevolg van klimaatverandering is zowel sterkere primaire productie als snellere mineralisatie van het organisch materiaal verwacht.



Afbeelding 1: Overzicht van de factoren en processen van de aquatische koolstofcyclus. De primaire productie vormt het begin van de koolstofcyclus en beïnvloedt de mate van slibvorming. De hoeveelheid slib is vervolgens bepalend voor de mineralisatie/afbraakproces waarbij broeikasgassen geproduceerd worden. De geproduceerde emissies kunnen deels nog in de bodem en waterkolom omgezet worden, voordat de emissies de atmosfeer in gaan. De pH is één van de factoren die de anorganische koolstofprocessen stuurt, waarbij koolstof ook in de vorm van bicarbonaat vastgelegd kan worden (het schema is als apart pdf bestand beschikbaar).

Primaire productie

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. De 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. De externe nutriëntenbelasting bepaalt in belangrijke mate de ecologische toestand van een watersysteem. Hoge nutriëntenbelastingen leiden vaak tot eutrofe systemen die gekenmerkt worden door algen gedomineerde primaire productie, terwijl waterplanten meestal helemaal ontbreken door gebrek aan licht en zuurstof. Lage nutriëntenbelastingen leiden vaak tot condities die voordelig zijn voor de groei van waterplanten.

Nadat algen en planten afsterven zinken deze naar de bodem (detritus) waar ze vervolgens accumuleren of afbreken. Het type en de hoeveelheid primaire productie bepaalt dus de voorraad aan organisch koolstof in de bodem. Afhankelijk van de condities kan dit organisch materiaal op de waterbodem vastgelegd worden, of wordt het afgebroken.

Zuurgraad (pH)

Met betrekking tot de koolstofhuishouding is de pH een belangrijke parameter voor de vastlegging van CO₂ in de vorm van carbonaat (HCO₃⁻). Wanneer CO₂ oplost in water, zal het zich verdelen over verschillende vormen van carbonaat. Dit is (onder meer) sterk afhankelijk van de pH: onder zure omstandigheden is hierdoor meer CO₂ oplosbaar dan onder minder zure omstandigheden. Daarnaast is de oplosbaarheid van CO₂ ook afhankelijk van andere waterkwaliteitsparameters zoals de temperatuur.

