

# BORTPUMPNING AV SJÖARS BOTTENVATTEN FÖR ATT MINSKA INTERNBELASTNINGEN AV FOSFOR Erfarenheter från Bornsjön

## Hypolimnetic withdrawal to reduce internal phosphorus loading in lakes Experiences from Lake Bornsjön

av ANNIKA LINDVALL<sup>1</sup> och BARBRO ULÉN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vizon SciTec Inc., BC Research Complex, 3650 Wesbrook Mall, V6S 2L2 Vancouver BC, Canada

e-post: annika\_lindvall@hotmail.com

<sup>2</sup> Avdelningen för vattenvårdslära, SLU

e-post: barbro.ulen@mv.slu.se



### Abstract

Eutrophication of lakes is a serious problem, especially in agricultural areas. It is mainly due to external and internal loads of phosphorus (P), which increase the P concentration in the lake water. Lake Bornsjön is a reserve source of water supply for Stockholm and is located 25 km southwest of the city. Maximum yearly concentration of total P has increased during recent years to 920  $\mu\text{g l}^{-1}$  during 2000–2004 compared to 700  $\mu\text{g l}^{-1}$  during the 1990s. The lake seems to be in the beginning of a negative process with accelerating P concentrations and low levels of oxygen ( $\text{O}_2$ ) in the hypolimnion during stagnant periods.

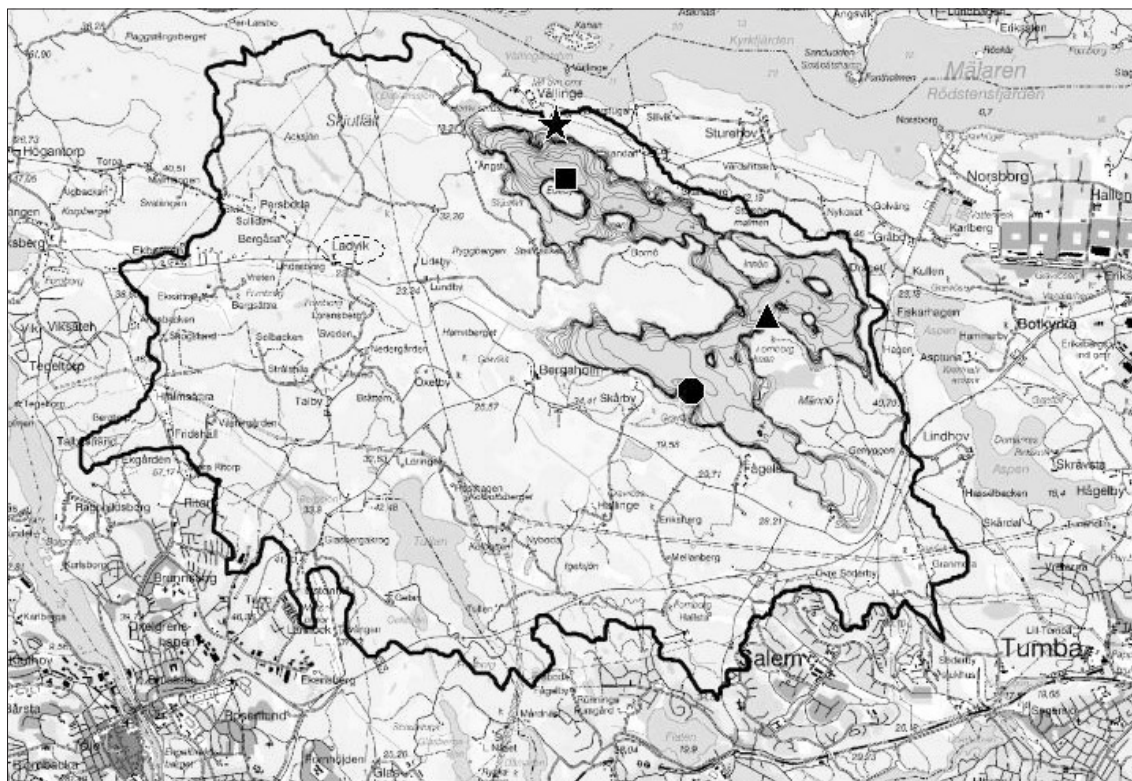
During the summer of 2004, 480 000  $\text{m}^3$  of water containing 158 kg P were pumped from the hypolimnion of the north-west basin of Lake Bornsjön. Pumping started in early June and lasted during the entire stratified period. The  $\text{O}_2$  depletion was quite high during June–August, 0.024  $\text{mg cm}^{-2} \text{dygn}^{-1}$ , and there was no clear effect on the P concentration of the hypolimnetic withdrawal. However, there was no additional  $\text{O}_2$  consumption in that year, in contrast to the significant trend observed in at least previous 18 years. Better results with improved  $\text{O}_2$  conditions would probably have been achieved with a more effective pump capable of 120  $\text{l s}^{-1}$  or more compared with the 40  $\text{l s}^{-1}$  employed here. Some alternative methods of managing the pumped water are discussed.

*Key words* – accelerating eutrophication, drinking water, hypolimnetic withdrawal, phosphorous loading, oxygen consumption.

### Sammanfattning

Eutrofiering av sjöar är ett vanligt problem, speciellt i jordbruksområden. Det beror främst på att det sker både extern och intern belastning som leder till ökande halt fosfor (P) i vattnet. Bornsjön är en reservvattentäkt till Stockholm och ligger 25 km sydväst om staden. Årliga maximala halten fosfor (P) har ökat till 920  $\mu\text{g l}^{-1}$  under åren 2000–2004 från att ha legat på 700  $\mu\text{g l}^{-1}$  under nittioalet. Sjön verkar vara i början av en negativ utveckling med ökande halter av P och låga halter av syre ( $\text{O}_2$ ) i hypolimnion under skiktade perioder.

