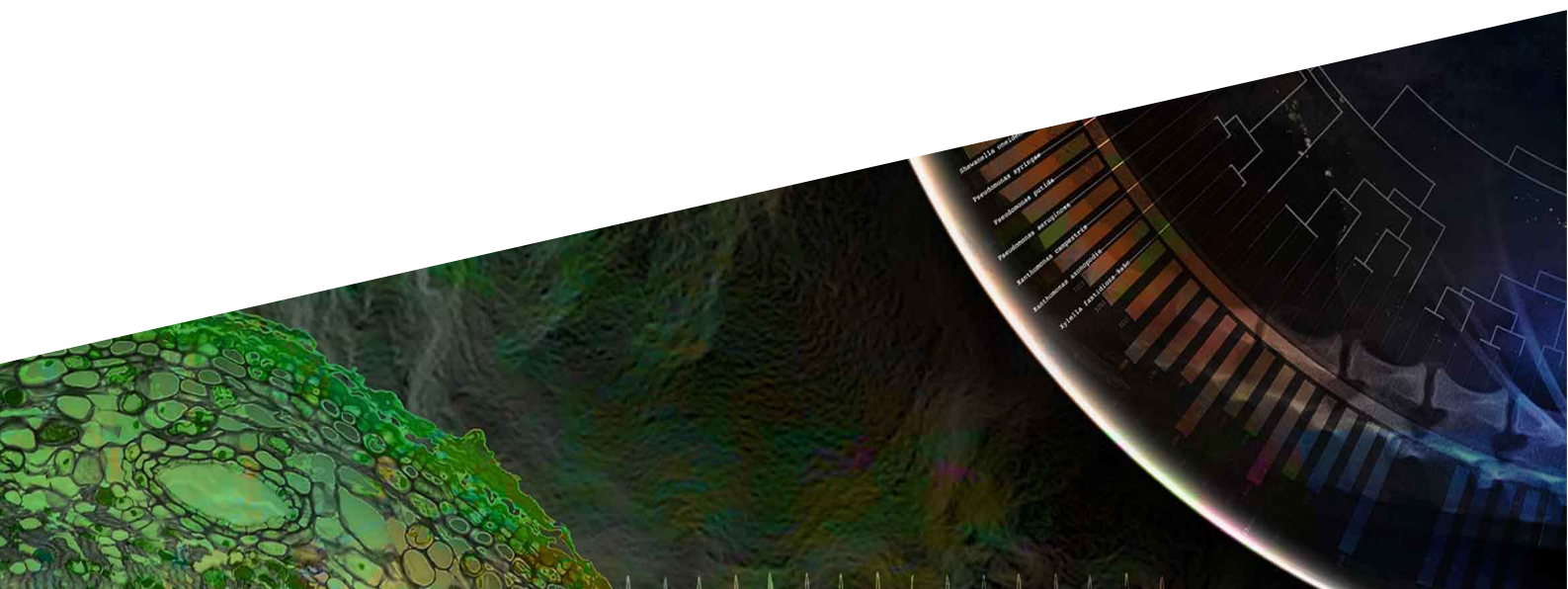




Förväntade effekter på bentisk primärproduktion och fiskbiomassa av en tröskeldamm i reglermagasinet Grundsjön

Karin A. Nilsson, Jenny Ask, Erik Geibrink och Pär Byström

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för vilt, fisk och miljö
Rapport 2023:2
2023



Förväntade effekter på bentisk primärproduktion och fiskbiomassa av en tröskeldamm i reglingsmagasinet Grundsjön

Karin A. Nilsson, <https://orcid.org/0000-0002-2678-9324>, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Vilt Fisk och Miljö.

Jenny Ask, <https://orcid.org/0000-0003-2156-4908>, Umeå Universitet, Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap och Umeå Marina Forskningscenter.

Erik Geibrink, Umeå Universitet, Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap.

Pär Byström, <https://orcid.org/0000-0001-7311-0989>, Umeå Universitet, Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap.

Utgivare:	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö
Utgivningsår:	2023
Utgivningsort:	Umeå
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel:	Rapport (Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vilt, fisk och miljö)
Delnummer i serien:	2023:2
DOI:	https://doi.org/10.54612/a.5obrci77ul
Nyckelord:	vattenkraft, regleringsmagasin, reglermagasin, fisk, primärproduktion, bentiskt habitat

Sammanfattning

Reglering av sjöar för vattenkraftproduktion innebär ofta att stora delar av sjöns bottenyta torrläggas när vattenståndet är lågt, med negativa konsekvenser för sjöarnas födovävar. I Grundsjön (Härjedalen), överväger Fortum att anlägga en tröskeldamm för att förhindra torrläggningen av ett grundområde i sjön, med syfte att minska regleringens påverkan på sjöekosystemet. En stabilare miljö utan torrläggning möjliggör över tid en ackumulering av bottensediment och därmed en nyetablering av bottenlevande (bentiska) alger, insektslarver och kräftdjur vilket i sin tur sannolikt får positiva effekter på födotillgången för fisk. I denna rapport sammanfattar vi kunskapsläget gällande fisk- och primärproduktion i klarvattensjöar, och utifrån befintlig kunskap beräknar vi hur framförallt bentisk primärproduktion och fiskbiomassa förväntas påverkas av anläggandet av en tröskeldamm i Grundsjön. Vi har utgått från två alternativa tröskellägen i Grundsjön, där våra uppskattningar ger ca 20 gånger högre bentisk primärproduktion på den annars temporärt torrlagda bottenytan i det ena området, och ca 5 gånger högre i det andra området, jämfört med nuvarande situation. Samma ökning uppskattas för fiskbiomassa eftersom våra beräkningar visar att fiskbiomassa ökar proportionerligt med bentisk primärproduktion.

Nyckelord: vattenkraft, regleringsmagasin, reglermagasin, fiskbiomassa, primärproduktion, bentiskt habitat

Abstract

Scheduled water level changes in lakes regulated for hydropower production often exposes large parts of the lake bottom to air. Lake sediments are then left to dry out, having negative consequences for lake food webs. In Grundsjön (Härjedalen, Sweden), Fortum are now considering building a threshold dam to prevent an area in the lake from drying up, with the aim of reducing the environmental impact of hydropower on the lake ecosystem. A more stable environment, without drying, enables sediment to accumulate over time and bottom-dwelling (benthic) algae, insect larvae and crustaceans to establish. Increased production of benthic organisms should have positive effects on the food supply for fish. In this report, we give a brief summary of the state of knowledge regarding fish and primary production in clear water lakes. Based on existing knowledge, we also estimate how fish and specifically benthic primary production can be affected by the construction of two different threshold dams in Grundsjön. Our estimates suggest there could be ~20 times as much benthic primary production in one dam and about 5 times as much in the other dam, compared to the current situation (no threshold dams). We expect the same increase in fish biomass since our calculations show a proportional increase in fish biomass following an increase in benthic primary production.

Keywords: hydropower, reservoirs, fish, primary production, benthic habitat

Innehållsförteckning

1. Introduktion	7
1.1 Syfte med rapporten och projektet i sin helhet	7
1.2 Fjällsjöars funktion och ekologi	7
1.3 Från sjö till reglermagasin	10
2. Grundsjön och tröskellägen	12
2.1 Sjöbeskrivning.....	12
2.2 Ljusbmätningar och vattenprover från Grundsjön.....	13
2.3 Tröskellägen.....	15
2.4 Morfometri-beräkning för hela Grundsjön	17
3. Beräkning av primärproduktion	18
3.1 Övergripande beskrivning	18
3.2 Detaljerad beskrivning av metoden.....	18
3.3 Resultat av beräkning av algproduktion på botten.....	20
3.4 Uträkning av fiskbiomassa	22
4. Diskussion	24
4.1 Ekologiska konsekvenser av anläggandet.....	24
4.2 Uträkning av fiskbiomassa och lekbottnar/uppväxthabitat.....	24
4.3 Konsekvenser av höjden på tröskeln	25
Referenser.....	28
Bilaga A. Vatten- och sedimentprover	31
Bilaga B. Detaljer beräkningar bentisk produktion	33

Introduktion

1.1 Syfte med rapporten och projektet i sin helhet

Grundsjöns vattennivå genomgår betydande amplitudförändringar under en årscykel som en konsekvens av reglering av vattenståndet för vattenkraftproduktion. Detta medför att stora delar av sjöns bottenyta torrläggs när vattenståndet är lågt. AFRY (tidigare EKOM) har översiktligt beskrivit förutsättningarna för att anlägga en tröskeldamm som förhindrar en torrläggning av ett grundare område i sjön, i syfte att minska regleringens miljöpåverkan (Lundström 2020). En stabilare miljö utan torrläggning möjliggör över tid en ackumulering av sediment på vattentäckta ytor och syftet med tröskeldammen är att förhindra erosion av bottensediment och torrläggning av bottenytan så att bottenlevande alger, insektslarver och kräftdjur ska etablera sig. Mjuka sedimentbottnar är viktiga habitat för bottenlevande alger som bidrar till en stor del av den totala primärproduktionen framförallt i klarvattenssjöar. En ökad produktion av bottenlevande alger förväntas gynna fisk som livnär sig på insektslarver och kräftdjur.

Syftet med denna rapport är att ge en kort sammanfattning av kunskapsläget gällande fisk- och primärproduktion i klarvattenssjöar och utifrån befintlig kunskap beräkna bidraget till sjöns primärproduktion och fiskbiomassa som anläggande av en tröskeldamm i Grundsjön kan medföra.

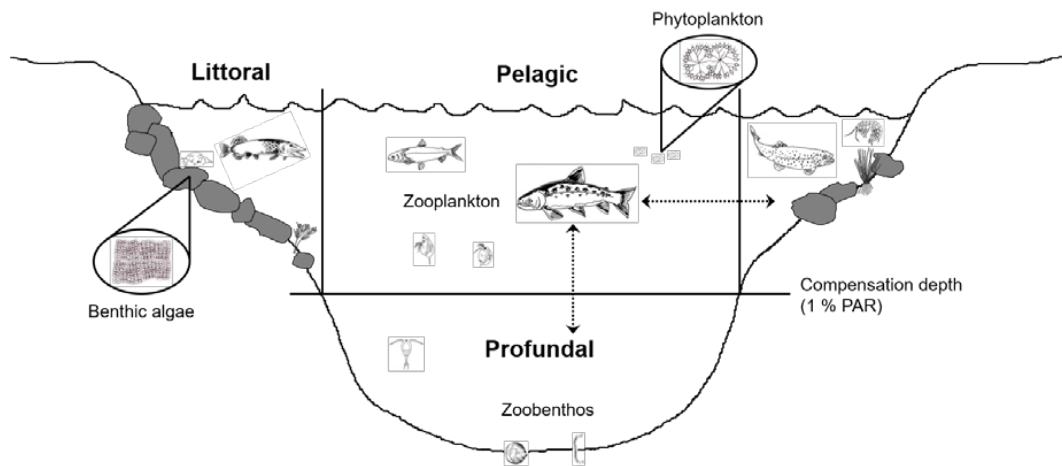
1.2 Fjällsjöars funktion och ekologi

I klara, grunda (< 15 m) till medeldjupa (< 30 m) sjöar i anslutning till de svenska fjällen domineras ofta primärproducenterna (d.v.s. basen i födoväven) av bottenlevande alger. Dessa bottenlevande alger utgör även den huvudsakliga basresursen för fisk via deras konsumtion av bottenlevande djur så som kräftdjur och insektslarver.

