

Christer Lännergren/VV
 Stockholm Vatten,
 106 36 Stockholm
christer.lannergren@stockholmvatten.se

2005-11-14

Utpumpning av bottenvatten från Bornsjön.

Inledning

Bornsjöns yta är 660 ha och medeldjupet 9,8 m. Volymen är 64,8 Mm³, tillrinningsområdets yta 42 km² och den teoretiska omsättningstiden (med avrinningstal 7,5 l/s/km²) ca 6,5 år.

Tabell 1. *Provtagningsdjup i de tre bassängerna. Ordinarie provtagningsdjup är markerade med fetstil.*

Bassäng		
NV	NO	S
0	0	0
5	5	5
7	7	7
10	10	10
12	12	12
13	13	
14	14	
15	15	
16		
17		
17,5		
18		

17,5 och 18 m från och med 31 augusti.

Sjön består av tre mer eller mindre väl åtskilda bassänger. Det största djupet i den nordvästra bassängen är 18,3 m och i den nordöstra 16,0 m. De två bassängerna skiljs åt av en tröskel på 11-12 m. Största djup i den södra bassängen, som står i förbindelse med den nordöstra, är endast 13,6 m och någon egentlig tröskel finns inte mellan de två bassängerna.

Tabell 2. *Undersökta parametrar.*

Temperatur	pH
Siktdjup	Fosfor (total, fosfat)
Ledningsförmåga	Kväve (ammonium, nitrit+nitrat, total)
Syre	Kisel
Svavelväte	

Den normala övervakningsprogrammet, med provtagningar ungefär en gång i månaden, utökades så att prover i NV och Ö bassängen togs varje vecka från 1 juni till 27 oktober. Prover togs också på ett större antal djup (Tabell 1). Temperaturen mättes på varje meter med termistor. Provtagningspunkten i Ö bassängen flyttades något mot söder till det största djupet i bassängen. Undersökta parametrar framgår av Tabell 2.

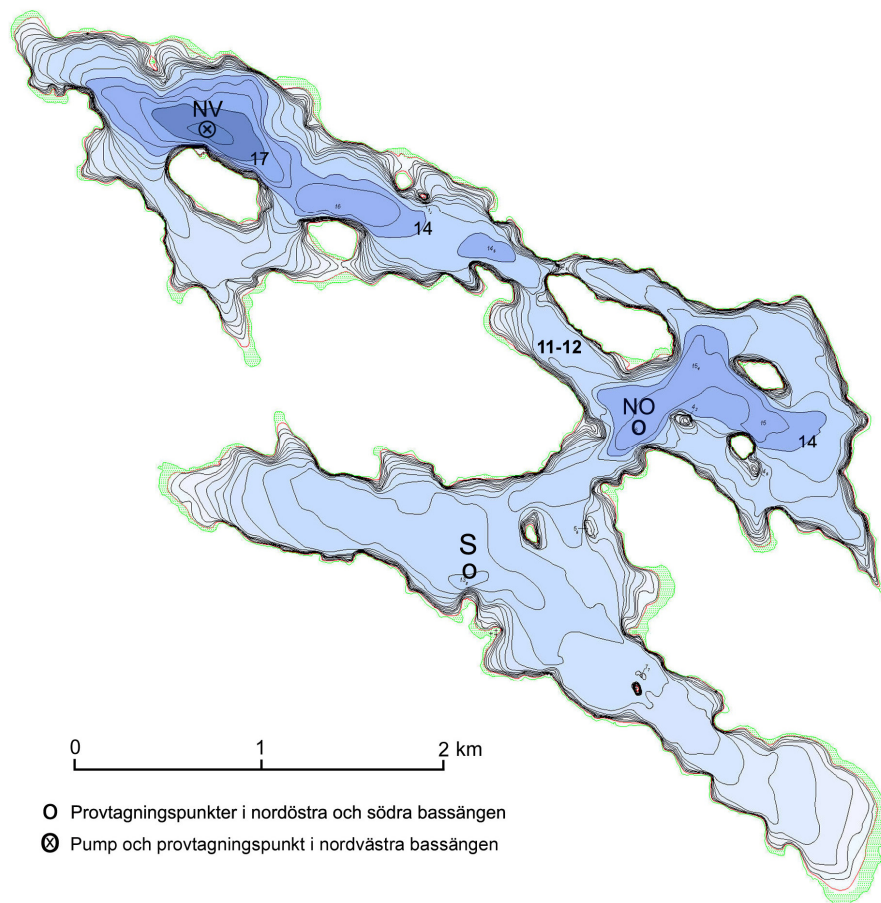
Pumpen var placerad på 18 m djup i NV bassängen. Utpumpningen påbörjades 11 juni och pågick till 28 oktober. Vattnet kom enligt de kemiska analyserna från 17,5-18 m djup. Den utpumpade volymen mättes i utloppskanalen vid Vällingen till 40 l/s.

Ö bassängen avsågs som referens. Luftningsapparaten var därför avstängd. NV och Ö bassängen är åtskilda av en tröskel på 11-12 m, största djup i NV bassängen är 18,3 m och i Ö bassängen 16,0 m. Den södra bassängen, med största djup 13,8 m, tar emot huvuddelen av inflödet till Bornsjön. har kontakt med den östra bassängen via ett brett sund utan egentlig tröskel. där det största inflödet kommer

Volym och bottenytor i de två bassängerna framgår av Tabell 3. Djupförhållanden, rovtagningspunkter och pumpens placering visas i kartan, Figur 1.

Tabell 3. Volym och bottenytor i NV och Ö bassängen.

