

Jämförelse av metoder för mätning av metangasutsläpp från vattenreservoarer

JESPER ANDERSSON 2017
MVEK02 EXAMENSARBETE FÖR KANDIDATEXAMEN 15 HP
MILJÖVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET



Jämförelse av metoder för mätning av metangasutsläpp från vattenreservoarer

Jesper Andersson

2017



LUNDS
UNIVERSITET

Jesper Andersson

MVEK02 Examensarbete för Kandidatexamen 15 hp, Lunds universitet

Intern handledare: Lars Harrysson, Socialhögskolan, Lunds universitet

CEC - Centrum för miljö- och klimatforskning

Lunds universitet

Lund 2017

Abstract

Hydropower is developing fast across the globe to accommodate the increasing need for electric energy. It is generally considered to be a close-to-zero emission source of energy, but studies have shown that reservoirs and dams have a substantial emission of greenhouse gas, especially methane. Measurements of methane emissions from different reservoirs have very varying results, partly because of the use of different measuring methods.

The aim of this study is to examine which methods are used in studies of methane emissions from reservoirs, and to compare them using a SWOT analysis. It shows that less than half of the studies on methane emission from reservoirs include both diffusion and ebullition emissions, and that the most common methods have been proven unreliable compared to more advanced methods. Up-to-date methods have to be used in order to avoid systematic underestimation of the emissions. Combining methods for measuring diffusion and ebullition of methane, for example the boundary layer method and an automatic funnel trap system, may be the most efficient way of measuring both total emission and spatial and temporal variations. However, more expensive methods (e.g. eddy covariance, acoustic echosounders and optical methane detector) need to be used to assure the reliability of less expensive ones, and to accurately study the spatial and temporal variation of emissions in order to determine the sources and possible hot spots. This will enable further measurements globally, and the eventual inclusion of the emissions from reservoirs and dams in global inventories of greenhouse gas emissions.

Innehållsförteckning

Abstract 3

Innehållsförteckning 5

Inledning 7

Mätmetoder 9

Syfte och frågeställning 9

Metod 11

Resultat 15

SWOT-analys 16

Floating chamber 16

Boundary layer method 17

Eddy covariance 18

Funnel trap 19

Acoustic echosounder 20

Optical methane detector 21

Direkta metodjämförelser 22

Diskussion 25

När lämpar sig de olika metoderna? 26

Metodernas effektivitet 26

Metodernas användningsområden 28

Vattenkraft och reservoarer i ett större perspektiv 29

Slutsats 31

Referenser 33

Inledning

Förnyelsebara energikällor står idag för över 20 % av den globala elektricitetsproduktionen, varav vattenkraft står för cirka 70 % (World bank, 2014). Utvecklingen av vattenkraft har lett till att miljontals människor fått tillgång till elektricitet. Trots detta lever fortfarande över en miljard människor utan elektricitet (World bank, 2014a), vilket kräver stora satsningar på ny energiproduktion, och expansion av befintlig sådan. Då energi- och värmeproduktion idag står för cirka 25 % av det totala växthusgasutsläppet (IPCC, 2014), är det en sektor som måste utöka produktionen på ett miljömässigt hållbart sätt.

Länge har vattenkraft ansetts vara en energikälla som inte bidrar till utsläppet av växthusgaser. Forskning har dock under de senaste årtiondena visat att utsläppen från vattenreservoarer, bland annat de kopplade till vattenkraft, har väsentliga utsläpp av framförallt metangas, som står för upp till 90 % av det totala växthusgasutsläppet från reservoarer (Deemer et al., 2016). Deemer et al. har i sin sammanställning av växthusgasmätningar i reservoarer kommit fram till att utsläppen står för cirka 1,3 % av de totala antropogena växthusgasutsläppen mätt i koldioxidekvivalenter under ett tidsspänn på 100 år. Metan är 28 gånger mer potent än koldioxid för en tidshorisont på 100 år, men eftersom metangasen är kortlivad i atmosfären, är den 84 gånger mer potent under en tidshorisont på 20 år (Myhre et al., 2013). Därför är troligen det verkliga bidraget från reservoarer betydligt större (Deemer et al., 2016). Detta är relevant då vattenkraften är under enorm utveckling världen över, med 3700 dammar antingen under konstruktion eller i planeringsstadiet, framförallt i länder med snabbt växande ekonomier där energiförbrukningen ökar explosionsartat (Zarfl et al., 2015).

Reservoarer skiljer sig från sjöar och andra naturliga vattendrag eftersom de är skapade av människor, och dränker stora landområden vid konstruktionen. Deemer et al. förklarar att detta stimulerar den mikrobiella nedbrytningen som omvandlar det lagrade kolet i biomassan till växthusgaser. Andra skillnader jämfört med naturliga akvatiska system menar de är de stora tryckskillnader orsakade av vattenkraftsdammar som kan orsaka stora utsläpp av metan genom uppblubbling och därav minska mängden metan som oxideras till koldioxid, samt närhet till mänskliga aktiviteter som kan orsaka flöden av organiskt material och näringsämnen till reservoaren och då driva på nedbrytningen av biomassa (Deemer et al., 2016).

Växthusgasutsläppen från vattenreservoarer har undersöks i flera studier, vilka har sammanställts i olika översiktsartiklar med ändamålen att uppskatta det totala växthusgasutsläppet från världens reservoarer. I dessa studier framkommer det att det finns en stor spridning i resultaten mellan olika studier, vilket beror på skillnader i bland annat klimat och vilket landskap som blivit översvämmat av reservoaren samt vilken metod som använts för att mäta utsläppen (Deemer et al., 2016; Demarty & Bastien, 2011). Växthusgasutsläppen från en reservoar sker genom (Demarty & Bastien, 2011):

1. Diffusion från vattenytan till atmosfären, till följd av skillnader i koncentration av gasen. Diffusionshastigheten beror till viss del på vindhastighet, regn samt rörelser i vattnet och luften orsakade av temperaturförändringar (konvektion).
2. Uppbubbling av metan från bottensediment, orsakat av anaerob nedbrytning av organiskt material. Bubblingen sker på grund av metangasens låga lösningsförmåga i vatten. Hastigheten för uppbubblingen beror främst på temperatur och hydrostatiskt tryck.
3. Utsläpp nedströms från reservoaren. Dessa inkluderar avgasning (då vatten med hög koncentration av gasen passerar turbiner) och uppbubbling och diffusion i vattendrag nedströms från reservoaren.

Dessa olika utsläppsvägar kan mätas med olika metoder. I många av de studier som genomförts där mätningar av metanutsläppen från en reservoar har gjorts är det endast diffusionen från reservoarens vattenyta som mätts (Deemer et al., 2016; Demarty & Bastien, 2011). Detta kan leda till en grov underskattning av det totala utsläppet från reservoaren, då uppbubblingen i många fall står för den större delen av utsläppet från själva reservoaren (Deemer et al., 2016). För att kunna inkludera utsläppen från reservoarer i globala beräkningar för det totala utsläppet av växthusgaser måste fler studier genomföras, med metoder som inkluderar samtliga utsläppsvägar från reservoarerna. Då metangasens utsläpp beror på anaerob nedbrytning av biologiskt material, är den rumsliga variationen i utsläppen starkt beroende av var nedbrytningen sker (Li et al., 2015). Det förekommer förhöjda utsläpp på vissa platser i reservoarer där artificiell mixning av vattnet sker, exempelvis vid vattenintag från floder (Guérin et al., 2016). Denna variation innebär att mätmetoderna måste vara flexibla för att kunna mäta variationen och eventuella ”hot spots” av utsläpp. Den tidsmässiga variationen av utsläppen är också stor, bland annat eftersom många reservoarer, likt sjöar, är stratifierade. Detta innebär att de har en epilimnion, vilket är det syrerika och varmare ytvattenskiktet, samt en hypolimnion, som är det underliggande, syrefattiga och kalla vattenskiktet. I klimat med varierande temperaturer har reservoarer perioder då temperaturen jämnar ut sig mellan skikten, och vattnet mixas. Under dessa perioder är utsläppen mycket högre än normalt, då metanrikt vatten når ytan (Guérin et al., 2016).

