

Metoder för åtgärd av intern fosforbelastning i Norrviken

– en litteratursammanställning på uppdrag av Upplands Väsby kommun

**Metoder för åtgärd av intern fosforbelastning i Norrviken
– en litteratursammanställning på uppdrag av Upplands Väsby kommun**

Författare: Anna Gustafsson, Emil Rydin & Mia Arvidsson
Naturvatten AB
Rapport 2016:5
2016-04-26
Naturvatten i Roslagen AB
Norra Malmavägen 33
761 73 Norrtälje
0176 – 22 90 65

| | |
|--|-----------|
| SAMMANFATTNING | 4 |
| BAKGRUND OCH SYFTE | 5 |
| Intern kontra extern fosforbelastning..... | 5 |
| Ekologisk och kemisk status – övergödning och miljögifter | 6 |
| METODER FÖR ÅTGÄRDER AV INTERNBELASTNING | 7 |
| Aluminiumbehandling..... | 7 |
| Järntillsats | 9 |
| Kalciumtillsats | 9 |
| Muddring..... | 9 |
| Biomanipulering | 10 |
| Avtappning av bottenvatten..... | 11 |
| Utspädning och genomspolning | 12 |
| Syresättning av bottenvatten | 13 |
| REKOMMENDATION AV ÅTGÄRDSMETOD FÖR NORRVIKEN | 14 |
| ALUMINIUMBEHANDLADE SJÖAR I STOCKHOLMS LÄN | 15 |
| Lejondalssjön | 16 |
| Bagarsjön..... | 16 |
| Flaten | 16 |
| Långsjön | 17 |
| Malmsjön..... | 17 |
| Trekanten | 17 |
| MINSKAD ÖVERGÖDNING - FÖRVÄRRADE MILJÖGIFTSPROBLEM? | 18 |
| Bedömning av risk för toxiska effekter vid aluminiumbehandling | 19 |
| SAMMANFATTANDE SLUTSATSER | 20 |
| REFERENSER | 22 |

Sammanfattning

Som en del i arbetet med att nå god ekologisk status för Norrviken har Upplands Väsby kommun initierat ett projekt med syfte att undersöka och utreda om aluminiumbehandling är ett lämpligt alternativ för att åtgärda frisättning av fosfor från sjöns sediment, den så kallade internbelastningen. I denna litteraturstudie sammanställs kunskap om olika metoder för åtgärder av denna näringskälla. I rapporten diskuteras också om och hur åtgärder mot övergödning kan tänkas påverka halter av miljögifter i vatten, växter och djur med fokus på konsekvenser av aluminiumbehandling. Avsikten är att kunskapssammanställningen ska fungera som underlag för beslut om vilken åtgärdsmetod som är bäst lämpad för Norrviken.

Åtskilliga sjörestaureringsmetoder finns för att åtgärda intern fosforbelastning. Aluminiumbehandling av sediment med PAX-lösning är den metod som bedöms vara bäst lämpad för åtgärd av internbelastningen i Norrviken. Metoden förordas då den kan förväntas ge goda resultat, är välbeprövad, kostnadseffektiv, har kort genomförandetid och mycket god genomförbarhet. Stöd saknas dock för att rekommendera aluminiumbehandling av de grunda mjukbottenarna i Norrvikens norra del. I dessa områden kan sugmuddring vara en lämplig metod. För att avgöra om så är fallet krävs mer detaljerade uppgifter från utföraren Teknikmarknad.

Minskad fosforbelastning från externa källor, exempelvis via dagvatten och Hagbyån, är i högsta grad eftersträvänsvärt även vid åtgärder mot internbelastning. Utan minskad externbelastning blir åtgärder mot internbelastningen kortsiktiga eftersom sedimentens fosforförråd då åter kommer byggas upp och ånyo frisätta fosfor.

Framgångsrika åtgärder mot övergödning kan medföra att miljögiftshalterna ökar i växter och djur eftersom mängden miljögift i ekosystemet fördelas över en mindre biomassa. En sådan effekt är tänkbar i Norrviken där halterna av vissa miljögifter i fisk redan idag överskrider fastställda gränsvärden. För att undvika ytterligare förhöjda halter vid åtgärder mot övergödning och istället åstadkomma en förbättrad kemisk status är det av stor vikt att åtgärdsarbetet riktas även mot miljögiftsproblematiken.

Avgörande för att en aluminiumbehandling ska kunna utföras på ett sätt som är säkert med hänsyn till direkt och indirekt påverkan på växter och djur är att den alltigenom utförs under välbuffrade förhållanden. Den teknik som förordas, aluminiumbehandling med PAX-lösning, uppfyller enligt utföraren Vattenresurs AB dessa krav.

Bakgrund och syfte

Som en del i arbetet med att nå god ekologisk status för Norrviken har Upplands Väsby kommun initierat ett projekt med syfte att undersöka och utreda om aluminiumbehandling är ett lämpligt alternativ för att åtgärda det betydande läckaget av fosfor från sjöns sediment, den så kallade internbelastningen. Att interbelastningen står för en stor del av den totala fosforbelastningen till sjön och är viktig att åtgärda visas i tidigare utredningar (Gustafsson & Schreiber 2011; Arvidsson & Rydin 2013).

Denna litteraturstudie syftar till att sammanställa kunskapen om metoder för att åtgärda internbelastningen i Norrviken med hänsyn till förväntade resultat, risker, genomförbarhet och kostnadseffektivitet för metoder som bedöms lämpliga. Arbetet inkluderar underlag för bedömning av hur en aluminiumbehandling kan tänkas påverka halter och spridning av miljögifter i vattenmassa och biota (fisk). Kunskap kring detta väntas även genom praktiska försök under 2016. Avsikten är att kunskapssammanställningen ska mynna ut i ett underlag för beslut om vilken åtgärds metod som är bäst lämpad för Norrviken.

Intern kontra extern fosforbelastning

Tidigare utredningar visar att det föreligger ett behov av åtgärder riktade även mot den externa fosforbelastningen (Gustafsson & Schreiber 2011). Att åstadkomma minskad fosforbelastning till Norrviken från externa källor, exempelvis via dagvatten och Hagbyån, är i högsta grad eftersträvanvärt även vid åtgärder mot internbelastning. Utan minskad externbelastning blir åtgärder mot internbelastningen kortsiktiga eftersom sedimentens fosforförråd då åter kommer byggas upp och ånyo frisätta fosfor. I områden där möjligheterna att utföra åtgärder på land är begränsade - av utrymmesskäl, tekniska skäl och/eller ekonomiska skäl - kan upprepade åtgärder mot internbelastning vara ett tänkbart och bra komplement. Som regel bör dock åtgärder vid eller nära källan eftersträvas. Även med omfattande externa åtgärder bedöms åtgärd av internbelastningen vara nödvändig om Norrviken ska ha förutsättningar att nå vattenmyndighetens förslag till miljö kvalitetsnorm, god ekologisk status 2027.

Ekologisk och kemisk status – övergödning och miljögifter

Vattenförekomsten Norrviken i Upplands Väsby och Sollentuna kommuner uppvisar i nuläget otillfredsställande ekologisk status. Enligt VattenInformationssystem Sverige (VISS) uppnås god kemisk status med undantag för PBDE och kvicksilver som i Sverige omfattas av generella kvalitetsundantag (VISS). God kemisk status uppnås dock inte med hänsyn till PFOS som uppmätts i förhöjda halter i fisk. PFOS omfattas av vattenmyndighetens klassningsarbete först hösten 2016 (personlig kommunikation, Håkan Johansson, Länsstyrelsen i Stockholms län). Vattenmyndighetens förslag till nya miljökvalitetsnormer innebär att tidsfristen för att uppnå god ekologisk status utökas från 2021 till 2027. För kemisk status gäller det nationella kvalitetsundantaget för polybromerade difenyletrar (PBDE) och kvicksilver.