Under sommaren 2004 pumpades 480 000  $\text{m}^3$  bottenvatten innehållande 158 kg P från hypolimnion i den nordvästra bassängen i Bornsjön. Pumpningen påbörjades i början av juni och pågick under hela den skiktade perioden. Minskningen av  $\text{O}_2$  under juni – augusti var relativt snabb; 0,024  $\text{mg cm}^{-2} \text{dygn}^{-1}$  och det blev ingen tydlig effekt av pumpningen på vattnets fosforhalter. Konsumtionen av  $\text{O}_2$  fortsatte dock inte att accelerera detta år vilket har varit trenden under minst 18 år tidigare. Antagligen skulle man få bättre resultat med förbättrade  $\text{O}_2$ -koncentrationer med en effektivare pump och högre pumphastighet; 120  $\text{l s}^{-1}$  eller mer jämfört med den nu använda hastigheten 40  $\text{l s}^{-1}$ . Några alternativa sätt att ta vara på det bortpumpade vattnet diskuteras.



Figur 1. Karta över Bornsjön och dess tillrinningsområde. Gränsen för tillrinningsområdet är markerad med fet linje. Provpunkterna i de olika delbassängerna i sjön och vid utloppet är markerade med symboler: stjärna = utloppet, kvadrat = nordvästra, triangel = östra och cirkel = södra.

## Inledning

Eutrofiering av sjöar förekommer mer eller mindre i de flesta bebodda områden och är speciellt vanliga i jordbruksområden. I Sverige är det de södra kustnära områdena samt områdena runt Mälaren, Hjälmaren Vänern och Vättern där näringsrikedom i sjöar är märkbar (Johansson & Persson, 2001) och den ökar till följd av mänsklig påverkan från t.ex. enskilda avlopp, reningsverk, industrier och jordbruk. Detta brukar leda till att det bli mer alger, minskat siktdjup, ändrad artsammansättning och ökad igenväxning. Även om tillförseln av näringsämnen till en sjö (extern belastning) minskar så kan fortfarande höga halter av näringsämnen finnas kvar i sjöns sediment från tidigare. Näringsämnen kan frigöras till den fria vattenmassan i sjön (intern belastning) och problem med eutrofiering kan kvarstå under lång tid.

Ett antal metoder har utvecklats för att motverka effekterna av eutrofieringen (Eiseltová, 1994, Moss et al., 1996 m.fl.). De flesta går ut på att binda fosfor i sedimenten och/eller att upprätthålla goda syreförhållanden i sjön och därmed minska internbelastningen.

Generellt gäller att metoderna får bäst effekt först efter det att den externa belastningen har minimerats.

Den här artikeln syftar till att beskriva syre- och fosforförhållandena i en sjö med accelererande eutrofiering, samt att utvärdera ett försök under sommaren 2004 där man under fem månader pumpade bort bottenvatten under språngskiktet.

## Bornsjön

Bornsjön ligger ca 2,5 mil sydväst om Stockholm och är en förkastningssjö med mestadels branta stränder. Den totala sjöytan är 6,6 km<sup>2</sup> och medeldjupet ligger på 10 m. Sjön består av tre delbassänger (Figur 1). Den södra bassängen (S) har ett maxdjup på 13,8 m och den östra (Ö) bassängen på 16 m. Den nordvästra (NV) och djupaste bassängen, där försöket med pumpning utförts, har ett maxdjup på 18,3 m. Även om NV och Ö bassängen har olika morfometri så är volymförhållandet mellan hypolimnion och epilimnion densamma i de båda bassängerna. Hypolimnion utgör där 27 % (räknat från 9 m från

Tabell 1. Klassificering av Borsjön baserat på närsalter, siktdjup, klorofyll och syrgas enligt Naturvårdsverkets bedömningsgrunder (1999).

Parameter (år klassningen baseras på)	Benämning	Klass
Totalfosforhalt (år 2004)	Måttligt höga halter, mesotrofi	2
Totalkvävehalt (år 2004)	Måttligt höga halter	2
Kvoten totalkväve/totalfosfor (år 2004)	Kväve och fosfor är i balans	2
Siktdjup (år 2003)	Måttligt siktdjup	3
Klorofyll (år 2001–2003)	Måttligt höga halter	2
Syrehalt (år 2001–2004)	Syrefritt eller nästan syrefritt	5

ytan) av den totala volymen medan den utgör en mindre andel (15 %) i S bassängen. Sjön som är reservvattentäkt för södra Storstockholm är fridlyst. Större delen av tillrinningsområdet ägs av Stockholm Vatten AB men Södertälje kommun äger mindre delar av tillrinningsområdet väster om Ladvik (Figur 1). 1988 fastställdes det nu gällande vattenskyddsområdet som i stort sett sammanfaller med vattendelaren. Det huvudsakliga tillflödet till Borsjön sker via två tillflöden, Oxelbydicket och Bergaholmsdicket, som tillsammans avvattnar 2/3 av tillrinningsområdet. Dikena mynnar i S bassängen och vattnet rör sedan sig från S till Ö bassängen. Där finns en ledning på 6 m djup genom vilken vatten kan tas till Norsborgs vattenverk, alternativt ledas ut till Mälaren. Praktiskt taget hela utflödet från sjön går via denna ledning. Det naturliga utloppet finns vid Vällinge vid sjöns nordligaste del, men här avvattnas bara sjön i undantagsfall vid högt vattenstånd. Sjön och dess tillrinning övervakas noggrant sedan mer än ett par decennier av Stockholm Vatten AB. Bolaget utför all provtagning och analys av närsalter mm. Detta sker enligt Svensk Standard på bolagets laboratorium som är ackrediterat av SWEDAC (Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll).

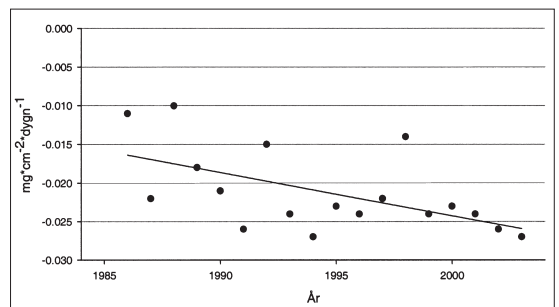
Sommaren 1987 påbörjades syresättningen av bottenvattnet i Ö bassängen genom luftning med ett s.k. Limnoaggregat. Luftningen har vanligen pågått från juni/juli till september/oktober, förutom några år med kortare avbrott på grund av driftstopp. Åtgärden var avsedd som en kortsiktig lösning i väntan på effekter av de åtgärder inom jordbruket och enskilda avlopp som började vidtas i slutet av 80-talet, respektive runt år 2000 (Christer Lännergren, 2004.). Luftningen avbröts i samband med försöket med bortpumpning av bottenvattnet 2004 för att använda Ö bassängen som referens.

