

Proj. nr	P12638-1
2003-03-05	
STATENS ENERGI MYNDIGHET	
Ank.	2003-05-15
D/Drf	2000-1063

## Emission av växthusgaser från kraftverksmagasin och reglerade sjöar i norra Sverige.

Slutrapport. Energimyndigheten, projektnr P12638-1

Mats Jansson<sup>1</sup>  
Grete Algesten<sup>1</sup>  
Ann-Kristin Bergström<sup>1</sup>  
Sebastian Sobek<sup>2</sup>  
Lars Tranvik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institutionen för ekologi och geovetenskap, Umeå universitet

<sup>2</sup> Evolutionsbiologiskt Centrum, avdelningen f. Limnologi, Uppsala universitet

Rapporten godkännes
2003-06-13 OBS! Åter för registrering
<i>Mats Jansson</i> innan anmälan
Skicka in kommentarer/ev uppföljning till:
SE 123456789

## **Summary**

Carbon dioxide in Swedish hydroelectric reservoirs and natural lakes was studied to assess whether the emission of CO<sub>2</sub> from inland waters has increased due to construction of reservoirs, and to gauge how the CO<sub>2</sub>-emission from reservoirs relates to CO<sub>2</sub>-emission from combustion plants used for electricity production. Emission of CO<sub>2</sub> from the reservoirs was lower than from most reservoirs in other boreal regions of the world, probably since most reservoirs are constructed by damming of large natural lakes in hilly sub-arctic terrain. Therefore, comparatively small areas with small stores of organic carbon have been flooded. The total annual CO<sub>2</sub>-emission due to regulation for the seven rivers included in this study (which collectively represents 87% of the total hydroelectricity production in Sweden) is 50 000 tonnes of CO<sub>2</sub>. This emission represents 1.5 % of the yearly CO<sub>2</sub>-emission from Swedish electricity combustion plants and 1 % of the net emission from natural Swedish lakes.

## **Allmänt**

Projektets målsättning har varit att definiera koldioxidemission från reglerade vattendrag i norra Sverige och ange i vad mån regleringen har påverkat emissionen jämfört med förhållandena i naturliga vattendrag. Arbetet inom projektet inleddes i juni 2000 och bestått i anskaffning av utrustning, metodutveckling, fältstudier, bearbetning av data samt rapportering av resultat i form av två manuskript inskickade till vetenskapliga tidskrifter (Bilaga 1 och Bilaga 2). Verksamma i projektet har varit professor Mats Jansson, Umeå universitet (projektledare), professor Lars Tranvik, Uppsala universitet, FD Ann-Kristin Bergström, Umeå universitet (forskningsassistent 50%), FK Grete Aronsen, Umeå universitet (doktorand), FK Sebastian Sobek, Uppsala universitet (doktorand). Av dessa har Ann-Kristin bergström haft lön (50%) från projektet. Övrigas löner har täckts från annat håll

## **Provtagningsprogram**

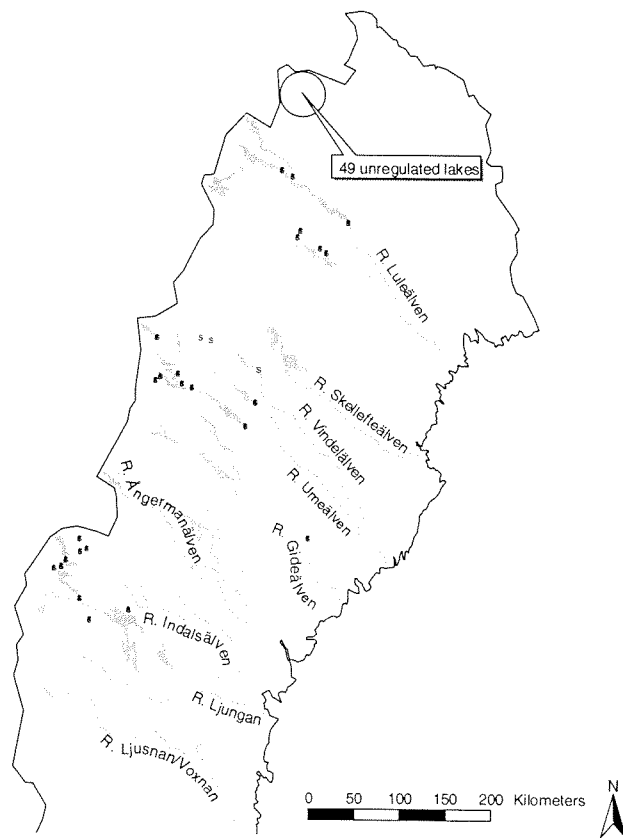
Efter inledande fältstudier under sommaren 2000 genomfördes 2 större fältprogram under sommaren 2001. I ett program utfördes provtagningar i 26 större regleringsmagasin i Luleäven, Umeälven och Indalsälven (Figur 1).