Mineralisatie

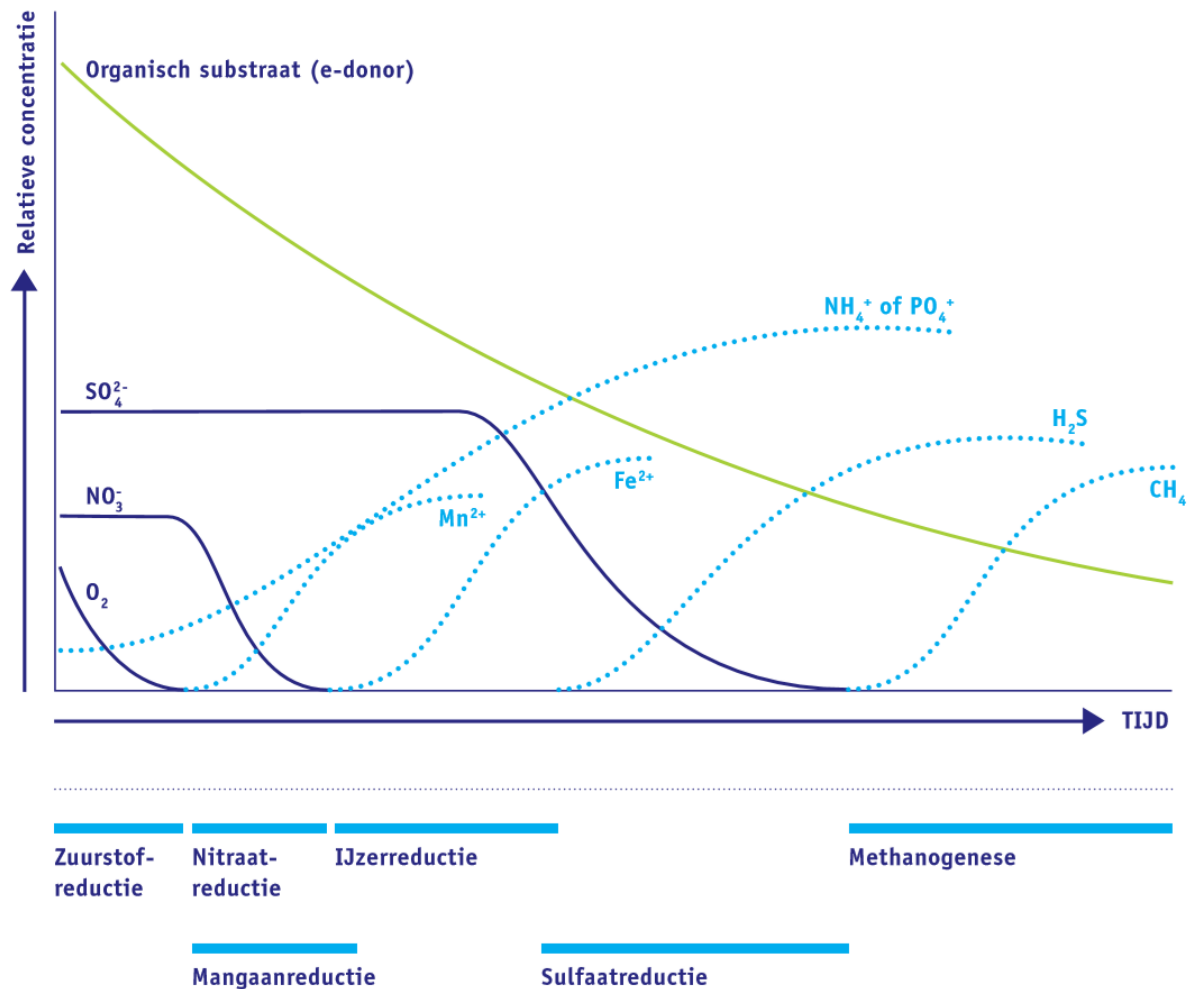
Slibvorming en slibafbraak zijn de meest bepalende processen voor de omvang van emissies uit watersystemen. Hoe groter de koolstofvoorraad in het slib, hoe meer materiaal beschikbaar is voor mineralisatie.

Mineralisatie is het afbraakproces van het organisch materiaal (detritus). Hoe snel het organisch materiaal afbreekt is afhankelijk van de complexiteit van dit materiaal. Algen breken bijvoorbeeld sneller af dan waterplanten. Voor de mineralisatie van organisch materiaal zijn verschillende micro-organismen nodig. Welke microbiële processen de mineralisatie uitvoeren, is een zeer belangrijke bepalende factor voor de ordegrrootte van de totale uitstoot.

In de natuur bepaalt het type elektron acceptor en de beschikbaarheid daarvan of het microbiële proces plaats zal vinden. Zuurstof is de sterkste elektron acceptor en CO₂ de slechtste (Afbeelding 2). Dit betekent dat bij een reactie van een elektron donor met zuurstof als elektron acceptor er veel energie zal vrijkomen. Er komt dus weinig energie vrij als eenzelfde elektron donor zou reageren met CO₂ als elektron acceptor. Het verschil in redoxpotentiaal tussen elektron donor en acceptor bepaalt hoeveel energie er vrij komt bij de reactie.

Er bestaan twee opeenvolgende vormen van mineralisatie: aerob (met zuurstof als elektron acceptor), anaerob (met andere elektron acceptoren, zoals nitraat of sulfaat). Bij de productie van methaan (methanogenese) wordt CO₂ gebruikt als elektron acceptor. Dit proces vindt alleen plaats als vrijwel alle andere elektron acceptoren verdwenen zijn (immers zouden die meer energie geven en dus gunstiger zijn).

Welke vorm van mineralisatie in een systeem domineert is dus afhankelijk van de beschikbaarheid van de relevante stoffen en de hoeveelheid van organisch materiaal. Tijdens de afbraak van koolstof worden broeikasgassen geproduceerd, vooral CO₂, CH₄ en N₂O, elk met een andere bijdrage als broeikasgas aan de atmosfeer. Door aerobe mineralisatie wordt uitsluitend CO₂ geproduceerd, bij anaerobe mineralisatie komt CO₂, CH₄ en N₂O vrij, al zal CH₄ pas gevormd worden wanneer alleen CO₂ nog over is als elektron acceptor. De broeikasgassen CH₄ en N₂O hebben een veel grotere opwarm potentiaal in de atmosfeer dan CO₂, respectievelijk 34 en 298 (mol/mol) keer zo groot is als dat van CO₂ (Myhre et al. 2013, Dean et al. 2018).



