



Nr C 381
Mars 2019

Åtgärder mot internbelastning av fosfor i Hjälmaren

kostnad, nytta och konsekvenser

Magnus Karlsson, Mikael Malmaeus & Emil Rydin



I samarbete med Naturvatten i Roslagen

Författare: Magnus Karlsson & Mikael Malmaeus, IVL Svenska Miljöinstitutet; Emil Rydin
Naturvatten i Roslagen

Medel från: Hjälmarens vattenvårdsförbund

Rapportnummer C 381

ISBN 978-91-7883-028-2

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2019**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	4
Inledning	8
Bakgrund	8
Åtgärdsbehov	9
Konsekvenser av åtgärder.....	10
Metodbeskrivning	13
Kriterier för åtgärder.....	13
LCA	15
Utvärdering av åtgärder.....	16
Reduktionsfiske	16
Aluminiumbehandling.....	17
Lågflödesmuddring	21
Konventionell muddring	22
Övriga metoder	23
Juridiska aspekter	24
Sammanfattande slutsatser	25
Referenser.....	27

Sammanfattning

I takt med att det svenska samhället genomfört åtgärder för att minska tillförseln av näringsämnen från reningsverk, industrier och jordbrukssektorn till vattendrag, sjöar och omgivande kustområden har miljöförhållandena successivt förbättrats i våra vattenområden. Under vissa förutsättningar kan emellertid historiska utsläpp som skedde för flera decennier sedan fortfarande påverka miljöförhållandena och graden av näringsrikedom i vattenområdena, ett fenomen som benämns internbelastning.

Hjälmarén, Sveriges till ytan fjärde största sjö, är ett exempel på en sjö där kraftfulla åtgärder vidtagits för att minska tillförseln av näringsämnen från omgivande marker, punktkällor och tillrinnande vattendrag. Likväl är sjön fortfarande att betrakta som mycket näringsrik, vilket bland annat manifesteras i en hög primärproduktion av växtplankton och en likaledes hög fiskproduktion. Modellberäkningar tyder på att en stor del av den fosfor som finns i sjöns vattenmassa har sitt ursprung i en växelverkan, en ständigt pågående cirkulation av fosfor mellan sjöns vattenmassa och bottensediment. Senare utförda sedimentundersökningar har bekräftat att det finns en förhållandevis stor pool av mobil potentiellt läckagebenägen fosfor i Storhjälmarens och östra Hjälmarens bottensediment.

En komplicerande faktor när det gäller Hjälmarén är att det är svårt att fastställa vad som är sjöns naturliga näringsnivå. Hjälmarens areal och vattenvolym minskade drastiskt när sjön vid två tillfällen sänktes i slutet av 1800-talet för att skapa nya jordbruksarealer. I och med detta skedde en omlagring av sediment och tidigare djupare liggande depositionsbottnar blev åtkomliga för vind- och vågdriven erosion. Hjälmarén ligger i ett landskap med en naturligt näringsrik jordmån och historiska källor vittnar om att sjön under lång tid varit närings- och fiskrik. Inom den svenska vattenförvaltningen har man emellertid beslutat att för att uppnå en godtagbar ekologisk status behöver fosforkoncentrationerna i runda tal halveras från dagens cirka 40 µg/l till cirka 20 µg/l. Modellberäkningar visar att detta endast är möjligt att uppnå genom kraftfulla åtgärder mot internbelastningen.

Om fosforkoncentrationen minskade till den fastslagna målnivån skulle den omedelbara konsekvensen för sjön bli att produktionen av växtplankton, alger, minskade. Detta skulle leda till att vattnet blev klarare, siktdjupet bedöms öka med 0,5–1 m från dagens nivåer och sannolikt att frekvensen av så kallade algblomningar minskade. Algblomningar uppstår i speciella situationer med stabila väderförhållanden och innebär en kraftig ansamling av alger i ytvattnet, varav vissa släkter av blågrönalger, eller mer korrekt cyanobakterier, kan vara giftiga för människor och djur som kommer i kontakt med eller dricker vattnet. På sikt skulle den minskade algproduktionen, vilken utgör basen i den akvatiska näringsväven, också leda till att produktionen av fisk minskade i sjön. Hur det skulle slå mellan olika fiskarter, vilka som skulle missgynnas och vilka som eventuellt skulle gynnas av ett klarare vatten är svårt att förutsäga. Den går dock inte att utesluta att den för yrkes- och fritidsfisket viktiga gösen skulle påverkas negativt. Gös är en fiskart som gynnas av näringsrika och grumliga förhållanden där den tack vare god syn har konkurrensfördelar. Gösens stapelföda är nors och i vilken utsträckning den skulle minska eller öka i utbredning vid sänkta näringsnivåer är oklart.

För att reducera internbelastningen finns i teorin ett antal möjliga åtgärder att tillgripa, alltifrån att fysiskt gräva bort sediment eller avleda fosforrikt bottenvatten till att fiska ut vitfiskbestånd eller med hjälp av fällningskemikalier på likartat sätt som i avloppsreningsverk fälla ut fosfor i icke biotillgängliga former. Den metod som såväl internationellt som i Sverige är mest beprövad är att genom att dosera ett aluminiumsalt till vattenområdets vattenmassa eller bottensediment fälla ut fosfor i bottensedimenten i en form där den inte kommer att läcka tillbaka till vattenmassan utan begravas i en stabil förening. Det är en process som sker naturligt i de flesta vattenmiljöer, aluminium är det fjärde vanligaste grundämnet i jordskorpan, men i områden med överskott på fosfor finns helt enkelt inte dessa bindarpartiklar i tillräcklig omfattning för att kunna förenas med all den tillgängliga fosfor. Ett tiotal sjöar i Sverige har behandlats på detta sätt med övervägande gott resultat och i Nordamerika har ett hundratal sjöar sedan 1960-talet aluminiumbehandlats. I Stockholmsregionen finns beslut på att restaurera ytterligare ett tiotal vattenområden med denna metod inom de närmsta åren.

Modellberäkningar har visat att för att nå ned till de önskvärda fosfornivåerna i Hjälmaren behöver ungefär halva bottenarealen, cirka 200 km², aluminiumbehandlas på ett sådant sätt att fosforläckaget helt upphör. En så stor sammanhängande yta har tidigare aldrig behandlats vare sig i Sverige eller internationellt. Kostnadsalkylen för en operation av detta slag är därför osäker men kan, baserat på ett antagande att 50 g aluminium/m² är en erforderlig dos grovt skattas till mellan 450 och 750 MSEK. För att genomföra åtgärden fullt ut behöver ca 100 000 ton aluminiumsalt doseras i Hjälmaren. Det motsvarar cirka 100 års förbrukning av fällningskemikalier vid Örebro kommunala reningsverk. Att producera aktuella fällningskemikalier är en förhållandevis energi- och resurskrävande process. Med hjälp av en så kallad livscykelanalys kan det samlade koldioxidutsläppet som tillverkning, transport och spridning av aluminiumsalt vid en fullskalebehandling genererar uppskattas till 75 000 ton. Det motsvarar 5 % av de årliga estimerade koldioxidemissionerna från Örebro län. Aluminium kan vid låga eller höga pH-värden gå i lösning och utöva toxisk verkan mot organismer, exempelvis fisk. Ett välkänt fenomen från försurade sjöar är att löst aluminium kan fällas ut på fisks gälar där pH-värdet är högre, vilket leder till en försämrad syreupptagningsförmåga. Hjälmaren har ett välbuffrat nära neutralt vatten där det inte föreligger någon risk att pH varierar mellan de ytterligheter där fria aluminiumjoner löses ut. Fiskdöd har vid ett flertal tillfällen observerats i Hjälmaren men inte kunnat knytas till förhöjda aluminiumkoncentrationer utan mer sannolikt berott av ansträngda syreförhållanden.

En annan metod som har viss potential i Hjälmaren vore att kraftigt minska på bestånden av fisk, framförallt arter som braxen, mört, nors och gärs genom utfiskning. Genom ett hårt fisketryck lyfter man handgripligen en viss mängd fosfor ur sjön. I Hjälmaren finns uppskattningsvis en stående fiskbiomassa på 10 000 ton och en årlig fiskproduktion på cirka 2 000 ton. Om man skulle fiska upp en mängd motsvarande hela den årliga fisktillväxten så avlägsnas 20 ton fosfor (fisk består som de flestas organismer till cirka 1 % av fosfor). Åtgärden ger således en långt mindre fosforreduktion än vad som krävs för att nå miljömålet men skulle om den genomfördes under ett antal på varandra följande år kunna ge en avsevärd effekt. En positiv sidoeffekt av denna åtgärd är att man tillgodogör sig en resurs, den upptagna fisken, som om den inte kan användas som människoföda eller djurfoder, i vart fall kan användas för biogasproduktion. En potentiellt negativ effekt är givetvis att man genom att minska på bestånden av bytesfisk minskar på födotillgången för rovfisk, exempelvis gös. Det förekommer redan vid nuvarande förhållanden att gös under vissa perioder går över till att äta vitfisk när tillgången på nors sviktar.

Muddring av bottensediment är en relativt vanlig åtgärd i miljövarðsammanshang när det handlar om att sanera avgränsade områden från miljöfarliga ämnen. Att i större skala muddra botten i ett vattenområde av Hjälmarens storlek i syfte att avlägsna fosfor har dock inte tidigare provats. För att åstadkomma en erforderlig reduktion av internbelastningen i Hjälmaren skulle de översta 10

centimetrarna på en yta av cirka 100 km² av de djupare liggande bottarna i Storhjälmaren och Östra Hjälmarén behöva muddras bort. Det motsvarar 10 Mm³ muddermassor före avvattning. En teknik som diskuterats under senare år är så kallad lågflödesmuddring, vilket innebär att under långsamt tidsförlopp successivt sugmuddra ytsedimenten och sprida de erhållna muddermassorna som jordförbättringsmedel på omgivande åkermarker. Tekniken är än så länge i sin linda och har enbart verifierats i pilotskala. Ett flertal projekt där tekniken ska testas framöver har emellertid initierats. Konventionell muddring att antingen gräva eller sugmuddra områden och transportera muddermassorna till en deponi på land är emellertid en beprövad teknik. En mycket grov kalkyl ger vid handen att kostnaden för att genomföra erforderlig muddring skulle hamna runt 2 miljarder SEK och de koldioxidutsläpp som genereras vid muddring och kvittblivning av muddermassor är av samma storleksordning som vid en aluminiumbehandling. Vid muddring krävs att försiktighetsåtgärder vidtas för att inte spill av materialet som tas bort förorsakar grumling av vattenmassan eller att miljöfarliga ämnen sprids till omgivande vattenmiljöer. Erfarenheter från ett antal muddringar i Sverige i samband med infrastrukturprojekt i bland annat hamnar och farleder och strandnära förorenade områden som ska bebyggas visar att de risker som föreligger går att hantera med skyddsåtgärder, exempelvis när på året muddringar utförs och genom att avgränsa undervattensarbeten med olika former av grumlingskydd.

