

# Brunnsviken

Utvärdering av åtgärder för förbättrad  
vattenkvalitet

---

Hanna Portin

## **REFERAT**

### **Brunnsviken - Utvärdering av åtgärder för förbättrad vattenkvalitet**

*Hanna Portin*

Perioder av syrebrist är ett återkommande problem i Brunnsviken. De faktorer som i huvudsak ger upphov till utbredningen av syrefria områden i viken är övergödning orsakad av antropogena utsläpp av näringsämnen, en tröskel vid inloppet som hindrar vattenutbyte samt skiktning i vattenskolumnen till följd av salinitets- och temperaturskillnader som hämmar vertikal omblandning. I ett försök att förbättra syrgasförhållandena pumpas bottenvatten ut ur viken i syfte att syrerikare vatten ska strömma in.

I detta examensarbete undersöktes pumpningens effekt på syrgashalten. Då detta är en komplex fråga lades fokus på att utreda syrets variabilitet samt vilken effekt vattenutbytet har på syrgashalten.

I Brunnsviken pågår sedan omkring ett år tillbaka konduktivitet-, temperatur-, djup- och syremätningar med hög tidsupplösning. Dataserien är en av mycket få serier i sitt slag och någon grundlig utvärdering av dessa mätningar har inte gjorts tidigare. Resultatet av utvärderingen visade att syremätningar måste göras mycket ofta för att beskriva syredynamiken i Brunnsviken och andra akvatiska system på ett korrekt sätt, eftersom syrgashalten varierar mycket på kort tidsskala. Det är därför inte möjligt att använda månadsmätningar för att utvärdera vilken effekt pumpningen har haft på syrgashalten i Brunnsviken. Högupplösta data visade att syrebrist inte varit möjligt att undvika i Brunnsviken. Detta var heller inte att vänta då målet med pumpningen främst varit att hålla ner oxyklinen.

Vattenutbytet beräknades utifrån Brunnsvikens vattenbalans och jämfördes med syredata. Någon effekt på syrgashalten orsakad av vattenutbytet har inte gått att påvisa. Det beror troligen på att densiteten på det inströmmande vattnet varit lägre än densiteten på bottenvattnet i Brunnsviken under nästan hela den studerade perioden. Detta i kombination med att pumpflödet är mycket litet i förhållande till det naturliga vattenutbytet gör att det viktigaste med pumpningen är att syrefattigt vatten förs bort från viken.

**Nyckelord:** Brunnsviken, tröskelvik, syre, syrebrist, vattenutbyte

## **ABSTRACT**

### **Brunnsviken – Evaluation of Measures for Improved Water Quality**

*Hanna Portin*

Periods of hypoxia are a recurring issue in Brunnsviken. Main factors that trigger hypoxia in Brunnsviken are eutrophication due to anthropogenic emission of nutrients, stratification in the water column due to salinity and temperature differences that prevents mixing and a sill inlet that prevents water exchange. As an attempt to improve the oxygen levels, bottom water is pumped from Brunnsviken causing aerated surface water to flow back into the basin.

The objective of this Master's thesis was to study the change in dissolved oxygen levels due to pumping. Since the question is complex, two areas were chosen to focus on; oxygen variability and the impact of water exchange on dissolved oxygen.

Conductivity, temperature, depth and oxygen measurements, which were performed by Stockholm Vatten, were studied. This type of data set, with high resolution, is very rare and the data set from Brunnsviken has not been evaluated thoroughly before. The result of the evaluation was that high resolution data of oxygen are required in order to describe the dynamics of oxygen in Brunnsviken and other aquatic systems properly. Measurements of oxygen once a month is not sufficient. For that reason, it is not possible to use monthly measurements to evaluate the effect of the pumping. However, high resolution data for approximately one year were available. Episodes of hypoxia occurred during that period. This was not surprising, as the main purpose of the pumping was to keep the oxycline as deep as possible.

The water exchange was determined from a water balance of Brunnsviken and compared with oxygen data. The water exchange did not seem to influence the oxygen level in Brunnsviken. The reason for this is most likely that the density of inflowing water was less than the density of the bottom water in Brunnsviken during most of the period studied. This result in combination with the fact that the pump flow is small compared to the water exchange suggests that the most important result of the pumping is that water with a low oxygen level is removed.

**Key words:** Brunnsviken, sill basin, oxygen, hypoxia, water exchange

## **FÖRORD**

Detta examensarbete har utförts på WSP Vattenbyggnad i Stockholm och är den avslutande delen på civilingenjörsprogrammet Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetets omfattning är 30 högskolepoäng, vilket motsvarar 20 veckors heltidsstudier. Examensarbetet är tänkt som en uppföljning på det förbättringsarbete som pågår i Brunnsviken i Stockholm Vattens regi.

Jag vill framförallt rikta ett stort tack till min handledare Petter Stenström, WSP, som med ett stort personligt engagemang har hjälpt mig under arbetets gång, min ämnesgranskare Andreas Bryhn, Institutionen för geovetenskaper, som ständigt funnits tillgänglig för att besvara frågor och Anders Tengberg, Göteborgs universitet och Aanderaa Data Instruments, som har varit till mycket stor hjälp bland annat vid utvärderingen av mätdata.

Tack även till Bo Värnhed och Christer Lännergren på Stockholm Vatten som bidragit genom att svara på frågor och förse mig med data samt Anders Engqvist, A & I Engqvist konsult, som tillhandahållit litteratur om Brunnsviken.

Uppsala, 2011

Hanna Portin

Copyright © Hanna Portin och Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W11 001 ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2011.

# POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

## Brunnsviken - Utvärdering av åtgärder för förbättrad vattenkvalitet

*Hanna Portin*

I Brunnsviken, som ligger på kommungränsen mellan Solna och Stockholm, är bottenvattnet syrefattigt stora delar av året. Särskilt under sommarhalvåret är syrgasnivåerna väldigt låga. Syrefria bottenar förekommer över hela världen och kan leda till att bottenlevande organismer dör. Hur stor påverkan syrebristen ger beror på vilken art det handlar om och hur länge syrebristen varar. I marina miljöer, d.v.s. i vatten med lite högre salthalt klarar de flesta bottenlevande djuren inte mer än en vecka av syrebrist. I Östersjön, där salthalten är lägre, är de bottenlevande organismerna lite tåligare men efter två veckor av syrebrist finns endast ett fåtal bottenlevande organismer kvar.

Syrebrist kan förutom att orsaka skada på organismer även leda till en ökad utlösning av fosfor från sedimenten och därmed till ökade problem med övergödning och även syrebrist. I denna fråga är dock forskarna oense. Några menar att minskande syrgashalter leder till att fosforutlösningen ökar medan andra ifrågasätter detta resonemang bland annat genom att hävda att det inte går att avgöra om en minskande syrgashalt är resultatet eller orsaken till fosforutlösning från sedimenten eftersom det finns mikroorganismer som förbrukar syrgas samtidigt som fosfor frigörs. Oavsett om en ökad syrgashalt vid sedimentytan hindrar fosforutlösning från sedimenten eller inte så är pilotprojekten av intresse då de kan komma att förbättra syrgasförhållandena för bottenlevande organismer.

Brunnsviken har under årens lopp varit utsatt för stora utsläpp från mänsklig aktivitet och det är en av anledningarna till att viken lider av syrebrist idag. En annan bidragande orsak är att vattenutbytet i viken är begränsat av vikens grunda och smala inlopp, Ålkistan. Vattnet i Brunnsviken är dessutom skiktat till följd av skillnader i salthalt och temperatur under delar av året. Det gör att vattnet inte omblandas så lätt.