Norrviken uppvisar en tydlig övergödningspåverkan med förhöjda näringshalter samt förändringar av växtplanktonflora, vattenvegetation och fisksamhälle. Vad gäller miljögifter redovisar Vattenmyndigheten förhöjda halter av PBDE, kvicksilver och ammoniak. Halterna av PBDE och kvicksilver i fisk var lägre än nationella medelvärden för sjöar (Karlsson m.fl. 2015). Sammanställningar av miljögiftsdata på uppdrag av Oxunda vattensamverkan visar att även halterna av perfluoroktansulfonsyra (PFOS) är förhöjda (fisk). Halten av PFOS låg cirka 5 gånger över aktuellt gränsvärde samt det nationella medelvärdet för sjöar och var den allra högsta av de fyra sjöar som undersökts i Oxundaåns vattensystem (Anonymous 2012, Karlsson & Viktor 2014, Karlsson 2015; sammanställt i Gustafsson 2015). Det kan ses som en indikation på att Norrviken belastas av lokala källor till PFOS.

Undersökningar av metaller och organiska miljögifter i sediment 2015 indikerar att koppar, nickel och PCB₇ förekommer i halter som enligt Naturvårdsverkets äldre bedömningsgrunder (1999, reviderade 2013) kan klassas som höga (Arvidsson 2016). Det gäller för metallerna i Norrvikens norra och centrala del. I den södra delen var halterna något lägre, motsvarande måttligt höga halter enligt samma bedömningssystem. Medelhalten på 9,2 µg/kg TS var ändå mycket lägre än uppmätta halter i Oxundasjön (1500 µg/kg TS) och Edssjön (66 µg/kg TS). I samma undersökning uppmättes PBDE genomgående i halter under rapporteringsgränsen (2 µg/kg TS). Det innebär att halterna utgjorde en bråkdel av det osäkra gränsvärde (1550 µg/kg) som anges av Havs- och vattenmyndigheten (skrivelse 2013-09-27). Även halterna av kvicksilver (0,155–0,192 µg/kg) låg med mycket god marginal under motsvarande typ av gränsvärde (0,67 µg/kg).

Miljögifter i fokus

Befintlig kunskap om miljögifter enligt ovan indikerar att PFOS, koppar och nickel är de ämnen som är mest intressanta att utreda och övervaka för Norrviken, både generellt och vid åtgärder mot övergödning. Eftersom det inte finns några tydliga tecken på lokala källor till PBDE och kvicksilver och halterna dessutom förefaller låga i Norrvikens botten, bör dessa båda ämnen främst vara intressanta att övervaka vid åtgärder mot övergödning och då genom undersökningar av biota.

Metoder för åtgärder av internbelastning

Åtskilliga sjörestaureringsmetoder finns för att åtgärda intern fosforbelastning. Flera av dessa metoder har genom åren använts för att åtgärda även andra miljöproblem, så som dåliga syrgasförhållanden och höga halter miljögifter. Denna sammanställning fokuserar på åtgärdernas effekt på fosforläckage från sediment. Åtgärderna omfattar metoder för att öka fastläggningen av fosfor i sedimentet genom tillsats av fosforbindande ämnen (aluminium, järn, kalcium) 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 vitfisk (braxen, björkna, mört) och/eller utsättning av rovfisk (gädda, abborre) kan ge positiva effekter på fosforhalterna i vattenmassan.

Ett alternativ till att åtgärda internbelastningen är att låta Norrviken återhämta sig på naturlig väg. Norrviken är en av de första sjöar där internbelastningens långvariga inverkan har följts (Ahlgren 1978). Med tanke på de betydande mängder läckagebenägen fosfor som förekommer i sjöns botten kan det väntas ta decennier eller ännu längre, även om vattnet omsätts relativt snabbt (ca 10 månader). Eftersom den externa fosforbelastningen alltså är högre än acceptabelt för att sjön ska nå näringsbalans (Gustafsson & Schreiber 2011) finns i nuläget ingen möjlighet till naturlig återhämtning.

Aluminiumbehandling

Aluminiumbehandling är en kostnadseffektiv metod för att åtgärda internbelastning genom att öka sedimentens fosforbindande förmåga.

Aluminium är inte redoxkänsligt och binder därför fosfor även vid syrgasfria förhållanden vilket gör att fosforbindningen i sedimenten blir stabil. Den första dokumenterade aluminiumbehandlingen gjordes i Långsjön (Huddinge) för snart 50 år sedan. Då spreds aluminiumsulfatgranuler på isen vilka löstes upp i vattnet och sedimenten vid islossning. Flera hundra sjöar har behandlats sedan dess och faktorer som morfometri, aluminiumdos, förråd av läckagebenägen sedimentfosfor och externbelastning påverkar hur långvarig effekten av behandlingen blir (Huser m. fl. 2015). Vid de tidiga behandlingarna var kunskapen om aluminiumdosering dålig och många sjöar behandlades med en för låg dos vilket medförde att sämre effekt, framförallt sett till åtgärdens varaktighet. Numera finns välfungerande metoder för att beräkna rätt aluminiumdos utifrån sedimentens förråd av läckagebenägen fosfor. Aluminium doseras på så vis att löst fosfor binds efterhand som fosfor mobiliseras från sedimenten. Långsjön som aluminiumbehandlades 1968 och 1971 med en alltför låg dos återbehandlades 2006 med en dos beräknad enligt denna metod (Rydin 2006). Genom rätt dosering bör åtgärden ha en obegränsad livslängd i och med att fastläggningen av fosfor är permanent (Rydin m. fl. 2000, Huset m.fl. 2011). Precis som för övriga metoder för åtgärd av internbelastning förutsätter detta att den externa belastningen ligger på en acceptabel nivå. Utvärderingar enligt ovan baseras i huvudsak på resultat från djupare sjöar och havsvikar. Försök med aluminiumbehandling i Vallentunasjön ger en indikation på att metoden eventuellt inte fungerar lika bra på grunda mjukbottnar där organiskt bunden fosfor dominerar (Rydin & Lindqvist 2015). Där utfördes nämnda försök i inneslutningar med begränsad vattenmängd och obefintligt vattenutbyte vilket kan ha påverkat utfallet. Att aluminiumbehandling kan sämre effektivitet i grunda bottenar som är rika på organiskt material indikeras även av liknande laboratorieförsök med sediment från Norrvikens norra grundområde (Arvidsson m.fl. 2016). Sammantaget visar försöken att aluminiumbehandling av denna typ av bottenar kan kräva ytterligare utredning innan metoden kan rekommenderas. Motiv till att i detta läge inte rekommendera aluminiumbehandling av Norrvikens norra grundområde ges även av lägre läckagehastighet och mindre förråd av läckagebenägen fosfor jämfört med sjöns övriga delar, samt framförallt av att denna grunda del av sjön sällan utsätts för syrgasbrist och därmed har bättre förutsättningar att kvarhålla järnbunden fosfor (Arvidsson m.fl. 2016).