Primärproduktion i sjöar är den process där alger, och vattenlevande växter, använder ljusenergi för att omvandla vatten och koldioxid till biomassa. Förutom ljusenergi och koldioxid behövs också näringsämnen såsom kväve och fosfor.

Alger återfinns antingen som frilevande i den öppna vattenmassan (pelagiska) eller växande på olika typer av bottensubstrat (bentiska) (figur 1). De olika bottensubstraten innehåller olika mycket näringsämnen och högst näringshalt återfinns oftast i mjuka sedimentbottnar där näring har ackumulerats över tid, bl.a. genom sedimentation av pelagiska organismer, och tillgängligheten av näring kan vara mer än 10 gånger högre än den i fria vattenmassan (Enell och Löfgren 1988). Andra bottensubstrat så som sand, grus, sten eller nedfallna träd innehåller betydligt lägre näringshalter, eller ingen näring alls, och alger som växer på dessa bottensubstrat använder istället näringen som finns i vattenmassan. Primärproduktion sker alltså både i den fria vattenmassan (pelagialt) och på botten (bentiskt) i sjöar (figur 1). Relationen mellan produktionen i dessa habitat bestäms främst av hur sjön ser ut, d.v.s. dess morfometri (djupförhållanden och strandlinjekomplexitet), vilken typ av bottensubstrat som dominerar, samt ljusförhållanden i vattnet.

Ljustillgången i sjöar är till stor del beroende av vattenfärg och partiklar i vattnet (klart eller grumligt vatten), där övergödning (Vadeboncoeur et al. 2003), inflöde av brunfärgat humusrikt vatten (Ask et al. 2009b), samt en hög andel partiklar i vattnet är sådant som minskar ljustillgången. Detta bestämmer i sin tur på vilket djup det fortfarande finns tillräckligt med ljusinstrålning för att fotosyntesen hos primärproducenter i både det bentiska och det pelagiska habitatet ska fungera (figur 1 "Compensation depth").

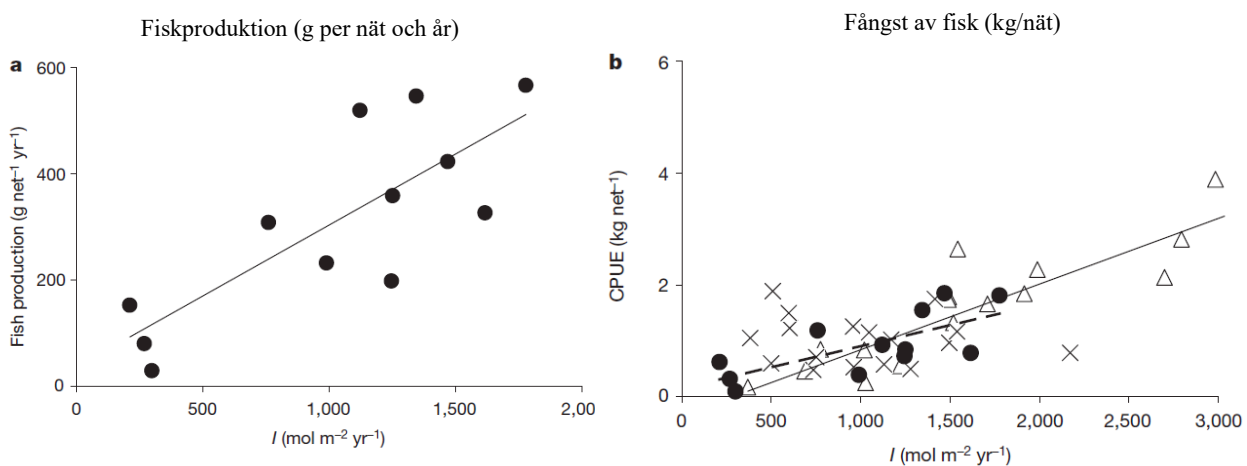


Figur 1. Skiss över en sjö och dess olika delar; grunda och strandnära områden (Littoral) med bentiska alger (Benthic algae) och bottendjur, och den fria vattenmassan (Pelagic) med växt- och djurplankton (Phytoplankton and Zooplankton), och det djupa området (Profundal) med bottenlevande djur (Zoobenthos). Bild från Eloranta 2013.

Fjällsjöar karakteriseras ofta av ett lågt näringsinnehåll i vattenmassan och har därför ofta klart vatten med stort siktdjup som gör att ljuset kan nå stora delar av sjöbotten. Tillgången på ljus är gynnsam för alla alger, men för att alger ska kunna

utnyttja ljuset till fullo krävs även en god tillgång på näringsämnen. I klara och relativt grunda till medeldjupa fjällsjöar är primärproduktion av bottenlevande alger på mjuka bottenbotten ofta betydligt högre än pelagisk primärproduktion (Björk-Ramberg 1983, Hansson 1992, Puts et al. 2022, Vadeboncoeur et al. 2002, Vadeboncoeur et al. 2003, Welch och Kalff 1974). Som exempel har det visats att ca. 80% av den totala primärproduktionen i fyra grunda, klara fjällsjöar kring Abisko utgörs av bentisk primärproduktion, där de mest produktiva djupen är mellan 1- 4m (Ask et al. 2009a). I många sjöar har dock den översta metern en lägre produktion på grund av mer stenigt bottenbotten, ljusinhiering (alltså att ljusstillgången nästan blir för hög) samt att det ligger i den sk. skvalpzonen. Anledningen till den höga andelen bentisk primärproduktion i framförallt klarvattenssjöar är att primärproduktion av alger i vattenmassan i fjällsjöar ofta är näringsbegränsad p.g.a. den låga näringshalten i vattnet, medan de bottenlevande algerna har tillgång till näringsämnen som finns lagrad i bottenbotten (Jansson 1980, Bonilla et al. 2005).

Den höga produktionen av bottenlevande (bentiska) alger överförs också effektivt upp till fisk högre upp i näringskedjan via de bottenlevande insektslarver och kräftdjur som lever på de bentiska algerna (Hecky och Hesslein 1995, Karlsson och Byström 2005). Många fiskarter i fjällsjöar livnar sig därför till stor del på bottenlevande djur då dessa både är större och deras produktion är högre än den för små pelagiska djurplankton. Exempelvis har det visat sig i en studie att röding kan erhålla ändå upp till 94 % av sitt energibehov och sin tillväxt från att äta bottenlevande djur (Karlsson och Byström 2005). Den väldigt starka kopplingen mellan det bentiska habitatets produktivitet och fisk i fjällsjöar möjliggörs alltså av hög näringsstillgång i sedimentet för bentiska alger och det gynnsamma ljusmiljö, man kan säga att fiskproduktionen i relativt grunda fjällsjöar är ljusberoende (figur 2).



Figur 2. Fiskproduktion (a) och fångst av fisk (b) som en funktion av ljusmiljö i sjöar i norra Sverige (från Karlsson et al. 2009).

Större och därmed oftast djupa sjöar har däremot ett ekosystem som främst är beroende av primärproduktion i den fria vattenmassan och domineras därför av pelagiska organismer som djurplankton och planktonätande fisk. Samtidigt används bentiska resurser oproportionerligt mycket i relation till deras tillgång i stora sjöar (Hampton et al. 2011). Den pelagiska primärproduktionen är direkt beroende av närsaltstillgången i vattnet och eftersom fjällsjöar generellt har låga koncentrationer av närsalter i vattnet leder det till en relativt lägre produktion av fisk i djupa sjöar, då stora delar av bottenarna inte nås av ljus även i klara sjöar (Norman et al. 2022).

Sammanfattningsvis kan man säga att sjöars ljusklimat, djupförhållanden och utseende (morfometri) bestämmer viktiga ekosystemprocesser - som näringskretslopp och habitatspecifik och total primärproduktion. Detta kan i sin tur påverka artsammansättning, täthetsförhållanden mellan arter i födoväven och fiskproduktion (Hayden et al. 2017, 2019, Karlsson et al 2009, Norman et al 2022). Eftersom ljusstillgång och morfometri (djupförhållanden och strandlinjekomplexitet) är av så stor betydelse för sjöars ekosystem är dessa variabler viktiga att ta hänsyn till vid förvaltning och åtgärdsförslag för att minska effekter av vattenreglering på fiskebestånd.

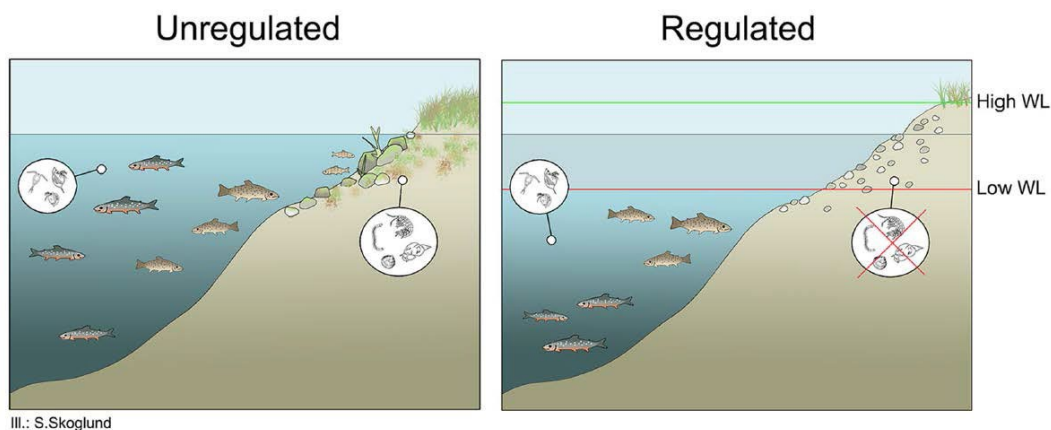
1.3 Från sjö till reglermagasin

I Sverige är många av sjöarna i de större utbyggda älvarna i Norrland reglerade av dammar för att lagra vatten som används för vattenkraftproduktion. På grund av sin förmåga att lagra stora mängder vatten är dessa reglerade sjöar, s.k. reglermagasin, centrala för att balansera elproduktionen för både industriella och samhällsliga elbehov på årsbasis. De flesta av reglermagasinen är från början naturliga sjöar, där förutsättningarna för den naturliga födoväven och ekosystemet förändrats kraftigt i samband med byggandet av en regleringsdamm. Den uppenbara effekten av dammbyggnaderna i reglermagasinen är en förändring från naturliga ofta små vattenståndsfluktuationer till säsongsmässigt onaturliga reglerade och stora fluktuationer i vattenstånd. Dessa onaturliga vattenståndsfluktuationer orsakar i sin tur förändringar i exempelvis vattentemperatur, istäcke, erosion, och omfördelning av näringsämnen, vilket i sin tur kraftigt påverkar levnadsvillkoren för organismerna i födoväven (Brodtkorb 2000, Hirsch et al. 2017, Millbrink et al 2011, Eloranta et al. 2018).