### Vattenkemisk status

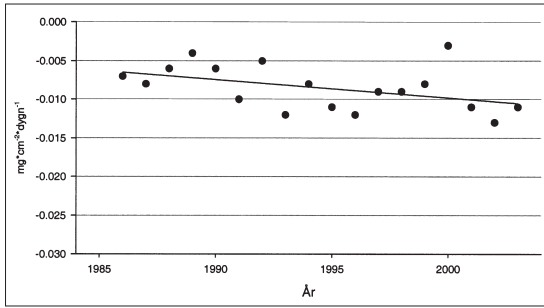
Borsjön har måttligt höga halter av totalfosfor (TotP) och totalkväve (TotN) och klassas därmed som en mesotrof sjö (Naturvårdsverket, 1999). Baserat på

samma klassificering råder kväve-fosforbalans i sjön med N/P kvoter på omkring 23. Om kvoten är låg, t.ex. genom en hög interbelastning av P, så ökar risken för att cyanobakterier (»blågröna alger») ska bilda massförekomster. Enligt närsaltsparametrarna, siktdjup och klorofyll klassificeras sjön som mesotrof, och befinner sig i klass 2–3 på en femgradig skala (Tabell 1). Kriterierna för syre (O<sub>2</sub>) indikerar däremot betydligt sämre status i och med att sjön tidvis har syrefria eller nästan syrefria förhållanden i bottenvattnet. Enligt kriterierna för skiktade sjöar utnyttjas mätvärden från provtagningsdjup som representerar minst 10 % av sjöns bottenyta eftersom O<sub>2</sub> förhållanden från en sjö som har förhållandevis liten volym i djuphålan kan ge en missvisande bild.

Produktionen i det trofogen skiktet reflekteras vanligen i den O<sub>2</sub> konsumtion som sker i hypolimnion och detta mått kan därför ses som en indikator på sjöns trofigrad. Syret i hypolimnion i NV bassängen har förbrukats allt fortare perioden juni–augusti under åren 1986–2003 (Figur 2). Trenden är signifikant ( $p < 0,05$ ), och approximerad till en rät linje motsvarar den en årlig ökning i O<sub>2</sub>-förbrukningen på 0,0006 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> dygn<sup>-1</sup>. Under de senaste åren har syrgasminskningen legat runt 0,025 mg cm<sup>-2</sup> dygn<sup>-1</sup> vilket motsvarar en



Figur 2. Syrgasminskning under juni–augusti på 12–17 m djup i nordvästra bassängen, 1986–2003. Den heldragna linjen motsvarar en syrgaskonsumtion som årligen ökar med 0,0006 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> dygn<sup>-1</sup>. Trenden är signifikant ( $p < 0,05$ ).



Figur 3. Syrgasminskning under juni–augusti på 12–14 m djup i östra bassängen, 1986–2003. Den heldragna linjen motsvarar en syrgaskonsumtion som årligen ökar med 0,0002 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> dygn<sup>-1</sup>. Trenden är endast marginellt signifikant ( $p < 0,1$ ).

klassning av sjön som mesotrof (Wetzel, 2001), dvs. indikerar bättre status än om man bara studerar syreförhållandena statistiskt.

I Bornsjöns Ö bassäng har O<sub>2</sub>-förbrukningen inte varit lika stor (Figur 3) och hastigheten har inte ökat lika påtagligt. Den årliga ökningen har motsvarat 0,0002 mg O<sub>2</sub> cm<sup>-2</sup> dygn<sup>-1</sup>, en trend som bara varit svagt signifikant ( $p < 0,1$ ). Den måttliga O<sub>2</sub>-förbrukningen är en indikation på att luftningen i Ö bassängen har haft effekt på förhållandena där. Under 2004, när luftningen var avstängd, var O<sub>2</sub>-förhållandena sämre än tidigare år (Figur 4 b). Under september–oktober var P koncentrationerna påtagligt höga och internbelastning från sedimenten betydande (Figur 4 c). Värdet på O<sub>2</sub>-minskningen kan dock generellt ha underskattats något eftersom O<sub>2</sub>-gradienterna allra närmast botten är okänd. I NV och Ö bassängen är det vattenvolumerna under 17 resp. 14 m djup som inte undersökts, vilket volymmässigt motsvarar 2,5 % resp. 23 % av hela hypolimnion.

### Karakterisering av bottensedimenten

Bornsjöns sediment undersöktes 1987 och befanns innehålla relativt höga P-koncentrationer (Pettersson, 1988). En viss anrikning av P i ackumulationsbottarna verkade ha ägt rum. Sedimenten på dessa områden är av gyttjetypp och dominerats således av material som bildats i sjön. Detta innehåller mycket organiskt bunden och rörlig P som kan brytas ned till fosfat (PO<sub>4</sub>-P), som sedan omlagras i sedimentet eller frigörs till vattenfasen. Fosfor bunden till järn (Fe) och aluminium (Al) utgjorde ca 25 % av totalinnehållet av P medan andelen labil P var < 1 %. Porvattnets innehåll av Fe påvisade oxiderade förhållanden vid sedimentytan med låga halter PO<sub>4</sub>-P som följd. Djupare ner var halterna påfallande höga, och totalt beräknades det finnas ungefär 1 ton