Vattenresurs AB är idag det enda företag i Sverige som erbjuder restaurering genom behandling av sediment med aluminiumlösning. I Stockholmstrakten har företaget med goda resultat behandlat en handfull sjöar genom att blanda polyaluminiumkloridlösning i sedimenten. Metoden innebär att aluminium tillsätts till det övre (0-20 cm) sedimentskiktet genom slangar. Vid behandlingen blandas aluminiumlösningen (PAX) upp med stora mängder vatten vilket ger ett pH på 7,2 då lösningen injiceras i sedimenten (källa: Vattenresurs AB).

Detta pH kan väntas ligga nära de naturliga pH-förhållanden som råder i sedimenten.

Tidigare utfördes aluminiumbehandlingen genom tillsats av aluminiumsalt till själva vattenmassan. Vid behandlingen bildas flockar (fällningar) som sjunker mot botten och fosfat samt partikulärt material i vattenmassan. Då den sedimenterande flocken når botten bildar den ett kemiskt lock som fortsätter att binda den fosfat som frigörs i sedimenten. En stor fördel med den metod som nu används (sedimentinjektering) är att aluminiumdosen blir kvar på de botten där den tillsattes. Vid en fällning i vattenmassan riskerar flocken att flytta sig på grund av vind och vattenrörelser. Injektering 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 i sedimenten. Mot bakgrund av detta rekommenderas injekteringsmetoden framför den äldre metoden.

Järntillsats

Tillsats av järn är liksom aluminiumbehandling en möjlig väg för att förbättra sedimentens fosforbindande kapacitet. Vid syrgasfria förhållanden reduceras järn och förlorar då sin fosforbindande förmåga. Även om effektiv fosforbindning kan uppnås så länge oxiska förhållanden råder gör redoxkänsligheten metoden osäker. I litteraturen saknas exempel på att järntillsats har resulterat i långsiktig kontroll av internbelastningen (Cooke m.fl. 2005). Mot denna bakgrund rekommenderas inte järntillsats för åtgärd av Norrvikens internbelastning.

Kalciumtillsats

Tillsats av kalcium är ytterligare en möjlighet att förbättra sedimentens fosforbindande förmåga. Eftersom bindningsförmågan är bäst vid höga pH-värden (> 8) och kan metoden inte väntas nå sin fulla potential i Norrviken. Metoden förefaller också ge kortsiktiga resultat med en varaktighet av vanligen mindre än 2 år (Huser & Köhler 2014). Tillsats av bentonitleror är en nyare metod som kan vara möjlig, men ännu är kunskapen ofullständig om dosering och effekt. Mot denna bakgrund rekommenderas inte kalciumtillsats för åtgärd av Norrvikens internbelastning.

Muddring

Muddring är en välkänd metod som används för fysisk borttagning av sediment, ofta i syfte att åstadkomma större vattendjup, men också för att

lyfta bort näringsämnen, syreförbrukande material och/eller miljögifter ur bottenarna. Muddring kan utföras med mekaniska tekniker (grävning) samt hydrauliska (mekanisk upprivning och uppsugning) och vakuumdrevna (uppsugning av löst sediment) tekniker. Muddring resulterar i stora mängder sediment och vatten med höga näringshalter vilket gör metoden mycket resurskrävande men ofta effektiv framförallt vid restaurering av grundare sjöar (Cooke m. fl. 2005). En fördel med metoden är att näringsrika sediment som inte är kontaminerade av miljögifter kan få användning som gödselmedel. Muddring kan också utföras genom att frysa sedimentet och lyfta upp det i sammanhängande lager. Denna metod lämpar sig väl för förorenade sediment och i känsliga miljöer.

Det finns många exempel på muddring i syfte att minska näringsläckage från sediment, både lyckade och misslyckade sådana (Cooke m.fl. 2005, Pettersson & Wallsten 1990). I projekt som ses som misslyckade kan orsaken vara att en alltför liten del av sjöns botten muddrats för att ge tydlig effekt på läckta fosformängder, och/eller att muddringen inte utförts till tillräckligt sedimentdjup. Ytterligare en orsak till att förväntade effekter uteblivit kan vara att den externa belastningen fortfarande varit alltför hög. Under förutsättning att muddring sker till ett sedimentdjup där läckagebenägen fosfor saknas samt över huvuddelen av sjöns bottenyta bör en muddring bli framgångsrik om än ekonomiskt kostsam. I den grunda och oftast omblandade Vallentunasjön där organiskt bunden fosfor dominerar i sedimenten har muddring, men inte aluminiumbehandling eller biomanipulering (se avsnitt nedan), visat sig effektiv för att åtgärda fosforläckaget till vattenmassan (Rydin & Lindqvist 2015, Gustafsson m.fl. 2015).

En muddringsmetod som kan lämpa sig både för grunda och djupare sjöar som Norrviken har utvecklats av Teknikmarknad (avknoppning från KTH). Vid denna typ av muddring suges de översta centimetrarna ytsediment upp och avvattnas. Metoden innebär jämfört med traditionell muddring en minskad risk för frisättning av löst bunden fosfor och minskad risk för uppvirvling av bottenmaterial (resuspension). Därmed minskar risken för negativa konsekvenser kopplade till exempelvis överslamning av värdefulla grundområden. Sugmuddring enligt denna metod har använts med framgång i Barnarpsjön i Jönköpings kommun. Denna metod kan vara lämplig kanske framförallt för Norrvikens grunda botten, där aluminiumbehandling förefaller mindre effektiv, att döma av laboratorieförsök (Arvidsson mfl. 2016).

Biomanipulering

Biomanipulering innebär att man på olika sätt åstadkommer förändringar i ekosystemets näringsväv i syfte att återföra systemet till mer naturliga förhållanden. Metoden innebär vanligen ett selektivt reduktionsfiske riktat

mot vitfisk (braxen, björkna, mört) och/eller utsättning av rovfisk (gädda, abborre). Den ursprungliga tanken var att på så vis minska mängden djurplanktonätande fisk vilket skulle medföra ökade mängder betande djurplankton och ett reducerat växtplanktonsamhälle vilket i sin tur ger ett klarare vatten och andra positiva följd effekter. Mekanismerna bakom en lyckad biomanipulering är enligt senare tiders erfarenheter mer komplexa än så och tycks även omfatta minskat näringsläckage från sedimenten, minskad bioturbation (sedimentgrumling av framförallt födosökande fisk), mer utvecklad undervattensvegetation etc (Naturvårdsverket 2008). För att en biomanipulering ska lyckas krävs som regel att vitfiskbeståndet reduceras med cirka 70-80 procent, men i vissa fall har även reduktioner till enbart 50 procent nått relativt goda resultat (Jeppesen and Sammalkorpi 2002). Insatsen bör också genomföras under en begränsad tidsperiod, cirka 1- 3 år (Naturvårdsverket 2008). Om en mindre andel fisk än så tas upp och/eller om detta sker under en mer utdragen tidsperiod är det stor risk att biomanipuleringen inte fungerar. Anledningen till detta är att den kvarvarande vitfisken då kan fortsätta reproducera sig i en sådan omfattning att obalansen i ekosystemet kvarstår och de positiva effekter som eftersträvas uteblir.

