

# Deltafact - Broeikasgasemissies uit zoetwater

Zo'n 5% van de Nederlandse broeikasgasemissie komt uit het oppervlaktewater. Meren leveren landelijk de grootste bijdrage. Hoe slechter de waterkwaliteit, hoe hoger de uitstoot van broeikasgassen. Maatregelen die gericht zijn op schoner water, zoals KRW-maatregelen, leveren dan ook een substantiële positieve bijdrage aan het klimaatvraagstuk.

Deze Deltafact geeft een overzicht van de kennis over broeikasgasemissies uit oppervlaktewater en de eerste ervaringen in pilotstudies. Er worden handvatten geboden om de uitstoot voor meren te kwantificeren en maatregelen te nemen. Ten slotte wordt ingegaan op het belang van nader onderzoek.

In achtergronddocumenten wordt een nadere toelichting gegeven.

## INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. SCHEMATISCHE WEERGAVE
4. TECHNISCHE KENMERKEN
5. HANDELINGSPERSPECTIEF
6. KENNISLEEMTEN
7. BRONNEN & LINKS
8. DISCLAIMER

### 1. Inleiding

Om de schadelijke gevolgen van klimaatverandering te beperken zijn in het Klimaatakkoord afspraken gemaakt om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. Broeikasgasemissies die hierin tot nu toe nog weinig onder de aandacht zijn geweest, zijn de emissies uit oppervlaktewateren. Het is nog lastig om de omvang van broeikasgasemissies uit oppervlaktewateren nauwkeurig in te schatten (Stanley et al. 2016). Op grond van de kennis die er nu is schatten we dat de bijdrage van oppervlaktewateren zo'n 5% van de totale Nederlandse broeikasgasemissie is.

Metingen laten zien dat de omvang van de emissie varieert (Kosten et al. 2018), waarbij eutrofiëring, watertemperatuur en de ecologische toestand van het watersysteem de belangrijkste redenen voor deze variatie lijken te zijn (o.a. Schrier-Uijl et al. 2011). Met waterkwaliteitsmaatregelen en slimmer beheer kan de bijdrage van oppervlaktewateren dan ook substantieel worden verminderd.

Ondiepe meren en plassen vormen in Nederland belangrijke bronnen van broeikasgasemissies (Davidson et al. 2015; Van Bergen et al. 2019). Dit geldt echter ook voor andere zoete wateren en met name voor eutrofe stadsvijvers waar de uitstoot van het sterke broeikasgas methaan ( $\text{CH}_4$ ) groot is (van Bergen et al. 2019). Ook sloten dragen substantieel bij aan de broeikasgasemissie met een aandeel van 3 tot 16 % aan de nationale methaanemissie (Kosten et al. 2018). Omgerekend is dit 0,3 tot 1,5% van de nationale broeikasgasemissie, omdat het aandeel methaan in de totale broeikasgasemissie circa 9% is (tabel 1).

**Bijdrage aandeel broeikasgasemissie 5% vanuit het oppervlaktewater:**

De schatting van 5% is gebaseerd op IPCC getallen voor meren en sloten (IPCC, 2019). Een plas van 100 hectare heeft volgens deze getallen een uitstoot van 457 ton  $\text{CO}_2$ -equivalenten per jaar. De IPCC getallen zijn gecorrigeerd op basis van diverse metingen in Nederlandse meren en sloten en resultaten van een prototype tool. Nederlandse wateren zijn in verhouding tot het buitenland meer belast met nutriënten en organische stof. Hierdoor is de broeikasgasemissie hoger. Er zijn diverse kanttekeningen te plaatsen bij deze berekeningen, waardoor het getal hoger en/of lager kan zijn (zie verder het achtergronddocument model).

Naar verwachting zullen de broeikasgasemissies uit oppervlaktewateren in de toekomst toenemen als gevolg van hogere temperaturen door een hogere primaire productie en een versterkte (microbiële) afbraak van koolstof in het water (Kosten et al. 2010; Moss et al., 2011; Aben et al. 2017; Velthuis et al. 2018; Davidson et al. 2018; Van Bergen et al. 2019).