I nedanstående tabell sammanfattas kostnader, åtgärdspotential och sidoeffekter av studerade åtgärdsalternativ

	Reduktionsfiske	Aluminiumbehandling	Lågflödesmuddring	Konventionell muddring
Kostnad per kg avskilt fosfor (SEK)	1 500–2 000	400–700	oklar	1 000 (mycket osäkert värde)
Potential i Hjälmarén (ton fosfor/år)	20	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)
Positiva sidoeffekter	Upptagen fisk kan användas för olika ändamål, t.ex. som foder eller som substrat för biogasproduktion. Åtgärden ger ett positivt koldioxidnetto		Åtgärden kan leda till jordförbättring på omgivande åkermarker om det är praktiskt möjligt att genomföra	Åtgärden kan leda till jordförbättring på omgivande åkermarker om det är praktiskt möjligt att genomföra
Negativa sidoeffekter	Rovfiskbestånden i Hjälmarén kan komma att minska av åtgärden och leda till sämre förutsättningar för yrkes- och fritidsfiske	Åtgärden är resurskrävande och leder till relativt kraftiga koldioxidutsläpp vid framställning av fällningskemikalierna		Åtgärden är resurskrävande och leder till relativt kraftiga koldioxidutsläpp vid upptag och transporter av muddermassor

Rättsläget när det gäller åtgärder mot internbelastning är oklart. I Stockholms län där man under årens lopp aluminiumbehandlat ett tiotal sjöar har åtgärden inte krävt något tillstånd enligt miljöbalken. I Kronobergs län har Växjö kommun nyligen ansökt om och erhållit ett tillstånd för miljöfarlig verksamhet från Mark- och miljödomstolen. Länsstyrelsen i Örebro län bedömer att aluminiumbehandling inte kan prövas som miljöfarlig verksamhet. HaV utreder för närvarande frågan och har för avsikt att komma med en vägledning.

Sammantaget visar denna utredning att:

- För att uppnå de uppsatta miljömålen behöver totalfosforkoncentrationen i sjön minska från dagens nivå på cirka 40 µg/l till cirka 20 µg/l. För att åstadkomma detta måste kraftfulla åtgärder vidtas mot internbelastningen av fosfor
- Åtgärder mot internbelastning skulle leda till en minskad produktion av växtplankton, ett ökat siktdjup med cirka en meter och sannolikt en minskad frekvens av algbloomingar
- Den sammanlagad fiskproduktionen i sjön skulle minska om åtgärder genomförs. Hur detta skulle slå mot enskilda arter är vanskligt att förutsäga men det finns en risk att gösbeståndet skulle minska
- Det är tekniskt möjligt att genomföra åtgärder som väsentligt reducerar internbelastningen av fosfor till Hjälmarens vattenmassa
- Av de åtgärder som studerats är kunskapsläget beträffande effektivitet, kostnader och konsekvenser störst vad gäller aluminiumbehandling som utförts i ett tiotal sjöar i Sverige och ett hundratal internationellt. Att genomföra en aluminiumbehandling av de aktuella Hjälmarbassängernas halva ackumulationsbottenareal skulle kosta i storleksordningen 750 MSEK
- Även en omfattande muddring av sjöns djupare liggande bottensediment skulle ge en motsvarande effekt som en aluminiumbehandling. Kostnaden för denna åtgärd är i nuläget svår att uppskatta men bedöms till storleksordningen 2 miljarder SEK. En sådan operation skulle generera i storleksordningen 20 Mm³ muddermassor
- Både aluminiumbehandling och muddring inklusive kvittblivning av muddermassor är relativt resurskrävande åtgärder. De koldioxidemissioner som genereras vid tillverkning och spridning av fällningskemikalier uppskattas till storleksordningen 75 000 ton
- Reduktionsfiske av vitfisk skulle kunna bidra till en del av betinget vad avser fosfor till en förhållandevis låg kostnad och med ringa miljöpåverkan men innebär också en potentiell risk för att rovfiskbeståndet minskar
- De miljörisker som kan identifieras vid olika åtgärder, exempelvis aluminiums potentiella toxicitet eller grumling i samband med muddring bedöms som små och hanterbara. Det väsentliga ur ett sammanvägt samhällsligt miljöperspektiv är väga nyttan av åtgärden i form av förbättrad vattenkvalitet mot risken för ett försämrat fiske och de kostnader och den resursförbrukning och därtill kopplade koldioxidemissioner som åtgärderna medför

Inledning

Inom Hjälmarens vattenvårdsförbund diskuteras Hjälmarens miljöförhållanden. Hur mår Hjälmaren idag? Hur har det sett ut historiskt och vilken vattenkvalitet vill man ha i framtiden är viktiga frågor att besvara för de beslutsfattare som har möjlighet att påverka den framtida utvecklingen av sjön.

Hjälmaren anses övergödd, d.v.s. att tillförseln av näringsämnen, framförallt fosfor och kväve, under längre tid varit onaturligt hög, vilket påverkat de ekologiska förhållandena negativt. Trots att omfattande åtgärder genomförts för att reducera näringsämnestillförseln från landbaserade källor exempelvis kommunala reningsverk, industrier och läckage av växtnäringsämnen från jordbruksmark visar kontinuerliga mätningar att fosforkoncentrationerna i Hjälmarens centrala och östra bassänger i princip är desamma som på 1980-talet. Modellberäkningar indikerar att en betydande del av tillförseln av fosfor till sjöns vattenmassa har sitt ursprung i bottensedimenten från Hjälmarens djupare delar, så kallad internbelastning.

IVL Svenska Miljöinstitutet har tillsammans med Naturvatten i Roslagen erhållit uppdraget att med hänsyn till kostnad, effekt, miljökonsekvens, juridiska aspekter, konsekvenser för yrkes- och fritidsfisket samt andra möjliga motstående intressen belysa för- och nackdelar med olika åtgärder för att minska internbelastningen i Storhjälmaren och Östra Hjälmaren.

Bakgrund

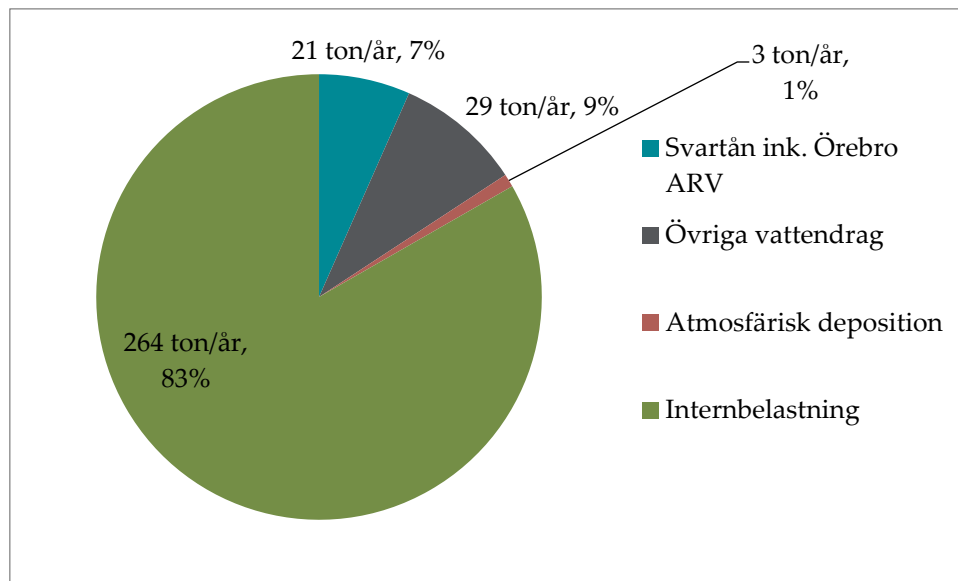
Hjälmaren är och har under lång tid varit en näringsrik sjö. Produktionen av växtplankton (alger), den så kallade primärproduktionen, vilket utgör basen i den akvatiska näringsväven är hög. Växtplanktonproduktionen stimuleras av den goda tillgången på lösta näringsämnen. I sötvattensystem är vanligtvis tillgången på fosfor den begränsande resursen för algutväxten. Den höga primärproduktionen leder även till att sekundärproduktionen av djurplankton, bottenlevande djur, bytesfisk och rovfisk är god. Algutväxten leder även till att vattnet i Hjälmaren är förhållandevis grumligt och att det emellanåt i samband med stabila väderförhållanden uppstår ansamlingar av alger i ytvattnet, så kallade algblomningar.

Äldre uppgifter tyder på att Hjälmaren varit näringsrik under lång tid, i vart fall sedan 1700-talet (referenser i NV, 1996 och Degerman et al., 2001). En drastisk förändring av sjön ägde rum i slutet av 1800-talet då sjön genom utdikning sänktes närmare 2 m varvid knappt 200 km² torrlades. Håkanson (1978) beräknade att sjöns livslängd därigenom minskades med cirka 1000 år. Sjösänkningen orsakade stora förändringar i sjön genom utsvällning av sediment mot djupare liggande bottnar och kolonisation av vattenväxter på nya grundbottnar som blev tillgängliga för vegetation att etableras på.

Hjälmaren, Sveriges till ytan fjärde största sjö, har med sin karaktär av grund lerslättsjö som genom utdikningsföretag avsevärt sänkts inga direkta motsvarigheter i Sverige eller annorstädes i norra Europa. Det är därför svårt, för att inte säga omöjligt, att fastslå vad som är de naturliga miljöförhållandena i sjön och vilka nivåer av näringsrikedom som är eftersträvaransvärda. Det är emellertid tveklöst så att den externa tillförseln av näringsämnen ökade under 1900-talet med införande av vattenklosetter i tätorter och användandet av konstgödsel inom jordbruket. En stor avlastning av sjöns fosfortillförsel skedde i början 1970-talet när Örebro stad förbättrade reningen av det kommunala avloppsvattnet. Den externa tillförseln av fosfor till Hjälmaren minskade då

från cirka 200 ton/år till 50 ton/år. Som ovan nämnts skedde dock ingen nämnvärd minskning av fosforkoncentrationerna i Storhjälmaren eller Östra Hjälmaren. En hypotes är att den historiska tillförseln av fosfor innan moderna reningsmetoder infördes fortfarande cirkulerar i sjön och omväxlande frigörs och fastläggs i sedimenten, så kallad internbelastning. En inventering av bottensedimentens fosforförråd (Malmaeus & Rydin, 2015) har visat att det finns cirka 4 000 ton potentiellt rörlig fosfor i de översta sedimentlagren. Det motsvarar i runda tal 30 års tillförsel av avloppsvatten från Örebro innan modern reningsteknik infördes.