Nordvästra bassängen			Östra bassängen		
Intervall (m)	Volym (m ³)	Bottenyta (ha)	Intervall (m)	Volym (m ³)	Bottenyta (ha)
0-2	4,159	13,872	0-2	3,431	7,485
2-3	1,970	7,985	2-3	1,664	2,716
3-4	1,889	8,335	3-4	1,633	3,462
4-5	1,812	7,002	4-5	1,597	3,622
5-6	1,742	7,076	5-6	1,558	4,217
6-7	1,667	7,959	6-7	1,513	4,506
7-8	1,584	8,522	7-8	1,468	4,590
8-9	1,484	11,600	8-9	1,420	4,869
9-10	1,324	20,290	9-10	1,361	6,723
10-11	1,152	14,050	10-11	1,261	13,200
11-12	1,027	11,100	11-12	1,034	31,590
12-13	0,904	13,450	12-13	0,719	30,820
13-14	0,702	26,870	13-14	0,463	19,900
14-15	0,470	19,640	14-15	0,265	19,300
15-16	0,279	18,590	15-16	0,084	16,600
16-17	0,146	7,903			
17-18	0,062	8,913			
18-18,3	0,003	1,743			



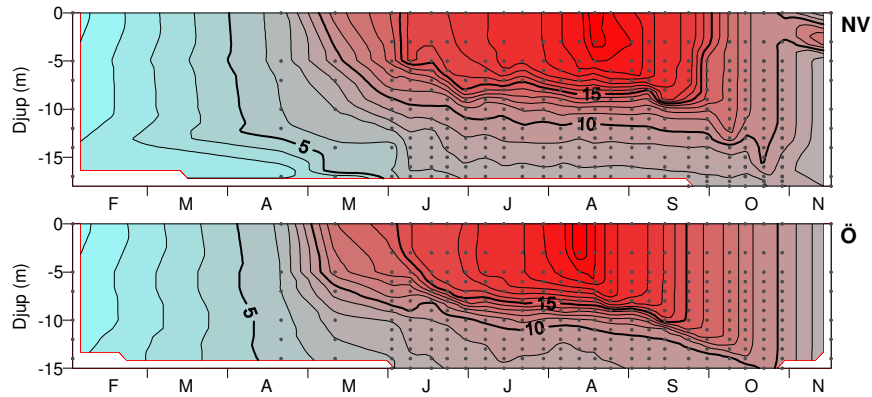
Figur 1. Djupkarta över Bornsjön, med provpunkter och pumpens placering

Skiktningförhållanden

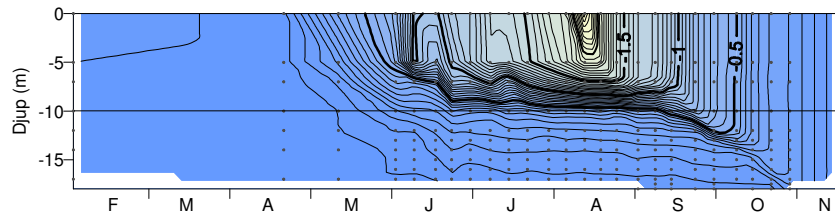
Saltinnehållet (konduktiviteten) är låg och ganska jämnt fördelad och spelar ingen roll för vat- tents täthet, som helt bestäms av temperaturen. En svag skiktning förekom redan i maj.

Språngskiktet var fullt utvecklat i början av juni och låg då på ca 6 m djup. Språngskiktet låg i juli-augusti på ca 8 m. Under hösten sjönk språngskiktet gradvis med ungefär 1 m per vecka, särskilt tydligt i Ö bassängen (Fig 2).

Den gradvisa sänkningen av språngskiktet under hösten framgår tydligt av täthetsfördelningen (Fig 3). Täthetsskiktningen i bottenvattnet, under språngskiktet, var mindre stark än i ytvatt- net, men tydlig och stabil under hela perioden från juni till november.

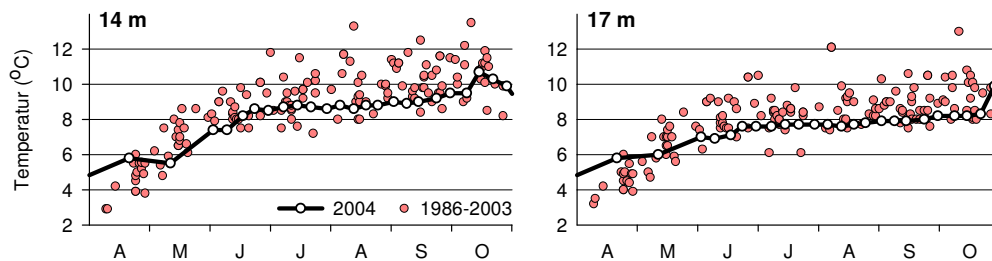


Figur 2. Temperaturen i NV och Ö bassängen, februari-november 2004.

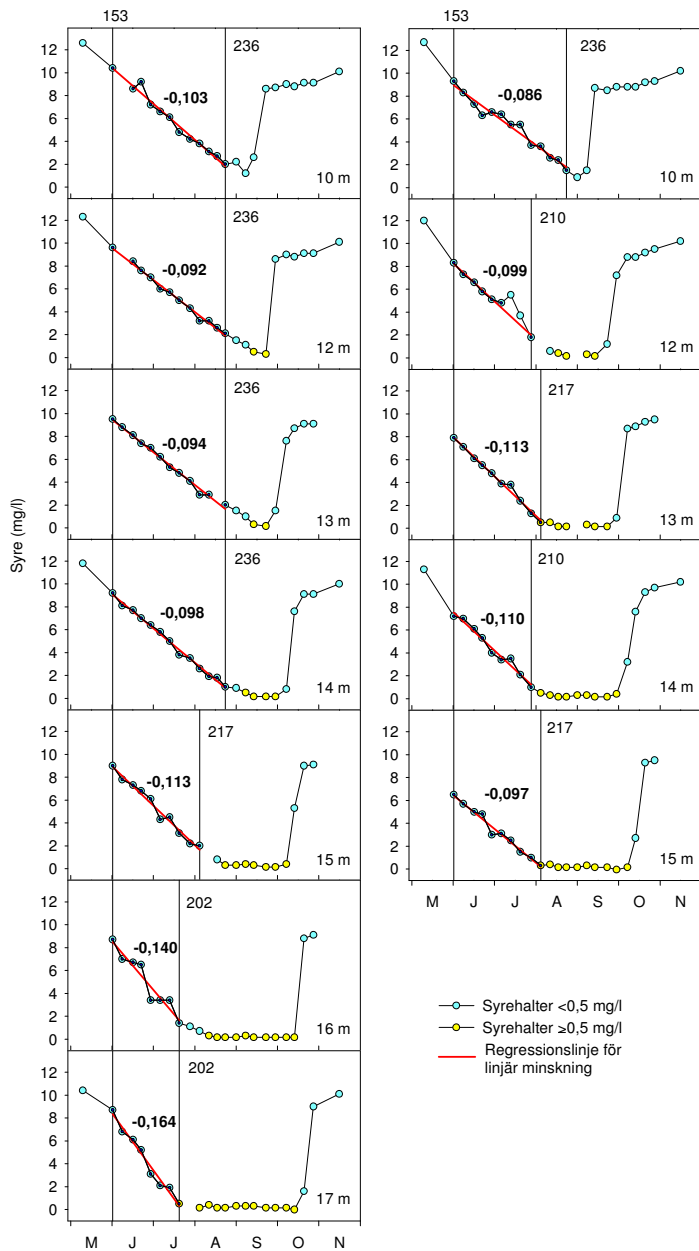


Figur 3. Densiteten (Sigma-t) i NV bassängen, februari-november 2004.