Utsläppen kan även variera under dygnet (Deshmukh et al., 2014), varför användning av mätmetoder som kan mäta under lång tid är att rekommendera för att inkludera dessa variationer.

Mätmetoder

Många av de studier som genomförts på växthusgasutsläpp från reservoarer kopplade till vattenkraftverk har endast mätt diffusionen från vattenytan till atmosfären, oftast genom att använda floating chambers (Deemer et al., 2016). På grund av detta är resultaten i de översiktsstudier som ämnar att beräkna det globala utsläppet från reservoarer troligen underskattade. För att få en mer realistisk förståelse för utsläppens storlek krävs det att fler studier använder metoder som även mäter uppblåsning av metangas samt utsläpp i turbiner och nedströms från reservoaren.

Denna studie ämnar jämföra sex metoder för mätning av metanutsläpp. De presenteras här i korthet för att sedan jämföras med en SWOT-analys senare i rapporten. Den mest använda, floating chamber, består av en flytande kammare som samlar in diffunderande och uppblåsande gas från vattenytan. Boundary layer metoden använder skillnad i gaskoncentration mellan vatten och atmosfär samt exempelvis vindhastighet för att beräkna flödet av gasen, och mäter därav endast diffunderande utsläpp. Eddy covariance använder avancerade instrument för att mäta gaskoncentration och gasflöde ovanför vattenytan, och mäter då både diffusion och uppblåsning. Resterande tre metoder; funnel trap, acoustic echosounder och optical methane detector, används för att mäta uppblåsning. Funnel trap är en omvänd tratt som placeras under vattenytan för insamling av uppblåsande gas. Acoustic echosounder sänder ut ljudsignaler som studsar tillbaka och ger information om bubblor i vattnet. Optical methane detector placeras på en autonom båt, och gör kontinuerliga mätningar av gaskoncentrationen precis ovanför vattenytan, för att registrera variationer som beror på uppblåsning.

Syfte och frågeställning

Syftet med studien är att jämföra de metoder som finns för att mäta metanutsläpp från reservoarer, genom att undersöka tidigare studier där dessa metoder använts. Frågeställningarna studien ska besvara är:

- Vilka metoder används i studier för att mäta metanutsläpp från reservoarer, och i vilken utsträckning?
- Under vilka förutsättningar är metoderna särskilt lämpade?

- Hur skiljer sig mätvärdena mellan de olika metoderna?

Metod

Metoden denna studie utgår från är en systematisk litteraturstudie, vilket innebär att litteraturen som studien baseras på har efter en omfattande sökning valts ut och sorterats utifrån bestämda kriterier (Ridley, 2012). Sökning av litteratur har genomförts i Lunds universitets databas LUBsearch. Nyckelord och booleansk logik har använts för att specificera sökningarna som resulterat i litteraturen som senare presenteras i resultatdelen av uppsatsen.

För att undersöka vilka metoder som används vid mätningar av metangasutsläpp i reservoarer har en identisk sökning genomförts för varje metod som denna studie undersöker, vilka redovisas nedan i tabell 1. Detta dels för att säkerställa att studier med de olika metoderna inkluderas och därav få en hög sensitivitet i sökningen (Karolinska Institutet, 2017), och för att identifiera antalet träffar per metod. Många artiklar förekom dock i flera av sökningarna, varför antalet unika artiklar är betydligt lägre än antalet träffar sammanlagt för alla sökningar. Det enda som ändrades mellan sökningarna var det sista sökkriteriet, som var namnet på mätmetoden. Det i sökningen som inte ändrades mellan sökningarna var: (TX (hydropower* OR hydroelectric*)) AND (methane OR CH4) AND (dam* OR reservoir*). I tabell 1 redovisas sökningen utan denna del, alltså endast det sista kriteriet, som anger namnet på mätmetoden.

Det första och sista kriteriet, alltså de som inkluderar vattenkraft och mätmetoden kräver endast att artikeln har orden nämnda någonstans i texten. Detta för att studierna inte nödvändigtvis måste vara utförda i reservoarer kopplade till vattenkraft, men kopplingen till det bör finnas nämnt i artikeln, och mätmetoden är i många fall endast nämnt i metoddelen av artikeln, varför hela texten inkluderades även i det sökkriteriet. Anledningen till att de metoder som jämförs i denna studie valdes ut är att de är de mest förekommande metoderna för mätning av utsläpp (Deemer et al., 2016).

Efter sökningarna sållades först alla dubletter ut, varefter de kvarvarande artiklarna valdes ut baserat på förutbestämda kriterier. Samtliga sökningar hade kriteriet att de är referentgranskade, för att säkerställa att de alla har genomgått en viss kvalitetskontroll, samt att de är skrivna på engelska. Kriterier för att artiklarna skulle inkluderas i sammanställningen över vilka metoder som används var att en självständig mätning av metangasutsläpp genomförts, där någon av de metoder som denna studie undersöker använts. Urvalet bland sökresultaten baserades först på titeln på artiklarna. Artiklar med en titel där det inte framgick att någon slags

diskussion om kolbalans eller metangas förekom sållades bort. Därefter lästes varje artikels abstract, och endast de artiklar som presenterade en självständig mätning av metangas valdes ut. Efter detta urval kvarstod 39 artiklar, varpå dessa klassificerades efter vilken metod, möjligen flera, som använts för mätningen.

För att inkludera en artikel i denna studie krävdes alltså att den innefattar en självständig mätning av metangasutsläpp från en reservoar, där någon av de metoder som denna studie ämnar jämföra använts.

Tabell 1

Sökningar genomförda i LUBsearch samt antal träffar och antal gånger metoden använts i de artiklar som valts ut baserat på kriterier. Endast det sista sökkriteriet redovisas i tabellen, för fullständig sökning, se text ovan.

Sökning i LUBsearch samt datum då sökningen genomfördes	Antal träffar	Antal gånger metoden använts i de utvalda artiklarna
2017-04-10: (TX floating)	86	26
2017-05-07 (TX boundary)	41	14
2017-04-11: (TX eddy)	32	4
2017-04-12: (TX funnel)	31	10
2017-04-12: (TX acoustic* OR echo*)	19	3

Då det är många olika faktorer som påverkar utsläppen från reservoarer, exempelvis klimat och vilket landområde som dränkts, är det inte möjligt att jämföra metodernas pålitlighet genom att endast jämföra resultaten från olika reservoarer där metoderna använts. Det som krävs för en direkt jämförelse av metoderna är att flera metoder använts samtidigt för mätning av metanutsläpp i samma reservoar. Därför användes LUBsearch för att söka efter sådana studier. Sökningen som genomfördes 2017-05-05 var:

(methane OR CH4) AND (TI (reservoir* OR lake*)) AND (TX ((floating AND eddy) OR (floating AND boundary) OR (boundary AND eddy) OR (acoustic AND funnel) OR (echo* AND funnel) OR (acoustic AND optic*) OR (echo* AND optic*))) AND (TX comparison).

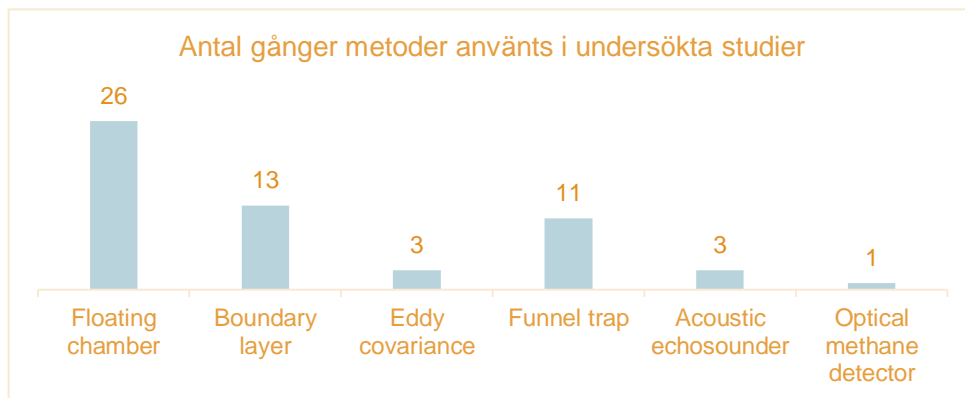
För att jämföra metoder för diffusion respektive metoder för uppblubbling inkluderades samtliga möjliga kombinationer i sökningen. Sökningen resulterade i 98 träffar. Kriterierna för urval av en artikel till sammanställningen var att den var referentgranskad, skriven på engelska samt att flera metoder användes för mätning av antingen diffusion eller uppblubbling av metangas samtidigt i samma reservoar

eller sjö. I sökningen inkluderades även studier i sjöar eftersom metoderna använts under längre tid för mätning i sjöar, varför det finns fler studier som jämför metoderna där. Skillnaderna mellan metoderna bör vara liknande i reservoarer och i sjöar, då både diffusion och uppblubbling förekommer även där. Baserat på de ovan nämnda kriterierna valdes åtta artiklar ut, vilka alla jämför metoder för mätning av diffusion. Dessa sammanställs i resultatdelen under ”direkta metodjämförelser”.