Omsättningen av syrgas i vattenmiljöer beror på olika fysikaliska processer som gör att syrgasen transporteras runt med vattnet och att nytt syre blandas ner med hjälp av vinden. Utöver de fysikaliska processerna pågår biologiska processer som gör att syre tillförs och förbrukas i vattnet. Vid fotosyntesen tillförs syre samtidigt som organismernas cellandning gör så att syre förbrukas. Då organismerna dör bryts de ned av mikroorganismer och det gör att syre förbrukas.

För att förbättra miljösituationen i Brunnsviken har utsläpp direkt till viken minskats bland annat genom att avloppsvattnet från omkringliggande fastigheter anslöts till Käppalaverket 1969 samt att åtgärder för att minska föroreningsinnehållet i dagvatten vidtogs under 1990-talet. I ett försök att förbättra syrgassituationen i viken pumpas bottenvattnet ut ur viken. Syftet med att pumpa ut vattnet är att nytt syrerikare vatten ska ersätta det utpumpade vattnet. Pumpningen har pågått i perioder sedan 1982. Vanligtvis startas pumpen i början av våren och får sedan gå till början av hösten då temperaturskillnaderna mellan ytvatten och bottenvattnet minskar och vattnet blandas om naturligt av vinden. Miljösituationen i Brunnsviken övervakas genom att mätningar av olika parametrar görs varje månad. Då pumpen byttes ut

2009 placerades ett system ut i viken som på plats mäter salthalt, syrgashalt, vattentemperatur och tryck. Tiden mellan mätningarna har växelvis varit tio minuter och en timme. Detta system är ett av mycket få i sitt slag och någon grundlig utvärdering av mätningarna från detta system har inte gjorts förut.

I detta examensarbete studeras vilken effekt pumpningen har på syrgashalten i Brunnsviken. Eftersom frågan är komplex har arbetet koncentrerats till att undersöka hur mycket syrgashalten varierar i viken samt vilken effekt vattenutbytet har på syrgashalten. De mätningar som gjorts i Brunnsviken studerades och flödet genom Ålkistan beräknades genom att använda Brunnsvikens vattenbalans, som innebär att alla inflöden och utflöden till viken summeras.

Resultatet av utvärderingen var att syrgashalten i vattnet förändras mycket snabbt. Variationerna i syrgashalt är så hastiga att mätningar gjorda en gång i månaden inte ger en rättvisande bild av syrgasförhållandena i viken. Det gör att månadsmätningar av syrgas inte bör användas för till exempel miljöövervakning. Månadsmätningar av syrgas kan inte heller användas för att utvärdera pumpningens effekt på syrgashalten i Brunnsviken.

Syremätningarna visar också att perioder av syrebrist inte har kunna undvikas i Brunnsviken under perioden augusti 2009–juli 2010. Det var heller inte väntat då målet med pumpningen i första hand har varit att vattnet ska vara syresatt så långt ner som möjligt och inte att syrefria perioder ska undvikas helt. Möjligtvis är syrgassituationen bättre än vad den hade varit om ingen pumpning hade utförts men detta går inte att avgöra utifrån tillgängliga mätdata eftersom det är svårt att separera naturliga variationer i syrgashalt från variationer i syrgashalt orsakat av pumpningen.

Resultatet av flödesberäkningarna var att flödet genom Ålkistan är mycket större än övriga in- och utflöden. Jämfört med pumpflödet är flödet genom Ålkistan upp till 30 gånger större. Vattnet flödar omväxlande ut och in i Brunnsviken och flödet genom Ålkistan byter riktning ungefär var sjätte timme. Ingen effekt på syrgashalten som beror på detta flöde kunde påvisas. Det beror troligen på att det vatten som strömmar in genom Ålkistan har lägre densitet än bottenvattnet i Brunnsviken. Det gör att det inströmmande vattnet inte kan ta sig ner och syresätta bottenvattnet. Den viktigaste effekten av pumpningen är att syrefattigt vatten förs bort från viken och måste ersättas med syrerikare vatten.

# INNEHÅLL

<b>REFERAT</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>FÖRORD</b> .....	<b>III</b>
<b>POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 SYFTE .....	2
1.1.1 Delmål .....	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR .....	3
<b>2 BAKGRUND</b> .....	<b>4</b>
2.1 BRUNNSVIKEN.....	4
2.1.1 Miljöstatus .....	4
2.1.2 Åtgärder.....	6
2.1.3 Tidigare studier .....	6
2.2 SYREDYNAMIK I AKVATISKA MILJÖER .....	8
2.3 SYREBRIST I AKVATISKA MILJÖER .....	9
<b>3 METOD</b> .....	<b>10</b>
3.1 MÄTPROGRAM.....	10
3.1.1 CTD - och syremätningar .....	10
3.1.2 Månadsmätningar .....	11
3.1.3 Kompletterande vattenståndsmätningar .....	13
3.2 DATABEARBETNING .....	13
3.2.1 Tryckdata.....	13
3.2.2 CT-data.....	13
3.2.3 Syredata.....	14
3.2.4 Kompletterande vattenståndsmätningar .....	14
3.2.5 Skiktning .....	14
3.3 SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN.....	15
3.4 VATTENUTBYTE .....	15
3.4.1 Indata.....	16
3.4.2 Felsökning .....	17
3.4.3 Rimlighetsbedömning av flödesberäkningar.....	18
3.5 FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN .....	19
<b>4 RESULTAT</b> .....	<b>20</b>

4.1	ANALYS AV MÄTDATA .....	20
4.2	SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN.....	21
4.3	VATTENUTBYTE .....	24
4.4	FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN.....	27
<b>5</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>28</b>
5.1	ANALYS AV MÄTDATA .....	28
5.2	SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN.....	28
5.3	VATTENUTBYTE .....	30
5.3.1	Antaganden och modifikationer .....	30
5.3.2	Storlek och periodicitet .....	31
5.4	FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN.....	31
5.5	PUMPNINGENS EFFEKT PÅ SYREDYNAMIKEN .....	32
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER .....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>ORDLISTA .....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>36</b>
	<b>BILAGOR.....</b>	<b>39</b>

# 1 INLEDNING

Syrefria bottenar förekommer över hela världen och kan leda till att samhällen av bentisk fauna och fisk störs och i värsta fall kollapsar. I Östersjön har perioder av syrebrist förekommit sedan omkring 10000 år tillbaka (Zillén m.fl., 2008). Andelen syrefria bottenar har, i Östersjön liksom i andra kustnära hav världen över, ökat dramatiskt sedan 1960. Fördelningen av zoner med syrefria bottenar stämmer väl överens med var det ekologiska fotavtrycket är som störst (Diaz och Rosenberg, 2008).

Länderna kring Östersjön har under 30 års tid samarbetat för en bättre miljöstatus genom HELCOM, det verkställande organet i Helsingforskommissionen. År 2007 upprättades Baltic Sea Action Plan (BSAP) som en del i arbetet. En av nyckelfrågorna som identifieras i BSAP är övergödning, där ett av delmålen är att Östersjön ska återfå naturliga syrgasnivåer. För att nå målen är medlemsländerna överens om att tillförseln av näringsämnen måste reduceras (HELCOM, 2007). En stor mängd näringsämnen har tillförts Östersjön, vilket gör att den interna fosforbelastningen kommer att förbli stor även om tillförseln reduceras kraftigt.