Provtagning gjordes vid ett tillfälle under perioden juli – mitten av augusti. I varje magasin togs prover vid minst 2 lokaler. Vid varje lokal togs prover i ytvatten, bottenvatten och en nivå mellan yta och botten. Proven analyserades mät koldioxidkoncentration och koldioxidmättnad, pH, ledningsförmåga, näringsämnen, löst organiskt kol, klorofyll och bakterieantal. Syftet med denna studie var att undersöka magasin i norra, mellersta och södra delen av Norrland för att få en så heltäckande bild som möjligt av emissionen av växthusgaser från magasin inom eller i nära anslutning till den svenska fjällkedjan.

Samma typ av provtagning genomfördes också vid sex tillfällen och fyra lokaler i Burvattnet och i Övre Mjölkvattnet i Jämtland för att undersöka eventuella temporala och horisontella variationer i regleringsmagasin i fjällmiljö.

Ett andra provtagningsprogram förlades till Skinnmuddselet (reglerad) i Gideälven, Västerbotten och Örträsket (oreglerad) i Öreälven, Västerbotten (Tabell 1). Syftet med denna studie var att undersöka förhållandena i ett regleringsmagasin i skogslandet. Förhållandena i regleringsmagasinet utvärderas gentemot de i den oreglerade sjön i syfte att kunna belägga förhållanden som är specifika för den reglerade vattenmiljön. Provtagning och analyser genomfördes enligt samma modell som i fjällmagasinen vid fyra tillfällen. Därutöver togs prover i inlopp och utlopp i syfte att upprätta massbalanser för olika kolfraktioner i Skinnmuddselet och Örträsket.

Som referensmaterial till mätningarna i samtliga magasin har används mätningar som gjorts i ett stort antal sjöar i hela Sverige inklusive sjöar i norra delen av fjällkedjan.



**Figur 1.** Karta över de provtagna regleringsmagasinen (fyllda cirklar) och de naturliga sjöarna.

**Tabell 1.** Morfometriska och hydrologiska karaktäristika för Skinnmuddselet och Örträsket.

	Lake Skinnmuddselet	Lake Örträsket
Catchment area (km <sup>2</sup> )	1400	2210
Mean lake area (km <sup>2</sup> )	27	8
Mean lake volume (Mm <sup>3</sup> )	170	170
Maximum depth (m)	20	64
Mean depth (m)	6,5	23
Mean water inflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	20	33
Whole lake water exchange time (days)	110	61
Epilimnion water exchange time (days)	94	22

### Analys av koldioxid

Mätning av CO<sub>2</sub>-koncentration utfördes genom att injicera 50ml utomhusluft i provtagningsflaskor och därefter skaka dem i en minut för att erhålla jämvikt mellan CO<sub>2</sub> i vattnet och den injicerade gasfasen. Efter skakning togs 40ml gasfas ut ur flaskorna för och mättes med avseende på CO<sub>2</sub>-halt (ppm) i en IR-spektrofotometer (PP-systems EGM-3). Liknande analysmetodik användes för att analysera DIC, med den skillnaden att 5ml 25% HCl tillsattes till provtagningsflaskorna innan injektion av utomhusluft och skakning. På detta sätt förskjuts jämvikten i kolsyrasystemet så att halter av vätekarbonater och karbonater i vattenproverna omvandlas till mätbar koldioxid.