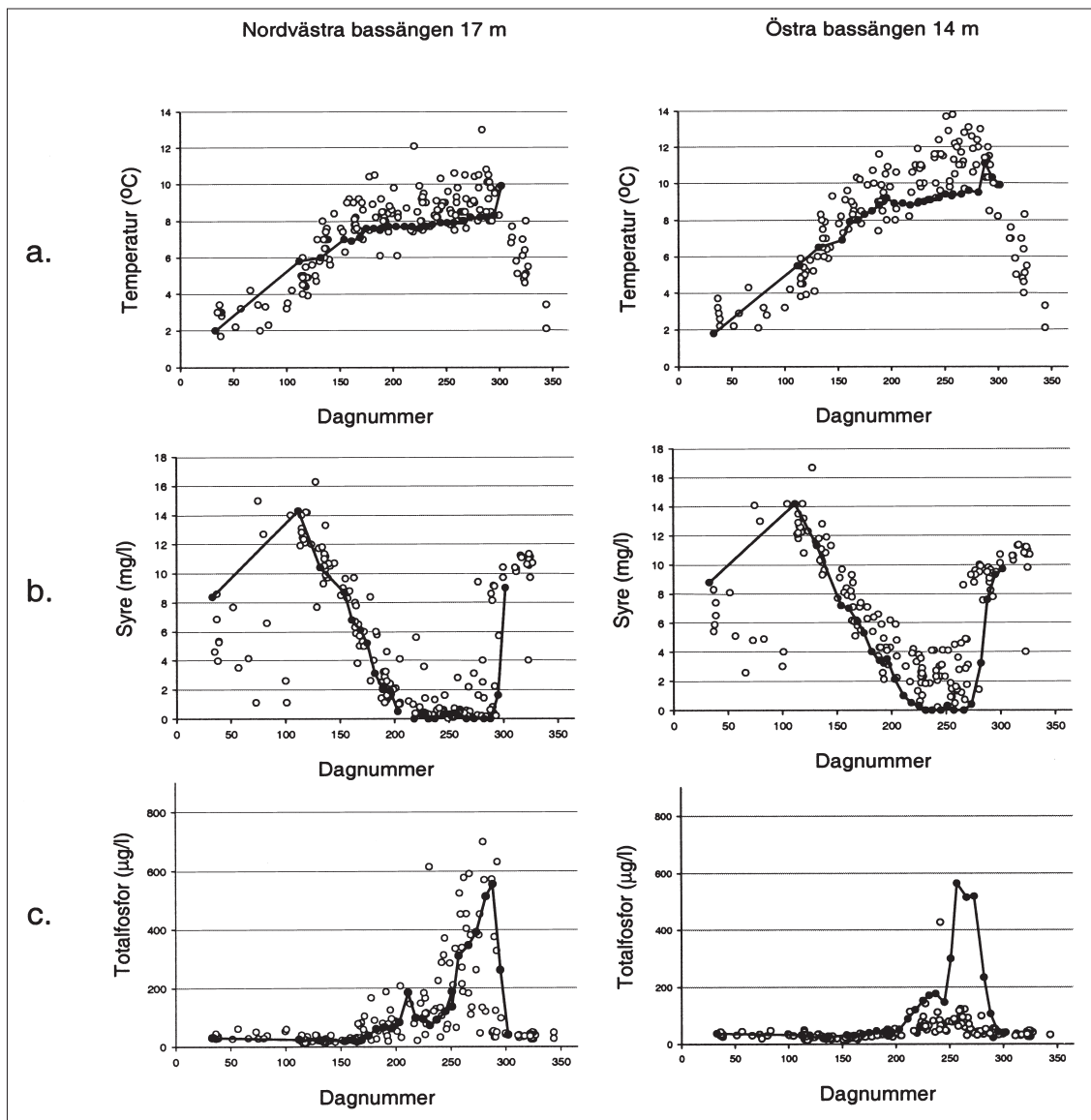
PO<sub>4</sub>-P i porvattnet i sedimentets översta decimeterskikt. En stor del av detta förråd kan lätt avges till vattenfasen om anaerobi uppstår vid sedimentytan och Fe reduceras.

I ett laboratorieförsök med utflöde av PO<sub>4</sub>-P konstaterades att mycket stora mängder P läckte ut från ytsedimenten vid högt pH (Pettersson, 1988). I stort sett hela andelen P bunden till Fe och Al lämnade sedimentet och återfanns som PO<sub>4</sub>-P i ovanstående vatten. Även om endast 10 % av Bornsjöns sediment drabbas av högt pH skulle på så sätt ca 3 ton P kunna frigöras. Med erfarenhet från sedimentundersökningar i jämförbara sjöar ansågs den järnbundna fosfor dominera (Pettersson, 1988). Anaerobi vid sedimentytan bedömdes därför orsaka i stort sett samma snabba frigörelse av PO<sub>4</sub>-P från sedimentytan som förhöjt pH.

Bornsjön tycks nu befinna sig i början av en negativ utveckling med högre halter av TotP och sämre O<sub>2</sub>-förhållandena (Lännergren, 2004). Vattenmassan innehåll av P under senare år har varit större än tidigare, troligtvis beroende på en ökad internbelastning. Under höstcirkulationen har mängden TotP i vattnet ökat med upp till 1000 kg i NV bassängen (Figur 5), vilket är i samma storleksordning som den årliga externa tillförseln till sjön via tillflödena. Problem med algbloomingar har inte förekommit ännu, men eftersom sjön är reservvattentäkt var det av speciellt intresse att sätta in åtgärder innan vattenkvaliteten riskerade att försämrats mer markant. Det var också viktigt med att starta åtgärder eftersom Bornsjön har långsam omsättning av vattnet vilket innebär att en återhämtning från eutrofa förhållanden sker långsamt.

### Åtgärder för att minska den externa fosforbelastningen

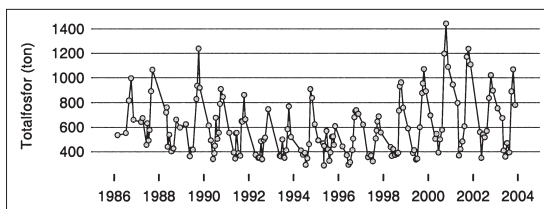
Åkermarken i tillrinningsområdet arrenderas ut av ägaren Stockholm stad. Arbetet med att minska belastningen av P från åkermarken sker i samarbete med lantbrukarna. I slutet av 80-talet infördes begränsningar av gödsel användningen och skyddszoner anlades kring huvudflödena. Totalt finns ca 100 enskilda avlopp i hela tillrinningsområdet. Av de båda huvudtillflödena avvattnar Oxelbydiken fler hushåll än Bergaholmsdiken och har dessutom en större andel enskilda avlopp utan tillfredställande rening. Oxelbydiken har också en större andel jordbruksmark och generellt har halterna TotP varit högre där än i Bergaholmsdiken (Figur 6). Standarden på några av de enskilda avloppen har förbättrats efter år 2000 inom projektet »Bra Små Avlopp vid Bornsjön» (Hellström & Jonsson, 2004). Halterna TotP i de båda huvudtillflödena, Oxelbydiken och Bergaholmsdiken, (Figur 6) indikerar dock ganska oförändrade halter i tillflödena sedan mitten av 1980-talet.



