



Läckagebenägen sedimentfosfor i Långsjön och Markusbölefjärden

Underlag för åtgärdsplanering



**Läckagebenägen sedimentfosfor i Långsjön och Markusbölefjärden
Underlag för åtgärdsplanering**

Författare: Anna Sjöberg, Emil Rydin & Ulf Lindqvist

Omslagsfoto: Miljöbyrån, Ålands landskapsregering

2024-03-20
Rapport 2024:7
Naturvatten i Roslagen AB
Norra Malmavägen 33
761 73 Norrtälje
0176 – 22 90 65

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	4
INLEDNING	5
UNDERSÖKNINGSOBJEKT	5
METODIK	6
PROVTAGNING	6
ANALYS OCH BERÄKNINGAR.....	8
ACKREDITERAD ANALYS	9
SEDIMENTUNDERSÖKNING – RESULTAT OCH DISKUSSION.....	9
SEDIMENTPROVTAGNING.....	9
VATTENHALT OCH ORGANISK ANDEL.....	9
OORGANISKA FOSFORFORMER.....	12
ORGANISKA FOSFORFORMER	16
TOTALFOSFORHALT.....	17
MÄNGD LÄCKAGEBENÄGEN FOSFOR.....	18
FOSFORMÄNGDERNAS FÖRDELNING.....	20
OSÄKERHETER I BEDÖMNINGARNA	21
UNDERLAG FÖR ALUMINIUMBEHANDLING	21
BEHANDLINGSYTOR	22
ALUMINIUMDOS	23
APPLICERINGSMETOD	26
ETABLERING.....	27
BUDGETERAD KOSTNAD.....	27
FÖRUTSÄTTNINGAR OCH GENERELLA REKOMMENDATIONER.....	27
REFERENSER	30
BILAGA 1. PROTOKOLL FRÅN SEDIMENTPROVTAGNING	

Sammanfattning

Föreliggande rapport redovisar resultat av sedimentundersökningar i övergödningsdrabbade Långsjön och Markusbölefjärden.

Undersökningarna utfördes år 2023 och syftar till att identifiera, kvantifiera och kartera läckagebenägen fosfor i sjöarnas bottenar, det vill säga ge kunskap om sedimentfosfor som med tiden kan komma att läcka till vattenmassan och därmed bidra till övergödning i de båda sjöarna och nedströms liggande vatten. I uppdraget ingick att upprätta underlag för åtgärd genom aluminiumbehandling av sjöarna. Utredningen utfördes av Naturvatten AB på uppdrag av och i samarbete med Miljöbyrån, Ålands landskapsregering.

Mängden läckagebenägen fosfor var måttligt hög i Långsjön ($6,6 \text{ g P/m}^2$) och hög i Markusbölefjärden (12 g P/m^2). Gemensamt för de båda sjöarna är att den mobila fosfor till stor del var järnbunden; en form som karakteriseras av att fosfor frisätts först i samband med låg redoxpotential. Det innebär att risken för betydande internbelastning är störst i samband med långvarig skiktning av vattenmassan, då syrgasbrist kan uppkomma vid bottenarna. Förhöjd fosforfrisättning kan också väntas ske under den varma årstiden då höga temperaturer leder till ökad mikrobiologisk aktivitet och effektiv mineralisering av fosforrikt organiskt material.

Aluminiumbehandling är en välbeprövad och kostnadseffektiv metod för åtgärd av förhöjd internbelastning och innebär att en tillsats av aluminium ger sedimenten förmåga att permanent fastlägga fosfat som annars skulle läcka från bottenarna. Mängden läckagebenägen fosfor uppvisar endast mindre variationer över de båda sjöarnas bottenar varför samma dos tillämpas i samtliga områden som föreslås för behandling. Den aluminiumdos som rekommenderas är 60 g/m^2 för båda sjöarna. Den lägre dos som föreslås för Markusbölefjärden, relativt sett den höga mängden mobil fosfor, motiveras av den höga andelen järnbunden fosfor och den begränsade risken för långvarig syrgasbrist vid sjöns förhållandevis grunda bottenar. Baserat på behandling av 65 ha bottenyta i Långsjön och 57 ha i Markusbölefjärden budgeteras kostnaden för åtgärden av Vattenresurs AB till 4,5 Mkr för Långsjön och 4,1 Mkr för Markusbölefjärden.

Som underlag för slutgiltiga beslut om kostnadseffektiva lokala åtgärder rekommenderas att en fosforbudget upprättas för de båda sjöarna. En sådan budget sätter den externa fosforbelastningen i relation till den interna, och utgör också underlag för att bedöma om påverkan från tillrinningsområdet ligger på en nivå som är långsiktigt hållbar i relation till miljö kvalitetsnorm god ekologisk status. För åtminstone Markusbölefjärden kan reduktionsfiske övervägas som inledande åtgärds metod för att bryta den interna fosforcirkulationen.

Inledning

Delar av den fosfor som tillförs en sjö fastläggs i bottenarna och sjön kommer därmed att fungera som en näringsfälla. I sjöar som under längre tid belastats av förhöjda fosformängder till följd av antropogen påverkan, exempelvis via jordbruk och enskilda avlopp, förmår sedimenten till slut inte kvarhålla fosfor som istället läcker tillbaka till vattenmassan och bidrar till övergödning. En förhöjd fosforfrisättning – en intern fosforbelastning – medför ofta att övergödda vatten inte återhämtar sig trots avlastning i extern näringstillförsel. Till följd av dessa interngödningsprocesser kvarstår då problematiken med höga fosforhalter i vattenmassan, algbloomingar och dåligt siktdjup. Flera metoder finns för åtgärd av en förhöjd intern fosforbelastning. Ett sätt att tillsätta fosforbindande ämnen som innebär att fosfor permanent binds in till sedimentet, och på så vis bryta återcirkulationen till vattenmassan.

Föreliggande rapport redovisar resultat av sedimentundersökningar i övergödningsdrabbade Långsjön och Markusbölefjärden. Undersökningarna utfördes år 2023 och syftar till att identifiera, kvantifiera och kartera läckagebenägen fosfor i sjöarnas bottenar, det vill säga ge kunskap om den fosfor som med tiden kan komma att läcka till vattenmassan och därmed bidra till övergödning i de båda sjöarna och nedströms liggande vatten. Uppdraget omfattade också att upprätta underlag för åtgärd genom aluminiumbehandling av sjöarna. Utredningen utfördes av Naturvatten AB på uppdrag av och i samarbete med Miljöbyrån, Ålands landskapsregering.

Undersökningsobjekt

Långsjön och Markusbölefjärden nyttjas som råvattentäkter av Ålands Vatten AB. De båda sjöarna stod tidigare i förbindelse med Lumparn, men avskildes 1971 från havet genom reglering via en damm vid Kaldersnäset, mellan Långsjön och Kaldersfjärden.

Långsjön är belägen i Finström och Jomala kommuner. Långsjön har en yta av cirka 143 ha och ett medel- och maxdjup av 6,3 m respektive 19,0 m (källa: Ålands Vatten AB). Sjöns nederbördsområde omfattar 17,1 km². Den externa fosforbelastningen beräknas till 335 kg/år med jordbruk som dominerande källa (källa: SMHI). Den näringsrika sjön har två distinkta djuphålor och drabbas återkommande av syrgasbrist i bottenvattnet. Mycket kraftigt förhöjda fosfatfosforhalter, uppemot 1800 µg/l, uppmäts återkommande i bottenvattnet vid sjöns djuphåla, något som påvisar en kraftig intern fosforbelastning. Långsjön bedöms ha otillfredsställande ekologisk status, baserat på status för bottenfauna och vattenväxter

perioden 2012-2018 (Ålands landskapsregering). Även totalfosfor uppvisar otillfredsställande status, medan fisk och växtplankton (klorofyll) indikerar ett mindre påverkat tillstånd, motsvarande god ekologisk status. Data från de senaste årens miljöövervakning (2017-2023) indikerar fortsatt otillfredsställande näringsstatus (Caroline Karlsson, personlig kommunikation).

Markusböleffjärden är belägen i Finström kommun och står åt söder i förbindelse med Långsjön via en igenväxande å. Sjön har en yta av cirka 156 ha och ett medel- och maxdjup av 5,5 m respektive 10,0 m (källa: Ålands Vatten AB). Den näringsrika sjön är polymiktisk (omblandas vid flera tillfällen per år) och drabbas sällan av långvarig syrgasbrist i bottenvattnet. Förhöjda fosfatfosforhalter, vid något tillfälle uppemot 770 µg/l men vanligare kring 150 µg/l, uppmäts återkommande i bottenvattnet vid sjöns djuphåla, något som påvisar en tidvis påtaglig intern fosforbelastning. Markusböleffjärden bedöms ha otillfredsställande ekologisk status, baserat på status för bottenfauna och vattenväxter perioden 2012-2018 (Ålands landskapsregering). Även totalfosfor uppvisar otillfredsställande status, medan fisk och växtplankton (klorofyll) indikerar ett mindre påverkat tillstånd, motsvarande hög eller god ekologisk status. Data från de senaste årens miljöövervakning (2017-2023) indikerar fortsatt otillfredsställande näringsstatus (Caroline Karlsson, personlig kommunikation). Sjöns nederbördsområde omfattar 12,2 km². Den externa fosforbelastningen beräknas till 165 kg/år med jordbruk som dominerande källa (SMHI).