Biomanipulering har använts för att åtgärda övergödning och övergödningens problematik och har i många fall varit framgångsrik (Naturvårdsverket 2008, Bernes m.fl. 2015). Restaurering genom biomanipulering har provats i Vallentunasjön genom utfiske 2010-2014 utan att resultera i önskad effekt med avseende på näringshalter, växtplankton och/eller siktdjup (Gustafsson & Rydin 2015). Att effekten uteblivit kan bero på att utfisket inte tycks ha uppnått den nivå som anses krävas för att skifta balansen i ekosystemet. Dock har inte heller de inneslutningsförsök som utfördes i sjön 2013 och 2014 gett indikationer på att biomanipulering fungerar som avsett. En tänkbar förklaring till den uteblivna effekten av utförda biomanipuleringar är att de processer som driver frisättningen av fosfor till vattenmassan under sommaren är motståndskraftiga mot förändringar i näringsvävens struktur. Utsikterna att lyckas med biomanipulering kan väntas vara bättre i grunda sjöar där undervattensvegetation har förutsättningar till stor utbredning. I Norrviken är stora delar av bottenarna alltför djupa för att möjliggöra en sådan utveckling. Biomanipulering rekommenderas därför inte som åtgärds metod för Norrviken.

Avtappning av bottenvatten

Avtappning av bottenvatten, så kallad hypolimnionavtappning, är en metod som innebär att fosforrikt bottenvatten avlägsnas, antingen genom att ledas nedströms eller till behandling och återcirkulation. Bäst effekt nås om avtappningen sker under skiktningstiderna då fosforhalterna är som högst och syrgashalterna som mest ansträngda. Fördelar med metoden är

att fosfor och syrgasfritt eller eventuellt svavelvätehaltigt vatten förs bort från sjön och att sedimentens fosforförråd med tiden utarmas. Metoden är dock behäftad med en del problematik. Om bottenvattnet leds nedströms innebär det en export av fosforrikt vatten och ökad näringsbelastning till dessa vatten vilket knappast är önskvärt eller ens acceptabelt. Vidare minskar vattennivåerna om inte nytt vatten kan tillföras. Om bottenvattnet behandlas, exempelvis genom fosforfällning och luftning, kan återföringen medföra att skiktningförhållandena störs och att kvarstående fosfor i bottenvattnet förs upp i ytvattnet. Gemensamt för de båda metoderna är att eventuellt svavelväte i bottenvattnet medför luktproblem som kan bli svårhanterliga, särskilt i tätortsområden. Under förutsättning att häverteffekten kan nyttjas och aktiv pumpning inte krävs kan hypolimnionavtappning vara en kostnadseffektiv metod för att exportera fosfor. Åtgärden kräver enligt erfarenhet från sjörestaureringsprojekt att bottenvattenvolymen byts ut ett par tre gånger årligen (Naturvårdsverket 2008).

Bottenvattenavtappning är en åtgärd som sedan 80-talet periodvis har tillämpas för Brunnsviken, Stockholm. Avtappningen sker genom pumpning och främst i syfte att förbättra syrgasförhållandena. Pumpningen innebär en kraftig reduktion av fosforhalterna i bottenvattnet och har en tydlig och gynnsam effekt även på förhållandena i ytvattnet. Åtgärden kan väntas innebära att sedimentens fosforförråd utarmas vilket är positivt. En nackdel med åtgärden är dock att stora mängder fosfor (ca 1 ton per år, Naturvatten AB, pågående utredning på uppdrag av Stockholms Stad) exporteras till utanförliggande havsområde (Lilla Värtan). Mot bakgrund av de negativa effekter och konsekvenser som listas ovan rekommenderas inte bottenvattenavtappning som restaureringsmetod för Norrviken.

Utspädning och genomspolning

Denna typ av åtgärd är liksom avtappning av bottenvatten inriktad på att föra bort näringsrikt vatten och därmed åstadkomma lägre halter och minskad övergödningsproblematik. Utspädning innebär tillförsel av vatten med lägre koncentrationer näringsämnen vilket späder ut det näringsrika sjövattnet samt skyndar på exporten nedströms. Denna teknik tillämpas bland annat av Stockholm Vatten för Trekanten och Långsjön. En genomspolning innebär enbart att omsättningstiden minskar. För att nå avsedd effekt måste omsättningstiden minska till en nivå som närmar sig den takt med vilken växtplankton tillväxer. Den sammantagna effekten av åtgärderna är en ökad export av fosfor och organiskt material vilket med tiden leder till att sedimentens fosforförråd reduceras. Metoderna har i många fall gett goda resultat (Naturvårdsverket 2008). Nackdelar med denna typ av åtgärd är dels att de förutsätter mycket god tillgång till

vatten, dels att de kan innebära att problemen exporterar nedströms. Av dessa anledningar rekommenderas inte metoden för Norrviken.

Syresättning av bottenvatten

Syresättning av bottenvatten kan göras med målsättningen att förbättra förutsättningarna för bottenfauna och för fisk i djupvattnet, samt för att öka sedimentens fosforbindande förmåga genom att oxidera löst järn i bottenvattnet. Syresättning kan åstadkommas genom omblandning eller luftning av bottenvatten. Restaurering genom omblandning är en principiellt enkel och flitigt använd metod som utvecklades under 50-talet för att undvika fiskdöd vid islagda förhållanden. En vanlig teknik vid omblandning är att luft pumpas ut genom perforerade rör förankrade vid botten. Då luftbubblorna stiger och expanderar driver de en vattenrörelse mot vattenytan. Denna metod bedöms vara den enklaste och mest kostnadseffektiva (Cooke m.fl. 2005). En annan teknik som visat sig fungera väl för att hålla vattenmassan i cirkulation är pumpning (Michele & Michele 2002). Utöver vanligtvis goda effekter på syrgashalt och fosforläckage kan en omblandning bidra till minskad primärproduktion genom att ljusbegränsa växtplankton och även bidra till minskad mängd cyanobakterier (Hyenstrand m.fl. 1998). Om tillgången till järn är låg i bottenvattnet och/eller om syresättningen blir ofullständig finns dock en risk för att kvarvarande fosfor i bottenvattnet tillgängliggörs i ytvattnet och där bidrar till förvärrad övergödningssproblematik (ökad mängd växtplankton, minskat siktdjup).

Andra metoder för att åstadkomma syresättning av bottenarna redovisas av Naturvårdsverket (2008) och omfattar bland annat pumpning av bottenvatten till ytan för syresättning och återföring, nyttjande av så kallade luftliftar där vattnet syreberikas i dubbelcylindrar samt pumpning av syrerikt ytvatten till bottenarna (MIXOX-metoden). Dessa metoder ger samma fördelar som omblandning, och de båda sistnämnda metoderna (luftliftar samt MIXOX) minskar risken för att fosforrikt bottenvatten förs upp i ytvattnet. Sammanfattningsvis medför syresättning av bottenvatten ofta positiva effekter med avseende på i första hand syrgasförhållanden och i andra hand fosforläckage. En stor nackdel är att effekterna är kortsiktiga och i princip enbart kvarstår så länge åtgärderna upprätthålls. Av dessa anledningar rekommenderas inte metoden för Norrviken.

Rekommendation av åtgärdsmetod för Norrviken

Av ovanstående avsnitt framgår att aluminiumbehandling med PAX-lösning alternativt sugmuddring är de metoder som sett till resultat bedöms ha bäst potential för åtgärd av Norrvikens internbelastning. I nedanstående kapitel redogörs kortfattat för de båda metodernas kostnadseffektivitet och genomförbarhet som ytterligare underlag för metodval.