Temperaturen i bottenvattnet var ovanligt låg 2004 (Fig 4). Eftersom temperaturen i bottenvatt- net bara kan öka genom att varmare vatten från ytan blandas ner till stort djup, innebär den låga temperaturen att skiktningen var stabilare än vanligt,.



Figur46. Temperaturen på 14 och 17 m djup, april-oktober 1986-2003 och 2004.



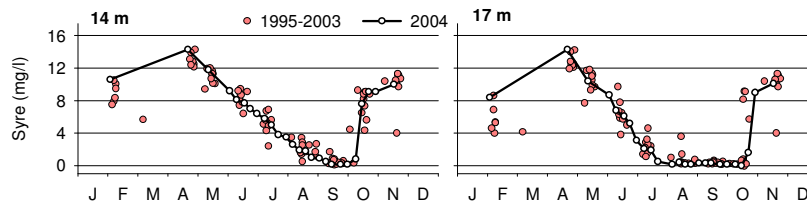
Figur 7. Syrehalter på 10-17 m djup i NV bassängen och 10-15 m djup i Ö bassängen, maj-november 2004, samt syreminskningshastigheten (mg/l/d) under perioden med linjär minskning (dag 153 – 202-236).

Syre: Syrehalterna i NV bassängen var höga ner till 7 m djup. På 10-13 m djup minskade syreinnehållet nästan linjärt från början av juni till augusti-september med en hastighet av ca 90 $\mu\text{g/l/d}$. Hastigheten ökade med djupet och var 0,164 mg/l/d på 17 m.

Sänkningen av språngskiktet i september gjorde att minskningen avbröts på 10 m djup, där den lägsta halten var 1,2 mg/l (Fig 7). Halter $< 0,5$ mg/l förekom på 12 och 13 m djup i september, på 16 och 17 m djup i augusti till mitten av oktober. Svavelväte registrerades bara vid ett tillfälle på 17 m djup men uppträdde kontinuerligt på 17,5 och 18 m djup ifrån slutet av september till slutet av oktober.

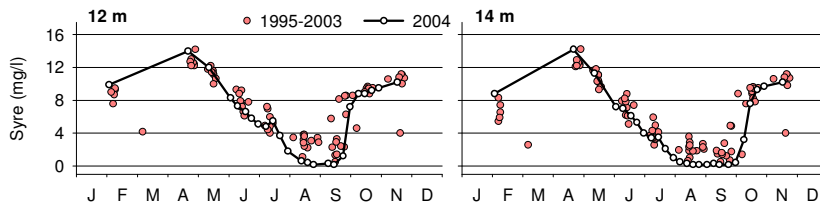
Liknande förändringar av syreinnehållet skedde i Ö bassängen men någon ökning av syreminskningshastigheten med djupet kunde inte påvisas.

Minskningen av syreinnehållet på 14 och 17 m djup i NV bassängen visade inga tydliga skillnader mot tidigare år. De mycket låga halterna på 14 m djup varade något längre än vanligt, vilket orsakades av de låga temperaturerna i bottenvattnet som gjorde att höstomblandningen på de största djupen kom senare än normalt. (Fig 8).



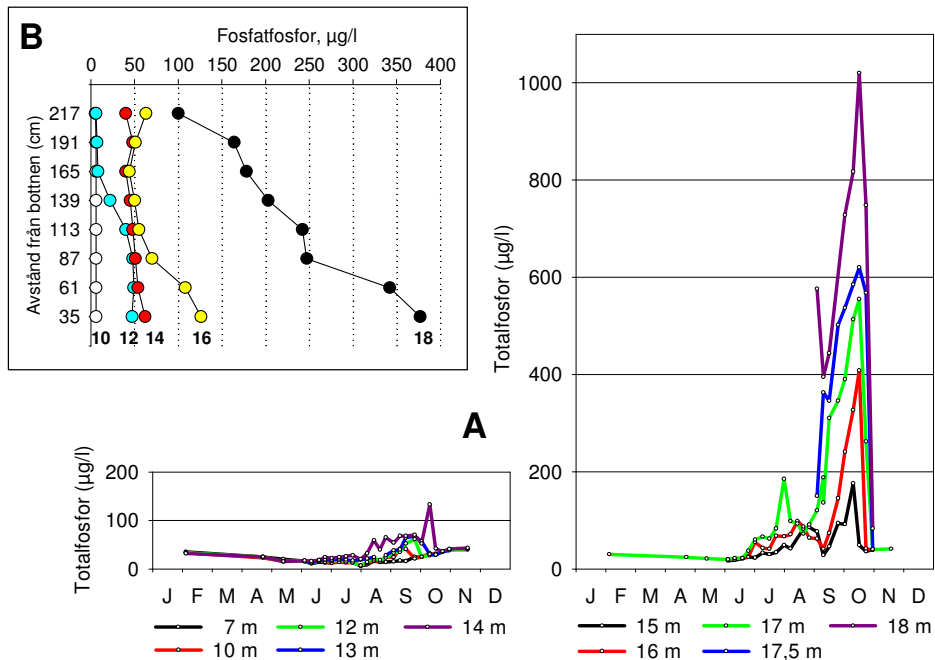
Figur 8. Syrehalter på 14 och 17 m djup i NV bassängen, januari-december 1995-2003 och 2004.

Syrehalterna i Ö bassängen var betydligt lägre 2004 än tidigare år med luftning, då halter <1 mg/l bara registrerades någon enstaka gång (Fig 9).



Figur 9. Syrehalter på 12 och 12 m djup i Ö bassängen, januari-december 1995-2003 och 2004.

