

**Slutrapport för perioden 2000-2003**

## **RESTAURERING AV REGLERINGSMAGASIN – optimering av fisk- och planktonproduktion genom balanserad näringsanrikning**

Dnr 5210P-00-745, Projektnr: P 12565-1

Göran Milbrink, Tobias Vrede, Emil Rydin, Jonas Persson, Staffan Holmgren, Mats Jansson, Peter Blomqvist och Lars Tranvik



Jonas Persson & Bo Säll tar prover på Mjölkvattnet, juni 2001. Foto: T. Vrede

## INLEDNING

Målet med projektet har varit att undersöka om det är möjligt samt ekologiskt försvarbart att förbättra fiskproduktionen i regleringsskadade sjöar i fjällregionen genom näringstillsats. Huvudproblemet är att de stora vattenståndsfluktuationerna i reglerade magasin förstör litoralzonen och att sjön utarmas på näring (oligotrofiering) (Stockner et al. 2000). Dessa skador leder i längden fram till svaga och långsamväxande fiskpopulationer. Näringstillsats är en möjlighet att i viss mån kompensera skador i redan reglerade system men kan givetvis inte uppväga de olika typer av skador som skulle uppkomma om ytterligare magasin skapas. Projektet har ett nyhetsvärde genom att det är första gången som metoden har tillämpats i *större vatten* i Skandinavien. Ett stort nyhetsvärde har också vårt arbete med att klargöra mekanismerna bakom oligotrofieringsprocessen.

Projektet har löpt under tiden 2000 – 2002, finansierat genom forskningsprogrammets första etapp. Under denna första period har vi etablerat nödvändiga metoder, genomfört förstudier i Stora Mjölkvattnet och Burvattnet i övre Indalsälven i Jämtland, och påbörjat den storskaliga näringstillsatsen under en säsong.

De resultat som vi uppnått visar att näringstillskotten snabbt omsätts i näringskedjorna, vilket visar sig genom kraftiga ökningar i växt- och djurplankton. Oönskade växtplanktonarter har inte gynnats av näringstillsatsen. Djurplanktonökningarna har i sin tur på kort tid lett till avsevärd konditionsökning hos planktivor röding och är så här långt en bekräftelse på att resultat som uppnåtts i mindre skala (regleringsmagasin upp till c:a 150 ha; Milbrink & Holmgren, 1999) kan vara giltiga även för medelstora regleringsmagasin. Flera års näringsanrikning krävs dock för ett slutgiltigt svar i det avseendet.

## BAKGRUND

Det har visat sig att reglering av sjöar, främst på norra halvklotet, leder till oligotrofiering (Straskraba et al., 1992; Stockner et al., 2000) - en process som är lika negativ som eutrofiering för laxartad fisk. En borteroderad strandzon, som normalt utgör sjöns mest produktiva delar, medför att den reglerade sjöns biologi i stort sett begränsas till det öppna vattnets (pelagialens) relativt låga produktionförmåga. I Sverige och Norge uppmärksammades dessa negativa konsekvenser, som yttrat sig i svältpopulationer av laxartad fisk, redan under 40- och 50-talen. Botemedlen blev introduktion av nya fiskarter och nya fisknäringssdjur, bl.a. pungträkan (*Mysis relicta*). Ingen ny näring tillfördes således och resultaten blev magra.

I British Columbia i Kanada påbörjade man tidigt experiment med balanserad näringstillsättning till sjöar och vattendrag för att återskapa vattnets naturliga produktionskraft. Man gjorde det i första hand för att kompensera för uteblivna uppstigningar av lax från Stilla Havet p.g.a. av överfiske i kustvattnen. Det har visat sig att laxen genom sin uppvandring och omedelbara död efter leken i vattendragen tillför närmare 50% av den tillgängliga näringen - den s.k. laxpumpen. Berggrunden i sig är här mycket näringsfattig. Näringsanrikning av kustnära sjöar, där laxungarna uppehåller sig upp till ett år före utvandringen, har lett till högre överlevnad hos ungarna och därmed alltfler återvändande laxar. För varje miljon dollars man satsat på näringsanrikning har man fått tillbaka cirka 25 miljoner i form av förbättrat federalt fiske. Problemen blev, insåg man snabbt, desamma i kölvattnet på den omfattande vattenregleringen som startats i British Columbia under 1970-talet, och medicinen blev följaktligen densamma - balanserad näringsanrikning. Idag behandlar man framgångsrikt regleringsmagasin - eller delar av sådana - av gigantiskt format.

På 70-talet påbörjade Göran Milbrink och Staffan Holmgren i Sötvattenslaboratoriets regi näringsanrikningsexperiment i reglerade vatten i Jämtland enligt kanadensisk modell. Under åren 1990-1994 genomförde de ett SNV-projekt i ett litet regleringsmagasin, Övre Lilla Mjölkvattnet, på c:a 150 ha nedströms huvudobjektet i innevarande projekt - Stora Mjölkvattnet. Resultaten blev mycket positiva med starkt förbättrad kondition hos populationerna av röding och öring och ökad biologisk mångfald.

I samband med en internationell workshop i ämnet som sammankallades i Uppsala våren 1998 av prof. John Stockner, British Columbia, och Göran Milbrink, med deltagare från Kanada, USA, Norge och Sverige - i princip av flertalet forskare i världen som då arbetade med näringsanrikning av inlandsvatten - presenterades bl.a. resultaten från SNV-projektet (Milbrink & Holmgren, 1999). Workshopen som finansierades av Energimyndigheten och Elforsk AB (Vattenregleringsföretagen) upplevdes som mycket framgångsrik och blev startskottet till ny forskningssatsning i reglerade vatten i Sverige.

## ALLMÄN PROJEKTBEKRIVNING

Projektets övergripande mål har varit att utveckla en strategi för att restaurera ekosystemen och återskapa biodiversiteten i reglerade sjöar samt att optimera produktionen av röding och öring. För att kunna utveckla denna strategi krävs bättre kunskaper om väsentliga flöden och processer i systemet.

Några av delmålen har varit att

- kvantifiera mängden biotillgänglig fosfor som p.g.a. dämning undandragits näringsväven.
- kvantifiera pelagiala förluster av tillsatta näringsämnen till sedimenten samt nedströms.
- kvantifiera effekten av näringstillsets på fiskpopulationers kondition och produktion, framför allt hos röding.
- undersöka hur växt- och zooplanktonsamhällena påverkas av näringstillsetser och att studera hur effektivt energi och material transporteras vidare i näringsväven.
- med hjälp av mesokosmförsök utveckla optimala strategier för närsalttillsatser.
- med hjälp av stabila isotoper kartera närsaltsflödena genom näringsvävarna.
- genom näringsanrikning gynna hotade bestånd av laxartad fisk (röding och öring).

