

Analys av förutsättningarna för att effektivisera Brunnsvikens vattenutbyte genom olika pumpningsschemor för bottenvattnet

av Anders Engqvist, A&I Engqvist Konsult HB, Kullasundsv. 1, 185 37 VAXHOLM.

rapportdatum : 2007-05-30

Sammanfattning

Vattenutbytet mellan Brunnsviken och L:a Värtan baserat på uppmätt vattenströmning i den mellanförbindande Ålkistekanalerna har analyserats liksom dess påverkan på salinitets- och temperaturskiktningen i Brunnsviken. Dessa mätdata tillsammans med samtidigt uppmätt vattenstånd, omfattande perioden 2006-04-18 t.o.m. 2007-02-21 med 10 minuters tidsupplösning, har beretts av Petter Stenström (WSP) och resulterat i volymflödesuppskattningar för tre lager räknat från aktuell vattenyta, varav de två översta lagren givits en konstant tjocklek av 1 m medan det tredje får varierande tjocklek ner till botten. Sötvattentillrinningen har rekonstruerats utifrån dessa data och nederbördsdata.

Utifrån dessa primära mätdata samt mätningar med c:a en månads tidsupplösning av salinitets(S)- och temperatur(T)-variationerna i L:a Värtan vid Ålkistans mynning, har motsvarande profiler simulerats för Brunnsviken uppdelad i fyra delbassänger. För två av dessa delbassänger förligger mätningar som har utnyttjats för att kalibrera modellen mot en nominell körning som regenererar dessa profiler så nära som möjligt. Denna körning jämförs sedan med de olika föreslagna pumpningsprogrammets konsekvenser. Den nominella körningen kan dock, trots avstämning av modellparametrarna, inte bringas att helt överensstämna med uppmätta ytsaliniteter i Brunnsviken, utan dessa blir något lägre ner till 6m-nivån under ytan.

Utvärderingen av de olika pumpningsprogrammen görs utgående från den genomsnittliga åldern, AvA , för det utpumpade vattnet, räknat från den tid när ett vattenpaket strömmat in i Brunnsviken. För effektiv pumpning önskas denna ålder så hög som möjligt, eftersom detta vid stabil skiktning sammanhänger med en långvarig kontakt med de syretärande bottenbotten. Undantaget utgörs av den vertikala höstomblandning p.g.a. avkylning.

Modellanalysen visar att intermittenta pumpningsschemor som förstärker naturligt inflöde är c:a 6% effektivare än motsvarande schemor med pumpning vid naturligt utflöde. Förlängning av inloppsrörets mynning till delbassängen i NV ger marginellt förbättrad effektivitet jämfört med dess nuvarande centrala placering, medan en förlängning till den södra delbassängen (Kräftriket) innebär en analog försämring. Jämfört med dessa pumpningsschemor ger dock kontinuerlig pumpning från mitten av höstens avkylningsperiod en väsentlig, c:a 30%, effektivitetsförbättring jämfört med genomsnittet för de intermittenta schemorna. Detta effektivitetsmått korrelerar acceptabelt väl (-40%) med uppmätta syre/svavelväte-koncentrationer, men en operationell policy måste i första hand inriktas på att förhindra en utbredning uppåt av den årligen regelbundet uppträdande oxyklinen. Förutsättningarna för detta diskuteras utgående från planerad framtida kontinuerlig syreövervakning och utökad pumpkapacitet.

Uppdraget

Av Gunilla Lindgren, Stockholm Vatten AB, gavs formellt uppdraget 2007-01-29 att utföra modellering av Brunnsvikens vattenutbyte och dess interna dynamik innefattande en uppdelning av densamma i minst tre delbassänger samt en analys av dess yttre och inre vattenutbyte med en målsättning att den analyserade perioden skulle inriktas på att omfatta minst 10 månader. Avrapporteringen skulle vara färdigställd senast 2007-05-15.

Kort historik

Brunnsvikens tidigare problematiska utveckling och sammanhörande restaureringsåtgärder finns sammanfattade i Engqvist m.fl. (2006), som också beskriver vattenutbytet analyserat för en 14-årsperiod med en 1-dimensionell (1D) modell och för 1 år med en 3D-modell. Utfallet för dessa två modellansatser jämfördes mot mätdata under ett år (1999) och det konstaterades huvudsakligen att 3D-modellen beskrev den termiska utvecklingen bättre medan motsvarande för saliniteten inte fungerade väl då 3D-modellen gav med i stort sett likartade salinitetsprofiler under hela årscykeln, medan 1D-modellen simulerade dessa profiler väsentligt mer realistiskt trots att sundströmningsformuleringen inte skulle visa sig vara realistisk enligt de mätningar som innevarande analys grundas på.

Vid återupptagning av arbetet med Brunnsvikens vattenutbyte våren 2006 baserades undersökningen på att mäta strömhastigheterna i Ålkistekanalens mitt med ett bottenförlagt aukustiskt baserat mätinstrument, vilket även mäter vattenståndet. Planen var vidare att på ömse sidor om kanalen ha salinitets- och temperaturregistrerande instrument utplacerade i syfte att i detalj kunna studera strömningsdynamiken i kanalen.

Redan inledningsvis gav denna mätorienterade ansats ett otvetydigt resultat. Strömningsförloppet genom kanalen uppvisar en i stort sett homogen hastighetsprofil från ytan till botten med endast någon tendens till minskning mot botten p.g.a. friktionseffekter. Strömningsriktningarna alternerar med en periodicitet som genomsnittligt befanns ligga något över 12 h, se Fig. 1.

Ansträngningarna att relatera dessa perioder till omvärldsfaktorer lyckades omsider såtillvida att inom en marginal av en konstaterad drift för instrumentet i Ålkistan, samvarierar vattenståndet där med oberoende mätningar som gjorts samtidigt vid Skeppsholmen (utförda av SMHI) och Hammarbyslussen (Stockholms Hamnar). Den funna genomsnittliga periodtiden är avsevärt för lång för att kunna förklaras av resonanfenomen med enbart Ålkistan som impedans och Brunnsviken som kapacitans (Stigebrandt, 1980). Periodtiden beror sannolikt på resonanser i den inre skärgården.

Salinitets- och temperaturmätningarna har däremot inte varit motsvarande lyckosamma. Sensorkedjorna i L:a Värtan och i Brunnsviken var båda kopplade till en datalogger i Stockholm Vattens pumphus innanför Ålkistekanalens, för direkt överföring via GSM-modem till dator på Stockholm Vatten. Systemet med sammanlagt över 500 m signal- och strömförsörjningskabel visade sig dock vara mycket känsligt och överslag och instabila mätningar konstaterades redan från början. Dessutom har registrerade

blixtnedslag orsakat problem. Felsökning av systemet har pågått under hela perioden, men stabila mätningar har inte kunnat åstadkommas förrän mot slutet av mätperioden (2007-01-27 t.o.m. 2007-02-28) då parallella mätserier finns med endast en datalucka, Fig. 2. Återigen konstaterades en svårförklarlig drift för tryckgivaren för Ålkiste-instrumentet relativt de omgärdande mätarna. Dessutom visas att saliniteten på L:a Värtan-sidan har en variabilitet oberoende av registreringarna på Brunnsvikensidan som är avsevärt kortare än den drygt månadslånga periodiciteten för mätningarna som utförts i Stockholm Vattens regi på stationen Ekhagen.

Slutsatserna blev att modelleringen måste baseras på den uppmätta strömningen i Ålkistan, vilket utesluter att en komplett årscykel kan analyseras, utan analysperioden fastställdes till fr.o.m. 2006-04-19 t.o.m. 2007-02-21, d.v.s. drygt 10 månader. Som randvärden användes de salinitets- och temperaturprofiler som uppmätts vid Ekhagen-stationen, Fig. 3a och 3b.

En jämförelse mellan salinitets- och temperatur data har tyvärr endast kunnat utföras för ett enda tillfälle, nämligen för Ekhagen-stationen 2007-02-20. Utfallet ger ingen som helst anledning att ifrågasätta någondera mätningarna som tvärtom visade sig vara anmärkningsvärt samstämmiga, redovisat i Tabell 1.

Dataunderlag

För övrig drivning av modellen behövs ytvattentemperaturens variation under året i Brunnsviken inklusive uppgifter om isläggning, sötvattenavrinningen samt vindfältet för den vertikala omblandningen. Det sistnämnda införskaffades från SMHI, varvid vinddata från Stavsnäs valdes —dock efter viss tvekan— eftersom såväl Observatorielunden- som Brommastationerna ligger närmare Brunnsviken men erfarenhetsmässigt inte ger någon särskilt rättvisande representation av medelvinden i den inre skärgården.

Hypsografiska data för den valda indelningen i delbassänger (Fig. 4) har tillhandahållits av Anders Svahnberg, Myrica, se Tabell 2. Även det buffertområde, som inringats med grön cirkel i samma Fig. 4, ingick i denna extraktion av hypsografiska data.

Under den fastställda modelleringsperioden har i Stockholm Vattens regi två mätstationer (Tivoli och Kräftriket) besökts ungefär en gång per månad (Fig. 5 a-d), vilka data utnyttjas för att kalibrera den nominella körningen, d.v.s. den simulering mot vilka de övriga olika pumpningsschemorna jämförs.

Avseende ytvattentemperaturen undersöktes om någon annan tidsserie med högre tidsupplösning kunde överensstämja vid mättillfällena för Tivoli-stationen. Möjliga alternativ erbjöds genom de s.k. ”fiskare”-stationerna i Stockholms skärgård, Fig. 6. Tyvärr visade det sig att ingen av dessa data gav en tillräckligt god överensstämmelse, varför den sämre tidsupplösningen från Tivoli-stationen måste hållas till godo med. Mätunderlag för sötvattenavrinningen under 2006 visade sig däremot saknas helt, vilka data därför måste uppskattas utifrån övriga mätningar. Dessa beräkningar har utförts av Petter Stenström, WSP.

Modellutformning

Strömningen genom Ålkistekanalerna uppdelades i tre lager: det översta från aktuell vattenyta och en meter nedåt, det andra likaledes med en meters tjocklek samt det tredje lagret från 2 m ner till botten. Eftersom vattenytan varierar får detta tredje lager en variabel tjocklek. Ålkistans hypsografiska kurva (Fig. 7) illustrerar detta. Anledningen till detta arrangemang är att lagren blir lättare att förse med motsvarande salinitets- och temperaturdata, vilka också är relaterade till aktuellt rådande vattenstånd. Sötvattentillrinningen beräknades som skillnaden mellan uppmätt in- och utflöde (Fig. 8) men måste därefter modifieras och sammanvägas med nederbördsdata erhållna från SMHI, Fig. 9. Problemet är att vid denna uppskattning uppkommer negativa flödesvärden under sommaren av storleksordningen $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Sådana kunde möjligtvis förklaras med exceptionell avdunstning eller läckage till tunnelbanan. Rimlighetsuppskattningar ger att avdunstningen kan som högst uppgå till c:a 50 l/s medan uppmätt läckage till tunnelbanan är ytterligare en 10-potens lägre (Gunilla Lindgren, pers. medd.). Som jämförelse ger ”Vattenprogram för Stockholm” (2000) uppgift om en årlig medeltillrinning av $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket i sin tur utgör något mer än en tredjedel av det medelvärde som observerats och använts tidigare för 1999 av Engqvist m.fl. (2006). I brist på mätningar under 2006, antogs som utgångspunkt att medeltillrinningen detta år var densamma som 1999, ett antagande som senare har måst modifieras.

Med undantag för sund nummer 1 (S1) d.v.s. Ålkistan, se Fig. 4, beräknas vattenutbytet genom de övriga sunden enligt Engqvist & Stenström (2004) med en lagerbaserad modellansats som minimerar oönskad numerisk diffusion. Med detta avses att vattenpaket inte primärt behöver blandas utan skall kunna bibehålla sina tidigare (skalära) egenskaper (såsom salinitet, temperatur och AvA) efter genomfört utbyte. Blandning i delbassängerna sker endast då antalet lager överskrider ett på förhand fastställt antal och vid ett senare skede i modellberäkningarna. Ytlagrens temperatur föreskrivs linjärinterpolerat mellan mättilfällena utan någon dygnsvariation. När isen observerats ha lagt sig 2007-01-24 på Brunnsviken, reduceras i modellen vindfarten till 10% av den annars gällande, vilket avsevärt reducerar den vertikala omblandningen i delbassängerna.

Sektionsarean vid medelvattenstånd i Ålkistan är approximativt 20 m^2 , men varierar med vattenståndet. Längden för Ålkistekanalerna är c:a 180 m. Detta ger en minsta exkursionslängd för den skiljande fronten mellan vattenpaket härrörande från de inre och yttre områdena. Denna längd måste överskridas för att ett reellt utbyte skall kunna ske. I verkligheten mynnar kanalen mjukt över till de anslutande bassängerna på Brunnsviks sidan. Denna vattenståndsberoende dödvolymer som alltså måste överskridas innan ett reellt utbyte sker, kan förutsättas vara betydligt större än själva den inneslutna kanalvolymer. Detta förhållande har gestaltats i modellen med en koefficient som anger hur många gånger större än den nominella kanalvolymer denna dödvolymer bör vara för att åstadkomma med mätningarna överensstämmande salinitets- och temperaturprofiler under den 10 månader långa simuleringsperioden.

Den nominella körningen

I första hand eftersträvades att låta det nominella fallet, som är tänkt att utgöra normen mot vilken de olika pumpningsstrategierna jämförs, bestämmas av teoretiska och/eller semiempiriska parametrar som tagits fram i andra studier i liknande tillämpningar. Det visade sig att med denna ansats var det omöjligt att ens tillnärmelsevis erhålla modellerade salinitets- och temperaturprofiler som motsvarar de uppmätta. En sannolik förklaring är att strömnings-, vattenstånds- och avrinningsdata inte är fullt representativa för verkliga förhållanden, även om de är sinsemellan konsistenta. En viss justering av i första hand sötvattentillrinningen måste därför vidtagas.

Efter en sådan kalibrering har salinitets- och temperaturkonturerarna i Fig. 10 (Tivolistationen) och Fig. 11 (Kräftriket) kunnat jämföras med mätvärden. I Tabell 3 ges motsvarande modellparametervärden för denna nominella körning. Båda dessa stationer uppvisar tillräckligt goda såväl kvalitativa som kvantitativa likheter, även om några mindre avvikelser kan noteras. Dessa kan utan tvekan tillskrivas den glesa tidsupplösningen med drygt månadslånga uppehåll mellan mätvärdena som ligger till grund för drivningen (undantagandes vind- och kanalflödesdrivningen). Därför måste några mindre avvikelser t.ex. i penetrationsdjupet för temperaturkonturerna kunna tolereras. De valda värdena för några av de semi-empiriska parametrarna i Tabell 2 kan mot denna bakgrund också vara värda att kommenteras.

Att fyra gånger den nominella dödvolymin krävs för att erhålla bästa överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta profiler måste ses mot bakgrunden av att den avgränsade volym, som jämfört med kanaldjupet endast uppvisar en obetydlig fördjupning (visas inom en grön cirkel i Fig. 4) motsvarar en approximativt tio gånger större volym än den nominella kanalvolymen vid medelvattenstånd. Denna dödvolymin minskar tiden för reellt vattenutbyte genom kanalen med c:a en tredjedel av den totalt tillgängliga simulerings-tiden som är 309 dygn.

Likaså, för att erhålla en salthalt för ytlagren som motsvarar Stockholm Vattens mätvärden måste det framräknade sötvattenflödet dämpas. Medelvärdet för detta motsvarar en konstant tillrinning av $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket grundats på mätningarna för 1999, medan uppskattade långtidsmedelvärden är c:a en tredjedel av detta värde. Detta talar för en aktningvärd mellanårsvariabilitet. För att erhålla de uppmätta ytsaliniteterna måste det till en reduktion, given av parametern *rqf*. En annan möjlig förklaring till denna differens är att simuleringsperioden högst sannolikt startade efter kulminationen av vårflödet. Idealiskt vore om den interna dynamiken för L:a Värtan kunde ha modellerats för att erhålla en bättre underbyggd uppfattning om S- och T-variationen mellan de månadslånga luckorna mellan mättillfällena. Detta har dock inte gått att genomföra inom den till buds stående tidsramen.

De i Fig. 5a och 5c återgivna ytsaliniteterna i intervallet 1,5 – 3 psu kan inte fullt uppnås vid modellberäkningarna med mindre än att vattnet tillåts bli rekryterat från djupare lager än vad som motsvarar det aktuella djupet för de tre lagren. Den troliga förklaringen är att mellan mättillfällena förekommer uppvällningsperioder i L:a Värtan. Enligt Fig. 2,

varierar saliniteten minst ± 0.5 psu inom en vintermånad trots att L:a Värtan var islagd under drygt halva tiden, se Fig.12. Det finns därmed inte längre någon rationell anledning att särskilja de tre olika lagrens något avvikande medelhastigheter, utan dessa kan sammanslås till ett lager, se Fig. 13, som påvisar en stark korrelation ($\rho > 96\%$) mellan dessa lagerflöden.