Voor een goede beschouwing van uitstoot van broeikasgassen uit oppervlaktewater moet niet alleen naar de broeikasgasemissies worden gekeken, maar ook naar de vastlegging van broeikasgassen in het watersysteem. Oppervlaktewateren zijn in staat om koolstof vast te leggen, wat de impact op het klimaat verlaagt. Wereldwijd

leggen stilstaande wateren meer organisch koolstof vast dan de oceanen, ondanks het feit dat ze maar een fractie van het oppervlak uitmaken (Alin & Johnson 2007; Dean & Gorham 1998; Tranvik et al. 2009). De verhouding tussen de broeikasgasemissie en -vastlegging bepaalt uiteindelijk of een watersysteem negatief of positief bijdraagt aan klimaatverandering. Om dit te bepalen is een analyse van de gehele koolstofkringloop in het stroomgebied van een water nodig, inclusief het (bagger)beheer.

## 2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts

Trefwoorden: Klimaatveranderingen, zoetwater, broeikasgas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), broeikasgasemissie, eutrofiëring.

Relevante Deltafacts: [Effecten klimaatverandering op landbouw](#); [Effecten klimaatverandering terrestrische natuur](#); [Klimaatverandering en grondwaterbeheer](#); [Bodemdaling](#); [Onderwaterdrainage](#); [Dynamisch peilbeheer](#)

## 3. Schematische weergave

Voor de analyse van broeikasgasemissie uit oppervlaktewater is inzicht nodig in zowel de vastlegging als de emissie van koolstof, waarbij de gehele kringloop moet worden beschouwd. In deze analyse dient ook het effect van baggeren meegenomen te worden, waarbij het effect op de lange termijn zowel positief als negatief kan zijn.

De koolstofkringloop wordt beïnvloed door een groot aantal factoren en processen, waarbij de beschikbaarheid van zuurstof en de belasting met nutriënten en organische stoffen sturend zijn. Afbeelding 1 geeft dit schematisch weer voor een helder en plantenrijk water en een troebel en algenrijk water. Hieronder geven we een korte samenvatting.

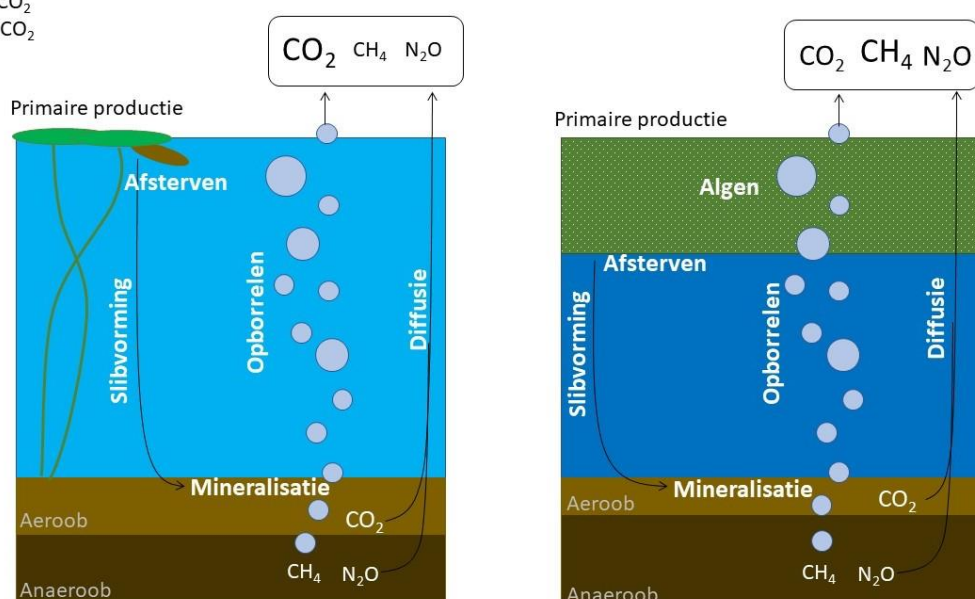
**Primaire productie** van algen en waterplanten in het water zorgt voor vastlegging van koolstof. Wanneer algen en planten afsterven (organisch materiaal) dragen ze bij aan **slibvorming**. Ook koolstof van buiten het water kan bijdragen aan slibvorming, zoals door uitspoeling van deeltjes uit (veen)percelen of invallend blad.