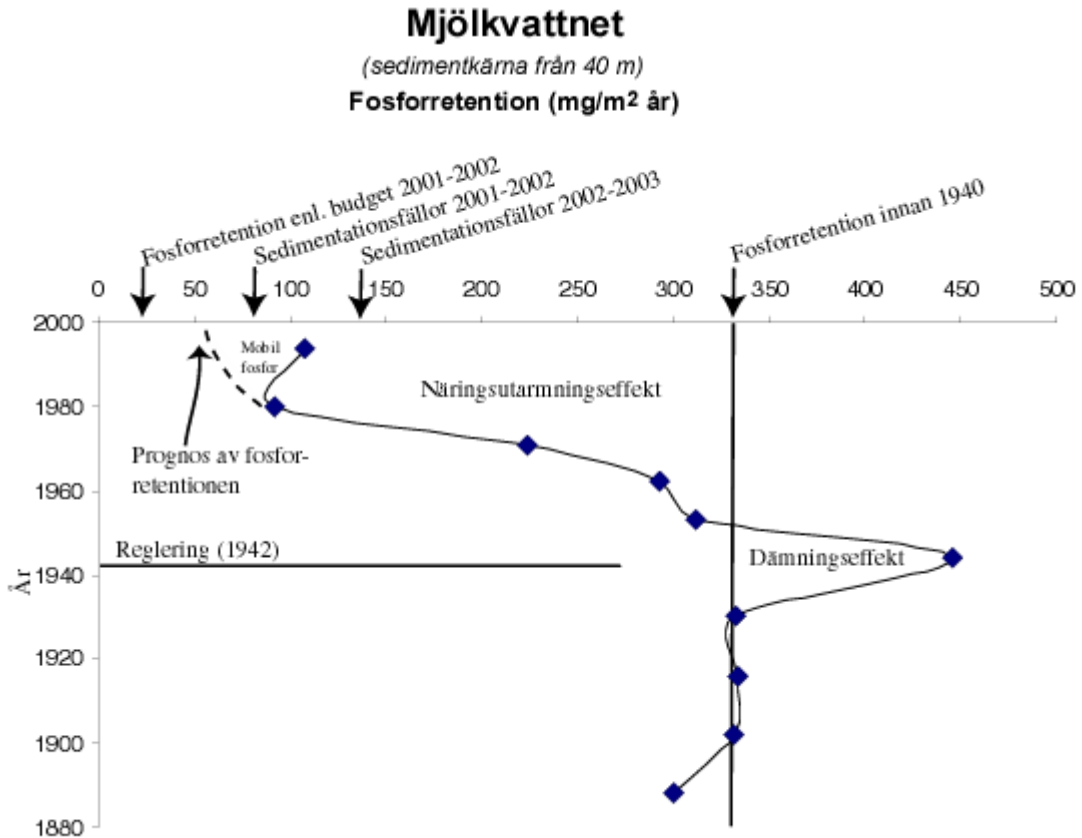
För att genomföra dessa mål har vi i enlighet med beskrivningen i ansökan genomfört fältstudier och näringsanrikning i två sjöar, Stora Mjölkvattnet och Burvattnet i Jämtland. Under åren 2000 och 2001 genomfördes grundläggande arbeten såsom lodning samt studier av vattenkemi och biota under omanipulerade förhållanden. Fältarbetet fortsatte väsentligen oförändrat under 2002 förutom att Mjölkvattnet näringsanrikades (Burvattnet behölls som referenssystem). År 2001 genomfördes också ett mesokosmexperiment med syfte att undersöka lämplig sammansättning och dos på näringsgivan. De flesta av ovanstående delmål bedömer vi att vi har uppnått under den gångna treårsperioden. När det gäller arbetet att med stabil isotopteknik studera hur effektivt energi och material vidaretransporteras i näringsväven har detta inte kunnat uppnås på grund av medelsbrist. Resultaten från fältarbetet samt övriga aktiviteter redovisas nedan.

## NÄRINGSUTARMNING (OLIGOTROFIERING) ORSAKAD AV REGLERING

För att en kompensatorisk näringstillsets skall kunna dimensioneras på ett miljömässigt försvarbart sätt måste näringsutarmningen pga regleringen av Mjölkvattnet och Burvattnet 1942 kvantifieras. En hypotes har varit att borteroderingen av mjukt och näringsrikt litoralsediment innebär förlust av en viktig fosforkälla till vattenmassan. Genom att undersöka litoralsediment från den oreglerade Ånnsjön (liksom Mjölkvattnet belägen i Indalsälvens vattensystem) framgick att 30 mg fosfor/m<sup>2</sup> år frisätts. Om denna hastighet även kan anses giltig för Mjölkvattnet, och omräknat till arean som har eroderats, innebär frånvaron av en intakt litoralzon med finsediment i Mjölkvattnet en utebliven fosforfrigörelse från dessa grunda bottnar (vilka täcker 3 av Mjölkvattnets 13 km<sup>2</sup>) på knappt 100 kg/år. Detta flöde kan jämföras med den externa tillförseln till Mjölkvattnet som är ca 1500 kg/år. Undersökningarna i Mjölkvattnet tyder dock på att fosforutarmningen är betydligt större än så.

En drastisk minskning av fosfordepositionen på ackumulationssedimenten har skett i Mjölkvattnet under de senaste årtiondena (Figur 1). Detta är en tydlig fingervisning att fosfortillgången i vattnet också har minskat.

Prognosen av fosforretentionen i sedimenten (ca 50 mg P/m<sup>2</sup> år) överensstämmer, med hänsyn taget till att arean av ackumulationsbotten utgör hälften av sjöarean, med fosforbudgeten som visar att fosforretentionen var ca 20 mg P/m<sup>2</sup> år under 2001-2002 utslaget på hela sjöarean. Den fosfor i sedimenten som kommer att frigöras till vattnet, ”mobil fosfor”, består av organiskt bunden fosfor och motsvarar runt 500 mg/m<sup>2</sup>. Figur 1 visar också mängden fosfor som sedimenterat under 2001-2002 (ingen näringstillsets) och 2002-2003 (inkluderar näringstillsetsen 2002, och en prognos av sedimentationen t.o.m. hydrologiska årets slut i mars 2003). Sammantaget visar detta att fosfortillsetsen 2002 inte var överdimensionerad.



Figur 1. Mängd fosfor som har deponerats och blivit kvar i Mjölkvattnets sediment under förra seklet. Fosforretentionen enligt fosforbudgeten, sedimentterande fosfor och mobil fosfor i ytsedimenten är också markerat.

Det bör poängteras att av tre sedimentkärnor från Mjölkvattnet som har analyserats med avseende på näringshalter och metaller har hittills en sedimentkärna från Mjölkvattnet daterats, vilket är grunden för att beräkna fosfordeponeringen. Sedimentationsmönstret kan vara heterogent och ytterligare sedimentkärnor skall dateras för att säkerställa förändringen i fosfordeposition.

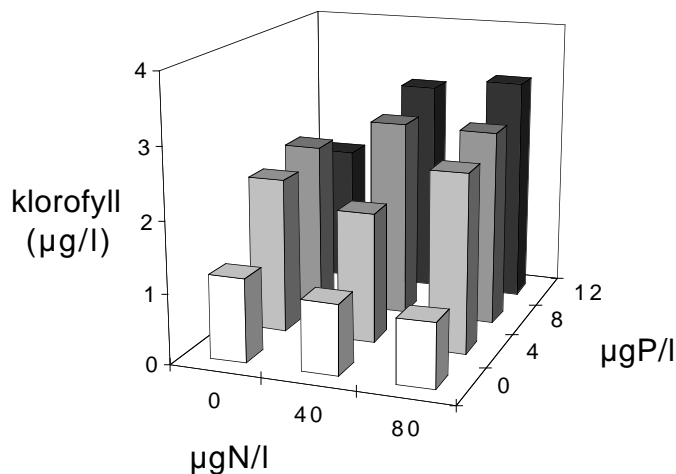
Hur kan en så pass kraftig förändring i fosforackumulering förklaras? Den så kallade dämningseffekten åren efter dämningen är logisk och välkänd. Erodering och urlakning av överdämda områden resulterar i en förhöjd produktion i vattenmassan och därmed en ökad deposition av material och näring på ackumulationsbottenområden (Figur 1). Men varför återgår inte depositions hastigheten till den som rådde innan regleringen, bortsett för det minskade bidraget från den eroderade litoralzonen? Det är svårt att se att den externa fosfortillförseln skulle ha minskat – bortsett från att magasinet uppströms Mjölkvattnet (Burvattnet) kan ha ökat sedimentationen av fosfor. Ytterligare en process kan tänkas ha bidragit med näring till det oreglerade Mjölkvattnet, nämligen den "naturliga dämningseffekten". I en odämd sjö är skillnaderna mellan högsta och lägsta vattenstånd måttliga (någon meter) och strandområden översvämmas i juni. Detta kan leda till att jordarna i strandzonen lakas ur på näringsämnen vid en tidpunkt som sammanfaller med den biologiska produktionssäsongen. Idag syns förnalagret som ett svart band i den eroderade strandzonen vid dämningens gränser. Dit når vattenytan endast vid överdämning (som inte sker under sommaren när biota kan dra nytta av den näring som frigörs). En annan bidragande orsak till den minskade fosforretentionen i sedimenten kan vara att fosforflödet *ut* ur Mjölkvattnet kan ha ökat under vintern p.g.a den stora vattenståndsminskningen (11m), vilken kan tänkas generera vattenrörelser i *hela* vattenmassan och därigenom orsaka resuspension av det mest finpartikulära och näringsrika materialet på ackumulationsbotten. Ovan nämnda frågeställningar skall undersökas under kommande år.