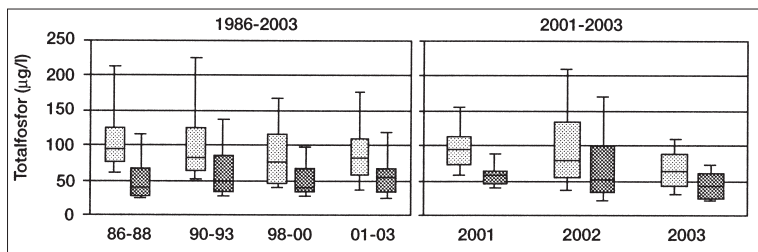
Figur 4. Temperatur (a), syre (b) och totalfosfor (c) i nordvästra och östra bassängen på 17 respektive 14 m djup, jämförelse mellan värden från 2004 (punkter med heldragen linje) och värden från 1986–2003 (cirkelar). Dag 200 är 18 juli, dag 250 är 6 sept. och dag 300 är 26 okt.

### Försök att minska intern fosforbelastning genom bortpumpning av bottenvatten

Bortpumpning av bottenvatten i NV bassängen av Bornsjön utfördes 2004. Det var ett pilotförsök för att undersöka om en sådan åtgärd verkade vara ett effektivt sätt att förbättra O<sub>2</sub> och P förhållandena i sjön. En utpumpning av vatten från hypolimnion bör påbörjas efter att sjön har skiktat sig men innan O<sub>2</sub>-fria förhållanden uppträder (Cook et al., 2003). Intaget bör placeras så att



Figur 5. Totalt innehåll av fosfor (kg) i vattenmassan i den nordvästra bassängen i Bornsjön 1986–2003.



Figur 6. Totalfosforhalter i de två största tillflödena till Borsjön; Oxelbydicket (ljusgrå) och Bergabolmsdicket (mörkgrå). Figuren är från Lännergren, (2004).

transporten av P maximeras, vanligtvis 1–2 m ovanför botten vid maxdjupet. Hur mycket vatten som ska pumpas bort måste vägas av mellan att inte störa skiktningen i sjön och att ändå ta ut tillräckligt med vatten för att se effekter på koncentrationerna  $O_2$  och P i bottenvattnet. Om skiktningen störs kan näringsrikt och  $O_2$ -fattigt vatten komma upp i det produktiva skiktet.

Syrehalterna i bottenvattnet i Borsjöns NV bassäng brukar börja minska i juni för att redan i juli nå låga halter. Pumpningen påbörjades därför 11 juni och pågick under hela den skiktade perioden t.o.m. 1 november. Önskvärd kapacitet på pumpen uppskattades till  $50 \text{ l s}^{-1}$ . Direkta mätningar i utloppet utförda med en saltmetod visade dock att den verkliga kapaciteten motsvarade ca  $40 \text{ l s}^{-1}$  (Bo Värnhed opubl.). Installeringen av pumpen gjordes med hjälp av dykare. Pumpen sattes fast på en plattform av träpallar och placerades i djuphålan i NV bassängen och en slang drogs till utloppet till Mälaren vid Vällinge (Figur 1). Pumpningen var sedan igång 11/6–1/11, fränsett ett avbrott 29/6–2/7 då

Tabell 2. Provtagningsdjup (m) i nordvästra (NV) och östra (Ö) bassängen. I NV bassängen togs förutom de ordinarie proven även täta prover närmast botten vid tre tillfälle i september.

NV bassängen		Ö bassängen
Ordinarie djup	Täta prov	Ordinarie djup
0	–	0
5	–	5
7	–	7
10	–	10
12	–	12
13	–	13
14	–	14
15	–	15
16	16,0	
–	16,2	
–	16,5	
–	16,8	
17	17,0	
–	17,3	
–	17,8	
–	18,0	

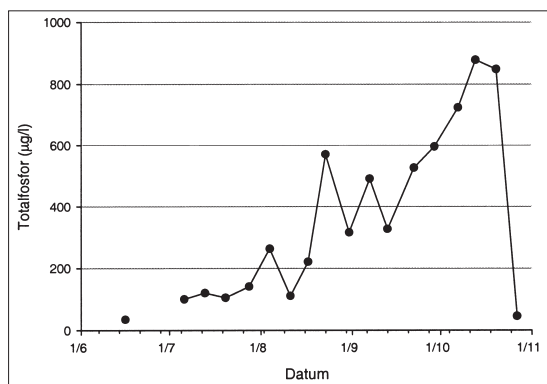
slangen från pumpen till utloppet gick av vid en av skarvarna. Totalt pumpades  $480\,000 \text{ m}^3$  bottenvattnet och med detta  $158 \text{ kg P}$  ut ur sjön under hela säsongen.

Under perioden som pumpningen pågick togs vattenprov för analys av syrgas och närsalter en gång i veckan vid olika djup (Tabell 2) i de båda bassängernas djuphåla och av det utpumpade vattnet. Temperaturen mättes samtidigt på varje meter. Under september–oktober togs även prover i NV bassängen på 17,5 och 18 m djup. Vid tre tillfällen i september undersöktes också P-gradienten i djuphålan genom vattenprovtagning i 8 skikt närmast botten med en specialbyggd provtagare (Tabell 2).

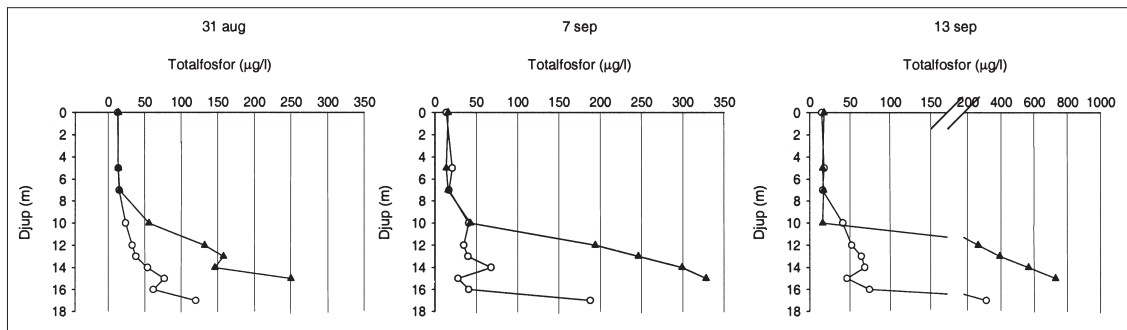
## Resultat och diskussion

### Koncentrationer i utpumpat vatten

Vattnet som pumpades ur sjön innehöll höga halter TotP och var som högst  $878 \mu\text{g l}^{-1}$  den 13:e oktober. Jämförelser med halterna TotP mellan 17 och 18 m djup indikerade att pumpen hade tagit vatten från skiktet 17,5–18 m djup vilket ungefär stämmer överens med dess läge ovan botten. Koncentrationen TotP i det utpumpade vattnet ökade kontinuerligt fram till slutet av oktober men varierade kraftigt, speciellt under augusti (Figur 7). I mitten av augusti steg halten från  $221 \mu\text{g l}^{-1}$