De nuvarande miljötillstånden för magasin drift omfattar framförallt begränsningar i lägsta och högsta vattenstånd utan hänsyn till hur snabbt eller hur ofta vattenståndet fluktuerar inom de givna gränserna. I de flesta fall fylls de större reservoarerna upp under vårfloden och sommaren till det högsta tillåtna vattenståndet för att sedan under vintertid, när energibehovet är som störst,

kontinuerligt tappas på vatten till vattenkraftverken nedströms, för att i de flesta fall nå den lägsta tillåtna vattennivån någon gång före vårfloden.

Vattenmagasinens yta, djup, bottenprofil och strandlinjekomplexitet bestäms till stor del av deras läge (t.ex. latitud och höjd) och geologi. Geologin påverkar också reglermagasinens vattenkvalité och känsligheten för mekanisk påverkan av vattenregleringen. Vattenmagasin omgivna av och/eller bildade på löst substrat är känsligare för regleringsinducerade förändringar på grund av erosion i vattenkvalitet (d.v.s. grumlighet, färg och näringskoncentrationer) än magasin som ligger på kargare berggrund. Dessutom har magasin med stenig botten också bättre lek- och uppväxtområden för olika laxfiskpopulationer än magasin med mjukt och löst bottenstrukt. Lösa grunda bottnar är samtidigt viktiga habitat för produktion av botten djur – likt vi beskrivit ovan för opåverkade system.



Figur 3. Schematisk bild av strandzonen i en oreglerad (tv) och en reglerad sjö (th). Högsta och lägsta vattennivån är markerad (Water Level, WL). Bild av Sigrid Skoglund med teckningar av evertebrater av Pekka Antti-Poika, från Hirsh et al. 2017.

Vattennivåreglering som orsakar infrysning, torrläggning och ökad erosion av det näringsrika grunda botten sedimentet har direkta negativa effekter på den bentiska algproduktionen och de bentiska organismer som lever av den (figur 3). De tydligaste negativa effekterna av en reglering av vattennivån i magasinerna drabbar alltså den mest produktiva livsmiljön i sjöar, d.v.s. de grunda bottnarna.

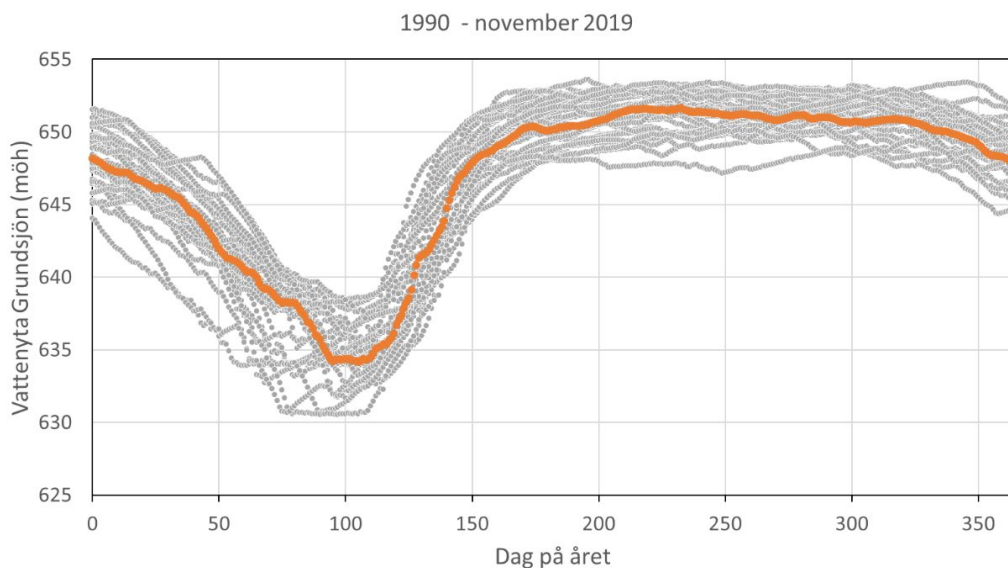
Baserat på de ovan beskrivna negativa effekter av en vattenreglering torde anläggandet av en tröskel i anslutning till exempelvis en vik i ett reglermagasin som förhindrar stora vattenståndsförändringar, torrläggning och erosion i alla fall till viss del kunna återställa den ursprungliga grunda mjukbotten och dess funktion. Detta kan i sin tur förväntats leda till en ökande bentisk algproduktion, mer bottenlevande djur och en ökad fiskbiomassa. I denna rapport gör vi en uppskattning av de förväntade effekterna av byggandet av trösklar i Grundsjön på bentisk algproduktion och deras potentiella bidrag till fiskbiomassa.

Grundsjön och tröskellägen

2.1 Sjöbeskrivning

Grundsjöns area är 2149 ha, dess maxdjup är 26 m och den ligger 653,5 m över havet. Röding, öring, sik, abborre, lake, bergsimpa, elritsa och harr återfinns i sjön. I några bäckar som ansluter till sjön förekommer bäckröding. Det finns också tecken på att rödingen i sjön håller på att minska i antal. Mer information om sjön återfinns i projektrapporten för Grundsjöprojektet 2020.

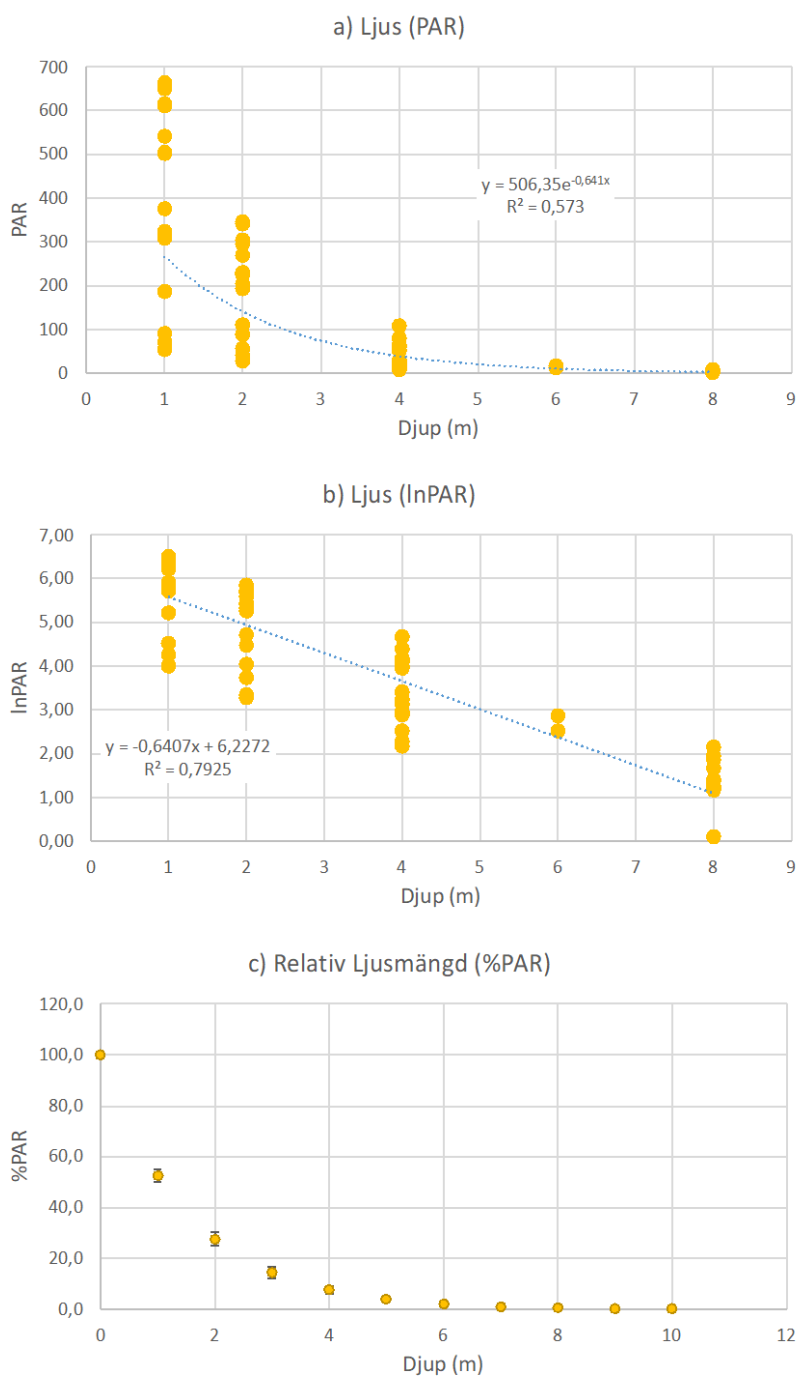
Sjön består av Nedre och Övre Grundsjön och sjöns reglerkraft kommer också ifrån Övre Särvsjön, genom en överledning av vatten via en tunnel från denna sjö. Vattendomen medger att Nedre Grundsjön kan regleras med en amplitud om 23,5 m (Dämningsgräns (DG) +653,5 m – Sänkingsgräns (SG) +630 m). Under åren 1999-2018 har medianvärdet för vattenståndet över året rört sig mellan +651.6 m och +634.2 m (röd linje i figur 4), medan det också funnits en stor variation mellan åren (grå linjer i figur 4). Detta är viktigt att beakta vid en anläggning av en tröskel. Dels för att vattennivån bestämmer under hur stor del av året som vattenytan ligger ovan tröskeln och därmed möjliggör in- och utvandring av fisk till området innanför tröskeln. Det är också viktigt för att vattendjupet påverkar hur mycket ljus som når bottenarna, och följaktligen algproduktion i området innanför tröskeldammarna.