I ett försök att minska utbredningen av syrefria bottenar pågår ett antal pilotprojekt i och omkring Östersjön för att syresätta syrefattiga bottenvattnen artificiellt. Förhoppningen är att förhållandena för bottenlevande organismer ska förbättras samt att problemen med den interna fosforbelastningen ska minskas eftersom fosfor frigörs då syrgashalterna är låga.

Teorin att syrgashalten kontrollerar fosforutlösning från sedimenten presenterades i mitten av 30-talet och har sedan dess utvecklats av flera forskare. I korthet går teorin ut på att tvåvärda järnjoner oxideras av syrgas för att sedan bilda ett komplex tillsammans med fosfor. Komplexet sedimenterar och blir därmed otillgängligt. Under anaeroba förhållanden frigörs istället fosfor från sedimenten. Under årens lopp har åtskilliga empiriska studier gjorts som stödjer denna teori genom starka korrelationer mellan en minskande syrgashalt och fosforutlösning (se t.ex. Mortimer, 1942; Holm, 1978; Gunnars & Blomqvist, 1997). Samtidigt finns det flera studier som kritiserar teorin bland annat genom att ifrågasätta korrelationernas kausalitet. Om en minskande syrgashalt är resultatet av eller orsaken till fosforutlösning från sedimenten är svårt att avgöra då mikrobiella processer både förbrukar syre och frigör fosfor (Hupfer & Lewandowski, 2008). Oavsett om aerobiska förhållanden vid sedimentytan hindrar fosforutlösning från sedimenten eller inte så är pilotprojekten av intresse då de kan komma att förbättra syrgasförhållandena för bottenlevande organismer.

En grupp forskare vid Göteborgs universitet arbetar genom projektet *Baltic Deepwater Oxygenation (BOX)* med att mekaniskt föra ner syrerikt vatten till bottenvattnet med hjälp av vinddrivna pumpar (Marine System Analysis Group, 2010). *PROPPEN* är ett samarbete mellan svenska och finska forskare som går ut på att i kustnära områden pumpa ner syrerikt vatten till bottenvattnet i delvis stängda bassänger. Försöken sker både med och utan tillsats av järn (Finlands miljöcentral, 2010). I projektet *Wave Energized Baltic Aeration Pump (WEBAP)* utreds om en vågdriven pump kan användas för att syresätta bottenvattnet (WEBAP, 2010). Samtliga projekt syftar i första hand till att undersöka om syresättning kan användas för att snabbt minska den interna fosforbelastningen i Östersjön.

I Brunnsviken, som ligger i Stockholms innerskärgård, pågår ett projekt som går ut på att bottenvatten pumpas ut ur viken i syfte att vatten med högre syrgashalt ska strömma in genom Ålkistan, som är vikens enda förbindelse med utanför liggande fjärd. I samband med byte av pump placerades år 2009 ett strängsystem för *in situ*-mätningar av syrgashalt, konduktivitet, temperatur och tryck ut i en djuphåla i Brunnsviken. Som komplement till dessa mätningar har de månadsmätningar av olika parametrar, som gjordes även innan utplaceringen av strängsystemet, fått fortgå. Att pumpa vatten är en kostsam åtgärd. Det gör att kännedom om under vilka förhållanden pumpningen är effektiv för syresättning av bottenvattnet i Brunnsviken är önskvärd. Många studier har gjorts i Brunnsviken, men ännu har ingen utvärdering av pumpningens betydelse för vikens syredynamik baserad på de högupplösta mätningarna från strängsystemet gjorts. Den högupplösta dataserien är av extra stort intresse eftersom det finns mycket få mätserier med så hög tidsupplösning.

## **1.1 SYFTE**

Detta examensarbete syftar till att utvärdera vilken effekt utpumpningen av bottenvattnet har haft på syrgasförhållandena i Brunnsviken. Då frågeställningen är komplex kommer arbetet i första hand att koncentreras till att besvara de nedan uppställda delmålen. I förlängningen är förhoppningen att detta arbete ska leda fram till vilka ytterligare åtgärder eller undersökningar som krävs för att styra pumpningen så att effekten på syrgashalten blir så stor som möjligt samt att pumpens energiförbrukning minskas genom att pumpa endast då det ger effekt på syrgashalten.

### **1.1.1 Delmål**

- Tidigare sammanställningar av syrgassituationen i Brunnsviken har gjorts utifrån månadsmätningar av syrgas. Hur tillförlitligt är resultatet av dessa mätningar? Hur ofta måste syrgashalten mätas för att beskriva syredynamiken i Brunnsviken och andra akvatiska system på ett korrekt vis?
- Flödet genom Ålkistan ska bestämmas och de olika flödens storlek kvantifieras. Pumpningen ger ett ökat inflöde på 600 l/s. Hur stort är det i jämförelse med naturligt inflöde till Brunnsviken?
- Utifrån beräknade flöden ska perioder med stort inflöde och perioder med inflöde under en lång tid identifieras för att undersöka vad inflödet har för effekt på syrgashalten i Brunnsviken. När ger flödet effekt på syrgashalten i Brunnsviken? Hur påverkas syrgashalten av snabba fluktuationer?
- För att uppnå en effektiv syresättning av bottenvattnet i Brunnsviken är det även viktigt att förstå hur det inströmmande vattnet rör sig. Hur ofta kommer tyngre vatten in? Har pumpningen effekt när inflödande vatten har lägre densitet än Brunnsvikens bottenvatten?

## **1.2 AVGRÄNSNINGAR**

Inom ramen för detta examensarbete kommer inte frågan om hur fosforbindning till sedimenten påverkas av syresättningen i Brunnsviken att behandlas. Om förhållandena för bottenlevande fauna har förbättrats i Brunnsviken kommer inte heller att beröras. Pumpningens effektivitet studeras i denna rapport endast utifrån respons i syrgashalt.

## **2 BAKGRUND**

### **2.1 BRUNNSVIKEN**

Brunnsviken ligger på kommungränsen mellan Solna och Stockholm (figur1). Från början var Brunnsviken en havsvik men omvandlades under 1600-talet genom landhöjningen till en sjö. Den enda förbindelse som idag finns med den utanförliggande fjärden, Lilla Värtan, kallas Ålkistan och anlades 1863 för att återskapa Brunnsviken som en havsvik, öppna för sjöfart samt för att torrlägga mark för bebyggelse.

Intill viken ligger populära rekreationsområden som Hagaparken. I övrigt omges Brunnsviken till största delen av bebyggelse. Brunnsvikens tillrinningsområde är ungefär 17 km<sup>2</sup>. Vatten tillförs Brunnsviken bland annat genom Råstaån, som är det enda vattendraget som mynnar i Brunnsviken. Utöver Råstaån finns ett antal dagvattenutlopp i Brunnsviken (Stockholm Vatten, 2000). Stockholmsåsen sträcker sig längs delar av Brunnsvikens västra strand och grundvattenavrinningen från åsen sker delvis till Brunnsviken men även till Edsviken strax norr om Brunnsviken (Eriksson, 2009).