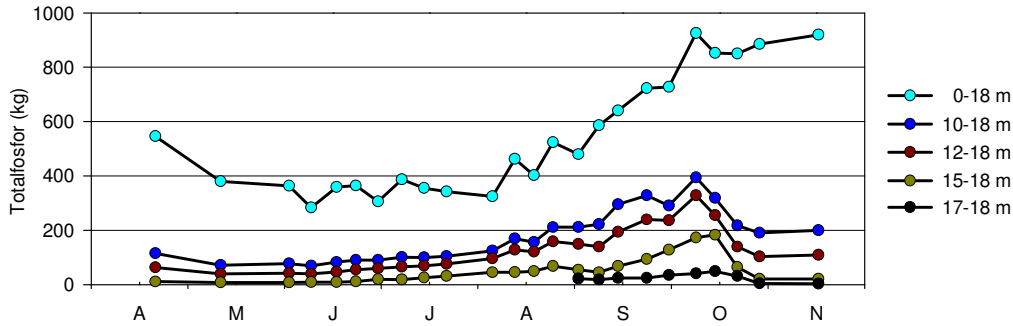
Fosfor. Totalfosforhalterna i bottenvattnet i NV bassängen började öka i slutet av juli och nådde de högsta halterna i oktober. Halter >100 µg/l var med ett undantag begränsade till djup under 14 m (Fig 11 A). Halter >500 µg/l förekom bara på 17-18 m djup. Den högsta halten, 1020 µg/l, registrerades på 18 m djup 13 oktober.



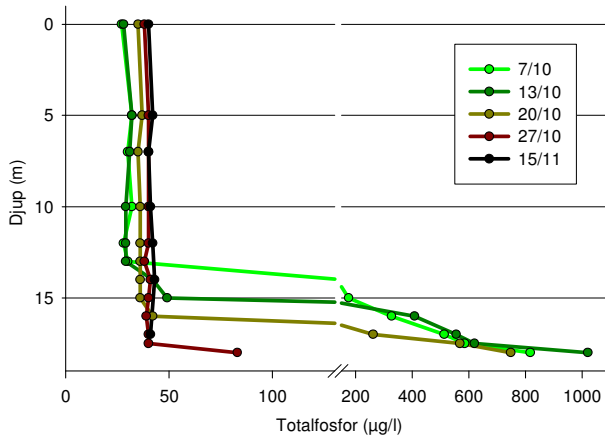
Figur 11. (A) Totalfosforhalter på 7-18,5 m djup i NV bassängen, (B) Fosfatprofiler 35-217 cm från sedimentytan på 10, 12, 14, 16 och 18 m djup, NV bassängen 22 september 2004.

Gradienten mot botten var mycket brant i september-oktober, med vid flera tillfällen mer än en fördubbling av halten från 17 till 18 m djup. 22 september togs prover på 10, 12, 14, 16 och 18 m vattendjup med en specialtillverkad provtagare, som gjorde det möjligt att få prover från var med 26:e cm med det djupaste provet 35 cm över sedimentytan. Resultaten, som fosfatfosfor, visar tydligt gradienten på 18 m djup, och även att gradient mot sedimentytan saknades på mindre vattendjup - gradienterna från de olika djupen bildar istället en mer eller mindre sammanhängande djupkurva (Figur 11 B).

Den totala fosformängden i NV bassängens vattenmassa minskade från knappt 600 kg i april till ca 300 kg i juni och ökade därefter till något över 900 kg i november (Fig 12).



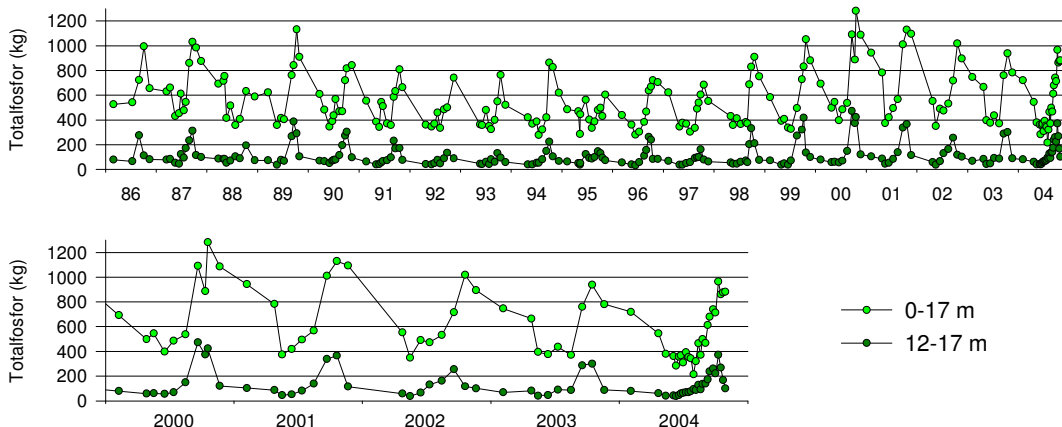
Figur 12. Mängden totalfosfor i NV bassängen april-november 2004, total och på >10, >12, >15 och >17 m.



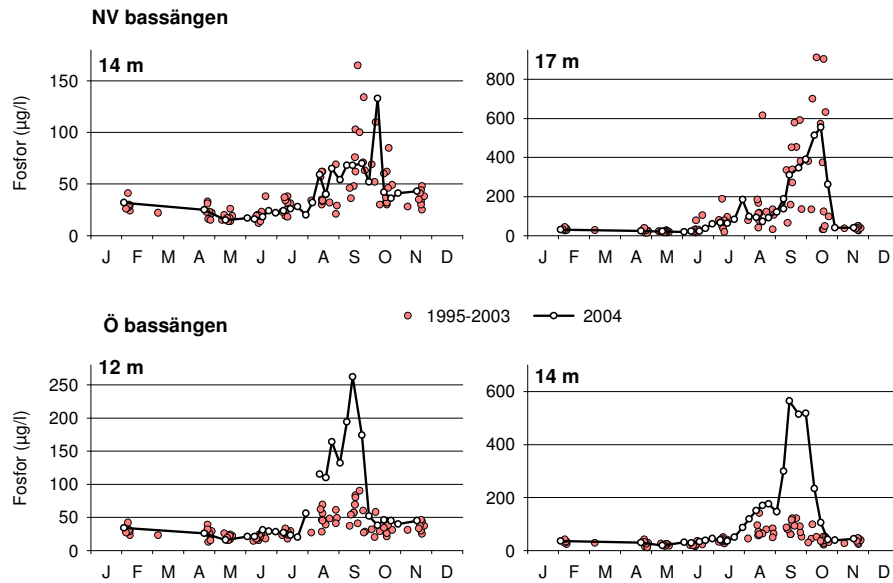
Figur 13. Totalfosforhalter på 0-18 m djup i NV bassängen i oktober-november 2004.

Ökningen av den totala fosformängden fram till början av oktober orsakades huvudsakligen av ökningen i bottenvattnet 10-18 m. Efter mitten av oktober minskade mängden i bottenvattnet. Samtidigt fortsatte mängden i hela vattenmassan att öka, vilket berodde på den gradvisa sänkningen av språngskiktet som gjorde att bottenvattnets fosforinnehåll successivt fördes upp i ytvattnet (Fig 13).