Figur 4. Medianvärdet på vattenståndet i Grundsjön visas för åren 1999-2018 (i orange), medan dagsvärdena för alla olika år visas i grått (1990 -november 2019, data från Fortum). Dag 100 motsvarar 11 april, medan dag 151 motsvarar första juni. Nuvarande förslag på tröskellägen ligger på 650 m och 652 m. En "medelår" skulle alltså vattnet nå upp till det lägre tröskelläget i slutet av juni.

2.2 Ljusbmätningar och vattenprover från Grundsjön

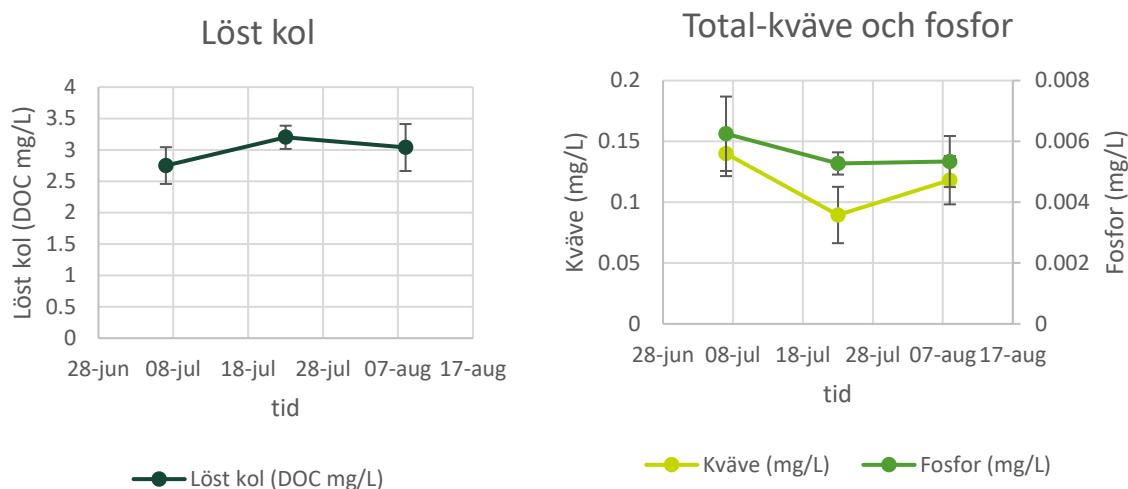
För att skatta den bentiska produktionen har ljusprofiler mätts upp under sommaren 2021 vid 4 stationer och vid 4 tillfällen i Grundsjön. Ljustillgången, PAR (Photosynthetic Active Radiation), mättes vid djupen 1m, 2m, 4m och 8m (figur 5a) med en LI-193 Spherical Quantum Sensor (LI-COR Biosciences). Med hjälp av förhållandet mellan naturliga logaritmen för PAR och djupet (figur 5b) kan ljustillgången beräknas för alla djup. Ljuset minskar alltid exponentiellt med djupet i vatten (figur 5a), men hur stark ljusutsläckningen är, och hur långt ner ljuset når, beror på hur klart vattnet är. För varje station och tillfälle beräknades den relativa ljustillgången (%PAR) vid olika djup genom att dividera ljustillgången vid ett givet djup med ljustillgången vid vattenytan $\times 100$ (figur 5c). Eftersom relativ ljustillgång varierade marginellt över säsongen och mellan stationer (t.ex., %PAR vid 2 m djup: 27.6 ± 2.7 , se figur 5c) så används ett medelvärde av dessa vid beräkningarna för bentisk primärproduktion (se nedan).



Figur 5. Ljusprofiler från Grundsjön sommaren 2021. (a) PAR (Photosynthetic Active Radiation, sv.: Fotosyntetiskt aktiv strålning), (b) lnPAR och (c) medel (± 1 standardavvikelse) för %PAR, dvs relativ ljusstillgång (faktisk ljusstillgång vid ett visst djup delat med ytljus $\times 100$), för alla sommarens mätningar (4 stationer vid 4 tillfällen).

Både löst organiskt kol och näringsämnen påverkar ljusklimatet negativt i sjöar, vilket gör det viktigt att mäta dessa parametrar för att få en uppfattning om ljusklimatet och ljusutsläckning i en sjö. Kol har en direkt negativ inverkan

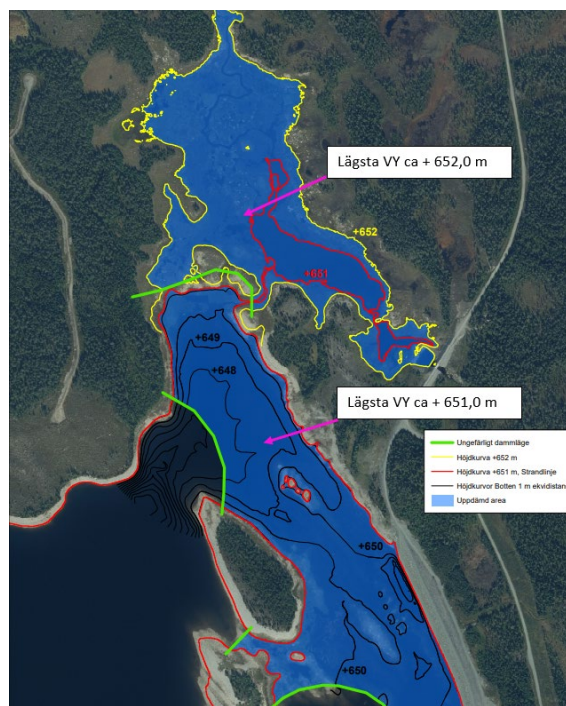
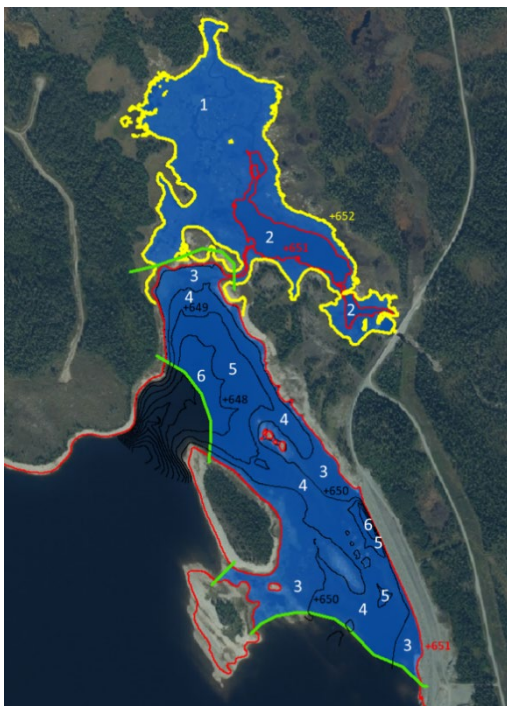
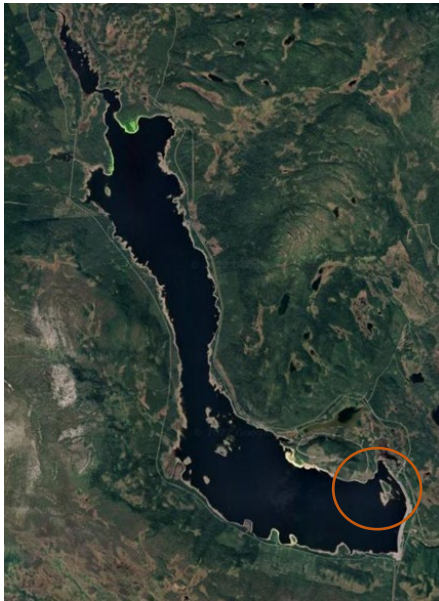
eftersom det ofta är brunfärgat medan näring har en indirekt negativ inverkan eftersom höga halter kan leda till hög produktion av pelagiska alger (algbloomningar). I Grundsjön mättes halterna av löst organiskt kol och näringsämnen fosfor och kväve i vattenmassan genom att ta upp vattenprover från 2m och 4m djup vid 4 stationer med hjälp av en Ruttnerhämtare. Halterna av både löst organiskt kol och näringsämnen är låga i Grundsjön (figur 6) och är även jämförbara med halterna i klara fjällsjöar (tabell A2 i bilaga samt Ask et al. 2009a, Karlsson et al. 2009, Norman et al. 2022).



Figur 6. Resultat av vattenprovtagningar i Grundsjön utförda 2021 med löst kol (Dissolved Organic Carbon, DOC i mg/L), fosfor (mg/L) och totala kvävehalter (mg/L) för tidpunkterna 7 juli, 23 juli och 10 augusti. Medelvärden för de olika mätstationerna (nära Mittån, Anån, centrum och södra delen) och djupen (2 och 4 m) visas med standardavvikelse. Data i sin helhet där man kan se värdena för de olika stationerna återfinns i Bilaga i Tabell A1.

2.3 Tröskellägen

Det föreligger 2 föreslagna tröskellägen (Lundström 2023). Båda ligger i den sydöstra delen av sjön (figur 7). Det övre tröskelläget sätter uppströms lägsta vattennivå till ca +652,0 m (markerat med 1-2 i figur 7 nedan, område A). Den uppkomna ytan beräknas uppgå till ca 164 256 m². Motsvarande för nedre tröskelläget (område B) är ca +651,0 m och beräknas ge en yta av 220 661 m² (markerat 3-6 i figur 7). Totalyta för båda områdena (A+B) är 384 917 m² (ytor uträknade av Per Lundström, AFRY, se även tabell 1) vilket utgör ca 1.8% av Grundsjöns totala sjöyta (område A 0.8% och område B 1%).



Figur 7. Karta över Grundsjön med ungefärligt tröskelläge markerat med en röd cirkel (upp t.v.) samt mer detaljerad kartbild från det området (upp t.h.), i de nedre figurerna är djupzoner markerade för tröskelläge A och B.

Tabell 1. Beräkningar av olika bottenytor för 2 tröskellägen motsvarande figur 7 ovan (från Per Lundström, AFRY). Dessa areaberäkningar ligger till grund för våra uträkningar av primärproduktion.

Uppströms Norra dammen (Tröskelläge A)

Område	Bottennivå [RH2000]	Djup	Area [m]	Area [ha]	Kommentar
1	+651 till +652 m	< 1 m	136529	13.7	Ett sammanhängande område
2	+650 till +651 m	1 - 2 m	27727	2.8	Djupdata saknas i detta område. Lägsta kända nivå på vattenyta ca +650.5 m (LM Höjddata). Djupet är antaget vara som mest 0.5 m under den nivån i detta område. Dvs ung max djup under nivå +651 m antas vara ca 1 m.