För att jämföra metoderna användes en SWOT-analysmetod. SWOT står för *strengths, weaknesses, possibilities and threats*. Analysmetoden används ofta inom företag och organisationer för att identifiera interna styrkor och svagheter samt externa möjligheter och hot (Hay & Castilla, 2006). Det är dock möjligt att använda analysmetoden i andra sammanhang, för att strukturera jämförelser (Jackson et al., 2003). I denna studie används den för att systematisera jämförelsen mellan metoderna genom att för varje metod, med hjälp av tidigare studier där metoden använts, identifiera styrkor, svagheter, möjligheter och hot vad gäller användningsområden, kostnad, arbetsbörda och mätningarnas pålitlighet. De artiklar som används i analysen är framförallt ett urval av de artiklar som sökningarna ovan genererat. Även ett fåtal artiklar som refererats till i somliga av dessa framsökta artiklar användes dock, då de bidrog med en aspekt som inte undersökts i de framsökta artiklarna. Urvalet av representativa artiklar för varje metod gjordes med kriteriet att de i sin studie problematiserade mätmetoden, och diskuterade sina resultat utifrån metodvalet eller metodens för- och nackdelar.

Resultat

Det framgår tydligt av de studerade artiklarna i denna studie att de vanligaste metoderna för mätning av metangasutsläpp från reservoarer är floating chamber och boundary layer method för diffusion samt funnel trap för uppblubbling. I figur 1 nedan redovisas de använda metoderna i de artiklar som undersökts. Sammanlagt undersöktes 39 artiklar, varav flera använde olika metoder för mätning av metangasutsläpp. Därför är antalet använda metoder fler än antalet undersökta artiklar.



Figur 1 Antal använda metoder

De metoder som använts i de undersökta studierna. I vissa studier har flera metoder använts, varför det totala antalet inte stämmer överrens med antalet undersökta artiklar.

Mätning av det totala utsläppet från reservoarerna mättes i flera fall, dock inte alla. I de studier som undersöktes var det:

- Tre studier som använde sig av eddy covariance, vilket mäter både diffunderande och uppblubblande utsläpp.
- Åtta av de 26 studier som använde sig av floating chamber använde även funnel trap för mätning av uppblubbling, varav en dessutom mätte utsläpp med eddy covariance.
- Två av de 13 studier som mätte diffunderande utsläpp med boundary layer mätte även uppblubbling med funnel trap.

- En av de studier som använde acoustic echosounder samt den studie som använde optical methane detector för mätning av uppblubbling mätte även diffunderande utsläpp med floating chamber och boundary layer respektive endast floating chamber.

SWOT-analys

Metoderna som använts i de artiklar som denna studie undersökt presenteras nedan i en SWOT-analys.

Floating chamber

Metoden beräknar gasflödet genom att mäta förändringen av gaskoncentrationen över tid i en sluten, flytande kammare som befinner sig på vattenytan (Erkkilä et al., 2017). Kammaren kopplas antingen direkt till en analysator, som mäter koncentrationen i kammaren, eller så tas manuella prover till en gaskromatograf, som kan mäta koncentrationen av gasen (Guérin et al., 2007). Mätningen sker oftast under en kortare period (10-30 min.), men tillräcklig för att kunna producera en linjär regression för koncentrationsökningen i kammaren över tid (Demarty & Bastien, 2007). När flera mätningar gjorts kan sedan genom interpolation ett genomsnitt för hela vattenytan beräknas.

Styrkor

Det är en billig och enkel metod för mätning av diffusion och/eller uppblubbling av metangas (Erkkilä et al., 2017; St-Pierre, 2007).

Den största fördelen med floating chamber är att den ger direkta värden på gasflödet vid en viss plats, och kan därför användas för att se rumsliga variationer i utsläppen. Detta kan användas för att hitta "hot spots" av utsläpp, som sedan kan ge information om de bakomliggande processer som påverkar utsläppen.

Svagheter

Om endast denna metod används är uppskattningarna för det totala utsläppet grova, eftersom de endast baseras på värdena från de enskilda mätpunkterna (Podgrajsek et al., 2014), och vid mätning av metanutsläpp från en reservoar är det därför möjligt att missa momentana utsläpp vid exempelvis uppblubbling. Även om metoden är enkel i sitt utförande är den arbetskrävande om provtagningen sker manuellt (Erkkilä et al., 2017). Kammarna kan påverka gasflödeshastigheten genom att antingen skydda vattenytan från yttre faktorer som vind eller regn, eller genom att skapa artificiell störning av vattenytan genom kammarens rörelser, vilket

ökar turbulensen (Matthews et al., 2003). De kan också påverka koncentrationsskillnaden mellan vattnet och atmosfären då gas fylls på i kammaren (Bastien et al., 2011).

Möjligheter

Metoden möjliggör för utredning av de bakomliggande processerna som påverkar metangasutsläppen. Genom att lokalisera var i reservoaren mest gas släpps ut, kan åtgärder sättas in för att minska utsläppet. Eventuellt finns det möjlighet att ta till vara på den gas som släpps ut från vattnet, och denna metod kan då lokalisera de platser där utsläppen är störst (Bambace et al., 2007). Nya metoder för automatisering av kammartekniken kan innebära att kammare kan användas för att täcka större områden genom att placeras på autonoma fordon, detta ökar dock kostnaden markant (Dunbabin & Grinham, 2017).

Hot

Vid beräkning av genomsnittligt utsläpp för hela reservoaren är det med denna metod möjligt att detta värde underskattas. Globala uppskattningar för det totala utsläppet från reservoarer riskerar också att bli lägre som en konsekvens av att denna metod används i stor utsträckning.

Boundary layer method

Denna metod använder sig av semi-empiriskt framtagna ekvationer för uträkning av flödet av en gas från vattenytan till atmosfären (Jennifer et al., 2015). De faktorer som påverkar flödet av gas från vattenytan till atmosfären är skillnad i koncentration samt gasöverföringshastigheten, eller $F = k \times \Delta C$, där F är det diffunderande flödet av gasen, k är gasöverföringshastigheten och ΔC är skillnaden mellan gaskoncentrationen i vattnet och den koncentration vattnet skulle ha vid jämvikt med atmosfären (Guérin et al., 2016). Det finns flera olika framtagna modeller för värdet på k (Erkkilä et al., 2017). Den enklaste och mest använda modellen beräknar gasöverföringshastigheten endast med hjälp av vindhastigheten ovan vattenytan, men nyare modeller inkluderar även värmeförändringar eller flytkraft som faktorer som påverkar turbulensen i vattnet, och därav gasöverföringen (Erkkilä et al., 2017; Vachon et al., 2010).

Styrkor

Få mätningar och provtagningar krävs för att gasflödet ska kunna beräknas med befintliga ekvationer, vilket gör det till en enkel och billig mätmetod (Duchemin & Lucotte, 1999), som även kan ge information om rumslig variation hos utsläppen (Jennifer et al., 2015).

