



Akkumulation av CO₂ och CH₄ i istäckta boreala sjöar

Hur förändras ackumulationen i sjöar påverkade av avverkning jämfört med referenssjöar?

MARIA SANDSTRÖM

Maria Sandström
Examensarbete i Geovetenskap 15 hp
Avseende kandidatexamen
Rapporten godkänd: 05 Juni 2015
Handledare: Ann-Kristin Bergström och Anders Jonsson



Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG)
901 87 Umeå, Sweden
Telefon 090-786 50 00
Texttelefon 090-786 59 00
www.umu.se

Förord

Först och främst vill jag tacka mina handledare Ann-Kristin Bergström och Anders Jonsson för all hjälp med utformningen av examensarbetet och för all hjälp och stöd dom bidragit med under hela skrivprocessen. Stort tack även till Marcus Klaus för alla provtagningar, laborationsarbeten och bearbetning av allt data som han har inhämtat under åren och som ligger till grund för detta arbete.

Accumulation of CO₂ and CH₄ in boreal ice-covered lakes

Is the accumulation in lakes affected by clearcutting different compared to reference-lakes?

Maria Sandström

Abstract

The aim of this report was to quantify the accumulation of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) in ice-covered lakes in winter (October-March) during three consecutive years, and to assess whether the concentrations of DIC and CH₄, as well as the ratio DIC:CH₄ differs between years and between lakes affected by clearcutting and untreated reference lakes. Water- and gas samples were collected from four boreal lakes (two affected by clearcutting and two untreated reference lakes) located in Västerbottens inland in spring. The lakes were found to accumulate on average 91, 55, and 84 mgCm⁻²d⁻¹ during winters 2012-2013, 2013-2014, and 2014-2015, mostly originating from CO₂. The concentrations of DIC (autumn and spring) were higher in the affected clear-cut lakes compared to reference lakes for all years, including the reference year (2012-2013) before clear-cutting. No such difference was found for CH₄ or the ratio DIC:CH₄. Accumulated concentrations of CO₂ and CH₄ varied between years while the ratio (accumulated) CO₂:CH₄ increased over time for all lakes but with no difference between the clear-cut lakes and the reference lakes. The differences between the clear-cut and the reference lakes, hence, are unclear with differences between years likely stemming from natural variations. The effects of clearcutting in catchment areas might be more visible at other times of year not seen in this study which focuses only on winter. The amount of CO₂ and CH₄ accumulated under ice in lakes was substantial i.e. high-lighting the importance of including winter accumulation of greenhouse-gases in estimations of yearly emissions from lakes.

Key words: Accumulation, greenhouse gases, boreal lakes, winter, Sweden

Innehållsförteckning

1. Inledning och Bakgrund	1
1.1. Bakgrund	1
1.1.1. Produktion av CO ₂ och CH ₄ i sjöar	1
1.1.2. Skogsbrukets inverkan	2
1.2. Syfte	3
2. Material och Metod	3
2.1. Områdesbeskrivning	3
2.2. Fältarbete	4
2.3. Labbanalys	5
2.4. Dataanalys	5
3. Resultat	6
3.1. Höst- och vårförhållanden	6
3.2. Ackumulation av CO ₂ och CH ₄ i sjöar	8
4. Diskussion	11
4.1. Ackumulation av kol	11
4.2. Förändringar i koncentration och förhållande	11
4.3. Framtida förändringar	13
4.4. Slutsats	13
5. Referenser	14

Bilaga 1 – Resultat av statistiska analyser

1. Inledning och Bakgrund

1.1 Bakgrund

Globalt kan sjöar fungera som källor eller sänkor för växthusgaser (Cole et al. 2007) och står för en betydande del av de atmosfäriska utsläppen av växthusgaser globalt sett trots att sjöar endast står för en liten del av den totala arean öppet vatten, jämfört med haven (Tranvik et al. 2009). Fastän sjöar är en viktig del av den globala kolcykeln med beräknade utsläpp på $0,32\text{PgCyr}^{-1}$ globalt (Raymond et al. 2013) är sjöar inte studerade i samma utsträckning som haven (Cole et al. 2007).

Koldioxid (CO_2) och metan (CH_4) är två växthusgaser som bidrar till den globala uppvärmningen och koncentrationerna i atmosfären ökar stadigt. Som följd av de antropogena utsläppen var atmosfärshalterna av CO_2 400 ppm och CH_4 1800 ppb år 2014 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2013) varav de atmosfäriska utsläppen av CO_2 och CH_4 från sjöar uppskattas vara likvärt 4-18% av de antropogena utsläppen (St Louis et al. 2000). GWP (global-warming-potential) är en tidsbaserad estimerad uppvärmningseffekt av en viss mängd gas, vanligtvis beräknad för ett 100-års perspektiv. CO_2 är referensgasen som andra växthusgaser jämförs med och anges med ett GWP på 1 jämfört med CH_4 med GWP på 25 sett över 100 år. Samma mängd atmosfäriskt utsläpp av CH_4 bidrar således 25 ggr mer till den globala uppvärmningen än samma mängd CO_2 . (Intergovernmental Panel on Climate Change 2013).

De uppskattningarna av den årliga produktionen och atmosfäriska utsläpp av växthusgaser från sjöar baseras vanligtvis på sommarens utsläpp (Michmerhuizen, Striegl och McDonald 1996). Den ackumulation som sker vintertid och sedan utgasas vid islossningen räknas därför inte med i uppskattningarna (Ducharme-Riel et al 2015). Då vinterprocesserna är studerade knapphändert blir de uppskattningar av de årliga atmosfäriska utsläppen från boreala sjöar lägre än den egentliga utsläppsmängden (Striegl et al. 2001) då den ackumulationen som sker under vintern kan stå för betydande delar av utsläppet av växthusgaser på årsbasis (Karlsson et al. 2013).

1.1.1. Produktion av CO_2 och CH_4 i sjöar

I Sverige utgör sjöar 9 % av landytan där de flesta sjöar har lågt pH delvis som följd av de höga humushalterna i vattnet men även pga. av surt atmosfäriskt nedfall. Svenska boreala sjöar har vanligen väldigt brunt vatten då dom är rika på humusämnen som tillkommer från skog eller myrmark i avrinningsområdet vilka i sin tur påverkar vattenkvalitén i sjöar. Den höga mängden organiskt material i sjöarna gör det möjligt för sjöarna att bibehålla en hög produktion av växthusgaser under hela året (Riera, Schindler och Kratz 1999). Både globalt och i Sverige är boreala sjöar generellt sett övermättade av CO_2 (Sobek et al. 2003; Koprivnjak, Dillon och Molot 2010) och de atmosfäriska utsläppen av CO_2 från boreala sjöar är den största förlusten av kol från kolcykeln i boreala akvatiska system (Kokic et al. 2015). Globalt sett står sjöar även för 6-16% av globala icke-antropogena utsläppen av CH_4 (Bastviken et al. 2004). Mättnadsgraden av CO_2 förändras med säsongerna, temperaturen och de antropogena utsläppen (Weyhenmeyer et al. 2012).

Den mängd CO_2 som finns i sjöar är nettot av respiration och fotosyntes som sker genom olika processer. CO_2 i sjöar bildas genom respiration och vid nedbrytning av organiskt kol av bakterier medan det används upp i fotosyntes av fotosyntetiserande organismer. Om fotosyntesen är högre än respirationen fungerar sjön som en sänka där kol fixeras från atmosfären. Är fotosyntesen mindre än respirationen sker det motsatta och koldioxid ackumuleras och sjön fungerar som en källa för CO_2 till atmosfären (Cole et al. 2007). Sjöar som är undermättade på syrgas konsumerar mer syre än vad som produceras (dvs. respirationen är större än fotosyntesen) medan sjöar som är syrgasmättade har högre fotosyntes i relation till nedbrytningen av organiskt material. CH_4 bildas av mikrober vid

jäsning och nedbrytning av organiskt material under anaeroba förhållanden (Huttunen et al. 2001). Förutom produktionen i sjöar kan både CO₂ och CH₄ tillkomma till sjöar löst via tillrinnande grundvatten och/eller vattendrag (Striegl och Michmerhuizen 1998)

Produktionen av CO₂ och CH₄ gynnas av olika faktorer som bl.a. syrgasmättnad eller mängden löst organiskt material i sjön (humusämnen). Produktionen av CO₂ gynnas i syrerikare vatten medan CH₄ produceras primärt i syrefattigt vatten t.ex. i sjöar som är påverkade av övergödning med låga syrgashalter i sjösediment och/eller i vattenmassan (Huttunen et al. 2001). Mängden löst organiskt material i sjöar påverkar produktionen av växthusgaser där högre mängder ökar mängden tillgängligt material som kan brytas ned (främst av bakterier) vilket kan leda till en ökad produktion av växthusgaser (Karlsson, Ask och Jansson 2008).