Total 1 164256

NS Norra dammen, US Södra dammarna (Tröskelläge B)

Område	Bottennivå [RH2000]	Djup	Area [m]	Area [ha]	Kommentar
3	+650 till +651 m	< 1 m	86176	8.6	Två områden
4	+649 till +650 m	1 - 2 m	83266	8.3	Ett område
5	+648 till +649 m	2 - 3 m	36364	3.6	Tre områden
6	+648	3 - 4 m	14855	1.5	Två områden

Total 2 220661

2.4 Morfometri-beräkning för hela Grundsjön

För att kunna skatta både bentisk och pelagisk primärproduktion behövs skattningar på sjöns (och tröskellägenas) morfometri (djup-area-volym förhållanden). Det saknas djupdata för Grundsjön som helhet, men en grov uppskattning av de grundare (0-10 m) delarnas morfometri har gjorts utifrån satellitbilder som tagits vid låga vattenstånd (Sentinel Playground). Det man kan utläsa från dessa flygbilder är att arean mellan vattenstånd +641 och +651 m (d.v.s. mellan 0 – 10 m) är 730 ha (se tabell B1 i bilaga). Eftersom hela sjöns area (vid vattenstånd +651 m) är 2149 ha blir bottenarean vid 10 m 1419 ha (2149 – 730 = 1419). Vidare antas att botten sluttar linjärt mellan 0 m och 10 m för att kunna uppskatta bottenareor och vattenvolymer. Detta antagande ger en area för varje 1-meters djupintervall på 73 ha samt en total volym mellan 0 – 10 m på 178 400 000 m³.

Beräkning av primärproduktion

3.1 Övergripande beskrivning

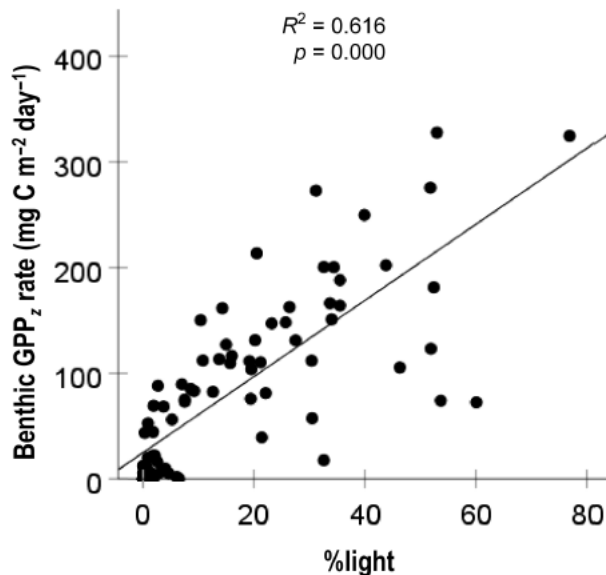
Primärproduktionen beräknas givet Tröskelläge A och B, först för ett tillstånd innan trösklarna anläggs där vattennivån är lägre (d.v.s. nuvarande tillstånd), vilket sedan kontrasteras mot ett tillstånd med trösklar. Den lägre vattennivån är +650 m vilket motsvarar vattenståndet under sommarmånaderna (enligt figur 4). Primärproduktionen beräknas här för mikroalger som växer på mjuka och hårda bottenar eftersom det är den typen av primärproduktion, och då framförallt den på mjuka bottenar, som ofta dominerar i klarvattenssjöar (Ask et al. 2009a, Ask et al. 2009b, Persson et al. 1977). Viktiga parametrar för beräkning av bentisk primärproduktion är ljusstillgång, bottenarea och djup. För dessa grunda områden inkluderar vi alltså inte primärproduktionen av vattenlevande växter eller växtplankton i den fria vattenmassan (pelagisk produktion), då vi räknar med att dessa är försumbara jämfört med den produktion av mikroalger som förväntas ske på bottenarna (Persson et al. 1977). Beräkningarna är baserade på data från Puts et al. (2022) som inkluderar produktionsmätningar och ljusmätningar från klarvattenssjöar.

Vi gör också en separat uppskattning för produktionen i hela sjön, med givna vattennivåer (utifrån medianvärden i figur 4), där vi också inkluderar uppskattningar för den pelagiska produktionen.

3.2 Detaljerad beskrivning av metoden

Som beskrivits tidigare i denna rapport så dominerar primärproduktion av bentiska mikroalger på mjuka sedimentbottenar över andra typer av primärproduktion (pelagisk, på stenbottenar, vattenlevande växter osv) i klara fjällsjöar (Ask et al. 2009a, Persson et al. 1977, Vadeboncoeur et al. 2003, Vadeboncoeur et al. 2006). Vi har därför här fokuserat beräkningarna på bentiska mikroalger som växer på mjuka sedimentbottenar med antagandet att

näringsstillgången inte är begränsande i mjuka sedimentbottnar och därmed att primärproduktionen där istället oftast är ljusbegränsad. Man kan alltså använda ljustillgången vid olika djup för att göra en grov uppskattning av primärproduktionen av bentiska mikroalger på mjuka sedimentbottnar (figur 8 samt Puts et al. 2022) under sommarsäsongen.



Figur 8. Relationen mellan relativ ljustillgång (%PAR, här %light) och bentisk primärproduktion (bentisk GPP) på mjuka sedimentbottnar i 27 olika sjöar, där både fjällsjöar och skogssjöar är inkluderade. Från Puts et al. 2022. Ekvation då interceptet sätts till noll: bentisk GPP = $4.4554 \times \%PAR$.

Med hjälp av förhållandet mellan relativ ljustillgång och bentisk primärproduktion (Bentisk primärproduktion = $4.4554 \times \%PAR$, figur 8) beräknades alltså bentisk primärproduktion för olika djup (tabell B2). Notera att sambandet i figur 8 är baserat på uppmätt bentisk primärproduktion från oreglerade sjöar med stabilt bottensediment, vilket Grundsjön inte har. Den uppskattade bentiska primärproduktionen för hela Grundsjön samt för tillståndet i tröskelläge A och B innan anläggning av trösklarna har därför justerats ner till att motsvarande hälften av den bentiska primärproduktionen för opåverkade mjukbottnar som visas i figur 8 (tabell B2).

I fjällsjöar (och även andra sjöar) består oftast strandkanten av block, sten och grus medan den mjuka, näringsrika sedimentbotten ofta tar över på lite större djup, ungefär vid 1-2m. Dessutom kan ljustillgången nästan vara för hög på väldigt grunda bottnar (ljusinhivering) i klarvattenssjöar. För att inte överskatta den bentiska primärproduktionen på de allra grundaste områdena så antogs därför en lägre bentisk primärproduktion (motsvarande den på sten) ner till 1 m djup (tabell B2). Areorna för olika djupintervall för tröskelläge A respektive B, med och utan

träsklar, räknades ut baserat på sjöns morfometri (djup-area-volym förhållanden, se tabell 1). Den bentiska primärproduktionen i respektive djupintervall beräknades sedan genom att multiplicera respektive area med tillhörande mått på primärproduktion (tabell B3). Därefter summeras produktionen för samtliga djupintervall för att erhålla den totala bentiska produktionen i respektive område (tabell B3). De beräknade produktionsmått gällande för det som får antas vara den mest produktiva säsongen, alltså de varmaste sommarmånaderna (ca juni-augusti, men se tabell 2).

Den pelagiska primärproduktionen i Grundsjön som helhet uppskattades grovt genom att multiplicera ett viktat medelvärde av pelagisk primärproduktion mellan 0 – 10 m (mätt i $\text{mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, taget från en annan klarvattenssjö med jämförbar näringshalt (Almberga, se bilaga B för detaljer) med den totala volymen mellan 0 – 10 m i Grundsjön.

3.3 Resultat av beräkning av algproduktion på botten

Den totala vattentäckta ytan i område A ökar från ca 28 000 m^2 till 164 000 m^2 (83% större), och i område B från 134 000 m^2 till 221 000 m^2 (39% större), om träsklar sätts in för att hålla vattennivån över en viss minimi-nivå. Bentisk primärproduktion (kg kol per dygn) beräknas i nuläget (d.v.s. utan träsklar, samt med en halverad bentisk primärproduktion p.g.a. att nuvarande bottenhabitats funktion som substrat för bentisk alg tillväxt är suboptimal) att uppgå till 0,5 kg C d^{-1} i tröskelläge A och 5,3 kg C d^{-1} i tröskelläge B (tabell 2). Med träsklar beräknas den bentiska primärproduktionen initialt öka till 4,9 kg C d^{-1} i tröskelläge A och till 10,7 kg C d^{-1} i tröskelläge B (alltså större vattenlagd bottenyta än i nuläget, men med halverad bentisk primärproduktion då bottnarna fortfarande är störda).

Vid antagandet att sediment ackumuleras över tid, och då funktionellt kommer att motsvara naturliga mjukbottensediment, beräknas den bentiska primärproduktionen kunna uppgå till 7,3 kg C d^{-1} i tröskelläge A och till 19,8 kg C d^{-1} i tröskelläge B (Tabell 2).

En rimlig uppskattning av Grundsjöns nuvarande totala primärproduktion visar att den pelagiska produktionen är ca. 5 gånger så hög som den bentiska (756,3 kg C d^{-1} jämfört med 144,6 kg C d^{-1}), och att utav den totala primärproduktionen på 901,0 kg C d^{-1} så är ca. 16% bentisk primärproduktion (tabell 2).

Tabell 2. Uppskattning av bentisk och pelagisk primärproduktion (GPP, kg C d⁻¹) i tröskelläge A, tröskelläge B, samt i hela Grundsjön. I hela Grundsjön, samt för uppskattningen utan tröskel i de båda tröskellägena, har en sub-optimal (halverad) bentisk GPP antagits. För uppskattningen med tröskel presenteras den maximala potentiella bentiska GPP som kan antas uppnås då botten stabiliserat sig efter att effekterna av amplitudförändringarna minskat. För tröskelläge A och B anges även den årliga bentiska primärproduktionen där den produktiva säsongen antas vara 70 dagar för tröskellägen utan klack samt 100 dagar för tröskellägen med klack. 100 dagar innefattar då den mest produktiva tiden på året, alltså ca sista veckan i maj till första veckan i september. Tröskellägen utan klack antas ha en något kortare produktiv säsong eftersom de grunda områdena är torrlagda fram till början på juli. Resten av året antas produktionen vara försumbar p.g.a. låga temperaturer och/eller låg ljusstillgång

	Tröskelläge A			Tröskelläge B			Hela Grundsjön		
	Bentisk GPP		Pelagisk GPP	Bentisk GPP		Pelagisk GPP	Bentisk GPP	Pelagisk GPP	Total GPP
	Utan klack	Med klack		Utan klack	Med klack				
kgC/d	0,51	7,26	-	5,31	19,76	-	144,61	756,34	900,95
kgC/år	35,99	725,64		371,65	1975,57				

Om trösklar sätts in kan alltså den dagliga bentiska primärproduktionen bli ca 14 gånger så hög i tröskelläge A och ca 4 gånger så hög i tröskelläge B jämfört med vad produktionen uppskattas till i nuläget (tabell 2). I nuläget utgör den bentiska primärproduktionen i tröskelläge A ca. 0,06 % av den totala primärproduktionen i Grundsjön, och den i tröskelläge B ca. 0,6 %. Om trösklar sätts in skulle det bidraget potentiellt kunna öka till 0,8 % för tröskelläge A och 2,2 % för tröskelläge B.