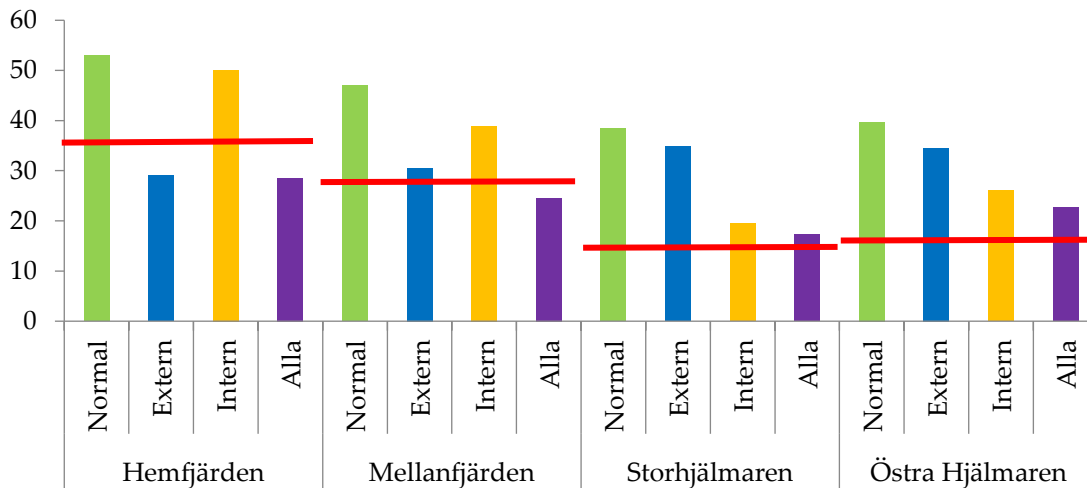
Modellberäkningar (Malmaeus & Karlsson, 2015) indikerar att drygt 250 ton fosfor/år motsvarande cirka 80 % av den sammanlagda tillförseln (**Fig. 1**) har sitt ursprung i fosforläckage från sedimenten. Om denna fosforkälla reducerades skulle det givetvis få långtgående konsekvenser för fosforkoncentrationerna i vattenmassan.



Figur 1. Olika källors bidrag till fosfortillförseln till Hjälmaren. Data från Malmaeus & Karlsson, 2015.

Åtgärdsbehov

Inom den svenska vattenförvaltningen har man beslutat att för att uppnå god ekologisk status behöver fosforkoncentrationerna i Storhjälmarens och Östra Hjälmarens ytvatten minska från dagens nivåer på cirka 40 µg/l till cirka 20 µg/l. Modellberäkningar (Malmaeus & Karlsson, 2015) indikerar att detta är möjligt att uppnå om kraftfulla åtgärder sätts in mot internbelastningen. Beräkningarna antyder att om åtgärder som reducerar internbelastningen med 50 % genomförs parallellt med att man också minskar den externa tillförseln med 50 % kommer man att nå fosforkoncentrationer som ligger i närheten av nivån för god ekologisk status i Storhjälmaren (**Fig. 2**).



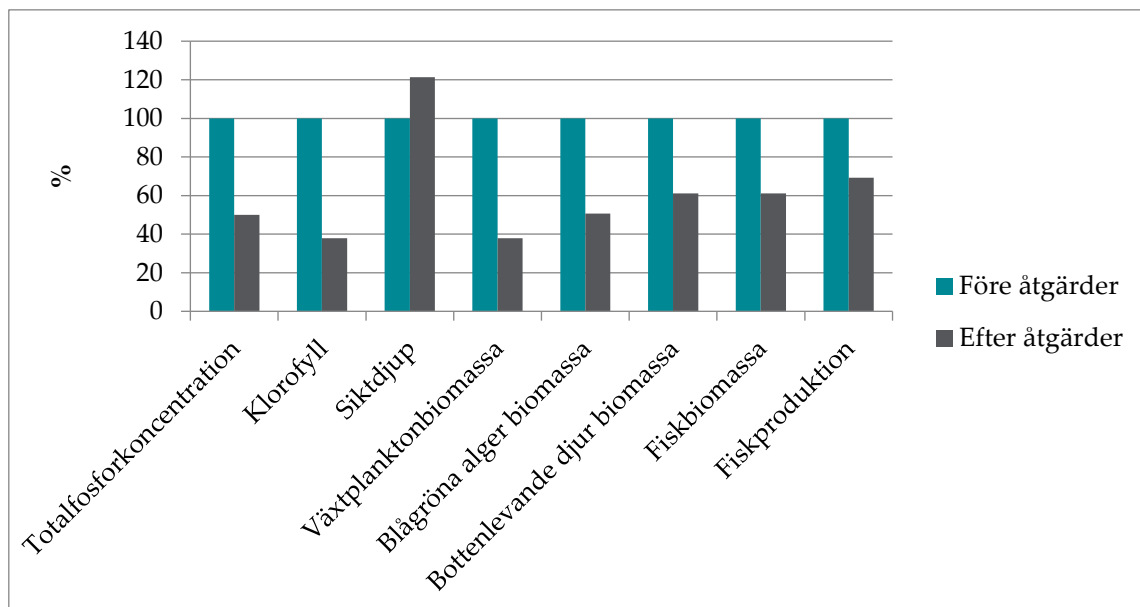
Figur 2. Modellerad halt av totalfosfor ($\mu\text{g/l}$) i ytvatten (årsmedelvärde) i Hjälmarens fyra bassänger under nuvarande betingelser (grönt), 50 % minskad extern tillförsel (blått), behandling av 50 % av bottenarealen i Storhjälmaren (orange) samt kombinerade åtgärder (lila). I figuren visas också gränsen för god status i respektive bassäng (röd linje). Från Malmaeus & Karlsson (2015).

Konsekvenser av åtgärder

Åtgärder mot internbelastningen syftar till att sänka koncentrationerna av fosfor i Hjälmarens ytvatten och därigenom minska produktionen växtplankton, vilket sannolikt skulle leda till att vattnet blir klarare och att frekvensen av kraftiga algblomningar minskar. Ett potentiellt motstående intresse mot att sänka näringsförhållanden i Hjälmaren är att åtgärden skulle kunna innebära en minskad produktion av kommersiellt och för fritidsfiske intressanta fiskarter, framförallt gös som gynnas av näringsrika och grumliga förhållanden och eventuellt även leda till minskande kräftbestånd. Det har sedan början av 1970-talet tagits fram ett antal empiriska samband som relaterar fosforhalter i sjöar med produktionen av allt ifrån växtplankton till fisk (Peters, 1986). I **Tabell 1** och **Figur 3** redovisas några biologiska variabler som visat sig korrelera väl med totalfosforhalten i ytvattnet och hur dessa skulle påverkas om åtgärderna att begränsa den externa och interna fosfortillförseln genomförs.

Tabell 1. *Prediktion av några sjökaraktäristiska variabler före respektive efter att åtgärder för att minska fosfortillförseln genomförts baserat på regressionsmodeller till totalfosforkoncentration enligt Peters, 1986; Downing et al., 1990 och Sandström et al., 2016.*

	Nuvarande förhållanden	Efter åtgärder
Totalfosforkoncentration (µg/l)	40	20
Klorofyll (µg/l)	13	5
Siktdjup (m)	3,5	4,2
Växtplanktonbiomassa (g/m ³)	5,2	2,0
Blågröna alger biomassa (g/m ³)	1,6	0,8
Bottenlevande djur biomassa (ton)	4 600	2 800
Fiskbiomassa (ton)	10 000	6 000
Fiskproduktion (ton/ år)	1 800	1 200



Figur 3. *Predikterad procentuell förändring av några sjökaraktäristiska variabler efter åtgärder mot internbelastning baserat på regressionsmodeller enligt Peters, 1986; Downing et al., 1990 och Sandström et al.*

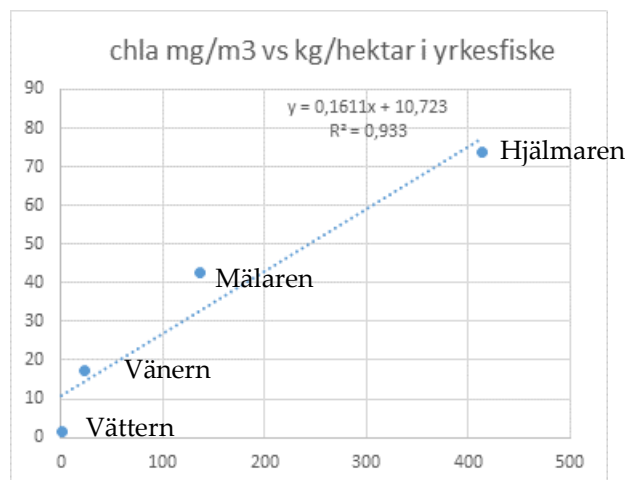
Av **Tabell 1** och **Figur 3** framgår att den halvering av totalfosforkoncentrationerna som bedöms kunna uppnås om åtgärderna genomförs fullt ut skulle leda till en avsevärd minskning av primärproduktionen, mätt som koncentration av klorofyll och att siktdjupet, ett mått på vattnets klarhet skulle öka med knappt en meter. Biomassan av olika funktionella grupper i ekosystemet skulle minska och det skulle även påverka produktionen av fisk som skulle minska med en tredjedel jämfört dagens nivå. Prediktioner av detta slag är givetvis förenade med stora osäkerheter och skall inte tolkas bokstavligt men de ger en fingervisning av hur systemet skulle svara på en minskad fosfortillförsel.

Till de potentiellt positiva effekterna av en minskad näringsrikedom hör en minskad biomassa av blågröna alger eller mer korrekt cyanobakterier. Det är denna typ organismer som kan förorsaka

algbloomningar som understundom är toxiska. Huruvida frekvensen av besvärliga algbloomningar, som till sin natur är oförutsägbara då de i hög grad är kopplade till vissa stabila väderförhållanden, kommer att minska skall låtas vara osagt men den genomsnittliga tillväxten av denna algtyp kommer att minska med lägre fosforkoncentrationer i vattnet. På grund av sin svårförutsägbarhet och variabla natur finns ingen statistik på hur vanligt algbloomningar är i Hjälmaren i dagsläget. Det allmänna intrycket efter diskussioner med yrkesfiskare som vistas stora delar av året på sjön och har gjort så under flera decennier är emellertid att frekvensen av algbloomningar minskat under senare år.

Under 1970-talet skedde en väsentlig förändring av mjukbottenfaunasamhället i Hemfjärden och Mellanfjärden när biomassorna av glattmaskar minskade (Lst, 1984). Detta var sannolikt en konsekvens av minskad organisk belastning från Örebro tätort efter vidtagna åtgärder i reningsverket. Några dramatiska förändringar i bottenfaunasamhällets artsammansättning är inte att förvänta om näringsnivåerna sänks i Hjälmaren. Däremot talar erfarenheter från norra Vänern som blivit näringsfattigare under senare år mot att tätheter och biomassor av mjukbottenfauna kommer att minska (Sandström et al., 2015). Av speciellt intresse för Hjälmaren är dess bestånd av signalkräfta som utgör en viktig resurs för både yrkes- och husbehovsfiske. Att det finns starka bestånd av signalkräftor i Vättern trots att det är en extremt näringsfattig sjö talar emot att en minskad näringsrikedom i Hjälmaren skulle få kräftbestånden att svikta.