Den aluminiumdos som skulle krävas för att inaktivera den läckagebenägna fosfor i Norrviken har beräknats från sedimentundersökningar (Arvidsson & Rydin 2013). Utifrån dessa uppgifter beräknar Vattenresurs AB kostnaden för behandling med PAX-lösning till 8-9 Mkr exklusive moms. Den totala mängden läckagebenägen fosfor kan, utifrån sedimentundersökningar och beräknad areal ackumulationsbotten, skattas till cirka 8 ton vilket skulle ge en kostnad om cirka 1 000 kr/kg fosfor. Om sjöns norra grundområde undantas från behandling, vilket rekommenderas enligt tidigare utredning (Arvidsson m.fl. 2016), minskar den totala kostnaden något liksom möjligen även kostnaden per kilo fosfor. Åtgärden genomförs lämpligen under våren och i andra hand under höstperioden. Enligt tidigare erfarenheter från aluminiumbehandling av sjöar och havsvikar i Stockholms och Uppsala län kräver inte åtgärden tillstånd enligt Miljöbalken och metodens genomförbarhet bedöms vara mycket god.

Kostnaden för muddring uppgår enligt Huser & Köhler (2014) till cirka 50-100 kr per kubikmeter, och nära 500 kr per kubikmeter för föroreningskontaminerade sediment. Under förutsättning att hela Norrvikens bottenyta kan muddras till ett djup av 5 cm och sedimentet inte räknas som föroreningskontaminerat uppgår kostnaden till cirka 10 Mkr. Om muddringsdjupet skulle dubblas (10 cm) eller om sedimenten skulle behöva efterbehandlas på grund av föroreningar blir kostnaden troligen mer än dubbelt så hög (20 Mkr). Sugmuddring ter sig attraktiv särskilt då det näringsrika ytsedimentet kan pumpas till närliggande åkermark och användas som jordförbättring utan förbehandling. För sjöar i tätort där möjligheten för sugmuddring till åkermark saknas eller där sedimenten är kontaminerade med miljögifter torde muddring bli väsentligt dyrare än exempelvis aluminiumbehandling. Bengt Simonsson vid Teknikmarknad som utvecklat den metod för sugmuddring som avses beräknar kostnaden för åtgärd av Norrviken till 5-6 Mkr och genomförandetiden till 2-3 år. Insatsen omfattar bortförsel av ytsediment och syrefattigt bottenvatten, och bidrar därmed till att minska förrådet av läckagebenägen fosfor samt öka sjöns kapacitet som fosforsänka. Bärgade sedimentvolym avvattnas och kan enligt utföraren användas som marktäckningsmaterial exempelvis

vid vägbyggen i närområdet. I och med att insatsens omfattning enligt utföraren styrs av den ”upplevda förbättringen” är det inte möjligt att ange hur stora mängder fosfor som kommer avlägsnas genom denna åtgärd. Därmed kan inte någon kostnadseffektivitet anges. Muddring innebär vattenverksamhet och är som sådan tillståndspliktig enligt Miljöbalken. För bottenytor mindre än 3000 kvadratmeter gäller anmälningsplikt.

Mot bakgrund av de beskrivningar som lämnas ovan av genomförbarhet och kostnadseffektivitet bedömer vi att aluminiumbehandling med PAX-lösning är den metod som lämpar sig bäst för åtgärd av Norrvikens internbelastning. Stöd saknas dock för att rekommendera aluminiumbehandling för sjöns norra grundområde (Arvidsson m.fl. 2016). Sugmuddring kan möjligen vara en kompletterande metod för dessa grunda mjukbottnar. För att avgöra om sugmuddring är lämplig för detta område, och möjligen även för sjön generellt, behöver mer detaljerade uppgifter inhämtas från utföraren Teknikmarknad.

Aluminiumbehandlade sjöar i Stockholms län

Nedanstående avsnitt utgör en kortfattad genomgång av sjöar i Stockholms län som behandlats med aluminium. Vissa av sjöarna redovisas tillsammans med diagram över totalfosforhaltens förändring över tid, hämtade från Miljöbarometern (senast uppdaterad: 16 april 2015). Flaten, Långsjön och Trekanten har behandlats i Stockholm Vattens regi. Övriga sjöar har behandlats av olika aktörer; Långsjön – Upplands-Bro kommun, Bagarsjön – Nacka kommun och Malmsjön – Botkyrka kommun. Generellt sett har behandlingarna fungerat bra men på grund av för hög extern belastning och för låg aluminiumdos har de positiva effekterna avtagit i Bagarsjön och Lejondalssjön. Den externa belastningen har av allt att döma varit fortsatt hög till Långsjön, vilket förklarar att effekten av behandlingen börjar avklinga, detta trots att sjövattnet späds ut med dricksvatten i pågående restaureringsprojekt (Stockholm Vatten AB). Dricksvatten tillsätts även till Trekanten. I Flaten, Malmsjön och Trekanten verkar effekten fortfarande vara god. Det är med andra ord av största vikt att rätt aluminiumdos kan beräknas och att den externa belastningen minimeras för att få en så god och långvarig effekt som möjligt.

Lejondalssjön

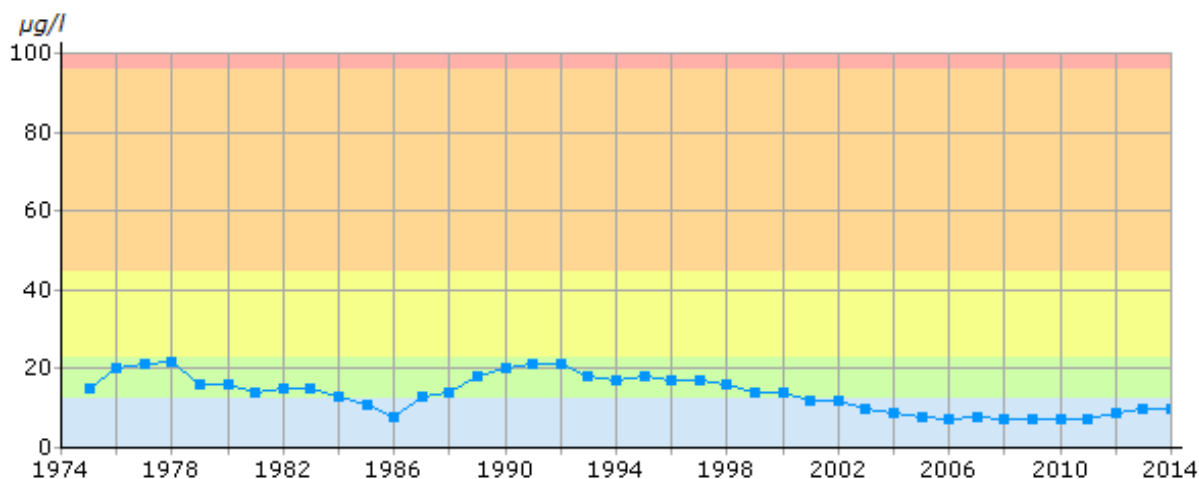
Lejondalssjön i Upplands-Bro kommun behandlades med aluminiumlösning i bottenvattnet (25 g/m^2) under perioden 1992-94. Behandlingen gav till en början en positiv effekt på vattenkvaliteten såsom ökat siktdjup och minskad fosforhalt i vattenmassan (Carlsson 1993). Efter ett decennium avklingade dock effekten, dels då externbelastningen fortfarande var för hög samt att en högre dos borde tillsats, och sedan början av 2000-talet är internbelastningen åter hög (Arvidsson 2015).

Bagarsjön

Bagarsjön i Nacka kommun är den första sjön som behandlades genom att på ett enklare sätt injicera aluminiumlösning i sediment och vattenmassa. Detta gjordes år 1997. Effekten var dock kortvarig på grund av för hög externbelastning (muntligen Sten-Åke Carlsson, Vattenresurs AB).