Fosformängden i NV bassängen var ungefär lika stor 2004 som tidigare under 2000-talet (Fig 14). Förändringen under året visade inte heller någon tydlig skillnad mot tidigare år (Fig 15).

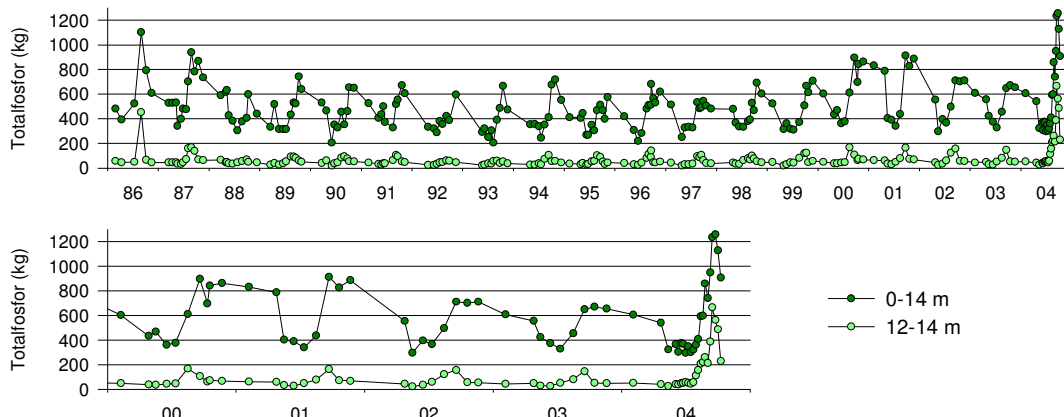


Figur 14. Fosformängden i NV bassängen 0-17 m och 12-17 m 1986-2004, resp 2000-2004.



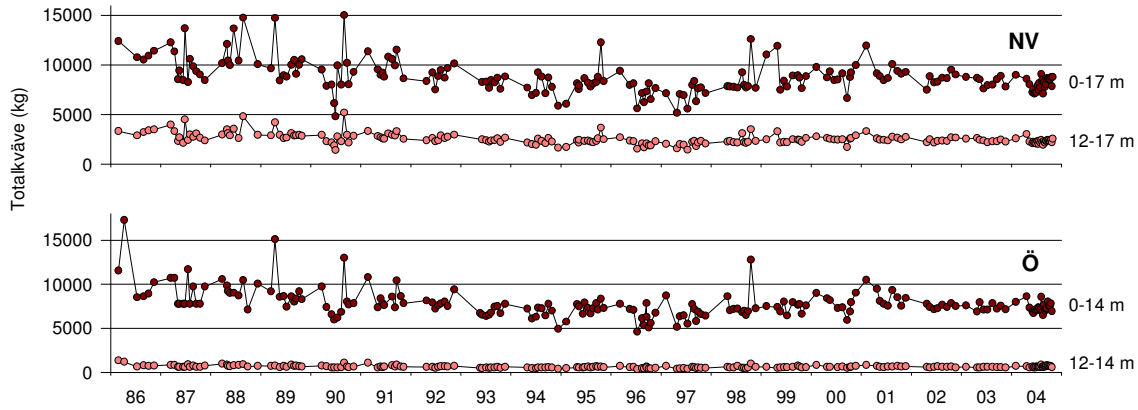
Figur xx. Koncentrationer av totalfosfor på 14 och 17 m djup i NV bassängen och 12 och 14 m djup i Ö bassängen 1995-2003 och 2004.

Halterna var betydligt högre i Ö bassängens bottenvatten 2004 än tidigare år och den totala mängden ökade vid höstomblandningen med ca 800 kg mot tidigare 300-400 kg, huvudsakligen beroende på stora mängder under 12 m djup. (Figur xx) .

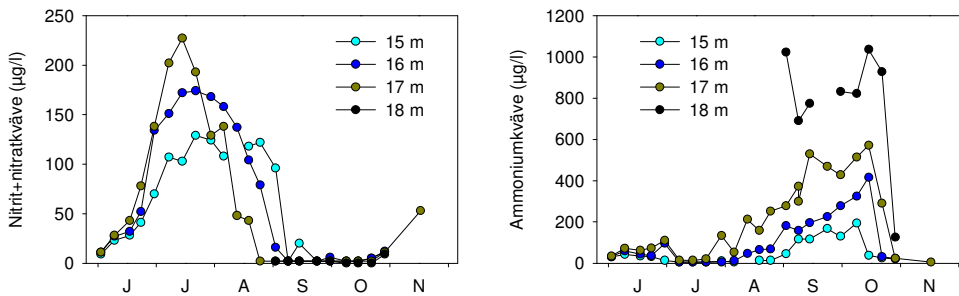


Figur 14. Fosformängden i Ö bassängen 0-14 m och 12-14 m 1986-2004, resp 2000-2004.

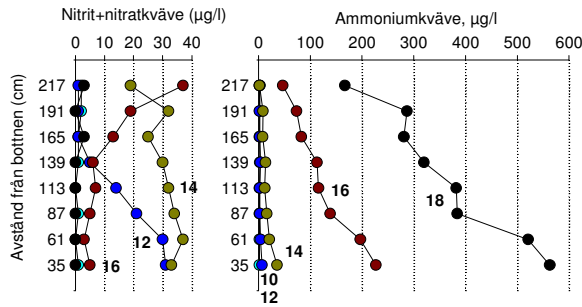
Kväve. Det totala innehållet av kväve i de två bassängerna har varierat mindre än fosforinnehållet, både mellan och inom åren. Mängden i bottenvattnet har varit relativt konstant (Figur 16).



Figur 16. Kvävmängder på 0-17 och 12-17 m djup i NV och 0-14 och 12-14 m djup i Ö bassängen 1986-2004.



Figur 17. Koncentrationer av nitrit+nitratkväve och ammoniumkväve på 15-18 m djup, NV bassängen juni-november 2004.



Figur 18. Fördelningen av nitrit+nitratkväve och ammoniumkväve 35-217 cm från sedimentytan på 10, 12, 14, 16 och 18 m djup, NV bassängen 22 september 2004.

De lösta, oorganiska fraktionerna visar däremot stora förändringar med djupet. Innehållet av nitrit+nitratkväve minskar vid låga syrehalter medan ammoniumkväve ökar. Bottenvattnet innehöll efter augusti mycket låga nitrit+nitrat-halter. Innehållet av ammoniumkväve ökade med tid och djup, och nådde som mest strax över 1000 µg/l på 18 m djup i början av oktober (Fig 17).