## VART TAR TILLSATT NÄRING VÄGEN?

För att klarlägga var näringstillsatsen tar vägen behöver de olika näringsfällorna kvantifieras. Centrala frågor i samband med näringstillsats är: Är fosfor eller kväve begränsade för primärproduktionen? Hur stor är tillsatsen jämfört med det naturliga flödet av näring genom magasinet? Sedimenterar tillsatt näring ut så pass snabbt att endast en liten andel rinner nedströms?

### Näringstillsatsen

Responserna av plankton på tillsats av kväve och fosfor studerades i ett mesokosmexperiment i Stora Mjölkvattnet under en treveckorsperiod i augusti 2001. Experimentdesignen var replikerat faktoriell med fyra nivåer av fosfortillsats (0, 4, 8 och 12  $\mu\text{gP/l}$  i form av  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) och tre nivåer av kvävetillsats (0, 40 och 80  $\mu\text{g N/l}$  i form av  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), dvs totalt 12 mesokosmer. Fosfor hade en positiv effekt på klorofyllhalten (Figur 2) och biomassan av växtplankton (huvudsakligen ätliga flagellater) och protozoer (huvudsakligen ciliater). Kväve däremot hade ingen effekt på dessa variabler. Responserna på fosfor var icke linjära; vid doser högre än 4  $\mu\text{gP/l}$  var ökningen i biomassa måttlig eller obefintlig. En möjlig förklaring till detta kan vara att spårämnesbrist kan ha uppstått vid högre fosfordoser. Under sommaren 2002 genomfördes in situ-experiment i Mjölkvattnet och Burvattnet som visade att även järn kan vara begränsande. Den måttliga responserna i mesokosmexperimentet vid högre tillsatser av fosfor motiverar också att dosen i helsjöskala inte ska vara för stor, dvs inte större än ca 4  $\mu\text{gP/l}$ . N:P-kvoten i näringsgivan gav inga dramatiska effekter på växtplanktonsamhällets sammansättning, varför en tämligen låg N:P-kvot i den tillsatta näringen kan accepteras i helsjöskala utan att risken för cyanobakteriedominans blir överhängande.



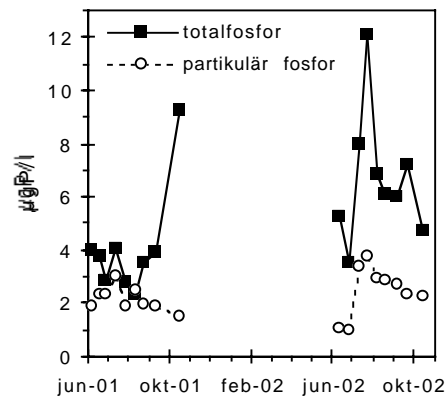
Figur 2. Växtplanktonbiomassa (mätt som klorofyllhalt) i mesokosmexperiment i Stora Mjölkvattnet (medelvärde av 2 mätningar efter 2 respektive 3 veckor efter näringstillsats). Experimentet hade faktoriell design med tre nivåer av kvävetillsats och fyra nivåer av fosfortillsats. Bakgrundshalterna av kväve och fosfor var 93  $\mu\text{g N l}^{-1}$  respektive 3  $\mu\text{g P l}^{-1}$ .

Baserat på resultaten från förundersökningar i Mjölkvattnet och Burvattnet 2001 och mesokosmexperimentet i Mjölkvattnet 2001 tillsattes fosfor (1,2 ton P i form av  $\text{H}_3\text{PO}_4$  i vattenlösning) och kväve (9,5 ton N i form av  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  i vattenlösning) till Mjölkvattnet 27 juni 2002 och 12 juli 2002. Tekniken att från pråm bogserad av båt pumpa ut näringen fungerade planenligt.

### Näring i vattnet

Näringstillsatsen resulterade i en förväntad höjning av totalfosforhalten med 3  $\mu\text{g/l}$  till drygt 6 under augusti och september (Figur 3). I slutet på juli var dock den uppmätta totalfosforhalten 12  $\mu\text{g/l}$ , vilket kan förklaras av att tillsatt näring inte hade hunnit fördelas i hela vattenmassan. I oktober hade totalfosforhalten sjunkit till drygt 4  $\mu\text{g/l}$  i Mjölkvattnet. Om 1  $\mu\text{g}$  fosfor/l av tillsatsen fanns kvar i vattnet i oktober innebär det att en tredjedel av tillsatsen fortfarande var kvar i vattenmassan. Omkring 40% av totalfosfor återfinns i partikulär fosfor. När totalfosforhalten stiger ökar också halterna av partikulär fosfor vilket indikerar att fosfor i stor utsträckning tas upp av växtplankton. Differensen mellan totalfosfor och partikulär fosfor består dels av lösta organiska fosforföreningar, dels av fosfor

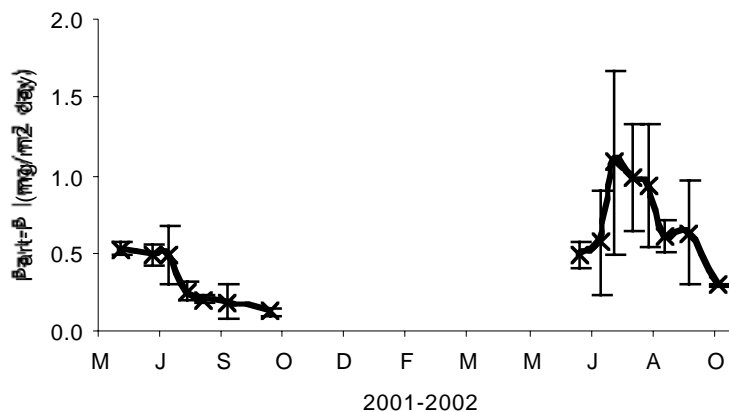
bundet till bakterier (vilka är så små att de passerar genom filtret som används för analys av partikulär fosfor).



Figur 3. Halter av totalfosfor och partikulär fosfor i Mjölkvattnet 2001-2002.