Under vintertid i sjöar är vattenmassan stillastående då istäcket förhindrar fysiska processer som blandar vattenmassan vilket gör att vattnet lägger sig i olika skikt med varmare vatten närmare sjöbotten. I och med att produktionen av växthusgaser fortsätter i det varmare bottenvattnet minskar syretillgången och produktionen av CH₄ blir allt vanligare framför CO₂ (Riera, Schindler och Kratz 1999; Huttunen et al. 2001). Så länge som organiskt material transporteras till sjöar fortsätter nedbrytningen och produktionen av växthusgaser vilket leder till en ackumulation av växthusgaser vintertid då utsläpp till atmosfären hindras av istäcket (Striegl et al. 2001).

Ett problem med kvantifieringen av mängden CH₄ i sjöar är att gasen kan avgå till atmosfären både genom att diffundera och genom uppblåsning (Bastviken et al. 2004) till skillnad från CO₂ som kontinuerligt diffunderar ut till atmosfären vid övermättnad. Då utsläppen av CH₄ från sjöar inte är jämnt fördelade över hela vattenmassan och då bubblor av CH₄ även kan fastna i sjöisen tas inte all CH₄ med vid mätningar av koncentrationer i vattenmassan (Wik et al. 2011; Ducharme-Riel et al. 2015).

Nuvarande beräkningar av boreala sjöars årliga utsläpp av växthusgaser ofta är underskattade. Detta delvis som följd av problematiken med kvantifieringen av mängden CH₄ i sjöar men framförallt då få studier räknar med sjöars vinterackumulation av växthusgaser (Striegl et al. 2001; Karlsson et al. 2013). Få studier räknar med både den akvatiska och den terrestra kolcykeln i kol-budgeten och fokuserar endast på ett system (Buffam et al. 2011). Men då upp mot 45% av det terrestra kolet som transporteras till boreala akvatiska system kan mineraliseras och avgår som CO₂ (Jonsson et al. 2007) är samspelet mellan akvatiska och terrestra systemen kritiskt att studera då mängden kol i sjöar påverkas av processer på land.

1.1.2. Skogsbrukets inverkan

Den vanligaste formen av avverkning i Sverige är kalhyggen och varje år avverkas ca 90 miljoner m³ skog (Skogsstyrelsen 2008). Avverkning av skog är en stor störning som kan påverka avrinningsområden upp till 18 år efter avverkningen (Ide et al. 2013; Palviainen et al. 2014).

Kalhyggen kan, förutom att ge en högre grundvattennivå, även resultera i en ökad avrinning från området vilket kan medföra att stora mängder organiskt material och näringsämnen transporteras bort från skogen och ut till närliggande akvatiska system (Schelker et al. 2013; Schelker et al. 2014). Den ökade mängden organiskt material kan leda till en ökad vinterproduktion av växthusgaser i boreala sjöar (Karlsson, Ask och Jansson 2008). Den ökade avrinningen från kalhyggen kan även öka vattenföringen i vattendrag vilket kan leda till ökad turbulens och ett ökat utbyte av gaser mellan vattnet och luften i bäckar (Kokic et al. 2015). Den ökade produktionen av växthusgaser från den högre mängden tillgängligt organiskt material i boreala sjöar behöver större mängder syre för att uppehållas. Under vintern när många boreala sjöar är syrefattiga kan det leda till en ökad produktion av CH₄ (Huttunen et al. 2001). Förändringar av mängden CO₂ och/eller CH₄ märks tydligt i förhållandet mellan

CO₂:CH₄ och är därför en bra indikation på förändringar i en sjös syrgasmättnad och produktion av växthusgaser.

I Sverige är det även vanligt att man utför en markberedning (utförs vanligen ett år efter avverkning) där man river upp marken, exempelvis harvning, för att riva upp organiskt material och skapa nya ytor för växlighet att fästa sig på. Detta kan ha en större effekt än enbart avverkning och leda till en ännu större transport av näringsämnen och organiskt material till boreala sjöar och vattendrag (Eklöf et al. 2015). Andra mindre vanligt förekommande metoder för avverkning som bl.a. att enbart plocka stammarna eller att lämna träd och buffertzoner till vatten kan minska de effekter som annars förekommer men detta kan vara väldigt specifikt för olika områden (Kreutzweiser, Hazlett och Gunn 2008).

Liknande bristen på studier av ackumuleringen av växthusgaser i boreala sjöar under is, är skogsbrukets påverkan på produktionen av växthusgaser i sjöar inte studerat i stor utsträckning. Studier visar att effekterna av kalhyggen på avrinningsområden är stora och att den ökade avrinningen och ökade tillförseln av organiskt material (Schelker et al. 2013) pågår under lång tid (Ide et al. 2013). Övermättnad av CO₂ har visats vara positivt korrelerat till koncentration av löst organiskt kol (material; humusämnen)(DOC) i sjöar i Sverige, och globalt (Jonsson, Karlsson och Jansson 2003; Sobek et al. 2003). En ökad import av DOC till följd av skogsbruket kan därför tänkas öka övermättnaden av CO₂ i sjöar. Det gör att skogsbrukets inverkan är en viktig komponent att utvärdera gällande produktion och ackumulering av växthusgaser under is i boreala sjöar.

1.2 Syfte

Syftet med den här studien är att:

- 1) kvantifiera ackumuleringen av koldioxid och metan i boreala sjöar under vintern (Oktober – Mars) när sjöar är istäckta
- 2) utvärdera om koncentrationerna koldioxid och metan under vintern skiljer sig mellan opåverkade boreala sjöar och boreala sjöar påverkade av avverkning och markberedning
- 3) utvärdera hur ackumuleringen under vinter förändras under de tre tidsperioderna; År 1 (referenssäsongen; 2012-2013), År 2 (1 år efter avverkning; 2013-2014) och År 3 (2 år efter avverkning, 1 år efter markberedning; 2014-2015).
- 4) utvärdera hur förhållandet mellan koldioxid och metan (CO₂:CH₄) skiljer sig i och mellan de boreala sjöarna under de tre tidsperioderna.

2. Material och Metod

2.1 Områdesbeskrivning

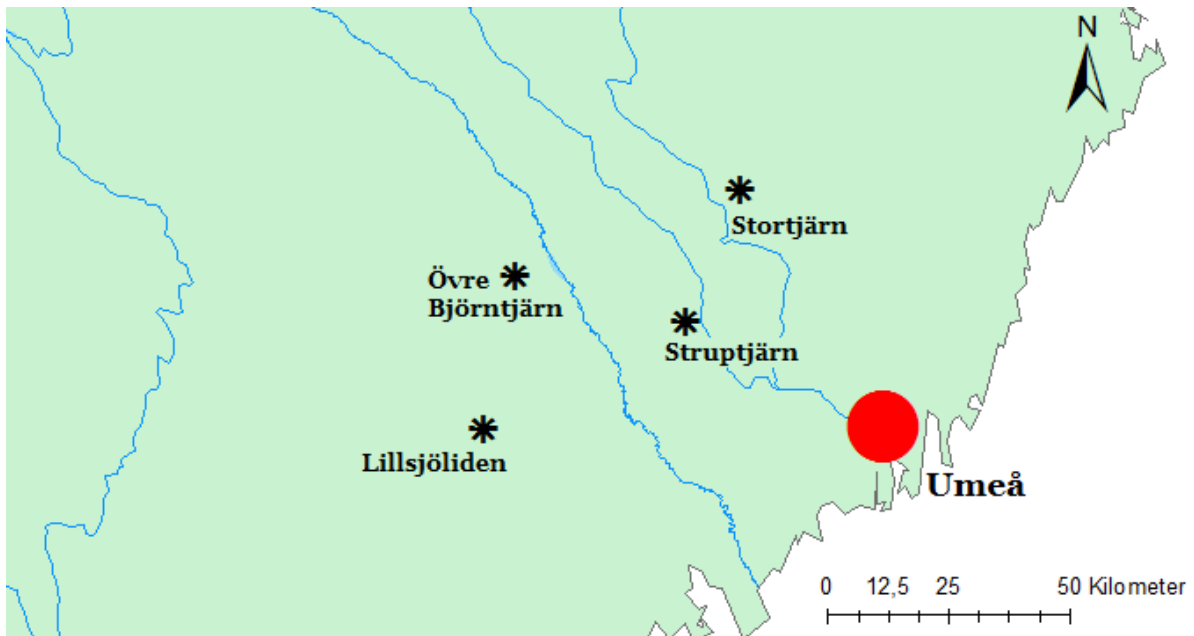
Fyra sjöar har provtagits belägna i Västerbottens inland och kustområde (Figur 1). Sjöarnas djup varierar från ett medeldjup av 2,7 m till 4 m och ett maximaldjup av 5,2 m till 8 m (Tabell 1). Sjöarna är bruna med stora mängder humus i vattnet och har ett pH på 5-6. Avrinningsområdena för sjöarna består främst av barrskog (49-80%) men även mindre myrområden (2-15%) förekommer. Morän är den dominerande jordarten i områdena kring sjöarna.