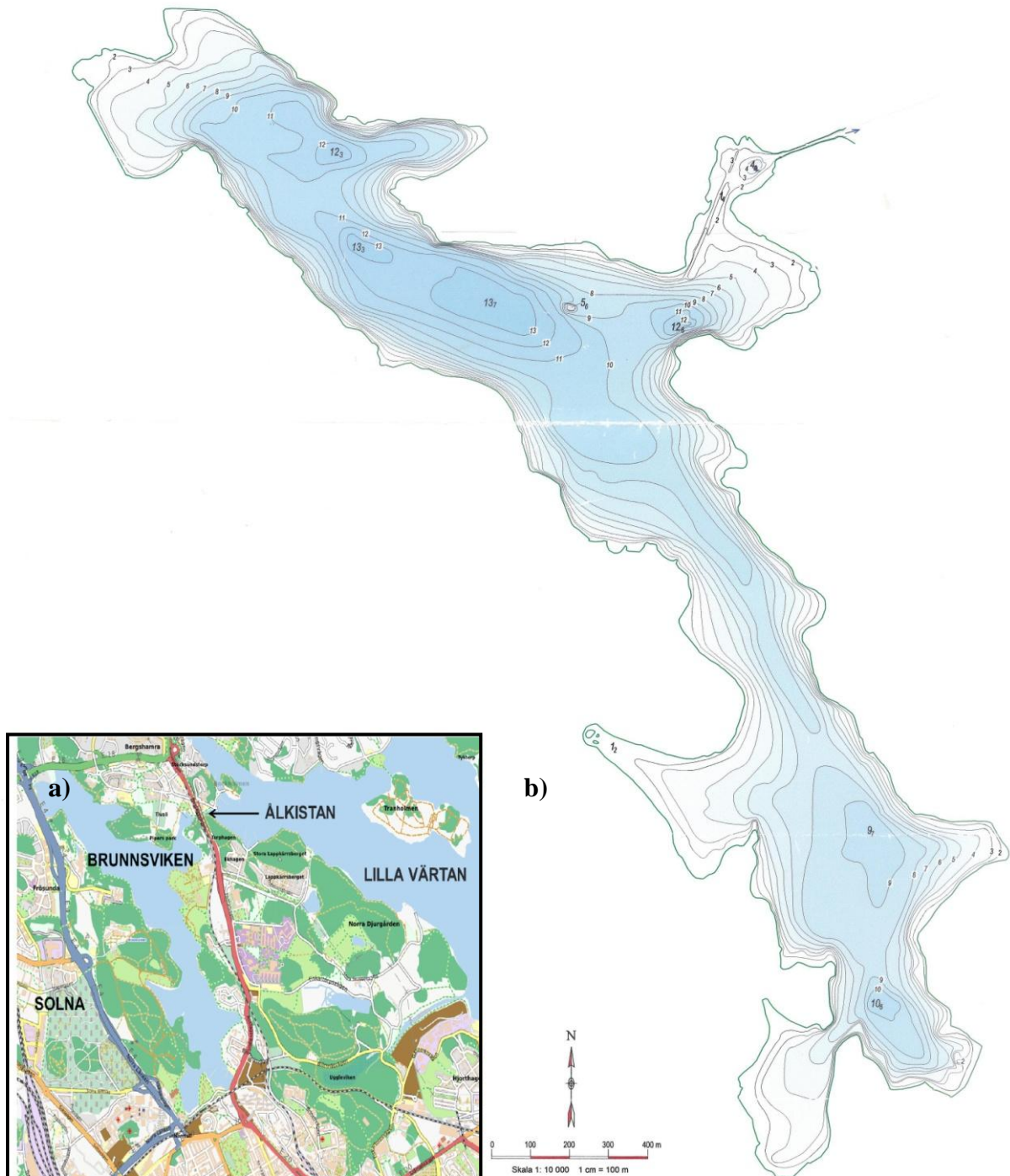
Brunnsviken är en så kallad tröskelvik, vilket innebär att inloppet till viken är betydligt grundare än både innan- och utanförliggande delar. Detta begränsar möjligheten till utbyte av bottenvatten med hög densitet som bara sker då ytvattnet i Lilla Värtan har högre densitet än bottenvattnet inne i Brunnsviken.

#### **2.1.1 Miljöstatus**

Brunnsviken lider idag från sviterna av den hårda antropogena belastning som viken utsatts för under årens lopp. I en tillståndsbedömning, som gjorts enligt Naturvårdsverkets klassning, beskrivs halten totalfosfor som hög och halten totalkväve som måttligt hög. Sedimenten har mycket höga halter av tungmetaller som bland annat kvicksilver och kadmium. Dessutom förekommer andra miljöfarliga ämnen som till exempel PCB (polyklorerade bifenyler) och PAH (polyaromatiska kolväten) i stora mängder i sedimenten. Utöver detta är syrgassituationen i Brunnsviken med perioder av mycket låga halter av syrgas och förekomst av svavelväte ett stort miljöproblem. Undersökningar av bottenfaunan gjorda under 1995 visade att sedimenten under fyra meters djup då var syrefria och att det inte fanns någon förekomst av djur (Stockholm Vatten, 2000).

Sedimentkemiska studier gjorda under 2000/2001 vittnar om hur tillförseln av organiskt kol har varierat sedan början av 1900-talet. Under perioden 1942–1962 ökade tillförseln av organiskt kol dramatiskt som en direkt följd av att avloppsvatten från hushåll och industrier började släppas rakt ut i Brunnsviken omkring 1940. En bidragande orsak är att urbaniseringen ökade i området under samma tidsperiod (Routh m.fl., 2004). Utsläppen av ofullständigt renat avloppsvatten medförde även att stora mängder näringsämnen tillfördes viken.

En viktig orsak till att syrebrist i bottenvattnet är ett återkommande inslag i Brunnsviken är att vattenutbytet begränsas av att viken är en tröskelvik. En annan bidragande orsak är de höga halterna av näringsämnen som kan leda till att primärproduktionen ökar, vilket i sin tur leder till ökad syrgaskonsumtion i samband med nedbrytning samt att skiktningen till följd av salinitet- och temperaturskillnader hindrar effektiv omblandning i vertikalled.



**Figur 1 a)** Översiktskarta över Brunnsviken (Kartdata OpenStreetMap contributors, CC-BY-SA; Creative Commons-licens) **b)** Djupkarta över Brunnsviken (Stockholm Vatten och Myrica AB, medgivande 2011-01-18)

### 2.1.2 Åtgärder

Olika åtgärder har vidtagits i syfte att förbättra vattenkvaliteten i Brunnsviken. En stor del av arbetet har varit att minska tillförseln av närsalter och miljöskadliga ämnen. Som ett första steg i arbetet anslöts avloppsnätet till Käppalaverket 1969. Under 90-talet genomfördes sedan åtgärder för att reducera föroreningsinnehållet i dagvattnet. Trots detta tillförs närsalter idag till största delen via dagvattnet (Stockholm Vatten, 2000).