Metodik

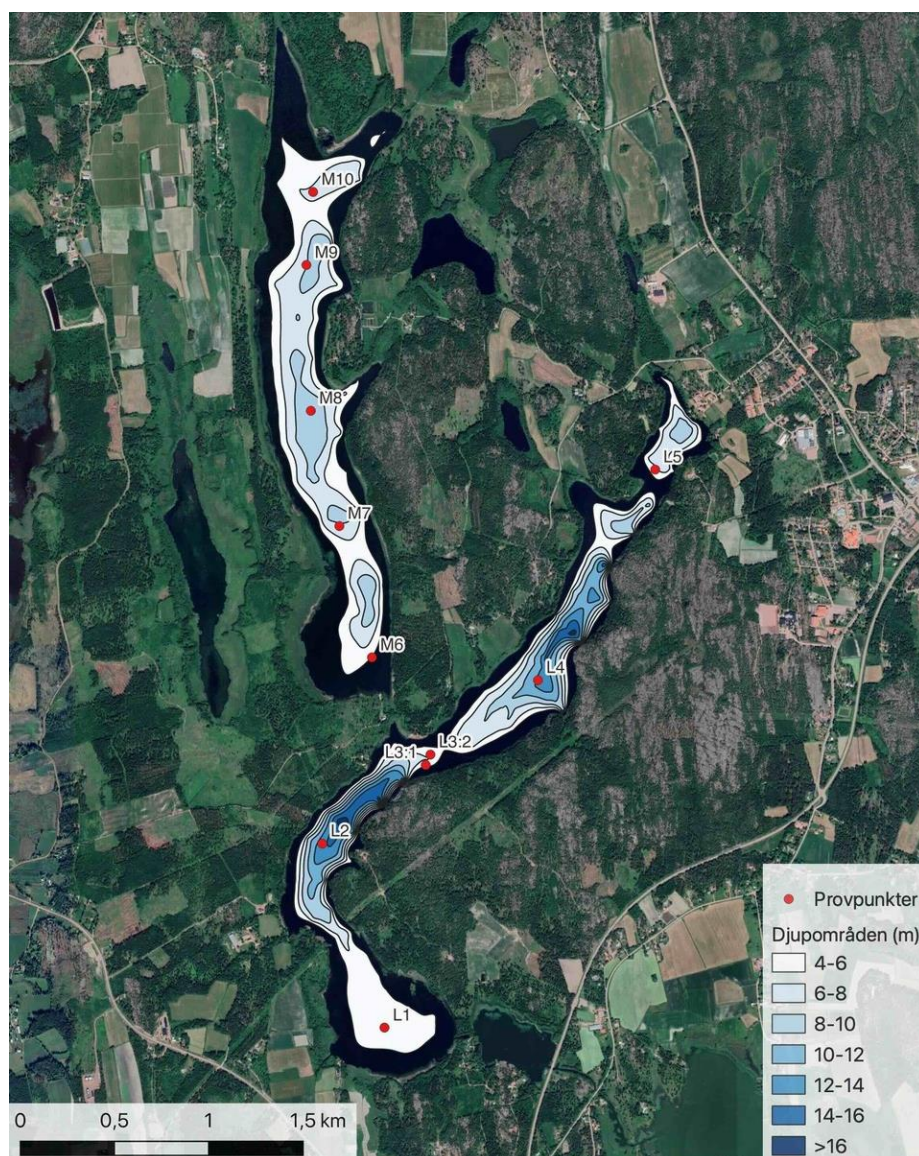
Provtagning

En plan för sedimentprovtagning togs fram av Naturvatten AB som vägledning för det fältarbete som utfördes av uppdragsgivaren genom Miljöbyrån. Som underlag användes befintliga djupkartor (Ålands Vatten AB 2003). Sedimentundersökningen omfattade 5 kärnor per sjö och planerades för att ge en representativ bild av läget i sjöarnas olika delar, samt nå ner tillräckligt långt i sedimenten för att få med lager som speglar den fosforhalt som kan anses permanent begravd.

Provtagningsstationernas lägen framgår nedan (Tabell 1, Figur 1). Som underlag visas den djupkarta som i efterhand upprättades av Miljöbyrån och Naturvatten AB, baserat på befintligt kartmaterial.

Tabell 1. Provtagningsstationer med djup (m) och position (WGS84) vid sedimentprovtagning i Långsjön och Markusbölefjärden, november 2023.

Sjö	Station	Djup m	Position (WGS84)	
			N	E
Långsjön	1	5	60,204989	19,937725
Långsjön	2	12	60,213726	19,931786
Långsjön	3:1	5	60,217463	19,941667
Långsjön	3:2	5	60,217955	19,942120
Långsjön	4	9	60,221488	19,952396
Långsjön	5	5	60,231488	19,963602
Markusbölefjärden	6	4	60,222571	19,936528
Markusbölefjärden	7	7-8	60,228806	19,933414
Markusbölefjärden	8	8	60,234278	19,930687
Markusbölefjärden	9	8	60,241199	19,930263
Markusbölefjärden	10	5	60,244662	19,930904



Figur 1. Provtagningsstationer vid sedimentundersökning av Långsjön och Markusbölefjärden, november 2023. Bakgrundskartan visar sjönarnas djupförhållanden där varje linje motsvarar en djupmeter. Djup mindre än 4 m redovisas inte. Kartan digitaliserades baserat på befintliga djupkartor (Ålands Vatten Ab 2003).

Sedimentprovtagning ombesörjdes av uppdragsgivaren och utfördes den 3 och 6 november 2023 av Caroline Karlsson och Jacob Nordlund vid Miljöbyrån. Vid provtagningen användes en hämtare av typen Limnos sediment corer. Sedimentprover skiktades omedelbart efter provtagning i 7 skikt (0-2, 2-4, 6-8, 12-14, 18-20, 26-28 och 36-38 cm), där så var möjligt. Fördelningen bedömdes ge tillräckligt hög upplösning i de yngre lagren för att kunna följa den förväntade haltminskningen, samt nå ner till den en i det närmaste konstant fosforkoncentration i djupare lager. Proverna transporterades till Erkenlaboratoriet där de förvarades kallt (4 grader) och mörkt fram till analystillfället. I samband med provtagningen noterades sedimentens karaktär, liksom de temperatur- och syrgasförhållanden som rådde vid bottarna.

Analys och beräkningar

Samtliga sedimentskikt analyserades med avseende på vattenhalt, glödningsförlust, totalfosforhalt och fosforfraktioner. Analyser utfördes av Erkenlaboratoriet, Uppsala universitet. Sedimentens olika fosforformer kan separeras och analyseras genom så kallad fosforfraktionering (Psenner m.fl. 1988). Sex olika fosforformer kvantifieras genom stegvis extrahering:

1. löst bunden fosfor ($\text{NH}_4\text{Cl-rP}$)
2. järnbunden fosfor (BD-rP)
3. aluminiumbunden fosfor (NaOH-rP)
4. organiskt bunden fosfor (NaOH-nrP)
5. kalciumbunden fosfor (HCl-rP)
6. residualfosfor (huvudsakligen organiska fosforformer)

Den läckagebenägna fosfor kvantifierades genom att en bakgrundshalt antogs, det vill säga den fosforkoncentration som yngre sedimentlager förväntas nå ner till efter att den läckagebenägna fosfor har frisatts och diffunderat ut i vattenmassan. Bakgrundshalten subtraherades från de yttligare sedimentlagrens högre halter för varje enskild kärna. Skillnaden anses utgöra summan av den fosfor som kommer att frigöras med tiden (Rydin 2000) och benämns här läckagebenägen eller mobil fosfor. Den läckagebenägna fosfor utgörs vanligtvis av organiska former tillsammans med järnbunden fosfor. Läckagebenägen fosfor i varje sedimentskikt räknades om till mängd och summerades till en totalmängd per ytenhet. Mängden läckagebenägen sedimentfosfor beräknades genom att bestämma ytorna för olika djupintervall i sjöarnas delområden. För fördjupad information om fosforfraktionering och läckagebenägen fosfor i sediment hänvisas till publikation av Rydin (2000). För att beräkna den aluminiumdos som krävs för att binda den mobila fosfor antas att 11 gånger mer aluminium (på viktsbasis) krävs (Rydin m.fl. 2000).

Ackrediterad analys

Sedimentkemiska analyser utfördes av Erkenlaboratoriet, Uppsala universitet ackrediterade av Swedac enligt ISO/IEC 17025 (ackrediteringsnr 1239).

Sedimentundersökning – resultat och diskussion

Sedimentprovtagning

Provtagningen utfördes vid 5 stationer per sjö (Tabell 1, Figur 1 ovan). I Långsjön karakteriserades bottenmaterialet av lösa bruna, brungrå eller grå lösa sediment (Bilaga 1). I sjöns centrala del (L3) var bottenarna hårdare och utgjordes av sand och lera en bit ner i profilen. Två kärnor togs i närheten av den station som planerats för provtagning, men proverna var inte möjliga att skicka djupare än till 4 respektive 14 cm djup, och inte 38 cm enligt plan. De prover som analyserats bekräftar att sedimentet är representativt för erosions- och/eller transportbottenar, och inte speglar ackumulationsförhållanden. Till följd av att detta utgår data för denna kärna ur de resultat och bedömningar som presenteras nedan.

I Markusbölefjärden utgjordes bottenmaterialet av lösa brungrå sediment. Vid stationen i sjöns grunda (4 m) södra del (M4) fanns delar av vattenväxter i kärnan. Ingen svavelvätelukt noterades för någon av kärnorna.

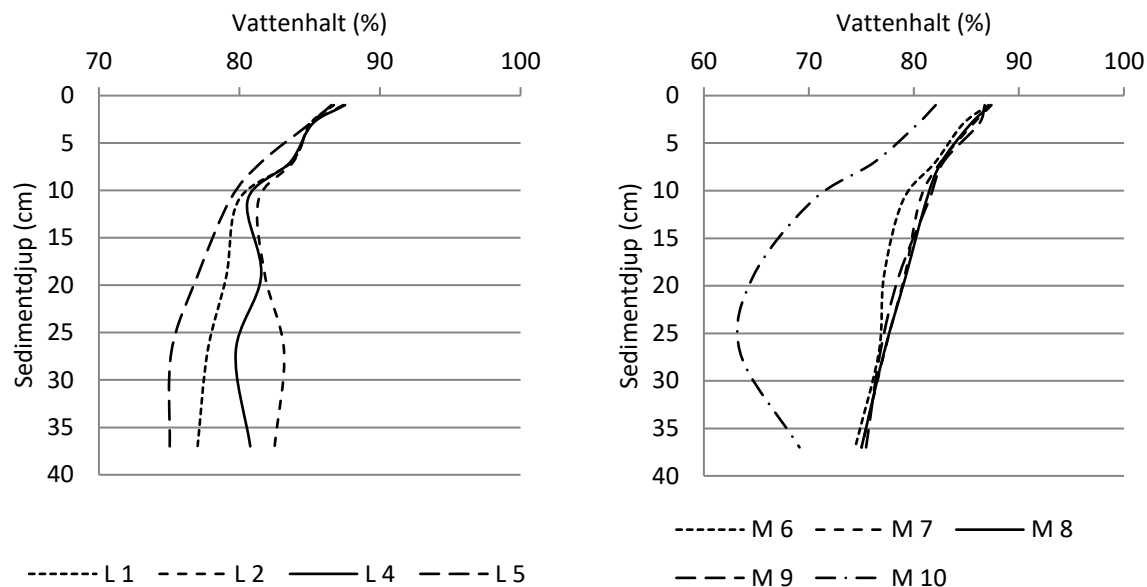
Vattenhalt och organisk andel

Vattenhalt och glödningsförlust är två grundläggande sedimentparametrar som ofta används för att särskilja ackumulationsbottenar från erosions- och transportbottenar. En tumregel är att vattenhalten i ytsediment bör vara högre än 75 procent för att sedimentet skall anses representera en ackumulationsbotten (Håkanson and Jansson, 1983). På motsvarande sätt bör halten organiskt material (glödningsförlusten) överstiga 10 procent för att det med säkerhet skall röra sig om ackumulationsbottensediment. När kontinuerliga ackumulationsbottenförhållanden råder avklingar vatten- och organisk halt

snabbt till en början, för att långsamt stabilisera sig vid en konstant lägre halt.

Vattenhalten i Långsjöns ytsediment var relativt hög och låg i samtliga kärnor på 87-88 procent (Figur 2a). Halten avtar av mot det djupaste sedimentskiktet, där två kärnor (L2, L4) nådde en vattenhalt kring 85 procent och övriga två (L1, L5) låg tydligt lägre, kring 75 procent. Den kontinuerliga avklingningen med ökande sedimentdjup indikerar att ackumulationsförhållanden råder, och pekar på vissa skillnader i materialavsättning.