Afbeelding 2 - Reductieprocessen die bij afbraak van organisch materiaal kunnen optreden, afhankelijk van de beschikbaarheid van stoffen (STOWA 2008-04).

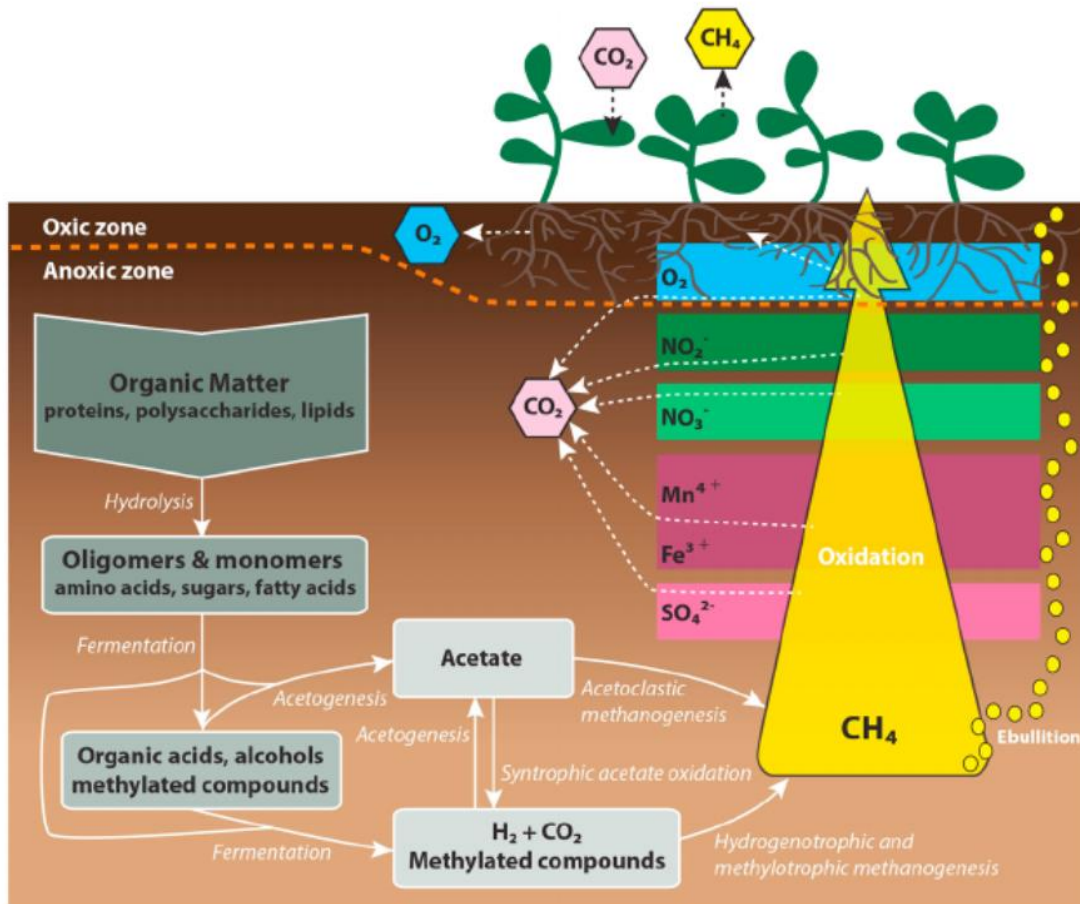
Methaanoxidatie

De netto methaanemissie uit een systeem is een balans tussen methaanproductie en methaanconsumptie, welke in oppervlaktewateren vrijwel allemaal microbiologische processen zijn. Dit betekent ook dat de methaanproductie in sommige gevallen (vele malen) hoger is dan de netto methaanuitstoot van het systeem (Bastviken et al. 2008; Huttunen et al. 2006).