Figur 7. Koncentrationen av totalfosfor i det utpumpade vattnet under juni–oktober, 2004.



Figur 8. Totalfosforhalter i nordvästra bassängen (cirklar) och östra bassängen (trianglar) vid tre provtagningstillfällen under sensom-maren, 2004. Vid 14–15 m:s djup var halten högre än vid 15–16 m:s djup i den nordvästra bassängen.

till  $571 \mu\text{g l}^{-1}$  på en vecka. Konduktiviteten i det ut-pumpade vattnet varierade på ett liknande sätt med värden mellan  $24,7$  och  $29,8 \text{ mSm}^{-1}$ . Medelvärdet för koncentrationen av TotN i det utpumpade vattnet var  $875 \mu\text{g l}^{-1}$  och den högsta koncentrationen uppmättes den 20 oktober till  $1420 \mu\text{g l}^{-1}$ .

Det utpumpade vattnet hade ungefär samma koncentration  $\text{O}_2$  som bottenvattnet i NV bassängen. Koncentrationen var låg redan i juni och svavelväte uppmättes vid några tillfällen under september–oktober. Under denna period var samtidigt  $\text{O}_2$  halten under detek-tionsgränsen ( $< 0,3 \text{ mg l}^{-1}$ ) på 17–18 m:s djup i sjön.

### Fosfor och temperaturskiktning i sjön

Förhållandena i Ö och NV bassängerna är inte helt jämförbara eftersom de har olika morfometri. Ö bas-sängen har också luftats sedan 1987, vilket kan ha för-ändrat förhållandena i sedimentet. Under 2004 påvisa-des tydligt högre halter TotP under språngskiktet i Ö bassängen jämfört med NV bassängen (Figur 8). Gra-dienterna för NV bassängen hade också en oregelbun-denhet; vid 14–15 m:s djup var halten ofta något högre än vid 16 m:s djup, dvs. koncentrationen var förhöjd i jämnhöjd med tröskeln till Ö bassängen. Detta skulle kunna indikera att vatten med hög halt av P har rört sig

från Ö till NV bassängen t.ex. genom interna seicher, och att det på så sätt skett ett extra tillskott av P till den NV bassängen.

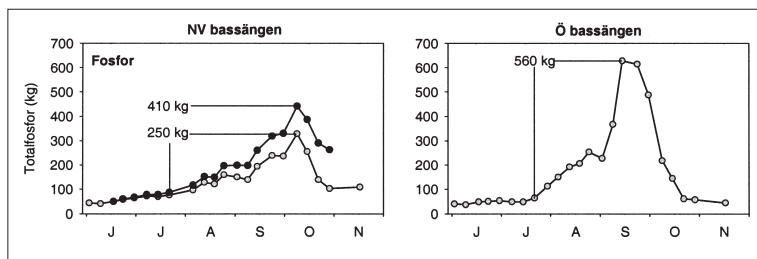
Halterna i NV bassängen var år 2004 ungefär lika som tidigare år men var ovanligt höga i Ö bassängen (Figur 4). Denna skillnad kan ha åtminstone tre orsaker:

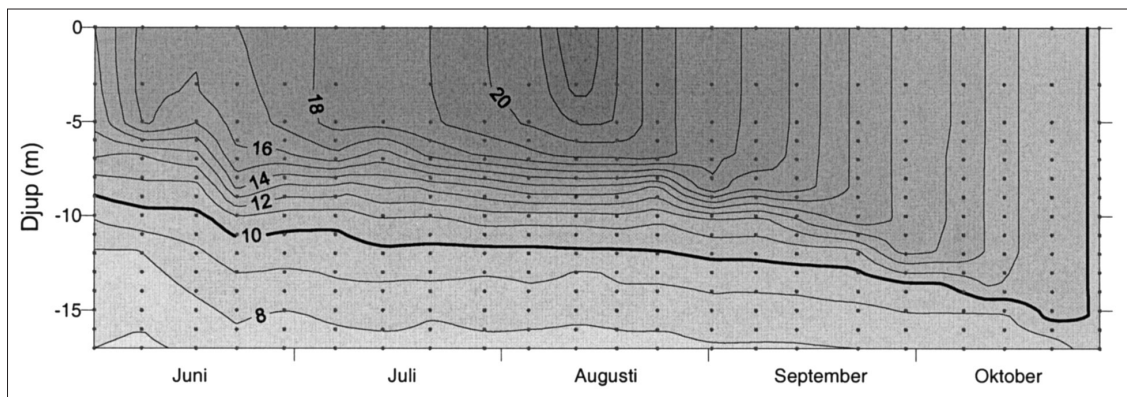
- Pumpningen hade effekt och medförde lägre halter i NV bassängen;
- Lättlösligt P har frigjorts från de förråd i sedimenten som har byggts upp under många år med luftning och medförde högre halter i Ö bassängen;
- Omsättning av P och  $\text{O}_2$  i de olika bassängerna har skett olika beroende på deras skilda morfometri.

Troligtvis har alla tre faktorerna inverkat och det är svårt att säga vilken som varit viktigast. Utan utpumpningen skulle dock fosforhalten varit klart högre än utan pumpning (Figur 9).