Effektiviteten för de olika pumpningsprogrammen

Den befintliga pumpen kan givetvis godtyckligt slås på och av inom de gränser som viss försiktighet vid uppstartnings- och avslutningsförloppen kräver. Den maximala pumpkapaciteten är idag $0,5 \text{ [m}^3/\text{s]}$. Eftersom pumpinloppsrorets mynning är placerat nära djuphålans botten i Bassäng 2 finns en påtaglig risk för att inströmmande vatten med hög densitet kommer att fylla denna bottenhåla och därmed bli utpumpat igen en kort tid efter inströmningen. Genom s.k. ”selektivt uttag” kan även tätare vatten, beläget under insugrorets mynning sugas med, vilket gör att allt bottenvatten i modellen kan förutsättas rekryterbart för utsugning. Dessa nya vattenpaket har därmed inte haft tid på sig att ekvibreras med utläckande närsalter från bottensedimenten, vilket innebär dåligt utbyte för pumpningskostnaden. Denna risk är uppenbarligen ännu högre för Bassäng 1 som ligger närmare Ålkistan, varför denna bassäng har undantagits från analys av alternativa placeringar av rörmynningen. Hög utbyteseffektivitet uppnås när det utpumpade vattnet har uppehållit sig under lång tid i de dåligt syresatta bottenlagren. Som ett lämpligt effektivitetsmått kan därför medelåldern (eng. Average Age, eller AvA uttryckt i sorten [dygn/m^3]) för utpumpat vatten användas. Måttet på det totala förnyelsarbetet erhålls genom att integrera AvA -måttet under hela den sammantagna pumpningsperioden. I utredningsuppdraget har följande åtta olika pumpningsschemor (A-H) föreslagits:

- A. pumpning (från Bassäng 2) när naturligt inflöde sker,
- B. pumpning (från Bassäng 2) när naturligt utflöde sker
- C. förlängning av utpumpningsledningen till Kräftriket (Bassäng 3), f.ö. som A
- D. förlängning av utpumpningsledningen till Kräftriket (Bassäng 3), f.ö. som B
- E. förlängning till Bassäng 4, där Råstaån mynnar, f.ö. som A
- F. förlängning till Bassäng 4, där Råstaån mynnar, f.ö. som B
- G. kontinuerlig pumpning stora volymer (försöka pumpa bort syrefritt vatten)
- H. intensivierad pumpning av stora volymer (fördubblad pumpkapacitet)

Dessutom har frågan ställts huruvida man kan hitta någon gräns där man pumpar så mycket som möjligt utan att få en oacceptabel motström. Innan dessa schemor analyseras och sammanhörande frågor besvaras, måste först kontrolleras att det uppmätta vattenståndet bibehålls intakt (Fig. 14) vid de genomförda pumpningsmanipulationerna. För att senare kunna bedömma pumpningens påverkan på AvA -fördelningen med avseende på djupet i de fyra olika bassängerna, visas först denna fördelning rörande den nominella körningen med avstängd pump, se Fig. 15.

Resultatet av pumpningsschema A kan ses i Fig. 16. Naturlig inströmning ägde rum under knappt 161 dagar och medelåldern för det utpumpade vattnet var $70,5 \text{ dygn}/\text{m}^3$. Motsvarande kontureringsdiagram visas i Fig. 17, i vilket det tydligt framgår att den

tillkommande inströmmen inlagras primärt i Bassäng 2, för att därefter sprida sig till de mer perifera Bassängerna 3 och 4.

På samma sätt har konsekvenserna av de övriga pumpningsschemorna utvärderats och redovisas analogt i Fig. 18 t.o.m 31. Den sammantagna pumpningstiden, summerat över de intermittenta intervallen) uppgick till 148(161) dygn för pumpning vid naturligt in(ut)-flöde. Utfallet av dessa beräkningar har ställts samman i Tabell 4, och resultatet kan enklast sammanfattas i punktform:

- Pumpning vid naturligt inflöde är genomgående effektivare än att pumpa vid naturligt utflöde.
- Det finns ingen effektivitetsvinst att göra genom att dra inloppsledningen till Kräfrike-bassängen (Bassäng 3).
- En förlängd rördragning till Bassäng 4 ger endast en marginell förbättring jämfört med den nuvarande mynningen i Bassäng 2.
- Det mest effektiva pumpningsschemat (G) av de analyserade innebär att invänta att bottenvattnet är åldrat för att sedan pumpa så länge inga förnyade inbrott av vatten med hög densitet från Ålkistan sker.
- Pumpning med fördubblad pumpkapacitet, d.v.s 1 [m³/s], ger en något minskad effektivitet jämfört med schema H.

Att det ur *AvA*-synpunkt mest effektiva pumpningsschemat visat sig vara det som innebär kontinuerlig utpumpning (schema G med standard kapacitet för pumpen) jämfört med de övriga intermittenta schemorna, motiverar att sådana alternativa schemor diskuteras.

Diskussion

Den centrala problematiken med Brunnsviken är utläckningen av fosfor från botten-sedimenten, vilken intensivieras i hög grad när bottarna är syrefria. Det skulle vara en mer direkt ansats att inrikta modelleringen på denna utläckning, men det skulle i så fall också kräva en separat syremodellering, vilket i sin tur kräver en fullständig ekologisk modell. Detta faller utanför ramen för den aktuella analysen. Alternativt skulle utläckningen kunna föreskrivas, men de tillgängliga fåtaliga kvantitativa geokemiska litteraturuppgifterna om utläckningsprocessen i Brunnsviken (Pettersson, 1988) ger inte tillräcklig vägledning om dess hastighet som funktion av omvärldsfaktorerna (djup, temperatur samt grad av anoxi) för att kunna läggas till grund för modellering.

Det finns några besvärande skillnader med den aktuella modellansatsen mellan *AvA*-dynamiken och koncentrationer som tillförs vattenmassan i kontakt med bottarna: Med horisontellt välomblandade lager kan denna centrala mekanism inte simuleras adekvat därför att åldrandet måste äga rum över hela den horisontella utsträckningen av ett vattenstrata. Skillnaden mellan dessa i princip oförenliga angreppssätt avtar mot bottarna i takt med att den horisontella utsträckningen minskar. Med en 3D-modell skulle dock sådan utläckning kunna modelleras, varvid även transporttiden för vattnet fram till de alternativa rörmynningsplaceringarna (till delbassängerna motsvarande Kräfriket och 'Sipri') blir en väsentlig modelleringsfaktor. Med tillgång till det uppmätta utbytesflödet skulle en sådan 3D-studie inte behöva besväras av problem med att förena

Ålkistedynamiken med modelleringen för hela Brunnsviken (Engqvist m.fl., 2006). Även med en 3D-ansats skulle dock behovet av förbättrad tidsupplösning av randdata (salinitet och temperatur i L:a Värtan samt ytvattentemperaturer i Brunnsviken) kvarstå.

Den AvA-proxy som utnyttjas i den förhandenvarande analysen utgående från kopplade 1D-delbassänger har valts därför att denna ansats ger möjlighet att undvika att pumpa ut nyinkommet Ålkistevatten. Eftersom det utpumpade vattnet i samtliga analyserade fall rekryteras från de djupaste bottenhålorna, får eventuella invändningar mot antagandet om horisontellt välomblandade skikt mindre betydelse. Att det ur AvA-perspektiv mest lovande alternativet (schema G) med kontinuerlig pumpning mot slutet av simuleringsperioden inte motverkades av att inströmmande vatten hann leta sig ner till utpumpningsinsuget, förklaras av Fig. 32. I slutet av oktober 2006 sjunker saliniteten drastiskt för randdata från Ekhagen-stationen. Därefter blir Brunnsvikens ytvattensalinitet högre än det inströmmande vattnet. Det betyder att inströmmande vatten inlagras på ytan medan bottenvattnet fortsätter att åldras medan det står i kontakt med botten sedimenten. Att schema H ger en något försämrade effektivitet jämfört med schema G beror på att med den förhöjda pumpkapaciteten hinner bottenvattnet förnyas i snabbare takt än det åldras.

Detta kan göras till utgångspunkt för ett optimalt pumpningsschema med prioriteringen lagd på att undvika att pumpa ut nyligen inströmmat vatten: *Pumpen tillåts vara igång så länge som tätheten för det inströmmande vattnet i botten av Ålkistekanalerna är lägre än tätheten för ytvattnet inuti Brunnsviken.* Inströmmande vatten kommer då att lagras in sig på ytan i Brunnsviken. Under sådana strömningssituationer med omkastade tätheter i förhållande till den normala situationen (d.v.s. lättare vatten i Brunnsviken och tyngre i L:a Värtan) finns heller ingen risk för att det utpumpade Brunnsviksvattnet blir återcirkulerat in i Ålkistan igen. En sådan omvänd risk kan däremot föreligga för det utpumpade bottenvattnet om det visar sig vara lättare än ytvattnet för Ålkistans mynningsområde mot L:a Värtan. Dock kan detta schema vara alltför försiktigt formulerat. Den täthetsskiktning som finns i den delbassäng från vilken pumpning sker (delbassäng 2) kommer att utgöra en säkerhetsmarginal för denna typ av kortsluten recirkulation.

Emellertid rekommenderar beprövad erfarenhet att det är av högre prioritet ur naturvårdsynpunkt att förhindra att anoxiska förhållanden utbreder sig på bottenarna. Syre- och svavelväte-koncentrationer som uppmätts under 2006 fram t.o.m. 2007-01-31 på Tivolistationen i Brunnsviken framgår av Fig. 33 med syrekoncentrationerna angivna med positiva värden (ml/l) och de för svavelväte (likaså ml/l) med negativa förtecken sammanvägda med en enhetsfaktor enligt Hastings & Emerson (1988). Syrebristen börjar vid djuphålets botten där area/volym-förhållandet är störst och fortskrider uppåt. I samma figur kan noteras en temporär förbättring med mindre grad av anoxi vid dag 240 samt en total syresättning av hela vattenmassan i delbassäng 2 mellan de två sista mättillfällena 2006-12-12 respektive 2007-01-31. Sådan syresättning brukar normalt uppträda i slutet av hösten i samband med inbrott av vatten med hög densitet via Ålkistan. Så var dock inte fallet under förvintern 2006/2007 eftersom den tidigare konstaterade inlagringen av inkommande vatten ägde rum på ytan. En förklaring ges av tillståndsdigrammet i Fig. 34, från vilket det framgår att höstavkylningen succesivt åstadkommer välomblandade förhållanden för ytlagren men ej penetrerar till 12m-nivån

ens vid 2006-12-12. Därefter sker en totalomblandning och en förnyad inlagring av lättare vatten på ytan, vilket resulterar i den profil som uppmättes 2007-01-31.

Utgående från dessa O₂/H₂S-mätningar under modelleringsperioden kan korrelationskalkyler göras mot såväl beräknade AvA-värden (Fig. 35a) som mot uppmätta temperaturer (Fig. 35b). Korrelationsnivån för AvA hamnar i genomsnitt på -40%, räknat som ett genomsnitt för de tre analyserade djupen, medan för temperaturen blir genomsnittet något mindre än -70%. Detta indikerar att temperaturen är en bättre prediktor än AvA-måttet för att detektera syrebrist. Om korrelationsberäkningarna syre/sulfid vs. temperatur utsträcks till att omfatta samtliga samtliga mätningar under perioden 2000-02-01 t.o.m. 2007-01-31 på samma station, varierar korrelationskoefficienterna från -37% (12m djup) till -65% (6m djup), redovisat i Fig. 36.

Utan tillgång till optrod-baserade direktmätande syre-profilerande mätinstrumenten som planeras bli installerade vid Tivoli-stationen, skulle alltså de betydligt enklare temperaturprofileringarna kunna tjäna som indikatorer för att syrebrist börjat sätta in. Ju närmare ytan den kritiska varningsgränsen (3 ml/l) underskrids, desto starkare är korrelationerna, vilket minimerar risken för falsklarm och ineffektiv pumpning under anormala år. Däremot finns det all anledning att börja pumpningen redan när en begynnande oxyklin etableras på djupa nivåer för att undvika en fortskidande propagering uppåt av oxyklinien. Eftersom inbrott av potentiellt högdensitets-vatten via Ålkistan kan ske oberoende av behovet av att pumpa ut syrefattigt vatten, kan sådana händelser reducera pumpningseffektiviteten. För att minska risken kan antingen syrehalten i pumpröret övervakas och pumpningen temporärt avbrytas om syresatt vatten pumpas under en längre tid. Alternativt kan densiteten i Ålkistans inströmmade vatten monitoreras.

Med den planerade förhöjda pumpkapaciteten (fördubbling från 0,5 till 1,0 m³/s) har i Tabell 5 uppskattats pumpningstiden för att pumpa ut allt vatten under ett givet djup för delbassäng 2 där Tivoli-stationen befinner sig. Trösklarna till de anslutande delbassängerna innebär att vissa vattenmängder blir undantagna. Därför blir den totala volymen mindre än den som använts som underlagdata för bassänghypsografierna.

Ett överslag visar att även om pumpning startas först när oxyklinien nått 8m-nivån kan dess utbredning uppåt reverseras med pumpning, förutsatt att inga nya inlagringar av inströmmade vatten via Ålkistan sker under oxyklinien under tiden pumpningen pågår. Under sommarperioden kommer termoklinen av samma skäl fördjupas i en takt som ökar mot botten. Det finns därför möjligen anledning utgående från de noterade höga korrelationerna mellan syre/svavelväte-koncentrationen vs. temperatur att uppmärksamma om den uppsnabbade termoklinfördjupningen kan medföra en ökad syretäring.

Tillskrivningar

Rapporten har tillkommit under fortlöpande diskussioner med Gunilla Lindgren och Christer Lännergren, båda vid Stockholm Vatten AB. Petter Stenström (WSP) har förutom de beräkningar som tillskrivts i texten även läst korrektur och givit konstruktiva synpunkter på en tidigare preliminär rapportversion daterad 070515.

Referenser

- Engqvist A, Stenström P & Pierce K (2006) Modelling the effects of a pumping program for increasing water circulation in a semi-enclosed bay in the Stockholm archipelago. Proceedings of the ninth international ASCE conference on Estuarine and Coastal Modeling. Charleston. ISBN 0-7844-0876-9. sid. 253-269.
- Engqvist A & Stenström P (2004) Archipelago Strait Exchange Processes – An overview. Deep Sea Research II, **51**, 371-392.
- Hastings D & Emerson S (1988) Sulfate reduction in the presence of low oxygen levels in the water column of Cariaco Trench. Limnol. Oceanogr., **33**(3), 391-396.
- Pettersson K (1988) Sedimentkemiska studier i Brunnsviken. Rapport LIU B:18, Limnologiska inst. Uppsala Univ. 4 sid. + tabell- och figurbilagor.
- Stigebrandt A (1980) Barotropic and baroclinic response of a semi-enclosed basin to barotropic forcing from the sea. In: H.J. Freeland, D M Farmer & C D Levins (Red.) Fjord oceanography. Plenum Publ. Corp. New York. sid. 141-164.
- Vattenprogram för Stockholm (2000) <http://www.miljo.stockholm.se/vatten>.

Tabeller

Tabell 1. Jämförelse mellan mätningar på samma plats (Ekhagen) och på samma datum (2007-02-20). Differenserna är av förväntad och acceptabel storleksordning.