Svagheter

Det beräknade flödet av gas från vattnet till atmosfären är starkt beroende av vilken formel för gasöverföringshastighet som används (Erkkilä et al., 2017; Schubert et al., 2012; Vachon et al., 2010). Metoden beräknar endast det diffunderande flödet av gas från vattnet, och kan alltså inte mäta utsläpp orsakade av uppblubbling.

Möjligheter

Vid användning av en modell för gasöverföringshastigheten som stämmer väl överens med andra mätmetoder kan denna metod möjliggöra enkel och billig mätning av diffunderande utsläpp, som kan kombineras med metoder för mätning av uppblubbling för att ge en god uppskattning om det totala utsläppet från en reservoar (Schubert et al., 2012).

Hot

Då den mest använda beräkningsmetoden är den som endast baserar gasöverföringshastigheten på vindhastighet ovan vattenytan, finns det risk för att globala uppskattningar för totalt utsläpp från reservoarer grundade på studier utförda med denna metod blir för låga (Erkkilä et al., 2017). Jämförelser mellan olika gasöverföringskoefficienter presenteras på sidan 22 i ”direkta metodjämförelser”.

Eddy covariance

Eddy covariance, som främst använts för mätning av växthusgaser från landområden, men vars användande i akvatiska system ökat de senaste årtiondena, är en mikrometeorologisk metod som mäter utbytet av en gas mellan vattenytan och atmosfären (Vesala et al., 2012). Metoden använder sig av avancerade instrument och formler som måste anpassas baserat på meteorologiska data för varje unik plats. Beräkningarna av mätdatan använder många antaganden om exempelvis meteorologiska förutsättningar som även måste kompenseras för beroende på syftet med mätningen (G. Burba & D. Andersson, 2005). Instrumenten mäter partialtrycket av en gas i luften samt vindhastigheten i tre dimensioner. Det horisontella luftflödet består av flera ”eddies” av varierande storlek, vilka är turbulenta virvlar med både horisontella och vertikala komponenter. Genom att med instrumenten få fram vertikal vindhastighet, temperatur och gaskoncentration, kan det vertikala flödet av en gas beräknas (Burba & Andersson, 2005).

Styrkor

Den stora fördelen med denna metod är den kan mäta det genomsnittliga gasflödet över ett stort område (vanligtvis hektarer) med hög mätfrekvens, samt under långa

tidsperioder (dagar till år) (Deshmukh et al., 2014). Metoden möjliggör därav för precisa mätningar av totalt utsläpp, samt information om de tidsmässiga variationerna (Deshmukh et al., 2014). Momentana utsläpp som är möjliga att missa med andra, direkta mätmetoder, inkluderas i mätningarna med denna metod (Podgrajsek et al., 2014).

Svagheter

Mätningen, som ofta sker över en längre tidsperiod, genererar stora mängder data, vilken är komplicerad att bearbeta (Bonneville & Strachan, 2007). På grund av detta, och de avancerade instrumenten, blir metoden kostsam och kräver kunnig personal (Vesala et al., 2012). Det är inte möjligt att med denna metod avgöra om källan till utsläppen beror främst på diffusion eller uppblubbling, då den endast mäter det totala utsläppet till atmosfären (Deshmukh et al., 2014).

Möjligheter

Med ökad användning av denna metod kan globala uppskattningar av det totala utsläppet från reservoarer göras med exakta (Schubert et al., 2012). Metoden anses vara referensmetod för vertikala flödesmätningar (Guérin et al., 2007), och kan därför användas för att utveckla och säkerställa kvaliteten hos enklare och billigare metoder. Tillsammans med andra metoder för mätning av rumslig variation, kan fullständiga mätningar göras av utsläppens storlek och variation (Podgrajsek et al., 2014). Exempelvis kan mätningarna med eddy covariance instrumenten möjliggöra för pålitliga beräkningar av diffusion med boundary layer metoden (Erkkilä et al., 2017), vilket även gör det möjligt att skilja på diffusionens och uppblubblingens bidragande till det totala utsläppet.

Hot

För denna metod uppmärksammades inga hot.

Funnel trap

Denna metod används för att mäta uppblubbling av metangas från sedimenten i botten av en sjö eller reservoar upp till atmosfären (Varadharajan et al., 2010). En omvänd tratt sänks ner under vattenytan, där bubblorna fångas in. Provtagning görs i änden av tratten, och koncentrationen av metan i den fångade gasen mäts med en gaskromatograf (Deshmukh et al., 2014). Det finns både manuella och automatiska system för tömning av kammaren (Varadharajan et al., 2010).

Styrkor

Det är en billig metod för mätning av uppblubbling. Automatiska provtagningsystem är något dyrare, men möjliggör en högre provtagningsfrekvens samtidigt som systemet kan användas under en längre tid och registrera tiden för bubblingshändelser (Varadharajan et al., 2010). Detta ger möjlighet att få information om uppblubblingens tidsmässiga variationer. Då mätningar, likt de med floating chamber, utförs på en specifik plats, ger metoden även information om uppblubblingarnas rumsliga variationer.

Svagheter

Med manuell provtagning kan antingen en hög eller låg provtagningsfrekvens användas. Det tidigare riskerar att missa stora uppblubblingar, medan det senare inte ger någon information om tiden för uppblubblingarna (Varadharajan et al., 2010). Då metoden är begränsad till ett antal specifika platser i reservoaren, finns det risk att stora uppblubblingshändelser missas (Deemer et al., 2016).

Möjligheter

Likt metoden floating chamber är det med denna metod möjligt att genom de specifika mätpunkterna lokalisera stora utsläppskällor, vilket kan underlätta för åtgärder. Med framtida utveckling av tekniken kan denna metod ge möjlighet till långvarig mätning med automatisk provtagning med hög frekvens, vilket kan ge viktigt information om uppblubblingens totala bidrag till växthusgasutsläppen från reservoarer (Varadharajan et al., 2010).

Hot

Då uppblubbling har väldigt stor tidsmässig och rumslig variation, finns det risk att denna metod underskattar uppblubblingens bidrag till det totala metangasutsläppet.

Acoustic echosounder

Den totala uppblubblingen av metangas från bottensedimenten är svår att mäta, på grund av stora rumsliga och tidsmässiga variationer (Frouzova et al., 2015). Denna metod använder sig av akustiska instrument som sänder ut ljudsignaler vilka sedan studsar tillbaka och tolkas för att studera bubblornas storlek och form. Bubblornas vertikala rörelse gör att de kan skiljas från andra objekt i vattnet, exempelvis fiskar (DelSontro et al., 2011).

Styrkor

Metoden ger pålitlig information om uppblubblingens rumsliga variation över ett stort mätområde (DelSontro et al., 2011; Frouzova et al., 2015).

Svagheter

Det är inte möjligt att med denna metod avgöra innehållet i gasbubblor. Inte alla bubblor består enbart av metan, vilket gör att användande av endast denna metod för bestämning av uppblubbling möjligen överskattar metanutsläppet (Frouzova et al., 2015). För att beräkna metanutsläppet från uppblubbling krävs kompletterande metoder för bestämning av gaskoncentrationen i bubblorna (DelSontro et al., 2011). Ekoloden har en smal strålbredd (Grinham et al., 2011) och har svårt att registrera bubblor på små vattendjup (Grinham et al., 2011; Frouzova et al., 2015), vilket begränsar användandet något.

Möjligheter

Metoden möjliggör för exakta mätningar av uppblubblingens rumsliga utbredning och variation. Detta kan vara användbart för att ge ökad förståelse för de bakomliggande faktorer som påverkar uppblubblingens omfattning, vilket idag saknas (DelSontro et al., 2011a). En ny teknik där det akustiska instrumentet skickar signaler horisontellt genom vattnet istället för vertikalt kan möjliggöra att större område kan mätas samtidigt, och ge tydligare information om just de bubblor som når vattenytan (Frouzova et al., 2015).

Hot

Vid vertikal mätning registreras bubblor djupt ner i vattnet. På grund av oxidation är det inte säkert att dessa bubblor är lika stora när de når vattenytan, om de ens gör det (Frouzova et al., 2015). Detta gör att beräkningarna för utsläppet från uppblubblingen blir mindre pålitliga.