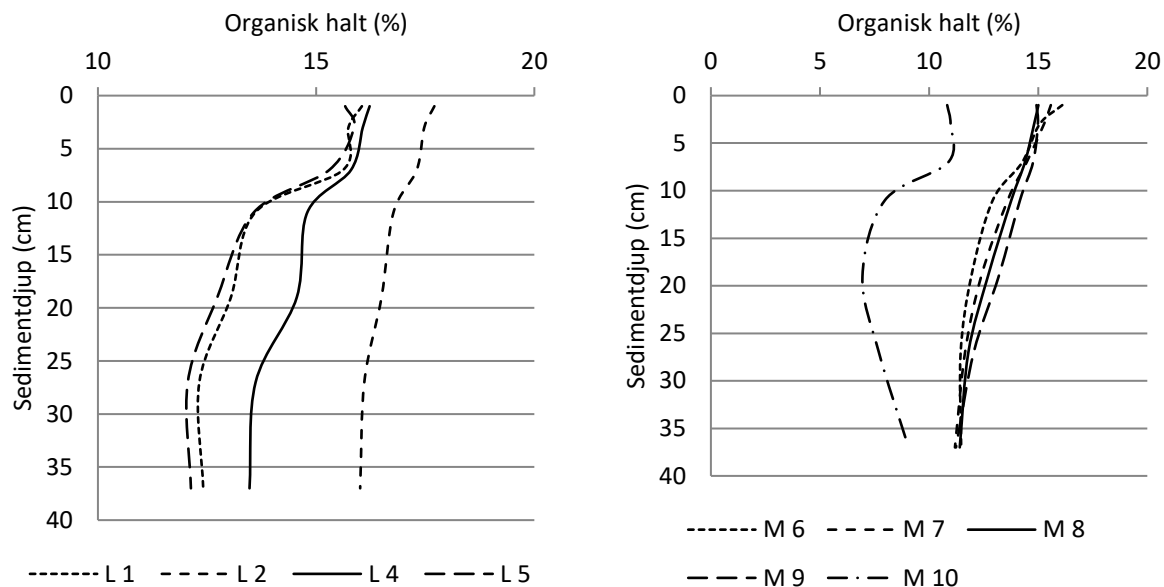
I Markusbölefjärden var vattenhalten i det närmaste identisk i fyra av de fem kärnorna (M6-M9), och minskade från 87 procent i ytsedimenten till 75 procent i det djupaste skiktet, detta som en effekt av mineralisering och kompaktering av sedimenten (Figur 2b). Likartade halter och mönster indikerar att dessa fyra stationer representerar en homogen sedimentyta där material avsätts under likartade och ostörda förhållanden. Kärnan från fjärdens norra del (M10) skiljer sig från övriga, med en lägre vattenhalt i både ytsediment och profil, något som pekar på att det material som avsatts i området har en annan sammansättning än i övriga delar av sjön. Att vattenhalten uppvisar en ökning från 25 cm sedimentdjup tyder på att det under den tidsperiod som kärnan representerar skett förändringar i utsedimenterat material, sett till sammansättning och/eller mängd, eller i bottenförhållanden. Sådana förändringar förklaras normalt sett av förändringar i sjöns avrinningsområde sett till markanvändning och/eller hydrologi. Om de avvikande vattenhalterna skulle förklaras av att sjön fram till 70-talets början stod i förbindelse med havet borde samma mönster ses även för övriga kärnor, och än tydligare i dessa då de är närmare belägna den tidigare havsförbindelsen. Den nivå där förändringen sker bör också representera en period några decennier innan sjöregleringen.



Figur 2ab. Vattenhalt (%) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Den organiska andelen av torrsubstanshalten (TS) klingar i Långsjön sakta av från 16-18 procent i ytsedimentet till 12-13 procent i tre av kärnorna (L1, L4, L5), och var tydligt högre i kärna L2, något som korrelerar med den högre vattenhalt som uppmättes vid denna station (Figur 3a).

I Markusbölefjärden var den organiska andelen av torrsubstansen i det närmaste identiska i fyra (M6-M9) av de fem kärnorna (Figur 3b); den minskar från 15 procent i ytsedimenten till 11 procent i det djupaste skiktet. Minskningen förklaras av mineralisering av lättnedbrytbart organiskt material, eventuellt i kombination med en förhöjd sedimentation av organiskt material under de senaste decennierna. I paritet med det mönster som ses för vattenhalten ovan tyder resultatet på att de fyra kärnorna representerar en homogen sedimentyta där liknande material avsätts under ostörda förhållanden, medan stationen i sjöns norra del (M10) avviker med en lägre halt organiskt material, i synnerhet 10-20 cm ner i profilen.



Figur 3ab. Organisk halt (%) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

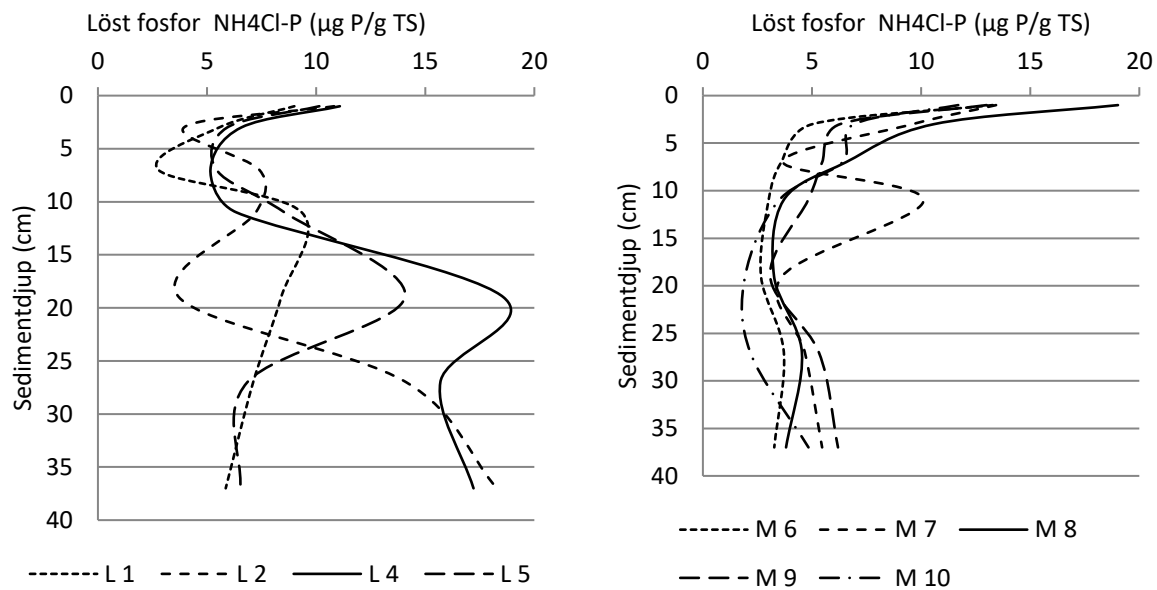
Oorganiska fosforformer

Till de oorganiska fosforformerna räknas den fosfor som är löst bunden, samt den som är bunden till järn, aluminium eller kalcium. Löst bunden och järnbunden fosfor ingår i den mobila fosforpoolen, det vill säga utgör delar av den fosfor som kan frisättas från sediment till vattenmassa. Både den aluminiumbundna och den kalciumbundna fosfor betraktas som tillräckligt hårt fastlagd för att inte frisättas under sedimentdiagenesen.

Löst bunden fosfor detekterades i Långsjöns sediment i låga halter i den översta decimetern (Figur 4a). Halterna låg kring 10 µg P/g TS i ytsedimenten och halverades ner till 5 cm sedimentdjup. I de båda nordligaste kärnorna (L4, L5) ökade halterna åter och nådde en högsta halt, kring 15-20 µg P/g TS, vid 20 cm sedimentdjup. Kärnan från sjöns södra djupområde (L2) uppvisar från 20 cm djup successivt ökande halter mot 18 µg P/g TS i det djupaste skiktet.

Sedimentprofilerna från Markusbölefjärden uppvisar ett annorlunda och mer enhetligt mönster där halterna löst bunden fosfor avklingar från 12-19 µg P/g TS i ytan ner till cirka 5 µg P/g TS i de djupare sedimentlagren (Figur 4b).

De generellt låga halterna som uppmäts i de båda sjöarna indikerar att sedimenten har en god fosforbindande förmåga då syrgasförhållandena är goda, men visar också att det finns ett litet överskott löst fosfat i sedimentens porvatten även när sedimentet är syresatt.



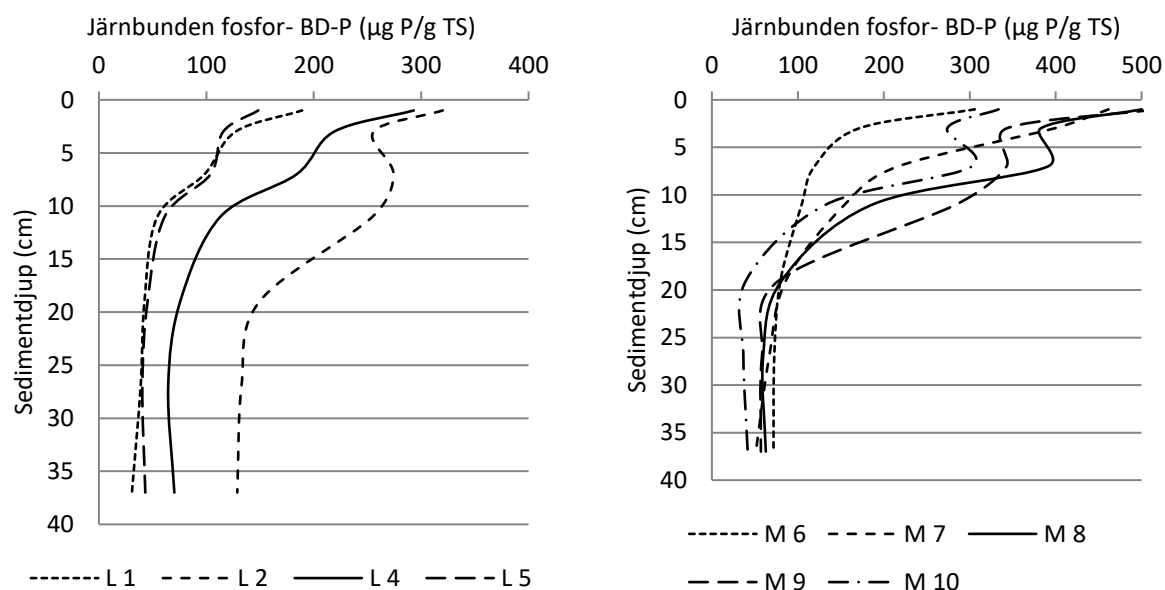
Figur 4ab. Löst bunden fosfor ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Järnbunden fosfor ingår tillsammans med den löst bundna fosfor i den läckagebenägna oorganiska fosforpoolen, och står ofta i jämvikt med denna, ett mönster som dock inte är tydligt i de undersökta sjöarnas sediment. I Långsjön var de järnbundna fosforhalter måttligt höga i sedimentens ytskikt, i medeltal kring $200 \mu\text{g P/g TS}$ (Figur 5a). Halterna var högst, cirka $300 \mu\text{g P/g TS}$, i sjöns djupområden (L2, L4) och hälften så höga i sjöns norra del (L5). Halterna avtar med ökande sedimentdjup för att halveras vid 20 cm sedimentdjup.