Djup m	Vattentemperatur			Salinitet		
	SVAB °C	WSP °C	differens °C	SVAB PSU-skala	WSP PSU-skala	differens PSU-skala
0	0.50	0.87	-0.37	1.48	1.55	-0.07
4.5	1.25	0.92	0.33	1.81	1.91	-0.10

Tabell 2. Sammanställning av hypsografiska uppgifter som erhållits från Myrica. De gråtonade fälten avser endast sunden vars djupaste del — i motsats till bassängerna — kan tillåtas tilldelas ett ojämnt antal meter. Alla delbassänger är djupare än sina tillhörande sund, som alltså samtliga är av tröskeltyp.

djup [m]	Bassängarealer [ha]				Sundbredder [m]			
	B1	B2	B3	B4	S1	S2	S3	S4
0.0	12.01	64.9	48.64	25.68	8.8	245	308	369
1.0	10.54	63.25	45.29	24.56	7.6	240	299	366
2.0	9.07	61.6	41.94	23.45	5.5	234	290	362
2.7					5.0			
3.0	6.63	58.79	36.9	21.46		226	262	353
4.0	4.73	55.42	30.34	18.65		217	226	348
5.0	3.41	51.8	25.42	15.68		208	176	340
6.0	2.73	47.81	21.98	13.88		196	139	328
7.0	2.28	43.12	17.97	12.11		184	86	306
7.8							0	
8.0	1.74	36.96	12.66	10.67		162		275
9.0	1.38	29.33	3.95	9.04		130		244
9.8						0		
10.0	0.84	21	0.42	7.01				185
10.5								88
11.0	0.31	11.47	0	2.47				
12.0	0.06	7.61		0.38				
13.0	0	3.06		0				
14.0		0						

Tabell 3. De oceanografiska parametrarna är med undantag av Q_{inmax} baserade på litteraturvärden. De semi-empiriska parametervärdena har kommentrats i texten.

	benämning	värde	sort
Oceanografiska parametrar:			
Maximal vertikal värmeöverföringskapacitet	Q_{inmax}	100	[W/m ²]
Uppströms-accelerationsfaktor	$alfa_q$	0.4	[-]
Monin-Obukhovs parameter	K_{mo}	0.6	[s/m]
Penetrativ konvektionskoefficient	p_{cc}	0.05	[-]
Semi-empiriska parametrar:			
Vind-reduktionsfaktor	w_{irf}	0.7	[-]
Strand-dissipationsfaktor	s_{df}	0.3	[-]
Reduktionsfaktor för sötvattentillrinning	r_{qf}	0.9	[-]
Nominell "dödvolum" för Ålkistan	vol_{ak}	3600	[m ³]
Förstoringsfaktor relativt den nominella dödvolymer	vol_f	4	[-]
Lagernummer från vilket L:a Värtan vatten rekryteras	$Draw_{lay}$	4-6	[-]

Tabell 4. Sammanställning av utfallet för de analyserade pumpningsschemorna. Intermittent pumpning vid naturligt inflöde är genomgående mer effektivt än vid utflöde. Även om förbättringen är signifikant och systematisk, är skillnaderna mellan in- och utflödespumpning inte bättre än c:a 6%. Schema G med kontinuerlig pumpning i slutet av simuleringsperioden är dock ur AvA-synpunkt bäst, nästan 50% bättre än det sämsta schemat (D). Den totala (föryngrings-)effekten för Brunnsvikens vatten genom pumpningsförfarandet beror proportionellt även på pumpningstiden. Schema H skiljer sig från de övriga därför att pumpkapaciteten har förutsatts vara fördubblad från 0,5 till 1.0 [m³/s]. För att göra dessa två schemor enklare att jämföra har pumpningstiden för schema H minskats till något mindre än halva tiden för schema G, vilket även medför att denna period väsentligen innebär oavbruten pumpning av anoxiskt bottenvatten.

	Pumpning vid naturligt	pumpnings- bassäng	medelAvA [dygn m ⁻³]	Pumptid [dygn]	Tot. effekt [k dygn ² m ⁻³]
Schema A	inflöde	2	70.5	160.9	11.3
Schema B	utflöde	2	67.0	148.2	9.9
Schema C	inflöde	3	63.5	160.9	10.2
Schema D	utflöde	3	59.7	148.2	8.8
Schema E	inflöde	4	71.1	160.9	11.4
Schema F	utflöde	4	67.1	148.2	9.9
Schema G	(kontinuerligt)	2	88.7	112.1	9.9
Schema H	(kontinuerligt)	2	85.4	61	10.4

Tabell 5. Pumptid som krävs för att från Tivoli-fjärden (delbassäng 2 eller B2) pumpa ut bottenvatten som befinner sig under den angivna nivån för oxyklinen med den planerade utökade pumpkapaciteten av 1 [m³/s]. Med den nuvarande halva pumpkapaciteten tar det följaktligen den dubbla tiden. De lägsta trösklarna mot de anslutna delbassängerna finns på de nivåer som anges av Tabell 2, så att det är först när redoxklinen når under dessa nivåer som inget vatten från dessa anslutande delbassänger pumpas ut om pumpning tillåts pågå den angivna tiden. Pumparbetet för att motverka oxyklinens uppåtstigande är mest krävande ju närmare ytan den befinner sig. Under 2006 skedde en förhöjning från 8 m till 6 m vid två tillfällen under en period av approximativt en månad. Att åstadkomma en motsvarande sänkning från 6 m till 8 m tar enligt tabellen (31.6-11.8 =) 19.8 dygn. Pumpkapaciteten skulle alltså med viss marginal ha räckt till även om oxyklinen tillåts nå så nära ytan som 8m. Detta förutsatt att inget nytt inströmmande vatten via Ålkistan lagras in under oxyklin-nivån under den tid pumpningen måste pågå. Tröskelnivåerna för de övriga till delbassäng B2 anslutna delbassängerna, har markerats med streck.

Oxyklinens djupnivå [m]	Volym för delbassänger				Total vol. [Mm3]	Pumptid [dygn]
	B1 [Mm3]	B2 [Mm3]	B3 [Mm3]	B4 [Mm3]		
0	0.4913	5.168	1.7	2.574	9.933	115
2	0.2815	3.916	1.214	1.678	7.090	82.1
4	0.1484	2.755	0.794	0.956	4.653	53.9
6	0.0782	1.731	0.478	0.446	2.733	31.6
8	0.0336	0.885		0.098	1.017	11.8
10		0.310			0.310	3.6
12		0.058			0.058	0.7

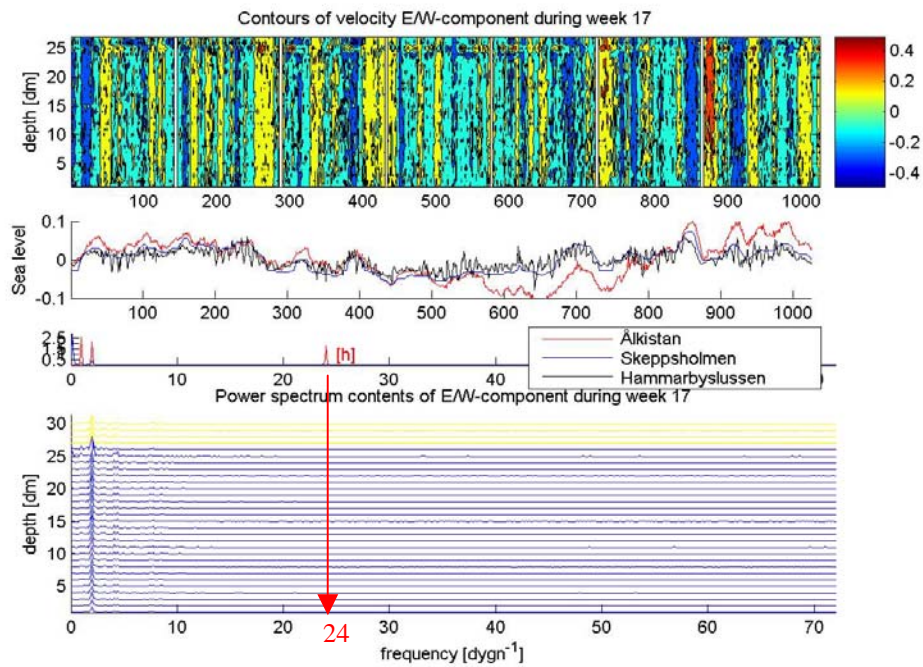


Fig. 1 En överblick av mätdata som registrerats i Ålkistan under den första mätveckan: Det översta diagrammet visar konturering (tiden [10minuters perioder] utmed x-axeln) av det uppmätta hastighetsfältet [m/s], det andra uppifrån visar simultana vattenståndsdata från Skeppsholmen och Hammarbyslussen samt trycket (okorrigerat för lufttrycksvariationer) vid Ålkistan. De två undre diagrammen är spektrala framställningar: Det övre är en kontroll som visar (röd färg) den frekvens som motsvarar svängningar med periodtid av en timme [h] d.v.s. 24 gånger per dygn i det nedersta diagrammets frekvens-skala, markerat med en röd pil. I det understa diagrammet visas (effekt-)spektra av samma data som för det översta diagrammet med de bottennära lagren nederst. De översta som har gulfärgats representerar aukustiska speglingar i vattenytan. Diagrammet uttolkas som att under denna vecka var den dominerande periodtiden drygt 12 timmar med en något avtagande amplitud mot botten.

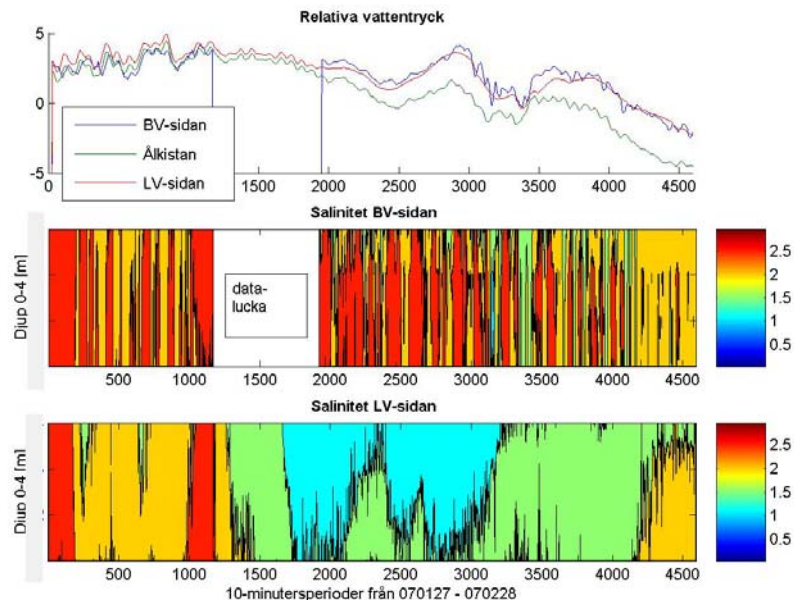


Fig. 2 Övre delfiguren visar den inbördes relationen mellan de vattentryck som registrerats i Ålkistan (ÅK) och på ömse sidor därom. Idealiskt skall trycket i ÅK hålla sig mellan de som uppmätts utanför. Så har grafiskt arrangerats i början av mätperioden (2007-01-27 t.o.m. 2007-02-28), men Ålkistans data driver därefter långt utanför vad som kan förklaras från oceanografiska utgångspunkter. Den mellersta delfiguren visar (med djupet som y-axel) salinitetskonturering för profilen mot Brunnsviken(BV)-sidan. Den undre bilden visar en konturering av uppmätt salinitet (psu-skala) på L:a Värtan(LV)-sidan, likaså med djupet som y-axel. Notera de avsevärda skillnaderna mellan dessa två kontureringar, även om inslag av saliniteteten på den motsatta sidan genom in- och utströmning kan tidvis noteras i båda diagrammen.

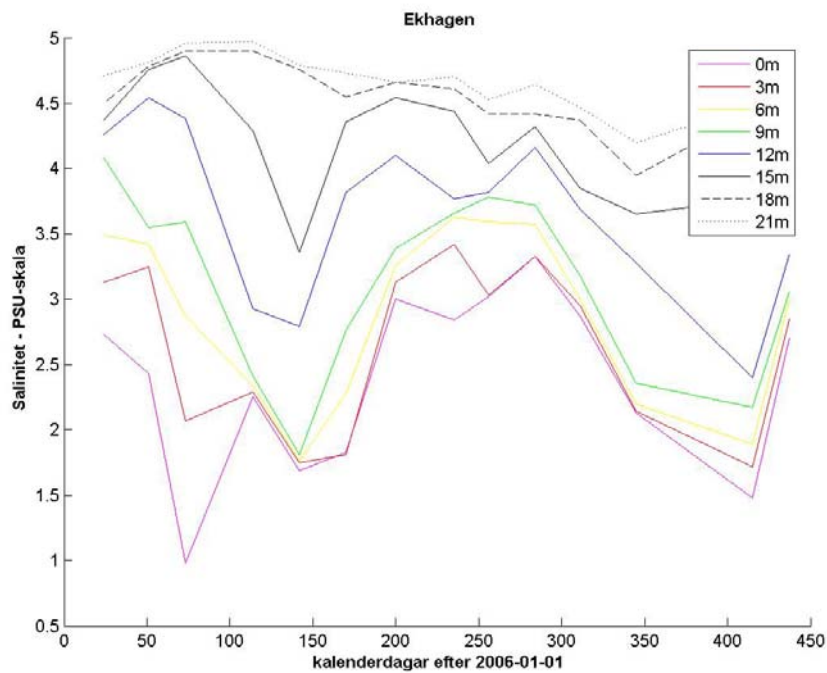


Fig. 3a Uppmätta saliniteter (mätn. av Stockholm Vatten) i Ekhagen under 2006 och början av 2007. Dessa data används linjärinterpolerade som drivande randdata.

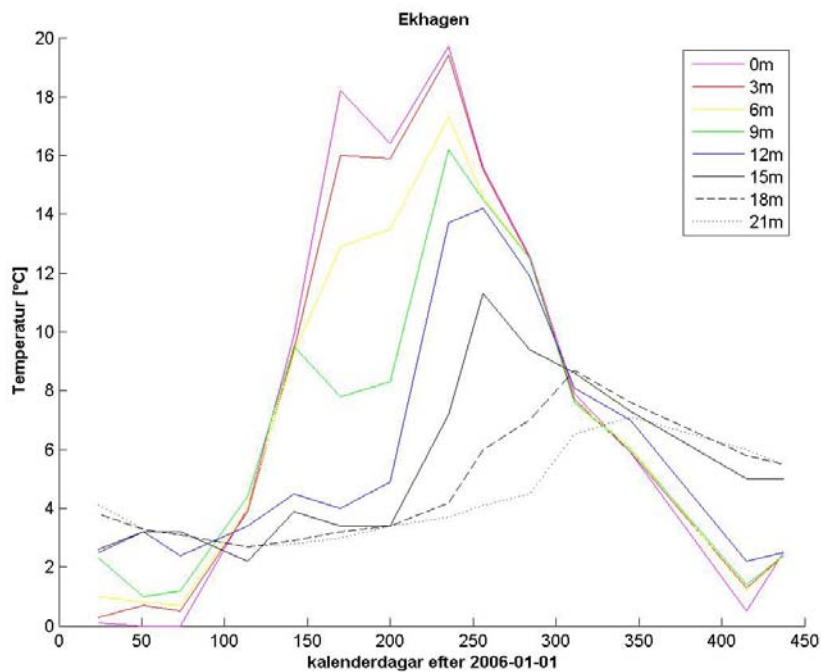


Fig. 3b Uppmätta temperaturer (mätn. av Stockholm Vatten) i Ekhagen under 2006 och början av 2007. Dessa data används linjärinterpolerade som drivande randdata. Notera den homogena temperaturfördelningen med avssende på djupet mot slutet av den presenterade mätperioden.