Vad avser fiskpopulationerna så är beståndet av gös av extra intresse eftersom den är viktig såväl för yrkes- som husbehovs- och fritidsfisket. Gösen är en fiskart som anses gynnas av näringsrikedom, bland annat därför att den tack vare god syn har en konkurrensfördel i grumliga vatten. Det finns ett statistiskt samband mellan göstäthet och siktdjup (Bergström et al., 2007). Det är därför rimligt att anta att gösbeståndet skulle minska om näringsnivåerna i Hjälmaren. Hur mycket är dock vanskligt att uttala sig om. Stapelfödan för gös är den pelagiskt simmande norsen som normalt upptar en stor del av den samlade biomassan av bytesfisk i sjön. Uppgifter från fiskarkåren pekar emellertid på att norsbeståndet minskat under senare tid och att gösen delvis gått över till att äta vitfisk (mört, braxen m.fl. arter av karpfiskar). Det förefaller således som att gösbeståndet redan i dagsläget är begränsad av födotillgången och att en sänkt näringsnivå därmed ganska omgående skulle kunna få följdverkningar för gösbeståndet. I Stockholms skärgård har bestånden av gös minskat radikalt under senare år sannolikt som en följd av minskad belastning av näringsämnen från Stockholms reningsverk. I **Figur 4** redovisas sambandet mellan näringsrikedom (mätt som klorofyll) och yrkesfiskets fångster per hektar i de fyra stora sjöarna i Sverige.



Figur 4. Koncentrationer av klorofyll plottade mot yrkesfiskets fångster av gös i de fyra stora sjöarna i Sverige. Data från Sandström et al., 2016.

Ovanstående resonemang motsägs delvis av erfarenheter från den estländska sjön Vörtsjärv som har vissa likheter med Hjälmaren. Där har man trots svagt minskande näringsnivåer sett ökade fångster av gös och braxen under senare år (Vilbaste et al., 2016).

En potentiellt positiv effekt av sänkta näringsnivåer är att sedimentationen av dött organiskt material (seston) skulle minska och att sannolikheten för temporär syrgasbrist i samband med stabila vädersituationer därmed också skulle kunna minska. 1980 och 1982 förekom relativt omfattande fiskdöd i Hjälmaren (Lst, 1984), som sannolikt kan hänföras till syrgasbrist även om det vid den tidpunkten förelåg diskussioner om utsläpp av aluminium från dåvarande Örebro pappersbruk bidragit till situationen. Även under den extremt varma sommaren 2018 förekom fiskdöd i Hjälmaren och även i Mälaren där stora mängder död nors sågs flyta i ytan i vattnen utanför Rosersbergs slott (Einar Olsson, Sigtuna fiskevårdsförening, pers. komm.). Den laxartade norsen är känslig för låga syrgasnivåer.

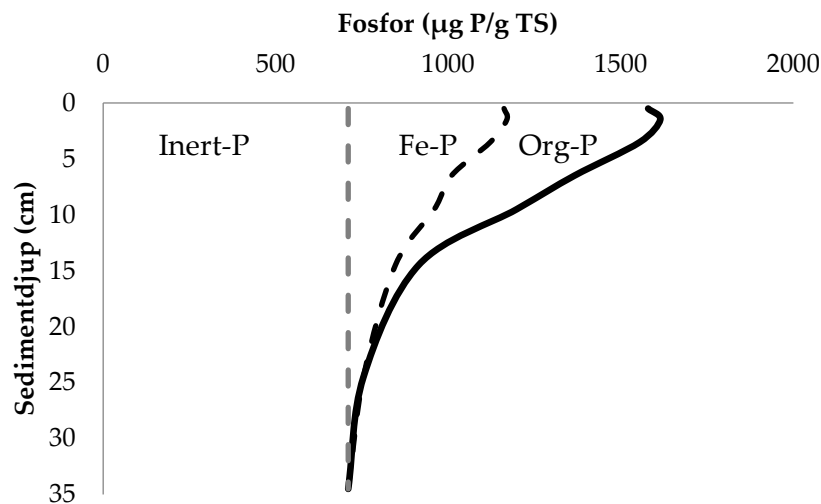
Metodbeskrivning

Kriterier för åtgärder

Syftet med denna sammanställning är att gå igenom olika möjligheter att genom interna åtgärder minska fosfortillgången i Hjälmarens vattenmassa. Fosfors kretslopp bryts antingen innan den har läckt från sedimenten eller så tas den bort efter att den har lagrats in, via plankton, i t.ex. fiskbiomassa. Principiellt innebär några av åtgärderna export av fosfor från sjön i form av sediment och fisk. Andra innebär ökad bindningsförmåga i bottensedimenten.

En uppdelning görs baserat på om metoden är kommersiellt gångbar och om en kostnadseffektivitet kan beräknas. Nästa kategori är de metoder som finns tillgängliga men där det har varit svårt att beräkna kostnadseffektiviteten. Ytterligare en kategori är metoder som fungerar i experimentskala eller i teorin. Dessa tas med för att dels belysa vad som finns i "pipeline", dels för att i någon mån vara heltäckande i en diskussion om vad som kan göras vad gäller interna åtgärder i Hjälmaren.

Det mesta av fosfor i ett sjöekosystem återfinns i de översta decimetrarna sediment. Men endast en mindre andel av den fosfor kommer att mobiliseras och läcka tillbaka till vattenmassan. För en rättvisande bedömning av kostnadseffektiviteten av att göra åtgärder för att inaktivera/ta bort sedimentfosfor tas bara hänsyn till den andel av fosfor som förr eller senare kommer att läcka till vattenmassan och vara tillgänglig för primärproduktion. Den bedömningen kan göras då fosforinnehållet i Hjälmarens sediment har undersökts med så kallad fosforfraktionering. Det innebär att det är känt vilken andel av det totala fosforinnehållet i ett sedimentskikt som kommer att frigöras (Malmaeus & Rydin 2015). Den andelen är störst i de översta centimetrarna sediment, för att klinga av med ökat sedimentdjup. Vid 15–20 cm sedimentdjup har all den läckagebenägna fosfor mobiliserats och läckt ut, vilket innebär att det inte bidrar till minskat internbelastning att ta bort sediment djupare än så. Vidare visade fosforfraktioneringen att när ett ytsediment avlägsnas så kan ca hälften av det totala fosforinnehållet tillgodoräknas eftersom hälften av det totala fosforinnehållet består av läckagebenägen sedimentfosfor som förväntas frigöras under en period motsvarande ett decennium (**Fig. 5**)



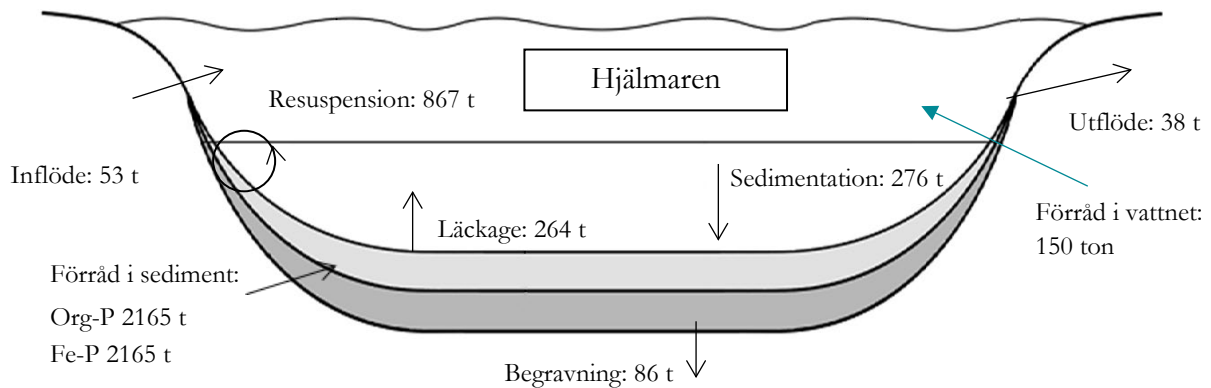
Figur 5. Fosfors fördelning i Storhjälmarens och Östra Hjälmarens sediment. Inert P indikerar den koncentration (710 µg P/g TS) med vilken fosfor antas begravas. Fe-P och Org-P representerar läckagebenägna fosforformer. Data från Malmaeus & Rydin (2015).

En längre omsättningstid innebär att även om åtgärdspotentialen är stor, som för sedimentfosfor, så innebär den genomsnittliga omsättningstiden att relativt stora mängder läckagebenägen sedimentfosfor behöver tas bort eller inaktiveras för att frisättningen av löst fosfor ska reduceras. Givet att internbelastningen (ca 250 ton fosfor/år) bara härrör från den fosfor som är bunden i organiska föreningar (Org-P) i sedimenten (2165 ton fosfor), innebär det en omsättningstid på ca 8 år för den fosforpoolen. Inkluderas även den järnbundna fosfor (Fe-P) i underlaget för en genomsnittlig omsättningstid blir det totala förrådet av läckagebenägen sedimentfosfor (4330 ton) baserat på den årliga internbelastningen 264 ton/år får en genomsnittlig omsättningstid på 16 år enligt Malmaeus & Rydin 2015).

Det kan diskuteras om järnbunden fosfor ska inkluderas i den läckagebenägna fosforpoolen. Den inkluderas regelmässigt när t ex mängden aluminium doseras för att binda den läckagebenägna fosfor, eftersom den löser upp sig vid syrgasbrist i ytsedimenten och den är heller inte stabil nog att begravas i djupare, ofta syrgasfria, sedimentlager. Men om de stora mängder järnbunden fosfor som finns lagrade i Hjälmarens ytligare sedimentlager inte går i lösning vid kortare perioder av skiktning och ansträngda syrgasförhållanden i bottenvattnet, kan de betraktas som inaktiva vad gäller fosforomsättningen.

Det bör i det här sammanhanget påpekas att det förekommer järn-fosforföreningar som endast bildas, och är stabila, under syrefria förhållanden (vivianit). Men dessa är sannolikt inte kvantitativt viktiga i Hjälmarens väloxiderade sediment.

För att kunna jämföra olika åtgärder tas hänsyn till att muddring och aluminiumbehandling fokuserar på förrådet av läckagebenägen sedimentfosfor; över hela (eller delar av) den bottenyta där näringsrika partiklar sedimenterar och ackumuleras (Fig. 6).



Figur 6. Hjälmarens fosforbalans och förråd av fosfor i sediment och vattenmassa. Från Malmaeus & Karlsson, 2015; Malmaeus & Rydin, 2015.