Notera att vi inte har inkluderat någon påverkan av variation i dagslängd och temperatur i dessa beräkningar. Vid en framtida utveckling av en mer detaljerad beräkningsmodell bör en integrering av förändringar över säsong i ljus, temperatur och amplitud i vattennivå ingå.

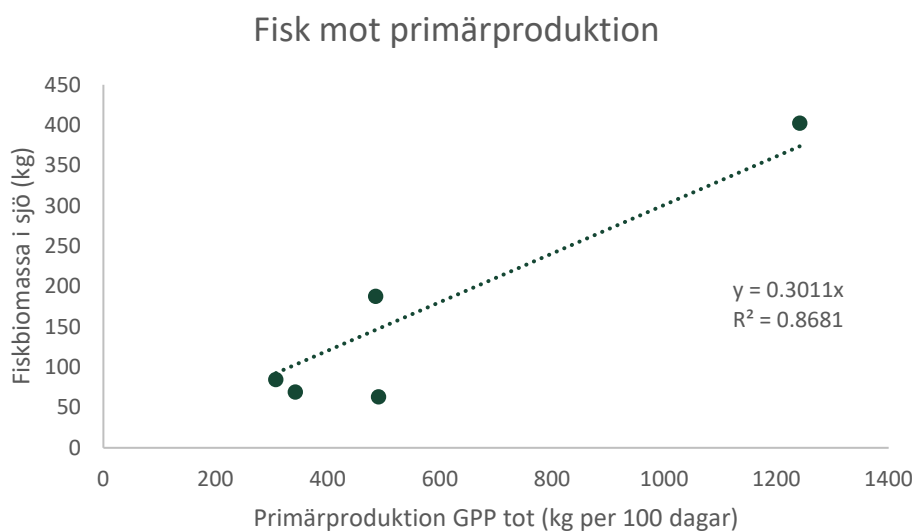
För att på ett mer relevant sätt kunna jämföra de beräknade primärproduktionsmåtten (som anges per dag) med fiskbiomassa så beräknade vi årlig bentisk primärproduktion genom att multiplicera dygnsvärdena i tabell 2 med 100 eller 70 (tabell 2). Dessa dagar innefattar då den mest produktiva tiden på året, alltså ca sista veckan i maj till första veckan i september (100 dagar) om trösklar byggs, samt från början av juli till första veckan i september i nuläget (70 dagar). Resten av tiden antas produktionen vara försumbar p.g.a. låga temperaturer och/eller låg ljusstillgång, även om viss produktion sker både före sista veckan i maj samt efter sista veckan i september. Tack vare potentiellt längre produktiv säsong om trösklar sätts in kan då den årliga bentiska primärproduktionen bli ca 20 gånger så hög i tröskelläge A och ca 5 gånger så hög i tröskelläge B jämfört med vad primärproduktionen uppskattas till i nuläget (tabell 2).

3.4 Uträkning av fiskbiomassa

För att få ett mått på förväntad ökning i fiskbiomassa, så användes tillgängliga förhållanden mellan årlig bentisk primärproduktion och fiskbiomassa från tidigare provtagna fjällsjöar (figur 9). Detta förhållande (figur 9), är baserat på 5 sjöar runt Abiskoområdet i Kiruna kommun (Almberga, Tjabrak, Ruozutjaure, Vuorejaure, Sourra). De 5 sjöar som sambandet i figur 9 baseras på är alla relativt små oreglerade system där röding är ensam fiskart (i.a.f. vid tidpunkten sjöarna provtogs). Vi menar därför att det är svårt att på förhand förutse nivån på förväntad ökning i fiskbiomassa i Grundsjön som en anläggning av en tröskel kan leda till. Nedan redovisas en uppskattning av detta, med förbehållet att denna skattning kommer med stor osäkerhet, samt att det kan diskuteras hur relevant denna uppskattning kan vara för Grundsjön..

Förutsatt att det finns ett välutvecklat djursamhälle på botten, vilket kan ta betydligt längre tid att uppnå jämfört med primärproducenter, så kan potentiellt ca 30 % av den årliga totala bentiska primärproduktionen översättas i fiskbiomassa (figur 9). Detta innebär, förutsatt att länken mellan primärproducenter och fisk (d.v.s. bentiska djur) finns och är tillgängliga, att en tröskel skulle kunna innebära ca 20 gånger så mycket fisk i område A och ca 5 gånger så mycket fisk i område B (proportionerlig mot ökning i primärproduktion).

I detalj ser uträkningen ut som följer; Om vi nu tänker oss att en tröskel i Grundsjön kan leda till en ökning av primärproduktionen för område A från 36 till 726 (tabell 2). Då motsvarar detta en maximalt möjlig ökning i fiskbiomassa från 11 till 219 kg enligt figur 9 (enligt ekvation: fiskbiomassa = $0.3011 \times \text{GPP}$ från figur 9). På samma sätt skulle en ökning av primärproduktionen från 372 till 1976 (tabell 2) i område B leda till en ökning av fiskbiomassa från 112 till 595 kg enligt ekvationen i figur 9.



Figur 9. Fiskbiomassa mot total bentisk primärproduktion, baserat på 5 sjöar från Abiskoområdet Kiruna kommun (Almberga, Tjabrak, Ruozutjaure, Vuorejaure, Sourra; Pär Byström, opublicerat). Notera att punkten längst upp till höger är väldigt betydelsefull för sambandet. Ekvation: biomassa = $0.3011 \times GPP$.

Diskussion

4.1 Ekologiska konsekvenser av anläggandet

Vi har utgått från att en tröskel medför att de nya grunda och vattentäckta bottarna blir mer produktiva, får bentiska påväxtalger, och att bottensubstratet förbättras gradvis till att det slutligen bildas ett mjukbottensediment med en smal remsa med stenigare partier runt stränderna och därmed får egenskaper motsvarande ett naturligt mjukbottensediment som vanligtvis återfinns i fjällsjöar. Utifrån beskrivna antaganden har vi beräknat hur stor en produktionsökning kan bli vid anläggning av projekterade trösklar i Grundsjön. Baserat på sambandet mellan bentisk primärproduktion och fiskbiomasa i fjällsjöar beräknas det kunna ge ungefär 20 gånger så mycket fiskbiomassa i område A och ca 5 gånger så mycket fiskbiomassa i område B.

Det tar givetvis tid att nå ett tillstånd där ekosystemet ovanför tröskeln är fullt fungerande. Vid området för tröskelläge A ser det ut att vara vegetation av våtmarkstyp och det kan innebära att det finns organiskt material som ger goda förutsättningar för att det snabbt bildas en fungerande mjukbotten med bentisk algproduktion.

4.2 Uträkning av fiskbiomassa och lekbottnar/uppväxthabitat

Våra beräkningen baseras på antagandet att det finns en väl fungerande överföring från det som produceras av algerna till fiskbiomassa, alltså att det finns väl fungerande populationer av olika bottendjur (som insekter och kräftdjur) som kan tillgodogöra sig ökningen i algproduktionen och sedan bli fiskföda. Givet att de nya tröskeldammarna kommer att vara skyddade från erosion och stora isrörelser så finns det goda förhoppningar om att områdena kan fungera bra som livsmiljö för bottendjur och att dessa kan öka i antal. Notera dock att området i tröskelläge A kan bli bottenfruset till stor del.

I beräkning av ökningen i fiskbiomassa tas ingen hänsyn till de skillnader som kan finnas mellan Grundsjön och de 5 sjöarna i figur 9 som ligger som grund för skattningarna av bidraget i fiskbiomassa till Grundsjön av trösklarna. Detta betyder att vi antar att fiskart och artsammansättning inte påverkar skattningarna av förväntad ökning i fiskbiomassa, vilket förstås inte är ett helt korrekt antagande. Sjöarna som figur 9 baseras på innehåller endast röding, som till stor utsträckning livnär sig på bentisk föda, medan det finns betydligt fler fiskarter i Grundsjön där vissa i stor utsträckning livnär sig på pelagisk föda.

För närvarande är Grundsjön en sjö där produktionen i den öppna vattenmassan har stor betydelse, vilket är vad man förväntar sig i ett reglermagasin (Millbrink et al 2011, Eloranta et al 2018). Det introducerade kräftdjuret mysis – som livnär sig av denna produktion genom att äta djurplankton - är en viktig del i dieten för både öring och röding i Grundsjön (personlig kommunikation Gunnar Öhlund, SLU). Vi vet inte vilka arter som främst skulle gynnas av en tröskel i Grundsjön, men det är möjligt att nya grundområden med god tillgång på bottenlevande insektslarver och kräftdjur kan komma att bidra till dieten hos bland annat öring och röding. Det finns önskemål om att förbättra situationen för rödingen i sjön, men vi finner ingen anledning till att tro att rödingen skulle gynnas mer än exempelvis sik och abborre av anläggningen av trösklar. Om vi ska spekulera så är det snarare troligt att sik, abborre och elritsa kan vara bättre på att utnyttja nya grundområden än röding. De nyskapade områdena blir sannolikt också mycket bra rekryteringshabitat för t.ex. abborre.

Sänkning av vattennivåer i sjöar kan leda till att lekbottnar torrläggs och till att bäckhabitat kan bli otillgängliga för öringar och andra fiskar som vandrar upp i dessa (Hirsch et al. 2017). Vi har inte undersökt hur viktiga sådana processer är i Grundsjön, men vi kan konstatera att nya grundområden kan utgöra goda yngelhabitat, medan trösklarna i sig kan utgöra vandringshinder.