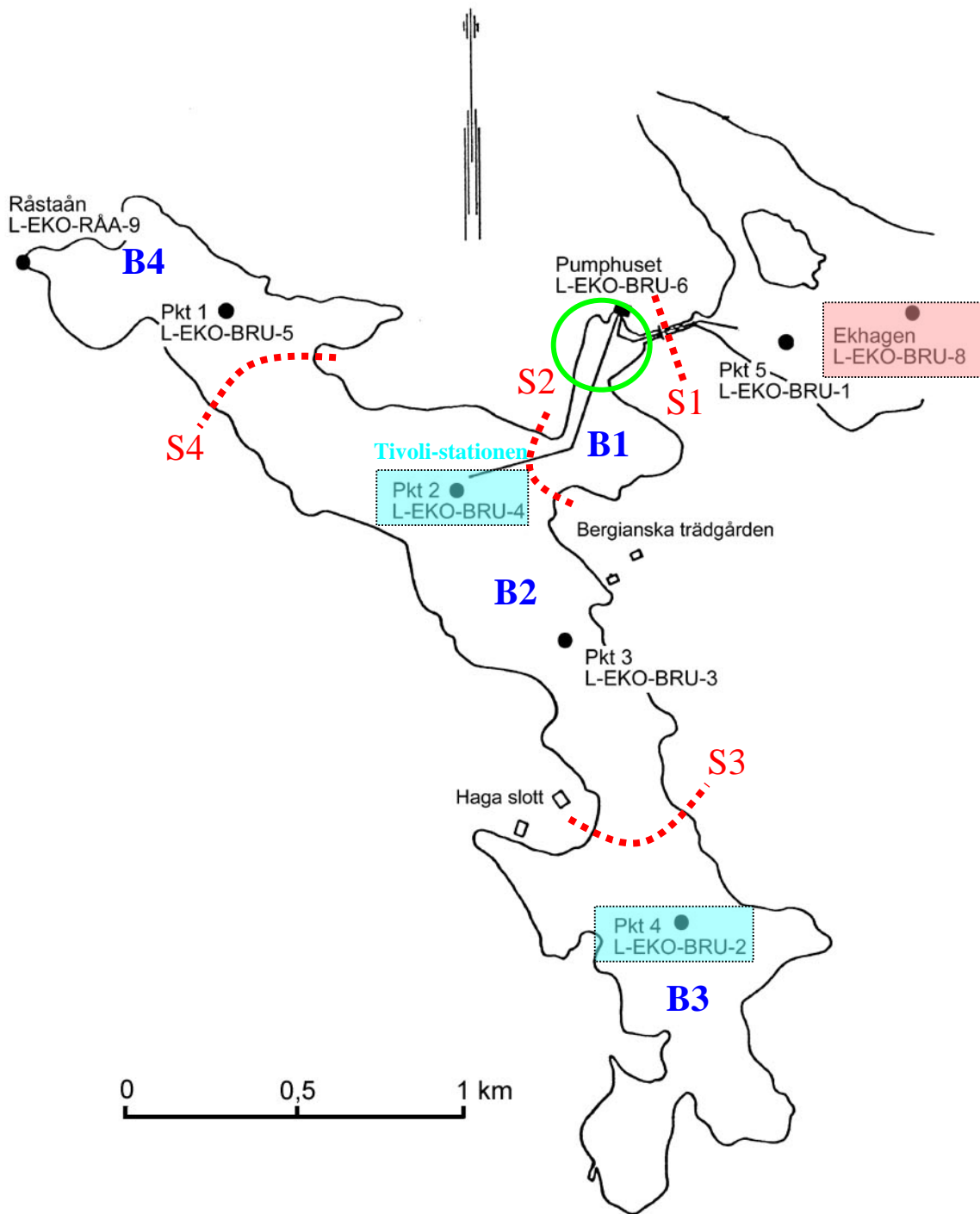


Fig. 4 Stiliserad karta över Brunnsviken uppdelad i fyra delbassänger (B1-B4) med lika många sundavgränsningar (S1-S4), i något stiliserad framställning. Tidigare använda mätstationers placering är även markerade. De två som besökts under den aktuella modelleringsperioden har markerats inom ljusblå inramning (varav den södra benämns "Kräftriket"; den i NV "Sipri"), medan Ekhagen-stationen inramats i ljusröd färg. Den gröna ringen visar den delvolym i Ålkistans förlängning mot Brunnsviken, vars ringa djup gör att åtminstone en del av densamma tillsammans med den egentliga kanalvolymen kan tjäna som en buffert för fram- och återskvapande vatten som alltså inte hinner inblandas i Brunnsviken när strömmen vänder. Underlaget för kartan härrör från Stockholm Vatten.

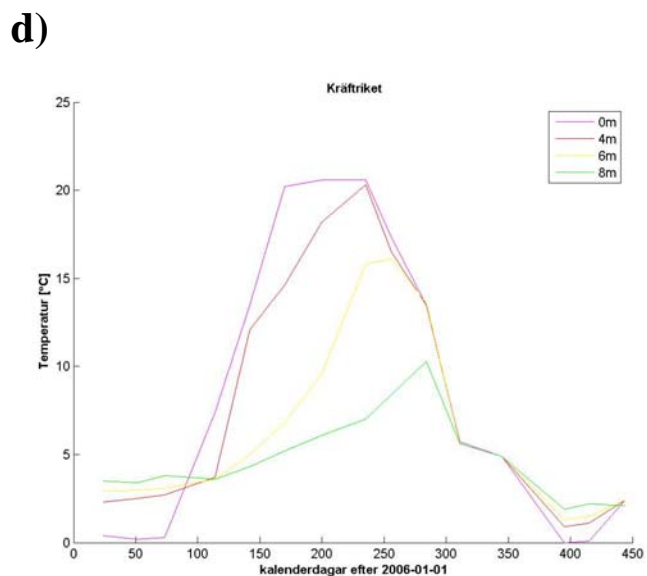
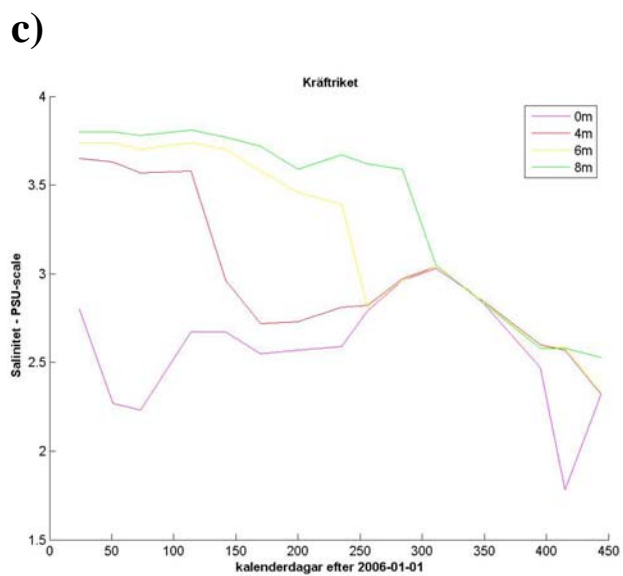
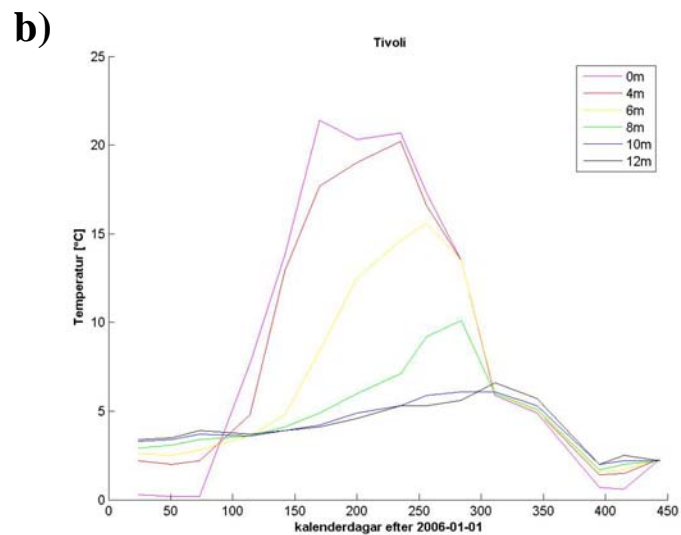
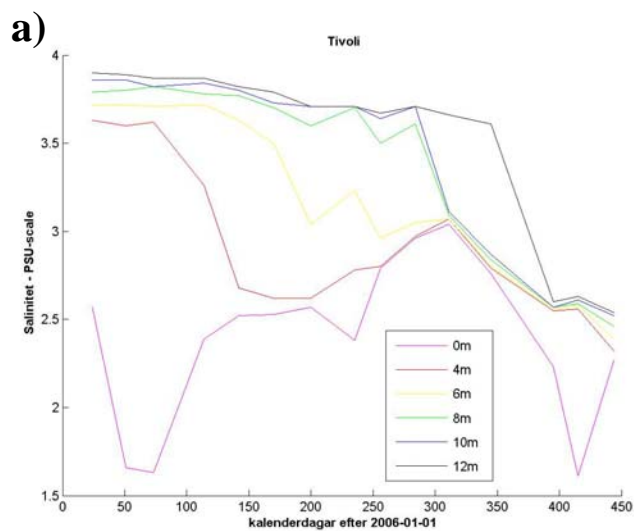


Fig. 5 Mätdata från Brunnsviken (från Stockholm Vatten) med start från 2006-01-01 som täcker modelleringperioden. Delfigur a) visar saliniteten vid "Tivoli"-stationen, d.v.s Bassäng 2; b) visar motsvarande för temperaturen. I delfigur c) ses saliniteten som uppmäts i "Kräftrike"-stationen (eller delbassäng 3) och motsvarande temperaturkurvor återfinns i delfigur d).

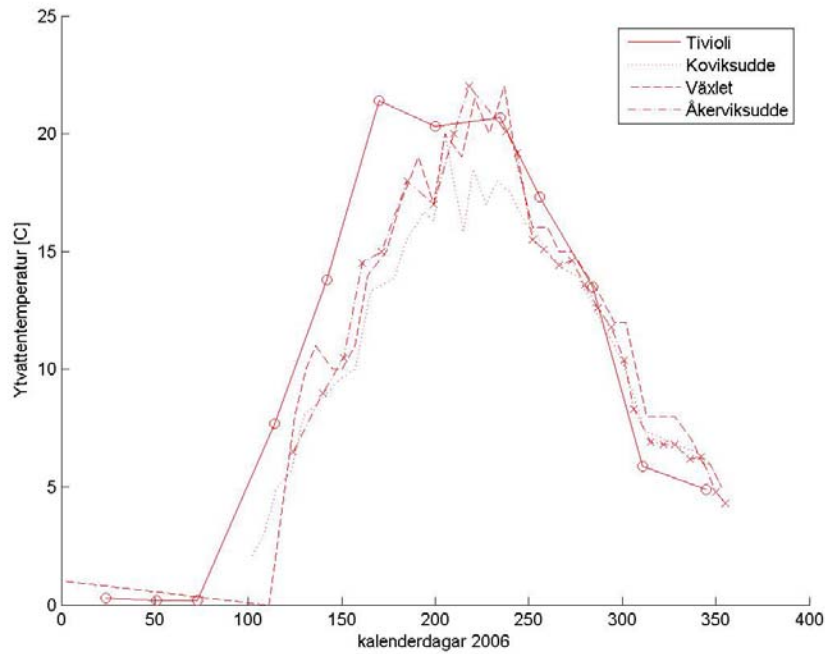


Fig. 6 Jämförelse mellan uppmätta ytvattentemperaturer vid Tivoli-stationen i delbassäng B2 och de som uppmätts vid de s.k. "Fiskare"-stationerna med veckatlig tidsupplösning. Ingen av dessa överensstämmer tillnärmelsevis tillräckligt väl med Tivoli-stationens data för att kunna bedömmas tjäna som en proxy för perioderna mellan de aktuella mättillfällena. Data från Stockholm Vatten.

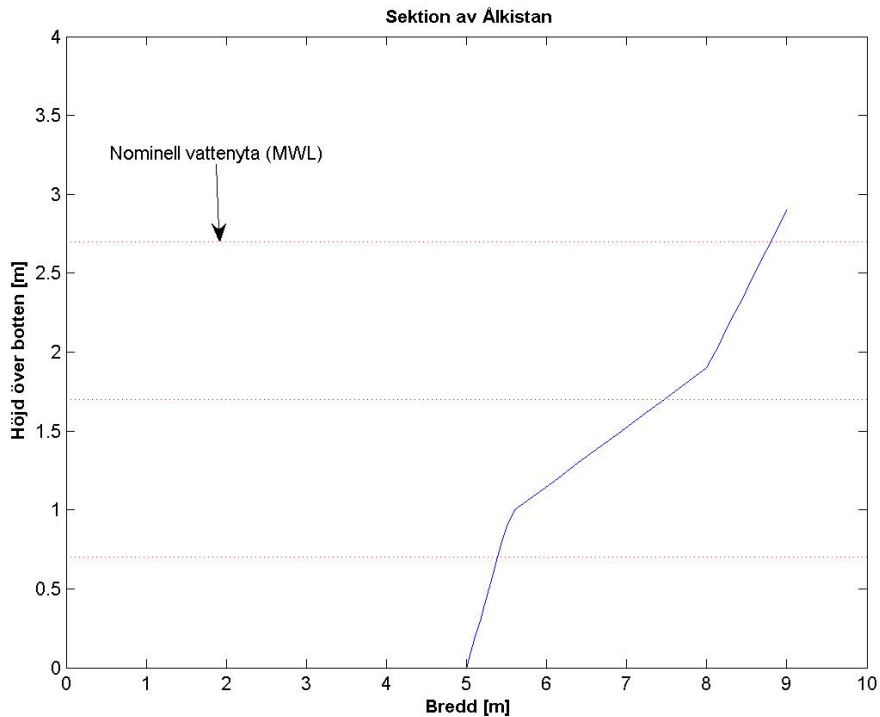


Fig. 7 Hypsografisk kurva (bredden som funktion av djupet), som baserats på konstruktionsritningar för en typisk sektion inom Älkistan. Denna kurva förutsätts även gälla för den sektion nära mitten av kanalen där ADCP-instrumentet placerats. Den nominella vattenytan är 2.7 m ovanför botten och två 1-m lager har ritats ut. Vid varierande vattenstånd räknas med att positionen för dessa två lagrets skiljeytor följer med i rörelsen så att lagertjockleken förblir oförändrad. Det nedersta lagret får då en varierande tjocklek. Fördelen med detta arrangemang är att salinitets- och temperaturmätningarna från Ekhagenstationen (som är relaterade till vattenytan) blir enkla att sammankoppla med volymflödesuppskattningarna för dessa tre lager. I och med välmotiverad sammanslagning av dessa tre lager till ett resulterande, får detta praktiska arrangemang dock ingen betydelse vid modellkörningarna.

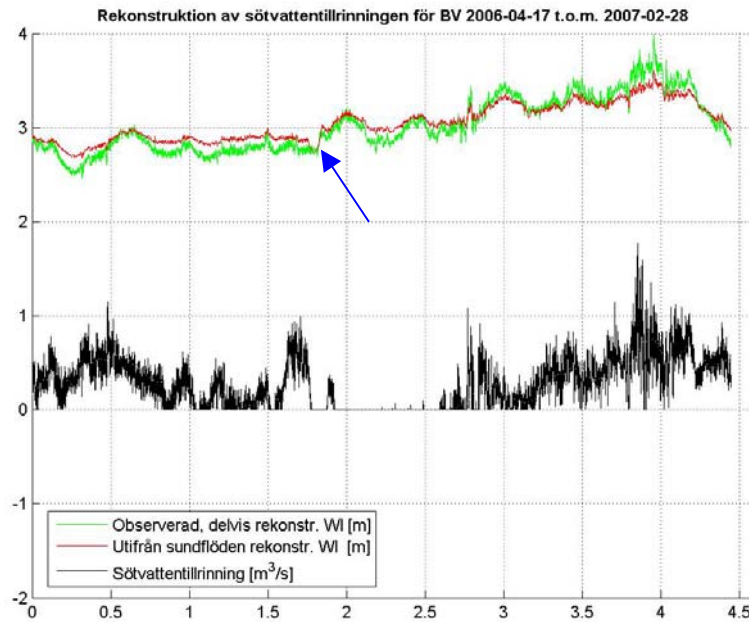


Fig. 8 Rekonstruerad sötvattentillrinning till Brunnsviken utifrån nettoflödet som uppmäts i Älkistan. De övre kurvparen visar samtida observerat respektive rekonstruerat vattenstånd. Driften mellan dessa två kurvor motsvarar approximativt 10 [l/s], vilket motsvarar mindre än en 10-potens lägre flöde jämfört med sötvattentillrinningens långtidsmedelvärde. Uppskattat läckage till tunnelbanesystemet är c:a 3 [l/s]. Före mitten av den återgivna simuleringsperioden finns en drygt sex dagar lång datalucka (2006-08-21 — 27) som markerats med en blå pil. Dataunderlaget har beräknats av P. Stenström, WSP.

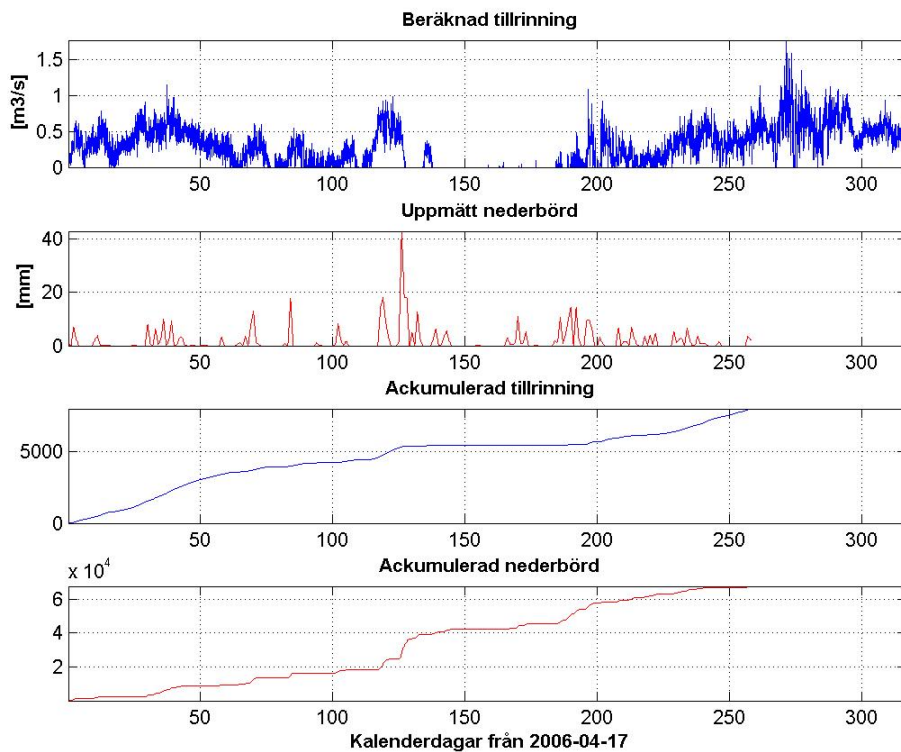


Fig. 9 Sammanställning av den uppskattade sötvattentillrinningen i förhållande till uppmätt nederbörd (SMHI-data från Observatoriekullen). Ut de två nedre diagrammen framgår att för motsvarande ackumulerade kurvor uppvisar den för nederbörden mera distinkta, händelse-orienterade förändringar, medan den ackumulerade tillrinningen är mera jämnt stigande. Detta kan dock i stor utsträckning tillskrivas avrinningsområdenas utjämnande inverkan. Figuren är modifierad efter förlaga av P. Stenström, WSP.