Flaten

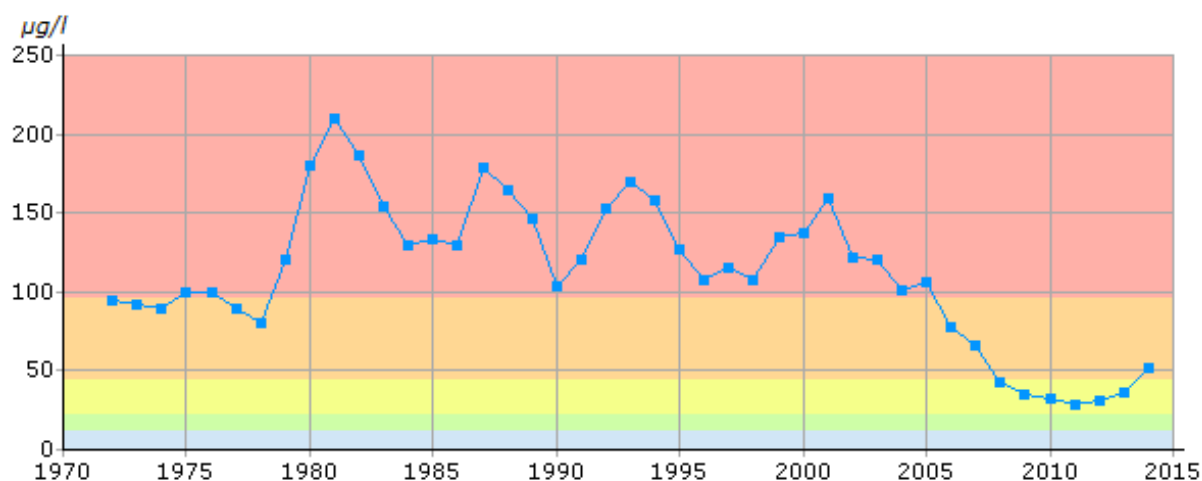
Flaten i Stockholm stad (Älta) är en uppskattad badsjö och den behandlades framgångsrikt år 2000. Innan behandling var internbelastningen markant och kraftiga algblomningar förekom under sommaren. Sedan behandlingen genomfördes har det inte noterats att fosfat frigjorts från bottenarna och fosforhalterna i sjön är låga (Figur 1). Dessutom förbättrades sjön med uteblivna blomningar av blågrönalger, förbättrade syreförhållanden, ökat siktdjup och större vegetationsdjuputbredning (Värnhed, 2005).



Figur 1. Innehåll av totalfosfor i augusti (ytvattnet i Flaten) från rullande 3-års medelvärden (Miljöbarometern).

Långsjön

Långsjön i Huddinge kommun behandlades år 2006 och effekten har varit god (Miljöbarometern). I ett pågående restaureringsprogram tillsätts dessutom dricksvatten till sjön (sedan 2002) vilket förmodligen står för en del av förbättringen. Den alltså höga externa belastningen har dock gjort att sjöns fosforhalter har börjat stiga de senaste åren (Figur 2).



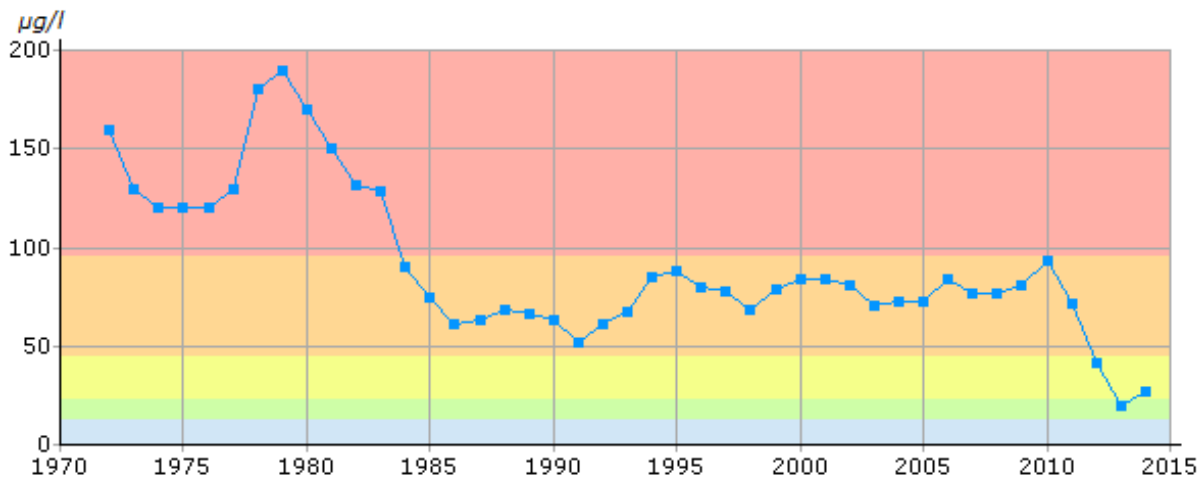
Figur 2. Innehåll av totalfosfor i augusti (ytvattnet i Långsjön) från rullande 3-års medelvärden (Miljöbarometern).

Malmsjön

Malmsjön i Botkyrka kommun behandlades år 2007. Även här har effekten varit god och vattnets totalfosforhalter har minskat från drygt 100 µg/l innan restaureringen till 20-30 µg/l (Botkyrka kommun).

Trekanten

I Trekanten i Stockholm stad (Liljeholmen) har det under 1900-talet gjorts flera försök att åtgärda övergödningssproblematiken. År 2011 behandlades bottenarna i den djupare delen av sjön med aluminium, vilket har haft en bra effekt på sjöns fosforhalter (Figur 3). I ett pågående restaureringsprogram tillsätts dricksvatten till sjön (liksom för Långsjön) vilket åtminstone delvis står för en del av förbättringen (Stockholm Vatten AB).



Figur 3. Innehåll av totalfosfor i augusti (ytvattnet i Trekanten) från rullande 3-års medelvärden (Miljöbarometern).

Minskad övergödning - förvärrade miljögiftsproblem?

Övergödning kan till viss del maskera miljögiftspåverkan genom så kallad biologisk utspädning. En återgång till ett mindre övergött ekosystemkan medföra att miljögiftshalterna ökar i biota (plankton, bottenfauna, fisk), eftersom mängden miljögift fördelas över en mindre biomassa. Exempelvis är kvicksilverhalten i fisk ofta högre i näringsfattiga sjöar än i näringsrika (Håkanson 1999). Åtgärder mot övergödning och övergödningsrelaterad problematik kan alltså paradoxalt nog innebära ökade miljögiftshalter och ökad risk för toxiska effekter. Ökade kvicksilverhalter i biota kan även uppkomma genom andra mekanismer kopplade till övergödningsåtgärder. Om syrgasförhållandena vid bottenarna förbättras från ett huvudsakligen anoxiskt (syrgasfritt) tillstånd till att pendla mellan anoxiska och oxiderade tillstånd, kan det medföra att kvicksilver i högre grad övergår i metylerad form (Regnell & Ewald 1991) och på så vis blir mer biotillgängligt, och alltså mer benäget att tas upp och lagras av organismer, exempelvis bottenfauna och fisk.