### Sedimentation av näring

Sedimentfällor var utplacerade i Mjölkvattnet (3 stationer) fr.o.m. juni t.o.m. oktober 2001 och 2002. Kol, kväve och fosfor (Figur 4) har analyserats. Om mängden sedimenterande material 2001 subtraheras från mängderna 2002, och räknas om till hela magasinet (för perioden juni - oktober) framgår att av den tillsatta fosfor sedimenterade drygt 50%, medan en mindre andel (<20%) av kvävet sedimenterade. Mängden sedimenterande kol var faktiskt mindre 2002 än under 2001. Dessa beräkningar på sedimentation av tillsatt näring är förmodligen underskattade då sedimentationshastigheten av åtminstone kol och kväve var lägre innan näringstillsats 2002 än under motsvarande period 2001. Detta kan förklaras med att 2001 var nederbördsrikare än 2002. Kvoten mellan sedimenterande kol och fosfor var alltså lägre 2002 än 2001. Den minskade från cirka 400 till 150 (på molbasis). Detta kan tolkas som att den autoktona primärproduktionen inte längre är lika uttalat fosforbegränsad efter näringstillsatsen som året innan.



Figur 4. Sedimentation av fosfor i Mjölkvattnet (medelvärde för 3 fällor på 30 m djup).

### Näring i ytsedimenten

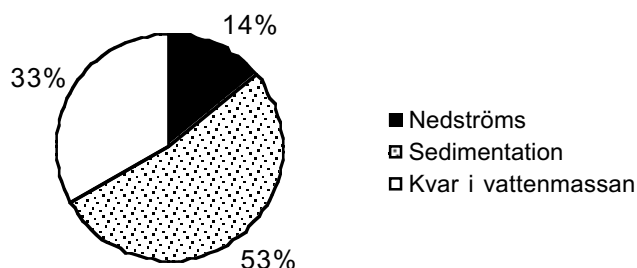
I transekter från de båda sjöarnas södra ändar togs triplikata ytsedimentprover från 15, 30, 45 och 60 m. Analyser med avseende på bl a fosfor, kol och kväve gjordes för att följa sedimentkvaliteten efter näringstillsats i Mjölkvattnet. Om hela tillsatsen av fosfor (3 µg/l) sedimenterar skall det resultera i en

höjning av ytsedimentens (0-1 cm) totalfosforhalt med cirka 20%. Analyserna på ytsedimenten från provtagningen i september 2002, då cirka 50% av den tillsatta fosfor hade sedimenterat, visade på en tendens till förhöjd totalfosforhalt i Mjölkvattnets ackumulationsbotten. Fosforfraktioneringen antydde ökning av järn- och aluminiumbunden fosfor, medan den organiskt bundna fosfor inte ökade i koncentration. En enstaka näringstillsats bygger alltså inte upp förhöjda halter av organiskt bunden fosfor som kan mineraliseras och nå vattenmassan igen.

### Näringsbudget (kväve och fosfor)

Burvattnets större tillflöden (7 st, vilka täcker 63% av tillrinningsområdets yta), sjön och utloppet provtogs varannan vecka from April tom Oktober. Mjölkvattnets större tillflöden (6 st, vilka täcker 85% av tillrinningsområdets yta), sjön och utloppet provtogs vid samma tidpunkter. From November och under vintern provtogs 76% av Mjölkvattnets tillrinningsområde (Tjäurenjukke och Burvattnets utlopp) varannan vecka. Tillloppens näringsbidrag viktades mot deras andel av den totala andelen av tillrinningsområdet som täcktes in av provtagningsprogrammet. Dagliga observationer av vattenstånd och utflöde från Burvattnet och Mjölkvattnet (vilket erhöles av Regleringsföreningen) räknades om till volym vatten, som får anses motsvara summan av tillloppens vattenbidrag (nederbörd på och avdunstning från sjöytan har, liksom grundvattenrörelser, ansetts försumbart). Resultaten av näringsbudgetarna redovisas i Tabell 1, men sammanfattas här i relation till mängd tillsatt näring till Mjölkvattnet i juli 2002.

Under hydrologiska året 2001/2002 (from april tom mars) tillfördes Mjölkvattnet 1519 kg fosfor, och 1345 kg lämnade magasinet, vilket ger en retention på endast 11%, medan hälften av kvävet (55%) hölls kvar i magasinet. Under följande hydrologiska år, vilket ännu inte är komplett, gjordes näringstillsatsen i juli (2002). From juli-02 tom oktober har inte mängden fosfor som lämnat Mjölkvattnet ökat jämfört med året innan. Detta förklaras dels av att tappningen har varit låg pga av den torra sommaren, dels att hösten 2001 var nederbördsrik vilket ökade fosfor- och kvävehalterna i Mjölkvattnet (och Burvattnet) under oktober till halter i paritet med de halter som uppnåddes med näringstillsatsen (Figur 3). From juli tom oktober har 176 kg av tillsatt fosfor (14%) runnit nedströms (om hälften av den total uttransporten under den perioden kan anses bestå av tillsatt fosfor), vilket är en liten andel jämfört med den andel som sedimenterade (Figur 5).



Figur 5. Andelar av den tillsatta fosfor som fanns kvar i vattnet, hade sedimenterat, respektive runnit nedströms fyra månader efter näringstillsats.

Tabell 1. Fosfor och kvävebudget för Mjölkvattnet hydrologiska året 2001-2002 (from april tom mars). Hydrologiska året 2002-2003 är inte komplett, men för att en jämförelse skall kunna göras med 2001-2002, summeras april tom oktober för 2001 och 2002 (kursiva rader). Burvattnet summeras på motsvarande sätt. Hälften av näringen tillsattes sista dagarna i juni, men bokförs tillsammans med resterande näringstillsats i juli 2002.

Mjölkvattnet												
Månad	Fosfor						Kväve					
	In			Ut	Retention		In			Ut	Retention	
	Tillrinning	Atm dep	Tillsatt		in-ut		Tillrinning	Atm dep	Tillsatt		in-ut	
	kg					%	kg					%
<b>apr-01</b>	41	0		73	-32		2038	0		2416	-378	
<b>maj-01</b>	210	34		24	219		4549	1360		313	5596	
<b>jun-01</b>	155	34		24	165		2717	1360		571	3505	
<b>jul-01</b>	162	11		34	138		3565	453		1243	2774	
<b>aug-01</b>	101	11		46	67		1858	453		949	1363	
<b>sep-01</b>	94	11		172	-67		1278	453		1250	482	
<b>okt-01</b>	160	11		156	16		2262	453		1096	1620	
<b>nov-01</b>	124	11		186	-51		3830	453		2472	1811	
<b>dec-01</b>	68	11		165	-86		2556	453		1594	1415	
<b>jan-02</b>	101	0		153	-52		3991	0		1756	2235	
<b>feb-02</b>	98	0		178	-81		3570	0		2406	1164	
<b>mar-02</b>	69	0		133	-64		2538	0		2080	458	
<i>apr-01 tom mar-02</i>	1383	136		1345	174	11%	34752	5440		18147	22044	55%
<b>apr-02</b>	89	0		87	2		3723	0		2938	785	
<b>maj-02</b>	311	34		35	310		4173	1360		1854	3680	
<b>jun-02</b>	169	34		105	98		3012	1360		1993	2378	
<b>jul-02</b>	80	11	1230	29	1293		1656	453	9430	844	10696	
<b>aug-02</b>	26	11		27	10		730	453		853	330	
<b>sep-02</b>	55	11		143	-76		1437	453		635	1256	
<b>okt-02</b>	47	11		153	-95		952	453		743	662	
<i>apr-01 tom okt-01</i>	<i>923</i>	<i>113</i>		<i>529</i>	<i>506</i>	<i>49%</i>	<i>18267</i>	<i>4533</i>		<i>7839</i>	<i>14962</i>	<i>66%</i>
<i>apr-02 tom okt-02</i>	<i>778</i>	<i>113</i>	<i>1230</i>	<i>579</i>	<i>1542</i>	<i>73%</i>	<i>15683</i>	<i>4533</i>	<i>9430</i>	<i>9860</i>	<i>19787</i>	<i>67%</i>
Burvattnet												
<i>apr-01 tom okt-01</i>	<i>442</i>	<i>110</i>		<i>275</i>	<i>278</i>	<i>50%</i>	<i>9978</i>	<i>4400</i>		<i>7481</i>	<i>6897</i>	<i>48%</i>
<i>apr-02 tom okt-02</i>	<i>309</i>	<i>110</i>		<i>246</i>	<i>172</i>	<i>41%</i>	<i>6654</i>	<i>4400</i>		<i>9275</i>	<i>1779</i>	<i>16%</i>



## BIOTA

Biota, såväl fisk som plankton och bottenfauna, är centrala responsparametrar i helsjöexperimentet. Huvudfrågan i studiet av dessa är vilka effekter näringstillräkningen har på produktion, näringsvävsstruktur och biodiversitet. För att näringstillräkningen ska vara effektiv krävs det att rätt organismer stimuleras så att födokvalitet och näringsvävsstruktur medger ett effektivt flöde av energi från primärproducenter (växtplankton) via djurplankton till fisk.