LCA

Livscykelanalyser (LCA) är en metod för att ur ett helhetsperspektiv belysa och bedöma miljöaspekter och potentiella miljöeffekter förknippade med en produkt eller ett system.

Bedömning görs genom att identifiera och sammanställa relevanta in- och utflöden för systemet, utvärdera potentiella miljöeffekter som är förknippade med dessa flöden samt tolka resultaten. En fullständig LCA omfattar studie av hela livscykeln hos det studerade systemet från utvinning av råvaror, förädling av råvaror och energi, tillverkningsprocesser, transporter, användning, återvinning till slutlig kvittblivning. De allmänna kategorierna av miljöeffekter som normalt beaktas är resursanvändning, mänsklig hälsa och ekologiska konsekvenser. I ett tidigare projekt vid IVL (Karlsson et al., 2012) har en grovt förenklad livscykelanalys utförts på de alternativa åtgärder som redovisats för att minska fosfortillförseln till kustområdet utanför Gävle där syftet enbart varit att skatta de olika metodernas potential att generera koldioxidutsläpp.

Vid kemisk fällning i såväl reningsverk som direkt i vattenområden uppkommer koldioxidemissioner huvudsakligen vid tillverkning och transport av fällningskemikalier. För LCA:en har en programvara benämnd GaBi som bland annat innehåller en emissionsdatabas för ett stort antal tillverkningsprocesser och produkter använts. Resursförbrukning vid tillverkning skiljer sig avsevärt mellan olika fällningskemikalier. Vid behandling av bottnarna utanför Gävle antogs att polyaluminiumklorid (PAX XL 100) doserades utmed bottnarna. De beräknade koldioxidemissionerna för aluminiumbehandling uppgår till 70 kg koldioxidekvivalenter per kg avskild fosfor. Den absoluta majoriteten av koldioxidemissionerna genereras vid framställningen av fällningskemikalierna och enbart till en mindre del vid den fartygsburna spridningen av materialet. I kalkylen antogs att 100 kg fällningskemikalie behövs för att fastlägga 1 kg fosfor.

Utvärdering av åtgärder

Reduktionsfiske

Metoden syftar egentligen mot att förändra näringsväven i övergödda, grunda, sjöar mot ett rovfiskdominerat system med klarare vatten och återetablering av undervattensvegetation men är också en metod att bortföra fosfor. Genom att selektivt fiska på så kallad vitfisk (mört, björkna, braxen) så kan den förändringen, ett ekosystemskifte, ske om ett antal andra villkor är uppfyllda (Bernes et al., 2015). Metodens möjligheter att få till ekosystemskifte i Hjälmarén bedöms inte i denna sammanställning, eftersom metodens effekter är osäkra och svåra att kvantifiera. Det innebär att metodens potential troligtvis underskattas. Här kvantifieras effekten på fosforexporten från sjön

Vitfisk (mört, björkna, braxen, löja) innehåller mellan 0,5 och 1 % fosfor av våtvikten vilket gör att det kan vara ett sätt att ta bort fosfor från en sjö i form av fiskbiomassa. Metoden kan vara kostnadseffektiv om man exempelvis vintertid lokaliserar braxenstim som samlar sig i större stim och med not tar upp dem. I fiskrika sjöar kan man ta upp vitfisk för 20 kr/kg fisk (företaget Klara vatten). Det motsvarar drygt 2000 kr/kg fosfor och måste betraktas som ett kostnadseffektivt sätt att avlägsna aktiv, biotillgänglig fosfor från en sjö. Nyligen genomförda reduktionsfisken i Växjösjöarna har nått en kostnadseffektivitet på 15 kr/kg fisk (Hedré 2018)

Medelfiskbiomassan i Storhjälmaren har skattats till 200–400 kg per hektar (Alfred Sandström och Thomas Axenrot, SLU, pers. komm.). De andra fjärdarna har inte undersökts men uppskattningsvis finns en stående fiskbiomassa på 10 000 ton i hela Hjälmarén (Alfred Sandström, SLU, pers. komm.). Yrkesfisket beräknas ta upp ca 350 ton fisk och signalkräfta per år (Sveriges officiella statistik). Fritidsfiskets omfattning är svårare att bedöma men utgör uppskattningsvis lika mycket.

Det råder osäkerheter om hur starka bestånd av vitfisk som finns i Hjälmarén, dvs hur stor åtgärdspotentialen är. Yrkesfiskarna bedömer att gösen går över till att äta vitfisk när bestånden av nors sviktar vilket håller tillbaka vitfiskbestånden (Hans Johansson, Hjälmaréns fiskareförbund, pers. komm.). Braxenbeståndet bedöms som tämligen sparsamt, men mer storvuxet än tidigare. En anledning skulle kunna vara yrkesfiskarnas omfattande uttag av bl. a braxen för kräftbete (Per Nyberg, pers. komm.). Tidigare släpptes allt tillbaka. Används bifångst av vitfisk som kräftbete har ingen näringsexport uppnåtts. En uppskattning av bestånden storvuxen braxen skulle vara värdefull för att kunna avgöra om reduktionsfiske i Hjälmarén har någon åtgärdspotential.

Om man antar att man kan fiska upp hela den årliga fisktillväxten på knappt 2000 ton/år (**Tab. 1**) bortförs knappt 20 ton fosfor/år. Det motsvarar mellan 5 och 10 % av internbelastningen på 264 ton fosfor/år. Antaget att internbelastningen måste halveras för att nå miljökvalitetsmålen innebär det att ett reduktionsfiske, förutom andra positiva effekter på ekosystemet, inte som ensam åtgärd klarar att undandra den mängd fosfor det handlar om (100–150 ton fosfor/år), utan 10–20% av detta. Men efter ett par decennier av maximalt fiskuttag (både kommersiellt värdefulla arter som gös och kräfta och i form av "vitfisk" har ett ackumulerade uttag på 400 ton fosfor skett (20 år å 20 ton/fosfor år). Givet andra fosforflöden lika har då underlaget från vilket internbelastningen drivs minskat med 20 %.

Om man skulle använda sig av ett reduktionsfiske som metod att minska näringsnivån i Hjälmarén och om man väljer att röta den erhållna fångsten genereras koldioxidemissioner i samband med

båttransporter till och från fiskeplatserna, vid infrysning av fångsten samt vid transport av fisken till en biogasanläggning. Vid biogasanläggningen genereras ett bränsle, metangas vilket i denna analys betraktas som ett negativt koldioxidutsläpp då det kan ersätta fossila drivmedel, exempelvis bensin som fordonsbränsle. Vid ett försök vid KTH (Shi, 2012) med rötning av avloppsslam, fiskrens och bifångster från yrkesfiske erhöles ett utbyte motsvarande 0,5 m³ gas per kilo våtvikt. Om man antar att fångsten från reduktionsfisket kan transporteras och omhändertas vid en biogasanläggning i Örebro erhöles en besparing av koldioxidemissioner av storleksordningen 40 kg koldioxid/kg fosfor. Om man antar att hälften av den årliga fisktillväxten på 1 800 ton skulle rötas till biogas erhöles en koldioxidbesparing på 360 ton/år. Om fångsten från reduktionsfisket istället skulle saluföras som livsmedel eller djurfoder erhöles också potentiellt en koldioxidbesparing genom att andra produkter ersätts.

I **Tabell 2** sammanfattas olika aspekter av reduktionsfiske

Tabell 2. *Kostnad, potential och sidoeffekter av reduktionsfiske.*

Kostnad per kg avskilt fosfor (SEK)	1 500–2 000
Potential i Hjälmarén (ton fosfor/år)	20
Positiva sidoeffekter	Upptagen fisk kan användas för olika ändamål, t.ex. som foder eller som substrat för biogasproduktion. Åtgärden ger ett positivt koldioxidnetto
Negativa sidoeffekter	Rovfiskbestånden i Hjälmarén kan komma att minska av åtgärden och leda till sämre förutsättningar för yrkes- och fritidsfiske

Aluminiumbehandling

Metoden syftar till att öka sedimentens fosforbindande förmåga genom att applicera en så kallad aluminiumflock i, eller på, sedimentytan. Fosfor som med tiden frigörs i sedimenten binds istället till aluminiumflocken. Bindningen anses tillräckligt stabil för att den bundna fosfor ska begravas för gott i sedimenten. Tidigare undersökningar har kvantifierat det läckagebenägna fosforförrådet i Hjälmaréns sediment till cirka 4 000 ton (Malmaeus & Rydin 2015). Modellberäkningar (Malmaeus & Karlsson, 2015) har indikerat att det räcker halvera internbelastningen (tillsammans med minskad externbelastning) för att nå målet god vattenkvalitet i Hjälmarén. Här utvecklas kostnadsbedömningen och vilken dos som skulle krävas för att läckaget ska halveras.

Kemikaliekostnaden för aluminiumlösningen är ca 20 000 kr/ton. Med en bindningseffektivitet på ca 10:1 (Rydin et al., 2000) innebär det en kemikaliekostnad för att binda fosfor som annars skulle ha frigjorts till vattenmassan på 200 000 kr/ton fosfor.

Kostnaden för att tillföra lösningen bör kunna bli relativt låga pga. stordriftsfördelar, avsett om tillsatsen sker genom sedimentinjicering eller tillsatts till vattenmassan. Tillsatskostnaden blir av allt att döma lägre om den görs till vattnet jämfört med sedimentinjicering. Tillsatskostnaden till vattenmassan bedöms till att motsvara den för kemikalier; 200 000 kr/ton fosfor. Summan blir 400 000kr/ton P. Metoden för sedimentinjicering utvecklas och bör kunna nå ner till 500 000 kr/ton fosfor; summa 700 000 kr/ton fosfor.

Det totala förrådet läckagebenägen sedimentfosfor i Hjälmarén är 4330 ton, fördelat på Storhjelmarén (3000 ton), Södra Hjälmarén (1000 ton) och Östra Hjälmarén (330 ton) (Malmaeus & Rydin 2015). Hälften av denna fosfor är bundet till oxiderat järn, vilket är en stabil bindning så länge syrgastillgången är god i de översta sedimentlagren där detta fosforförråd finns lagrat. Med den kontinuerliga nybildningen av sediment, med ett visst järninnehåll, kan nya ytsedimentlager binda mobiliserad fosfat från djupare sedimentlager, varefter djupare sedimentlager tappar den förmågan pga. av syrgasbrist. Men av allt att döma är inte järntillgången tillräcklig för att binda den fosfor som frigörs vid mineraliseringen av det organiska materialet. Vore den det borde internbelastningen utebli och järnfosforbildningen fortgå.