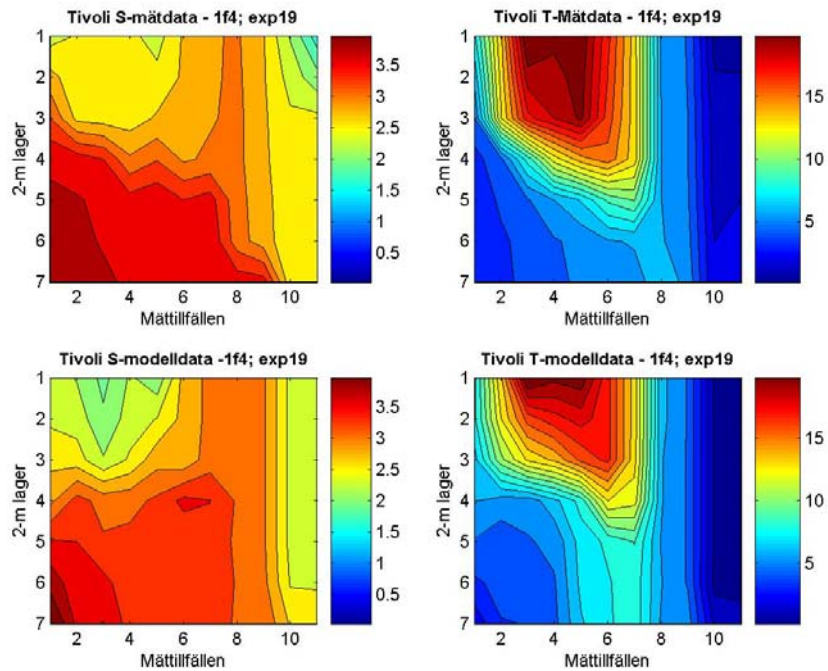


Fig. 10 Jämförelse uppdelad på 2m-lager och mättilfällen mellan uppmätta (övre kurvpar) och simulerade (nedre kurvpar) för respektive salinitets-(vänster kurvpar) och temperatur-(höger kurvpar) data avseende stationen i Bassäng 2 (Tivoli) gentemot körningen med den nominella parameteruppsättningen — Schema 0, d.v.s. ingen pumpning. Temperaturutvecklingen under simuleringsperioden fångas anmärkningsvärt väl. För att erhålla de uppmätta salinitetsnivåerna måste den uppskattade sötvattentillrinningen reduceras substansiellt, se Tabell 3. De små avvikelserna som kvarstår mellan mät- och modelldata måste anses acceptabla mot bakgrund av de valda parametervärdenas (speciellt reduktionsgraden av den *a priori* uppskattade sötvattentillrinningen) konstaterade känslighet med avseende på salinitets- och temperaturkontureringarnas utformning.

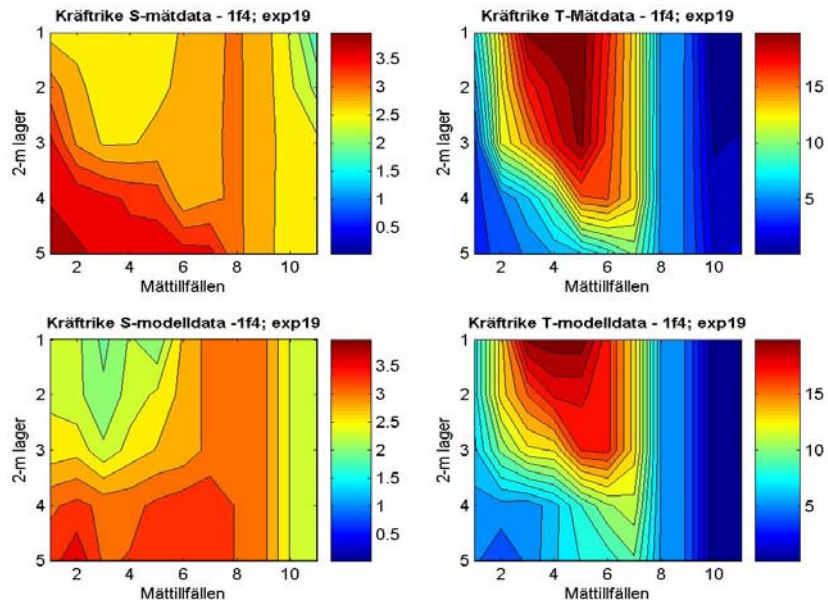


Fig. 11 Jämförelse uppdelad på 2m-lager och mättilfällen mellan uppmätta (över kurvpar) och simulerade (nedre kurvpar) för respektive salinitets-(vänster kurvpar) och temperatur-(höger kurvpar) data avseende stationen i Bassäng 3 (Kräftrike-stationen) och körningen med den nominella parameteruppsättningen. Notera det mindre djupet i förhållande till Fig. 10, men i övrigt gäller samma kommentarer som för Tivoli-stationen.

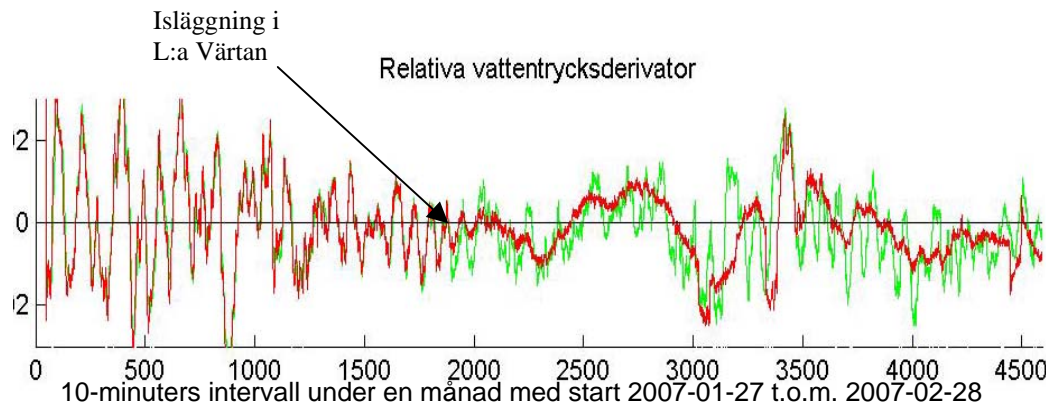


Fig. 12 Tidsdifferenser (derivator) för tryckmätningar i Ålkistan (grön kurva) och mätaren i L:a Värtan (röd kurva). Dessa samvarierar väl fram till en punkt drygt åtta dagar efter start, d.v.s. 2007-02-04, som markerats med en pil. Från denna tidpunkt förblir variationerna i L:a Värtan avsevärt dämpade. En rimlig tolkning är att isen lagt sig på denna station i L:a Värtan, medan Ålkistan genom strömning förblivit öppen. Som jämförelse observerades att isen i Brunnsviken lagt sig 2007-01-24.

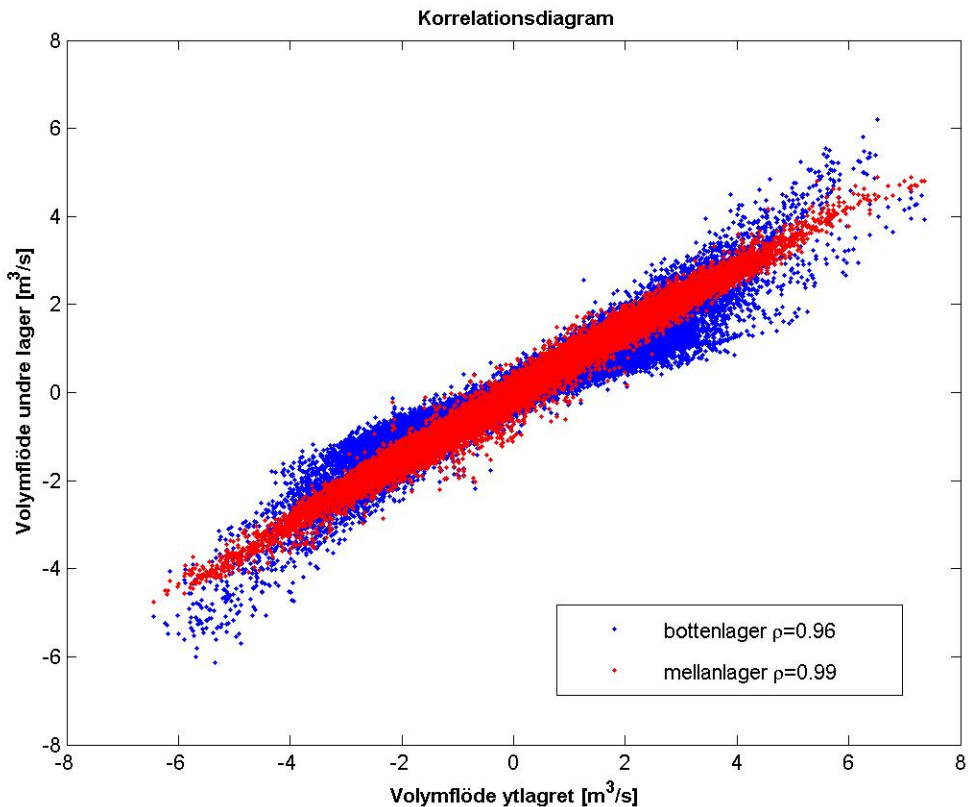


Fig. 13 I syfte att undersöka förutsättningarna för att sammanslå den i tre lager uppdelade volymflödesströmningen i Ålkistan utfördes en korrelationsberäkning mellan det övre lagret och de två undre. Korrelationskoefficienterna är 99% med mellanlagret och 96% med det undre. Regressionslinjerna lutar synbarligen i lika grad och amplituderna är överensstämmande, varför en sammanslagning endast kan förväntas resultera i negligerbar förlust av realism med avseende på vattenutbytet.

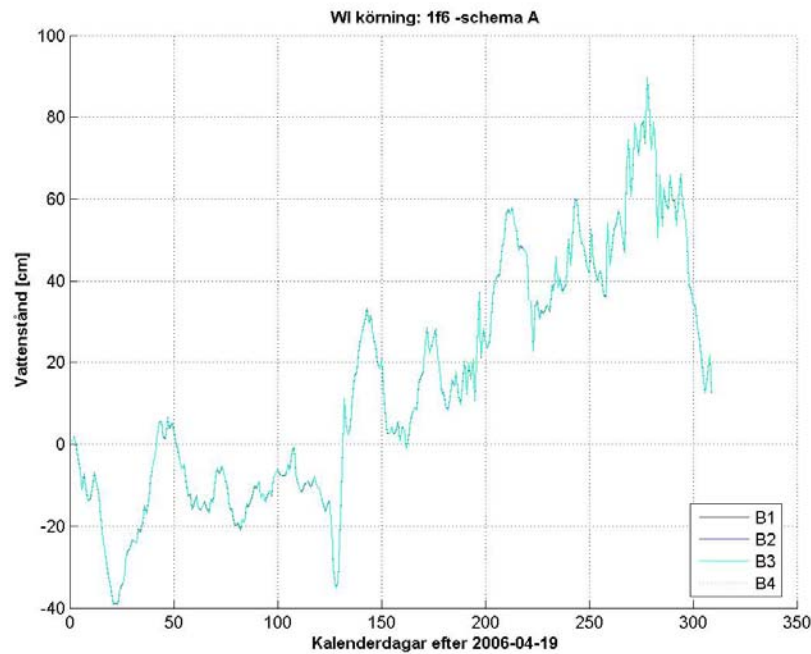


Fig. 14 Kontroll av att den resulterande vattenståndsutvecklingen förblir densamma även efter den artificiellt påtryckta utpumpningen av bottenvatten enligt Schema A. Jämfört med t.ex. kurvorna i Fig. 8 kan det konstateras att så är fallet, eftersom denna kurva genom att dess inneboende integrerande karaktär omisskännligen detekterar även små systematiska differenser mellan in- och utflödet till/från Brunnsviken.

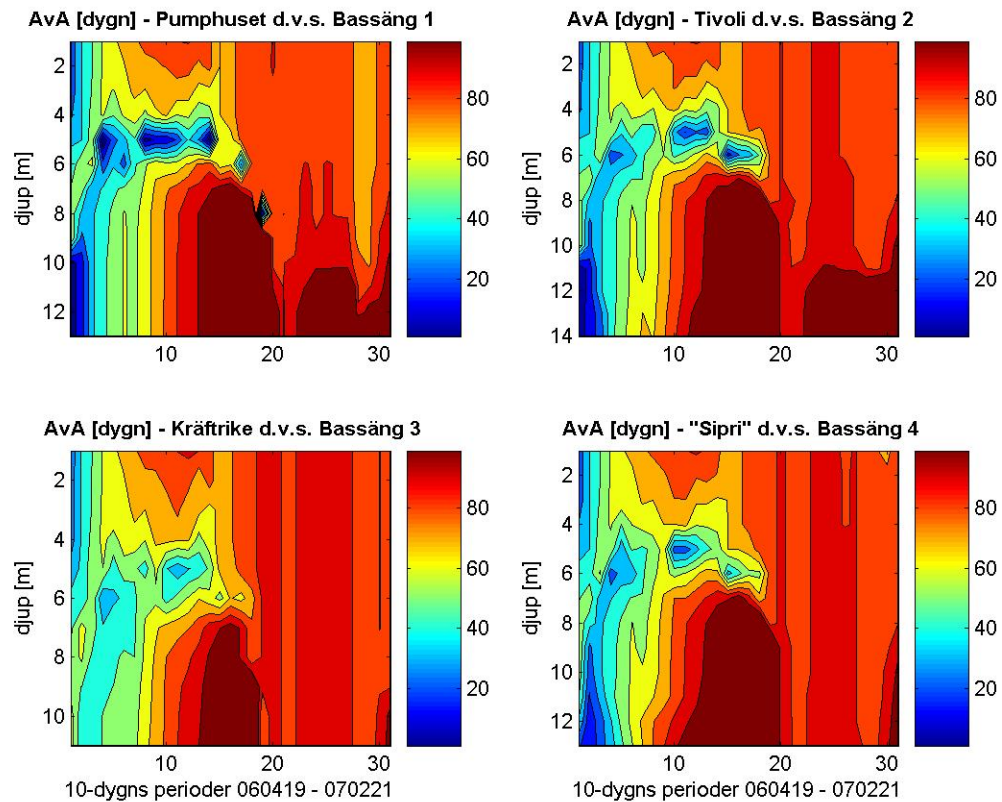


Fig. 15 Den relativa åldersfördelningen (AvA) för vattnet i Brunnsviken, åldern räknad sedan tillflödet av vattnet från L:a Värtan eller sedan det tillförts i form av sötvatten. Den senare källan till föryngring ger dock endast en knappt skönjbar föryngringseffekt på ytvattnet ens i Bassäng 4, dit 60% av tillrinningen leds. Tidmässigt är samplingen i dessa diagram utförda var 10:e dag. Inlagringen av inströmmande vatten från Ålkistan på en nivå något över 6 m i första hälften av simuleringsperioden är tydlig. Detta gör att bottenvattnet börjar åldras, vilket dock avbryts i etapper när höstavkylningens penetrativa konvektion innebär en partiell vertikal omblandning.