Optical methane detector

En ny metod som utvecklats för att förenkla och precisera mätningen av uppblubbling av metan är en optisk metandetektor. Denna metod använder sig av ett instrument som sitter på en autonom båt, och kan göra direkta och kontinuerliga mätningar av metangaskoncentration i atmosfären orsakade av uppblubbling (Dunbabin & Grinham, 2017). Diffusion har en så liten momentan påverkan på koncentrationen i atmosfären att instrumentet inte kan mäta den. Plötsliga ökningarna i metangaskoncentrationen ovanför vattenytan antas bero på uppblubbling från sediment (Dunbabin & Grinham, 2017).

Styrkor

Då instrumentet, tillsammans med bland annat GPS, sitter på en autonomt styrd båt kan det täcka stora arealer, samtidigt som det ger information om tid och plats för varje mätning, som kan ske varje 0,13 sekund (Dunbabin & Grinham, 2017). Detta

ger exakta mätningar av metangasutsläpp orsakade av uppblubbling från sedimenten.

Svagheter

Den optiska metangasdetektorn, som gör direkta mätningar av metangaskoncentrationen, är väldigt dyr.

Möjligheter

Långvariga och exakta mätningar med dessa instrument på självgående båtar möjliggör för god information och uppblubbningens rumsliga och tidsmässiga variationer. Detta kan användas för att dels utveckla åtgärder för minskning av utsläppen, samt möjligen hitta generella "hot spots" där uppblubbling är särskilt stor, vilka sedan kan mätas med billigare instrument.

Hot

Om kostnaden för denna metod gör att endast den används istället för att mäta både diffusion och uppblubbling med andra billigare metoder, finns inte möjligheten att använda studien i globala uppskattningar av totalt utsläpp.

Direkta metodjämförelser

Då mätning av metangasutsläpp i reservoarer är en relativt ny företeelse, finns det väldigt få studier som än har jämfört olika mätmetoder i samma reservoar. För sjöar däremot, vars metangasutsläpp undersöks under längre tid, finns det en del forskning som jämför olika metoder. Sökning i LUBsearch producerade efter urval baserat på kriterier nämnda i metoddelen av denna studie åtta artiklar där jämförelser gjorts mellan de tre metoderna för mätning av diffusion, vilka i detta stycke förkortas på grund av flitig användning till floating chamber (FC), eddy covariance (EC) och boundary layer metoden (BLM). Samtliga av dessa studier är utförda på norra delen av jordklotet, i tempererat eller kallt klimat. Av dessa jämför två artiklar alla tre metoder (Erkkilä et al., 2017; Schubert et al., 2008), tre stycken jämför EC och FC (Podgrajsek et al., 2014; Schrier-Uijl et al. 2011; Eugster et al., 2011), och tre stycken jämför FC och BLM (López Bellido et al., 2009; Repo et al., 2007; Matthews et al., 2003).

De två studier som jämfört samtliga metoder påvisade en markant skillnad mellan de beräknade värdena från BLM och övriga metoder då den mest använda gasöverföringskoefficienten, som är vindhastighetsbaserad, användes. Denna koefficient har enligt båda studier gjort att de globala uppskattningarna av metangasutsläpp har underskattats (Erkkilä et al., 2017; Schubert et al., 2008).

Schubert et al. (2008) jämförde tre olika koefficienter för gasöverföringen, men alla dessa tre gav värden på diffusionen långt under (5-30 gånger lägre) de uppmätta med FC och EC samt stor skillnad mellan varandra. De ansåg dock att dessa låga värden kan ha orsakats av att uppblubbling bidrog mycket till det totala utsläppet, vilket inte inkluderas i uträkningar med BLM. Studien mätte även uppblubblingen med funnel trap, och om denna mätning kombinerades med BLM gav det ett liknande värde som uppmätts med EC och FC. Erkkilä et al. (2017) bedömde utifrån en tidigare studie att uppblubbling inte är någon viktig mekanism för gastransport i den sjö där studien genomfördes. Överlag var resultaten från de tre metoderna i deras studie därav liknande. Även i denna studie jämfördes dock tre koefficienter för gasöverföring för beräkning med BLM, och det påvisades en stor skillnad mellan de tre. Den vanligast använda koefficienten stämde i mindre utsträckning överens med värden från EC och FC än två mer nyligen framtagna. Därav dras slutsatsen att val av koefficient för att bestämma gasöverföringshastigheter är av stor betydelse om BLM ska användas. Schubert et al. (2008) menar att EC är den självklara metoden för pålitlig mätning av gasutsläpp, framförallt när både diffusion och uppblubbling förekommer.

Samtliga tre studier som jämförde EC och FC påpekade att det förekommer skillnader mellan de två. Podgrajsek et al. (2014) redovisade något lägre mätvärden för totalt utsläpp med FC än EC. Detta beror främst på att FC, med sin lägre provtagningsfrekvens och mindre provtagningsyta, missade stora momentana utsläppshändelser som mätts av EC. På grund av deras metodologiska skillnader anser de att metoderna ska ses som komplement till varandra snarare än jämföras. FC ger information om utsläppens rumsliga variation, men EC ger ett pålitligare värde på det totala utsläppet. I studien utförd av Eugster et al. (2011) placerades EC på stranden, varpå den inte täckte hela området där FC placerats, längre ut i sjön. De menar därför att framtida jämförelser måste vara noga med att placera EC så att mätningar görs i samma område som FC placerats. Schrier-Uijl et al. (2011) fick liknande värden för EC och FC. Dock utfördes jämförelsen endast under fyra timmar, varför mätning av momentana variationsskillnader möjligen inte inkluderats i jämförelsen. De påpekar dock att framtida kontinuerliga mätningar med EC bör göras för att ge information om tidsmässiga variationer i utsläpp, dvs. dagliga, månatliga och årliga.

I två av de tre studier där FC och BLM jämfördes gav de två metoderna liknande resultat (López Bellido et al., 2009; Repo et al., 2007). Repo et al. (2007) mätte även uppblubbling med funnel trap, och fick då väldigt låga värden. De antar därför att de liknande resultaten mellan FC och BLM beror på att väldigt lite uppblubbling påverkat mätningarna med FC. Matthews et al. (2003) fick genomgående högre resultat med FC. De menar att detta troligen beror på att de flytande kammarna inte sänkts under vattenytan, och därav inducerat artificiell störning på vattenytan som påverkat mätningen.

Diskussion

Av de metoder som denna studie visat används för mätning av metangasutsläpp från reservoarer är de vanligaste floating chamber och boundary layer. Detta är troligen på grund av att de under lång tid använts för mätning av gasutsläpp, främst CO₂, från andra system, exempelvis sjöar (Duchemin & Lucotte, 1999).

Mätningar av uppblubbling sker inte alltid i samband med diffusionsmätningar. Denna studie visar att endast 15 av de 39 artiklar som undersöktes inkluderade mätning av uppblubbling. Den vanligaste metoden är funnel trap, som i alla förutom en studier används i samband med andra metoder för att inkludera både uppblubbling och diffunderande utsläpp. Detta resultat stämmer väl överens med andra sammanställningar av utförda studier (Deemer et al., 2016).

För att mätningar ska anses vara pålitliga måste uppblubbling och övriga utsläppsvägar inkluderas. Trots att flera studier visat att utsläppet, och särskilt det uppblubbade utsläppet, är störst i tropiska klimat (Barros et al., 2011), visar många studier att uppblubbling är en stor, och ofta den största, bidragande utsläppsvägen även i reservoarer på nordligare breddgrader (Venkiteswaran et al., 2013; Diem et al., 2008). Deemer et al. (2016) drar i sin översiktsartikel slutsatsen att det inte är latituden och åldern som påverkar det totala utsläppet från reservoarer, utan snarare reservoarens primära produktion och övergödningsgrad. De visar även att bidragandet av uppblubbling till det totala utsläppet från en reservoar varierar kraftigt, varför det är väldigt viktigt att inkludera mätningar av uppblubbling från alla reservoarer som ska inkluderas i globala uppskattningar.