Markusbölefjärdens sediment uppvisar ungefär dubbelt så höga halter järnbunden fosfor som Långsjön, med en variation i spannet $300\text{--}500 \mu\text{g P/g TS}$ i ytskikten (Figur 5b). Vid 20 cm har halterna i samtliga fem kärnor klingat av till bakgrundshalter strax $100 \mu\text{g P/g TS}$.

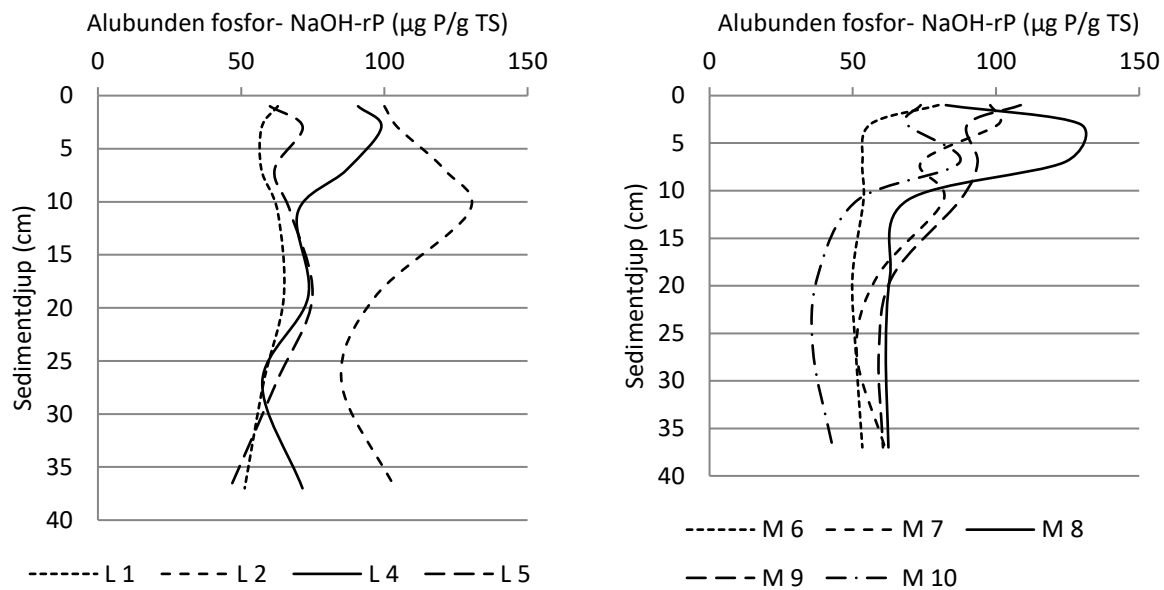
Det som utmärker de båda sjöarnas sediment är att den lägre, konstanta koncentrationen med vilken järnbunden fosfor begravs – bakgrundshalten – nås först vid cirka 20 cm sedimentdjup. Även om sedimentytan tidvis blir anoxisk (syrgasfri) och järnbunden fosfor löses upp, något som visar sig som förhöjda halter fosfat i det stagnanta bottenvattnet under perioder av skiktade förhållanden, når uppenbarligen den låga redoxpotentialen ännu inte längre ner i sedimentprofilen. Att så är fallet framgår av att sedimenten fortfarande upprätthåller sin naturliga förmåga att kvarhålla järnbunden fosfor en decimeter ner i sedimenten. Det kan jämföras med situationen i sediment från periodvis skiktade eller långvarigt bottensyrgasfria havsvikar längs Svealandskusten där järnbunden fosfor ackumuleras bara i de allra översta centimetrarna sediment (Rydin m. fl. 2021). En tolkning av de halter som uppmätts i sedimentprofilerna från

Långsjön och Markusbölesfjärden är åtminstone de områden som kärnorna representerar inte varit utsatta för längre syrgasfria perioder. Den tesen stärks av att ingen svavelvätelukt noterades vid provtagning, samt av att sedimenten var brungrå (oxiderade), och inte svarta (reducerade).



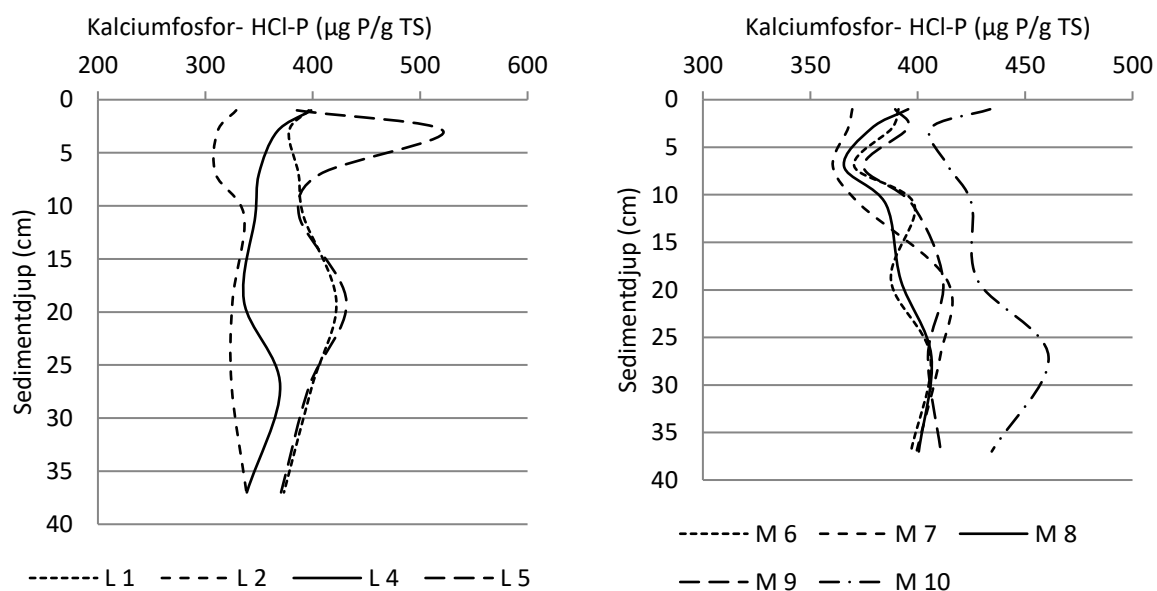
Figur 5ab. Järnbunden fosfor (µg P/g TS) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölesfjärden (höger).

Aluminiumbunden fosfor höll i sedimentprofiler från Långsjön och Markusbölesfjärden halter på mellan 50 och drygt 100 µg P/g TS (Figur 6ab). De något förhöjda halter som ses i yngre sedimentskikt i Långsjöns södra djupområde (L2) och i centrala Markusbölesfjärden (M8) skulle kunna återspegla användning av aluminiumbaserade kemikalier i avrinningsområdet någon gång kring millennieskiftet. Några sådana källor är dock inte kända (personlig kommunikation, Caroline Karlsson, Miljöbyrån).



Figur 6ab. Aluminiumbunden fosfor ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Kalciumbunden fosfor håller vanligen konstanta koncentrationer i sedimentprofiler som ett resultat av att den till stor del representerar hårt bunden fosfor i form av främst lerpartiklar. Halterna i de båda sjöarna låg huvudsakligen i intervallet 300-400 $\mu\text{g P/g TS}$ vilket är typiska nivåer som representerar postglaciala leror från avrinningsområdet och omlagring av sediment från grundare områden till följd av landhöjningen (Figur 7ab). Den något ökande halt med ökande sedimentdjup som syns i Markusbölefjärdens profiler är också typisk och kan eventuellt visa på en bildning av inerta (ej läckagebenägna) fosforformer som extraheras som kalciumbunden fosfor (Rydin m fl 2021).

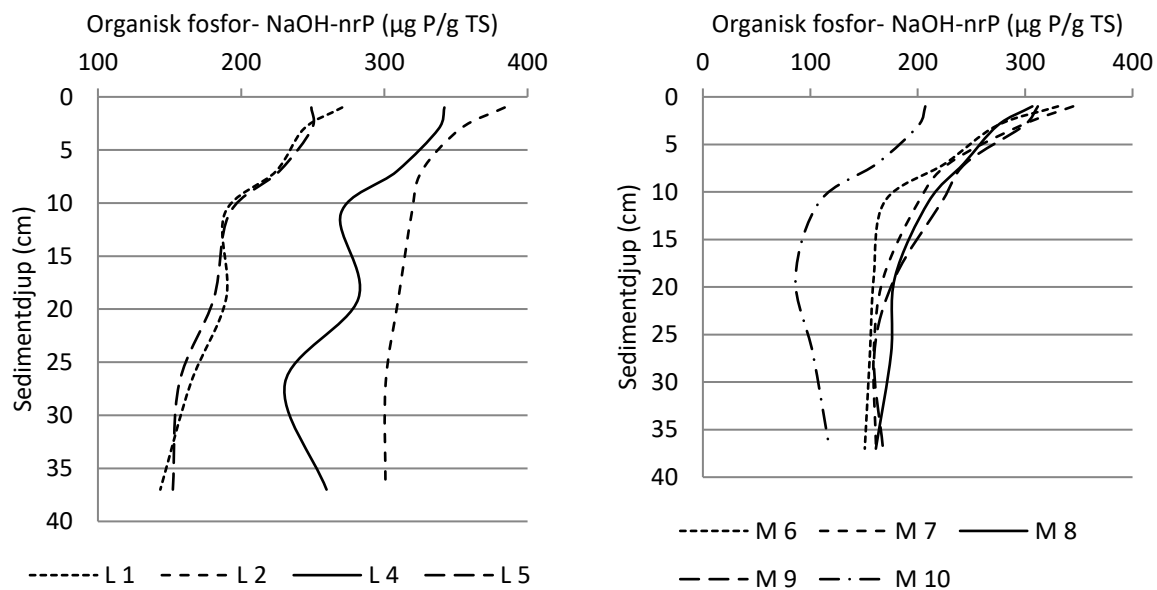


Figur 7ab. Kalciumbunden fosfor ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Organiska fosforformer

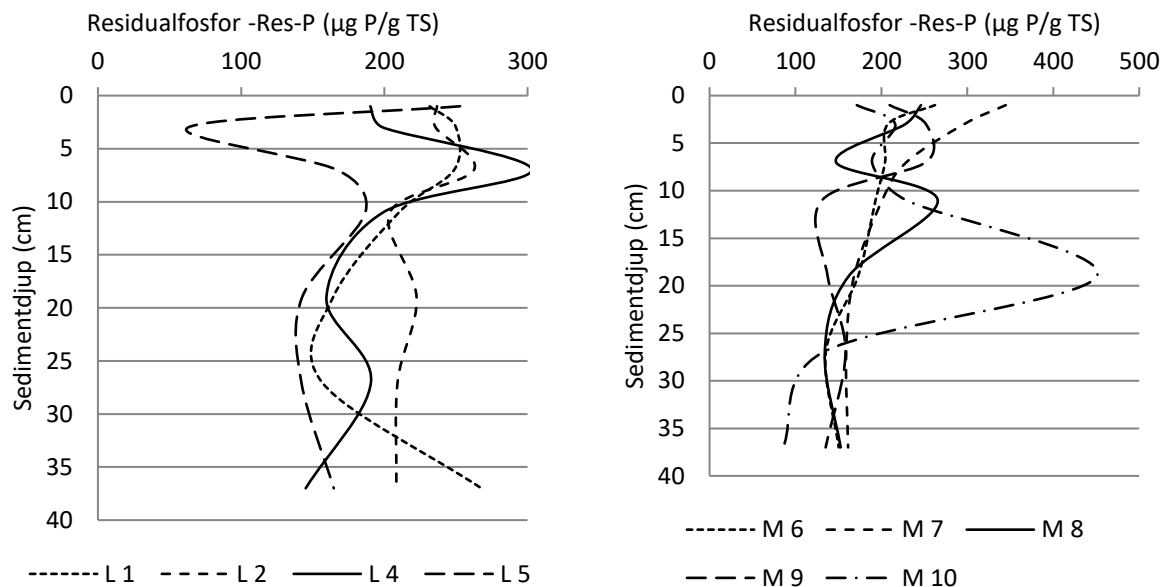
Organiskt bunden fosfor extraheras vid analysen ut i fraktionen organiskt bunden fosfor (NaOH-nrP) och utgör även en del av fraktionen residualfosfor (Res-P). I den förstnämnda fraktionen återfinns vanligen majoriteten av den fosfor som med tiden kommer att läcka från sedimenten till vattenmassan (Rydin m fl 2021). I de båda sjöarna var de organiskt bundna fosforhalterna i ytsedimenten dock låga (L1, L5, M10) eller måttliga (övriga kärnor), mellan 200-400 $\mu\text{g P/g TS}$ (Figur 8ab). I Markusbölefjärden avviker återigen kärnan från sjöns norra del (M10) med lägre halter jämfört med övriga profiler från sjön.