När man jämför förhållandena i NV bassängen med tidigare år är det svårt att se några tydliga effekter av pumpningen. Minskningen av  $\text{O}_2$  under juni–augusti var fortfarande snabb och motsvarade  $0,024 \text{ mg cm}^{-2} \text{ dygn}^{-1}$ . Syretäringen fortsatte dock inte att öka detta år och trenden (Figur 2) kan i bästa fall vara bruten. Bortförande av näringsrikt vatten i hypolimnion anses generellt kunna behöva pågå i åtminstone 3–5 år innan

Figur 9. Förändringen av fosformängden i bottenvattnet under 12 m djup i NV och Ö bassängen, juli–november 2004, i NV bassängen med och utan pumpade mängder. Figuren är från Lännergren (2004).





Figur 10. Temperaturen (°C) i nordvästra bassängen, juni–oktober 2004.

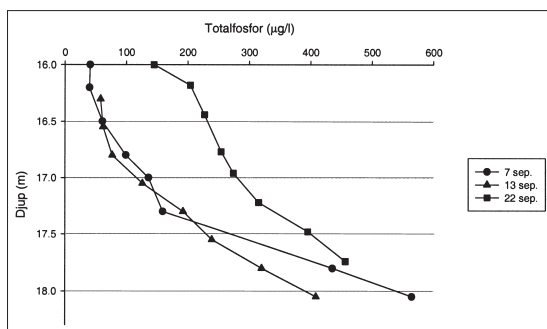
man ser en förbättring i vattnet ovanför språngskiktet (Cook et al., 1993). Pumpningen kan också ha haft dolda positiva effekter i och med temperaturskiktningen var mycket stabil sommaren 2004 (Figur 10), med ovanligt låg temperatur närmast botten (Figur 4). Fosforgradienterna närmast botten i början av september var markanta (Figur 11). Inblandningen av O<sub>2</sub>-rikt vatten från mindre djup har därför varit liten, och koncentrationsgradienten för P borde ha varit ännu kraftigare än utan pumpning. Sjön hade en liknande temperaturskiktning år 1995 och halten P började då öka något tidigare på sommaren än under år 2004 (Figur 12). Tyvärr saknas data för halten TotP under sensommaren 1995 då koncentrationen kan förmodas ha varit som högst, och någon ordentlig jämförelse kan inte göras med år 2004.

Avstängning av luftningsaggregat i Ö bassängen har medfört försämrade O<sub>2</sub>-förhållanden där (Figur 4 b) och P-halterna har varit ovanligt höga under sensommaren (Figur 4 c). Det senare skulle kunna förklaras av att man byggt upp ett förråd av lättlösligt P i sedimenten under

de ca 15 sommarsäsonger som bassängen luftats. När aggregatet varit avstängt har mycket av denna kunnat frigöras, speciellt som skiktningen under 2004 var ovanligt stabil. Detta motsägs dock av att en nästan lika hög halt TotP uppmättes redan år 1986, året innan luftningen började. Halten i slutet av augusti var då betydligt högre än år 2004 (Figur 13). Syrgasförhållandena och temperaturförhållanden var relativt lika de båda åren. De ovanligt dåliga O<sub>2</sub>-förhållandena indikerades därmed vara den viktigaste faktorn för höga P halter, inte ett eventuellt uppbyggt förråd av lättlöslig fosfor i sedimenten. Koncentrationen av totalfosfor kan dock ha varit ännu högre 1986 eftersom provtagningarna då bara utfördes en gång i månaden.

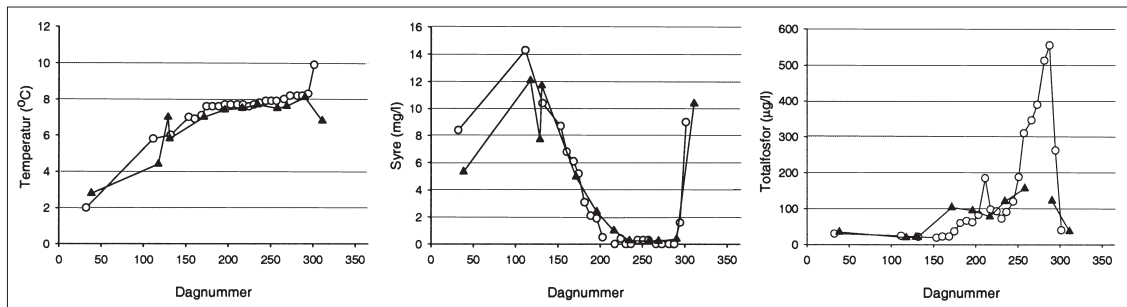
### Vattenomsättning och pumpkapacitet

Kapaciteten på pumpen var för liten och en större andel av vattenmassan hade behövt bytas ut för att man skulle få en tydlig förbättring av O<sub>2</sub>-förhållandena i NV bassängen. Cooke et al. (1993) rekommenderar en omsättningstid för hela hypolimnion på 2–3 månader för att pumpningen ska vara effektiv. För Borsjöns del motsvarar detta en pumpningskapacitet på 600 l s<sup>-1</sup> och med en sådan pumpningshastighet blir risken stor att skiktningen i sjön störs. Den använda pumpningskapacitet på 40 l s<sup>-1</sup> motsvarar å andra sidan att det tar hela 3,8 år innan vattenmassan byts ut, baserat på volymen under 10 m: djup som är 4 740 000 m<sup>3</sup>. Beräknat på volymen under 14 m djup (960 000 m<sup>3</sup>), dvs. den del av hypolimnion som har låga O<sub>2</sub>-nivåer, tar omsättningen av vattnet 9 månader om pumpningshastigheten är 40 l s<sup>-1</sup>. För att minska tiden till 3 månader krävs en pumpningskapacitet på 120 l s<sup>-1</sup>, en pumpningshastighet som borde ge bättre förutsättningar för ett effektivt resultat. Med en högre pumpningskapacitet förväntas också näringshalterna i det utpumpade vattnet bli lägre än under 2004.



Figur 11. Fosforgradient i djuphålan i nordvästra bassängen vid tre tillfällen i september, 2004.





Figur 12. Temperatur, syre och fosfor på 17 m djup vid nordvästra bassängen. Jämförelse mellan åren 1995 (trianglar) och 2004 (cirklar). Dag 150 är 29 maj, dag 200 är 18 juli och dag 250 är 6 september.