Tabell 1 De studerade sjöområdenas morfologi

	Sjöareal (ha)	Volym (m ³)	Medeldjup (m)	Maxdjup (m)	Avrinnings- område (ha)
Övre Björntjärn*	4,8	185084,4	4,0	8,0	284,0
Stortjärn*	3,9	102958,9	2,7	6,7	81,7
Lillsjöleden	0,8	21653,4	3,8	5,2	25,4
Struptjärn	3,1	107708,4	3,8	5,8	79,1

*Referenssjöar

Två av sjöarna, Struptjärn och Lillsjöleden, är påverkade av avverkning med 18 respektive 45% av avrinningsområdet bestående av kalhygge. Avverkningen utfördes Februari 2013 och markbereddes hösten därefter. Även Övre Björntjärn har kalhygge i avrinningsområdet med 9% av avverkningsområdet avverkat under 2014 men ingen markberedelse har utförts. Avrinningsområdet är dock det största (284ha) av de studerade sjöarna och de avverkade delarna ligger inte nära till sjön utan en buffertzona på upp mot 5 km finns och sjön behandlas således som en referenssjö opåverkad av avverkning i studien. Den andra referenssjön, Stortjärn, är helt opåverkad av kalhyggen i avrinningsområdet. I studien refereras första året (referensåret; 2012-2013) som År 1, följande år (1 år efter avverkning; 2013-2014) som År 2 och sista året (2 år efter avverkning, 1 år efter markberedning; 2014-2015) som År 3.



Figur 1 Karta över Västerbotten med de fyra provtagna sjöarna.

2.2 Fältarbete

Vid varje sjö provtogs tre punkter; en djuppunkt, en intermediär punkt och en grund punkt. Punkterna lokaliserades med GPS för att fastställa att provtagning utfördes vid samma punkter som tidigare år. Sjöarnas istäcke uppmättes till ca. 60 cm tjockt. Vid den djupa punkten provtogs fyra prov; epilimnion, metalimnion, hypolimnion och bottenvatten. Epilimnion provtogs ca 1 m från vattenytan (ca 40 cm under isen) och bottenvattnet provtogs ca 1 m ovanför sedimentytan. Djupen för metalimnion och hypolimnion bestämdes efter syre- och temperaturprofilen som uppmättes vid varje provpunkt med en YSI-ProODO varje 0,5-1 m (beroende på sjöns djup). Vid den intermediära punkten provtogs epilimnion och bottenvatten medan endast epilimnion provtogs vid den grunda punkten.

För alla sjöar inhämtades vattenprover för löst oorganiskt kol (DIC) och CH_4 samt luftprover för CO_2 och CH_4 . Provvatten avsett för analys av DIC inhämtades med en ruttnerhämtare vartefter en 5 ml plastspruta användes för att injicera 4 ml vatten till slutna glasvialer som tidigare injicerats med syra. Prover avsedda för analys av CH_4 utfördes med olika metoder beroende på sjöarna enligt följande:

Vid Struptjärn och Stortjärn inhämtades provvatten med en ruttnerhämtare vartefter en 500 ml glasflaska fylldes varsamt utan att skapa bubblor. Flaskan stängdes med en gummikork vartefter 50 ml vatten överfördes till en 60 ml plastspruta samtidigt som 50 ml luft tillfördes till flaskan (sk. head-space). Flaskan skakades kraftigt i ca 1 minut för att skapa jämvikt mellan head-space och provvattnet. 40 ml av det bortförda vattnet i sprutan fördes tillbaka till flaskan

samtidigt som 40 ml av flaskans head-space luft överfördes till en plastspruta. Luften injicerades i en sluten glasvial samtidigt som 40 ml luft togs bort för att bibehålla ett jämt tryck i vialen.

Vid Lillsjöleden inhämtades prover på liknande sätt som Struption och Övre Björntjärn med det undantag för de sprutor som användes. 10ml vatten överfördes från glasflaskan till en 10ml plastspruta medan 10 ml luft tillfördes till flaskan som sedan skakades i 1 minut. Vattnet fördes tillbaka till flaskan och ca 10 ml head-space luft överfördes till en spruta som sedan injicerades i en vial och skapade ett övertryck i vialen.

Vid Övre Björntjärn inhämtades provvatten med en ruttnerhämtare och 40 ml provvatten fylldes i en 60 ml spruta som sedan kopplades ihop med en spruta fylld med 20 ml luft. Luften fördes över till provvattnet varterefter sprutan skakades kraftigt i ca 30 sekunder. 10 ml av head-space luften fördes sedan tillbaka till den tomma sprutan och injicerades sedan i en vial och skapade ett övertryck.

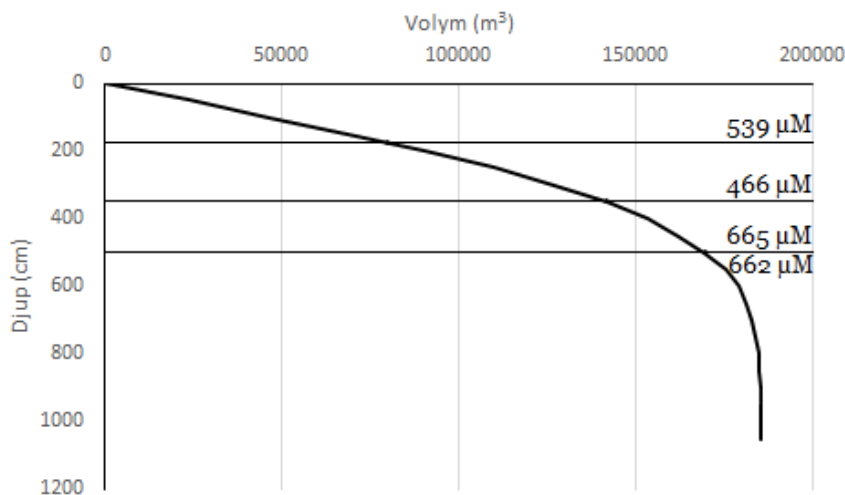
2.3 Labbanalys

Vialernas gasinnehåll analyserades med en gaskromatograf (Clarus 500, Perkin Elmer) samtidigt med kontrollvialer med kända koncentrationer av CO₂ och CH₄. Mängden DIC och CH₄ i vattnet beräknades utifrån mängden i luften med hjälp av Henry's lag (Wannikhof 1992). Då olika metoder användes vid inhämtning av gasprover korrigerades beräkningarna för gasvialernas olika tryck med hjälp av den allmänna gaslagen.

2.4 Dataanalys

Opublicerat data från hösten 2012 fram till hösten 2014 (tillhandahållet av Marcus Klaus, EMG) användes som komplement till det data som inhämtades och analyserades under våren 2015. Volymen på de olika vattenskikten uppskattades utifrån de djup som proverna inhämtades från och med hjälp av kumulativa volymdata från varje halvmeter i respektive sjö (det senare tillhandahållet av Marcus Klaus, EMG). Medelkoncentrationen av växthusgaser för sjöarna volymviktades genom att beräkna medelkoncentrationen från volymen på skikten och de uppmätta koncentrationerna.

T.ex. för våren 2014 för Övre Björntjärn (Figur 2) multiplicerades medelkoncentrationen av de tre ytvattensproven med volymen för det skiktet och upprepades för de andra skikten (medelvärde för bottenvatten användes också utifrån de två proverna medan meta- och hypolimnion endast hade ett prov och således inget medelvärde) och summerades sedan för att divideras med den totala volymen för sjön för en volymviktad medelkoncentration i sjön. Detta upprepades för alla sjöarna och för de olika provtagningstillfällena.



Figur 2. Batymetri för Övre Björntjärn med de uppmätta koncentrationerna DIC (µM) våren År 2 i de olika skikten.

Följande uträkningar och statistiska analyser är således utförda på volymviktat data. Utifrån de beräknade medelvärdena i sjöarna och den beräknade ackumulationen (dvs. skillnad i mängder mellan vår och höst) beräknades även förhållandet mellan DIC:CH₄ (höst och vår). Den ackumulation av DIC under vinter antas bestå av CO₂ och anges då som CO₂ (μM) eller förhållandet av CO₂:CH₄ (skillnad vår-höst) i rapporten. Från medelkoncentrationen (för varje sjö) beräknades även den totala ackumulationen av kol i sjöarna. Från antalet dagar mellan höstens och vårens provtagningstillfällen för År X beräknades ackumulationen av CO₂ och CH₄ i mg kol m⁻² d⁻¹ som hade skett under istäcket.