Haltminskningen med ökande sedimentdjup representerar den mineralisering av organiskt bunden fosfor som kontinuerligt sker. Att döma av haltutvecklingen ned till 20 cm kommer ungefär en tredjedel av den organiskt bundna fosfor i de båda sjöarnas botten att frigöras med tiden. Den organiskt bundna fosfor utgörs av allt att döma av det mikrobiella samhälle som bidrar till nedbrytning av det organiska materialet (Rydin m fl 2023).



Figur 8ab. Organiskt bunden fosfor ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Den del av den organiskt bundna fosfor som mäts som residualfosfor uppvisar en relativt stor haltspridning i sedimenten, delvis som en följd av att två olika analyser används för att beräkna halten. I profilerna från Långsjön sjunker halten från i medeltal 240 till 200 $\mu\text{g P/g TS}$, något som får betraktas som låga ytsedimenthalter och en blygsam avklingning för sediment från näringsrika vatten (Figur 9a). I Markusbölefjärden avtar medelhalten från knappt 240 i ytsedimenten till drygt 140 $\mu\text{g P/g TS}$ i det djupaste skiktet (Figur 9b).

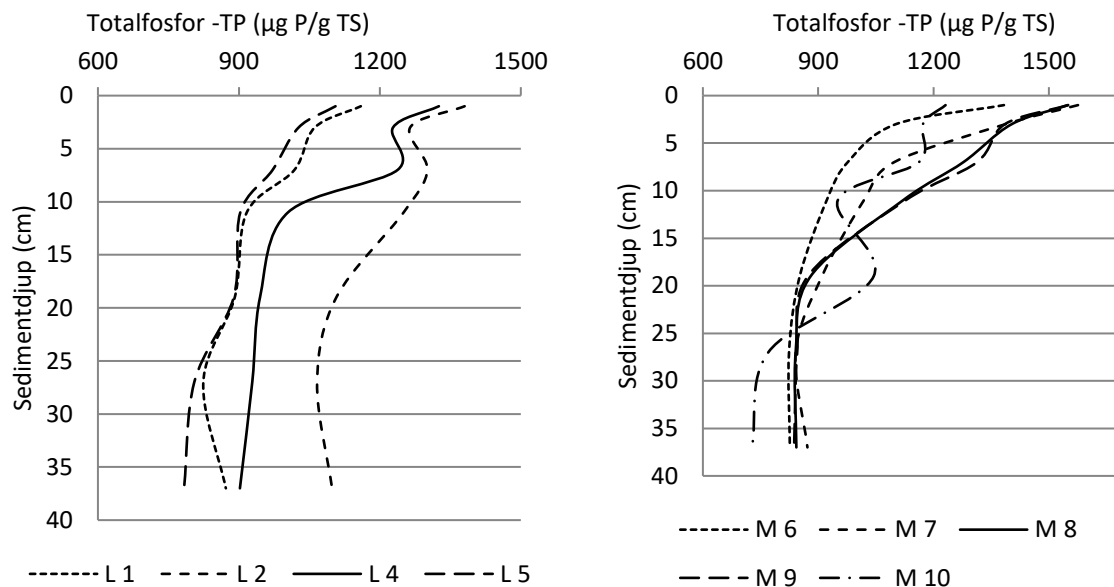


Figur 9ab. Residualfosfor ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Totalfosforhalt

Totalfosforhalterna summerar fraktionerna ovan och ger en samlad bild av hur delar av fosfor begravs i de djupare sedimentlagren samtidigt som en andel mobiliseras och läcker till vattenmassan. Halterna i ytsediment från Långsjön låg kring cirka $1100 \mu\text{g P/g TS}$ i de båda kärnorna från sjöns grundare södra och norra del (L1, L5), och tydligt högre, kring cirka $1400 \mu\text{g P/g TS}$ i kärnorna från sjöns djupområden (L2, L4) (Figur 10a). Skillnaden i ytsedimenten består i stort sett genom hela de undersökta profilerna. Totalfosforhalterna i Markusbölefjärdens ytsediment är något högre än i Långsjön, i medeltal $1450 \mu\text{g P/g TS}$, med de lägsta, cirka $1250 \mu\text{g P/g TS}$, i sjöns norra del (M10) (Figur 10b). De högre halterna som ses jämfört med Långsjön förklaras av högre halter av järnbunden och organiskt bunden fosfor i kärnornas översta 10 cm.

Halterna klingar långsamt av med ökande sedimentdjup för att i Långsjön sammantaget minska med ungefär 25-30 procent, undantaget i kärnan från det södra djupområdet där minskningen var något mindre, kring 20 procent. I Markusbölefjärden är minskningen större, cirka 40-45 procent. Avtagande halter av järnbunden och organiskt bunden fosfor förklarar i båda fall huvuddelen av den minskning som ses i totalfosforkoncentration med ökat sedimentdjup.



Figur 10ab. Totalfosforhalt ($\mu\text{g P/g TS}$) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger).

Mängd läckagebenägen fosfor

Avklingningen av totalfosforhalt över tid (ökat sedimentdjup) avspeglar en deposition av fosforrikt material där en andel av fosfor frigörs, främst genom mineralisering av organiskt material, med tiden och diffunderar mot vattenmassan (Carey & Rydin 2011). Denna tolkning av fosforomsättningen i sedimenten bygger på att depositionen av plankton och annat material har varit relativt konstant över den tidsperiod som avklingningen har skett på. Vidare betyder minskningen av totalfosforhalt parallellt med den läckagebenägna fosfor att den mobiliserade fosfor kommer läcka tillbaka till vattenmassan; den binds inte in i stabila föreningar som hindrar fosfor från läcka tillbaka till vattenmassan. I detta avsnitt kvantifieras mängden läckagebenägen fosfor som underlag för åtgärdsplanering.

Den läckagebenägna fosforpoolen består generellt av en oorganisk del (löst bunden och järnbunden fosfor) och en organisk andel (plankton och mikrobiell biomassa). I många övergödda sjöars och kustsediments sediment har den järnbundna fosforpoolen redan läckt ut från sedimenten till följd av att hela sedimentprofilen har blivit anoxisk. Denna fosfor bidrar i många fall till att upprätthålla den övergödda situationen trots att den externa belastningen har reducerats (Rydin m fl 2017). Fosforsammansättningen i Långsjön och Markusbölefjärden tyder dock på att järn-fosforbindningen ännu fungerar i den översta decimetern i sedimentet. Den järnbundna fosfor i detta sedimentlager kan antingen ha bildats genom att aktivt järn i de syresatta sedimenten binder löst fosfat som diffunderar upp mot sedimentytan, eller genom att järnhydroxider

fäller ut fosfat i vattenmassan och ackumuleras i sedimenten. Där blir fosfor kvar en tid, av allt att döma tills den går i lösning när syrgassituationen blir för dålig någonstans mellan 10 och 20 cm sedimentdjup. Då kan den lösta fosfaten diffundera upp mot sedimentytan och bindas igen så länge det finns järnhydroxid finns tillgänglig i tillräckliga mängder.

De läckagebenägna fosforhalter som erhöles vid fraktioneringen räknades om till mängd per ytenhet efter att bakgrundshalterna av respektive fraktion subtraherats (Tabell 2). För Långsjön beräknades i genomsnitt 3,0 gram löst bunden och järnbunden fosfor samt 3,6 gram organiskt bunden fosfor per kvadratmeter. Förrådet av läckagebenägen fosfor i Långsjöns sediment summeras därmed till i medeltal 6,6 g P/ m², vilket är en relativt måttlig mängd, men högre än exempelvis den måttligt näringsrika sjön Erken som håller cirka 5 g P/m² (Rydin 2000).

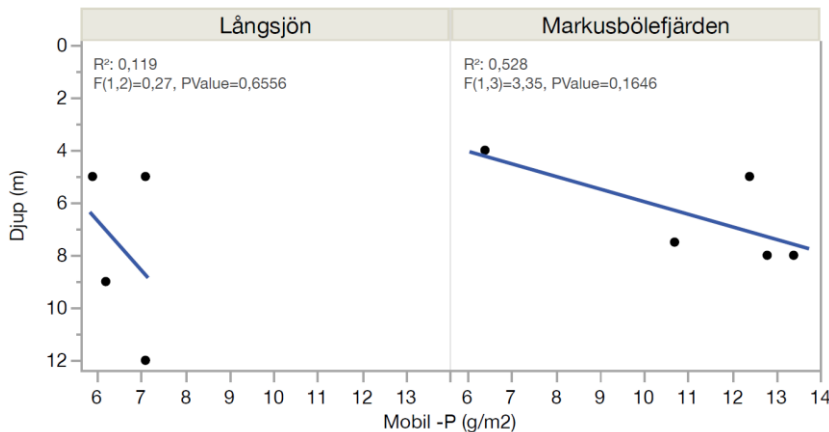
Bottnarna i Markusbölefjärden håller betydligt högre mängder läckagebenägen fosfor än Långsjön, i genomsnitt 11,1 g per kvadratmeter varav i genomsnitt cirka 60 procent i järnbunden form (Tabell 2). Det genomsnittet inkluderar kärnan från sjöns södra del (M6) som höll betydligt mindre mängd mobil fosfor, 6,4 g/m² (Tabell 2). Utan hänsyn till denna summeras de läckagebenägna fosformängderna till hela 12,1 g/m². Det som utmärker det läckagebenägna fosforförrådet i de båda sjöarna är den höga andelen järnbunden fosfor. Det kan jämföras med den djupare Björnöfjärdens sediment, som var helt anoxisk, och höll knappt 2 g organiskt bunden fosfor och i princip ingen järnbunden fosfor (Rydin & Kumblad 2019). Fjärden är ett exempel på bottnar som har tappat mycket av sin naturliga fosforbindning i form av järnbunden fosfor och till viss del även organiskt bunden fosfor (Rydin m fl. 2023).