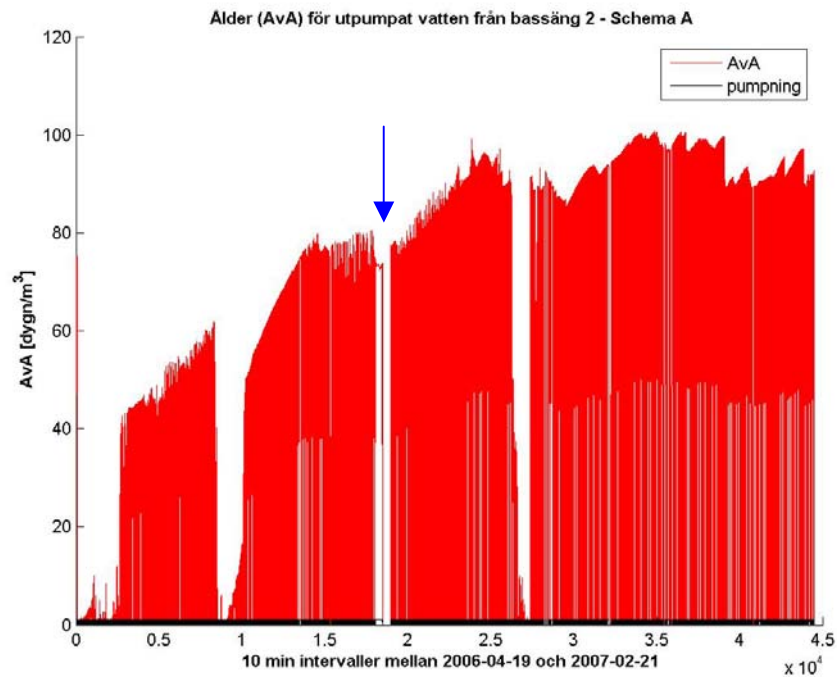


Fig. 16 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema A d.v.s. pumpning från Bassäng 2 när naturligt inflöde sker. Det initialt innehållna åldrade bottenvattnet är snart utpumpat och därefter sker en sakta förhöjning av AvA -värdena med en kvasistationär jämvikt etablerad mot slutet av simuleringen. Pumpningsperioderna har illustrerats med 1 när de pågår, annars 0. De frekventa övergångarna kan dock inte upplösas annat än för dataluckan (blå pil), för vilken interpolationsförfarandet råkar göra att nollgenomgång för flödet passeras mitt under denna datalucka.

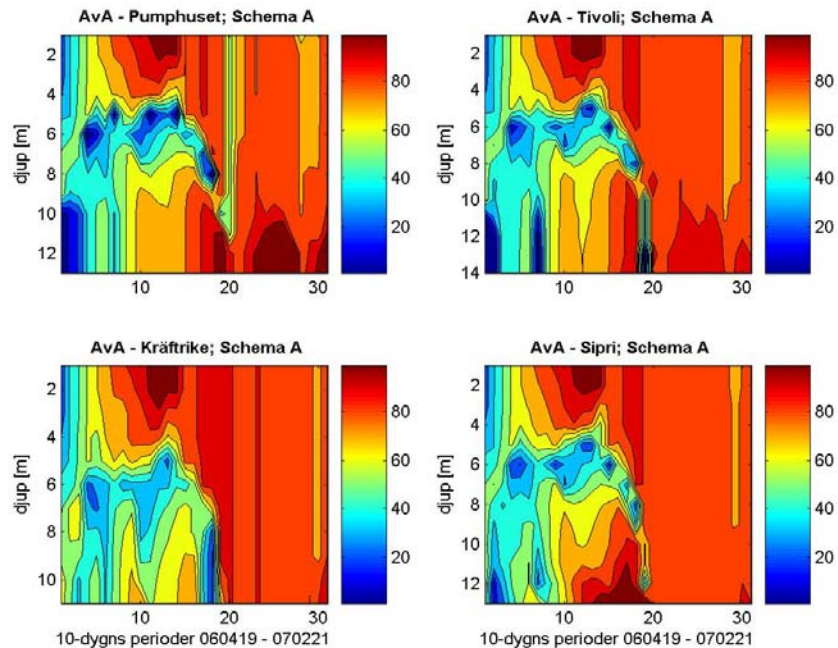


Fig. 17 Samma diagram som Fig. 15 men för pumpningsschema A. Pumpningen gör att den på mellannivå inlagrade plymen sugs ner mot djupet, vilket avspeglas i samtliga bassänger men mest uttalat för Bassäng 2 (Tivoli), från vilken utpumpningen sker. Höstomblandningen tillsammans med pumpningen verkar båda homogeniserande på AvA -innehållet. Notera de olika djupskalorna för delbassängerna.

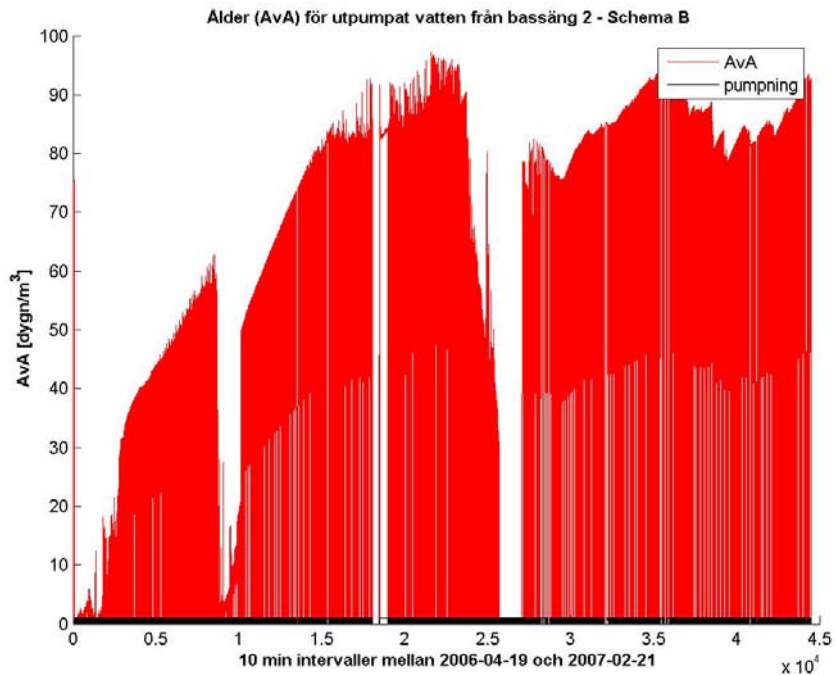


Fig. 18 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningschema B d.v.s. pumpning från Bassäng 2 när naturligt utflöde sker. Förutom dataluckan omkring den $1.8 \cdot 10^4$ tidssteg (om 10 minuter), förekommer två perioder med förnyring av bottenvattnet i Bassäng 2, varav den senare är mer markerad.

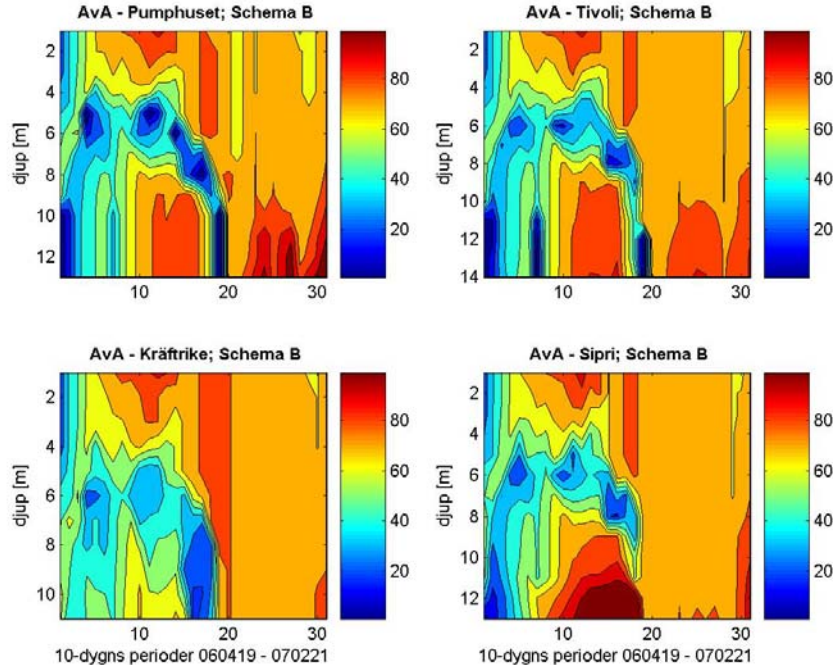


Fig. 19 Samma diagram som Fig. 15, men för pumpningschema B. Förnyelsen av bottenvattnet är accentuerad för Bassäng 2 (men även tydlig för delbassäng 3) omkring den 19:e av 10-dagarsperioderna.

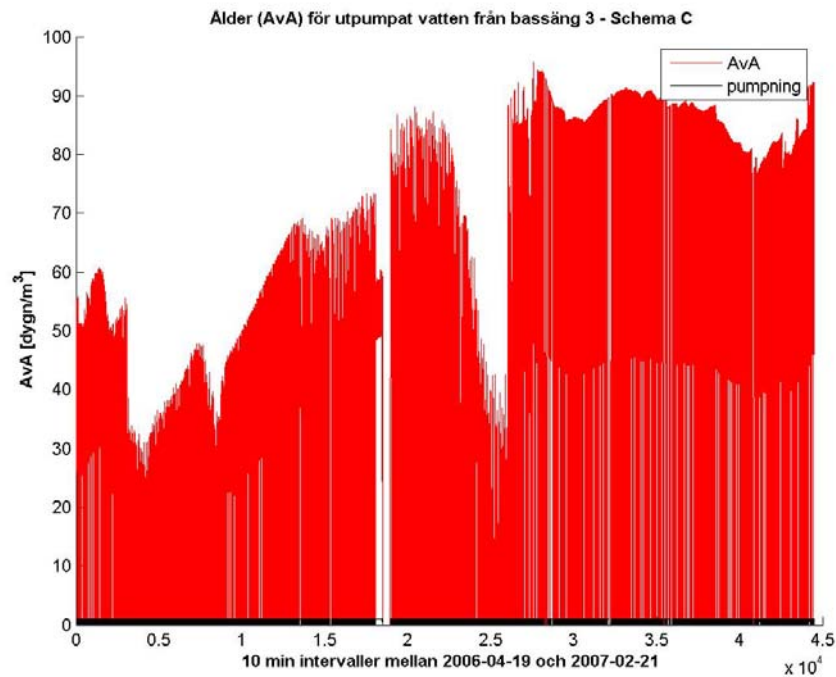


Fig. 20 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema C d.v.s. pumpning från Bassäng 3 när naturligt inflöde sker. Minima vid de förnyelseperioder som ses i Fig. 18 återfinns även i detta diagram men är betydligt reducerade och når inte ner till noll.

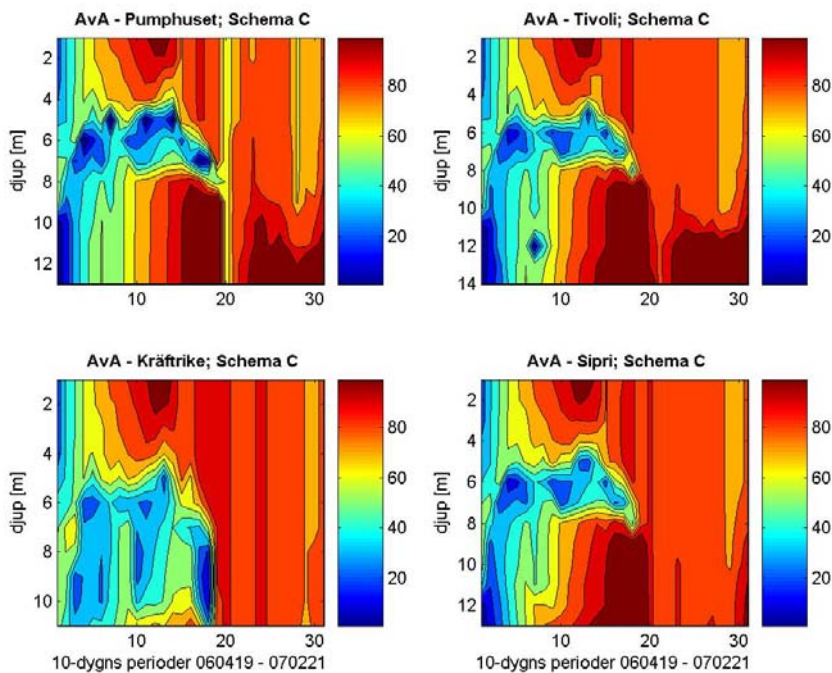


Fig. 21 Samma diagram som Fig. 15, men för pumpningsschema C. Accentuering av bottenvattenförnyelsen har flyttat över från Bassäng (Fig. 17 och Fig. 19) 2 till Bassäng 3 som förväntat.

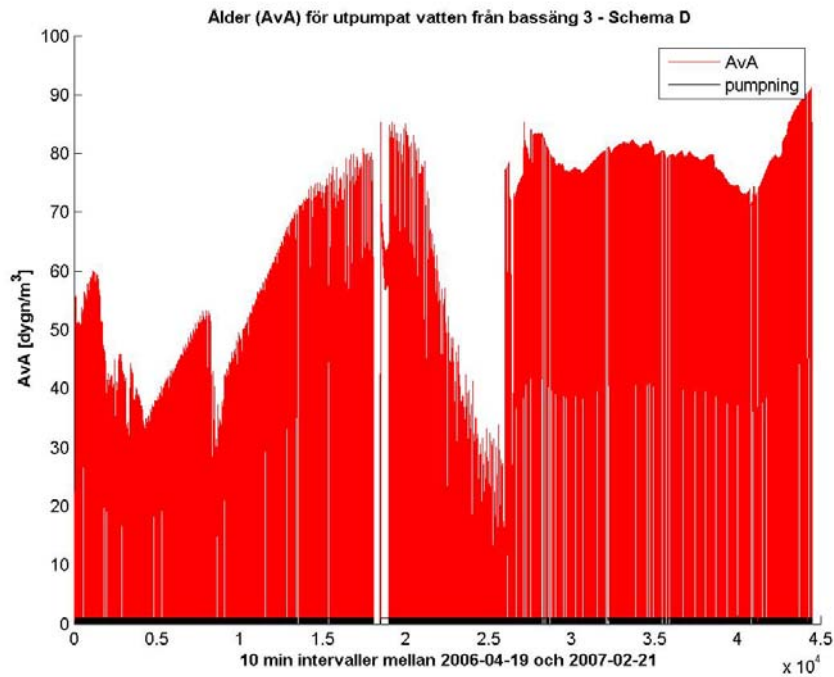


Fig. 22 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema D d.v.s. pumpning från Bassäng 3 när naturligt utflöde sker. Den genomsnittliga AvA -nivån i det utpumpade vattnet är tydligt lägre jämfört med Fig. 20, där utpumpning sker

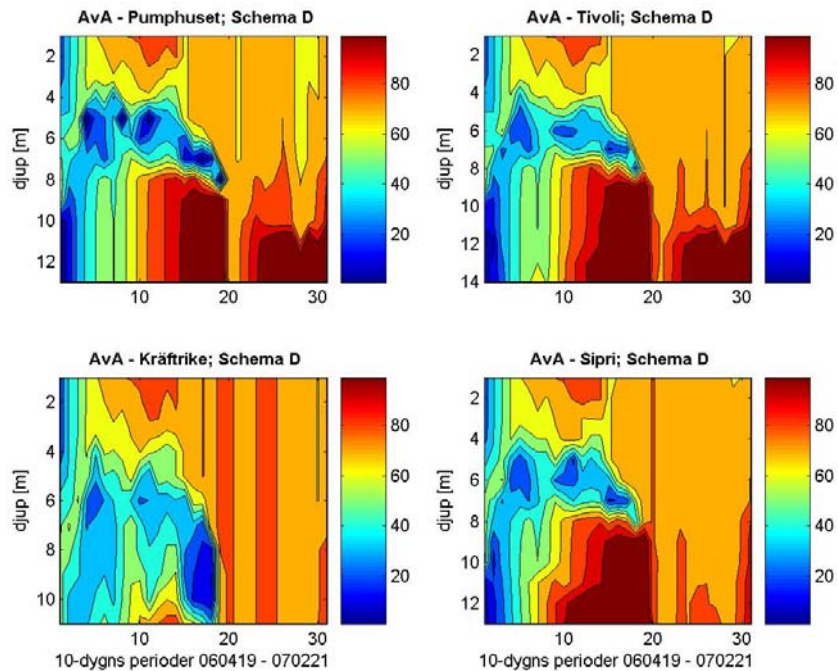


Fig. 23 Samma diagram som Fig. 15 men för pumpningsschema D. En generell relativ förnyring av hela vattenmassan äger rum i jämförelse med Fig. 21.