Bij methaanoxidatie zetten methaanconsumerende micro-organismen (methanotrofen) in het watersysteem methaan om naar CO₂. Vanuit het oogpunt van klimaatimpact is dat gunstig, want CO₂ is een minder krachtig broeikasgas dan CH₄ in de atmosfeer. De omzetting van CH₄ naar CO₂ (methanotrofie of methaan

oxidatie) is een microbiologisch proces (Huttunen et al. 2006; Schrier-Uijl et al. 2011). Dit proces vindt grotendeels plaats met zuurstof (aeroob), maar kan ook zonder zuurstof (anaeroob) verlopen. In dat laatste geval worden andere elektron acceptoren gebruikt (bijvoorbeeld, nitraat, nitriet, mangaan, ijzer of sulfaat; Dean et al. 2018). Anaerobe methaanoxidatie verloopt iets minder efficiënt dan zuurstof-afhankelijke methaanoxidatie (Dean et al. 2018, Lopes et al. 2011). Het gros van de methaan oxidatie wordt dan ook toegewijd aan activiteit van aerobe methanotrofen.

In hoeverre methaanoxidatie plaats vindt is afhankelijk van de dominante emissiepad. CH₄ dat via diffusie naar de atmosfeer gaat (en langzaam door de waterkolom opstijgt) kan omgezet worden naar CO₂, maar methaan dat via ebullitie de lucht in gaat verblijft niet lang genoeg in het watersysteem om van de micro-organismen omgezet te kunnen worden. Als methaanproductie in een systeem plaats vindt, is ebullitie wel vaak de dominante emissiepad, waardoor alleen een fractie van het methaan omgezet wordt naar het minder sterk broeikasgas CO₂. Echter kan geaccumuleerd methaan ook onder bepaalde condities reeds in de bovenste laag van het sediment omgezet worden naar CO₂ (Bastviken et al. 2008). Hiervoor is de aanwezigheid van zuurstof of andere elektronen acceptoren van belang.



Afbeelding 3 - Afkomstig uit Dean et al. 2018 toont een overzicht van de koolstof en methaan cyclus in sediment.

Emissies naar de lucht

De dominante broeikasgassen in oppervlaktewateren zijn CO₂, CH₄ en N₂O. Alle drie de gassen worden via diffusie of via opborreling als gasbellen (ebullitie) uitgestoten. Voor CO₂ kan ook een omgekeerd proces optreden, waarbij CO₂ vanuit de lucht in het water wordt opgenomen. Vanwege de lage CH₄ concentraties in de lucht is dit proces voor CH₄ te negeren. Ebullitie is een proces dat vooral in systemen met sterke methaanproductie optreedt. Ebullitie draagt aanzienlijk veel meer bij aan de netto methaan uitstoot dan diffusie, omdat er door het snelle opstijgen van de gasbellen geen methaanoxidatie kan plaatsvinden (Kosten et al. 2018). Ebullitie treedt niet permanent op maar varieert sterk in ruimte en tijd, waarbij warmere temperaturen en eutrofe systemen gekenmerkt worden door hogere ebullitie (Aben et al. 2017).

Externe organische belasting

In aanvulling op de systeem-interne processen, is de externe belasting een cruciale factor voor de broeikasgasproductie, zoals ook al onder primaire productie genoemd. Naast de nutriënten is ook de organische belasting van belang. De aanvoer van organisch materiaal vergroot de slibvoorraad in de plas. Dit kan tot meer koolstofvastlegging leiden, maar ook tot verhoogde emissies door een groter slibvoorraad. Terrestrisch materiaal vormt vaak een groter aandeel aan de totale hoeveelheid organisch materiaal in verhouding tot de interne primaire productie. Terrestrisch materiaal bevat vaak ook complexere organische bindingen, waardoor dit materiaal langzamer afbreekt dan waterplanten of algen (Grasset et al. 2018).

Temperatuur

In aanvulling aan de trofiegraad is ook de temperatuur bepalend. Zoals in de Deltafact beschreven stimuleren hogere temperaturen deze microbiologische processen, wat vaak tot hogere emissies leidt (Davidson et al. 2018; Kosten et al. 2010; Velthuis et al. 2018). Door de snellere afbraak is vaak ook het zuurstof sneller verbruikt, waardoor de productie van de sterke broeikasgassen methaan en lachgas toenemen. Dus neemt niet alleen de hoeveelheid uitgestoten broeikasgassen toe, maar stijgt vooral het effect van de uitstoot in CO₂-equivalenten. Met het oog op klimaatverandering is het dus nog belangrijker om maatregelen te nemen om een toename in emissies door hogere temperaturen te vermijden.