## Plankton

För analys av biomassa och produktion av plankton har ett provtagningsprogram genomförts med 9 provtagningar vardera under perioderna juni-oktober 2001 och juni-oktober 2002. Vid dessa tillfällen har också prover för analys av vattenkemiska parametrar som avspeglar födokvaliteten för djurplankton tagits.

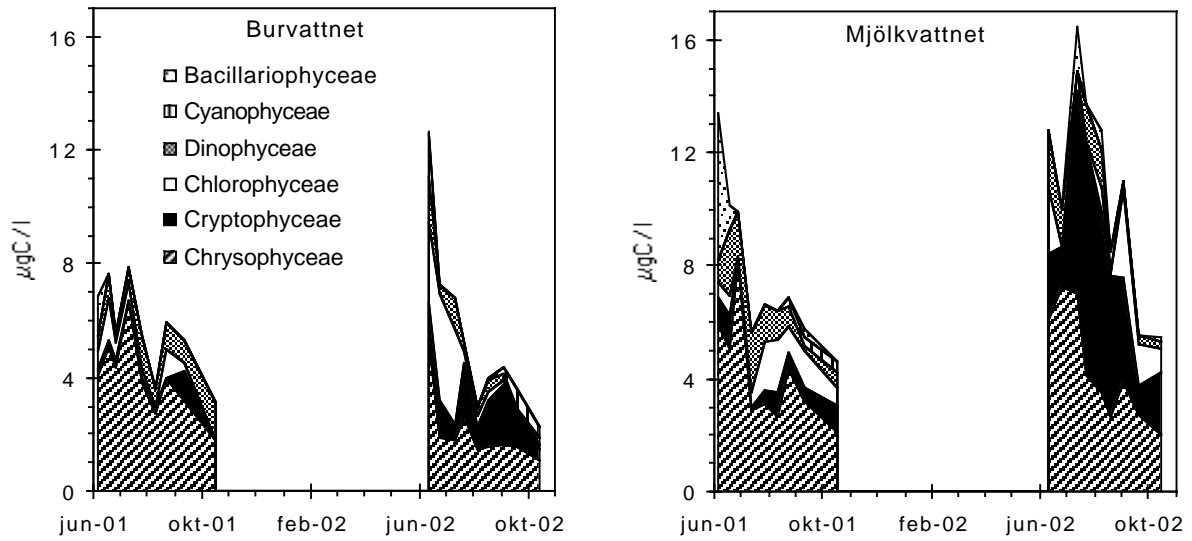
Vi fann att näringstillräkningen stimulerade planktonisk biota. Såväl växtplanktonproduktionen som växtplanktonbiomassan (Figur 6) ökade kraftigt i Stora Mjölkvattnet efter näringstillräkning. Framför allt gynnades Cryptophycéer, vilka anses vara högkvalitativ föda för djurplankton. Däremot förändrades inte växtplanktonfloran kvalitativt. Minskningen av växtplanktonbiomassa efter den stora toppen i juli 2002 kan sannolikt förklaras av ökad betning av djurplankton, såväl rotatorier som hinnkräftor. Bakterioplanktonproduktionen var i genomsnitt 3 gånger högre i Mjölkvattnet 2002 än i Burvattnet samma år. Produktionen i basen av näringsväven stimulerades således kraftigt av näringstillräkning.

Även på nästa trofiska nivå i näringskedjan, växtätande djurplankton, kan effekten av näringstillräkning utläsas tydligt. Biomassan av rotatorier ökade kraftigt i Mjölkvattnet som en följd av näringstillräkning (Figur 7). Arterna *Polyarthra vulgaris*, *Polyarthra remata* och *Conochilus hippocrepis* stod för den största delen av ökningen. Rotatorierna utgör en viktig föda för fisklarver samt för evertrebratpredatorer såsom *Bythotrephes longimanus*, vilka är en viktig föda för större fiskar. Bland herbivora Cladocera ökade såväl biomassan som fekunditet hos *Holopedium gibberum*, medan biomassan av *Bosmina coregoni* inte skiljde sig signifikant mellan år och sjöar (Figur 8). Sammantaget indikerar detta en ökad produktion av djurplankton som direkt eller indirekt utgör en viktig födoresurs för röding.

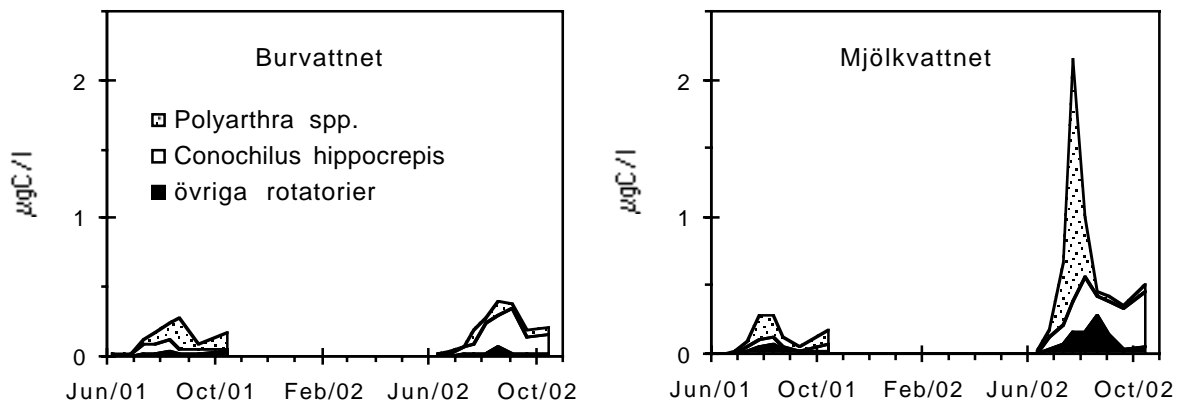
Födokvaliteten var fortsatt mycket hög eller till och med ökade, med avseende på sammansättning av essentiella grundämnen och fettsyror, vilket är en god förutsättning för djurplanktonproduktionen.