Het organische slib wordt afgebroken (**mineralisatie**) waarbij CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O kunnen worden gevormd. De vorming van CH<sub>4</sub> (**methanogenese**) en N<sub>2</sub>O (**onvolledige denitrificatie**) treedt alleen op daar waar geen zuurstof meer

aanwezig is (**anaeroob**). Deze anaerobe afbraak is vaak (veel) trager dan afbraak onder zuurstofrijkere condities (**aeroob**). Het slecht oplosbare CH<sub>4</sub> bereikt de atmosfeer in de vorm van gasbelletjes (**ebulutie**). In de waterlaag wordt CH<sub>4</sub> dat wel oplost (**diffusie**) microbiëel afgebroken tot CO<sub>2</sub> (**methaanoxidatie**), waardoor niet al het geproduceerde CH<sub>4</sub> de atmosfeer bereikt.

Afbeelding 1. Schematische en sterk vereenvoudigde weergave van de koolstofkringloop in oppervlaktewater (links: een helder en plantenrijk water, rechts: een troebel en algenrijk water)

CO<sub>2</sub> = 1 x CO<sub>2</sub>  
 CH<sub>4</sub> = 34 x CO<sub>2</sub>  
 N<sub>2</sub>O = 298 x CO<sub>2</sub>



Voor de emissie uit oppervlaktewater zijn (dus) drie broeikasgassen van belang: koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>) en lachgas (N<sub>2</sub>O). De laatste twee worden minder geproduceerd, maar zijn wel veel sterkere broeikasgassen dan CO<sub>2</sub>. Om het effect van de emissies van deze drie gassen te vergelijken, wordt naar het globaal opwarmend vermogen (Global Warming Potential, GWP) van elk gas gekeken. Dit wordt meestal uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten. Bij het bepalen van de GWP wordt mede rekening gehouden met de levensduur van de gassen in de atmosfeer. Een overzicht van het GWP per broeikasgas (over een periode van 100 jaar) is weergegeven in Tabel 4.1 (Myhre et al. 2013).

Tabel 1. Broeikasgaskarakteristieken (opwarmingsvermogen in een periode van 100 jaar)

Broeikasgas		Bijdrage aan nationale emissie (2018)	Levensduur in de atmosfeer [jaar]	GWP mol CO <sub>2</sub> / mol broeikasgas	GWP g CO <sub>2</sub> / g broeikasgas
Koolstofdioxide	CO <sub>2</sub>	85%	5 - 200	1	1
Methaan	CH <sub>4</sub>	9%	12.4	34	93
Lachgas	N <sub>2</sub> O	5%	121	298	299

#### 4. Technische kenmerken

Om de broeikasgasuitstoot van een water te beperken is het van belang om de processen te beïnvloeden, waarbij het in ieder geval verstandig is om de emissie van de sterkste broeikasgassen (CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O) zo veel mogelijk te beperken. De aanvoer van organisch materiaal, de zuurstofbeschikbaarheid en de mate van eutrofiering bepalen voor een belangrijk deel welke processen dominant zijn. In veel gevallen zal gelden: hoe slechter de waterkwaliteit (laag zuurstof, hoge eutrofiering), hoe meer broeikasgas er wordt geproduceerd en hoe meer in de vorm van methaan. Hetzelfde geldt voor een verhoogde aanvoer van organisch materiaal. Voedselarme systemen kennen dan ook vaak een lage emissie van broeikasgassen, terwijl voedselrijke systemen juist een hoge emissie hebben. Het verschil in emissie (uitgedrukt in GWP) kan oplopen tot een factor 10. Sturing op een betere waterkwaliteit kan hiermee zeer effectief zijn.