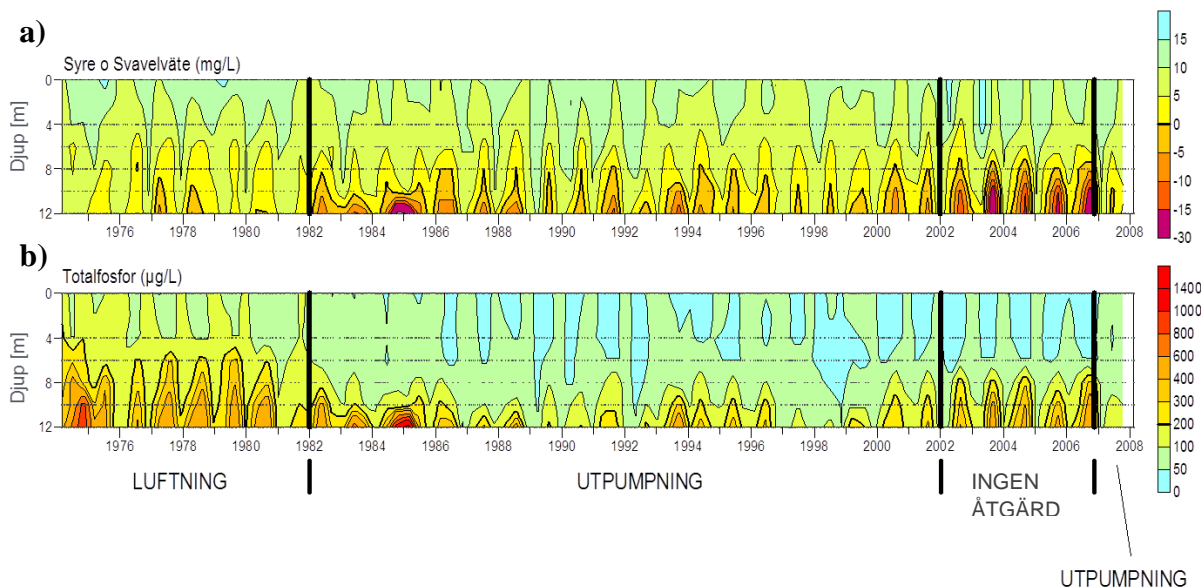
För att förbättra syrgasförhållandena i Brunnsviken genom artificiell syresättning har olika metoder provats. Mellan 1973 och 1981 luftades bottenvattnet genom att tryckluft pumpades ner till hypolimnion. 1982 byttes luftningsanordningen ut mot pumpar som periodvis pumpade ut bottenvatten ur Brunnsviken i syfte att syrerikare vatten skulle strömma in från Lilla Värtan genom Ålkistan. Pumpningen pågick fram till 2001 (Värnhed, pers. k.).

Mellan mars 2001 och september 2007 var det uppehåll i pumpningen. Därefter pågick pumpningen till juli 2008. Pumpningen påbörjades igen i mars 2010 efter att en ny pump installerats för att minska energiåtgången i slutet av 2009. Den nya pumpen pumpar precis som de gamla ut syrefattigt bottenvatten från djuphålan vid *Tivoli* (figur 5) till Lilla Värtan, i syfte att syrerikare vatten ska strömma in genom Ålkistan. Pumpens hastighet är konstant 600 l/s. Pumpen är i regel igång från våren fram till hösten (Värnhed, pers. k.).

### 2.1.3 Tidigare studier

I samband med förbättringsåtgärderna har olika studier genomförts i Brunnsviken. Ett examensarbete som behandlar Brunnsviken har tidigare utförts av Norberg (1997). Syftet med arbetet var att undersöka om vidtagna åtgärder haft avsedd effekt på syrgassituationen i Brunnsviken. Undersökning baserade sig på de månadsmätningar som utförs av Stockholm Vatten (se avsnitt 3.1.2.) och behandlade perioden 1987 – 1996. Resultatet av studien var att utpumpning av bottenvatten inte förhindrade bildning av svavelväte under den studerade perioden samt att perioder av syrefria bottnar ej har kunnat undvikas helt.

Ett antal olika parametrar har på månadsbasis uppmätts i Brunnsviken sedan förbättringsarbetet startade 1974 (se avsnitt 3.1.2.). En sammanställning av månadsmätningarna av syrgashalten indikerar att syrgasförhållandena vid botten var bättre under de år då åtgärder har utförts. Mellan 2002 och 2007 då ingen pumpning eller luftning har utförts, försämrades enligt dessa mätningar syrgasförhållandena vid botten och mängden svavelväte ökade (figur 2a). Enligt denna sammanställning minskade även mängden totalfosfor i vattenmassan då pumpning utförs jämfört med då luftning används eller ingen åtgärd vidtas (figur 2b).



**Figur 2 a)** Sammanställning av månadsmätningar av syrgashalt och svavelväte vid provpunkten Tivoli, Brunnsviken för perioden 1974 – 2008. Positiva värden representerar syrgashalten och negativa värden halten svavelväte. (Tidigare opublicerad, återgiven med tillstånd från C. Lännergren) **b)** Sammanställning av månadsmätningar av totalfosfor vid provpunkten Tivoli, Brunnsviken för perioden 1974 – 2008. (Tidigare opublicerad, återgiven med tillstånd från C. Lännergren)

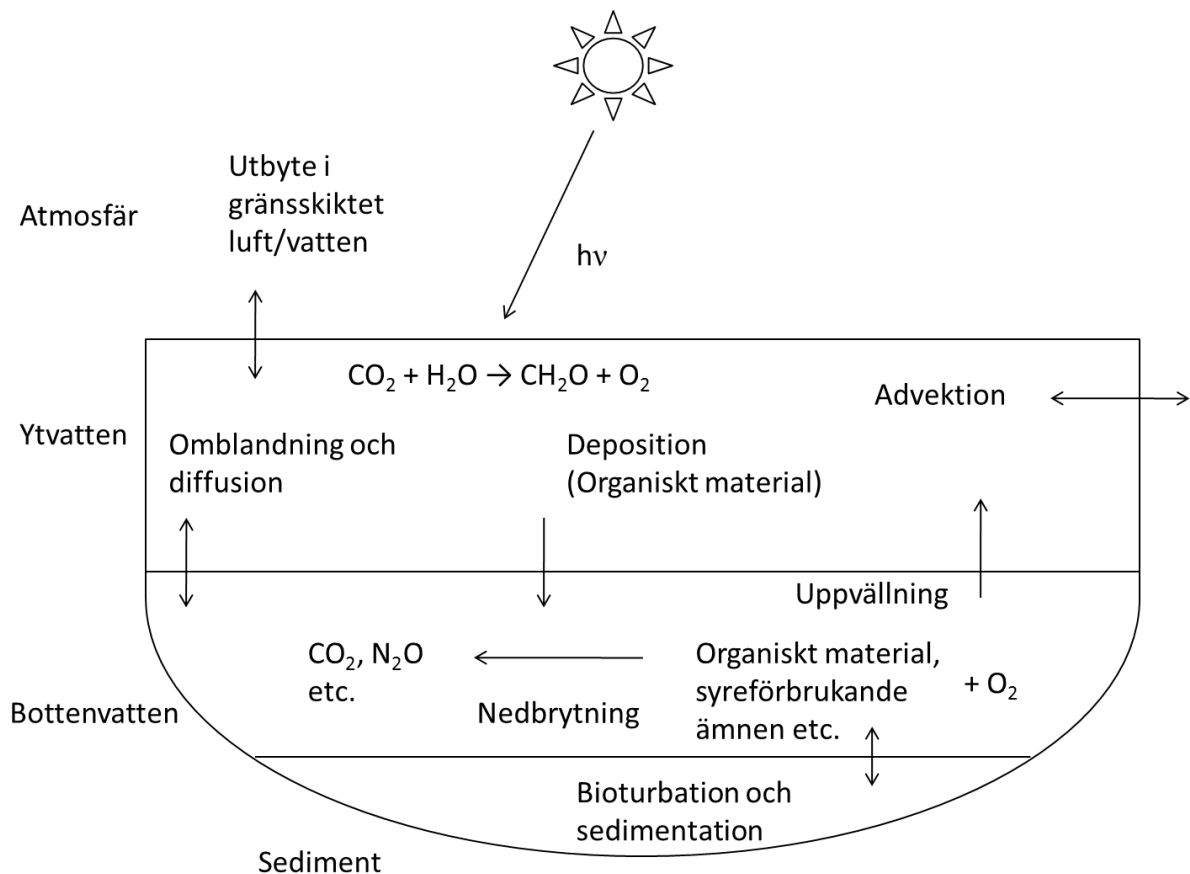
Inför pumpbytet utfördes strömmätningar med en akustisk dopplermätare (ADCP) och CTD-mätningar vid Ålkistan i syfte att optimera åtgärderna för förbättrad vattenkvalitet i Brunnsviken. Strömmätaren mätte hastigheten i 0,1 meter tjocka lager med tio minuters mellanrum. Flödet genom Ålkistan bestämdes sedan för tre lager genom att hastighetskomponenterna projicerades i kanalriktningen och integrerades över tvärsnittsytan. De två översta lagren hade en konstant tjocklek av en meter och bottenlagret fick varierande tjocklek beroende på vattenståndsförändringar under mätperioden (Stenström, 2007).