Syrgasförhållandena vid Norrvikens djupbottnar är normalt mycket ansträngda då vattenmassan är skiktad och svavelvätebildning sker återkommande (Gustafsson & Schreiber 2011, Lindqvist 2015). Bottenfaunasamhället på dessa bottnar är art- och individfattigt. Det innebär att miljögiftskontaminerade sediment endast i begränsad omfattning påverkas av bioturbation (omblandning genom biota) i

dagsläget. Om åtgärder mot övergödningen i Norrviken skapar förutsättning för att bottenfauna får bättre syrgasförhållanden kan bottenfaunasamhället stärkas och en ökad transport av miljögifter via bottenfauna till fisk kan bli ett faktum.

Som framgår ovan är det svårt att förutsäga vilken nettoeffekt åtgärder mot internbelastning och övergödning får sett till halter och effekter av miljögifter. Halterna av kvicksilver, PBDE och PFOS i fisk överskrider redan idag fastställda gränsvärden. För att undvika ytterligare förhöjda halter i biota och istället åstadkomma en förbättrad kemisk status är det av stor vikt att åtgärdsarbetet riktas både mot övergödning och miljögifter.

Bedömning av risk för toxiska effekter vid aluminiumbehandling

Möjliga toxiska effekter på akvatiska organismer vid aluminiumbehandling summeras i ett antal omfattande litteraturstudier (Cooke m.fl. 2005, Huser & Köhler 2012). Studierna omfattar akut och kronisk toxicitet samt fysiska förändringar av bottensubstrat och påverkan på bottenfaunan. Studierna visar att aluminium har låg reaktivitet och biotillgänglighet vid pH 6-9. Vid en aluminiumbehandling av sediment blandas aluminiumlösningen (PAX) upp med stora mängder vatten vilket ger ett pH på 7,2 då lösningen injiceras i sedimenten (källa: Vattenresurs AB). Resultatet kan väntas ligga nära, eller högre än, de naturliga pH-förhållanden som råder i sedimenten. Risken för att aluminium i sig skulle vara toxiskt för bottenfauna fisk och plankton bedöms därför vara försumbar. Uppvirvling av behandlade sediment (resuspension) bör inte heller medföra förhöjd löslighet eller toxicitet eftersom metallen då är partikulärt bunden.

En tänkbar effekt av aluminiumbehandling skulle kunna vara ökad löslighet och frisättning av metaller, bland annat miljögifter, från sedimenten. I och med att sedimentens pH-värde enligt ovan förblir neutralt vid och efter aluminiumbehandling ter det sig dock osannolikt att behandlingen skulle ge en sådan effekt. Lösligheten av metaller kan väntas vara opåverkad, eller minska om behandlingen medför förbättrade syrgasförhållanden. Partikelbundna ämnen inklusive miljögifter (metaller och organiska ämnen) bör bindas hårdare i botten-sedimenten efter injicering av aluminiumlösning då den bildade flocken aggregerar sedimentpartiklarna. Behandlingen kan alltså väntas medföra en minskad transport av partikulärt material från sediment till vattenmassa.

Ökad kunskap om, och i så fall hur, aluminiumbehandling kan påverka utbytet av miljögifter (metaller och organiska miljögifter) mellan Norrvikens sediment och vattenmassa väntas från pågående försök (på initiativ av Upplands Väsby kommun). Kunskap kring detta finns från

utläckageförsök med aluminiumbehandling i vattenmassa samt genom sedimentinjektion (Arvidsson m.fl. 2016). Försöken omfattade analys av näringsämnen och metaller (lösta halter); bland annat koppar och nickel som uppmätts i förhöjda halter i Norrviken. Flera metaller, däribland nickel och koppar och även halvmetallen arsenik, förekom med högst halter i obehandlade prover (referenser). Detta tyder på att det sker en fastläggning av vissa ämnen efter aluminiumbehandling. Halterna av kadmium, krom, kvicksilver och bly låg generellt sett under rapporteringsgränsen. Aluminium förekom inte helt oväntat i betydligt högre halter i de behandlade proverna. Högst aluminiumhalt (190 µg/l) noterades i ett av de prover som fällts i vattenmassan. I de prover som injicerats låg aluminiumhalten kring 60 µg/l. Det kan jämföras med den naturliga bakgrundshalten för sjöar i regionen vilken anges till 35 µg/l (totalhalt, Herbert m.fl. 2009). Två veckor efter behandling av sedimenten från Norrviken låg halterna i samtliga vattenprov under 20 µg/l. Förhöjt leversomatiskt index (relativ levervikt) och olika typer av vävnadsskador i lever har påvisats hos niltilapia (*Oreochromis niloticus*) som utsatts för kraftigt förhöjda halter av aluminium i vatten (Authman 2011). Försöket utfördes vid pH-värden och en hårdhet som motsvarar vattenkvaliteten i Norrviken. Effekter kunde beläggas för fisk som utsatts för aluminiumhalter på 1000 µg/l (lösta fraktionen), vilket är betydligt högre än de halter som registrerats vid ovan beskrivna försök med injektering av sediment. Mot denna bakgrund ter det sig osannolikt att en behandling skulle medföra metalltoxiska effekter (förhöjt LSI, vävnadsskador) på fisk. En undersökning av aluminiumbehandlade alkaliska insjöar kunde påvisa förhöjda aluminiumhalter i gäle hos abborre, men inte karpfisk (Wauer & Teien 2010). Mekanismen bakom de förhöjda halterna i dessa olika fiskarter har inte utretts. Det är också oklart hur höga aluminiumhalter fisken utsatts för, samt om de förhöjda halterna medfört toxiska effekter.

Avgörande för att en aluminiumbehandling ska kunna utföras på ett sätt som är säkert med hänsyn till direkt och indirekt påverkan på biota är att den alltigenom utförs under välbuffrade förhållanden. Den teknik som förordas, aluminiumbehandling med PAX-lösning, uppfyller enligt utföraren Vattenresurs AB dessa krav.

Sammanfattande slutsatser

Aluminiumbehandling av sediment med PAX-lösning är den metod som bedöms vara bäst lämpad för åtgärd av internbelastningen i Norrviken. Metoden förordas då den kan förväntas ge goda resultat, är välbeprövad,

kostnadseffektiv, har kort genomförandetid och god genomförbarhet. Stöd saknas dock för att rekommendera aluminiumbehandling av de grunda mjukbottenarna i Norrvikens norra del, för vilka laboratorieförsök indikerat att aluminiumbehandling kan ha lägre effektivitet (Arvidsson 2016). I dessa områden kan sugmuddring vara en lämplig metod. För att avgöra om så är fallet krävs mer detaljerade uppgifter från utföraren Teknikmarknad.

Eftersom den externa fosforbelastningen till Norrviken, exempelvis via dagvatten och Hagbyån, alltså bedöms vara högre än acceptabelt (Gustafsson & Schreiber 2011) är åtgärder även av dessa källor i högsta grad eftersträvansvärda. Utan minskad externbelastning blir åtgärder mot internbelastningen kortsiktiga eftersom sedimentens fosforförråd då åter kommer byggas upp och ånyo frisätta fosfor. Att minska den externa fosforbelastningen genom exempelvis dagvattenåtgärder beräknas vara cirka fem gånger dyrare än åtgärder av internbelastningen genom den metod som här förordas. Jämförelsen baseras på de ungefärliga kostnader som anges för dagvattenåtgärder i Norrvikens tillrinningsområde (VISS) under antagandet att dagvattenanläggningarna har en avskrivningstid på 20 år. Där möjligheterna är begränsade till resultat- och tidseffektiva åtgärder av externa källor kan upprepade åtgärder mot internbelastning vara ett bra komplement. Åtgärd av internbelastningen bedöms också vara nödvändig om Norrviken ska ha förutsättningar att nå vattenmyndighetens förslag till miljö kvalitetsnorm, god ekologisk status 2027.