De få jämförande studier som har gjorts mellan de tre mätmetoderna för diffunderande utsläpp har varierande resultat, vissa visar på stora skillnader mellan metoderna, andra på likheter i mätningar. Framförallt framhäver de dock osäkerheterna med metoderna floating chamber och boundary layer. Osäkerheten med floating chamber grundar sig i att mätningarna kan missa möjliga "hot spots" samt att kammaren i sig kan påverka mätresultaten. Boundary layer metodens osäkerheter beror på vilken beräkningsmodell som används. Modeller som bevisats jämförbara med mätvärden från eddy covariance bör användas i framtida studier. Fler studier som jämför dessa olika metoder, samt de för mätning av uppblubbling, vilket idag saknas, bör genomföras i reservoarer för att slutsatser ska kunna dras gällande metodernas pålitlighet.

När lämpar sig de olika metoderna?

Eddy covariance och boundary layer method använder sig av bland annat vindhastighetsmätningar för att beräkna flödet av metangas från vattnet till atmosfären. Detta gör att det krävs vissa vindförhållanden för att dessa metoder ska kunna användas. Den återstående metoden för mätning av diffunderande utsläpp vid avsaknad av vind är floating chamber, men denna har i vissa studier visat sig överskatta utsläppet på grund av att kammaren som flyter på ytan orsakar turbulens vid vindstilla förhållanden, vilket ökar gasflödes hastigheten (Vachon et al., 2010; Matthews et al., 2003). Kammarens påverkan på gasflödet bör undersökas ytterligare för att påvisa om metoden är tillräckligt pålitlig för att användas för mätning av utsläpp, särskilt under vindstilla förhållanden. Samtliga mätningar av diffunderande utsläpp bör alltså ske i förhållanden med viss vind, för att säkra goda resultat.

Metodernas effektivitet

Effektivitet delas oftast in i två olika kategorier, *inre* och *yttre* effektivitet, vilka motsvarar engelskans uppdelning av *efficiency* och *effectiveness*. Brorström et al. (2006) beskriver inre effektivitet som relationen mellan input och output, alltså förhållandet mellan resultat och satsade resurser. Yttre effektivitet beskrivs som måluppfyllelse, alltså till vilken grad något uppfyller de krav eller mål som är uppsatta.

För denna studie blir begreppen användbara för att jämföra effektiviteten hos de metoder som jämförts i SWOT-analysen. Den totala effektiviteten inkluderar både inre och yttre effektivitet, vilka ofta har ett motsatsförhållande (Brorström et al., 2006). Inre effektivitet ställer inga krav på att uppfylla mål, utan endast att de resultat som uppnås görs så till en så låg kostnad som möjligt. Yttre effektivitet däremot har endast slutmålet som krav, och hur det uppnås påverkar inte den yttre effektiviteten. En kombination av dessa innebär att mål kan uppnås till en så låg kostnad som möjligt, varför inre effektivitet kan ses som en del i att uppnå den yttre effektiviteten (Brorström et al., 2006).

De två huvudsakliga mål med att mäta metangasutsläppen från reservoarer är att undersöka den rumsliga och tidsmässiga variationen av diffusion och uppblubbling, eller mäta det totala utsläppet från reservoaren. Beroende på vad målet med mätningen är skiljer sig effektiviteten mellan metoderna. Förmågan att uppfylla målet ger den yttre effektiviteten, medan kostnaden i relation till resultatet ger den inre effektiviteten.

För att mäta variationer i utsläppen krävs metoder som skiljer på det diffunderade och uppbyggande utsläppet. Floating chamber kan mäta båda samtidigt, och är en billig och enkel metod. Den ger god information om rumsliga variationer, men med manuella provtagningar är det svårt att göra långvariga och kontinuerliga mätningar, och automatiska metoder kräver större resurser. Flera felkällor gör även att metodens mätresultat är mindre pålitliga, vilket sammantaget gör att både den inre och yttre effektiviteten minskar något. Den billigaste och enklaste metoden för mätning av enbart diffunderande utsläpp är boundary layer metoden. Endast ett fåtal mätningar och provtagningar behöver genomföras, och vid användning av en bevisat pålitlig metod för beräkning av gasöverföringshastigheten har metoden god överensstämmelse med andra dyrare mätmetoder, exempelvis eddy covariance (Erkkilä et al., 2017; Vachon et al., 2010). Boundary layer kan ge information om rumslig variation, och även tidsmässig variation vid hög provtagningsfrekvens. Metoden måste dock kombineras med en metod för mätning av uppbygging för att beräkna totalt utsläpp från reservoaren, vilket ökar kostnaden och arbetsbördan. I kombination med användning av billiga automatiska funnel trap system för mätning av uppbygging på flera ställen under lång tid, kan de två metoderna mäta både totalt utsläpp samt variationer med god precision (Varadharajan et al., 2010). Då metoderna är relativt billiga och pålitliga, får de en hög inre effektivitet, samt hög yttre effektivitet för båda de uttryckta målen med mätningar.

Eddy covariance mäter över stora områden samtidigt med god precision. Med kontinuerliga och automatiska mätningar blir arbetsbördan mindre än med andra metoder, men kostnaden och kunskapen som krävs för korrekt kalibrering och datahantering gör att den inre effektiviteten minskar något. Är det övergripande målet med undersökningar att bidra till att möjliggöra globala uppskattningar av det totala utsläppet från reservoarer är dock eddy covariance troligen en metod med hög inre och yttre effektivitet. Även vid mätning av tidsmässiga variationer är eddy covariance en metod med hög total effektivitet.

För bästa möjliga mätning av uppbygging för att undersöka rumslig och tidsmässig variation är troligen optical methane detector mest lämpad. Höga kostnader för autonoma fordon och dyra mätinstrument gör dock att den inre effektiviteten minskar. Acoustic echosounder är en billigare metod, men osäkerheten i mätningarna är än så länge något större, och en ytterligare mätmetod krävs för att bestämma gasinnehållet i bubblorna, varför dess inre effektivitet är snarlik den hos optical methane detector, men den yttre effektiviteten lägre.

I tabell 2 presenteras metoderna med hög respektive låg total effektivitet inom de två målen för mätningarna. Metodernas yttre effektivitet beror på vad målet med undersökningarna är, och den inre hur stor kostnaden och arbetsbördan är jämfört med hur pålitligt resultatet av mätningarna är.

Tabell 2

Metodernas totala effektivitet vad gäller att uppfylla målet med mätningen så bra som möjligt med så låg kostnad och arbetsbörda som möjligt.

	Totalt utsläpp	Rumsliga och tidsmässiga variationer
Hög effektivitet	Boundary layer + automatisk funnel trap Eddy covariance	Boundary layer Automatisk funnel trap Eddy covariance (tidsmässiga)
Låg effektivitet	Floating chamber	Optical methane detector Acoustic echosounder Floating Chamber

Metodernas användningsområden

Beroende på syftet med mätningar av metanutsläpp från reservoarer bör olika metoder användas. Effektiviteten som presenterats ovan beskriver metodens förmåga att generera pålitliga resultat för så låg kostnad som möjligt, för att uppnå målet med mätningen. För att mäta det totala utsläppet från reservoaren, ofta för att bidra till kunskapen om reservoarerens totala globala utsläpp, bör metoder användas som har en hög effektivitet vad gäller mätning av totalt utsläpp. Då eddy covariance anses vara den metod med mest pålitliga mätresultat, men samtidigt är en dyr metod, kan den användas som referensmetod för att säkerställa att andra billigare metoder utvecklas och ger så pålitliga resultat som möjligt. Detsamma gäller för de mer avancerade metoderna för mätning av uppblubbling, acoustic echosounder och optical methane detector. De gör precisa mätningar av rumsliga och tidsmässiga variationer, men är dyra, varför de möjligen är mest lämpade att användas för att hitta generella "hot spots" av uppblubbling i reservoarer, vilka sedan kan observeras under längre tid med exempelvis automatiska funnel traps. "Hot spots" har visats spela en stor roll i utsläppet från reservoarer, varför mätmetoder med god rumslig täckning behövs för att inkludera samtliga utsläppsvägar (DelSontro et al., 2011).