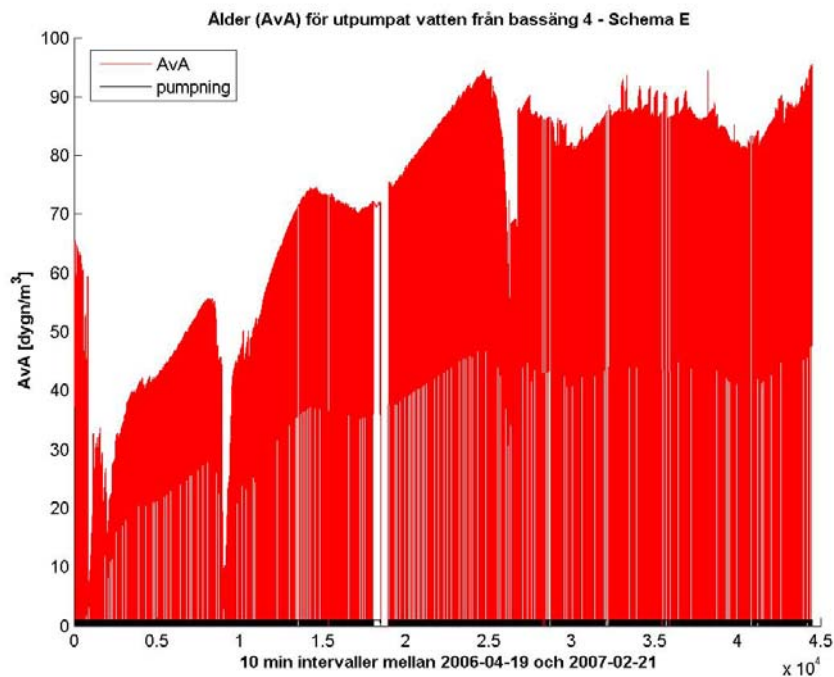


Fig. 24 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema E, d.v.s. pumpning från Bassäng 4 när naturligt inflöde sker. De två förnyelsehändelserna med plötsligt uppkommande avsevärt lägre AvA -värden kan iakttagas men framstår som dämpade jämfört med Fig. 22.

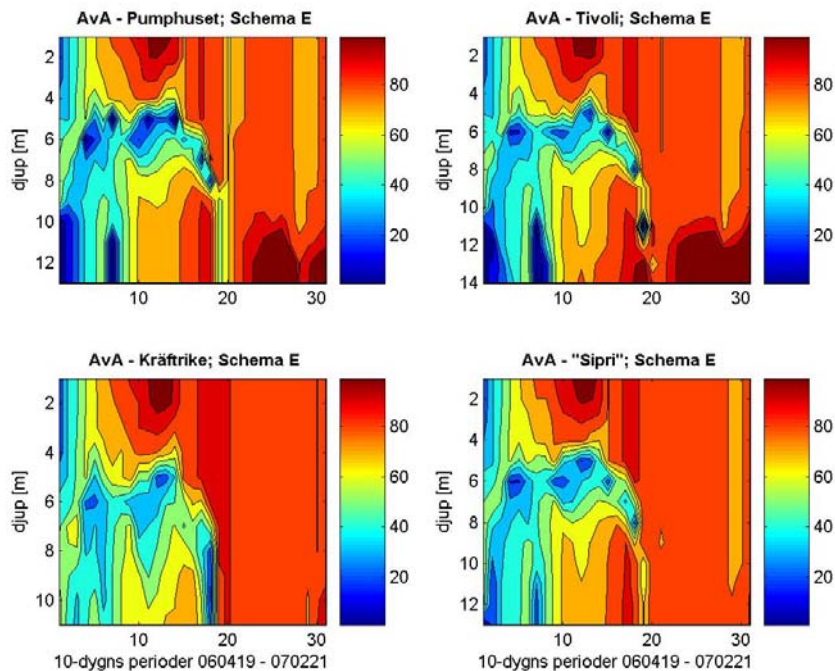


Fig. 25 Samma diagramutformning som för Fig. 15, men för pumpningsschema E. Att förnyelsen som väntat är mest markerad för Bassäng 4 är en konsekvens av den simulerade överflyttningen av pumpningen till denna bassäng.

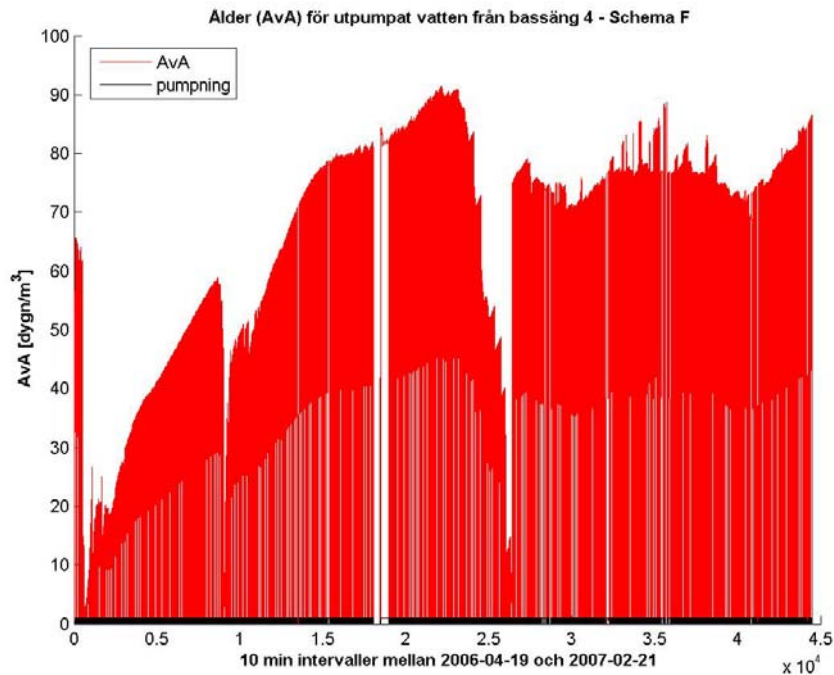


Fig. 26 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema F, d.v.s. pumpning från Bassäng 4 när naturligt utflöde sker. Jämfört med Fig. 24 (pumpning från samma Bassäng 4 vid naturligt inflöde) är resultatet synbarligen lägre AvA -nivåer i pumpvattnet mot slutet av simuleringsperioden.

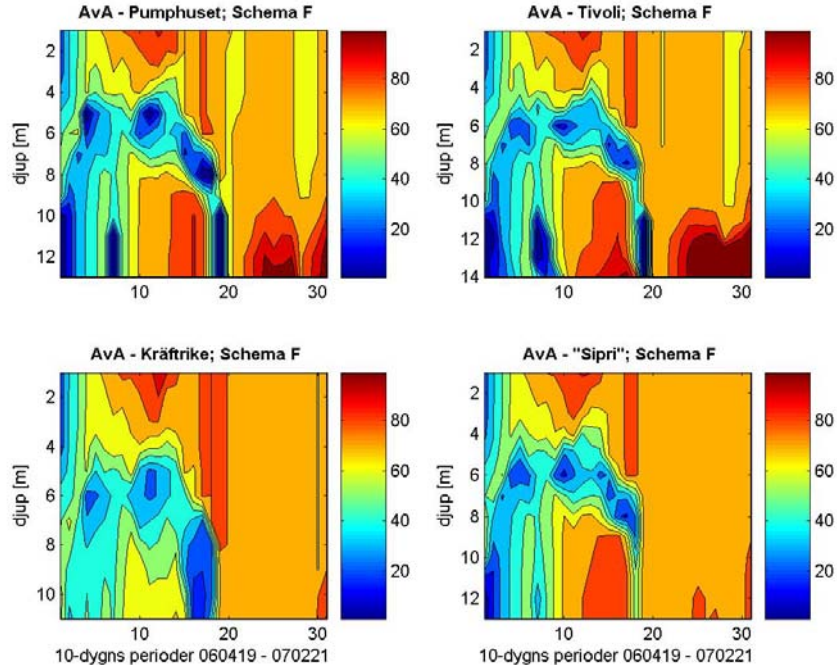


Fig. 27 Samma diagram som Fig. 15 men för pumpningsschema F. De lägre AvA -nivåerna i det utpumpade vattnet mot slutet av simuleringsperioden tar sig också uttryck i form av allmänt lägre AvA -koncentrationer i vattenmassan, speciellt i Bassäng 4.

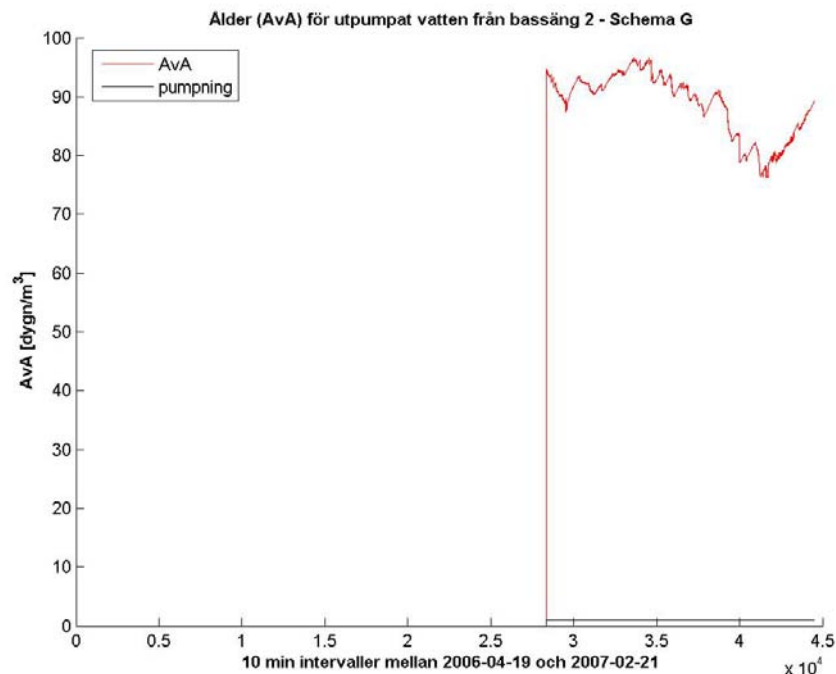


Fig. 28 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema G, innebärande kontinuerlig bortpumpning av stora volymer från Bassäng 2. Med insikt om att AvA för bottenvattnet tenderar att tillta mot slutet av simuleringsperioden, har pumpningen förlagt till efter 2006-10-31, vilket ger 101 pumpningsdagar till slutet av simuleringsperioden. Påslaget av pumpningen framgår nu också tydligt av den svarta kurvan nära x-axeln, som övergår från noll till ett när pumpningen börjar.

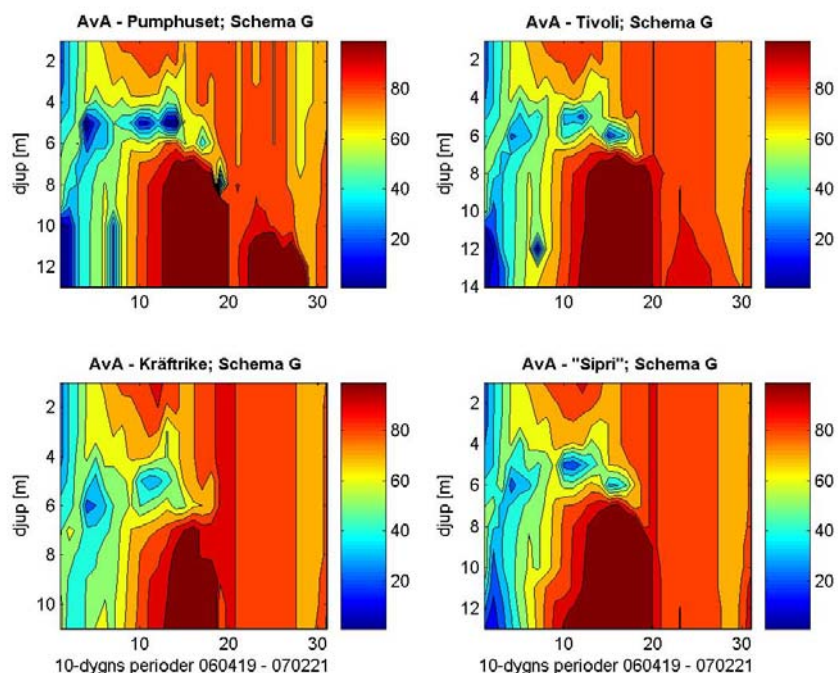


Fig. 29 Samma diagram som Fig. 15 men för pumpningsschema G, d.v.s. kontinuerlig utpumpning från Bassäng 2 mot slutet av simuleringsperioden. Innan pumpningen startar är AvA-konturerna identiska med de i Fig. 15. Utgångsläget inför den kontinuerliga pumpningsperioden med start 2006-10-31 är väsentligt förhöjda AvA-nivåer i bottenvattnet jämfört med de de övriga schemorna A-F för vilka pumpningen sker intermittert och fördelat över hela simuleringsperioden. Ur effektivitetssynpunkt är detta det i särklass mest effektiva schemat.

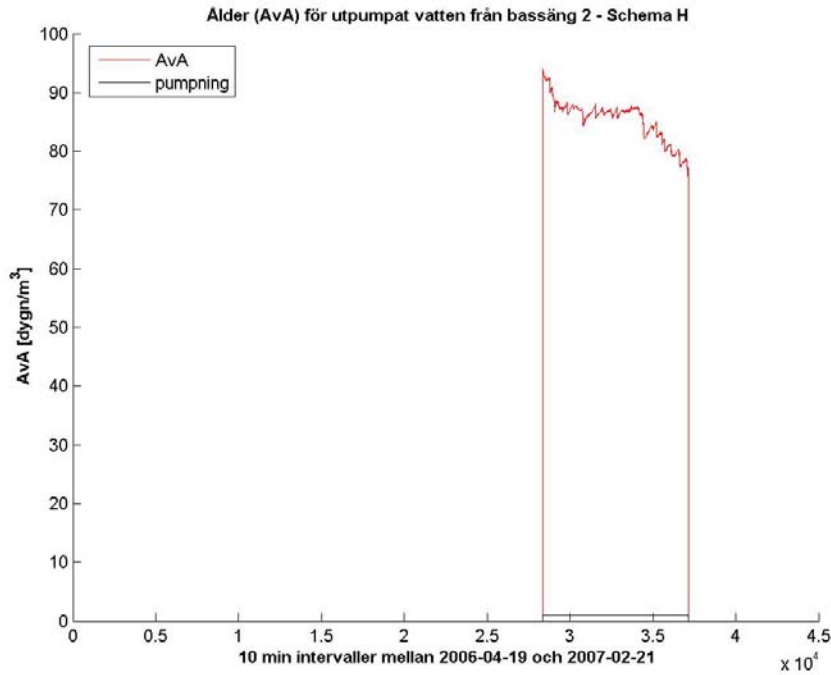


Fig. 30 Åldern (AvA) för det utpumpande vattnet under den drygt 10 månader långa simuleringsperioden följande pumpningsschema H, innebärande kontinuerlig bortpumpning av stora volymer från Bassäng 2 med den dubbla pumpkapaciteten jämfört med pumpningsschema G d.v.s. 1 [m³/s]. För att göra detta schema så jämförbart som möjligt med föregående (G), så avbröts pumpningen efter två månader vid årsskiftet. Under denna tid faller som väntat åldern snabbare så att effektiviteten blir något sämre än för G, medan syresatt vatten som enligt mätningar uppträder på 12 m djup efter årsskiftet inte riskerar att bli utpumpat.

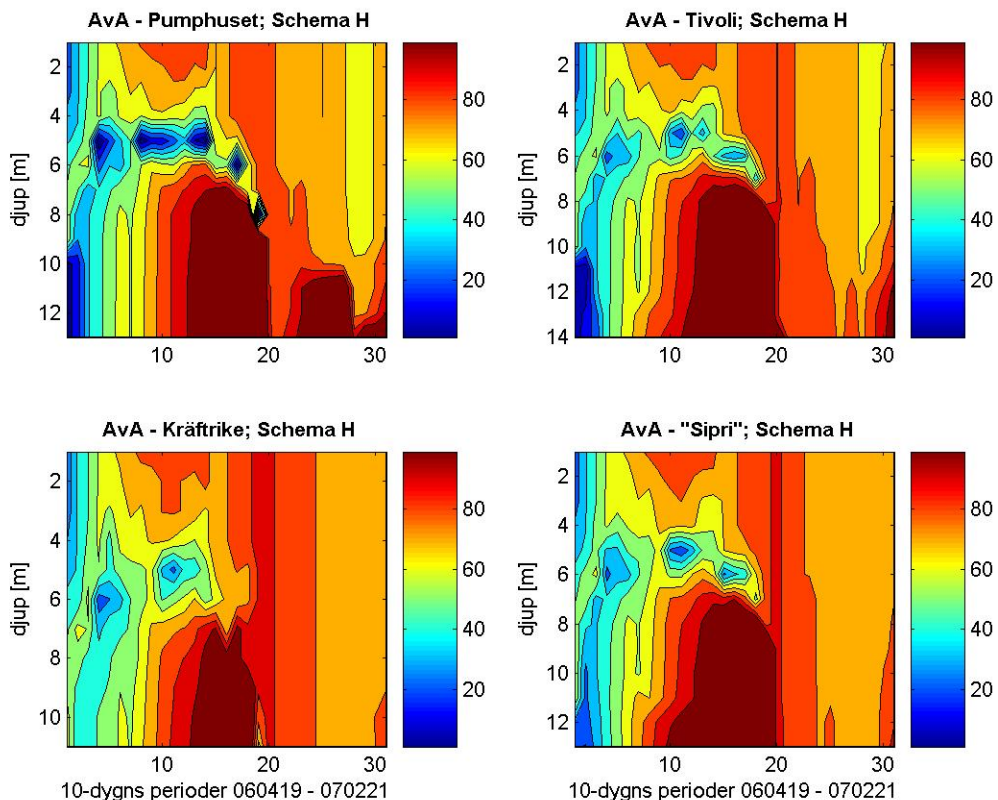


Fig. 31 Samma diagram som Fig. 15 men för pumpningsschema H, d.v.s. kontinuerlig utpumpning från Bassäng 2 mot slutet av simuleringsperioden men med dubbel pumpningskapacitet jämfört med Schema G. Innan pumpningen startar är AvA-konturerna identiska med de i Fig. 15 och Fig. 29 och under de två månader som pumpning äger rum sker en noterbar föryngring av bottenvattnet jämfört med den senare figuren.