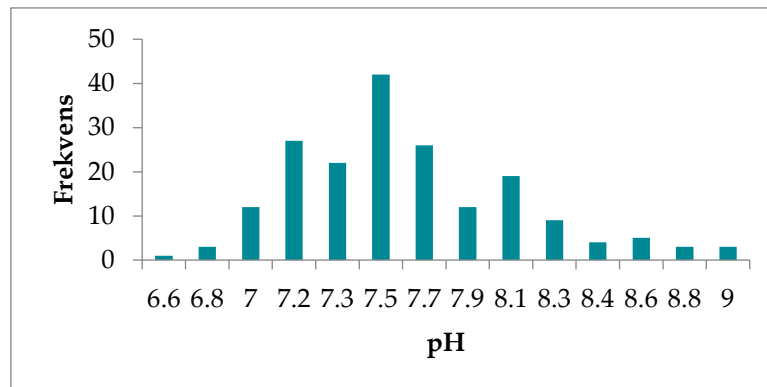
Vid dosering av aluminium till övergödda sjöars sediment inkluderas järnbunden fosfor i den läckagebenägna fosfor som aluminiumdosen baseras på. Ofta är den järnbundna fosforpoolen liten då sedimenten i övergödda sjöar regelbundet blir reducerad. Räknas den järnbundna fosfor in i al doseringen, och antaget att det krävs 10 ggr mer al (viktbasis) än den fosfor som ska bindas (Rydin m fl. 2000), åtgår cirka 20 000 ton aluminium för att behandla hälften av Hjelmaréns bottenyta. Men kan den järnbundna fosforpoolen anses stabil efter en aluminiumtillsats, bör doseringen kunna reduceras till att omfatta den läckagebenägna organiska fosforpoolen, vilken utgör halva den totala läckagebenägna fosforpoolen (Malmaeus & Rydin 2015). Den mängden motsvarar en dos på 52 g aluminium/m² och om aktuell yta för behandling är cirka 200 km², behöver således cirka 10 000 ton aluminium doseras. Den dosen är alltså en engångsdos som räcker för hela det befintliga förrådet av organiskt bunden sedimentfosfor som kommer att mineraliseras och läcka som löst fosfor till vattenmassan. En dos på 50 g aluminium/m² är vanlig dos för behandling av mindre sjöar med ett måttligt förråd av läckagebenägen fosfor. Med stordriftsfördelar bör kostnaden för åtgärden i Hjelmarén ligga mellan 0,4 och 0,7 MSEK per ton läckagebenägen fosfor, beroende på metod för tillsatsen. Det totala förrådet av mobiliserbara organisk sedimentfosfor i Hjelmaréns bassänger är 2 165 ton, vilket ger ett totalpris på mellan 900 och 1500 MSEK. Behandlas halva ytan, vilket enligt modellberäkningar (Malmaeus & Karlsson, 2015) räcker blir kostnaden mellan 450 och 750 MSEK.

Potentiellt negativ påverkan av en aluminiumbehandling kan delas in i fysiska respektive toxiska effekter. De fysiska effekterna är exempelvis att bottenfauna kan få problem att gräva sig genom aluminiumlagret samt att plankton kan flockas ut. Exempelvis minskade djurplanktons täthet och diversitet omedelbart efter behandling med aluminium i Newman Lake i Washington, USA (Shumaker et al., 1993). Efter två månader hade systemet återhämtat sig. Liknande återhämtningsförlopp har observerats efter behandling av Liberty Lake, Washington, USA (Gibbons et al., 1984). Växtplankton påverkas på ett likartat sätt och flockas ut i samband med Al-fällning men återhämtar sig snabbt (Gibbons et al., 1984)

Bottenlevande djur är generellt okänsliga för aluminiumtillförsel (Narf, 1990; Doke et al., 1995). Höga aluminiumkoncentrationer i vattenmassan är emellertid toxiskt för fisk vid låga pH-värden (Hyne & Wilson, 1997). Om pH understiger 6 kan aluminium flockas ut på gälar och hämma syreupptagningsförmågan. Vid de neutrala till basiska pH-värden (min 6,6) som råder i det välbuffrade Hjelmarvattnet är dock denna risk obefintlig.

Undersökningar i Danmark visar att både naturligt och tillsatt aluminium också kan gå i lösning vid höga (>9,5) pH värden i grunda sjöar (Reitzel m fl. 2013). När pH sedan sjunker återbildas aluminiumhydroxidflocken som sedimenterar ut igen. pH-värdet i *ytvattnet* i sjöar stiger normalt under produktionsperioden i samband med algers fotosyntes medan ökningen i *djupvattnet* under det fotosyntetiserande skiktet är betydligt lägre. Sediment är så pass välbuffrade att vattenmassans pH inte ens på lång sikt påverkar det. Aluminiumbehandling genom sedimentinjicering riskerar således inte att löst aluminium mobiliseras till vattenmassan. Om man däremot överväger

aluminiumbehandling i vattenmassan är pH i djupvattnet en viktig faktor att beakta. I **Figur 7** redovisas ett histogram över uppmätta pH-värden i Hjälmarens djupvatten (≥ 10 meters vattendjup) för perioden 1974–2013.



Figur 7. *Frekvensfördelning över uppmätta pH-värden i Storhjälmarens djupvatten (≥ 10 meters vattendjup). Data från Hjvovf.*

pH-värdet har som maximalt vid ett mätillfälle uppnått 9,0. Slutsatsen blir att det inte föreligger någon risk att en aluminiumbehandling skulle leda till skadliga nivåer av löst aluminium i vattenmassan. Internationella erfarenheter från behandlingar av hundratals sjöar (Huser et al., 2016) talar heller inte för att det föreligger några nämnvärda risker för människors hälsa eller påverkan på miljön av aluminiumbehandlingar av sjöar.

Som ovan redovisats behöver åtminstone storleksordningen 1 000 ton fosfor kvarhållas i sedimenten, varför en mängd på cirka 100 000 ton aluminiumsalt behöver doseras. Som jämförelse kan nämnas att Örebro kommunala reningsverk, Skebäckverket, årligen omsätter cirka 1000 ton fällningskemikalier¹. Den prognosticerade satsningen av aluminiumsalt i Hjälmarens motsvarar således cirka 100 årsförbrukningar av fällningskemikalier vid Skebäckverket vid nuvarande antal anslutna personekvivalenter. En jämförelse kan också göras mellan effektiviteten att fälla fosfor med kemisk fällning i avloppsreningsverk, där ett viktförhållande mellan Al (eller Fe) och fosfor på runt 2:1 erhålls. När fällningen görs i sediment blir utbytet 5 gånger sämre; 10:1. Slammet efter fosforfällning i avloppsreningsverk innebär ett potentiellt kvittblivningsproblem men också en möjlighet till återanvändning, som inte uppstår när fosfor binds i sedimenten.

För att immobilisera 1 000 ton fosfor behöver aluminium doseras i en omfattning som orsakar omkring 75 000 ton koldioxidutsläpp. För att sätta denna koldioxidmängd i perspektiv kan detta jämföras med de samlade utsläppen av klimatpåverkande gaser från Örebro län vilka under 2016 uppgick till 1,4 miljoner ton (detta var 30 000 ton högre jämfört med 2015). Enligt Örebro läns energi- och klimatprogram 2017–2020² ska utsläppen av växthusgaser i Örebro län år 2030 vara 60 % lägre än 2005 års nivåer (då ca 1,8 miljoner ton), d.v.s. nå ner till nivån ca 1 miljoner ton vilket motsvarar en minskning med ungefär 30 000 ton per år.

¹ <https://www.orebro.se/download/18.5720281715774fdcd2b27ce/1475649283174/Skeb%C3%A4ck%202015.pdf>

² <https://www.regionorebrolan.se/sv/Regional-utveckling/Energi-klimat-och-miljo/1Energi-och-klimatprogram-for-Orebro-lan-2013-2016/>

Koldioxidutsläppen som orsakas av aluminiumbehandlingen motsvarar alltså i storleksordningen 5 % av de samlade utsläppen från Örebro län under ett år, och samtidigt ca 2,5 gånger mer än den årliga minskning som krävs för att uppnå målet enligt energi- och klimatprogrammet.

Utsläppen kan också jämföras med koldioxidutsläppen per capita i Sverige vilka uppgår till ca 5 ton per person och år (sett ur ett produktionsperspektiv), d.v.s. utsläppen som en aluminiumbehandling genererar motsvarar omkring 30 000 personers årliga utsläpp. Priset på koldioxidutsläpp i EU:s handelssystem ETS ligger för närvarande runt 200 SEK per ton vilket ger en fingervisning om den samhällsekonomiska värderingen. 75 000 ton koldioxid motsvarar ca 15 miljoner SEK enligt denna värdering.³

Notera att koldioxidutsläppen i samband med aluminiumbehandling i vår beräkning är en engångshändelse, till skillnad från de siffror vi jämför med som gäller årliga utsläpp.

I **Tabell 3** sammanfattas olika aspekter av aluminiumbehandling

Tabell 3. *Kostnad, potential och sidoeffekter av aluminiumbehandling.*

Kostnad per kg avskilt fosfor (SEK)	400–700
Potential i Hjälmarén (ton fosfor)	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)
Negativa sidoeffekter	Åtgärden är resurskrävande och leder till relativt kraftiga koldioxidutsläpp vid framställning av fällningskemikalierna

³ ETS-systemet har dock kritiserats för att vara ineffektivt vilket talar för att priset på CO₂-utsläpp borde vara högre än nuvarande nivåer. <http://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/society/20170213STO62208/darfor-kravs-reform-av-eu-s-system-for-handel-med-utslappsraetter-ets>

Lågflödesmuddring

Företaget Teknikmarknad, en avknoppning från Kungliga tekniska högskolan, har utvecklat en metod för att avlägsna det näringsrika, övre sedimentlagret, från djupare botten genom så kallad lågflödesmuddring, så kallad "skimming". Det saknas ett bra ord för detta på svenska. I vissa sjötyper är den så kallade sedimentfokuseringen betydande, vilket innebär att det näringsrika, finpartikulära materialet med vattenrörelsernas hjälp fokuseras till det djupare området och som då kan "skördas" av utrustningen. I andra system är den fokuseringsprocessen inte betydande utan det näringsrika materialet, främst växtplankton, blir kvar på de botten där det ursprungligen sedimenterade. Detta fenomen får betydelse för hur stora ytor muddringen måste ske på för att få genomslag på internbelastningen. Dessutom avgör den läckagebenägna fosforns utbredning i sedimentens djupled hur mycket av sedimenten som måste muddras bort för att man ska ha tagit bort majoriteten av den läckagebenägna fosfor.

I Hjälmarén sker ingen påtaglig fokusering av finpartikulärt, fosforrikt, material till vissa delar av sjön. Snarare är fördelningen av läckagebenägen fosfor förvånansvärt homogen inom de olika delarna av Hjälmarén (Storhjälmaren, Östra Hjälmarén). Det innebär att effekten på internbelastningen blir proportionell mot ytan som muddrats.