### Beräkningar

Erhållna halter av CO<sub>2</sub> (ppm) omvandlades till partialtryck av CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) enligt följande formel som är baserad på Henrys Lag och Allmänna gaslagen:

$$pCO_2 = ((X_g V_g / RT_v + X_g K_H V_v - X_{luft} V_g / RT_v) P_{luft}) / V_v K_H$$

där  $X_g$  är uppmätt CO<sub>2</sub>-halt (ppm),  $V_g$  och  $V_v$  är volym vatten samt volym injicerad gasfas (L),  $T$  motsvarar vattentemperatur (K), och  $R$  är den universella gaskonstanten (0,08206 L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>).  $X_{luft}$  är koncentrationen av CO<sub>2</sub> i utomhusluft och  $K_H$  är Henrys konstant som beräknades enligt Weiss (1974).

Emission av kol (mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) bestämdes enligt Cole och Caraco (1998):

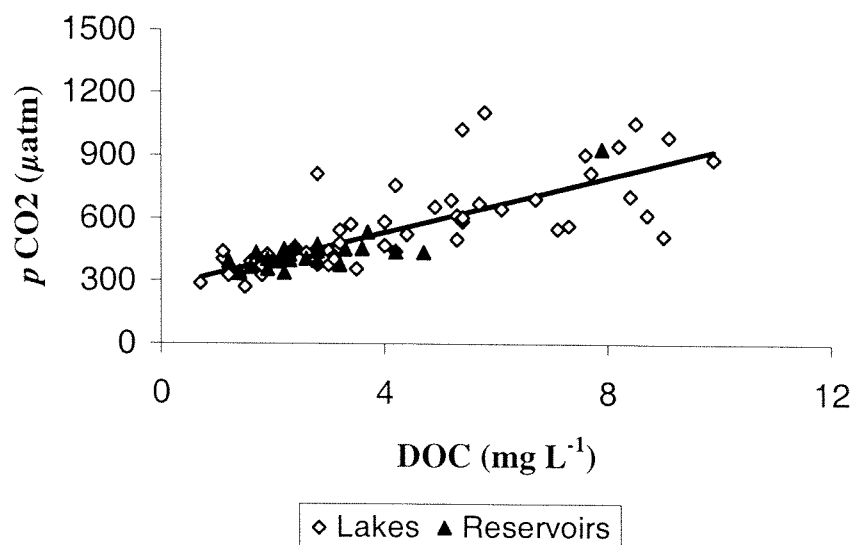
$$\text{Emission} = k (P_{gas} - gas_{mättnad}) K_H$$

Där  $P_{gas} K_H$  motsvarar partialtrycket av CO<sub>2</sub> vid vattenytan och  $gas_{mättnad}$  motsvarar gaskoncentrationen som vattnet har vid jämvikt med atmosfären (360ppm). Parameter  $k$  (m d<sup>-1</sup>) anger diffusionshastighet av CO<sub>2</sub> mellan vatten och atmosfär och beräknas enligt följande:

$$k = (2,07) + (0,215 U^{1.7}) \times (0,24); \quad \text{där } U \text{ motsvarar vindhastighet (m s}^{-1}\text{)}$$

### Beräkning av emission från de reglerade älvarna

Data från de magasin som provtagits visade på ett starkt samband mellan pCO<sub>2</sub> och koncentration av löst organiskt kol (DOC), och sammanföll väl med det samband som tidigare redovisats från oreglerade fjällsjöar i Abiskoområdet (Figur 2). Ekvationen i figur 2 användes för att beräkna partialtrycket av koldioxid i de magasin som ej provtagits. Koncentration av kol i ej provtagna magasin erhöles ifrån Riksinventeringen-95 (RI-95). I de magasin som ej fanns med i RI-95, och som ej hade provtagits i denna undersökning, antogs att koncentrationen av DOC var av samma storleksordning som i närliggande magasin. Vid beräkning av emission (enligt formler ovan) antogs en vattentemperatur på 10°C i alla magasin och en vindhastighet på 2.5 ms<sup>-1</sup>. På detta sätt kunde den totala emissionen av kol beräknas för samtliga magasin i samtliga älvar som reglerats i Norrland. Sammantaget svarar dessa för ca 90 % av den svenska elproduktionen från vattenkraft.



**Figur 2.** Samband mellan DOC-koncentration och  $p\text{CO}_2$ -koncentration i ytvatten i regleringsmagasin och naturliga sjöar i norra Sverige.