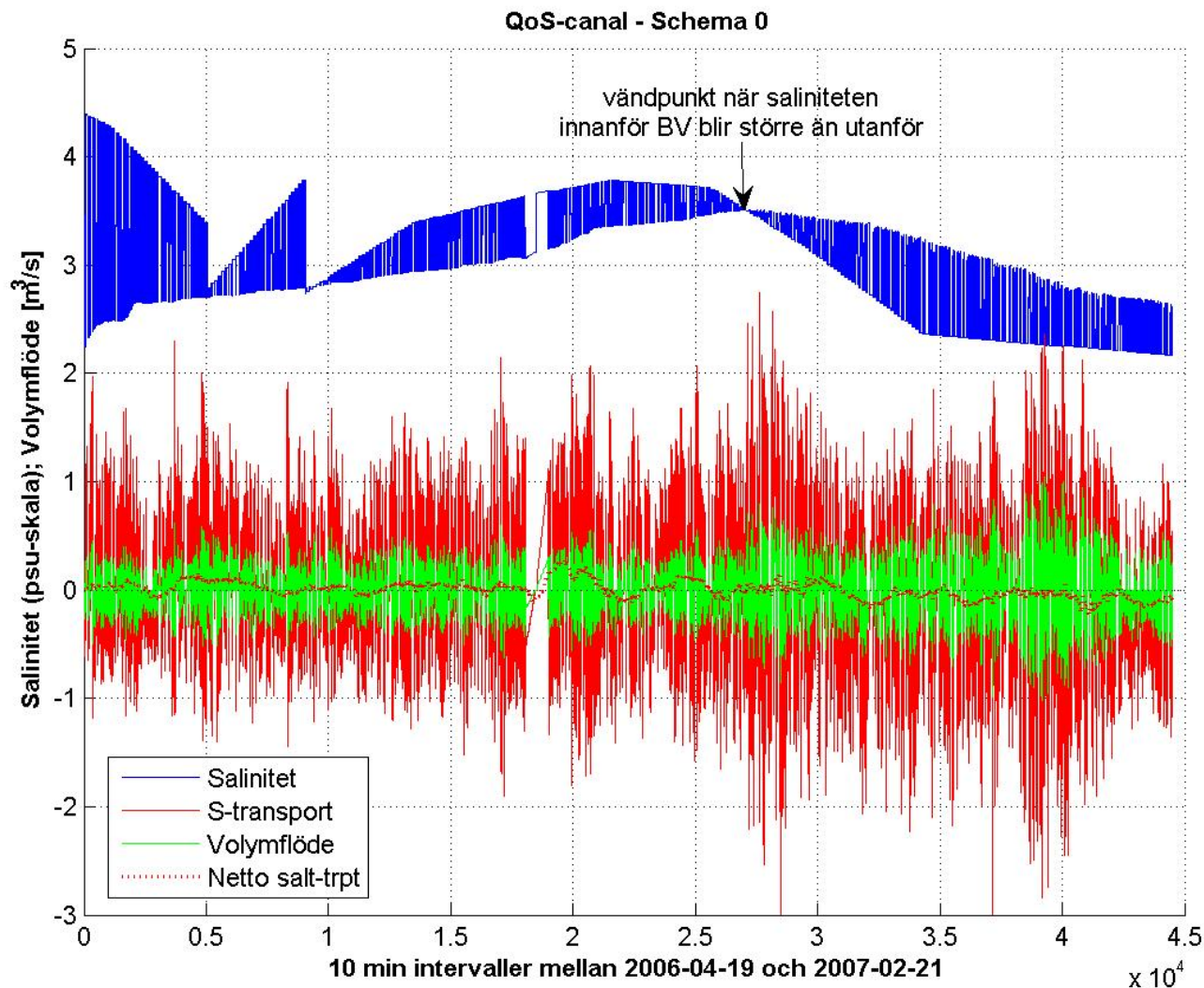


Fig. 32 Sammanställning av salinitets-, flödes- och saltransportdata för den nominella simuleringen (även benämnd Schema 0). Saltransporten är produkten av saliniteten i Älkistekanalerna och det uppmätta volymflödet, modifierat av den effektiva dödvolum som kanalerna representerar och som inverkar reducerande på det effektiva vattenutbytet. Nettosaltransporten har åskådliggjorts genom en lågpasfiltering medelst löpande medelvärdesberäkning. Den blå kurvan visar genom sina övre och undre begränsande värden skillnaden mellan saliniteterna för inströmmande respektive utströmmande kanalvatten. I början av simuleringen är saliniteten för det exogena vattnet härrörande från L:a Värtan mestadels högre än ytvattnet i Brunnsviken. I slutet av oktober korsar emellertid dessa yttre begränsningslinjer varandra, vilket markerats med en pil. Efter denna tidpunkt blir nettosaltransporten (prickad röd kurva, mot grön bakgrund genererad av det snabbt fluktuerande volymflödet) i stort sett negativ med endast kortvariga undantag med minimala positiva amplituder. Under pumpningsperioden sker alltså inlagringen av inkommande vatten till Brunnsviken företrädesvis på ytan, varför bottenvattnet kan åldras samtidigt som det i verkligheten genom kontakt med bottenarna blir föremål för en pågående ekvibrering av utläckande närsalter, främst fosfat.

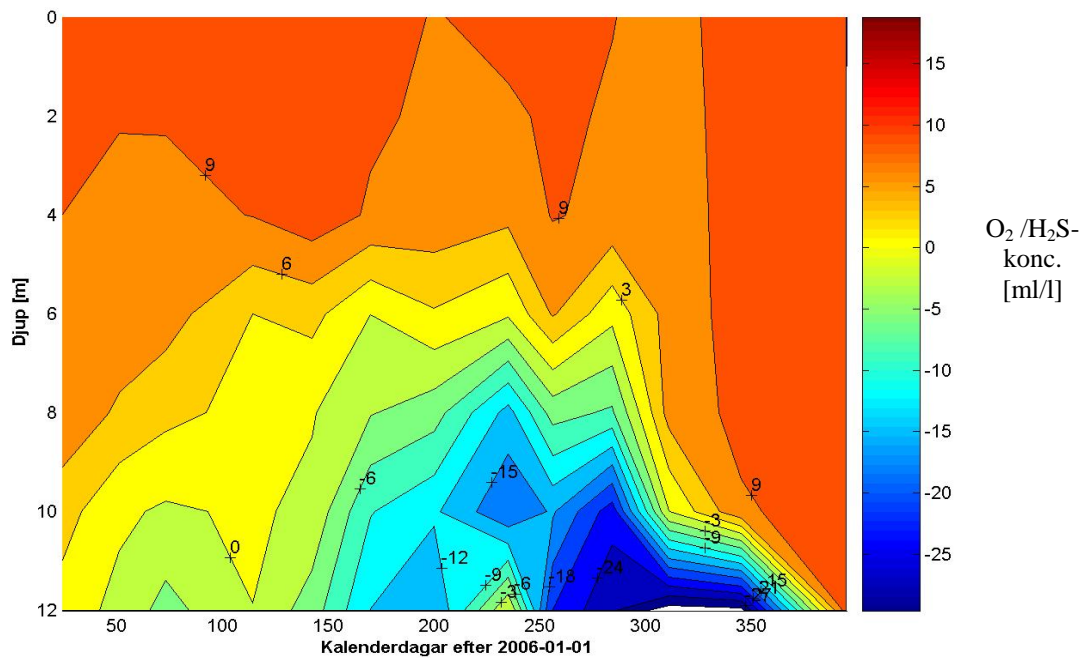


Fig. 33 Uppmätta syre- och svavelvätekoncentrationer vid Tivoli-stationen i delbassäng 2, med de senare noterade som negativa värden. Nivåkurvan för +3 [ml/l] tjänar som som en varningsindikator för begynnande anoxiska förhållanden. Notera den snabba syresättningen vid slutet av 2006.

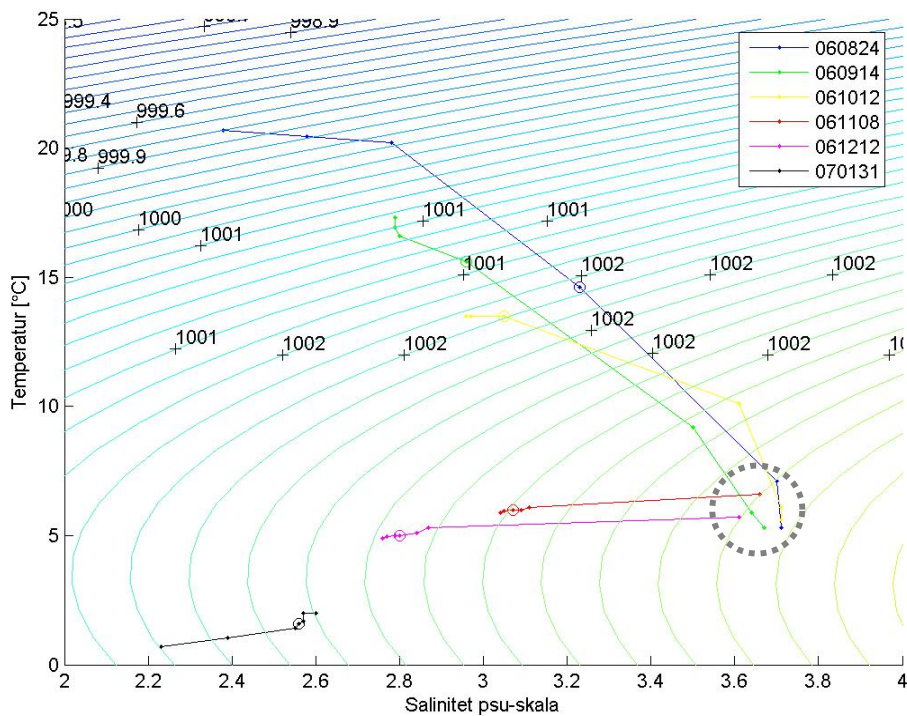


Fig. 34 Tillståndsdigram med uppmätta salinitets(S)- och temperatur(T)profiler vid Tivoli-stationen för de angivna mätdatum. Konturlinjerna anger sammanhörande S- och T-värden som har samma densitet uttryckt i $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Ytvärdena för varje profil motsvarar ändpunkterna till vänster. För 2006 års profiler återfinns bottenvärdena på 12m djup inom den streckade cirkeln vilket tolkas som att höstavkyllningen inte penetrerat till detta djup förrän någon gång mellan 061212 och 070131. För profilerna har 6m-värdena markerats med en ring. En homogenisering av den övre vattenmassan pågår hela hösten och kulminerar i en nästan vertikalt välomblandad bassäng. Det lättare vattnet som fortsätter strömma in via Ålkistan efter 061212 är orsaken till den konstaterade radikala täthetsänkningen 070131, med nära homogen blandning nära botten och med salinitetsgradienten närmare ytan.

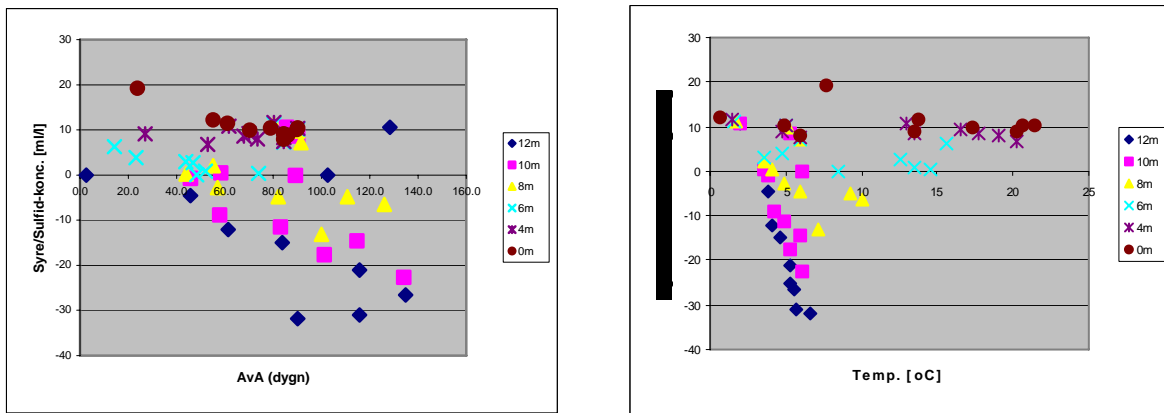


Fig. 35a (vänster delfigur) Korrelationsdiagram för modellerade AvA-värden gentemot uppmätta syre/svavelväte-koncentrationer under modelleringsperioden på motsvarande djup vid Tivoli-stationen (d.v.s. delbassäng 2). Korrelationskoefficienterna är $-0,32$, $-0,59$ samt $-0,29$ för respektive 12m-, 10m- samt 8m-nivån, vilket indikerar ett visserligen något svagt men ändå otvetydigt samband.

35b (höger delfigur) Korrelationsdiagram för uppmätta temperaturer gentemot uppmätta syre/sulfid-koncentrationer på motsvarande nivå vid Tivoli-stationen (delbassäng 2). Korrelationskoefficienterna är $-0,97$, $-0,60$ samt $-0,66$ för respektive 12m-, 10m- och 8m-nivån, vilket visar på ett förhållandevis starkt samband.

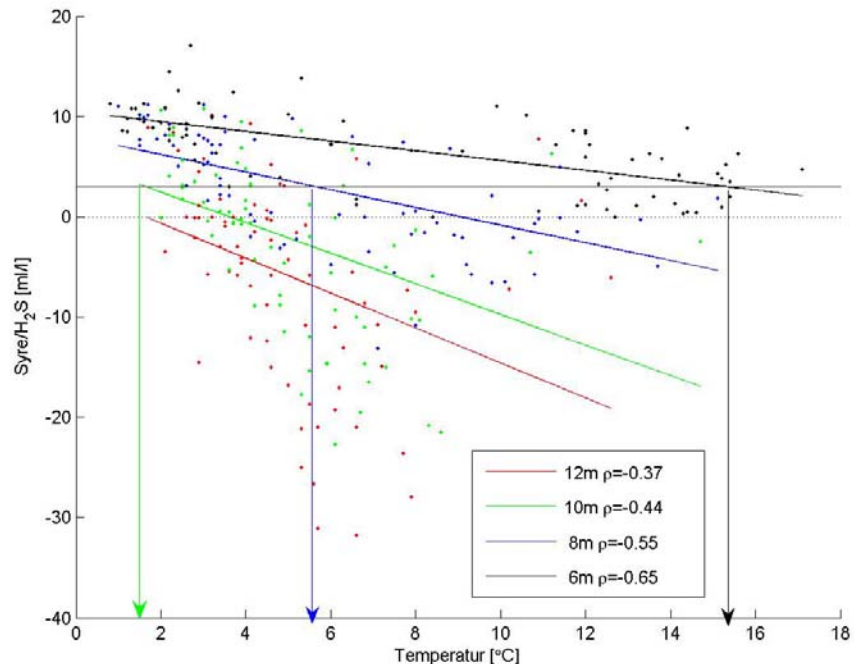


Fig. 36 Korrelationsdiagram mellan uppmätta temperatur- och syre/svavelväte-data vid Tivoli-stationen mellan 2000-02-01 och 2007-01-31. Korrelationskoefficienterna är angivna i diagrammet och sambanden blir starkare (genomgående mindre än $-0,5$) för de nedre lagren om undantagsåret 2001 utesluts. Detta kan läggas till grund för en ny proxy utöver AvA för att detektera begynnande syrebrist när redoxklinen når den indikerade 3[ml/l]-nivån (heldragen svart linje). När temperaturen t.ex. på 8m-nivån överstiger 5.5 °C (blå pil) behövs enligt Tabell 5 pumpning under 20,8 dygn för att säkerställa att allt anoxiskt bottenvatten i Bassäng 2 pumpats ut, förutsatt att inget nytt bottenvatten hinner tillströmma och lagras in under oxyklinen under denna nästan tre veckor långa period.