##### 4.1 Voedselarme systemen

Voedselarme systemen worden gekenmerkt door een lage nutriëntenbelasting. Er is weinig primaire (plant)productie in deze heldere en plantenrijke wateren. Afgestorven planten zinken naar de bodem waardoor een organische sliblaag wordt gevormd. Het afbraakproces verloopt langzaam, omdat de plantenresten veelal grof zijn, complex qua structuur en weinig nutriënten bevatten. Door het relatief langzaam verlopen van de afbraakprocessen blijft er relatief lang zuurstof beschikbaar in de onderwaterbodems, waardoor de afbraakprocessen aeroob kunnen plaatsvinden en er dus hoofdzakelijk CO<sub>2</sub> wordt geproduceerd (afbeelding 1). Als het beschikbare zuurstof verbruikt is, begint de anaerobe afbraak met een andere elektron acceptor dan zuurstof, bijvoorbeeld nitraat, ijzer of sulfaat. Bij dergelijke processen komt niet alleen CO<sub>2</sub> vrij, maar kunnen ook CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O worden geproduceerd. Over het geheel blijven de emissies echter relatief laag. Voedselarme systemen kunnen onder bepaalde condities zelfs (netto) organisch koolstof vastleggen, namelijk als de afbraak langzamer verloopt dan de sedimentatie van organisch materiaal en er bij de afbraak grotendeels CO<sub>2</sub> vrijkomt.

## 4.2 Voedselrijke systemen

Voedselrijke systemen worden daarentegen gekenmerkt door een hoge nutriëntenbelasting. Er is veel primaire (alg)productie in deze troebele en algenrijke wateren. Algen sterven snel af in verhouding tot waterplanten en produceren hierbij veel slib. Dit makkelijk afbreekbare organisch materiaal wordt snel afgebroken, waardoor het zuurstof in de onderwaterbodems snel opraakt. Hierdoor verloopt een groot deel van de afbraak anaeroob (zie afbeelding 1): eerst met nitraat en sulfaat als elektronenacceptoren en daarna via methanogenese. Hierbij komen naast CO<sub>2</sub> ook CH<sub>4</sub> en in sommige gevallen N<sub>2</sub>O vrij. Over het geheel is de broeikasgasemissies daardoor vaak hoger dan in voedselarmere watersystemen.

In voedselrijke watersystemen is er daarnaast vaak sprake van meer aanvoer van aanvullend (terrestrisch) organisch materiaal en opgelost CO<sub>2</sub> dan in voedselarmere watersystemen, bijvoorbeeld door uitspoeling vanuit deeltjes uit (veen)percelen of invallend blad. Dit versterkt nog eens de afbraakprocessen, waarbij nog meer CH<sub>4</sub> en in sommige gevallen N<sub>2</sub>O worden gevormd.

## 4.3 Invloed van temperatuur op de koolstofprocessen

De temperatuur speelt een belangrijke rol in de koolstofkringloop. Biologische processen worden versterkt door hogere temperaturen. De primaire productie kan toenemen, onafhankelijk van de toestand van het systeem. Bij jaarrond hogere temperaturen kan de primaire productie in een door waterplanten gedomineerd watersysteem met meer dan 50% toenemen (Velthuis et al. 2018). Dit heeft als gevolg dat meer slib geproduceerd wordt. Onder warmere condities verloopt ook het afbraakproces sneller, waardoor zuurstof sneller opraakt en een groter aandeel van het slib anaeroob afgebroken wordt. Dit leidt tot een verhoging van de emissies van sterke broeikasgassen (CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O). In tegenstelling tot verhoogde emissies, blijkt uit onderzoek dat de vastlegging van koolstof bij verhoogde temperatuur gelijk blijft (Velthuis et al. 2018). Als de temperatuur én de nutriëntenbelasting verhoogd zijn, treedt een versterkend effect op, waarbij de emissies verder toenemen (Davidson et al. 2018). Oftewel, er is sprake van een positief feedback mechanisme: klimaatverandering, waarbij de temperatuur hoger wordt, leidt tot meer broeikasgasemissie en dit leidt weer tot een versterkte klimaatverandering.