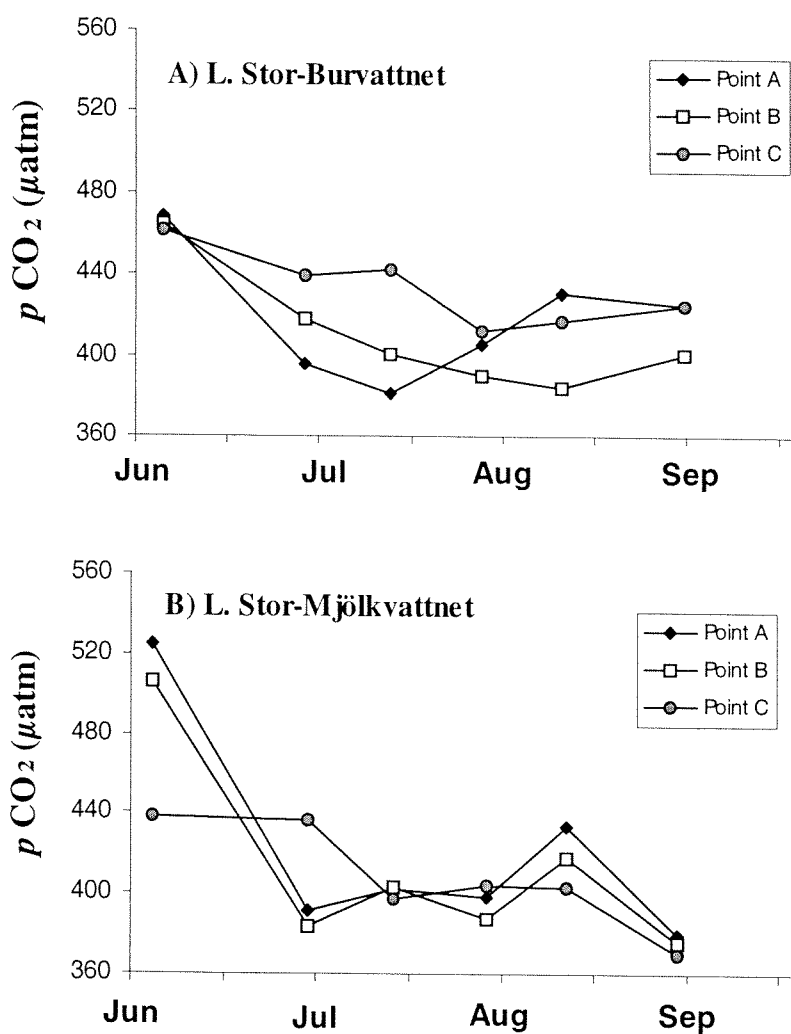
Uppgifter på förändring i sjöyteareal i och med reglering av älvarna tillhandahölls från Vattenfall AB Vattenkraft, Swedpower, Skellefteälvens Vattenregleringsföretag samt av Regleringsföretagen i Östersund. Uppgifter på total elproduktion i respektive älv tillhandahölls från Vattenregleringsföretagen Östersund, Vattenfall AB Vattenkraft, Skelleftekraft samt av Graninge Kraft AB

## Resultat

### Reglerade fjällälvar

Resultat från denna del av projektet redovisas och diskuteras i detalj i Bilaga 1: "Emission of  $\text{CO}_2$  from hydroelectric reservoirs in northern Sweden" (manuskript insänt till Water Resources Research). Samtliga undersökta fjällmagasin hade ytvatten som var övermättade med koldioxid (Figur 2). De mätningar som gjordes i Burvattnet-Mjölkvattnet visade endast små variationer i tid och rum under sommarperioden (Figur 3). Vi anser därför att de mätningar som gjorts i juli – augusti väl representerar en sommarsituation. Följaktligen visar våra resultat att magasin i fjällen är nettoavgivare av koldioxid till atmosfären. Övermättnader och flöden av koldioxid är dock låga jämfört med vad som uppmätts i de flesta naturvatten i Sverige. Skälet är den låga tillförseln av organiskt material (som via nedbrytning i vatten och sediment) är främsta koldioxidkälla. Koldioxidmättnadens samband med halten av organiskt material (DOC) i fjällmagasinen följer väl det samband som finns mellan DOC och koldioxidövermättnad i oreglerade fjällsjöar (Figur 2). Inga skillnader noterades mellan de tre undersökta älvarna. Reglerade vatten i fjällen tycks således inte skilja sig från oreglerade sjöar vad gäller produktion och emission av koldioxid. Emellertid medför en dämning att större vattenvolymer och