Framgångsrika åtgärder mot övergödning kan medföra att miljögiftshalterna ökar i biota (plankton, bottenfauna, fisk), eftersom mängden miljögift i ekosystemet då fördelas över en mindre biomassa. En sådan effekt är tänkbar i Norrviken där halterna av vissa miljögifter (kvicksilver, PBDE, PFOS) i fisk redan idag överskrider fastställda gränsvärden. För att undvika ytterligare förhöjda halter i biota vid åtgärder mot övergödning och istället åstadkomma en förbättrad kemisk status är det av stor vikt att åtgärdsarbetet parallellt riktas även mot miljögiftsproblematiken.

Avgörande för att en aluminiumbehandling ska kunna utföras på ett sätt som är säkert med hänsyn till direkt och indirekt påverkan på biota är att den alltigenom utförs under välbuffrade förhållanden. Den teknik som förordas, aluminiumbehandling med PAX-lösning, uppfyller enligt utföraren Vattenresurs AB dessa krav.

Referenser

Ahlgren, I 1978. Response of Lake Norrviken to reduced nutrient loading. Verh. Int. Verein. Limnol. 20: 846-850.

Anonymous. 2012. Fiskprovtagning – resultat av analyser av kvicksilver och miljögifter i abborre från Edsviken och Norrviken 2011/2012. Sollentuna kommun, Dnr MBN 2011-001073 Ecos, daterad 2012-05-28.

Arvidsson, M. 2015. Sjöundersökning i Upplands-Bro kommun 2014. Lejondalssjön, Örnässjön och Lillsjön. Naturvatten AB, Rapport 2015:10.

Arvidsson, M. & E. Rydin. 2013. Undersökning av intern belastning och läckagebenägen sedimentfosfor i Norrviken. Naturvatten AB, Rapport 2013:18.

Arvidsson, M., Rydin, E. & A. Gustafsson. 2016. Fosforutbyte på olika bottendjup i Norrviken – Utläckageförsök som underlag för åtgärdsplanering. Naturvatten AB, Rapport 2016:2.

Authman, M.M.N. 2011. Environmental and experimental studies of aluminium toxicity on the liver of *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) fish. Life Science Journal, 2011; 8(4).

Bernes, C. 2015. Inverkan av reduktionsfiske på övergödda sjöars vattenkvalitet. Sammanfattning av Systematisk utvärdering SR3. EviEM, Stockholm.

Carlsson, S-Å., 2006. Sjöprovtagning i Upplands-Bro kommun 2005. Rapport Vattenresurs 69 sidor.

Cooke, G.D., E. B. Welch, R. Peterson & S. A. Nichols. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs. CRC Press, Boca Raton, FL. 591 pp.

Gustafsson, A. & H. Schreiber. 2011. Mot god status i Norrviken. Utredning på uppdrag av Oxunda Vattensamverkan.

Gustafsson, A. 2015. Miljögifter i Oxundaåns vattensystem. Sammanställning och bedömning av mätdata från sjöar och vattendrag. Naturvatten AB, Rapport 2015:26.

Gustafsson, A. & Rydin, E. 2015. Vattenkvalitet och plankton i Vallentunasjön 2014. Utvärdering av effekter av biomanipulering och historisk återblick. Naturvatten AB, Rapport 2015:14.

- Gustafsson, A., E. Rydin & U. Lindqvist. 2015. Vallentunasjön – fosforutbyte mellan sediment och vattenmassa. Litteraturstudie och utläckageförsök som underlag för åtgärdsplanering. Naturvatten AB, Rapport 2015:22.
- Gustafsson, A. & H. Schreiber. 2011. Mot god status i Norrviken. En metodbeskrivning för åtgärdsinriktat arbete inom vattenförvaltningen med Norrviken som modell. Rapport på uppdrag av Upplands-Väsby och Sollentuna kommuner.
- Herbert, R., L. Björkvald, T. Wällstedt & K. Johansson. 2009. Bakgrundshalter av metaller i Svenska inlands- och kustvatten. Institutionen för vatten och miljö, SLU, Rapport 2009:12.
- Huser, B. J. & S. J. Köhler. 2014. Granskning av åtgärdsförslag för att minska internbelastningen av fosfor i Växjösjöarna. Institutionen för vatten och miljö, SLU, Rapport 2014:7.
- Hyenstrand, P., P. Blomqvist & A. Petterson, A. 1998. Factors determining cyanobacterial success in aquatic systems- a literature review. Arch. Hydrobiol., Spec. Issues, Advanc. Limnol. 51:41-62.
- Jeppesen, E. & I. Sammalkorpi. 2002. Lakes, p. 297-324. In M. Perrow and T. Davy [eds.], Handbook of Restoration Ecology (Vol 2). Cambridge University Press.
- Jernelöv, A. 1970. Undersökning av kvicksilverhalt i fisk i sjöar som fällts med aluminiumsulfat. Särtryck ur Vatten 3/70.
- Karlsson, M. & H. Elving. 2009. Kvicksilver i sediment och fisk från Stockholms skärgård. IVL Rapport B1890.
- Karlsson, M., & T. Viktor. 2014. Miljöstörande ämnen i fisk från Stockholmsregionen 2013. IVL Rapport B2214.
- Karlsson, 2015. Föroreningshalter i abborre från Väsjön. Uppsala, 2015-01-08.
- Lindqvist, U. 2015. Biologiska och fysikalisk-kemiska vattenundersökningar i Björnöfjärden, Fjällsviksviken och Skarpösundet, Värmdö kommun 2012-2014. Naturvatten AB, Rapport 2015:20.
- Lindqvist, U. & Rydin, E. 2015. Inneslutningsförsök i Vallentunasjön för att utvärdera vitfiskens inverkan på vattenkvaliteten. Bilaga till Rapport 2015:14, Naturvatten AB.

Lindqvist, U. 2015. Sjöar och vattendrag i Oxundaåns avrinningsområde 2014. Naturvatten AB, Rapport 2015:15.

Naturvårdsverket. 2008. Kan Östersjön restaureras? Utvärdering av erfarenheter från sjöar. Rapport 5860.

Naturvårdsverket. 1999. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet – Sjöar och vattendrag. Naturvårdsverket rapport 4913.

Naturvårdsverket. 2013. Tabell 30 i Naturvårdsverkets rapport 4914 (1999) Bedömningsgrunder för miljö kvalitet – Kust och hav har ändrats. <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Miljoovervakning/Bedomningsgrunder/Sediment/#>

Regnell, O. & G. Ewald. 1991. Syrgashaltens inverkan på kvicksilvermetylering och kvicksilvrets fördelning mellan sediment och vatten från sjön Grycken - En laboratiestudie. Rapport från ekologiska institutionen, Lunds universitet.

Värnhed, Bo. 2005. Restaurering av Flaten. Stockholm Vatten.

Värnhed, Bo. 2009. Långsjön. Reducering av den interna fosforbelastningen genom aluminiumbehandling av bottensedimenten. Slutrapport. Stockholm Vatten.

Övriga källor:

Miljöbarometern <http://miljobarometern.stockholm.se/>

VattenInformationssystem Sverige (VISS)
<http://www.viss.lansstyrelsen.se/>