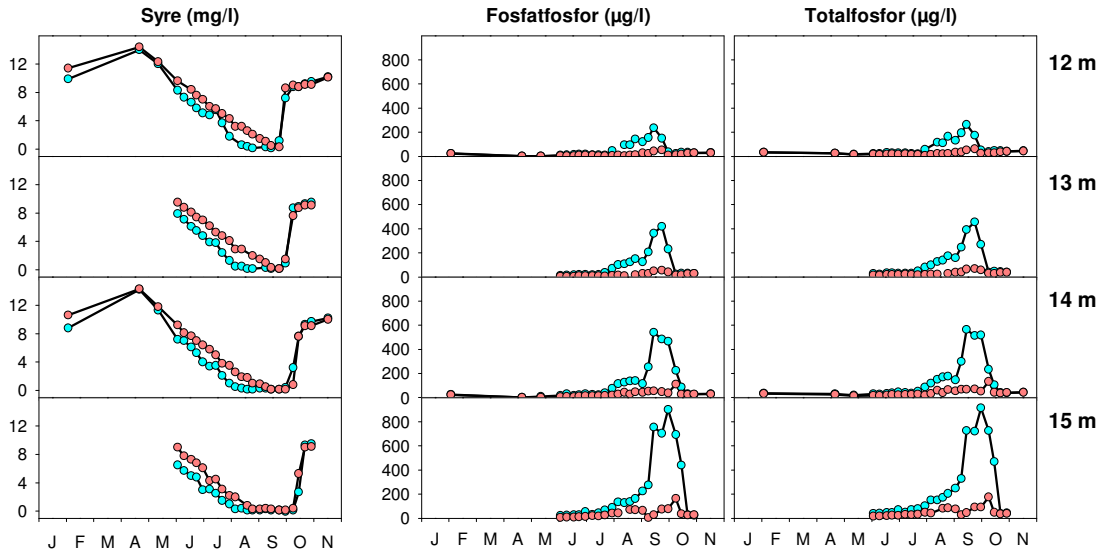
De prover, som togs med den specialtillverkade provtagaren 22 september, visade en slående likhet mellan fördelningen av ammoniumkväve och fosfatfosfor, framförallt i proverna från ca 16-18 m djup (Fig 18). Halterna av nitrit+nitratkväve var genomgående låga med de högsta på ca 11,5-14 m djup. Under ca 16 m var halten <2 µg/l.

Utpumpning av kväve. Totalkvävehalten i det utpumpade vattnet ökade från ca 500 till 1500 µg/l till slutet av oktober (Fig 19). Det totala kväveinnehållet i det utpumpade vattnet var 450 kg, Ungefär hälften, 220 kg, förekom som ammoniumkväve och 25 kg som nitrit+nitratkväve.

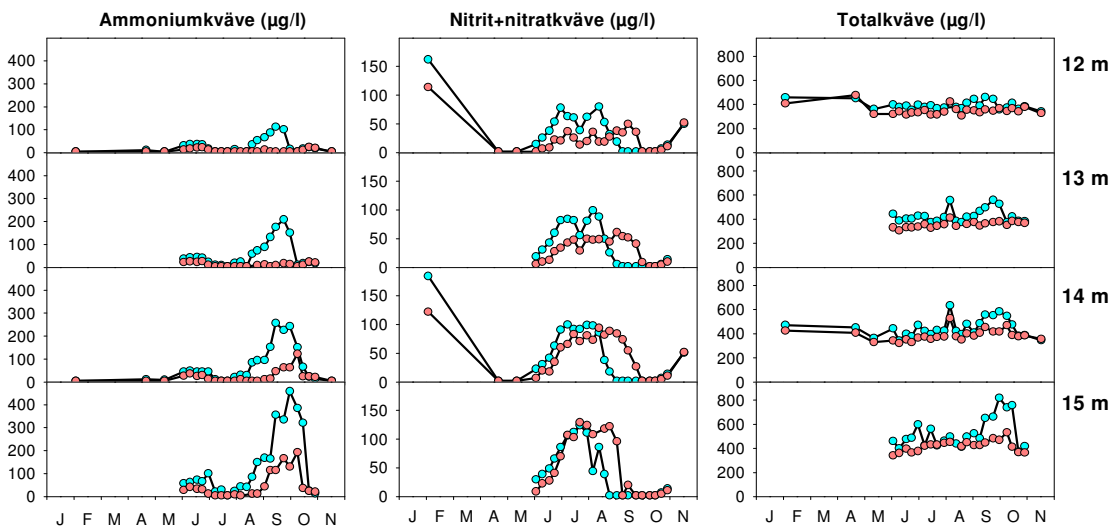
Jämförelser mellan NV och NO bassängen

Proverna från NO bassängen var avsedda som referens för NV bassängen, där utpumpningen gjordes. Förhållandena i de två bassängerna var dock så olika, huvudsakligen beroende på morfologiska egenskaper, att värdet som referens var litet.

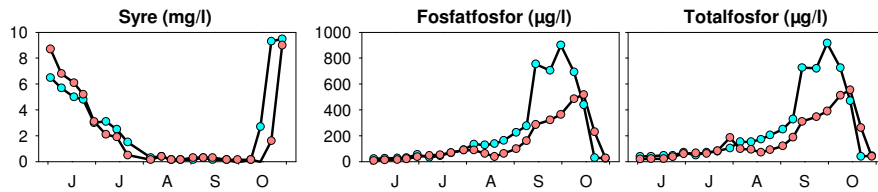
Det största provtagningsdjupet i NO bassängen var 15 m. När jämförelser görs mellan samma djup, framstår förhållandena i NO bassängen som betydligt sämre än i NV bassängen. Syreinnihållet minskade snabbare och låga syrehalter förekom under längre tid (Fig 20), fosforhalterna på 12-15 m djup var avsevärt högre (Fig 20), liksom ammoniumhalterna (Fig 21), vilket trots mindre innehåll av nitrit+nitratkväve resulterade i högre totalkvävehalter (Fig 21).



Figur 20. Syre, fosfatfosfor och totalfosfor på 12-15 m djup i NO (blå symboler) och NV bassängen 2004.