Mängden partikulärt kol i vattnet påverkades inte av näringstillräkning, utan höll sig omkring 160 respektive 210  $\mu\text{g/l}$  i båda sjöarna (Figur 9). Halterna av partikulärt kol indikerar inte svältförhållanden för djurplankton, men en stor del av det partikulära materialet består av detritus som är av lågt näringsvärde. Den mest dramatiska effekten av näringstillräkning var att halterna av partikulärt fosfor (P) ökade i Mjölkvattnet. Detta innebär att C:P-kvoten var väsentligt lägre i Mjölkvattnet 2002 än i Burvattnet samma år. C:P-kvoter omkring 200 innebär att djurplanktonproduktionen inte är begränsad av fosforbrist. Dock visar de höga C:P-kvoterna i Burvattnet 2002 att det finns en potential för fosforbegränsning av djurplanktonproduktionen där. Att C:P-kvoten är tämligen låg såväl i Burvattnet som i Mjölkvattnet 2001 beror sannolikt på att fosfor kontinuerligt tillfördes till planktonsamhället tack vare att det var ett mycket regnigare år än 2002.

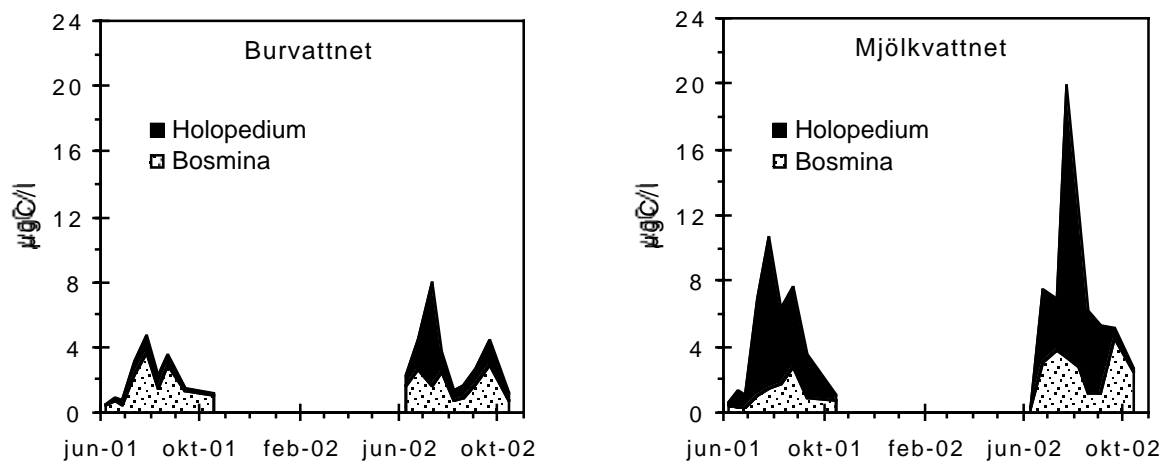
Omättade fettsyror är viktiga för att uppehålla membranstruktur och för framställning av hormoner inblandade i gonadutveckling och reproduktion. Den grupp som tycks ha störst potential att begränsa planktonlevande kräftdjur är  $\omega$ 3-fettsyrorna. Brist på EPA (eicosapentaensyra acid, 20:5 $\omega$ 3) kan begränsa tillväxten för *Daphnia* då koncentrationen är mindre än 0,8  $\mu\text{g/l}$  (Müller-Navarra 1995). Koncentrationen av EPA i seston i Burvattnet är låg eller mycket låg: 0,3 resp. 0,2  $\mu\text{g/l}$  i Burvattnet i juli och under detektionsgränsen i augusti. I Mjölkvattnet varierar halten mellan 0,3 och 0,5  $\mu\text{g/l}$ . Dessa värdena ligger i underkant av de koncentrationer som uppmätts i mesotrofa sjöar. Den totala mängden fettsyror i seston ökar i Burvattnet, men är nästan oförändrad i Mjölkvattnet (Figur 10). Ökningen av fettsyreinnehållet i seston från Burvattnet utgörs framför allt av mättade fettsyror, medan innehållet av  $\omega$ 3-fettsyror minskar.



Figur 6. Växtplanktonbiomassa i Burvattnet och Mjölkvattnet 2001-2002.

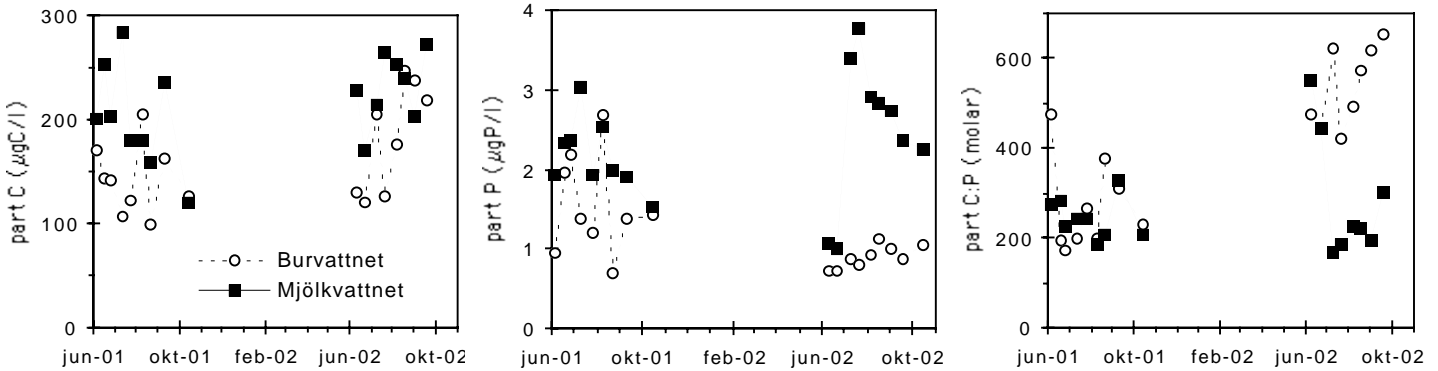


Figur 7. Rotatoriebiomassa i Burvattnet och Mjölkvattnet 2001-2002.

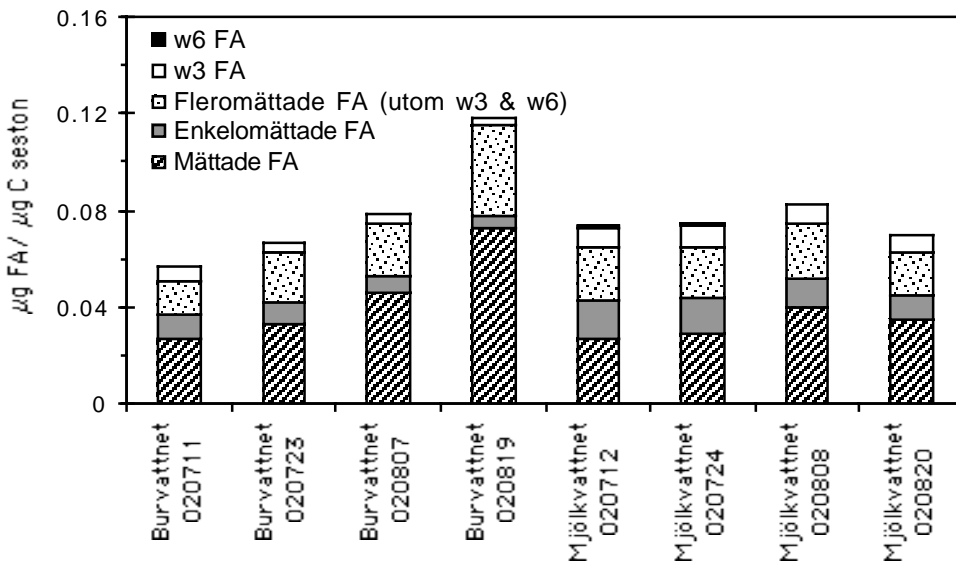


Figur 8. Biomassa av herbivora Cladocerer i Burvattnet och Mjölkvattnet 2001-2002.