Allt data testades för normalfördelning (Shapiro-Wilk test) för bestämning av statistiskt test. En signifikansnivå på 95% användes för samtliga statistiska analyser och utfördes i Microsoft Excel. För att undersöka skillnaden i koncentrationen (μM) DIC och CH₄ mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna jämfördes höstkoncentrationer, vårkoncentrationer och ackumulationen (μM samt mgCm⁻²d⁻¹) för alla åren för de två grupperna med T-test (vid normalfördelat data) eller Mann-Whitney (om ej normalfördelat data). Skillnad i ackumulation (μM samt mgCm⁻²d⁻¹) över tid analyserades med Mann-Whitney test för alla sjöarna tillsammans. Sist analyserades skillnader i förhållandet av DIC:CH₄ mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna (höst, vår och ackumulationen [CO₂:CH₄]) samt skillnaden mellan åren med Mann-Whitney test.

3. Resultat

3.1. Höst- och vårförhållanden

Under hösten var syrgasmättnaden (Figur 3) och vattentemperaturen jämn i vattenpelaren med en medeltemperatur på 5-6,5 °C i sjöarna. Under våren var alla sjöarna omvänt skiktade (Figur 3) med en ökande vattentemperatur och minskad syrgasmättnad med ökande djup. Anoxiska förhållanden i sjöarna uppstod vid 2-5m djup. Syrgasmättnaden har varit relativt jämn mellan åren (Tabell 2). Lillsjöleden hade syrefattigast vatten med ca 50% på hösten jämfört med de andra sjöarna där syrgasmättnaden gick upp mot 75%. Under våren var Lillsjöledens syrgasmättnad anmärkningsvärt lägre (<15%) jämfört med de andra sjöarna (19-42%).

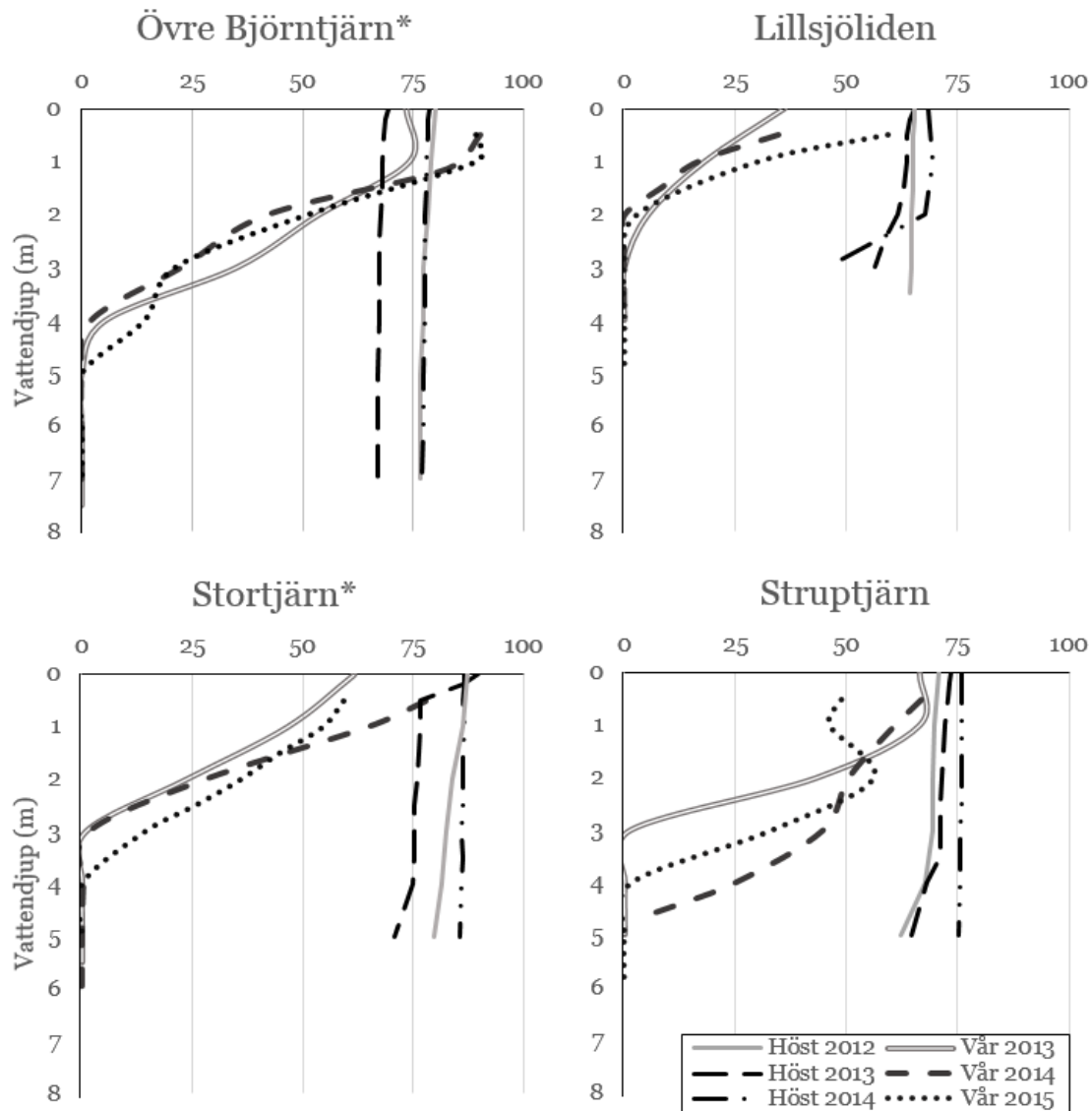
Tabell 2 Genomsnittlig syrgasmättnad i sjöarna under höst och vår.

	Genomsnittlig Syrgasmättnad %					
	Höst	Vår	Höst	Vår	Höst	Vår
	År 1	År 1	År 2	År 2	År 3	År 3
Övre Björntjärn*	77	27	58	30	78	33
Stortjärn*	83	19	77	25	86	29
Lillsjöleden	51	12	55	7	52	15
Struptjärn	68	30	65	42	76	27

*Referenssjöar

Under hösten mättes högst koncentration av DIC (μM) (Tabell 3) i fallande ordning: Lillsjöleden, Struptjärn, Övre Björntjärn och Stortjärn medan koncentrationen av CH₄ (μM) uppvisade större variation under hösten mellan sjöarna. Under våren varierade koncentrationerna DIC (μM) och CH₄ (μM) mellan och i sjöarna med betydligt högre uppmätta koncentrationer än på hösten. Generellt uppmättes även högre koncentrationer av både DIC (μM) och CH₄ (μM) (höst och vår) närmare botten och lägre koncentrationer i epilimnion och metalimnion.

Syrgasmättnad %



Figur 3 Syrgasmättnad i de provtagna sjöarna under höst och vår från syremätningar i sjöarnas djuppunkt.
* Referenssjöar

Koncentrationen av DIC (μM) (Tabell 3) under höst och vår var signifikant högre i de påverkade avverkningsjöarna (Lillsjöleden och Struptjärn) jämfört med referenssjöarna (Övre Björntjärn och Stortjärn) (T-test $p=0,004$ respektive $p=0,006$) men skilde sig inte signifikant mellan sjöar vad gäller koncentrationen av CH_4 (μM) (för resultat av statistiska analyser se Bilaga 1). Koncentration av CH_4 (μM) under våren minskade signifikant från År 2 till År 3 och från År 1 till År 3 i samtliga sjöar (Mann-Whitney test $p=0,04$ respektive $p=0,01$).

Tabell 3. Volymviktade koncentrationer av DIC och CH₄ (µM) i sjöarna under höst och vår samt förhållandet mellan DIC:CH₄

	Höst År 1	Vår År 1	Höst År 2	Vår År 2	Höst År 3	Vår År 3
DIC (µM)						
Övre Björntjärn*	204	569	290	539	187	541
Stortjärn*	170	612	180	466	120	586
Lillsjöleden	402	884	513	665	469	883
Struptjärn	261	642	283	662	246	588
CH₄ (µM)						
Övre Björntjärn*	0,29	4,4	0,53	1,09	0,06	0,44
Stortjärn*	0,34	3,88	0,18	6,66	0,06	1,13
Lillsjöleden	0,09	14,08	0,6	7,57	0,29	1,08
Struptjärn	N.D.	4,82	0,19	5,95	0,12	1,28
Förhållande DIC:CH₄						
Övre Björntjärn*	700	129	544	491	2815	1207
Stortjärn*	498	157	1407	70	1727	515
Lillsjöleden	4081	63	852	88	1606	815
Struptjärn	N.D.	133	1437	111	2054	458