Tabell 2. Läckagebenägen fosfor (g P/m²) i Långsjön och Markusböles sediment med fördelning på fosforform; löst bunden, järnbunden och organiskt bunden fosfor. Låbil organiskt bunden fosfor återfinns även i posten residual, vilken beräknats som ett medelvärde av kärnor från stationerna L1, L2, L4 och L5 respektive M6-M9. De olika fosforformernas andel (%) av den totala läckagebenägna mängden anges till höger i tabellen.

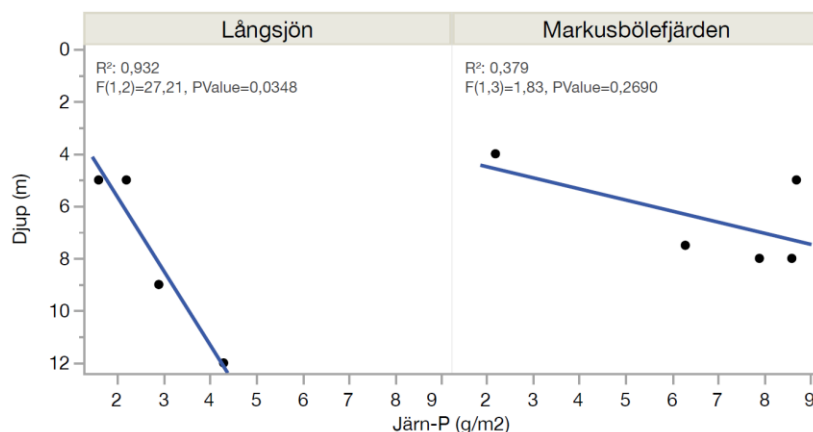
Sjö	Station	Djup (m)	Löst Järn Org Res					Löst Järn Org Res				
			g P/m ²					%				
Långsjön	L1	5	0,1	2,2	3,3	1,5	7,1	2	30	47	21	
Långsjön	L2	12	0,3	4,3	1,0	1,5	7,1	4	61	14	21	
Långsjön	L4	9	0,4	2,9	1,4	1,5	6,2	6	47	23	24	
Långsjön	L5	5	0,2	1,6	2,6	1,5	5,9	3	27	45	26	
medel			0,2	2,8	2,1	1,5	6,6	4	42	32	23	
Markusbölefjärden	M6	4	0,1	2,2	2,3	1,8	6,4	1	34	36	28	
Markusbölefjärden	M7	7-8	0,2	6,3	2,4	1,8	10,7	1	59	23	17	
Markusbölefjärden	M8	8	0,1	7,9	2,9	1,8	12,8	1	62	23	14	
Markusbölefjärden	M9	8	0,1	8,6	2,9	1,8	13,4	1	64	21	13	
Markusbölefjärden	M10	5	0,2	8,7	1,7	1,8	12,4	1	71	14	15	
medel			0,1	6,7	2,4	1,8	11,1	1	61	22	16	

Fosformängdernas fördelning

I djupare sjöar med bottenområden av ackumulationskaraktär, det vill säga där sedimenterat material avsätts på botten utan att grumlas upp igen vid kraftiga vattenrörelser, finns ofta ett positivt samband mellan vattendjup och mängden läckagebenägen fosfor. Baserat på de undersökta kärnorna ses inte något tydligt sådant samband för vare sig Långsjön eller Markusbölefjärden (Figur 11). Sett till enbart den järnbundna fosforfraktionen framträder för Långsjön ett mönster där mängden ökar med djupet, sannolikt till följd av sedimentfokusering där vattenströmmar deponerar material i sjöns djupaste del (Figur 12). Bristen på samband mellan djup och summerade läckagebenägna fosformängder gör det inte möjligt eller meningsfullt att redovisa fosfordistribution efter djupintervall. Som underlag för åtgärder mot intern fosforbelastning tillämpas istället ett medelvärde av den mobila fosformängden för undersökta kärnor enligt ovan (Tabell 2). Det innebär för Långsjön ett medelvärde av 6,6 g P/m² och för Markusbölefjärden 12,1 g P/m², utan hänsyn till resultat från den grunt belägna stationen i sjöns södra del (M6).



Figur 11. Summerad läckagebenägen fosfor (g P/m²) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger) avsatt mot vattendjup (m) vid provtagningsstationerna.



Figur 12. Järnbunden fosfor (g P/m²) i sediment från Långsjön (vänster) och Markusbölefjärden (höger) avsatt mot vattendjup (m) vid provtagningsstationerna.

Osäkerheter i bedömningarna

De läckagebenägna mängder som redovisas baserar sig på data från de kärnor som provtagits. Av stor vikt är att bedömningar kan göras baserat på kärnor som representerar ackumulationsbotten. Att en av stationerna istället togs i ett område med transport- eller erosionsbotten, utpekad inför fältarbetet, innebär att dataunderlaget för bedömning blev mindre än det avsedda. För att ge ett optimalt underlag borde också tre av de övriga kärnorna (M6, L4, L5) flyttats till något större djup än de som nu undersöktes. En erfarenhet av detta är att provtagning bör planeras utifrån tydliga djupkartor som med fördel även redovisar sedimenthårdhet, samt att behovet av omplanering med hänsyn till bottentyp och djup kan bedömas och utföras på plats i samband med fältarbete. Det underlag som nu finns för kvantifiering och kartering av läckagebenägen fosfor bedöms dock tillräckligt för att ge en god bild av läget.

En osäkerhet i bedömningen av mängden mobil fosfor kan också kopplas till att de båda sjöarna fram tills för 50 år sedan stod i förbindelse med havet. Då havsvattenpåverkan upphörde förändrades sannolikt i viss mån utsedimentationen till bottenarna, möjligen både sett till mängd och kvalitet och eventuellt även fokuseringsområden. En förändrad tillväxttakt och kvalitet i utsedimenterat material gör att bedömningar mot bakgrundshalter i kärnornas djupaste skikt blir behäftade med en del osäkerheter, detta eftersom metoden baserar sig på att förhållandena varit i stort sett likartade under den period profilen representerar.

Underlag för aluminiumbehandling

Aluminiumfällning är en välbeprövad och generellt välfungerande metod för att minska den interna fosforomsättningen och innebär att fosfor fastläggs till bottenarna genom tillsatts av aluminiumsaltlösning i vattenmassan eller genom injicering i sedimentet. Aluminium är inte redoxkänsligt och binder därför fosfor även vid syrgasfria förhållanden vilket gör fosforbindningen i sedimenten stabil. Vid behandling genom tillsatts av aluminiumsalt till vattenmassan bildas ett aluminiummineral som flockulerar och sjunker mot botten. Då den sedimenterande flocken når bottenarna bildar den ett kemiskt lock som fortsätter att binda den fosfat som frigörs i sedimenten. Vid sedimentinjicering tillsätts aluminiumlösningen 0-20 cm ner i bottenarna och kommer där i direktkontakt med högre fosforkoncentrationer. En fördel med injiceringsmetoden är att aluminiumdosen kan anpassas efter variationer i

mängden läckagebenägen fosfor i sedimenten samt att dosen blir kvar på de bottenar där den tillsattes. Vid en fällning i vattenmassan riskerar flocken att flytta sig på grund av vindinducerade vattenrörelser. Injicering ger sannolikt också en än mer effektiv bindning i och med att flocken bildas i sedimentet och där har bättre förutsättningar till direkt bindning av löst fosfat.

Aluminium doseras på så vis att löst fosfor binds efterhand den mobiliseras i sedimenten. Hur långvarig effekten av behandlingen blir påverkas av faktorer som morfometri, aluminiumdos, pH, förråd av läckagebenägen sedimentfosfor och externbelastning (Agstam-Norlin mfl 2021). Genom rätt dosering bör åtgärden ha en obegränsad livslängd i och med att fastläggningen av fosfor är permanent (Huser mfl 2016, Rydin m. fl. 2000).

Behandlingsytor

Vi föreslår att åtgärder för reducerad internbelastning för både Långsjön och Markusböle fokuserar till bottenområden djupare än 5 meter. Läckagebenägen fosfor finns även på grundare bottenar än de som föreslås för behandling, något som bekräftas av resultat från den på 4 meters djup belägna stationen i södra Markusbölefjärden (M6). Observationer från sedimentprovtagningen och uppgifter från vegetationskartering visar att åtminstone delar av dessa bottenar är vegetationsklädda, något som gör dem mindre lämpliga för behandling (Bilaga 1, Bystedt 2011).

Data från de senaste årens miljöövervakningsprogram indikerar att områden grundare än 5 meter kan ligga över språngskiktet sommartid, något som innebär en viss risk för att tillsatt aluminium skulle kunna omfördelas från dessa bottenar om de skulle behandlas. Effekten av en eventuell behandling av grunda bottenar kan också vara osäker även om flocken blir kvar på avsedda områden. Tänkbart är att biologiska processer som exempelvis fotosyntes via plankton och/eller påväxtalger konkurrerar ut den kemiska adsorptionen av fosfat som normalt sker till doserat aluminium och därmed ger en sämre effekt. I syfte att tillföra kunskap om effekten av aluminiumbehandling i grunda, övergödda vatten har Vattenresurs AB tagit initiativ till försök i provrutor i Ullnasjön norr om Stockholm. Undersökningen visar på en effektiv inbindning av fosfat i två steg, inledningsvis en snabb inbindning av redan löst fosfor och därefter en långsammare ackumulering i takt med att ytterligare fosfat frisattes från sedimenten, något som visar att åtgärden var framgångsrik (Rydin & Lindqvist 2023). Det är dock möjligt att det förbättrade ljusklimat som normalt sett uppkommer efter en fullskalebehandling stimulerar fotosyntes vid sedimentytan i grundområden, något som kan leda till kraftigt förhöjda pH-värden (>9,5) och risk för upplösning av aluminium i den flock som ännu inte hunnit binda in till fosfat. Ytterligare motiv för att utesluta

grunda bottnar är att de i Långsjön och Markusbölefjärden kan väntas vara väl syresatta och att påtagliga läckage av järnbunden fosfor därför är osannolika. Mest angeläget är att behandla de bottnar som återkommande drabbas av svår syrgasbrist, i synnerhet långvarig sådan, och där risken därmed är stor för omfattande frisättning av järnbunden fosfor.

Rekommendationen innebär en behandling av cirka 65 hektar botten i Långsjön, och cirka 57 hektar i Markusbölefjärden (se Tabell 3, Figur 13 nästa avsnitt), något som motsvarar 45 respektive 37 procent av den totala bottenarean. Som underlag för beräkningen användes de djupkartor som tagits fram inom ramen för projektet. Behandlas cirka 40 procent av bottenarna bör det vara tillräckligt för att ge förutsättningar för uppnå en betydande förbättring av vattenkvalitet, med direkt effekt på växttillgänglig fosfat, och indirekt effekt på totalfosfor, växtplankton, grumlighet och siktdjup. Antagandet bygger på att en framgångsrik behandling av de djupare bottenarna, där det näringsrika, läckagebenägna, finpartikulära sedimentet ansamlas, bör ge en tillräcklig reduktion av internbelastningen för att påtagligt sänka totalfosforhalten i sjöarnas vattenmassa. Det gäller givet att den externa belastningen ligger på en långsiktigt hållbar nivå. Slutliga bedömningar av hur omfattande reduktion som krävs av fosforfrisättningen från bottenarna bör baseras på en fosforbudget som beskriver både den externa och interna fosforbelastningen, samt en bedömning av vilken belastning som är acceptabel sett till miljö kvalitetsnorm för näringsstatus (se vidare under *Förutsättningar och generella rekommendationer*).