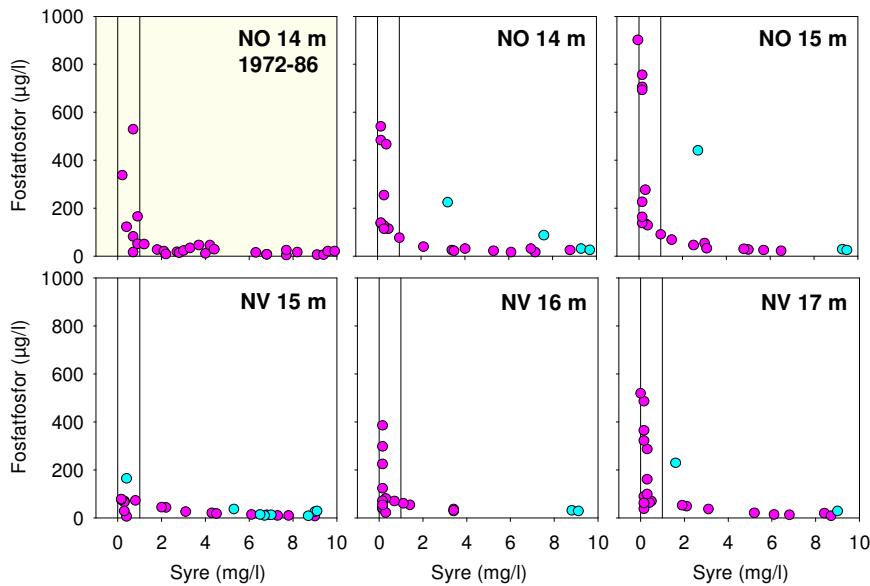


Figur 21. Ammonium-, nitrit+nitrat- och totalkväve på 12-15 m djup i NO (blå symboler) och NV bassängen 2004.



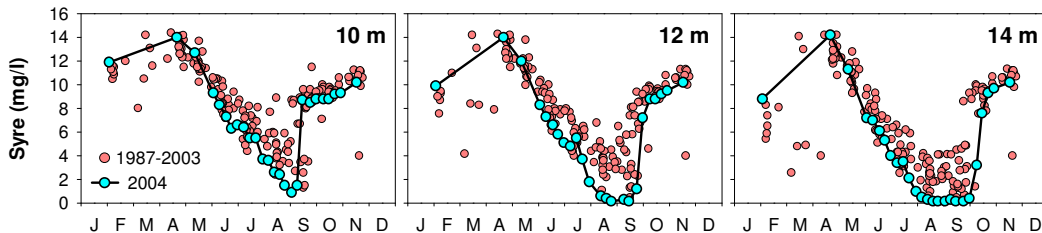
Figur 22. Syre, fosfat- och totalfosfor på 15 m djup i NO bassängen (blå symboler) och på 17 m djup i NV bassängen.

Om jämförelsen istället görs mellan 15 m djup i NO och 17 m djup i NV bassängen, i båda fallen ungefär 1 m över största djup, är förändringen av syrehalterna likartad. Fosforhalterna är emellertid avsevärt högre i NO bassängen, vilket också framgår av sambanden mellan syre och fosfor i de två bassängerna (Fig 22). De ganska fåtaliga analyserna av fosfor och kväve i bottenvattnet i NO bassängen innan luftning påbörjades 1986 ger inget stöd för antagandet, som ibland framförts, att luftningen har medfört ackumulering av lättroligt fosfor i sedimenten (Fig 23) och att det skulle vara orsaken till de höga fosforhalterna i bottenvattnet.

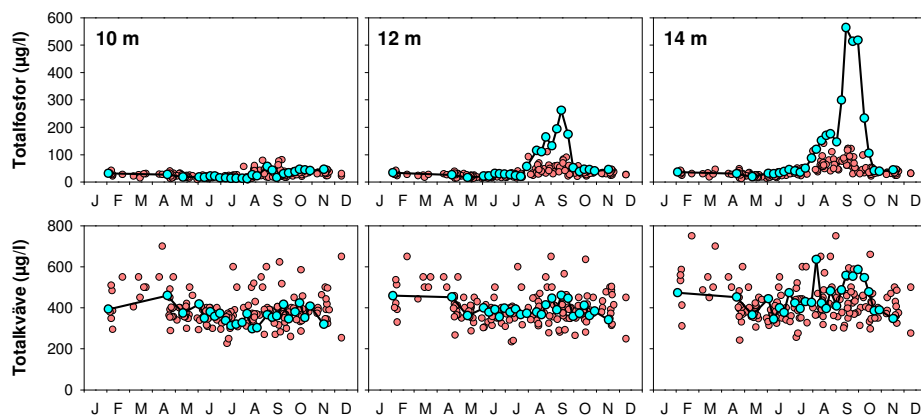


Figur 23. Sambandet mellan syre (halter ≥ 10 mg/l) och fosfathalter på 14 och 15 m djup i NO bassängen och på 15, 16 och 17 m djup i NV bassängen 2004, samt sambandet på 14 m djup i NO bassängen 1972-86, innan luftning påbörjades. Violet färg: minskande syrehalter, blå färg: ökande syrehalter under och efter höstomblandningen.

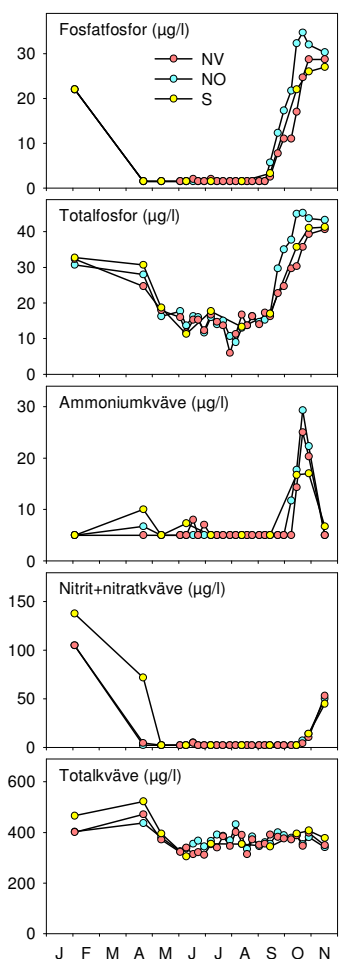
Syrehalterna var betydligt lägre 2004 än 1987-2003 då bottenvattnet luftades (Figur 24). Skillnaderna var stora på samtliga djup under språngskiktet, störst på 14 m där syrehalten var $\geq 0,5$ mg/l från början av augusti till slutet av september – en så låg halt registrerades bara en gång (14/7 -95) under de år luftningen pågick.