4.3 Konsekvenser av höjden på tröskeln

En viktig aspekt att ta hänsyn till är konnektiviteten mellan huvudsjön och det nyskapade området på insidan av tröskeln. Optimalt skulle vara att fiskarna kunde röra sig fritt mellan dessa områden framför allt under tillväxtsåsongen och samtidigt ha möjlighet att lämna området under vinterhalvåret. Tröskelns höjd är i detta av en direkt avgörande betydelse då den påverkar fiskarnas möjlighet att vandra in och ut från området innanför tröskeln.

Ett problem som uppstår är om tröskeln anläggs så att vattennivån på insidan tröskeln sätts till +652 m eftersom då kommer det uppdämda området inte att vara tillgänglig under stora delar av året för fisk som vandrar mellan sjön och det nyskapade grundområdet. Om man ser på medianvärdet för vattenståndet under

åren 1999-2018 (figur 4) så når detta knappt upp till den vattennivån. Om nivån sätts till +650 m så är området tillgängligt från augusti under ett år som motsvarar medianvärdet. Notera att vissa år så har vattennivån inte nått upp till +650 m, så det skulle kunna innebära att området är otillgängligt hela året och att eventuella fiskar där är instängda. Gällande område A så kan man också fråga sig om det är en miljö som fungerar tillräckligt bra för övervintring av fisk. Detta måste beaktas noga, dels så att fisken har tillgång till de nyskapade produktiva områdena, och dels så att fisken inte blir fast ovanför tröskeln (om det är ogynnsamt). En möjlighet kan vara att bygga en fisktrappa i tröskeln.

Tröskeldammarna kommer (om de anläggs) att kompletteras med ”utskov” som bestämmer vattnets väg då vattenytorna på respektive sida av tröskeln har olika nivå. Det är troligt att vattennivån i tröskelläge A och B kommer att vara högre också för att de fylls på från bäckarna ovanför. Samtidigt är det troligt att vattnet går åt andra hållet under den del av året när sjön som helhet regleras till en hög nivå. Det är därför lämpligt att överväga hur en fisktrappa i tröskeln skulle kunna se ut. Exempel på det finns exempelvis i Pålsbufjorden i Buskerud där en tröskel anlagts i en reservoar som har en regleringsamplitud på >24 m (vilket kan jämföras med 4 m amplitud ovan tröskeln). Här har man anlagt en konstgjord fiskväg, och man menar att åtgärden skapat en möjlig förbättring för öringbeståndet (Brabrand et al. 2008).

I Norge finns det flera reglermagasin där man har byggt trösklar (Helland et al. 2019). I Innerdalsvatnet i Hedmark har man exempelvis byggt en damm i den inre delen av magasinet, vilket skapade 0,6 km² sjöyta, att jämföra med det totala magasinet på 6,5 km². Åtgärden utfördes främst för att skapa grunda vattenområden för fåglar, men en fiskpassage har också uppförts för fisk (Helland et al. 2019). I Grundsjön skulle område A kunna vara intressant om man vill utföra våtmarksrestaurering och det kan vara värt att undersöka vilka förutsättningar området har som fågelhabitat om projektet fortskrider.

I Innerdalsvatnet har uppföljningar bekräftat god produktion av öring och viktiga bytesobjekt i den opåverkade delen av sjön, och man menar att åtgärden var framgångsrik när det gäller att stärka beståndet av öring (Rognerud och Qvenild 2006). Andra exempel på trösklar i reservoarer inkluderar Limingen (Trøndelag), Kløvtveitvatnet (Sogn og Fjordane) och Vågøyvatn (Nordland) (Helland et al. 2019). Helland och andra (2019) påpekar även att åtgärder som dessa är dyra, att det kan finnas estetiska problem, och att det – som konstaterats ovan – kan hindra att organismer rör sig mellan olika delar av sjön.

En avslutande reflektion: Enligt våra grova beräkningar så kan åtgärden med trösklar resultera i 20 gånger så mycket fisk i område A och ca 5 gånger så mycket fisk i område B. Primärproduktionen i tröskellägena utgör tillsammans ca 3% av

hela sjöns produktion (tabell 2), vilket är en ökning från 0,65% utan trösklar. Detta är ändå en förvånande stor ökning med tanke på de förhållandevis små arealerna som påverkas av trösklarna, men det är ändå rimligt med tanke på att de grunda bottenarna är så högproduktiva.

Referenser

- Ask, J., Karlsson, J., Persson, L., Ask, P., Byström, P., & Jansson, M. (2009a). Whole-lake estimates of carbon flux through algae and bacteria in benthic and pelagic habitats of clear-water lakes. *Ecology*, 90(7), 1923-1932.
- Ask, J., Karlsson, J., Persson, L., Ask, P., Byström, P., & Jansson, M. (2009b). Terrestrial organic matter and light penetration: Effects on bacterial and primary production in lakes. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2034-2040.
- Björk-Ramberg, S. 1983. Production of epipelagic algae before and during fertilization in a subarctic lake. *Holarctic Ecology* 6: 349-355.
- Brabrand, Å., T. Bremnes, S.J. Saltveit, P. Aass, J. Wollebæk, J. Heggenes, K. Røed. (2008). Fiskeribiologiske undersøkelser i Pålbufjorden – Hovedrapport, Laboratorium for ferskvannøkologi og innlandsfiske (LFI). Rapport nr. 260 – 2008.
- Bonilla, S., Villeneuve, V., & Vincent, W. F. (2005). Benthic and planktonic algal communities in a high arctic lake: Pigment structure and contrasting responses to nutrient enrichment. *Journal of Phycology*, 41(6), 1120-1130.
- Brodtkorb, E. (2000). Virkninger av effektregulering på biologiske forhold i vannkraftmagasin og avbøtende tiltak. Statkraft Grøner AS.
- Eloranta, A.P. (2013). The variable position of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* (L.)) in subarctic lake food webs. *Jyväskylä studies in biological and environmental science*.
- Eloranta, A.P., A.G. Finstad, I.P. Helland, O. Ugedal, M. Power. (2018). Hydropower impacts on fish populations are modified by environmental variation. *Science of the Total Environment*, Volume 618, pp. 313-322.
- Enell, M., & Löfgren, S. (1988). Phosphorus in interstitial water: Methods and dynamics. *Hydrobiologia*, 170, 103-132.
- Grundsjöprojektet - Vi värnar Grundsjörodingen (2020), Långå Fiskevårdsområdes Förening, organisationsnummer 89 26 00-2257. Manus och ansvarig utgivare: Helge Jonsson, helge.jonsson@langafisket.se. Tryckt hos: Daus Tryckeri, Östersund år 2020
- Hampton, S. E., Fradkin, S. C., Leavitt, P. R., & Rosenberger, E. E. (2011). Disproportionate importance of nearshore habitat for the food web of a deep oligotrophic lake. *Marine and Freshwater Research*, 62(4), 350-358.
- Hansson, L. A. (1992). Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnology and Oceanography* 37: 322-328.

- Hayden, B., Myllykangas, J.-P., Rolls, R.J. & Kahilainen, K.K. (2017). Climate and productivity shape fish and invertebrate community structure in subarctic lakes. *Freshw. Biol.*, 62, 990–1003.
- Hayden B., Harrod C., Thomas S.M., Eloranta A.P., Myllykangas J.P., Siwertsson A., Præbel K., Knudsen R., Amundsen P.A., Kahilainen K.K. (2019). From clear lakes to murky waters – tracing the functional response of high-latitude lake communities to concurrent ‘greening’ and ‘browning’. *Ecology Letters*. 22. 807-816.
- Hirsch, P. E. A. P. Eloranta, P.A. Amundsen, Å. Brabrand, J. Charmasson, I.P. Helland, M. Power, J. Sánchez-Hernández, O.T. Sandlund, J.F. Sauterleute, S. Skoglund, O. Ugedal, H. Yang. (2017). Effects of water level regulation in alpine hydropower reservoirs: an ecosystem perspective with a special emphasis on fish. *Hydrobiologia*, Volume 794, pp. 287-301.
- Hecky R. & Hesslein R. (1995) Contributions of Benthic Algae to Lake Food Webs as Revealed by Stable Isotope Analysis. *Journal of the North American Benthological Society*, Volume 14, Number 4.
- Helland, I. P., Johnsen, S. I., A. P. Eloranta (2019) Towards environmental design in hydropower reservoirs Developing a handbook for mitigation measures in regulated lakes. *Hydrocen report nr 10*.
- Karlsson, J., & Byström, P. (2005). Littoral energy mobilization dominates energy supply for top consumers in subarctic lakes. *Limnology and Oceanography*, 50(2), 538-543.
- Karlsson J., Byström P., Ask J., Ask P., Persson L., Jansson M. (2009) Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems. *Nature*, 460 (7254), 506-509.
- Lundström P. (2021) Förstudie Grundsjön: Återskapande av primärproduktion i reglermagasin. AFRY.
- Jansson, M. (1980). Role of benthic algae in transport of nitrogen from sediment to lake water in a shallow clearwater lake. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 89(1-2), 101-109.
- Milbrink, G., Vrede, T., Rydin, E. & L. Tranvik. (2011). Large-scale and long-term decrease in fish growth following the construction of hydroelectric reservoirs. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* 68: 2167–2173
- Norman S., Nilsson K.A., Klaus M., Seekell D., Karlsson J. och Byström P. (2022) Effects of habitat-specific primary production on fish size, biomass, and production in northern oligotrophic lakes. *Ecosystems*, Vol. 25, no 7, p. 1555-1570
- Persson, G., S. K. Holmgren, M. Jansson, A. Lundgren, B. Nyman, D. Solander och C. Ånell. (1977). Phosphorus and Nitrogen and the Regulation of Lake Ecosystem: Experimental Approaches in Subarctic Sweden. *National Research Council of Canada* 3: 3-19.
- Puts, I. C., Bergstrom, A. K., Verheijen, H. A., Norman, S., & Ask, J. (2022). An ecological and methodological assessment of benthic gross primary production in northern lakes. *Ecosphere*, 13(3), 16.
- Rognerud, S. and T. Qvenild. (2006). Fiskeribiologiske undersøkelser av ørretbestander i Øvre Orkla. NIVA Rapport LNR 5271-2006.

- Sentinel Playground, <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground>, Sinergise Ltd.
- Vadeboncoeur, Y., Vander Zanden, M. J., & Lodge, D. M. (2002). Putting the lake back together: Reintegrating benthic pathways into lake food web models. *Bioscience*, 52(1), 44-54.
- Vadeboncoeur, Y., Jeppesen, E., Vander Zanden, M. J., Schierup, H. H., Christoffersen, K., & Lodge, D. M. (2003). From Greenland to green lakes: Cultural eutrophication and the loss of benthic pathways in lakes. *Limnology and Oceanography*, 48(4), 1408-1418.
- Vadeboncoeur, Y., J. Kalff, K. Christoffersen och E. Jeppesen. (2006). Substratum as a driver of variation in periphyton chlorophyll and productivity in lakes. *Journal Of The North American Benthological Society* 25: 379-392.
- Welch, H. E., & Kalff, J. (1974). Benthic Photosynthesis and Respiration in Char Lake. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 31, 609-620.