Utgående från flödesdata beredda av Stenström (2007) samt temperatur, salinitet och vinddata utfördes en analys av olika pumpschemans förutsättning att effektivisera vattenutbytet av Engqvist (2007). Olika möjligheter, som exempelvis en flytt av pumpintaget, utreddes. Analysen gjordes genom att modellera vattenpakets rörelse mellan fyra delbassänger i Brunnsviken och den genomsnittliga åldern för det utpumpande vattnet användes för att utvärdera de olika pumpstrategierna. Tiden räknades utifrån när vattenpaketet strömmade in genom Ålkistan. Slutsatser som kunde dras utifrån modelleringen var att en flytt av pumpintaget inte leder till någon effektivitetsvinst. Det mest effektiva av de pumpscheman som studerats var att vänta med att pumpa tills att bottenvattnet är åldrat och därefter pumpa tills ett nytt inbrott av vatten med hög densitet sker.

## 2.2 SYREDYNAMIK I AKVATISKA MILJÖER

Syre deltar i ett stort antal kemiska reaktioner och är ett essentiellt ämne för vattenlevande organismer. I akvatiska system förekommer syre i såväl organiska som oorganiska föreningar, men även som syrgas ( $O_2$ ) löst direkt i vattenmassan. Lösligheten för syrgas i vatten är direkt proportionell mot partialtrycket. Halten löst syre ökar med ökat partialtryck. Även temperatur och salthalt påverkar lösligheten, som är störst vid låga temperaturer och låga salthalter (Garcia & Gordon, 1992; Zumdahl, 2005).

Både fysikaliska och biologiska processer är av stor vikt för omsättningen av löst syre i akvatiska system. Syrgas tillförs systemet främst genom advektion, fotosyntes och vågomblandning. Advektion sker genom att löst syre transporteras med vattnets rörelser och syrgas kan därför transporteras långa sträckor och tillföras systemet från andra system. Primärproducenter omvandlar genom fotosyntesen koldioxid och vatten till biomassa och syrgas. Syrgasen förbrukas framförallt genom nedbrytning av organiskt material, respiration (cellandning) och syreförbrukande ämnen. Inom vattenmassan omfördelas det lösta syret främst genom omblandning och advektion men även genom diffusion (figur 3) (se t.ex. Zhang m.fl., 2010; Hull m.fl., 2008; Peña m.fl., 2010)



**Figur 3** Principiell skiss över syrgasflöden i akvatiska miljöer. Skissen är gjord efter Zhang m.fl. (2010).

### 2.3 SYREBRIST I AKVATISKA MILJÖER

Syrebrist uppstår då halten löst syre i vatten underskrider 2 mg/l. Detta värde kan även betraktas som ett tröskelvärde för hur låga syrgashalter bottenlevande fauna klarar av. Det finns många olika orsaker till att syrebrist uppkommer i akvatiska miljöer och effekterna av syrebristen varierar från plats till plats.

En betydande orsak till att syrebrist uppkommer, är att skiktningar i vattenmassan ofta uppstår. Skiktningar uppstår som en effekt av temperatur- och salinitetsskillnader och är ett naturligt förekommande fenomen. Då skiktningar uppstått krävs mer energi för att vattnet ska omblandas i vertikalled vilket medför att bottenvattnet inte syresätts lika lätt (Diaz & Rosenberg, 2008; Zillén m.fl., 2008). En av orsakerna till att syrefria bottnar förekommit i perioder i Östersjön genom historien tros vara att Östersjön genomgått stora förändringar under årens lopp som gjort att skiktningar till följd av salinitetsskillnader har förstärkts och försvagats. (Zillén m.fl., 2008).

Antropogent orsakad övergödning är ytterligare en process som ökar bildningen av syrefria områden. Den ökade närsaltstillgången leder till en större primärproduktion som i sin tur kräver syrgas vid nedbrytning. Syrebrist orsakad av övergödning uppstår i våra vatten oftast under sensommar då vattnet värmts upp och nedbrytning efter vårens primärproduktion pågår vid botten. Syrebristen kan sedan pågå ända fram till hösten då skiktningen blir svagare och vattnet omblandas lättare (Diaz & Rosenberg, 2008; Zillén m.fl., 2008). I grunda sjöar, ofta bildade genom sjösänkningar i syfte att frigöra odlingsmark under 1800-talet, uppstår syrebrist ofta under vintern då isen lagt sig och vattnet inte kan syresättas genom vindomblandning. Klimatet är ytterligare en av de faktorer som påverkar utbredningen av syrefria bottnar världen över och är även en av orsakerna till att förekomsten av syrefria bottnar har varierat i Östersjön under historien. På kort tidsskala påverkar klimatet Östersjön genom variationer i hur mycket nytt bottenvatten som flödar in från år till år. På lite längre tidsskala kan klimatet påverka sötvattentillflödena så att saltbalansen i Östersjön förändras (Zillén m.fl., 2008; Conley m.fl., 2009).

Kustområdets känslighet mot syrebrist varierar mycket beroende på skillnader i fysikaliska och geografiska förhållanden. Batymetrin är en faktor som kan vara avgörande i frågan om en botten blir syrefri eller inte. Vikar som på grund av den omkringliggande landmassan har smala inlopp kännetecknas ofta av syrebrist i bottenvattnet på grund av att det smala inloppet hindrar vattenutbytet. Ett smalt inlopp i kombination med grund tröskel och salinitet- och temperaturskiktningar gör att systemet blir särskilt mottagligt för syrebrist. Trösklade vikar med smala inlopp återfinns i såväl tropiska och tempererade zoner som längs nordligare breddgrader. Trösklade vikar karakteriseras av en upphöjd havsbotten i inloppet till viken. Upphöjningen gör att vatten med hög densitet har svårt att passera in eller ut i viken, vilket medför att bottenvattnet inte förnyas så lätt och därmed kan problem med syrebrist uppstå. I dessa vikar beror vattenutbytet, och därmed också syretillförseln, till stor del på vindar, sötvattentillförsel och densiteten på vattnet utanför den trösklade viken (Zhang m.fl., 2010). En av de fysiska begränsningar, som till stor del inverkar på formationen av syrefria bottnar i Östersjön, är trösklarna i de danska sunden, Bälten och Öresund, som medför begränsat vattenutbyte (Conley m.fl., 2009).