Figur 24. Syrehalter i NO bassängen på 10, 12 och 14 m djup 1987-2003 och 2004.



Figur 25. Totalfosfor- och totalkvävehalter i NO bassängen på 10, 12 och 14 m djup 1987-2003 (röda symboler) och 2004.



Figur 26. Koncentrationer av fosfor och kväve i ytvattnet (medelvärde 0-7 m), NV, NO och S bassängen 2004.

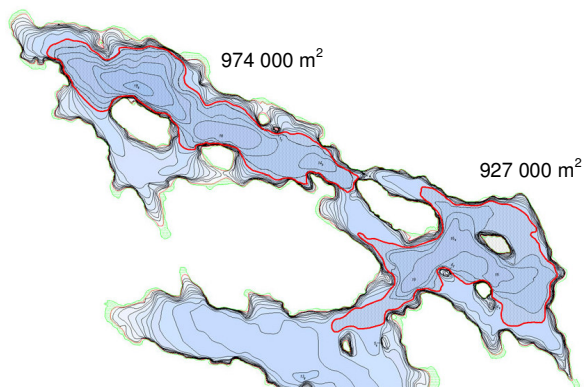
De låga syrehalterna orsakade kraftigt förhöjda fosforhalter i bottenvattnet, medan kväveinnehållet bara visade en mindre ökning och endast på 14 m djup (Figur 25).

De höga fosforhalterna i bottenvattnet medförde en kraftig ökning av innehållet i ytvattnet under höstomblandningen. Ökningen började i september, från $<2 \mu\text{g/l}$, och var störst i NO bassängen där den högsta halten i oktober var $35 \mu\text{g/l}$ mot $29 \mu\text{g/l}$ i NV bassängen en vecka senare. Ökningen av totalfosforhalten var ungefär lika stor – från ca 15 till 45 resp 40 $\mu\text{g/l}$ (Figur 26).

Ytvattnets innehåll av totalkväve visade jämförelsevis små variationer, medan ammoniumkväve ökade från $<10 \mu\text{g/l}$ till 25-30 $\mu\text{g/l}$ i slutet av oktober och nitrit+nitratkväve från $<5 \mu\text{g/l}$ i slutet av oktober till ca 50 $\mu\text{g/l}$ i mitten av november, det senare troligen pga att växternas aktivitet då i stort sett hade upphört.

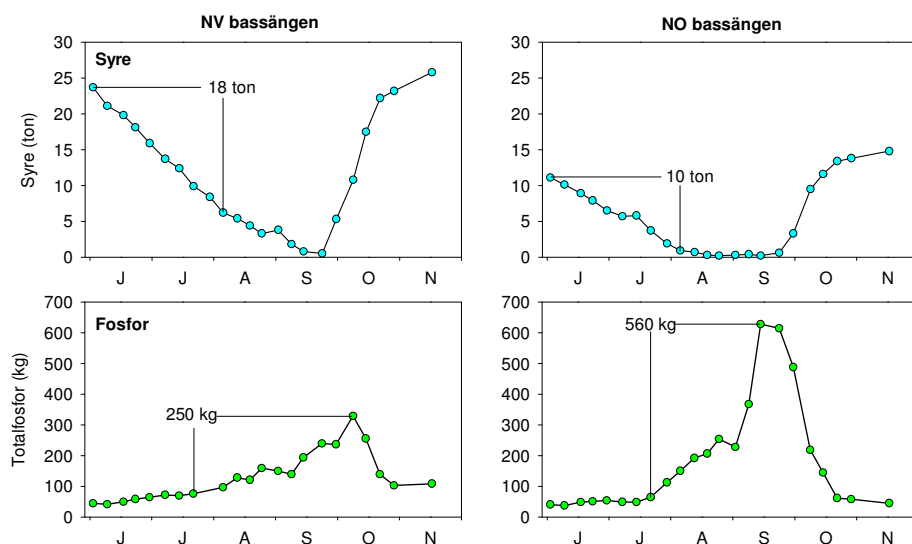
Upptransporten av fosfor vatten i september-oktober gjorde att fosfor förekom i överskott i ytvattnet och att växtligheten därför begränsades av tillgången på kväve. Eftersom de stora fosformängderna kom sent på året, uppstod aldrig någon blomning av blå-gröna alger.

Syreförbrukning och utlösning av fosfor. Syreförbrukningen gick fortare i NV än NO bassängen, men pga av större syreinhåll vid början av den skiktade perioden, var innehållet litet under längre tid i NO bassängen, vilket medförde en större utlösning av fosfor från sedimenten.



Figur xx. Bottenytor >12 m djup i NV och NO bassängen.

Syreinhållet minskade någotsånär linjärt från början av juni till början av augusti. Minskningen under 12 m djup (tröskeldjupet mellan de två bassängerna) uppgick till 18 ton i NV och 10 ton i NO bassängen. Beräknat per kvadratmeter bottenyta under 12 m motsvarade detta 0,028 resp 0,017 mg/cm²/dygn.



Figur xx. Förändringen av mängden kväve och fosfor i bottenvattnet under 12 m djup i NV och NO bassängen, juni-november 2004.

Fosforinnehållet började öka i slutet av juli och nådde det högsta värdet i mitten av september i NO och i början av oktober i NV bassängen, totalt en ökning med 560 resp 250 kg - mer än dubbelt så mycket i NO som i NV bassängen. Beräknad per areal bottenyta var skillnaden mellan de två bassängerna ännu större - 11,0 resp 3,3 mg/m²/d. Ökningen var inte linjär utan gick snabbare mot slutet av den skiktade perioden, särskilt i NO bassängen.

Hur stor bör utpumpningen vara ?

Den främsta målsättningen med utpumpningen var att förhindra uppkomsten av mycket låga syrehalter (<1 mg/l) i NV bassängens bottenvatten och därigenom minska utlösningen av fosfor från sedimenten. Först i andra hand var målsättningen att minska fosforinnehållet genom utpumpningen av fosforrikt vatten.

Det första målet uppnåddes inte alls – det finns ingenting i värdena som tyder på att syresituationen var bättre 2004 än tidigare år. Det andra målet nåddes genom att det första misslyckades – höga fosforhalter i bottenvattnet gjorde att en ganska stor mängd fosfor fördes bort från Bornsjön; 160 kg av en beräknad internbelastning i NV bassängen av 775 kg (utpumpad mängd + ökning med 615 kg).

Hur mycket vatten behöver pumpas ut för att hålla syrehalten över ca 1 mg/l i bottenvattnet?