N.D. = Not Detected

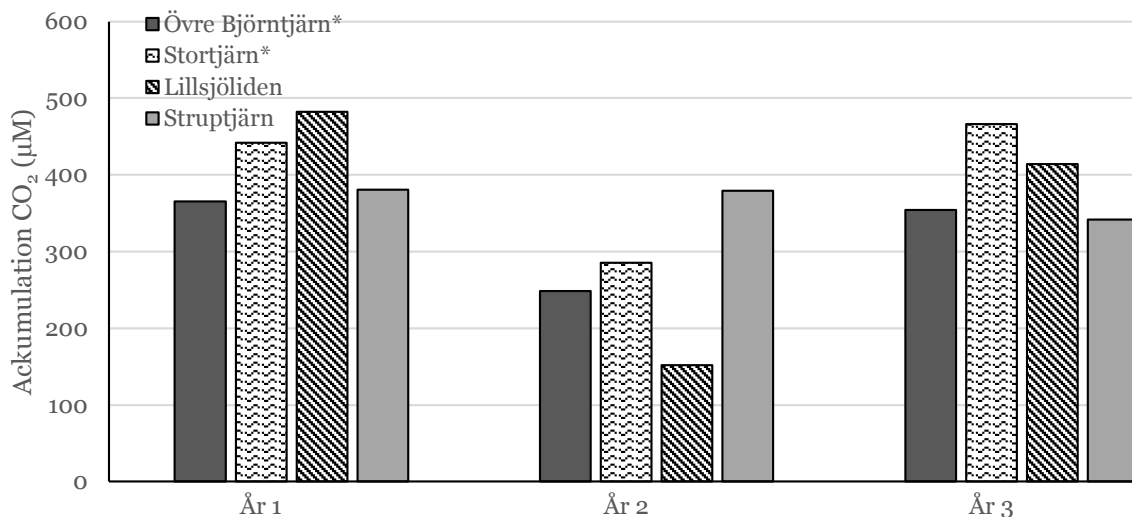
* Referenssjöar

Förhållandet av DIC:CH₄ i sjöarna (förutom Lillsjöleden) var som högst under hösten och våren År 3 jämfört med År 1 och År 2 (Tabell 3). Inget förhållande finns för Struptjärn hösten 2012 då den uppmätta koncentrationen av CH₄ (µM) i sjön var under detektionsgräns. Under våren var förhållandet däremot lägre än under hösten i samtliga sjöar och samtliga år. Däremot har förhållandet av DIC:CH₄ ökat med åren från 63-157 (våren År 1) till 70-491 (våren År 2) och som högst 515-1207 (våren År 3). Förhållandet av DIC:CH₄ skilde sig inte signifikant mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna.

Sammanfattningsvis var sjöarna undermättade på syrgas under hösten efter cirkulationen och under våren uppstod anoxiska förhållanden vid 2-5 m djup. Vid jämförelse mellan de påverkade sjöarna och referenssjöarna var koncentrationen av DIC högre i de påverkade sjöarna medan koncentrationen av CH₄ inte skilde. Koncentrationen av CH₄ (µM) för alla sjöar minskade signifikant till År 3 från År 1 och År 2 vilket koncentrationen av DIC (µM) inte gjorde.

3.2. Ackumulering av CO₂ och CH₄ i sjöar

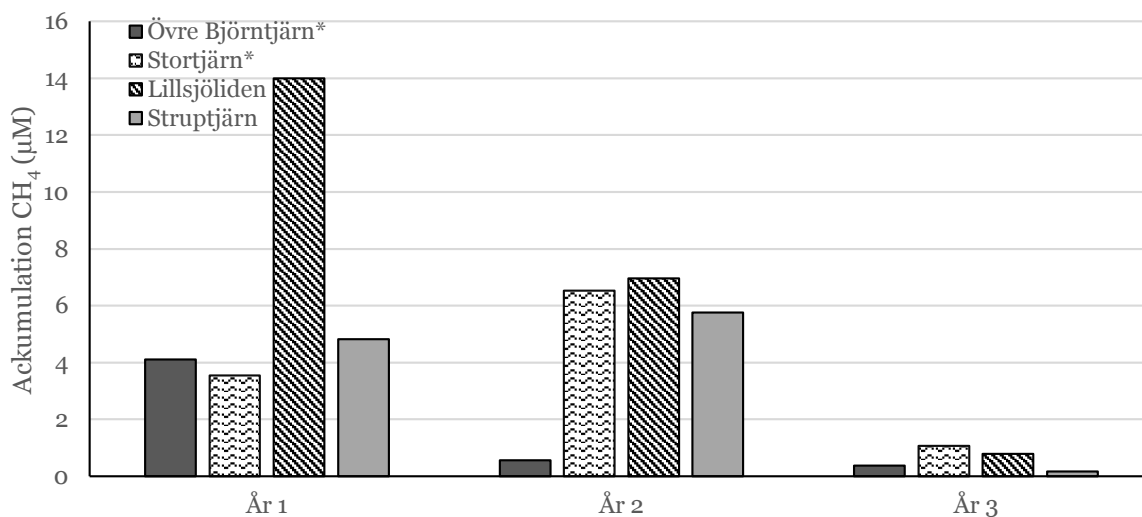
Mängden totalt kol (kg, från CO₂ och CH₄) som ackumulerats under vintern i sjöarnas vattenmassor härrör främst från CO₂ (95-99 %) med en mindre mängd från CH₄ (1-5%) med högst totala mängd i fallande ordning: Övre Björntjärn (315-820 kg), Stortjärn (361-577 kg), Struptjärn (443-499 kg) och Lillsjöleden (41-129 kg).



Figur 4 Ackumulation av CO₂ (µM) under vintern (vår-höst) för de tre åren baserat på volymviktat data i tabell 3.
* Referenssjöar

Förändringen i koncentrationen av CO₂ (µM) från höst till vår (Figur 4) visar en ökning från 365–482 µM år 1 till 151–379 µM år 2 och högst ökning år 3 med 354–465 µM. Koncentrationen av CH₄ (µM) i samtliga sjöar har från år 1 med 3,54–13,99 µM minskat till 0,56–6,96 µM år 2 och minskar därefter ytterligare till 0,16–1,03 µM år 3 (Figur 5).

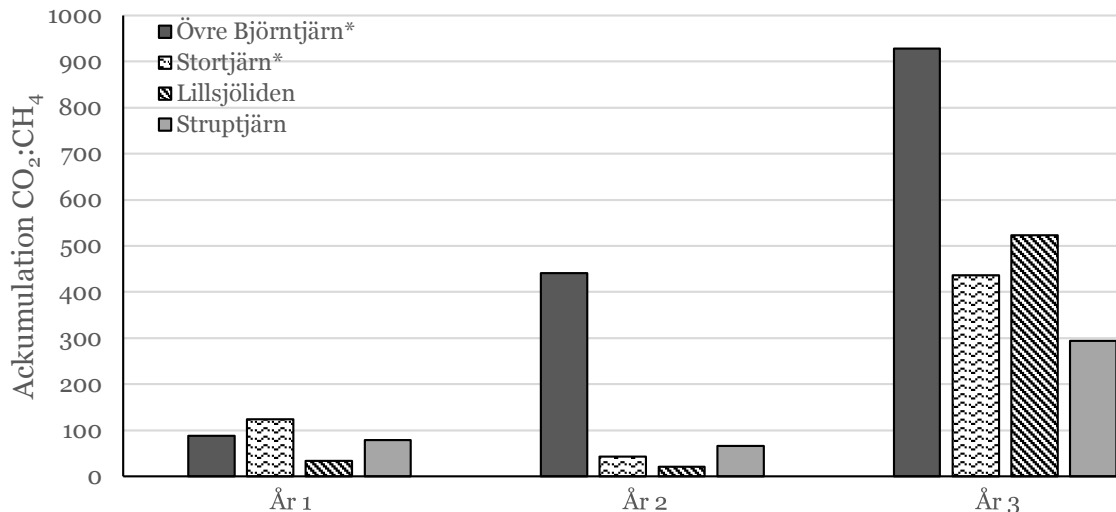
Ackumulationen av CO₂ (µM) minskade signifikant från År 1 till År 2 och ökade därefter från År 2 till År 3 (alla sjöar) (Mann-Whitney test p=0,02 respektive p=0,04). Minskningen av ackumulationen av CH₄ (µM) var endast signifikant från År 1 till År 3 för samtliga sjöar (Mann-Whitney test p=0,01). Förändringen i ackumulation av CO₂ och CH₄ under åren var inte signifikant skilt mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna.