Detta är det mönster som är typiskt för alger som utsätts för näringsbegränsning (Ahlgren *et al.* 2000). Det verkar alltså som om algerna i Burvattnet blir mer och mer näringsbegränsade under säsongen. I Mjölkvattnet är fettsyreinnehållet mer stabilt och halterna av  $\omega$ 3-fettsyror är högre än i Burvattnet, vilket kan bero på att näringsbegränsningen inte är så hård där. Chrysophycéer och Cryptophycéer, vilka dominerar växtplanktonsamhället, är i regel rika på essentiella fettsyror och således av hög kvalitet. Sammantaget indikerar resultaten att  $\omega$ 3-fettsyror har en potential att begränsa djurplanktonproduktionen i båda sjöarna, och i synnerhet i Burvattnet. Näringsstillsatsen i Mjölkvattnet tycks leda till en förbättring i födokvaliteten med avseende på fettsyrasammansättning.



Figur 9. Partikulärt kol (C), fosfor (P) och C:P-kvot i seston från Burvattnet och Mjölkvattnet 2001-2002.



Figur 10. Koncentrationer av olika grupper av fettsyror per  $\mu$ g kol i seston från Burvattnet och Mjölkvattnet under juli-augusti 2002.

### Bottenfauna

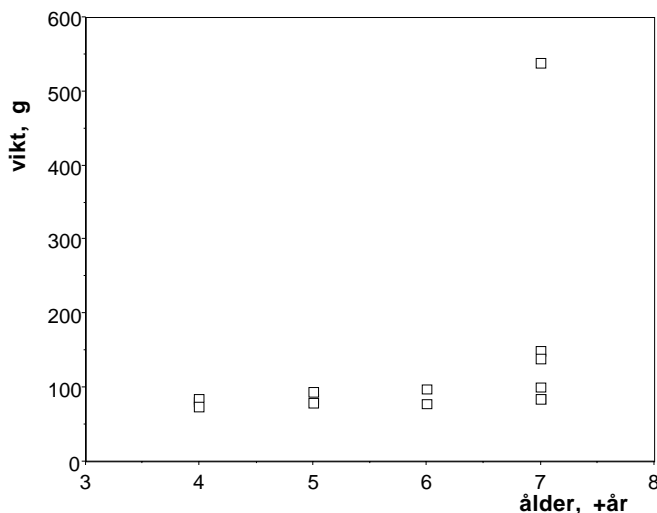
Standardiserade (enligt SNV:s anvisningar) bottenfaunaprovtagningar utfördes i båda sjöarna i augusti 2001 – c:a 50 bottenhugg proportionellt fördelade inom de olika djupzonerna i vardera sjön (stationerna randomiserade inom varje djupzon). I vardera sjön togs också en serie bottenhugg utefter en vald profil utlagd från ett större inflöde ut mot ackumulationsbottnar på c:a 30 meters djup (valda djup 10, 20 och 30m). Proverna avslöjade mycket låga abundanser av exempelvis fjädermygglarver och oligochaeter på alla djup - djurgrupper som normalt dominerar i naturliga sjöar inom regionen. På grundval av

erfarenheter från tidigare projekt av den här typen är det också dessa grupper som svarar mest kraftfullt vid näringsanrikning (Milbrink & Holmgren, 1999). Svidknottslarver, som var de största insektslarver som kunde identifieras före konservering, har frusits in för stabil isotop-analys. Avsikten är att samma provtagningar skall kunna upprepas efter minst två års näringsanrikning.

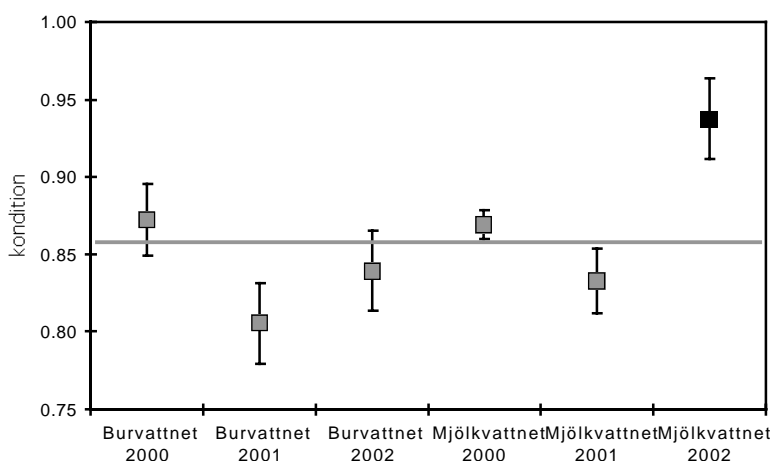
### Fisk

Under alla tre åren har standardiserade höstprovfisken utförts i båda sjöarna med Fiskeriverkets metodik. Varje fiske har omfattat 64 nätnätter per sjö. Dessutom utfördes i augusti 2001 i Stora Mjölkvattnet pelagiska provfisken för att ge en uppfattning om dels de pelagiska fiskpopulationernas storlek och dels hur täta fiskpopulationerna är över huvud taget i sjön. Samtidigt med det pelagiska fisket utförde doc. Sture Hansson (Stockholms univ.) en s.k. ekointegrering av fiskbestånden med ett ekolod med brett sökspektrum som annars mest använts för pelagiska fiskbestånd i Östersjön.

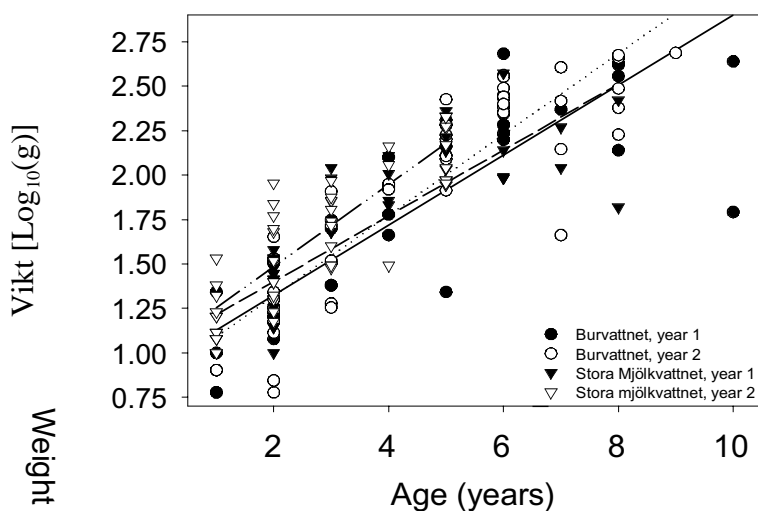
De årliga provfiskena visar att småvuxen röding (medelvikt ca 100 g) och något grövre men fåtalig öring (medelvikt ca 220 g) dominerar i båda sjöarna. Pelagiskt fiske kombinerat med ekointegrering utförda 2001 i Stora Mjölkvattnet visade på dels mycket låg fisktäthet och dels s.k. svältörding med åldersklassuppflyttning, vilket indikerar svår brist på födoorganismer (Figur 11). Konditionen (Fulton-koefficienten; vikten dividerad med längden i kubik) hos röding skiljer sig inte mellan sjöarna under åren 2000 och 2001, men ökar kraftigt i Stora Mjölkvattnet 2002 som en följd av näringstillsatsen (Figur 12). Det är notabelt att denna ökning i kondition uppmättes endast 7 veckor efter första näringstillsats.