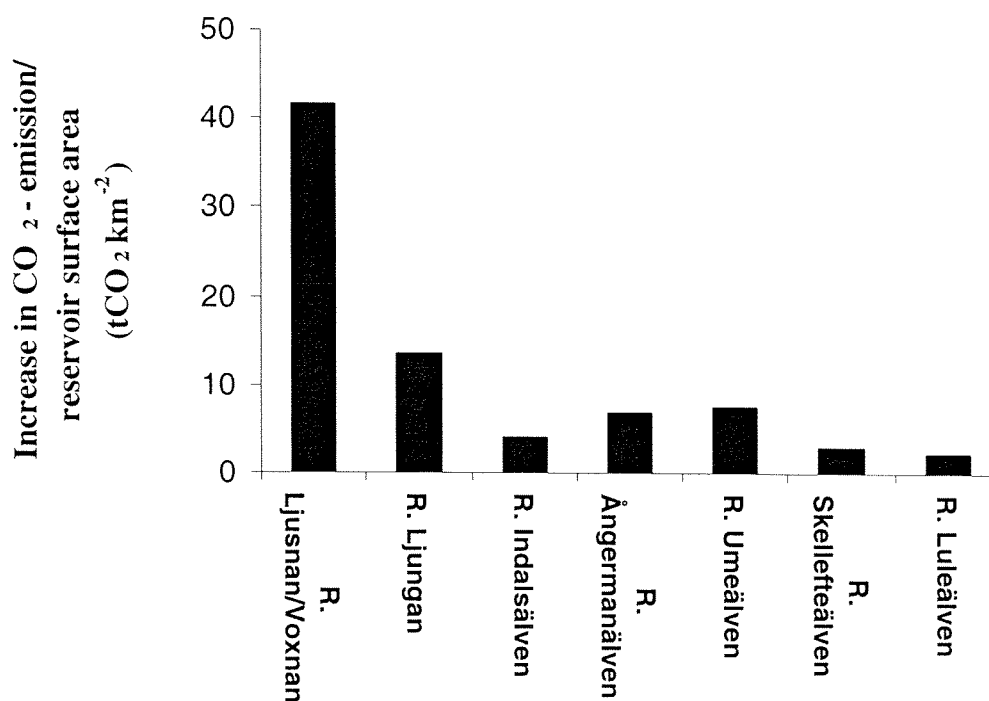
vattenarealer skapas jämfört med i oreglerade älvar. Även om emissionen per m<sup>2</sup> vattenyta inte skiljer sig mellan reglerade och oreglerade vatten kommer därför ändå den ökade vattenarealen att medföra att en reglerad älv avger mer koldioxid efter reglering än före.



**Figur 3.** Säsongsvariation i ytvattenkoncentration av  $pCO_2$  vid tre olika provtagningsstationer (A, B and C) i regleringsmagasinen A) Stor-Burvattnet, och B) Stor-Mjölkvattnet.

Storleken på denna ökade emission har beräknats för samtliga reglerade älvar i Norrland. De största ökningarna noteras i Ångermanälven och i Ljusnan/Voxnan medan övriga älvar uppvisar en lägre, men sinsemellan ungefär lika stor, ökning (Figur 4). Att Ljusnan/Voxnan har högst ökning beror på en stor ökning av vattenarealen i kombination med hög tillförsel av organiskt material (vilket avspeglas i hög TOC-halt). Ångermanälven har relativt stor ökning av arealen och medelhög tillförsel av organiskt material. Luleälven som är kraftigt reglerad och har den största arealökningen har

däremot så låg tillförsel av organiskt material att emissionsökningen blir måttlig. Det är alltså uppenbart att koldioxidproduktion framförallt beror på om det dämnda systemet har hög eller låg tillförsel av organiskt kol.



**Figur 4.** Ökning av CO<sub>2</sub>-emission per ytenhet magasinnya vid maximal regleringsamplitud i de sju undersökta älvarna.