Vattenkraft och reservoarer i ett större perspektiv

Reservoarer och dammar förväntas byggas ut i stor skala runtom i världen de närmaste åren. Detta kan leda till att mängden växthusgaser från antropogena källor, framförallt från energiproduktion, riskerar att öka. Forskning som påvisar stora utsläpp av framförallt metan gör att vattenkraft möjligen bör ifrågasättas som miljömässigt hållbar elproduktion. I denna kritiska period när växthusgasutsläpp måste kontrolleras för att begränsa den globala uppvärmningen är det särskilt viktigt att undersöka konsekvenserna av utbyggnationen av vattenkraft. Vanligtvis beräknas utsläppen av metan i koldioxidekvivalenter baserade på ett 100-årigt tidsperspektiv, men då vi befinner oss i en situation där växthusgasutsläppen måste minska drastiskt för att nå målet med under 2 graders global uppvärmning bör utsläppen snarare beräknas med ett 20-årigt tidsperspektiv, vilket kraftigt ökar metanens påverkan (Deemer et al., 2016; Fearnside, 2015). Deemer et al. beräknar att reservoarer står för cirka 1,3 % av de totala antropogena växthusgasutsläppen under 100 år. Med ett 20-års perspektiv uppskattar de att utsläppen är de dubbla. De påpekar även att mätningarna som uppskattningarna grundar sig på inte inkluderar samtliga utsläppsvägar, exempelvis avgasning och utsläpp nedströms från vattenkraftverk, varför de troligen är betydligt större (Deemer et al., 2016). Variationer i mätresultat från olika reservoarer och avsaknad av pålitliga globala uppskattningar om totalt utsläpp från reservoarer har gjort att IPCC länge valt att exkludera dessa utsläpp från sina riktlinjer för nationella mätningar (Fearnside, 2015). Dock har de i uppdaterade riktlinjer 2015 inkluderat mätningar av diffusion från vattenytan i reservoarer, men övriga utsläppsvägar är fortfarande valfria att mäta. Detta, och osäkerheten i mätvärdena, gör att utsläppen underskattas i globala inventarier av växthusgasutsläpp under United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (Fearnside, 2015). De stora skillnaderna jämfört med exempelvis naturliga sjöar vad gäller utsläppsvägar och dränkt biomassa gör att reservoarer med sitt troligen betydligt högre utsläpp bör prioriteras för mätningar av växthusgaser. Mätning i sjöar bör också göras för att vidare undersöka kolcykeln (Tranvik et al., 2009), men på grund av den stora globala utvecklingen av vattenkraft och konstruktion av reservoarer måste deras påverkan säkerställas.

Under den relativt korta period som växthusgasutsläpp mätts i reservoarer har många olika metoder använts. Detta är en av anledningarna till att mängden rapporterade utsläpp varierar kraftigt. Denna undersökning visar att mindre än hälften av de studier som genomförts har inkluderat både diffunderande och uppblåsta metangasutsläpp, vilket gör att globala uppskattningar för totalt utsläpp blir underskattade. De vanligaste använda metoderna är de som i flertalet studier påvisats generera undermåliga resultat jämfört med andra mer pålitliga metoder. Detta skapar ytterligare osäkerheter för de globala översikter som produceras. För att möjliggöra goda uppskattningar om globala utsläpp från

reservoarer och vattenkraftsdammar bör IPCC revidera sina riktlinjer gällande mätningar så att de inkluderar samtliga utsläppsvägar av alla växthusgaser (Fearnside, 2015), samt att de metoder som rekommenderas är bevisat pålitliga. Då ekonomiska medel tillåter bör fler studier med eddy covariance utföras, samt fler studier som jämför olika metoder för att säkerställa deras pålitlighet. Billigare metoder, såsom boundary layer och automatiska funnel trap system kan därefter användas för att utöka underlaget för globala uppskattningar om totalt utsläpp.

Slutsats

Val av metod för mätning av metanutsläpp bör väljas noga beroende på vad syftet med mätningen är. De vanligaste metoderna för mätning av diffusion och uppblubbling, Floating chambers och funnel traps, är billiga metoder för information om utsläppens rumsliga variationer, vilket kan användas för att bestämma de bakomliggande faktorerna för utsläppen. Floating chamber har dock i ett flertal studier visats påverka gasflödet genom att antingen minska eller öka turbulensen genom att skydda från yttre påverkan eller genom att skapa artificiell turbulens vid vindstilla förhållanden. Boundary layer metoden kan, med ett pålitligt empiriskt framtaget värde på gasöverföringskoefficient, ge goda värden på det diffunderande utsläppet från reservoarer på ett billigt och enkelt sätt. I kombination med exempelvis automatiska funnel trap system kan de ge en god tidsmässig och rumslig precision på långvariga mätningar som kan användas för globala uppskattningar. Eddy covariance är den mest pålitliga metoden för mätning av totalt utsläpp, men är dyr och kräver kunnig personal för kalibrering och datahantering. Vid ökad användning av denna metod skulle dock goda uppskattningar om globala utsläpp kunna genomföras, och jämförelser med billigare metoder kan säkerställa deras pålitlighet. Acoustic echosounder och optical methane detector är relativt dyra metoder för mätning av uppblubbling, men kan ge god information om uppblubblingens påverkan på totalt utsläpp, och dess rumsliga och tidsmässiga variationer, som kan underlätta framtida mätningar och åtgärder.

För att kunna inkludera reservoarer totala bidragande till det antropogena utsläppet av växthusgaser i globala uppskattningar krävs fler studier där pålitliga metoder används för mätning av samtliga utsläppsvägar av framförallt metan.

Referenser

- BAMBACE, L. A. W., RAMOS, F. M., LIMA, I. B. T. & ROSA, R. R. 2007. Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. *Energy*, 32, 1038-1046.
- BARROS, N., COLE, J. J., TRANVIK, L. J., PRAIRIE, Y. T., BASTVIKEN, D., HUSZAR, V. L. M., DEL GIORGIO, P. & ROLAND, F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4, 593-596.
- BASTIEN, J., DEMARTY, M. & TREMBLAY, A. 2011. CO₂ and CH₄ diffusive and degassing emissions from 2003 to 2009 at Eastmain 1 hydroelectric reservoir, Quebec, Canada. *INLAND WATERS*, 1, 113-123.
- BONNEVILLE, M-C. & STRACHAN, I. 2007. The Eddy Covariance Technique: Data Processing, Result Examples and Applications. *Reservoirs' net greenhouse gas emissions research project, Eastmain-1*.
- BRORSTRÖM, B., HAGÉN, H-O., HAGSTEN, E., KASTBERG, G., MAGNUSSON, B., MALMBERG, B. & MURRAY, R. 2006. Mått på välfärdens tjänster – En antologi om produktivitet och effektivitet i kommunala verksamheter. *Rapport till ESS, Expertgruppen för Studier i Samhällsekonomi*, 2006:2 Finansdepartementet.
- BURBA, D. & ANDERSON, D. 2005. Introduction to the Eddy Covariance Method: General Guidelines and Conventional Workflow. *LI-COR Biosciences*.
- DEEMER, B. R., HARRISON, J. A., SIYUE, L. I., BEAULIEU, J. J., DELSONTRO, T., BARROS, N., BEZERRA-NETO, J. F., POWERS, S. M., DOS SANTOS, M. A. & VONK, J. A. 2016. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*, 66, 949-964.
- DELSONTRO, T., KUNZ, M. J., KEMPTER, T., WUEST, A., WEHRLI, B. & SENN, D. B. 2011. Spatial Heterogeneity of Methane Ebullition in a Large Tropical Reservoir. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 45, 9866-9873.
- DELSONTRO, T., OSTROVSKY, I., EUGSTER, W., MCGINNIS, D. & WEHRLI, B. 2011a. Hydroacoustic examination of reservoir ebullition: Sources of variability explored in comparison with other methods. Diss., ETH Zurich.
- DEMARTY, M. & BASTIEN, J. 2007. Measuring Greenhouse Gases in Aquatic Environments With Floating Chambers. *Reservoirs' net greenhouse gas emissions research project, Eastmain-1*.
- DEMARTY, M. & BASTIEN, J. 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy*, 39, 4197-4206.