Conclusie

De aquatische koolstofkringloop is complex en bevat veel processen die elkaar beïnvloeden. De externe belasting met nutriënten en organische stof en daarnaast de temperatuur zijn bepalende externe (stuur)factoren voor processen als primaire productie en mineralisatie in het watersysteem die verantwoordelijk zijn voor de broeikasgasemissie. Door het beter begrijpen van wanneer en onder welke condities deze processen dominant worden en hoe deze samenhangen met systeemkenmerken en beheer wordt het beter mogelijk om effectieve maatregelen te bedenken. Om de juiste maatregelen te nemen is het dus niet alleen cruciaal om de omvang van de emissies in beeld te brengen, maar ook om door een systeemanalyse de belangrijkste processen en (stuur)factoren voor een specifiek watersysteem te identificeren. Een samenhangend schema, zoals in afbeelding 1 helpt daarbij.

Literatuur

Aben, Ralf C. H., Nathan Barros, Ellen Van Donk, Thijs Frenken, Sabine Hilt, Garabet Kazanjian, Leon P. M. Lamers, Edwin T. H. M. Peeters, Jan G. M. Roelofs, Lisette N. De Senerpont Domis, Susanne Stephan, Mandy Velthuis, Dedmer B. Van De Waal, Martin Wik, Brett F. Thornton, Jeremy Wilkinson, Tonya Delsontro, and Sarian Kosten. (2017). "Cross Continental Increase in Methane Ebullition under Climate Change." *Nature Communications* 8(1):1–8.

Bastviken, D., Cole, J. J., Pace, M. L., & Van de Bogert, M. C. (2008). Fates of methane from different lake habitats: connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2).

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.

Dean, Joshua F., Jack J. Middelburg, Thomas Röckmann, Rien Aerts, Luke G. Blauw, Matthias Egger, Mike S. M. Jetten, Anniek E. E. de Jong, Ove H. Meisel, Olivia Rasigraf, Caroline P. Slomp, Michiel H. in't Zandt, and A. J. Dolman. (2018). "Methane Feedbacks to the Global Climate System in a Warmer World." *Reviews of Geophysics* 56(1):207–50.

Grasset, C., Mendonça, R., Villamor Saucedo, G., Bastviken, D., Roland, F., & Sobek, S (2018). Large but variable methane production in anoxic freshwater sediment upon addition of allochthonous and autochthonous organic matter. *Limnology and Oceanography*. <https://doi.org/10.1002/lno.10786>.

Huttunen, J. T., Väisänen, T. S., Hellsten, S. K., & Martikainen, P. J. (2006). Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs. *Boreal Environment Research*, 11(1), 27-34.

Kosten S, Weideveld S, Stepina T, Fritz C (2018) Mid-term report Monitoring Greenhouse gas emissions from ditches in the Netherlands.

Kosten, Sarian, Fábio Roland, David M. L. Da Motta Marques, Egbert H. Van Nes, Néstor Mazzeo, Leonel Da S. L. Sternberg, Marten Scheffer, and Jon J. Cole. (2010). "Climate-Dependent CO₂ Emissions from Lakes." *Global Biogeochemical Cycles* 24(2):1-7.

Lopes, F., Viollier, E., Thiam, A., Michard, G., Abril, G., Groleau, A., ... & Jézéquel, D. (2011). Biogeochemical modelling of anaerobic vs. aerobic methane oxidation in a meromictic crater lake (Lake Pavin, France). *Applied Geochemistry*, 26(12), 1919-1932.

Myhre, G., Shindell D., F. M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J. F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, and H. Zhang. (2013). "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing." in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia,.

Schrier-Uijl, A. P., Veraart, A. J., Leffelaar, P. A., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2011). Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 102(1-3), 265-279.

Sobek, S., DelSontro, T., Wongfun, N., & Wehrli, B. (2012). Extreme organic carbon burial fuels intense methane bubbling in a temperate reservoir. *Geophysical Research Letters*, 39(1).

STOWA (2008). Van helder naar troebel... en weer terug. Een ecologische systeemanalyse en diagnose van ondiepe meren en plassen voor de kaderrichtlijn water.

<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202000-2010/Publicaties%202005-2009/STOWA%202008-04.pdf>

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.

Janse 2005 PCLake.