Vad gäller talet för koldioxidemission (ökning efter reglering) i relation till producerad mängd energi så medför ovan relaterade förhållanden att Ljusnan/Voxnan har det högsta talet och Luleälven det lägsta. Den låga koltillförseln till svenska magasin gör att emissionen från de dämnda svenska älvarna är lägre än vad som redovisats från andra nordliga miljöer (Canada och Finland) (Tabell 2).

Sammantaget visar våra beräkningar att den ökade koldioxidemission som regleringen av norrlandsälvarna orsakat uppgår till ca 50 000 ton CO<sub>2</sub>/år. Detta motsvarar ca 1 % av koldioxidemissionen från samtliga naturliga sjöar i norra Sverige (Algesten et al. submitted manuscript) och ungefär 1,5 % av emissionen orskad vid elproduktion med fossila bränslen i Sverige.



**Tabell 2.** Överdämd landarea (Flooded Area), CO<sub>2</sub>-emission, CO<sub>2</sub>-emission/Överdämd landarea, Total energiproduktion, Överdämd landarea/Energi produktion, och CO<sub>2</sub>-emission/Energi produktion, i de sju undersökta reglerade älvarna i norra Sverige. Data från regleringsmagasin i den boreala zonen i Kanada och från Svenska förbränningsanläggningar är också inkluderade.

	Flooded Area (km <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> -Emission (MtCO <sub>2</sub> y <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> -emission/ Flooded Area (ktCO <sub>2</sub> km <sup>-2</sup> )	Energy prod. (TWh y <sup>-1</sup> )	Flooded area / Energy prod. (km <sup>2</sup> TWh <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> -emission/ Energy prod. (MtCO <sub>2</sub> TWh <sup>-1</sup> )
<b>Swedish regulated rivers</b>						
R. Ljusnan/Voxnan	161	0.016	0.10	3.7	44	0.004
R. Ljungan	49	0.003	0.07	2.3	21	0.001
R. Indal	107	0.007	0.07	9.6	11	0.001
R. Ångerman	190	0.009	0.05	11.3	17	0.001
R. Ume	149	0.005	0.04	7.4	20	0.001
R. Skellefte	130	0.004	0.03	4.2	31	0.001
R. Lule	354	0.003	0.01	13.6	26	0.0002
<b>Total* or Mean</b>	<b>1140*</b>	<b>0.05*</b>	<b>0.05</b>	<b>52*</b>	<b>24</b>	<b>0.001</b>
<b>Canadian regulated rivers</b>						
La Grande Complex <sup>1</sup>	13000	4.1	0.32	82	159	0.05
Churchill/Nelson <sup>1</sup>	1400	0.28	0.20	14	100	0.02
Manic Complex <sup>1</sup>	2645	0.80	0.30	20	132	0.04
Sainte-Marguerite <sup>1</sup>	85	0.02	0.26	2.8	30	0.008
Churchills falls <sup>1</sup>	6705	2.1	0.31	35	192	0.06
<b>Electricity production using fossil fuels in Sweden</b>						
Oil and gas		1.9				
Coal and coke		0.9				
Peat and sweepings		0.1				
Biofuel		0.6				
<b>Total</b>		<b>3.5</b>		<b>8.4</b>		<b>0.4215</b>

<sup>1</sup>Data from Duchemin et al. [in press]