## 3 METOD

### 3.1 MÄTPROGRAM

#### 3.1.1 CTD - och syremätningar

##### *Brunnsviken*

CTD (konduktivitet, temperatur och djup)-mätningar utförs av Stockholm Vatten i anslutning till pumpens intagspunkt, *Tivoli* (figur 5). Mätningarna görs *in situ* med hjälp av SEAGUARD® String System från Aanderaa Data Instruments AS (AADI). Strängsystemet består av en kedja med fyra sensorer för konduktivitet (AADI Conductivity Sensor 4319A) och en sensor för tryck (AADI Pressure Sensor 4117A). Både konduktivitet- och trycksensorerna mäter även vattentemperatur. Tryckdata kan efter korrektion för lufttryck enkelt konverteras till djupdata.

Samtliga sensorer är kopplade till SEAGUARD® String Logger, som är ett instrument som sitter omkring en till två meter över botten beroende på hur långt bojstenen som systemet är förankrat i sjunker ned i bottensedimenten. Loggern mäter med givna mellanrum. Sensorerna för konduktivitet och temperatur är placerade i fyra olika nivåer i djupled; 0, 2, 4 och 6 meter över loggern. Tryckgivaren är placerad längst ner på kedjan, vid den nedersta CT-sensorn. Intill CT-sensorerna finns, på varje djupnivå, även en syresensor (AADI Oxygen Optode 4330) som registrerar syrgashalt, syrgasmättnad och temperatur (figur 4a). Kontinuerlig syrgasmätning under lång tid har tidigare visat sig vara svårt eftersom de, i huvudsak elektrokemiska, sensorer som använts visat sig driva med tiden. I Brunnsviken används relativt nya optiska syresensorer som normalt har bättre långtidsstabilitet (se t.ex. Tengberg m.fl., 2006; Nicholson m.fl., 2008; Hydes m.fl., 2009)

Systemet försörjs med ström genom en kabel in till land. Kabeln möjliggör även direktöverföring av data. Det dataset som används i det här examensarbetet är från perioden 2009-08-26–2010-07-21 och innehåller endast kortare avbrott för omprogrammering eller upptagning av loggern. Tidsupplösningen på data har under perioden varit antingen tio minuter eller en timme (bilaga 1). Loggern stod under perioden i medeltal på 10,9 meters djup (beräknat utifrån tryckdata). Det innebär att nivån 0 meter över loggern i medeltal motsvaras av ett djup på 10,9 meter. Nivån 2 meter över loggern motsvaras av ett djup på 8,9 meter, nivån 4 meter av ett djup på 6,9 meter och nivån 6 meter över loggern motsvaras av ett djup på 4,9 meter (figur 4b).

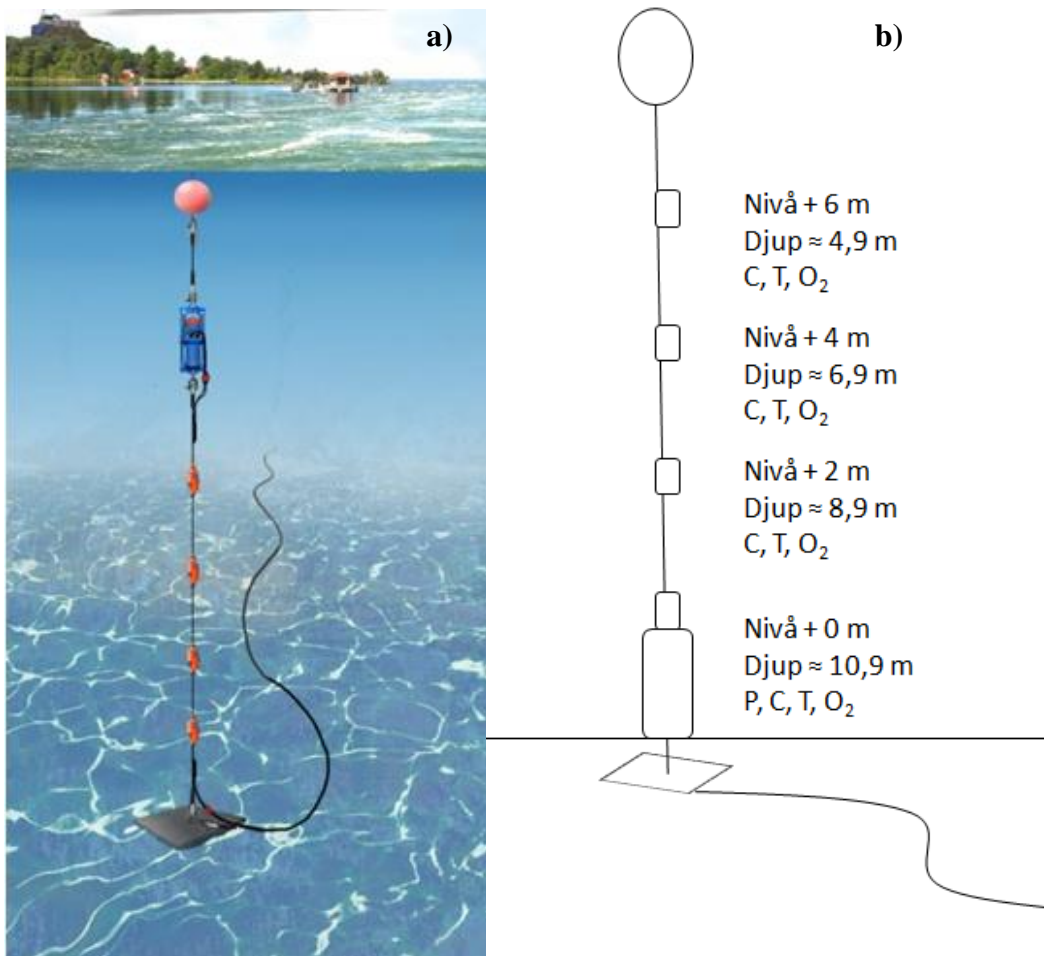
##### *Edsviken*

För att undersöka bland annat sensorernas stabilitet analyserades även mätdata från ett liknande system som finns i Edsviken, som är belägen strax norr om Brunnsviken. I Edsviken är direktöverföring inte möjlig då det inte finns någon kabel in till land. Data lagras istället i ett internt SD-kort och systemet försörjs med ström från batterier. Avståndet mellan mätpunkterna i Brunnsviken och Edsviken är omkring 5 kilometer (figur 5). Systemet i Edsviken är placerat på ett större djup än i Brunnsviken och har sensorer på tre olika nivåer; 0, 2 och 4 meter över loggern.

Mätdata från systemet finns för perioden 2009-08-21–2010-07-16, vilket är ungefär samma period som datasetet från Brunnsviken. Tidsupplösningen på data har under mätperioden varit en timme.

Loggern stod under perioden i medeltal på 15,8 meters djup (beräknat utifrån tryckdata). Det innebär att nivån 0 meter över loggern motsvaras av ett djup på 15,8 meter. Nivån 2 meter över botten motsvaras av ett djup på 13,8 meter och nivån 4 meter över botten av ett djup på 11,8 meter.

Edsvikens inlopp ligger i Lilla Värtan, i samma fjärd som inloppet till Brunnsviken. Övriga likheter mellan vikarna är att inloppen är trösklade och smala, att vikarna till största del omges av bebyggelse samt att båda vikarna under perioder har syrefattigt bottenvatten.