### Alternativ för att ta hand om bortpumpat vatten

Att pumpa det näringsrika bottenvattnet till Mälaren är inte en långsiktigt bra lösning eftersom det innebär en näringsbelastning på en annan värdefull sjö. Bottenvattnet bör tas om hand och ett alternativ är att ta det till Norsborgs vattenverk och använda det i produktionen av dricksvatten. Om detta ska kunna ske krävs vissa ombyggnationer i verket. Det är dessutom oklart om tillräckligt god vattenkvalitet kan uppnås, eftersom bottenvattnet från Bornsjön är svårfällt (Abrahamsson, 2004). Omfattande undersökningar kommer att behövas innan ett sådant omhändertagande kan bli aktuellt. Ett annat alternativ är att infiltrera vattnet i en ås strax nordost om Bornsjön. Även detta alternativ behöver dock utredas noggrant och att området vid sjön är naturskyddsområde innebär svårigheter att få tillstånd för detta alternativ.

Syftet med pumpningen i denna undersökning var att förbättra O<sub>2</sub>-förhållandet i bottenvattnet och därmed minska internbelastningen. Ett alternativ till detta är att pumpa ut bottenvattnet för att minska innehållet av P i sjön. Då bör kapaciteten på pumpen anpassas så att pumpningen ökar under sensommaren då halterna är högre. Med denna metod är det speciellt viktigt att ta

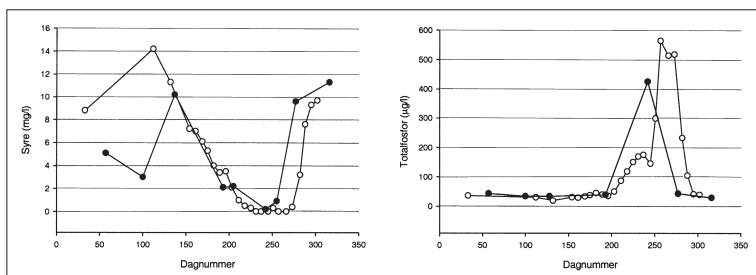
hand om vattnet eftersom innehållet av näringsämnen är stort. Med en pumphastighet som initialt är omkring 40 l s<sup>-1</sup>, med som under eftersommaren ökar till 120 l s<sup>-1</sup> skulle, baserat på 2004 års resultat, på så vis över 300 kg P kunna bortföras från sjön. Med 3 års pumpning motsvarar detta ungefär ett års interbelastning i NV-bassängen. Det är också ungefär samma mängd som innehållet i porvattnet i sedimentets översta skikt (0–10 cm). En så pass stor bortförel av P borde därför efter några år påverka interbelastningen i positiv riktning.

### Slutsatser

Det bör utredas om det går att göra ytterligare insatser för att minska den externa belastningen till Bornsjön. En noggrann kartläggning av källorna i tillrinningsområdet skulle vara användbar för att förstärka vad det är bäst att sätta in åtgärder. Samtidigt som botten sedimenten i sjön borde undersökas noggrannare borde det också göras en karakterisering av jordbruksmarken i tillrinningsområdet. Det bör också undersökas hur mycket näringsämnen de enskilda avloppen, som inte har åtgärdats i Oxelbydikets dalgång, bidrar med till den externa fosforbelastningen.

Internbelastningen av fosfor är så stor i Bornsjön att

Figur 13. Syrgas- och fosforhalter år 1986 (punkter) och 2004 (cirklar), i östra bassängen på 14 m djup. Dag 150 är 29 maj, dag 200 är 18 juli och dag 250 är 6 september.



man bör åtgärda denna. Om pumpningen ska få större effekt på syre- och fosforförhållandena än under 2004 så behöver bottenvattnet föras bort med större hastighet, minst  $120 \text{ l s}^{-1}$ . Sjön är ofta mycket stabilt skiktad och pumpningskapaciteten bör kunna ökas utan störning. Efter några års pumpning bör man kunna se positiva effekter på syre- och fosforförhållandena. Ett alternativ till att pumpa för att förbättra syrgasförhållandet är att pumpa ut bottenvattnet för att föra bort fosfor från sjön. Då bör kapaciteten på pumpen anpassas så att fosforkoncentrationen i bottenvattnet förblir hög under pumpningsperioden. Bottenvattnet som pumpas ut bör tas om hand vid pumpning men de olika alternativen behöver utredas mer.

### Erkännande

Ett stort tack till Christer Lännergren, Stockholm Vatten AB för hjälp och synpunkter under arbetet.

### Referenser

Abrahamsson J., 2004. Fällningsförsök med bottenvattnet från Bornsjön. Stockholm Vatten AB, opublicerat material.  
Cooke G. D., Welch E. B., Peterson S. A. & Newroth P. R., 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, Second Edition. Lewis Publishers, Boca Raton.

Eiseltová, M (ed) 1994. Restoration of Lake Ecosystems – a holistic approach. IWRB Publication 32. The Waterfowl and Wetland Research Bureau, Slimbridge, Gloucester, GL2 7BX, UK.  
Hellström D. & Jönsson L., 2004. Bra små avlopp vid Bornsjön, resultat från 15 enskilda anläggningar. Stockholm Vatten (Populärversionen). ISBN: 91-7289-263-3.  
Johansson H. & Persson G., 2001. Svenska sjöar med höga fosforhalter – 790 naturligt eutrofa eller eutroferade sjöar?. Institutionen för miljöanalys Rapport 2001:8.  
Lännergren C., 2004. Projekt – Utpumpning av bottenvattnet från Bornsjön. Stockholm Vatten AB, opublicerat material.  
Moss B., Madgwick, J. & Phillips, G., 1996. A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes. – Broads Authority, UK.  
Naturvårdsverket., 1999. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet – Sjöar och vattendrag. Rapport 4913. Naturvårdsverket, Uppsala.  
Pettersson K., 1988. Bornsjöns sediment – fosforsituationen 1987. Erkenlaboratoriet, Limnologiska institutionen, Uppsala universitet, opublicerat material (Rapport till Stockholm Vatten AB).  
Wetzel R.G., 2000. Limnology – Lake and River Ecosystems, Third edition. Elsevier Science, Orlando.  
Värnhed B., 2000. Restaureringen av Flaten, september – oktober 2000. Stockholm Vatten AB, opublicerat material.  
Värnhed B., 2004. Syrsättningskapacitet hos luftningsaggregatet i Bornsjön. Stockholm Vatten AB, opublicerat material.