Figur 5. Ackumulation av CH₄ (µM) under vintern (vår-höst) för de tre åren baserat på volymviktat data i tabell 3.
* Referenssjöar

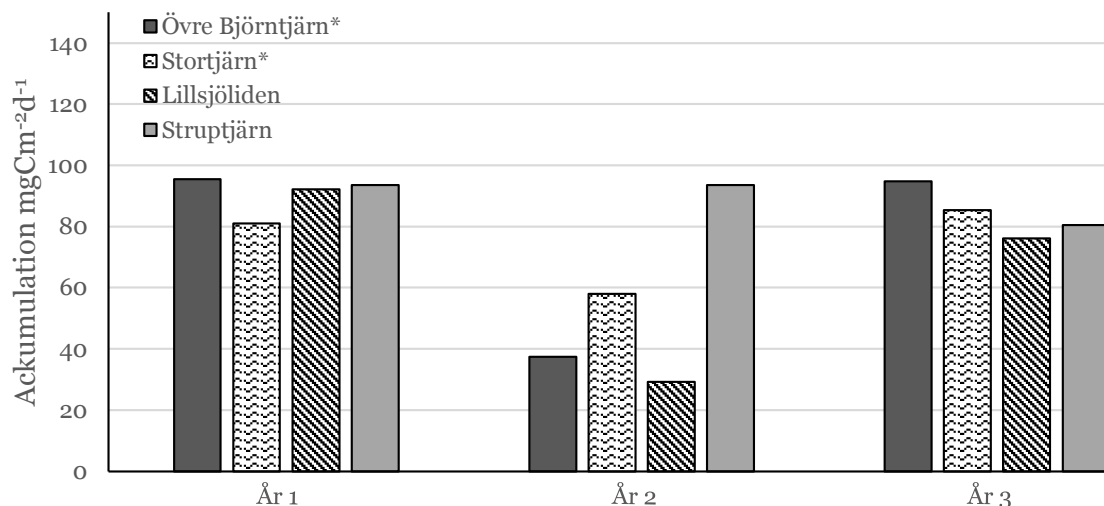
Förändringen av förhållandet av CO₂:CH₄ har sedan år 1 ökat från 34-125 till 21-440 år 2 och sedan ökat kraftigt till 293-927 år 3 (Figur 6). För Övre Björntjärn har förhållandet ökat nästan 5ggr från År 1 till År 2 och därefter 10ggr från År 1 till År 3. I Stortjärn halverades förhållandet från år 1 till år 2 för att sedan öka 3,5ggr från År 1 till År 3. Lillsjöleden och Struptjärns förhållande av CO₂:CH₄ var relativt stabilt mellan År 1 och År 2 med en väldigt svag minskning men ökade sedan med 15ggr respektive nästan 4ggr från År 1 till År 3.

Akkumuleringen av $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ ökade inte signifikant efter avverkningen (År 1 till År 2) men ökade däremot signifikant för samtliga sjöar från År 1 och år 2 till År 3 (dvs. 2 år efter avverkning och 1 år efter markberedning) (Mann-Whitney test $p=0,01$ respektive $p=0,04$). Förhållandet av $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ skilde sig inte signifikant vid jämförelse mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna.



Figur 6. Ackumulering $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ under vintern (vår-höst) för de tre åren baserat på volymviktat data i tabell 3. * Referenssjöar

Under år 1 ackumulerades (från $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) $81-96 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, år 2 $37-95 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ och år 3 $76-94 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Figur 7). Akkumuleringen År 2 var lägre för alla sjöar utom Struptjärn som ackumulerade samma mängd som under År 1 ($93 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$). Förändringen i ackumulering av kol ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$) som skett var inte signifikant skilt mellan åren för samtliga sjöar eller vid jämförelse av samtliga år för skillnad mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna.



Figur 7. Beräknad daglig ackumulering av kol (mg) i sjöarna (per m^2) under vintern (vår-höst) för de tre åren. * Referenssjöar

Sammanfattningsvis bestod den totala ackumuleringen av kol i sjöarna (CO_2 och CH_4) primärt av CO_2 . Akkumuleringen av CO_2 (μM) ökade signifikant till År 3 både från År 1 och År 2 medan ackumuleringen av CH_4 (μM) minskade signifikant från År 1 till År 3 för samtliga sjöar. Akkumuleringen av kol ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$) för samtliga sjöar förändrades inte signifikant mellan åren medan förhållandet av $\text{CO}_2:\text{CH}_4$ ökade signifikant till År 3 från År 1 och År 2. Varken

ackumuleringen av CO₂ (μM), CH₄ (μM) eller förhållandet av CO₂:CH₄ skildes signifikant vid jämförelse mellan referenssjöarna och de påverkade sjöarna.

4. Diskussion

Akkumuleringen av koldioxid (CO₂) och metan (CH₄) härrör primärt från CO₂ (95-99%). Den totala mängden kol som ackumulerades (41-820 kg) motsvarade en daglig ackumulering av 29-95 mgCm⁻² (Figur 7). Koncentrationen av DIC (μM) var för samtliga år högre i de påverkade sjöarna jämfört med referenssjöarna (både under höst och vår). Koncentrationen av CH₄ (μM) skilde sig däremot inte mellan de påverkade sjöarna och referenssjöarna (alla år). Den enda skillnaden i koncentration för samtliga sjöar var för CH₄ (μM) som under våren minskade signifikant från År 1 och 2 till År 3. Vidare följde ackumuleringen av CO₂ (μM) och CH₄ (μM) motsatta trender där den ackumulerade koncentrationen av CO₂ (μM) var lägre År 2 samtidigt som den ackumulerade koncentrationen av CH₄ (μM) var högre År 2. Den ackumulerade koncentrationen av CO₂ (μM) återgick därefter (År 3) till ungefär samma koncentration som under År 1. Den ackumulerade koncentrationen av CH₄ (μM) minskade däremot betydligt till År 3 jämfört med År 1 och År 2. Utifrån ovanstående ses därför att förhållandet mellan DIC:CH₄ ökade för samtliga sjöar från hösten till våren. Förhållandet i den ackumulerade mängden av CO₂:CH₄ ökade även med åren. Däremot detekterades ingen skillnad mellan de påverkade sjöarna och referenssjöarna vare sig i förhållandet mellan DIC:CH₄ under höst och vår, eller i förhållandet mellan CO₂:CH₄ i den total ackumulerade mängden av kol.

4.1. Ackumuleringen av kol

I de studerade sjöarna härrör 95-99% av det ackumulerade kolet från CO₂ med endast 1-5% från CH₄ vilket kan jämföras med medel ett på 86% från CO₂ i subarktiska sjöar (Karlsson et al. 2013). Produktionen av kol (i tempererade och boreala sjöar) från CO₂ under sommaren och hösten beräknades till medel på 198 respektive 228mgCm⁻²d⁻¹ (Ducharme-Riel et al. 2015). Den vintertida produktionen och ackumuleringen av kol från CO₂ och CH₄ på ett medel av 55-91 mgCm⁻²d⁻¹ (i de sjöar innefattade av denna studie) verkar då rimlig då CO₂ står för >95% och produktionen av växthusgaser är långsammare i kallare vattentemperaturer. Den dagliga ackumuleringen (mgCm⁻²d⁻¹) som skett är däremot baserat på antalet dagar mellan höst- och vårprovtagningar och är därför en uppskattning då det exakta antalet dagar från isläggningen till islossningen inte är känd.

4.2. Förändringar i koncentration och förhållande

Under hösten var ingen sjöarna helt syrgasmättade (Tabell 2). Det gör att sjöarna har haft olika utgångspunkter för ackumuleringen vid vinterns början då all CO₂ och CH₄ inte har utgasas under sommar och höst. Lillsjöleden utmärker sig med den betydligt lägre syrgasmättnaden (ca 50% höst, <15% vår) under alla åren jämfört med de andra sjöarna (51-86% höst, 19-42% vår) vilket förklarar de höga koncentrationerna CH₄ (μM) i Lillsjöleden på våren (Tabell 3). Då denna skillnad i syrgasmättnad även ses i referensåret (År 1) beror det troligt på naturliga skillnader i morfologin snarare än som en effekt av avverkning.

För alla sjöar var koncentrationen DIC (μM) relativt jämn fördelad i vattenmassan under hösten och med en svag ökning i bottenvattnet på våren. Detta kan jämföras med koncentrationen av CH₄ (μM) som ibland endast uppmättes i bottenvattnet. Då koncentrationen av CH₄ (μM) varierar kraftigt mellan vattenskikten (0-49) härrör produktionen av CH₄ troligen främst från sjösediment, något som även Bastviken et al. (2008) fann i tempererade sjöar (Wisconsin, U.S.A.) under sommaren. De skillnader som uppvisats mellan de påverkade sjöarna och de opåverkade referenssjöarna, med mer DIC (μM) höst och vår, uppmättes även för referensåret. Skillnaden i koncentration DIC (μM) mellan år är därför mest troligt inte en effekt av avverkning och/eller markberedning, utan illustrerar snarare naturliga säsongsvariationer. Förhållandet av DIC:CH₄ ökade under åren vilket beror på den minskade koncentrationen CH₄ (μM) i samtliga sjöar. Men även den ökningen detekterades i

alla sjöar, med högst förhållande DIC:CH₄ i Övre Björntjärn jämfört med de andra sjöarna och tyder ytterligare på naturliga variationer.