Figur 11. Ålder-vikt-relationer hos röding fångade i pelagiskt fiske i Mjölkvattnet i augusti 2001. Svältförhållanden har lett till att pelagisk röding stannar i växten och även uppnår lekmognad vid en vikt av endast omkring 90 g



Figur 12. Kondition (Fulton-koefficienten; vikten dividerad med längden i kubik) hos röding i Mjölkvattnet och Burvattnet åren 2000 till 2002. Punkterna och felstaplarna visar medelvärde och 95% konfidensintervall. Den gråa linjen visar stormedelvärde för alla provfisken. Näring tillsattes i Mjölkvattnet 2002 och provfisket utfördes 7 veckor efter första näringstillsats. Konditionen var 12% högre i Mjölkvattnet 2002 än i Burvattnet 2002 (envägs ANOVA, Tukey post hoc test,  $P < 0,0001$ ).



Figur 13. Vikter (log-transformerade) hos likåldriga rödingar fångade i höstprovfiskena i båda sjöarna 2001 respektive 2002. Alla storleksklasser var signifikant tyngre i det näringsanrikade Mjölkvattnet 2002, d.v.s. tillväxtkurvan ligger då på en klart högre nivå (co-variansanalys,  $p < 0,001$ ). Regressionslinjernas lutning skiljer sig däremot inte åt.

En ytterligare bekräftelse på rödingarnas avsevärt förbättrade kondition illustreras av regressionslinjerna i Fig. 13 där de enskilda rödingarnas vikter ställs mot åldern. Den övre linjen återspeglar den förbättrade tillväxten hos röding i Mjölkvattnet efter näringstillsetningen 2002.

En intressant observation som gjorts beträffande vilka rödingar i Mjölkvattnet som efter näringstillsetningen nått de högsta konditionsvärdena är att hanarna i många fall är konditionsstarkast. Av de 11 rödingar i längdintervallet 175 - 375 mm som könsbestämts och som nått konditionsvärden över 1,05 var 7 hanar. Höstprovfiskena görs normalt nära in på leken och det vore kanske logiskt att tänka sig att honorna med sina välfyllda romsäckar lättare skulle utnyttja ett näringsöverskott. Snarare tyder resultaten på att alla fiskar oavsett kön utnyttjar den förbättrade födosituationen till somatisk tillväxt.

Analys av maginnehåll hos fisk från båda sjöarna 2002 (hittills 25 magar analyserade från vardera sjön) visar att många rödingmagar från Mjölkvattnet var helt fyllda av främst den relativt storvuxna rovdafnian *Bythotrephes longimanus*, men också *Holopedium gibberum* och *Eurycercus lamellatus* var viktiga födoobjekt. Ett flertal magar innehöll vardera 1.000 – 5.000 individer av förstnämnda arten, vilket tyder på en exceptionellt hög täthet i sjön. Ett begränsat antal öringmagar som hittills analyserats visar att större öringar huvudsakligen är piscivora, d.v.s de har ätit smårödingar. Enstaka mindre öringar har innehållit upp till 4.000 individer av en annan större rovdafnia – *Polyphemus pediculus* - som sensommaren 2002 blev ytterst vanligt förekommande i litoralen i Mjölkvattnet. Fyllnadsgraden var betydligt lägre i rödingmagar från Burvattnet, och *B. longimanus* saknades nästan fullständigt. Det vanligaste födoobjektet var istället *E. lamellatus*.

## FORSKNINGSINFORMATION OCH ÖVRIGA AKTIVITETER

### Vetenskapliga presentationer på internationella kongresser, seminarier, projektarbeten, mm

- Göran Milbrink & Staffan Holmgren. *Restoration of impounded lakes: optimization of fish and plankton production through balanced nutrient enrichment*. Muntlig presentation på den internationella konferensen "Restoring Nutrients to Salmonid Ecosystems" i Oregon, U.S.A. i april 2001.
- Tobias Vrede, Jonas Persson, Sebastian Sobek, Peter Blomqvist, Mats Jansson, & Lars Tranvik. *Response of plankton to nutrient enrichment*. Muntlig presentation på ASLO-konferensen, Victoria, Canada, juni 2002.
- Persson, Jonas, Tobias Vrede & Peter Blomqvist. *Fatty acid composition of seston in enriched mesocosms*. Poster presenterad på ASLO-konferensen, Victoria, Canada, juni 2002.
- Tobias Vrede. *P and Fe limitation of phytoplankton in an alpine reservoir*. Seminarium på Inst. för Miljöanalys, SLU, Uppsala, november 2002.

- Tobias Vrede. *Restoration of pelagic food webs in oligotrophicated reservoirs – a whole lake fertilization experiment*. Seminarium på Avdelningen för Limnologi, Lunds universitet, november 2002.
- Emil Rydin. Projektarbete i akvatisk ekologi, civilingenjörsprogrammet för Miljö- och Vattenteknik: Näringsstillsats till regleringsmagasin –hur mycket röding blir det? Lena Andersson & Märten Berglund. HT 02.Handledare: Emil Rydin.

#### Information till finansiärer/intressenter

- Seminarium med programrådet och projektföreträdare, Stockholm, oktober 2000.
- Elforskdagarna, Stockholm, oktober 2000.
- Seminarium med Programrådet och projektföreträdare, Älvkarleby november 2001.
- Jämtkraft AB och Regleringsföretagen, Östersund, oktober 2001.

#### Populärvetenskapliga presentationer:

- Offerdals Kommun (fiskevattensägare, kommunledning, övr. intresserade), augusti 2000, oktober 2001 och oktober 2002.
- Energitinget, Eskilstuna i mars 2001.
- Länsstyrelsen i Jämtlands Län samt Landshövdingen, maj 2001.
- Offerdals Kommun (fiskevattensägare, kommunledning, övr. intresserade), oktober 2001.
- Näringsutarmning av sjöar och vattendrag – ett nytt miljöhot. Installationsföreläsning av G. Milbrink till professur i zoökologi vid Uppsala Universitet, 15 oktober 2001.
- Gödning av reglerade sjöar – rädda rödingen eller slänga pengarna i sjön? Föreläsning av T. Vrede på öppet hus på Evolutionsbiologiskt centrum, Uppsala universitet, 7 april 2002.

#### Studiebesök

- På inbjudan av Fisheries Canada, studiebesök vid bl.a. Alouette Reservoir (Vancouver), Arrow Lakes, Kootenay och Ravelstoke Reservoirs (Interior British Columbia), april-maj 2001 (G. Milbrink och S. Holmgren).

### **REFERENSER**

- Ahlgren, G, P. Hyenstrand, T. Vrede, E. Karlsson & S. Zetterberg. (2000) Nutritional quality of *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae) grown in different nitrogen regimes and tested on *Daphnia*. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27: 1-5.
- Milbrink, G. & Holmgren, S. 1999. Nutrient enrichment of a regulated lake in Sweden to restore salmonid fish populations and biodiversity. In: Stockner & Milbrink (Eds.). Proceedings of the International Workshop on the "Restoration of Fisheries by Enrichment of Aquatic Ecosystems", Uppsala March, 30 – April, 1998, 117-136.
- Müller-Navarra, D.C. (1995) Evidence that highly unsaturated fatty acids limits *Daphnia* growth in nature. *Archiv für hydrobiologie* **132**: 297-307.
- Stockner, J.G., Rydin, E. & Hyenstrand, P. 2000. Cultural oligotrophication: causes and consequences for fisheries resources. *Am. Fish. Soc.* 25. 7-14.
- Stockner, J.G. (Ed.) 2003. Restoring nutrients to salmonid ecosystems. *Am. Fish. Soc. Proc.* Vol., 336 pp.
- Straskraba, M., Dostalkova, I., Hejzlar, J., Vyhnalek, V. 1995. The effect of reservoirs on phosphorus concentration. *Int. Rev. Gesamt. Hydrobiol.* 80(3): 403-413.