Aluminiumdos

För en så kostnadseffektiv och hållbar behandling som möjligt baserar sig doseringen av aluminium i grunden på de mängder av läckagebenägen fosfor som indikeras av sedimentundersökningen. Antaget att cirka 11 gånger mer aluminium behövs på viktsbasis för att binda en given mängd fosfor (Rydin m fl. 2000), krävs en aluminiumdos på cirka 70 g/m² för att binda den genomsnittliga mängden läckagebenägen fosfor (6,6 g P/m²) i Långsjöns sediment, och cirka 130 g/m² för att binda in hela den genomsnittliga fosformängden (12,1 g P/m²) i Markusbölefjärden (Tabell 2 ovan, Tabell 3). Den beräknade dosen för Långsjön ligger i det centrala spannet av de tillsatser på 50-100 g/m² som normalt används av företaget Vattenresurs AB för att binda läckagebenägen sedimentfosfor i relativt välbuffrade sjöar (Agstam-Norlin m fl. 2021). För Markusbölefjärden överskrider den beräknade tillsatsen med stor marginal normalintervallet.

Eftersom sedimenten i de båda sjöarna fortfarande har kvar en fungerande järn-fosforbindning i djupare sedimentlager rekommenderar vi en lägre dos än den som inkluderar all järnbunden fosfor. För Långsjön föreslår vi en något lägre dos än den ovan beräknade, nämligen 60 g Al/m². Dosen är

tillräcklig för att åstadkomma en effektiv och heltäckande flockbildning i sedimenten och skapa en kemiskt ”fosforfilter”. Baserat på gängse metodik där 20 g Al/m² kan läggas vid varje överfart, räcker tre passager för den dos som här rekommenderas. Den totala aluminiumtillsats som krävs vid behandling av Långsjön, baserat på behandling av 65 ha och en aluminiumdos av 60 g/m², beräknas till 39 ton (Tabell 3). Om samma yta skulle behandlas med standardberäknad dos (73 g Al/m²) åtgår totalt 47 ton aluminium.

Tabell 3. Läckagebenägen fosfor (g P/m²) samt föreslagna åtgärdsdjup (m) och -ytor (ha) samt beräknad och rekommenderad aluminiumdos och total aluminiummängd (ton) för aluminiumbehandling av Långsjöns och Markusbölefjärdens sediment.

Sjö	Mobil fosfor g/m ²	Djup m	Yta ha	Beräknad Al-dos g/m ²	Rekommenderad Al-dos g/m ²	Al-mängd ton
Långsjön	6,6	> 5	65	73	60	39
Markusbölefjärden	12,1	> 5	57	133	60	34

Samma dos, 60 g/m², rekommenderas även för Markusbölefjärden där de mobila fosformängderna är höga främst till följd av den stora andelen järnbunden fosfor. En behandling med reducerad dos syftar till att binda den fosfor som mobiliseras i slutet av de stagnationsperioder då syrgasfria förhållanden tidvis uppkommer vid delar av bottenarna. Eftersom bindningen mellan järn och fosfor förblir intakt vid oxiderade förhållanden, och sjön sällan drabbas av långvarig syrgasbrist bör en sådan ansats vara tillräcklig för att ge en god effekt. Åtgärden syftar till att minska intensiteten i den planktonproduktion som följer när vattenmassan cirkulerar och fosfat tillgängliggörs i ytvattenskikten. Minskad planktonproduktion och därmed minskad depositionen av organiskt material till bottenarna bör då leda till en minskad syrgastäring vid bottenarna, förutsatt att den interndrivna näringsomsättningen dominerar över den externa näringsbelastningen. På sikt bör åtgärden bidra till att ytterligare minska riskerna för att syrgasfria förhållanden uppkommer i bottenvattnet och därmed bidra till att den ”onda cirkeln” av internbelastning, planktonblomningar och syrgastäring bryts. Rekommendationen om halverad dos i relation till den som standardberäknats baserat på hela den labila fosformängden ges med hänsyn till kostnadseffektivitet, samt med hänsyn till osäkerheter kring hur den järnbundna fosfor i djupare sedimentlager påverkas av en aluminiumtillsats. Om det skulle visa sig att den rekommenderade dosen av 60 g Al/m² inte är räcker för att fastlägga tillräckligt stor del av den fosfor som med tiden mineraliseras från djupare sedimentlager, är det normalt sett mer effektivt att efter något decennium, men minst 5 år, upprepa behandlingen, snarare än att inledningsvis lägga en större dos, som i detta fall dessutom överskrider normalintervallet. Genom detta tillvägagångssätt maximeras bindningseffektiviteten och risken för att tillsätta ett verkningslöst och kostsamt överskott av aluminium minimeras. En annan möjlig väg kan vara att utvärdera effekten av olika

aluminiumdoser på den järnbundna sedimentfosfor genom försök i ett antal provrutor (10x10 m) som behandlas och återbesöks efter något år för utvärdering. Den totala aluminiumtillsats som krävs vid behandling av Markusbölefjärden, baserat på behandling av 57 ha och en aluminiumdos av 60 g/m², beräknas till 34 ton (Tabell 3, ovan). Om samma yta skulle behandlas med standardberäknad dos (133 g Al/m²) åtgår totalt 76 ton aluminium.



Figur 13. Ytor (ha) och aluminiumdos (g/m²) som rekommenderas vid aluminiumbehandling av Långsjön och Markusbölefjärden.

Appliceringsmetod

Vid aluminiumbehandling kan dosen tillföras som granuler, som lösning direkt i vattenmassan alternativt genom injicering i sedimenten. Den senare metoden har utvecklats av företaget Vattenresurs AB och innebär att koncentrerad polyaluminiumklorid injiceras, eller ”harvas” ner i sedimenten tillsammans med sjövattnet vilket resulterar i en flockbildning i själva bottenmaterialet (Schütz m fl 2017). I många fall görs även en kompletterande insats genom fällning i hypolimnion (bottenvattnet) för att binda fosfat som redan hunnit frisättas. Eventuell fällning i vattenmassan i de båda sjöarna bör ske vid djup på åtminstone 5 meter. Behandling genom sedimentinjicering har fördelen att avsedd aluminiumdos tillförs direkt till de sedimentlager där den läckagebenägna fosfor finns och kommer att mobiliseras från över tid. Vid dosering i vattenmassan är risken stor att strömmar för bort den flock som bildats i vattnet och sedimenterat ut på botten, innan den efter ett par år har börjat införlivats i de översta centimetrarna sediment och där har effekt. En annan fördel med sedimentinjicering är att en större giva kan läggas utan att tillsatsen behöver buffras, eftersom sedimentens buffrande förmåga till viss del kan nyttjas. Till nackdelarna med sedimentbehandling hör högre kostnader, och i de fall höga halter miljögifter finns lagrade i sedimenten, vissa osäkerheter kring om och hur dessa kan frisättas vid behandling. Den frågan har belysts tidigare inför behandling av en kustvattenförekomsten Brunnsviken, Stockholm (Rydin m fl 2016).

När fällningsmedlet (polyaluminiumklorid, ex. Kemira kemi XL 100) tillsätts genom injicering i sedimenten och den fosforbindande flocken bildas åtgår hydroxidjoner. För att undvika en pH-sänkning som resultat av detta behöver hänsyn tas till sjöarnas buffertförmåga.

Aluminiumbehandlingarna av sjöar i Växjöområdet genom sedimentinjicering innebar att man behövde ta hänsyn till både höga pH-värden i vattenmassan under högsommaren när produktionen var hög, och låga pH-värden när doseringen hade varit för stor under en period. Växjö kommuns erfarenheter av behandlingarna är väldokumenterade (Hedrén 2021). Polyaluminiumklorid har inte samma försurande effekt som exempelvis aluminiumsulfat, och den dos som här rekommenderas (60 g Al/m²) ligger centralt i det dosspann som har fungerat bra i välbuffrade slättlandssjöars sediment. Att behandlingen utförs under alltigenom välbuffrade förhållanden behöver säkerställas av erfaren utförare. Förutsättningarna för en effektiv och säker behandling av de högalkalina Långsjön och Markusbölefjärden bedöms goda, i synnerhet med den dos som föreslås.

Etablering

Vattenresurs AB bedömer efter fältbesök att etablering vid aluminiumbehandling genom sedimentinjicering kan ske vid Långsjön. Bäst tycks förutsättningarna vara vid Grelsby strand. För Markusbölefjärden är läget mer osäkert då företaget ännu inte varit på plats. För etablering krävs bärig väg för tyngre fordon ned till vattnet och möjlighet för fordon att vända. Dessutom behövs plats att ställa av fem 40-fots containrar (2,4 x 6 m) placerade intill varandra, det vill säga en någorlunda plan yta om minst 12 x 6 m. Uppställningsplatsen bör inte ligga längre än 50 meter från brygga. Saknas brygga har Vattenresurs flytbryggor som kan läggas på plats under arbetstiden. Uppgifterna lämnades av Göran Andersson, Vattenresurs AB.

Budgeterad kostnad

Med det underlag som presenteras ovan vad gäller doser och behandlingsområden, och under förutsättning att aluminiumbehandlingen genomförs genom sedimentinjicering, budgeterar Vattenresurs AB åtgärden till 4,5 Mkr för Långsjön och 4,1 Mkr för Markusbölefjärden. Genom åtgärden beräknas drygt 6,6 ton läckagebenägen fosfor bindas till sedimenten, något som ger en kostnadseffektivitet på ca 1300 kr/kg fosfor. Kostnad för etablering och avetablering beräknas av Vattenresurs till cirka 150 tkr per sjö, det vill säga totalt cirka 300 tkr, och är inkluderad i budget. Om det skulle visa sig att det krävs behandling över flera år för att uppnå önskad effekt tillkommer denna kostnad för varje etablering. Vid en eventuell flerårig insats kan etableringskostnaden per år bli något lägre om det är möjligt att lämna containrar över vintern. Samtliga uppgifter lämnades av Göran Andersson, Vattenresurs AB.

Förutsättningar och generella rekommendationer

Utredningen fokuserar på att kvantifiera den sedimentfosfor som med tiden kommer att mobiliseras i de båda sjöarnas sediment, samt på att beräkna den aluminiumdos som behövs för att binda denna fosfor innan den frigörs till vattenmassan och bidrar till övergödning. En framgångsrik aluminiumbehandling fastlägger fosfor till bottenarna och resulterar i ett kraftigt reducerat fosforläckage från bottenarna, något som innebär att

fosforhalterna i vattenmassan reduceras. Om den externa belastningen - näringspåverkan från tillrinningsområdet – ligger på en förhöjd nivå kommer dock nya förråd av läckagebenägen fosfor med tiden att byggas upp i bottenarna vilket medför att internbelastningen på sikt kommer att öka igen. I ett sådant läge kan det vara nödvändigt med en upprepad behandling efter ett antal år.