En överslagsberäkning av den läckagebenägna fosfor i Hjälmaréns sediment visar att majoriteten av den läckagebenägna sedimentfosfor (ca 10 g fosfor/m²) återfinns i den översta dm sediment (Malmaeus & Rydin 2015). Se även Rydin (2016) för diskussion om fördelningen hur den läckagebenägna fosfor är fördelad i närliggande Öljarens sedimentprofil. Det innebär att om den översta dm muddras över 10 m² upptar den volymen 1 m³ (förutsatt att inget sjövattnet sugas med) och den volymen innehåller 0,1 kg läckagebenägen fosfor. För att avlägsna 1 000 ton mobil fosfor från sedimenten behöver enligt denna kalkyl 10 Mm³ ytliga sedimentlager muddras bort.

Det är i nuläget svårt att uppskatta kostnaden för att dels lågflödesmuddra och dels hantera muddermassorna i större skala innan tekniken har utvecklats ytterligare och blivit kommersiellt gångbar. En handfull aktörer är involverade i olika lågflödesmuddringsprojekt i Sverige som är av försökskaraktär (Jenny Herbertsson, Katrineholms kommun, pers. komm.).

Det finns flera attraktiva sidoeffekter av att lågflödesmuddra, förutom export av den läckagebenägna fosfor. Syretärande material förs bort (även om syretärande sediment inte är ett primärt problem i Hjälmarén) och de relativt rena sedimenten (Hjälmaréns sediment bedöms inte vara påtagligt kontaminerade av miljöfarliga ämnen) kan läggas på närliggande åker eller skogsmark, vilket möjliggör en viss tillförsel av näringsämnen. Återföringen av fosfor till jordbruksmark innebär ett kretslopp av fosfor. Värdena av dessa positiva sidoeffekter är svåra att kvantifiera och ingår inte i beräkningarna ovan.

Det är i teorin möjligt att samla in majoriteten av den läckagebenägna fosfor med lågflödesmuddring. En komplicerande faktor av metoden i sjöar där sedimentfokuseringseffekten är blygsam är om den används på stora ytor eller över lång tid är att en redan muddrad yta kommer att få nya lager med läckagebenägen fosfor i form av planktonblomningar som drivs av internbelastning från omuddrade ytor. På så vis omfördelas fosfor från omuddrade till muddrade ytor. Men totalt uppnås ändå en bortförsel av läckagebenägen fosfor. Sedan är det kanske ett praktiskt problem att muddringen behöver vara återkommande och en totalt sett större yta behöver muddras.

I **Tabell 4** sammanfattas olika aspekter av lågflödesmuddring

Tabell 4. *Kostnad, potential och sidoeffekter av lågflödesmuddring.*

Kostnad per kg avskilt fosfor (SEK)	Oklar
Potential i Hjälmarén (ton fosfor)	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)
Positiva sidoeffekter	Åtgärden kan leda till jordförbättring på omgivande åkermarker om det är praktiskt möjligt att genomföra

Konventionell muddring

Konventionell sug- eller grävuddring utförs rutinmässigt i samband med undervattensarbeten eller för att säkerställa farledsdjup (Karlsson & Viktor, 2015). Muddring är också en relativt vanlig metod för att omhänderta sediment som är förorenade av miljöfarliga ämnen (Elander & Jersak, 2017). Som åtgärd för att reducera tillförsel av fosfor är dock muddring en mindre beprövad metod. Delar av sjön Trummen i Växjö kommun muddrades så tidigt som 1970. Därefter har även andra sjöar runt Växjö (Växjösjön och Södra Bergundasjön) muddrats under 1990-talet.

Om man skulle använda sig av konventionell muddring som metod för att minska internbelastningen i Storhjälmaren och Östra Hjälmarén och muddrar hälften av den aktuella bottenarealen ned till 10 cm sedimentdjup genereras storleksordningen 20 Mm³ muddermassor med cirka 85 % vattenhalt som behöver omhändertas på land. 20 Mm³ muddermassor är att betrakta som en stor mängd. Som jämförelse kan exempelvis nämnas den pågående operationen att muddra farlederna i Mälaren för att möjliggöra att fartyg med större djupgående än tidigare kan anlöpa hamnarna i Köping och Västerås. Mark- och miljödomstolen har efter en lång tillståndsprocess meddelat tillstånd för vattenverksamhet och att muddra 1 Mm³. För utbyggnaden av Luleå hamn och farleden till Luleå har tillstånd erhållits för att dumpa 20 Mm³ rena muddermassor i havet. Muddermassorna från de ytliga sedimentlagren i Hjälmarén skulle eventuellt kunna användas som jordförbättringsmedel efter avvattning förutsatt att de inte är kontaminerade av miljöfarliga ämnen. Det finns såvitt känt är inga heltäckande undersökningar av Hjälmarsedimentens föroreningsinnehåll som utförts under senare år men i tidigare studier (Håkanson, 1978) var halter av undersökta ämnen låg och det finns inget som talar för att situationen skulle vara annorlunda idag i Storhjälmarens och Östra Hjälmarens ackumulationssediment.

Kostnadsbilden för att genomföra en konventionell muddring är svår att bedöma. En tumregel vid muddring av förorenade sediment är 850 kr/m³ (Elander & Jersak, 2017) men där ingår kostnader för rening av överskottsvatten och kvittblivning av miljöfarliga ämnen. Om man antar att muddring i Hjälmarén skulle kunna genomföras till en kostnad av 100 kr/m³ så skulle kostnaden för hela åtgärden hamna runt 2 miljarder SEK.

Negativa sidoeffekter av muddring är att de kräver ytor på land för att omhänderta materialet och att muddring i sig är resurskrävande och förbrukar drivmedel för upptagning, transport och kvittblivning av muddermassor. Vid en LCA-studie av muddring i Göteborgs hamn (Thulin, 2018) beräknades koldioxidemissionen per m³, vid transport från kaj till deponi (50 km) till 4 kg. Om 10 Mm³ antas transporteras på detta sätt erhålles en koldioxidemission på 40 000 ton, att jämföra med 75 000 ton vid aluminiumbehandlingsscenariot men då skall man betänka att koldioxidemissionen vid själva muddringen och transporten på pråm till kaj inte är inräknad. Å andra sidan är det kanske inte nödvändigt att transportera muddermassorna 50 km innan de kan deponeras. Vid muddring sker ofrånkomligen ett visst spill som kan leda till grumling av omgivande vattenområden. Effekten av detta är normalt kortvarig och kan begränsas med skyddsåtgärder.

Det finns få eller inga exempel på där grumlingseffekter i samband med muddring lett till negativa ekosystemeffekter (Karlsson & Viktor, 2015 med referenser däri).

I **Tabell 5** sammanfattas olika aspekter av konventionell muddring

Tabell 5. *Kostnad, potential och sidoeffekter av konventionell muddring.*

Kostnad per kg avskilt fosfor (SEK)	1 000 (mycket osäkert värde)
Potential i Hjälmaren (ton fosfor)	4 000 (i princip hela förrådet av mobil fosfor i sedimenten)
Negativa sidoeffekter	Åtgärden är resurskrävande och leder till relativt kraftiga koldioxidutsläpp vid upptag och transporter av muddermassor
Positiva sidoeffekter	Åtgärden kan leda till jordförbättring på omgivande åkermarker om det är praktiskt möjligt att genomföra

Övriga metoder

- Syresättning/omblandning: Syresättningen av Hjälmarens bottenvatten och ytsediment är av allt att döma inte den process som reglerar fosforfrigörelsen från sjöns sediment. Råder det ett generellt överskott av syrgas i bottenvattnet kommer inte ytterligare tillförsel öka fosforretentionen.
- Vandrarmusslan (*Dreissena Polymorpha*) är en invasiv art som har nått Hjälmaren. Arten koloniserar hårda substrat och kan bilda täta bestånd. Den har förmågan att filtrera stora volymer vatten om bara musseltätheten är hög. Vandrarmusslan i Ekoln (Mälaren) beräknades filtrerar hela Ekolns vattenvolym på drygt en vecka och binda upp signifikanta mängder fosfor (och kväve) som musselbiomassa (Goedkoop m fl. 2009). Senare försök att odla vandrarmussla i Ekoln fungerade i princip bra, men försöken har inte utvärderats kvantitativt (Willem Goedkoop, SLU, pers. komm.)
- Hypolimnionavtappning: Halterna av fosfor stiger inte till höga nivåer i Hjälmarens bottenvatten pga. av att sjön blandas om regelbundet, vilket är en förutsättning för att metoden ska kunna öka exporten av fosfor nedströms.
- Fällning med kalkbaserade ämnen: Under utveckling.
- Fällning med Järn: Under utveckling.
- Fällning med Phoslock© bildar en fosfatbindande barriär på sedimentytan som består av bentonitlera och lantan som binder fosfor. När det tillsätts i vatten bildas en slurry som binder in fosfor medan det sjunker till botten. Väl på botten lägger det sig som ett lock på ett par millimeter på sedimentytan där fosforbindningen till lantan kan fortsätta. Bindningen mellan lantan och fosfat är stark och i teorin ska varje tillsatt lantanjon (La^{3+}) kunna binda en fosfatjon (PO_4^{3-}), d.v.s. ett 1:1 förhållande mellan fosfat och lantan. Precis som för aluminiumbehandling spelar inte syrgassituationen någon roll för bindningen till fosfor. Leran håller 5 % viktsprocent lantan, och man beräknar att 1 ton Phoslock© binder upp till 11 kg fosfatfosfor.

Juridiska aspekter

Rättsläget vad gäller åtgärder mot internbelastning är oklart. Havs- och Vattenmyndigheten (HaV) har påbörjat ett arbete med att ta fram en vägledning i frågan. De största erfarenheterna när det gäller aluminiumbehandlingsanläggningar finns i Stockholm med omnejd. Här har ett tiotal sjöar behandlats sedan slutet av 1960-talet. Kommunernas miljöförvaltningar har varit huvudmän biträdade av de kommunala vatten- och avloppsbolagen. Anmälan till Länsstyrelsen har gjorts inom ramen för ett så kallat 12:6-förfarande.

I Växjö kommun har man valt en annan strategi och frivilligt valt att ansöka om och erhållit ett tillstånd av mark- och miljödomstolen vid Växjö tingsrätt för miljöfarlig verksamhet. Förfarandet motiverades av att man parallellt med aluminiumbehandlingen även genomförde andra åtgärder t.ex. muddring som det finns en praxis att pröva som vattenverksamhet. Det lutar i dagsläget åt att HaV framledes generellt kommer att förordna en prövning enligt miljöbalken för åtgärder mot internbelastning (Robert Almstrand, pers. komm.). Länsstyrelserna i Stockholm och Örebro bedömer dock att Al behandling av sjöar inte kan prövas som miljöfarlig verksamhet enligt nuvarande lagstiftning.

Om man skulle använda sig av konventionell muddring som åtgärd för att reducera effekter av internbelastning kan man utgå från att det kommer att krävas ett tillstånd för vattenverksamhet, i synnerhet om de blivande muddermassorna är kontaminerande av andra miljöfarliga ämnen. I det fallet kan man förvänta sig en relativt omfattande och komplicerad tillståndsprocess där hållbara lösningar för avvattning, omhändertagande och kvittblivning av muddermassor behöver diskuteras. Vilken form av tillstånd den hittills i större skala otestade metoden att lågflödesmuddra och sprida muddermassorna som jordförbättring och gödsel på omgivande åkermark är oklart.