De stora variationerna mellan åren kan förklaras bättre av naturliga mellanårsvariationer då förändringarna var likartade mellan år i samtliga sjöar (t.ex. mindre ackumulation av CO₂ (µM) och högre ackumulation av CH₄ (µM) i samtliga sjöar under År 2 jämfört med föregående och kommande år). Anderson et al. (1999) fann också stora mellanårsvariationer i CO₂ lagring i sjöar samtidigt som det var stora mellanårsvariationer i meteorologiska förhållanden. Även Rantakari och Kortelainen (2005) fann att utsläppen av CO₂ från sjöar tenderade att följa en positiv korrelation med mängden nederbörd. De fann även speciellt höga utsläpp av CO₂ från sjöar under sensommaren om mängden nederbörd under sommaren var hög och att det är en fördröjning innan effekter av ökad avrinning ses.

Den minskade ackumulationen År 2 (CO₂ µM och mgCm⁻²d⁻¹) i de studerade sjöarna sammanfaller med en minskad årsnederbörd under 2013 (400-600 mm) jämfört med föregående (700-800 mm) och kommande år (600-800 mm) (SMHI 2015) jämfört med normalmängden årsnederbörd (600-800 mm) för området och den senaste normalperioden 1961-1990 (SMHI 2014). År 2 var även påverkat av en stormig höst följt av en tidig och varm vår (SMHI 2015) vilket kan tänkas påverkat ackumulationen av växthusgaser. De klimatologiska variationerna under studieperioden är dock inte extremfall och antas vara relativt representativa där liknande variationer även ses under tidigare år (SMHI 2015). Det kan då även tänkas att, likt nederbörden, avverkningen har en effekt (avrinning och mängd DOC som visat) men att det är under andra årstider än vintern som effekten syns. Då denna studie endast undersöker vinterackumulationen kan man inte göra antagandet att avverkning inte har någon effekt på sjöars produktion av växthusgaser då stora delar av året inte omfattas.

En annan möjlig förklaring till att ingen effekt av avverkning uppmätts i denna studie kan bero på att de områden som har avverkats inte är stora nog för att ge en tydlig effekt. Palviainen et al. (2014) fann att signifikanta skillnader i export av näringsämnen endast uppstod vid avverkning av >30% av avrinningsområdet. Endast Lillsjöleden avrinningsområde avverkades i sådan stor utsträckning men har (i den här studien) även andra unika egenskaper (låg sjöareal, låg volym samt extrem låg syrgasmättnad) jämfört med de andra studerade sjöarna. Förhållandet av CO₂:CH₄ förändrades varje år i referenssjöarna medan de påverkade sjöarna knappt förändrades från År 1 till 2 men ökade därefter kraftigt (4-15 ggr) till År 3. Det kan då tänkas att det är en fördröjd effekt av avverkningen som börjas ses nu under senare år. Då avverkning kan påverka avrinningsområden under en lång tid efter störningen (Ide et al. 2013; Palviainen et al. 2014) kan det vara så att tydliga förändringar i produktionen av växthusgaser i sjöar inte uppstår förrän efter några år efter avverkning och markberedning. Humösa sjöar är naturligt kraftigt övermättade av CO₂ jämfört med klarvattenssjöar (Riera, Schindler och Kratz 1998). Det är därför också möjligt att de studerade sjöarna med hög mängd DOC inte påverkats av den ökade mängd DOC som tillförs vid avverkningen och att den mängden är förhållandevis liten i jämförelse med bakgrundskoncentrationen. Effekten av avverkning skulle därför kunna vara tydligare i klarvattenssjöar där ökningen av DOC till följd av avverkning är förhållandevis större i relation till bakgrundskoncentrationen i DOC.

Avverkning har visats kunna leda till mer export av DOC från avrinningsområdet (Schelker et al. 2014) medan övermättnad av CO₂ har visats vara positivt korrelerat till koncentration av löst organiskt kol (DOC) i boreala sjöar (Jonsson, Karlsson och Jansson 2003; Sobek et al. 2003). Men då de skillnader som uppvisats överensstämmer för alla år och för samtliga sjöar torde andra förklaringar än avverkning som t.ex. naturliga klimatologiska variationer förklara skillnaderna mellan år bättre.

Ett problem med studien är provtagningarna av CH₄ (µM) som delvis skiljer sig mellan sjöarna men där gasen även avgår från vatten genom bubbling. Bastviken et al. (2008) fann att väldigt stora andelar av utsläppen CH₄ från sjöar sker genom uppblubbling. Endast mätvärden från

provvattnen kan därför missa eventuellt stora mängder CH₄ som avgår via bubbling och således underskatta den verkliga CH₄ avgången.

4.3. Framtida förändringar

Andra faktorer som kan påverka ackumuleringen av växthusgaser i boreala sjöar men som inte tas med i studien är längden på istäcket och när isen lägger sig på hösten. I studien används antalet dagar mellan provdatumerna som grund för längden av ackumuleringen vilket medför en variation mellan 156-177 dagar lång vinterperiod. Den egentliga längden på vinter skiljer sig troligen mellan sjöarna och åren men de exakta längderna är okända. Det gör att den exakta ackumuleringen som skett inte heller är känd då man inte vet när ackumuleringen börjats på hösten och avslutats vid islossningen på våren.

Med de klimatförändringar som väntas komma kan sjöars produktion och ackumulering av växthusgaser påverkas. Med varmare klimat kan vikten av issmältningen i sjöar förminska då längden som sjöar är istäckta minskas och snöfria perioder blir längre. Tidpunkten av DOC export från avrinningsområden kan då tänkas påverkas när vårfloden blir mindre och infaller tidigare på våren (Rantakari et al. 2010). En annan effekt av klimatförändringarna är den ökning i mängd nederbörd som förväntas i Sverige, och globalt (Intergovernmental Panel on Climate Change 2013). Med mer nederbörd under hösten kan mängden DOC som tillförs till sjöar öka vilket kan bidra till en ökad produktion och ackumulering under vintern. Effekten kan vara tydligare i klarvattenssjöar där ökningen av DOC till följd av ökad nederbörd är förhållandevis större i relation till bakgrundskoncentrationen i DOC, jämfört med sjöar redan innehållande höga mängder DOC.

Det varmare klimatet och kortare längd på sjöars istäcke kan tänkas bidra till en mer genomgående höstcirkulation. De fyra studerade sjöarna var inte helt jämviktade efter höstcirkulationen (som setts i syrgasmättnaden Tabell 2). Med en mer genomgående höstcirkulation kan sjöarna luftas ut i större omfattning och kan då ha en annan utgångspunkt till ackumuleringen under vintern.

4.4. Slutsats

Sammanfattningsvis ses ingen direkt effekt av avverkningen på sjöarnas produktion och ackumulering av växthusgaser. De skillnader som förekom mellan sjöarna (sjöar påverkade av avverkning och opåverkade referenssjöar) beror primärt snarare på naturliga variationer. Möjliga förklaringar som kan påverka resultatet kan vara att de studerade sjöarna redan innehåller höga mängder DOC och att de ökade mängderna som tillkommer som en effekt av avverkningen är förhållandevis lite jämfört med bakgrundskoncentrationen. De ytor som har avverkats kan även ha varit för små för att ge en tydlig och omedelbar effekt på sjöarnas produktion av växthusgaser då större avverkade arealer i andra studier har visat bara betydande för att ge tydligare responser av avverkning på bland annat vattenkemi. Denna studie innefattar endast vintern och bortser från en stor del av året och det kan tänkas att effekter av avverkning ses bättre under andra årstider än vintern. Den mängd CO₂ och CH₄ som har ackumulerats under vintern i sjöarna är påtaglig vilket visar att vinterackumuleringen måste medräknas för att kunna göra korrekta estimationer på årliga emissioner av växthusgaser från sjöar.