## 5. Handelingsperspectief

Op basis van diverse verkennende praktijkonderzoeken is een eerste stappenplan ontwikkeld, waarmee inzicht kan worden verkregen in de emissies van watersystemen, de belangrijkste (sleutel)factoren die bepalend zijn voor de emissies en mogelijke handelingsperspectieven. Dit stappenplan, dat later in 2020 wordt gepubliceerd, bevat vier hoofdonderdelen die hieronder worden toegelicht.

### 5.1 Water- en stofbalans

Water- en stofbalansen helpen om de water-, koolstof- en nutriëntenstromen te kwantificeren als basis voor de verdere analyse. Waterschappen hebben deze vaak al op orde voor het bepalen van de nutriëntenbelasting van hun watersystemen. Hierbij is het van belang om, naast de aanvoer van nutriënten, ook naar de aanvoer van koolstof te kijken. Koolstof en nutriënten zijn bepalend voor de ecologische toestand, de dominante processen, de C-vastlegging en de broeikasgasemissies.

### 5.2 Tool BlueCan

Er is een (prototype) van een instrument genaamd "BlueCan" ontwikkeld, waarmee een eerste inschatting van de jaarlijkse uitstoot van broeikasgassen uit meren en plassen kan worden verkregen. Dit instrument is gebaseerd op de veel toegepaste waterkwaliteitsmodellen PCLake (Janse, 2005) en Delwaq (Los, 2009) en getoetst aan de hand van metingen in vier praktijkcases.

Aan de hand van systeemkenmerken als de waterdiepte, het bodemtype en de nutriëntenbelasting wordt de jaarlijkse emissie in CO<sub>2</sub>-equivalenten bepaald evenals het aandeel van CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>. Met deze inzichten kunnen waterbeheerders hotspots identificeren bij ondiepe meren en plassen en kunnen zij het effect van nutriëntenreductie op de emissie bepalen. Belangrijke kanttekening is dat dit instrument in de huidige vorm (nog) geen rekening houdt met de directe input van organisch koolstof, zoals uitspoeling van deeltjes uit (veen)percelen of invallend blad.

### 5.3 Metingen

Veld- en laboratoriummetingen helpen de actuele emissies te bepalen en de koolstofstromen te kwantificeren. Er bestaan verschillende methoden voor het bepalen van de actuele emissie. Een combinatie van methoden is wenselijk, omdat bijvoorbeeld zowel inzicht in de directe emissie naar de lucht gewenst is als in de gevoeligheid van slib voor de vorming van broeikasgassen. Metingen zijn verder

nodig voor het volgen van effecten van maatregelen. Ten slotte zijn metingen nodig voor het verbreden van de kennisbasis en een betere validatie van de tool.

#### 5.4 Kansrijke maatregelen

Er kunnen nu al maatregelen genomen worden, ook al weten we nog niet alles en is het effect van maatregelen systeemspecifiek. In algemene zin lijken vooral maatregelen gericht op een betere waterkwaliteit een effectief middel om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren. We lichten twee waterkwaliteitsmaatregelen toe:

##### *Beperking van de externe belasting*

Om de emissie uit een watersysteem effectief en langdurig te verminderen, is het noodzakelijk om de nutriëntenbelasting te reduceren. Hierbij moet rekening gehouden worden met zowel de interne als de externe belasting. Een lage nutriëntenbelasting vormt de basis voor heldere en plantenrijke watersystemen. In deze wateren wordt hoofdzakelijk CO<sub>2</sub> uitgestoten (soms vergelijkbaar met de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt vastgelegd, waardoor de netto uitstoot nihil kan zijn).

Ook door een beperking van belasting met organisch materiaal wordt de emissie effectief en langdurig verminderd.