Metoden reduktionsfiske skulle sannolikt inte kräva något miljötillstånd. Däremot är det rimligt att anta att det skulle kräva någon form av koncensusbeslut bland de fiskerättsinnehavare som påverkas av åtgärden. Det är även rimligt att anta att naturvårdande myndigheter skulle kunna ha en synpunkt om de anser att den biologiska mångfalden kan påverkas av åtgärden.

En annan juridisk aspekt rör rådigheten av att genomföra åtgärder. I Stockholm har man valt att konsultera alla berörda mark- och vattenägare och i de enskilda fall där någon motsatt sig åtgärden har man valt att inte behandla dessa ytor även om markägaren i slutändan ändå givetvis påverkats av att vattenkvaliteten i vattenområdet ändrats. I Hjälmarén ligger huvuddelen av de ytor som skulle bli aktuella för åtgärder inom så kallat allmänt vatten, d.v.s. de är inte knutna till specifika fastigheter. Det gör att rådighetsfrågan måhända är av mindre dignitet i detta fall.

Sammanfattande slutsatser

- Det är oklart vad som är en naturlig näringsnivå i Hjälmarén. Sjön är till sin karaktär som grund lerslättisjö naturligt näringsrik men det har historiskt också förekommit en betydande antropogen belastning innan modern VA-teknik infördes i tätorterna och lantbruket vidtog åtgärder för att minska näringsläckaget från åkrar och djurhållning.
- Vattennivån i sjön sänktes närmare två meter i slutet av 1800-talet varvid dess yta minskade med cirka 40 %. Det är en komplicerande faktor vid bedömningen av vad som är ett eftersträvansvärt näringstillstånd.
- Inom den svenska vattenförvaltningen har man beslutat att för att uppnå god ekologisk status behöver fosforkoncentrationen i sjön minska från dagens nivå på cirka 40 µg/l till cirka 20 µg/l.
- Massbalansberäkningar visar att en betydande andel, cirka 80 %, av den sammanlagda fosfortillförseln emanerar från frisättning av fosfor från bottensedimenten, så kallad internbelastning. För att uppnå miljömålet är det nödvändigt att vidta åtgärder som kraftigt reducerar internbelastningen.
- Den enda åtgärden som kan kostnadsuppskattas idag och som har en åtgärdspotential som innebär att internbelastningen upphör är aluminiumbehandling. Med en Al dos på ca 50 g Al/m² binds organiskt bunden fosfor (5 g fosfor/m²) varefter den immobiliseras i sedimenten och internbelastningen upphör. Med stordriftsfördelar bör kostnaden för åtgärden nå ner till 0,4 MSEK per ton läckagebenägen fosfor. Det totala förrådet av mobiliserbar organisk fosfor i Hjälmarens botten är drygt 2 000 ton, vilket ger ett totalpris på 900 MSEK.
- Det finns inget som talar för att en aluminiumbehandling skulle ge upphov till några nämnvärda toxiska bieffekter eller andra olägenheter. pH-värdet i Hjälmarén är vare sig så pass lågt eller högt att aluminium skulle kunna lösas ut i skadliga koncentrationer för det akvatiska djurlivet. Fler än hundra övergödda sjöar har sedan 1960-talet aluminiumbehandlats. Det finns inga rapporterade av olägenheter av betydelse för människors hälsa eller de akvatiska ekosystemens struktur och funktion.
- Vid en fullskalebehandling av Hjälmarén åtgår betydande mängder fällningskemikalier, storleksordningen 100 000 ton, vilket ungefärligen motsvarar 100 årsförbrukningar av fällningskemikalier vid Örebro kommunala reningsverk, Skebäckverket.
- Framställning, transport och spridning av fällningskemikalier vid en aluminiumbehandling beräknas ge upphov till storleksordningen 75 000 ton koldioxid. Det motsvarar ungefärligen 10 % av Örebro läns sammanlagda årliga utsläpp och skulle med dagens system för handel med utsläppsrätter värderas till 30 MSEK.
- Om åtgärder mot internbelastningen får avsedd effekt kommer siktdjupet, ett mått på vattnets klarhet, öka med cirka en meter och primärproduktionen av växtplankton minska med cirka 50 %. Frekvensen av besvärliga algbloomingar kommer sannolikt att minska men de är till sin natur svårförutsägbara då de förutom näringstillgång även begränsas av andra miljöfaktorer.

- Den sammanlagda fiskproduktionen bedöms minska med storleksordningen 50 % om åtgärder genomförs. Hur det slår mellan olika arter är svårare att förutsäga. Det finns dock en risk att beståndet av gös minskar. Gösen är en fiskart som gynnas av näringsrika förhållanden och har genom god syn en konkurrensfördel i grumliga vatten. Gösens stapelföda är nors. Norsen skulle å andra sidan eventuellt kunna gynnas av en minskad näringstillförsel, vilket skulle minska risken för episoder med syrgasbrist i vattnet, som den är känslig för. Sambanden är således komplexa.
- Rättsläget när det gäller åtgärder mot internbelastning är oklart. I Stockholms län där man under årens lopp aluminiumbehandlat ett tiotal sjöar har åtgärden inte krävt något tillstånd enligt miljöbalken. I Kronobergs län har Växjö kommun nyligen ansökt om och erhållit ett tillstånd för miljöfarlig verksamhet från Mark- och miljödomstolen. Länsstyrelsen i Örebro län bedömer att aluminiumbehandling inte kan prövas som miljöfarlig verksamhet. HaV utreder för närvarande frågan och har för avsikt att komma med en vägledning.

Referenser

Bernes, C., Carpenter, S.R., Gårdmark, A., Larsson, P., Persson, L., Skov, C., Speed, J.D.M. & Van Donk, E., 2015. What is the influence of a reduction of planktivorous and benthivorous fish on water quality in temperate eutrophic lakes? A systematic review. *Environmental Evidence* 4: 7.

Degerman, E., Hammar, J., Nyberg, P. & Svärdson, G., 2001. Human impact on the fish diversity in the four largest lakes of Sweden. *Ambio* 30:522-528.

Doke, J.L., Funk, W.H, Juul, S.T.J., and B.C. Moore. 1995. Habitat availability and benthic invertebrate population changes following alum treatment and hypolimnetic oxygenation in Newman Lake, Washington. *Journal of Freshwater Ecology*, Vol. 10(2): 87-102.

Downing, J.A., Plante, C. & Lalonde, S., 1990. Fish Production Correlated with Primary Productivity, not the Morphoedaphic Index. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47:1929–1936.

Elander, P. & Jersak, J., 2017. Fiberbankar i Norrland – Metoder för efterbehandling av fibersediment. Länsstyrelserna rapport 2017:1.

Gibbons, M.V., F.D. Woodwick, W.H. Funk and H.L. Gibbons. 1984. Effects of a multiphase restoration, particularly aluminum sulfate application, on the zooplankton community of a eutrophic lake in eastern Washington. *J. Fresh Water Ecol.* 2:393-404.

Goedkoop, W., Naddafi, R., Grandin, U., 2011. Retention of N and P by zebra mussels (*Dreissena polymorpha* Pallas) and its quantitative role in the nutrient budget of eutrophic Lake Ekoln, Sweden. *Biological Invasions*. DOI:10.1007/s10530-011-9950-9.

Hedré, A. 2018. Reduktionsfiske i Växjösjöarna. Slutredovisning av ett LOVA-projekt 2016–2018. Växjö kommun.

Huser, B.J. et al., 2016. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. *Water Research* 97: 122-132.

Hyne, R. V. & Wilson, S.P., 1997. Toxicity of acid-sulphate soil leachate and aluminium to the embryos and larvae of Australian bass (*Macquaria novemaculeata*) in estuarine water. *Environmental Pollution* 97:221-227.

Håkanson, L., 1978. Hjälmaren – en naturgeografisk beskrivning. SNV PM 1079.

Karlsson, M. & Viktor, T., 2015. Miljökonsekvenser av grumling vid muddring av Västerås hamn. IVL-rapport U5223.

Karlsson, M., Malmaeus, M., Baresel, C., Sivard, Å., Ericsson, T. & Grahn, O., 2012. Kostnadseffektivitet i åtgärder mot övergödning – Fallstudie Gävle fjärdar, IVL-rapport B2078.

Lst, 1984. Utredning om fiskdöd i Hjälmaren 1980 och 1982. Länsstyrelsen i Örebro län Naturvårdsenheten publikation 1984:9.

Malmaeus, M. & Karlsson, M., 2015. Fosfordynamik i Hjälmaren- Resultat av simuleringar. IVL-rapport C72.



- Malmaeus, M. & Rydin, E., 2015. Sedimentundersökning i Hjälmaren. IVL-rapport C136.
- Narf, R. P., 1990 Interactions of Chironomidae and Chaoboridae (Diptera) with aluminum sulfate treated lake sediments. *Lake and Reservoir Management* 6(1):33-42.
- NV, 1996. Hjälmaren under 29 år - Undersökningar inom PMK 1965–1994. Naturvårdsverket rapport 4535.
- Peters, R.H., 1986. The role of prediction in limnology. *Limnol. Oceanogr.* 31:1143-1159.
- Reitzel, K., Jensen, H.S., Egemose, S., 2013. pH dependent dissolution of sediment aluminium in six Danish lakes treated with aluminium. *Water Research* 47, 1409–1420.
- Rydin, E., 2016. Öljaren – Sedimentundersökning 2015. Naturvatten i Roslagen AB. Rapport 2016:24.
- Rydin, E, Huser, B. & Welch, E., 2000. Amount of phosphorus inactivated by alum treatments in Washington lakes. *Limnology and Oceanography* 45(1):226–230.
- Sandström, O., Grahn, O., Karlsson, M., Larsson, Å., Malmaeus, M. & Viktor T., 2015. Miljösituationen förr och nu i skogsindustrirecipienter - Bakgrundsrapport. IVL-rapport C115.
- Sandström, A. et al., 2016. Assessing the potential of remote sensing-derived water quality data to explain variations in fish assemblages and to support fish status assessments in large lakes. *Hydrobiologia* 780: 71-84.
- Shumaker, R.J., W.H. Funk and B.C. Moore. 1993. Zooplankton response aluminum sulfate treatment of Newman Lake, Washington. *J. Fresh Water Ecol.* 8:375-387.
- Thulin, F., 2018. Livscykelanalys av förorenade sediment i samband med muddring. Magisterexamensarbete Blekinge tekniska högskola, 51 sid.
- Vilbaste, S. et al., 2016. Ecosystem services of Lake Vörtsjärv under multiple stress: a case study. *Hydrobiologia* 780: 145–159.