Aluminiumbehandling utförs med fördel då huvuddelen av den fosfor som omsätts mellan sediment och vattenmassa finns lagrad i bottenarna. I Långsjön och Markusbölefjärden, där stora delar av den läckagebenägna fosfor är associerad till järn, innebär det att perioderna strax efter vår- eller höstcirkulation, då bottenvatten och ytliga sedimentskikt syresatts, bör vara de bäst lämpade för åtgärd. Vidare bör behandling om möjligt ske innan temperaturen vid bottenarna stiger under vår-försommar och frisättningen av organiskt bunden fosfor till vattenmassan tar fart. Om behandling skulle ske då en betydande del av den läckagebenägna sedimentfosfor frisätts från bottenarna bör sedimentinjicering kompletteras med fällning i vattenmassan. Behandling vid ytvattentemperatur lägre än 10°C bör om möjligt undvikas eftersom det under sådana förhållanden finns viss risk för försämrade fällningsförmåga och därmed sämre effekt.

Att behandlingen utförs under alltigenom välbuffrade förhållanden är nödvändigt både med hänsyn till effekt och risker för påverkan på biota, och behöver säkerställas av erfaren utförare. Långsjön och Markusbölefjärden är högalkalina (ca 2 mekv/l) och förutsättningarna för en effektiv och säker behandling bedöms goda, i synnerhet med den dos som föreslås. Som underlag för uppföljning av åtgärdens effekt rekommenderas inför och efter åtgärd ett riktat vattenkemiskt kontrollprogram som undersöker fosforhalter, pH-värden, samt gärna också kväve- och syrgashalter, i profiler från yta till botten i sjöarna. Det kan också vara lämpligt att utvärdera åtgärdens effekt genom analys av aluminiumbunden fosfor i ett antal sedimentkärnor, samt att komplettera befintligt övervakningsprogram med analys av löst aluminium.

Som underlag för slutgiltiga beslut om kostnadseffektiva och genomförbara lokala åtgärder rekommenderas att en fosforbudget upprättas för de båda sjöarna. En sådan budget sätter den externa fosforbelastningen i relation till den interna, och utgör också underlag för att bedöma om påverkan från tillrinningsområdet ligger på en nivå som är långsiktigt hållbar i relation till miljö kvalitetsnorm god ekologisk status.

Inom den åländska vattenförvaltningen tillämpas ett gemensamt referensvärde för fosfor i sjöar (Cederberg 2017). Det innebär att samtliga sjöar, i en av människan opåverkad situation, antas ha samma näringsstatus, motsvarande en totalfosforhalt på 10 µg/l. Det system som används för klassificering av ekologisk status innebär vidare att gränsvärdet för god näringsstatus ligger vid en totalfosforhalt av 17,5 µg/l.

Det är alltså denna halt som är målhalten för de båda sjöarna. Baserat på totalfosforhalter i nuläget för Långsjön (36 µg/l) och Markusböle (63 µg/l) (medelvärden år 2017-2023, personlig kommunikation Caroline Karlsson, Miljöbyrån) innebär det att en mycket omfattande haltreduktion krävs, motsvarande drygt 50 respektive 70 procent, om god näringsstatus ska uppnås. Med hänsyn till naturliga skillnader i tillrinningsområdenas karaktär vad gäller exempelvis jordarter, andel våtmarker/vatten/skog/öppen mark, lutning etc samt sjöarnas morfometri och omsättningstid är dock det rimligt att anta att näringshalterna skiljer sig åt även utan lokal antropogen påverkan, det vill säga i en naturlig situation. Om vattenförvaltningen så tillåter är vår rekommendation att målhalter, acceptabel extern fosforbelastning och förbättringsbehov bedöms utifrån beräknade lokalspecifika referenshalter, snarare än generella halter.

Det ska också påpekas att det utöver aluminiumbehandling även finns andra restaureringsmetoder för att reducera intern fosforbelastning. Åtgärderna omfattar metoder för att öka fastläggningen av fosfor i sedimentet genom tillsats av fosforbindande ämnen (aluminium, järn, kalcium, lantan) eller genom förbättrade syrgasförhållanden vid bottenarna (syresättning av bottenvatten, omblandning). Andra åtgärder inriktas mot bortförsel av fosforrika sediment (muddring) eller fosforrikt bottenvatten (avtappning av bottenvatten, utspädning). Ytterligare en åtgärd som tillämpats är så kallad biomanipulering där ett selektivt reduktionsfiske riktat mot karpfisk (braxen, björkna, mört) och/eller utsättning av rovfisk (gädda, abborre) kan ge positiva effekter på övergödningssymptom och på fosforhalterna i vattenmassan. Av de metoder som baserar sig på fastläggning av fosfor till bottenarna bedöms aluminiumbehandling i nuläget vara den enda vedertagna metod som ger bevisat goda effekter. Av övriga metoder kan framförallt reduktionsfiske tänkas vara lämplig för restaurering, och då i synnerhet av den grundare Markusbölefjärden. Till metodens fördelar hör att den för sjöar med gynnsamma förutsättningar är en skonsam och kostnadseffektiv åtgärd som stärker den biologiska mångfalden och bidrar till minskad klimatpåverkan. Vi rekommenderar att förutsättningarna för ett framgångsrikt reduktionsfiske utreds innan en aluminiumbehandling genomförs. Möjligen kan en kombination av de båda metoderna vara det mest kostnadseffektiva för restaurering av Markusbölefjärden.

Nämnvärt är att de båda sjöarna hyser livskraftiga bestånd av flodkräfta, något som måste beaktas vid val och genomförande av interna åtgärder. En aluminiumbehandling som utförs enligt gängse metodik, under välbuffrade förhållanden, väntas inte ha någon negativ påverkan på kräftor. Av yttersta vikt är att åtgärder genomförs utan risk för spridning av kräftpest.

Referenser

Agstam-Norlin, O., Lannergård, E., Rydin, E., Futter, M. Huser, B. 2021. A 25-year retrospective analysis of factors influencing success of aluminum treatment for lake restoration. Water Research <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117267>.

Bystedt, S. 2011. Kartering av vattenvegetation och klassificering av sjöarna Markusbölefjärden, Långsjön och Lavsböle träsk enligt EU:s ramdirektiv för vatten. Åbo Akademi, Forskningsrapporter från Husö biologiska station, No 128 (2011).

Cederberg, T. 2017. Klassificeringsmanual för Ålands kustvatten och sjöar åren 2012–2018. Ålands landskapsregering.

Huser B, Egemose S, Harper H, Hupfer M, Jensen H, Pilgrim K, Reitzel K., Rydin E, Futter M. 2016. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality, Wat. Res. 97. 122-132

Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Pucsko, R. & M. Sager. 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 30: 98-109.

Rydin, E. & U. Lindqvist. 2023. Effekt av aluminiumtillsats på fosfor i Ullnasjöns sediment. Naturvatten i Roslagen AB, Rapport 2023:10.

Rydin, E. 2000. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. Water Research 34(7):2037-2042.

Rydin, E, Huser, B. & E. Welch. 2000. Amount of phosphorus inactivated by alum treatments in Washington lakes. Limnology and Oceanography 45(1):226-230.

Schütz, J., Rydin, E., & Huser, B. 2017. A newly developed injection method for aluminum treatment in eutrophic lakes: Effects on water quality and phosphorus binding efficiency. Lake and Reservoir Management 1-11. 10.1080/10402381.2017.1318418.

Ålands Vatten AB. 2003. Kartmaterial: Sjöreglering Markusbölefjärden och Långsjön. Ritning 0302-002, 0302-003.

Ålands Landskapsregering. Ytvattenstatus på Åland 2012–2018. Odaterad.

Övriga referenser/underlag:

Caroline Karlsson, Miljöbyrån, Ålands landskapsregering

Göran Andersson, Vattenresurs AB

Vattenkvalitetsdata från miljöövervakningsprogram, 1999-2022

SMHI, näringsbelastning <http://aland.smhi.se/atlas/>

Ålands Vatten AB <https://www.vatten.ax/vattentakter/langsjon-markusbolefjarden>

Bilaga 1. Protokoll från sedimentprovtagning

Provtagningslista för Långsjön

Prov-ID "1 0-2" utläses "provtagningspunkt/sedimentkärna 1, sedimentdjup 0–2 cm". Kärnorna 1–5 är tagna i Långsjön i riktning från sjöns sydligaste provpunkt (1) till sjöns nordligaste provpunkt (5). Det finns både provpunkt 3-1 och 3-2, tagna i närheten av varandra.

Provtagare: Jacob Nordlund, Caroline Karlsson

Datum: 3/11 & 6/11 2023

Prov-ID	Observation/kommentar
1 0-2 1 2-4 1 6-8 1 12-14 1 18-20 1 26-28 1 36-38	Löst brunt sediment i hela profilen. Djup ca 5 m. Provtaget 3/11.
2 0-2 2 2-4 2 6-8 2 12-14 2 18-20 2 26-28 2 36-38	Löst mörkgrått sediment med bruna strimmor. Djup ca 12 m. Provtaget 3/11.
3-1 0-2 3-1 2-4 3-1 6-8 3-1 12-14	Två kärnor togs på två olika ställen i närheten av varandra, punkt 3-1 söder om punkt 3-2. Djup ca 5 m. Sedimentet var väldigt hårt så vi fick inte upp hela profilen. I punkt 3-1 bestod sedimentet av ett tunnare lager sand och sedan av hård blålera. Provtaget 6/11.
3-2 0-2 3-2 2-4	I punkt 3-2 bestod sedimentet av lera, men inte blålera i samma utsträckning som i punkt 3-1 utan den var brunare i färgen. Provtaget 3/11.
4 0-2 4 2-4 4 6-8 4 12-14 4 18-20 4 26-28 4 36-38	Löst brungrått sediment. Djup ca 9 m. Provtaget 6/11.
5 0-2 5 2-4 5 6-8 5 12-14 5 18-20 5 26-28 5 36-38	Löst grått sediment. Djup ca 5 m. Provtaget 6/11.

Provtagningslista för Markusbölefjärden

Prov-ID "6 0-2" utläses "provtagningspunkt/sedimentkärna 6, sedimentdjup 0–2 cm". Kärnorna 6–10 är tagna i Markusbölefjärden i riktning från sjöns sydligaste provpunkt (6) till sjöns nordligaste provpunkt (10).

Provtagare: Jacob Nordlund, Caroline Karlsson

Datum: 6/11 2023

Prov-ID	Observation/kommentar
6 0-2 6 4-2 6 6-8 6 12-14 6 18-20 6 26-28 6 36-38	Löst brunt/grått sediment med växtlighet. Djup ca 4 m.
7 0-2 7 4-2 7 6-8 7 12-14 7 18-20 7 26-28 7 36-38	Löst brunt/grått löst sediment. Röda maskar i sedimentet. Djup ca 7–8 m.
8 0-2 8 4-2 8 6-8 8 12-14 8 18-20 8 26-28 8 36-38	Löst brunt/grått sediment. Djup ca 8 m.
9 0-2 9 4-2 9 6-8 9 12-14 9 18-20 9 26-28 9 36-38	Löst brunt/grått sediment. Djup ca 8 m.
10 0-2 10 4-2 10 6-8 10 12-14 10 18-20 10 26-28 10 36-38	Löst brunt/grått sediment. Djup ca 5 m.