### Gideälv (reglerad skogsälv)

Resultaten från mätningarna i Skinnmuddselet och Örträsket redovisas och diskuteras i detalj i Bilaga 2 "A comparison of the carbon balances of a natural lake (L. Örträsket) and a hydroelectric reservoir (L. Skinnmuddselet) in northern Sweden" (manuskript insänt till "Ecosystems". Viktiga delar av resultaten sammanfattas i en massbalans för kol för de båda sjöarna (Tabell 3). Här framgår att den interna nettotillförseln av koldioxid som är resultatet av nedbrytning av organiskt kol i vatten och sediment var en betydande del av den totala kolbudgeten. I Skinnmuddselet var t.ex. den interna produktionen ca 6 ggr större än tillförseln av koldioxid med tillrinnande vatten. Bildningen av koldioxid i vatten och sediment var således den främsta källan till koldioxidemission till atmosfären. Vidare visar massbalansen att huvuddelen av koldioxidproduktionen emitterades till atmosfären och följaktligen var också emissionsförlusterna en stor del i den totala kolbudgeten. Den totala emissionen från Skinnmuddselet var betydligt högre (4-5 ggr) i Skinnmuddselet än i den oreglerade Örträsket. Detta var främst en effekt av den betydligt större ytan på Skinnmuddselet (27 km<sup>2</sup>) jämfört med Örträsket (7 km<sup>2</sup>). Emissionen per m<sup>2</sup> sjöyta var således bara något större i Skinnmuddselet. En annan skillnad mellan Skinnmuddselet och Örträsket var att sedimentet hade större betydelse som koldioxidproducent i Skinnmuddselet (Tabell 3) vilket i sin tur främst beror på att kvoten mellan sedimentyta och sjövolym är högre i Skinnmuddselet. Även för sedimentproduktionen av koldioxid gäller att den per m<sup>2</sup> sedimentyta var större i Skinnmuddselet än i Örträsket, vilket kunde förklaras av en högre temperatur då en stor del av sedimenten i Skinnmuddselet stod i direktkontakt med epilimnion (Figur 5). Detta var inte fallet i Örträsket där majoriteten av sedimenten stod i direktkontakt med hypolimnionvatten. Sammanfattningsvis tyder jämförelsen mellan Skinnmuddselet och Örträsket på att magasinet och den naturliga sjön har ungefär samma areella kapacitet att producera koldioxid. Det ska dock framhållas att eftersom magasin av Skinnmuddselets typ är tillskapade vattenarealer så kommer all den koldioxid som produceras i sådana magasin att vara en effekt av vattenregleringen. Eftersom skogs- och myrlandskapet som dämts över normalt utgör en fälla för koldioxid kan regleringseffekten dessutom vara ändå större än vad den nuvarande nettoemissionen anger.

### **Ej helt avslutade undersökningar.**

Under 2002 och vintern 2003 är görs mätningar av koldioxidmättnad i mynningen på alla större reglerade och oreglerade vattendrag längs norrlandskusten. Mätningar genomförs under vår sommar, höst och vinter. Syftet är att se om det finns skillnader mellan reglerade och oreglerade vattendrag långt nedströms i systemen. Om så är fallet kan vi utifrån dessa skillnader bedöma och kvantifiera i vad mån den "extra koldioxid" som vi registrerat i magasinerna läcker till Bottniska viken eller emitteras uppströms älvmyningarna. Beräkningar görs sedan på årsförluster och i vilken grad reglering bidragit till förändring av total växthusgasemission. I de data som hittills analyserats (3 tillfällen) finns inget som tyder på att reglerade älvar avviker från oreglerade. Vi kommer därför med stor sannolikhet dra slutsatsen att den koldioxid som bildas i regleringsmagasinen exporteras till atmosfären innan magasinens vatten når havet.

Table 3. Kolbalanser ( $g C m^{-2}$ ) för Skimmuddsetet (L. S) och Örträsket (L. Ö) för perioden 28 Maj – 19 Augusti, 2001. Värdet inom parentes anger ton C för hela sjöarna.

	Pool <sup>1</sup>	$\Delta$ Pool <sup>2</sup>	Input <sup>3</sup>	Output		Retention <sup>7</sup>	Internal Net Supply			
				Outlet <sup>4</sup>	Emission <sup>5</sup>		Total <sup>6</sup>	Total <sup>8</sup>	Water <sup>9</sup>	Sediment <sup>10</sup>
L. S.	DOC	53 (1430)	12.2 (330)	46.7 (1260)	36.7 (990)	36.7 (990)	10 (270)	2.2 (60)		
L. S.	DIC	10 (270)	2.2 (60)	8.5 (230)	7.8 (210)	23.9 (645)	23.9 (645)	25.3 (685)		
L. S.	CO <sub>2</sub>	5.2 (140)	1.1 (30)	3.3 (90)	3.7 (100)	23.9 (645)	23.9 (645)	25.3 (685)	5.3 (143)	20 (542)
L. Ö.	DOC	205 (1640)	-10 (-80)	350 (2800)	350 (2800)	350 (2800)	0	-10 (-80)		
L. Ö.	DIC	35 (280)	7.5 (60)	47.5 (380)	50 (400)	21.3 (170)	21.3 (170)	31.3 (250)		
L. Ö.	CO <sub>2</sub>	22.5 (180)	6.3 (50)	15 (120)	18.7 (150)	21.3 (170)	21.3 (170)	31.3 (250)	20.5 (164)	10.8 (86)