- DESHMUKH, C., SERCA, D., DELON, C., TARDIF, R., DEMARTY, M., JARNOT, C., MEYERFELD, Y., CHANUDET, V., GUEDANT, P., RODE, W., DESCLOUX, S. & GUERIN, F. 2014. Physical controls on CH₄ emissions from a newly flooded subtropical freshwater hydroelectric reservoir: Nam Theun 2. *BIOGEOSCIENCES*, 11, 4251-4269.
- DIEM, T., KOCH, S., SCHWARZENBACH, S., WEHRLI, B. & SCHUBERT, C. J. 2008. Greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄ and N₂O) from perialpine and alpine hydropower reservoirs. *Biogeosciences Discussions*, 5, 3699.
- DUCHEMIN, E. & LUCOTTE, M. 1999. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse. *Environmental Science & Technology*, 33, 350.
- DUNBABIN, M. & GRINHAM, A. 2017. Quantifying Spatiotemporal Greenhouse Gas Emissions Using Autonomous Surface Vehicles. *Journal of Field Robotics*, 34, 151.
- ERKKILÄ, K. M., MAMMARELLA, I., BASTVIKEN, D., BIERMANN, T., HEISKANEN, J. J., LINDROTH, A., PELTOLA, O., RANTAKARI, M., VESALA, T. & OJALA, A. 2017. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method. *Biogeosciences Discuss.*, 2017, 1-29.
- EUGSTER, W., DELSONTRO, T. & SOBEK, S. 2011. Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH₄ emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability. *BIOGEOSCIENCES*, 8, 2815-2831.
- FEARNSIDE, P. M. 2015. Emissions from tropical hydropower and the IPCC. *Environmental Science & Policy*, 50, 225-239.
- FROUZOVA, J., TUŠER, M. & STANOVSKY, P. 2015. Quantification of methane bubbles in shallow freshwaters using horizontal hydroacoustical observations. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13, 609-616.
- GRINHAM, A., DUNBABIN, M., GALE, D. & UDY, J. 2011. Quantification of ebullitive and diffusive methane release to atmosphere from a water storage. *Atmospheric Environment*, 45, 7166-7173.
- GUÉRIN, F., ABRIL, G., SERÇA, D., DELON, C., RICHARD, S., DELMAS, R., TREMBLAY, A. & VARFALVY, L. 2007. Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream. *Journal of Marine Systems*, 66, 161-172.
- GUÉRIN, F., DESHMUKH, C., LABAT, D., PIGHINI, S., VONGKHAMSAO, A., GUÉDANT, P., RODE, W., GODON, A., CHANUDET, V., DESCLOUX, S. & SERÇA, D. 2016. Effect of sporadic destratification, seasonal overturn, and artificial mixing on CH₄ emissions from a subtropical hydroelectric reservoir. *Biogeosciences*, Vol 13, Iss 12, Pp 3647-3663 (2016), 3647.
- HAY, G.J. & CASTILLA, G. 2006. Object-Based Image Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- IPCC. 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier et al. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JACKSON, S.E., JOSHI, A. & ERHARDT, N.L. 2003. Recent Research on Team and Organizational Diversity: SWOT Analysis and Implications. *Journal of Management* 29:801.
- JENNIFER, J. M., ALLISON, M. F., JANA, R. P., MARK, S. B., ARTHUR, J. S. & MATTHEW, J. T. 2015. Spatial and Temporal Correlates of Greenhouse Gas Diffusion from a Hydropower Reservoir in the Southern United States. *Water, Vol 7, Iss 11, Pp 5910-5927 (2015)*, 5910.
- KAROLINSKA INSTITUTET. 2017. Systematiska Översikter. *Universitetsbiblioteket, Karolinska Institutet*.
<https://kib.ki.se/soka-vardera/systematiska-oversikter#header-7>
 (Hämtad 2017-05-06)
- LI, S., BUSH, R. T., SULLIVAN, L. A. & ZHANG, Q. 2015. Methane and CO₂ emissions from China's hydroelectric reservoirs: a new quantitative synthesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 5325-5339.
- LÓPEZ BELLIDO, J., TOLONEN, T., KANKAALA, P. & OJALA, A. 2009. CO₂ and CH₄ fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Pääjärvi, southern Finland). *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 114, n/a.
- MATTHEWS, C. J. D., ST LOUIS, V. L. & HESSLEIN, R. H. 2003. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 37, 772-780.
- MYHRE, G., D. SHINDELL, F.-M. BRÉON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, J.-F. LAMARQUE, D. LEE, B. MENDOZA, et al. 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.
- PODGRAJSEK, E., SAHLÉE, E., BASTVIKEN, D., HOLST, J., LINDROTH, A., TRANVIK, L. & RUTGERSSON, A. 2014. Comparison of floating chamber and eddy covariance measurements of lake greenhouse gas fluxes. *Biogeosciences, Vol 11, Iss 15, Pp 4225-4233 (2014)*, 4225.
- REPO, M. E., HUTTUNEN, J. T., NAUMOV, A. V., CHICHULIN, A. V., LAPSHINA, E. D., BLEUTEN, W. & MARTIKAINEN, P. J. 2007. Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia. *Tellus: Series B*, 59, 788-796.
- RIDLEY, D. 2012. *The Literature Review: A Step-by-Step Guide for Students*. SAGE
- SCHRIER-UIJL, A., VERAART, A., LEFFELAAR, P., BERENDSE, F. & VEENENDAAL, E. 2011. Release of CO and CH from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 102, 265-279.
- SCHUBERT, C. J., DIEM, T. & EUGSTER, W. 2012. Methane Emissions from a Small Wind Shielded Lake Determined by Eddy Covariance, Flux Chambers, Anchored

- Funnels, and Boundary Model Calculations: A Comparison. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 46, 4515-4522.
- SCHUBERT, C. J., WEHRLI, B., SCHWARZENBACH, S., KOCH, S. & DIEM, T. 2008. Greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄ and N₂O) from perialpine and alpine hydropower reservoirs. *Biogeosciences Discussions*, Vol 5, Iss 5, Pp 3699-3736 (2008), 3699.
- ST-PIERRE, M. 2007. Measuring Greenhouse Gases in Aquatic Environments. *Reservoirs' net greenhouse gas emissions research project, Eastmain-1*.
- TRANVIK, A., J. DOWNING, J. COTNER, S. LOISELLE, R. STRIEGL, T. BALLATORE, P. DILLON, K. FINLAY, K. FORTINO, L. KNOLL et al. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.* 54(8, part 2), 2298-2314.
- VACHON, D., PRAIRIE, Y. T. & COLE, J. J. 2010. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange. *Limnology and Oceanography*, 55, 1723-1732.
- VARADHARAJAN, C., HERMOSILLO, R. & HEMOND, H. F. 2010. A low-cost automated trap to measure bubbling gas fluxes. *LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY-METHODS*, 8, 363-375.
- VENKITESWARAN, J. J., SCHIFF, S. L., ST LOUIS, V. L., MATTHEWS, C. J. D., BOUDREAU, N. M., JOYCE, E. M., BEATY, K. G. & BODALY, R. A. 2013. Processes affecting greenhouse gas production in experimental boreal reservoirs. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES*, 27, 567-577.
- VESALA, T., W. EUGSTER & A. OJALA. 2012. Eddy Covariance Measurements Over Lakes. In: Eddy covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis [Aubinet et al., eds.]. *Springer Atmospheric Sciences*. DOI 10.1007/978-94-007-2351-1 15.
- WORLD BANK. 2014. Electricity production from hydroelectric sources (% of total). *The World Bank Group*. <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.HYRO.ZS> [Hämtad 2017-04-15]
- WORLD BANK. 2014a. Access to electricity (% of population). *The World Bank Group*. <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS> [Hämtad 2017-04-15]
- ZARFL, C., LUMSDON, A., BERLEKAMP, J., TYDECKS, L. & TOCKNER, K. 2015. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77, 161-170.



LUNDS
UNIVERSITET

WWW.CEC.LU.SE
WWW.LU.SE

Lunds universitet

Miljövetenskaplig utbildning
Centrum för miljö- och
klimatforskning
Ekologihuset
223 62 Lund