Bilaga A. Vatten- och sedimentprover

Tabell A1. Resultat av vattenprovtagningar i Grundsjön utförda 2021 med löst kol (Dissolved Organic Carbon, DOC i mg/L), fosfor (mg/L) och totala kvävehalter (P mg/L) för tidpunkterna 7 juli, 23 juli och 10 augusti. Värden som var under detektionsgränsen för fosfor sattes till detektionsgränsen (0.005). Medelvärden och standardavvikelse är avrundade.

Datum	07-jul	23-jul	08-aug	27-jul	23-jul	08-aug	27-jul	23-jul	08-aug
Provpunkt och djup	DOC	DOC	DOC	Fosfor	Fosfor	Fosfor	Kväve	Kväve	Kväve
Grundsjön Mittån 2m	2.4	3	2.4	0.0068	0.005	0.005	0.15	0.08	0.12
Grundsjön Mittån 4	2.3	2.9	2.5	0.006	0.005	0.005	0.15	0.11	0.086
Grundsjön Anån 2 m	2.6	3.3	3.4	0.0082	0.005	0.005	0.12	0.098	0.12
Grundsjön Anån 4 m	2.7	3.4	3.2	0.005	0.0053	0.005	0.15	0.094	0.099
Grundsjön centrum 2 m	3	3.1	3.2	0.005	0.006	0.0074	0.14	0.13	0.13
Grundsjön centrum 4 m	3	3.2	3.3	0.0075	0.005	0.005	0.17	0.065	0.15
Grundsjön syd 2	3	3.4	3.2	0.005	0.0056	0.005	0.12	0.062	0.13
Grundsjön syd 4 m	3	3.3	3.1	0.0065	0.0053	0.0053	0.12	0.077	0.11
Medelvärden	2.75	3.20	3.04	0.00625	0.00528	0.00534	0.140	0.090	0.118
Standardavvikelse	0.29277	0.18516	0.37393	0.00122	0.00037	0.00084	0.01852	0.02316	0.01989

Tabell A2. Bakgrundsdata samt DOC och näringsinnehåll i fyra oreglerade Abiskosjöar (från Ask et al. 2009a, Ecology).

Characteristic	Almberga	Tjabrak	Ruozutjaure	Vuorejaure
Coordinates	68°20'00" N 19°09'28" E	68°10'18" N 19°51'57" E	68°12'15" N 19°33'58" E	68°11'30" N 19°36'27" E
Altitude (m above sea level)	382	508	710	712
Maximum depth (m)	6	14	8.5	8.5
Mean depth (m)	3.2	4.6	2.9	2.8
Area (ha)	5.5	6.2	3.4	4.3
Mean temperature (°C)	11.2 ± 3.7	11.3 ± 2.1	9.9 ± 4.6	9.9 ± 4.4
pH	7.2 ± 0.1	7.4 ± 0.2	6.9 ± 0.2	7.0 ± 0.2
DOC (mg/L)	4.1 ± 0.1	3.2 ± 0.2	2.4 ± 0.3	2.8 ± 0.1
Tot-N (µg/L)	168 ± 23	170 ± 36	138 ± 18	141 ± 17
Tot-P (µg/L)	10.8 ± 3.8	11.8 ± 4.4	13.6 ± 4.3	13.0 ± 4.5

Notes: Values are seasonal means ± SD. Key to abbreviations: DOC, dissolved organic carbon; Tot-N, total nitrogen; Tot-P, total phosphorus.

Sedimentprov från Grundsjön är tagna i området norr om möjlig klack, mellan Grundsjön och Långtjärnen (Långtjärnsbrynnet). För 2 prover är halterna av kväve och fosfor analyserade. För kväve Kjeldahl var resultatet 3500 samt 4000 mg/kg (motsvarande värden per torrsubstans; Kväve Kjeldahl 17000 samt 19000 mg/kg Ts). För fosfor var resultatet: 730 och 810 mg/kg Ts. Information om torrsubstans och glödrest finns också att tillgå.



Figur A1. Foto från Per Lundström. Ett av Grundsjöns torrlagda grundområden.

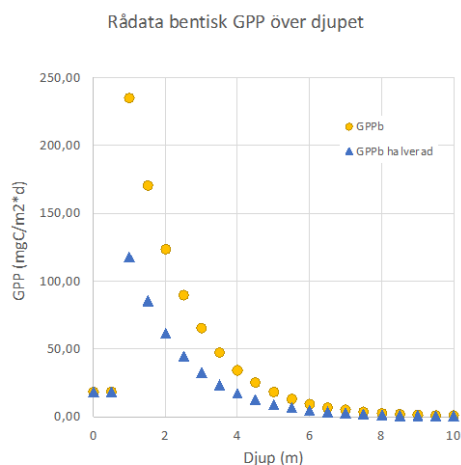
Bilaga B. Detaljer beräkningar bentisk produktion

Tabell B1. Uppskattning av ytor från flygbilden av hela Grundsjön:

Nivå	Area
+640,7 till +651 m	760 ha
+641 till +651 m	730 ha
+642,5 till +651 m	630 ha

Tabell B2. Rådata för bentisk primärproduktion (GPPb) i tabellform samt grafiskt och hur den har räknats ut från relativ ljusmängd (%PAR) enligt ekvation $GPP = 4.4554 \times \%PAR$ från Puts et al. 2022 (se även figur 8). Halverad GPPb (blå serie i grafen) har antagits för nuvarande situation, d.v.s. då bottensedimentet inte är optimalt för alg tillväxt och GPPb visar den faktiska bentiska primärproduktionen för en "vanlig sjö" (gul serie i grafen). För att inte överskatta den bentiska primärproduktionen på de allra grundaste områdena så antogs en lägre bentisk primärproduktion (motsvarande den på sten) ner till 1 m djup.

Djup	InPAR	PAR	%PAR	GPPb (mgC/m ² *d)	GPPb halverad (mgC/m ² *d)
0	6,23	506,34	100,00	18,54	18,54
0,5	5,91	367,55	72,59	18,54	18,54
1	5,59	266,80	52,69	234,77	117,38
1,5	5,27	193,67	38,25	170,42	85,21
2	4,95	140,58	27,76	123,70	61,85
2,5	4,63	102,05	20,15	89,80	44,90
3	4,31	74,08	14,63	65,18	32,59
3,5	3,98	53,77	10,62	47,32	23,66
4	3,66	39,03	7,71	34,35	17,17
4,5	3,34	28,33	5,60	24,93	12,47
5	3,02	20,57	4,06	18,10	9,05
5,5	2,70	14,93	2,95	13,14	6,57
6	2,38	10,84	2,14	9,54	4,77
6,5	2,06	7,87	1,55	6,92	3,46
7	1,74	5,71	1,13	5,02	2,51
7,5	1,42	4,15	0,82	3,65	1,82
8	1,10	3,01	0,59	2,65	1,32
8,5	0,78	2,18	0,43	1,92	0,96
9	0,46	1,59	0,31	1,40	0,70
9,5	0,14	1,15	0,23	1,01	0,51
10	-0,18	0,84	0,16	0,74	0,37



Den bentiska primärproduktionen (tabell B2) i respektive djupintervall beräknades genom att multiplicera respektive area med tillhörande mått på

primärproduktion (tabell B3). Därefter summeras produktionen för samtliga djupintervall för att erhålla den totala bentiska produktionen i respektive område (tabell B3). De beräknade produktionsmåttan gäller för det som får antas vara den mest produktiva säsongen, alltså de varmaste sommarmånaderna (ca juni-augusti, men se tabell 2).

Tabell B3. Mer detaljerad beräkning av bentisk GPP vid tröskelläge A och B, med och utan klack. Värdena för GPPb A och GPPb B (i mg C d⁻¹) har fått genom att multiplicera rådatat för GPPb (mg C m⁻² d⁻¹) från tabell B2 med arean för respektive djupintervall.

BENTISKT dammar (med klack, ej halverad GPPb)				
Djupintervall	Tröskelläge A	Tröskelläge B	GPPb A	GPPb B
	Area (m ²)	Area (m ²)	(mgC/d)	(mgC/d)
0-1	136529	86176	2531337	1597760
1-2	27727	83266	4725099	14189781
2-3		36364		3265331
3-4		14855		702871
4-5				
5-6				
Tot area:	164256	220661		
GPP (kgC/d):			7,26	19,76

BENTISKT dammar (utan klack, halverad GPPb)				
Djupintervall	Tröskelläge A	Tröskelläge B	GPPb A	GPPb B
	Area (m ²)	Area (m ²)	(mgC/d)	(mgC/d)
0-1	27727	83266	514077	1543806
1-2		36364		3098487
2-3		14855		666958
3-4				
4-5				
5-6				
Tot area:	27727	134485		
GPP (kgC/d):			0,51	5,31

Den pelagiska primärproduktionen i Grundsjön som helhet uppskattades grovt genom att multiplicera ett viktat medelvärde av pelagisk primärproduktion mellan 0 – 10 m från sjön Almberga i Abisko (4,24 mg C m⁻³ d⁻¹, Jenny Ask personlig kommentar) med den totala volymen mellan 0 – 10 m i Grundsjön (tabell B4).

Tabell B4. Mer detaljerad beräkning av total pelagisk och bentisk GPP (GPPp respektive GPPb) för Grundsjön som helhet. Värdet för GPPp (mg C d^{-1}) har fåtts genom att multiplicera $4,24 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (se ordinarie text) med den totala volymen mellan 0 – 10 m. Värdena för GPPb (mg C d^{-1}) har fåtts genom att multiplicera rådata för GPPb ($\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) från tabell B2 med arean för respektive djupintervall.

PELAGISKT helsjö			
Djupintervall	Volym (m ³)	GPPp (mgC/d)	GPPp helsjö (kgC/d)
0-10	178400000	756342536	756,34

BENTISKT helsjö (halverad GPPb)			
Djupintervall	Area (m ²)	GPPb (mgC/d)	GPPb helsjö (kgC/d)
0-1	730000	13534678	144,61
1-2	730000	62201499	
2-3	730000	32775429	
3-4	730000	17270142	
4-5	730000	9100043	
5-6	730000	4795026	
6-7	730000	2526612	
7-8	730000	1331331	
8-9	730000	701509	
9-10	730000	369642	