##### *Baggeren*

Ten slotte kan het baggeren van een organisch rijke sliblaag kansrijk zijn, vooral in wateren die veel N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> uitstoten. Hierbij wordt de hoeveelheid organisch materiaal sterk verminderd, waardoor er minder materiaal beschikbaar is om af te breken, wat leidt tot minder broeikasgasproductie. Als het slib dun over het land verspreid wordt, zal er voornamelijk CO<sub>2</sub> vrijkomen. In zeer ondiepe sloten (0-30 cm) helpt baggeren de broeikasgasproductie te verlagen doordat er naast minder organisch materiaal een positieve invloed is op zowel zuurstof als temperatuur.

Of baggeren tot een verlaging of verhoging van de broeikasgasemissie leidt, hangt af van de samenstelling van het baggermateriaal, de onderliggende bodemsamenstelling en de wijze waarop het materiaal verwerkt kan worden. Dit dient dan ook vooraf onderzocht te worden. Als er door het baggeren bijvoorbeeld een onderliggende laag met organisch rijk materiaal vrij komt te liggen, kan de emissie toenemen. Baggeren leidt dan juist tot meer afbraak. Verwerking van bagger in depots kan ook tot versterkte broeikasgasproductie leiden, vanwege een



ongunstige afwisseling van aerobe en anaerobe condities waarbij CH<sub>4</sub> en ook veel N<sub>2</sub>O kan vrijkomen (Van Dijk et al. in prep.).

## 6. Kennisleemten

De uitstoot van broeikasgassen uit watersystemen is nog beperkt onderzocht. In deze Deltafact zijn eerste belangrijke inzichten gedeeld op basis van wetenschappelijk onderzoek en praktijkonderzoek. Hiermee kan de impact op het klimaat beperkt worden. Er zijn echter ook nog veel kennisleemtes.

### *Modelbeperkingen*

Recent is een prototype-model ontwikkeld (BlueCan) waarmee een eerste inschatting van de jaarlijkse broeikasgasuitstoot van meren en plassen gemaakt kan worden. Deze inschatting is gebaseerd op een evenwichtssituatie. Dat betekent dat bijvoorbeeld een sterke nutriëntenbelasting en/of aanvoer van koolstof in het verleden (historische erfenis) niet mee berekend wordt. In wateren waar de nutriëntenbelasting al verminderd is, maar nog veel organisch materiaal vanuit het verleden aanwezig is, wordt de uitstoot bij de modelberekeningen bijvoorbeeld sterk onderschat. Ook het effect van maabeheer is nog niet onderzocht met het model.

### *Gebrek aan goede metingen*

Dat er een sterk verband tussen de waterkwaliteit en de omvang van de emissies bestaat, is duidelijk. Wat de koolstofvastlegging en -uitstoot onder verschillende systeemtoestanden precies beïnvloed, is minder goed onderzocht. Hiervoor is het belangrijk om wetenschappelijk en praktijkonderzoek voort te zetten in verschillende type wateren. Daarbij is het belangrijk dat gedurende een langere tijd (liefst continu) metingen worden verricht in aanvulling op het model. Zo kan de emissie met grotere nauwkeurigheid worden geschat en het model beter worden getoetst. Ook voor een goed advies over de omgang met bagger zijn meer metingen nodig, bijvoorbeeld van verschillende typen bagger (met verschillende kwaliteiten) dat is verspreid op het land en van bagger dat verwerkt is in depots. We voorzien een combinatie van toegepast en fundamenteel onderzoek, waarbij metingen worden gedaan, emissies worden gekwantificeerd en de dominante mechanismes worden verhelderd.

### *Gebrek aan inzicht in emissiepaden*

Het broeikasgas dat geproduceerd wordt op de bodem van plassen en meren zal zijn weg naar de atmosfeer vinden. Dit kan via diffusie (opgelost gas dat door concentratie verschil de atmosfeer in gaat), maar ook doordat gasbellen zich vormen en direct naar de atmosfeer bewegen (ebullitie) en het gas kan zelfs via holtes in planten (via schoorsteentjes) de atmosfeer bereiken. Tot op heden is vooral onderzocht wat de diffusie flux van de waterlaag naar de atmosfeer is. Echter, emissies via gasbellen vormen een grote onzekere en vooral onregelmatige factor, die pas recent meer en meer in kaart wordt gebracht. Deze piekbelasting in emissie kan wel 50% van de totale broeikasgasemissie vormen (Van Bergen et al. 2019). Gasbel formatie varieert enorm in de ruimte (onregelmatig patroon). Gasbel emissie treed met name op in de zomer (Van Bergen et al. 2019).