<sup>1</sup> Lake water pool of carbon

<sup>2</sup> Change in lake water pool from day 0 to day 84

<sup>3</sup> Input of carbon via the inlets

<sup>4</sup> Output of carbon via the outlet

<sup>5</sup> Output (emission) of carbon over the water surface

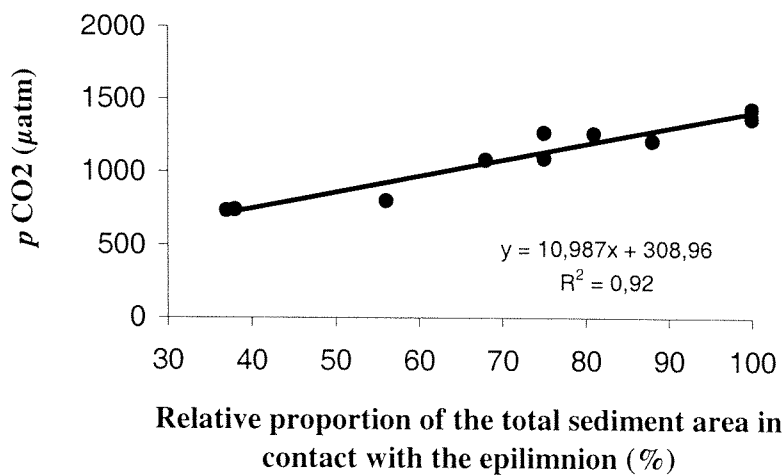
<sup>6</sup> Total output of carbon (Outlet + Emission)

<sup>7</sup> Retention (Input-Total Output)

<sup>8</sup> Total Internal Net Supply ( $\Delta$ Pool-Retention)

<sup>9</sup> Internal Net Supply from water column mineralization (10% of the DOC-pool (Pool); based on results from the study by Jonsson et al. [17])

<sup>10</sup> Internal Net Supply from sediment mineralization (Total Internal Net Supply – Internal Net Supply from water column mineralization)



**Figur 5.** Samband mellan ytvattenkoncentration av pDOC och relativ andel av total sedimentyta i direktkontakt med epilimnion i Skinnmuddselet under sommarskiktningen. Punkterna representerar fem delareor av Skinnmuddselet. Varje delarea provtogs 29 Juni och 17 Juli.

## Slutsatser

Regleringsmagasin och reglerade sjöar i norra Sverige exporterar inte mer koldioxid till atmosfären per sjöyteenhet än naturliga sjöar

På grund av att uppdamning skapar större arealer sker en dock en ökning av emissionen från en utbyggd älv jämfört med situationen före utbyggnaden. För norra Sveriges älvar uppgår den ökningen - som alltså är en regleringseffekt - till ca 50 000 ton koldioxid per år

Regleringseffekten är sannolikt större än så om hänsyn tas till att överdämda områden tidigare troligen varit fällor för koldioxid genom fixering i de terrestra systemen. Eftersom vi inte känner det terrestra systemens kolbalanser kan vi inte ange den totala effekten.

Ökningen av emissionen från de reglerade älvarna i norra Sverige motsvarar ca 1 % av den totala emissionen från alla naturliga sjöar i norra Sverige

Ökningen av emissionen från de reglerade älvarna i norra Sverige motsvarar ca 1.5 % av den koldioxidemission som genereras av elproduktion med fossila bränslen i Sverige

### **Citerad litteratur**

Algesten G, Sobek S, Bergström A-K, Ågren A, Tranvik LJ and M Jansson. The role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. submitted manuscript.

Cole JJ and N Caraco. 1998. Atmospheric exchange in a low wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>. *Limnol and Oceanogr.* 43: 647-656.

St Louis VL, CA Kelly, E Duchemin, JW Rudd and D Rosenberg. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *Bioscience* 50: 766-774.

Weiss RF. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry* 2: 203-215.