5. Referenser

- Anderson, Dean E., Striegl, Robert G., Stannard, David I., Michmerhuizen, Catherine M., McConnaughey, Ted A. och LaBaugh, James W. 1999. Estimating lake-atmosphere CO₂ exchange. *Limnology and Oceanography* 44(4):988-1001
- Bastviken, David, Cole, Jonathan J., Pace, Michael L. och Van de Bogert, Matthew C. 2008. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole lake budgets and CH₄ emissions. *Journal of Geophysical Research* 113:G02024
- Bastviken, David, Cole, Jonathan, Pace, Michael och Tranvik, Lars. 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles* 18:GB4009
- Buffam, Ishi, Turner, Monica G., Desai, Ankus R., Hanson, Paul C., Rusak, James A., Lottig, Noah R., Stanley, Emily H. och Carpenter, Stephen R. 2011. Integrating aquatic and terrestrial components to construct a complete carbon budget for a north temperate lake district. *Global Change Biology* 17:1193-1211
- Cole, Jonathan J., Prairie, Yves T., Caraco, Nina F., MccDowell, William H., Tranvik, Lars J., Striegl, Robert G., Duarte, Carlos M., Kortelainen, Pirkko, Downing, John A., Middelburg, Jack J. och Melack, John. 2007. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10: 171-184
- Ducharme-Riel, Véronique, Vachon, Dominic, del Giorgio, Paul A. och Prairie, Yves T. 2015. The relative contribution of winter under-ice and summer hypolimnetic CO₂ accumulation to the annual CO₂ emissions from northern lakes. *Ecosystems* 18:547-559
- Eklöf, Karin, Schelker, Jakob, Sorensen, Rasmus, Meili, Markus, Laudon, Hjalmar, von Brömssen, Claudia och Bishop, Kevin. 2014. Impact of forestry on total and methyl mercury in surface waters: Distinguishing effects of logging and site preparation. *Environmental Science & Technology* 48:4690-6498
- Huttunen, Jari T., Hammar, Taina, Alm, Jukka, Silvola, Jouko och Martikainen, Pertti J. 2001. Greenhouse gases in non-oxygenated and artificially oxygenated eutrophied lakes during winter stratification. *Journal of Environmental Quality* 30:387-394
- Ide, Jun'ichiro, Finér, Leena, Laurén, Ari, Piirainen, Sirpa och Launiainen, Samuli. 2013. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 304:482-491
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York. 1535 sidor
- Jonsson, Anders, Algesten, Grete, Bergström, Ann-Kristin, Bishop, Kevin, Sobek, Sebastian, Tranvik, Lars J. och Jansson, Mats. 2007. Integrating aquatic carbon fluxes in a boreal catchment carbon budget. *Journal of Hydrology* 334:141-150
- Jonsson, Anders, Karlsson, Jan och Jansson, Mats. 2003. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden. *Ecosystems* 6:224-235
- Karlsson, Jan, Ask, Jenny och Jansson, Mats. 2008. Winter respiration of allochthonous and autochthonous organic carbon in a subarctic clear-water lake. *Limnology and Oceanography* 53(3):948-954
- Karlsson, Jan, Giesler, Reiner, Persson, Jenny och Lundin, Erik. 2013. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes. *Geophysical Research Letters* 40:1123-1127
- Kokic, Jovana, Wallin, Marcus B., Chmiel, Hannah E., Denfeld, Blaize A. och Sobek Sebastian. 2015. Carbon dioxide evasion from headwater systems strongly contributes to the total export of carbon from a small boreal lake catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:13-28

- Koprivnjak, Jean-Francois, Dillon, Peter J. och Molot, Lewis A. 2010. Importance of CO₂ evasion from small boreal streams. *Global Biogeochemical Cycles* 24:GB4003
- Kreutzweiser, David P., Hazlett, Paul W. och Gunn, John M. 2008. Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems: A review. *Environmental Reviews* 16:157-179
- Lundin, Erik K., Giesler, Reiner, Persson, Andreas, Thompson, Megan S. och Karlsson, Jan. 2013. Integrating carbon emissions from lakes and streams in a subarctic catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 118:1200-1207
- Michmerhuizen, Catherine M., Striegl, Robert G. och McDonald Michael E. 1996. Potential methane emission from north-teperate lakes following ice mels. *Limnology and Oceanography* 41(5):985-991
- Palviainen, Marjo, Finér, Leena, Laurén, Ari, Launiainen, Samuli, Piirainen, Sirpa, Mattson, Tuija och Starr, Mike. 2014. Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: Long-term paired catchment studies from eastern Finland. *AMIBO* 43:218-233
- Rantakari, Miitta och Kortelainen, Pirkko. 2005. Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes. *Global Change Biology* 11:1368-1380
- Rantakari, Miitta, Mattson, Tuija, Kortelainen, Pirkko, Piirainen, Sirpa, Finér, Leena och Ahtiainen, Marketta. 2010. Organic and inorganic carbon concentrations and fluxes from managed and unmanaged boreal first-order catchments. *Science of the Total Environment* 408:1649-1558
- Raymond, Peter A., Hartmann, Jens, Lauerwald, Ronny, Sobek, Sebastian, McDonald, Cory, Hoover, Mark, Butman, David, Striegl, Robert, Mayorga, Emilio, Humborg, Christoph, Kortelainen, Pirkko, Dürr, Hans, Meybeck, Michel, Ciais, Philippe och Guth, Peter. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503: 355-359
- Riera, Joan L., Schindler, John E. och Kratz, Tim K. 1999. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U.S.A.. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56:265-274
- Schelker, Jakob, Grabs, Thomas, Bishop, Kevin och Laudon, Hjalmar. 2013. Drivers of increased organic carbon concentrations in stream water following forest disturbance: Separating effects of changes in flow pathways and soil warming. *Journal of geophysical research: Biogeosciences* 118:1814-1827
- Schelker, Jakob, Öhman, Karin, Löfgren, Stefan och Laudon, Hjalmar. 2014. Scaling of increased dissolved organic carbon inputs by forest clear-cutting – What arrives downstream?. *Journal of Hydrology* 508:299-306
- Skogsstyrelsen. Skogseko – Hur mycket skog kan vi avverka?. Available from: <http://www.skogsstyrelsen.se/Aga-och-bruka/Skogsbruk/Skogseko/Artikelregister/SkogsEko-42008/Hur-mycket-skog-kan-vi-avverka/> (accessed 2015-05-10)
- SMHI. 2014. *Normal uppskattad årsnederbörd, medelvärde 1961-1990*. <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/nederbord/normal-uppskattad-arsnederbord-medelvarde-1961-1990-1.6934> (Hämtad 2015-06-07)
- SMHI. 2015. *Årsnederbörd i millimeter*. <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/kartor/monYrTable.php?par=nbYr&month=13> (Hämtad 2015-06-07)
- Sobek, Sebastian, Algsten, Grete, Bergström, Ann-Kristin, Jansson, Mats och Tranvik, Lars K. 2003. The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes. *Global Change Biology* 9:630-641
- St. Louis, Vincent L., Kelly, Carol A., Duchemin, Éric, Rudd, John W.M. och Rosenberg, David M. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 50: 766-775
- Striegl, Robert G., Kortelainen, Pirkko, Chanton, Jeffrey P., Wickland Kimberly P., Bugna, Glynnis C. och Rantakari, Miitta. 2001. Carbon dioxide partial pressure and ¹³C content

- of north temperate and boreal lakes at spring ice melt. *Limnology and Oceanography* 46(6):941-945
- Striegl, Robert G. och Michmerhuizen, Catherine M. 1998. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes. *Limnology and Oceanography* 43(7):1519-1529
- Tranvik, Lars J., Downing, John A., Cotner, James B., Loiselle, Steven A., Striegl, Robert G., Ballatore, Thomas J., Dillon, Peter, Finlay, Kerri, Fortino, Kenneth, Knoll, Lesley B., Kortelainen, Pirkko L., Kutser, Tiit, Larsen, Soren, Laurion, Isabelle, Leech, Dina M., McCallister, Leigh S., McKnight, Diane M., Melack, John M., Overholt, Erin, Porter, Jason A., Prairie, Yves, Renwick, William H., Roland, Fabio, Sherman, Bradford S., Schindler, David W., Sobek, Sebastian, Tremblay, Alain, Vanni, Michael J., Verschoor, Antonie M., von Wachenfeldt, Eddie och Weyhenmeyer, Gesa A. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* 54(6):2298-2314
- Wannikhof, Rik. 1992. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research* 97: 7373-7382.
- Weyhenmeyer, Gesa A., Kortelainen, Pirkko, Sobek, Sebastian, Müller, Roger och Rantakari, Miitta. 2012. Carbon dioxide in boreal surface waters: A comparison of lakes and streams. *Ecosystems* 15:1295-1307
- Wik, Martin, Crill, Patrick M., Bastviken, David, Åsa, Danielsson och Norback, Elin. 2011. Bubbles trapped in arctic lake ice: Potential implications for methane emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 116:G03044

Bilaga 1

Resultat av statistiska analyser

Resultat av de utförda statistiska analyserna (p-värden) och vilken typ av analys som utfördes. T= T-test, MW=Mann-Whitney Test.

Fet stil = Signifikant skillnad

p-värden	År 1 och År 2	År 2 och År 3	År 1 och År 3	Referenssjöar och påverkade sjöar
DIC (μM)				
Höst	T 0,26	T 0,28	T 0,48	T 0,004
Vår	MW 0,38	MW 0,28	MW 0,19	T 0,006
Ackumulation	MW 0,02	MW 0,04	MW 0,19	MW 0,37
CH₄				
Höst	T 0,1	T 0,48	T 0,32	T 0,4
Vår	MW 0,38	MW 0,04	MW 0,01	MW 0,10
Ackumulation	MW 0,38	MW 0,07	MW 0,01	MW 0,07
Förhållande DIC:CH₄				
Höst	MW 0,36	MW 0,01	MW 0,23	MW 0,10
Vår	MW 0,38	MW 0,02	MW 0,01	MW 0,16
Ackumulation	MW 0,28	MW 0,04	MW 0,01	MW 0,1
mgCm-2d-1				
Ackumulation	MW 0,07	MW 0,12	MW 0,12	MW 0,43



Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG)
901 87 Umeå, Sweden
Telefon 090-786 50 00
Texttelefon 090-786 59 00
www.umu.se