#### *Emissie van lachgas nog weinig onderzocht*

Lachgas is een extreem sterk broeikasgas (GWP van 298), dat onder anaerobe condities gevormd wordt (Myhre et al. 2013). Vooral bij baggeren kunnen aanzienlijke emissies van N<sub>2</sub>O optreden als gevolg van onvolledige denitrificatie (Van Dijk et al. in prep.). Ook bij agrarische slootsystemen is bekend dat na heftige buien tijdelijk hoge N<sub>2</sub>O-emissies kunnen optreden als gevolg van onvolledige denitrificatie in het uit- en afspoelwater (Veraart et al. in prep.). Toch is er nog veel onbekend over deze processen, waardoor het nog lastig is om er op te sturen. De productie en de uitstoot van lachgas dient aan de hand van metingen verder onderzocht te worden. Ook dit is iets voor het gecombineerde toegepast en fundamentele onderzoek.

## 7. Bronnen en links

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.

Alin, S. R., & Johnson, T. C. (2007). Carbon cycling in large lakes of the world: A synthesis of production, burial, and lake-atmosphere exchange estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(3).

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.

Davidson, T. A., Audet, J., Svenning, J. C., Lauridsen, T. L., Søndergaard, M., Landkildehus, F., Larsen, S. E., Jeppesen, E. (2015). Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming. *Global Change Biology*, 21(12), 4449–4463.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.13062>

Dean, W. E., & Gorham, E. (1998). Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*, 26(6), 535-538.

IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S.(eds). Published: IPCC, Switzerland.

Janse, J. H. (2005). Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. Diss., Universiteit Wageningen.

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 CO<sub>2</sub> Emissions from Lakes." *Global Biogeochemical Cycles* 24(2):1–7.

Los, F.J. 2009. Eco-hydrodynamic modelling of primary production in coastal waters and lakes using BLOOM, PhD Thesis Wageningen University, ISBN 978-90-8585-329-9.

Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., Havens, K., Lacerot, G., Liu, Z., De Meester, L., Paerl, H.W., Scheffer, M. (2011). Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland waters*, 18 (1), 101-105.  
Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, 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, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing

Schrier-Uijl, A. P., Veraart, A. J., Leffelaar, P. A., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2011). Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> 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).

Stanley, Emily H., Nora J. Casson, Samuel T. Christel, John T. Crawford, Luke C. Loken, and Samantha K. Oliver. (2016). "The Ecology of Methane in Streams and Rivers: Patterns, Controls, and Global Significance." *Ecological Monographs* 86(2):146–71.

Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., ... & Kortelainen, P. L. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2298-2314.

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 Dijk, G., M. Poelen, S. Kosten, C. Cusell & A.J.P. Smolders (in prep.) De consequenties van baggeren op de broeikasgasemissies van de Noordelijke Langerarseplas, RP-18.206.20.11, Onderzoekcentrum B-WARE, Radboud Universiteit en Witteveen + Bos i.o.v. Hoogheemraadschap Rijnland.

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, in prep.

#### Auteurs:

S.A Schep, Witteveen+Bos  
R.J. Brederveld, Witteveen+Bos  
C. Pohnke, Witteveen+Bos

S. de Rijk, Deltares  
W.R.L. van der Star, Deltares  
T. A. Troost, Deltares  
S. Jansen, Deltares  
M.A.R. Kox, Deltares

#### Reviewers:

C. Cusell, Witteveen+Bos  
L. Moria, Waternet  
B. Nanninga, Hoogheemraadschap van Delfland  
S. Kosten, Universiteit Nijmegen

## 9. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.