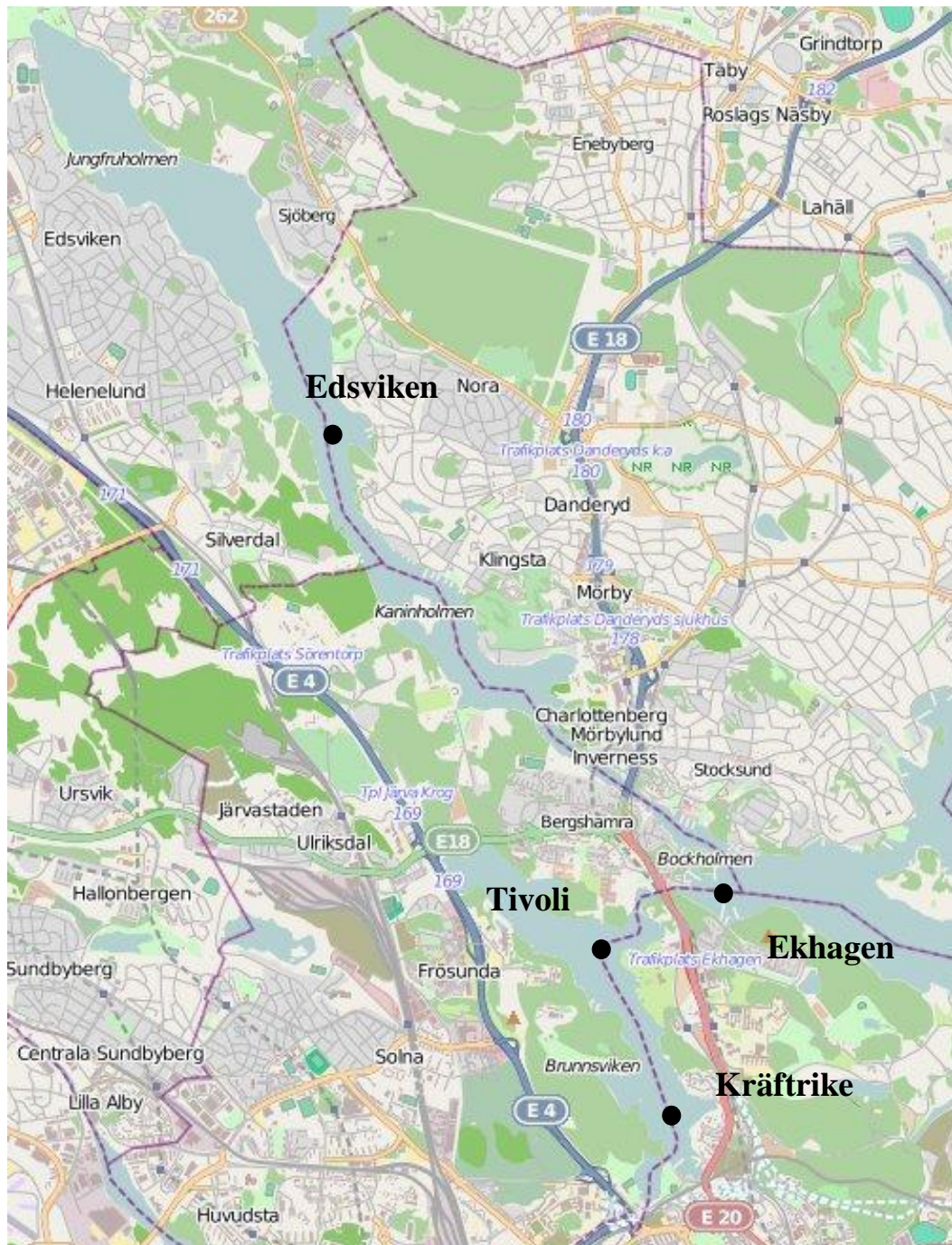
**Figur 4** a) SEAGUARD ® String System, fyra nivåer med sensorer för CTD- och syremätningar. Observera att i Brunnsviken är SEAGUARD ®String Logger placerad längst ner på kedjan och inte högst upp som bilden visar (Aanderaa Data Instruments AS, medgivande 2011-01-18) b) Schematisk skiss som beskriver placeringen av de olika sensorerna i Brunnsviken.

### 3.1.2 Månadsmätningar

Stockholm Vatten utför manuella mätningar varje månad på olika djup av ammoniumkväve, konduktivitet, nitrit, nitrat, svavelväte, syrgas, totalkväve, totalfosfor, fosfatfosfor, siktdjup

och klorofyll. Mätningarna görs vid två mätpunkter i Brunnsviken, *Tivoli* och *Kräftrike* samt *Ekhagen*, som är en mätpunkt i saltsjön strax utanför inloppet till Brunnsviken (figur 5).

Mätningarna vid *Tivoli* sker på djupen 1, 4, 6, 8, 10 och 12 meter. Vid *Kräftrike* sker mätningarna på 0,5, 4, 6 och 8 meters djup. Vid *Ekhagen* sker mätningarna på 0,5, 3, 6, 9, 12, 15, 18 och 21 meters djup. Konduktivitetmätningarna utförs i laboratorium vid 25 °C. Mätningar har gjorts sedan 1974. I detta examensarbete används endast CT- och syredata.



**Figur 5** Två strängsystem, för mätning med hög tidsupplösning, är placerade i Brunnsviken (*Tivoli*) och Edsviken. Månadsmätningar utförs i tre punkter, *Tivoli*, *Kräftrike* och *Ekhagen* (saltsjön). (Kartdata OpenStreetMap contributors, CC-BY-SA; Creative Commons-licens)

### **3.1.3 Kompletterande vattenståndsmätningar**

Inom ramen för examensarbetet utfördes kompletterande vattenståndsmätningar på två punkter i Brunnsviken. Mätningarna utfördes under två veckors tid, i november 2010, med hjälp av tryckmätare (Mini-Diver DI500 samt Mini-Diver D7493). Mätintervallet sattes till två minuter och mätarna synkroniserades. En av mätarna placerades i närheten av Ålkistan och den andra i vikens södra del. Utöver detta mättes även lufttrycket vid Ålkistan. Mätarna placerades vid fasta konstruktioner för att inte riskera att mätarnas läge förändrades i takt med vikens vattenståndsförändringar.

## **3.2 DATABEARBETNING**

CTD- och syredata från strängssystemet importerades och sammanlänkades i MATLAB för bearbetning och utvärdering. Grafer innehållande rådata för CTD- och syremätningarna återfinns i bilaga 2. Tidsserierna granskades för avvikande värden genom att data från Brunnsviken jämfördes med data från Edsviken. Dessutom gjordes en jämförelse med de månadsmätningar som gjorts i Brunnsviken under den studerade perioden.

### **3.2.1 Tryckdata**

Tryckdata för Brunnsviken och Edsviken jämfördes och sensorerna konstaterades ha fungerat tillfredställande under hela mätperioden. För att verifiera tryckmätningarna jämfördes tryckserien även med oberoende vattenståndsmätningar från Hammarbyslussen. Även denna jämförelse visade på relativt god överensstämmelse (bilaga 3). Vattenståndsdata för Hammarbyslussen hämtades från Stockholms hamnar. Tidsupplösningen för dataserien var en halvtimme.

I samband med upptagning av mätsystemet för service har en förskjutning i tryckdata uppstått, till följd av att mätsystemets läge förändrats och placerats 30 centimeter djupare (bilaga 2). Detta korrigerades genom att efterkommande tryckmätningar förflyttades till ursprunglig nivå.

### **3.2.2 CT-data**

Temperaturdata för CT- och syresensorer på samma djup jämfördes. Överensstämmelsen mellan temperaturserierna var god och därför drogs slutsatsen att temperaturmätningarna var tillförlitliga för hela den studerade perioden. Temperaturdata tycktes även följa förväntade säsongsvariationer.

Även konduktivitetsdata kunde betraktas som rimliga. Vid jämförelsen mellan månadsmätningar och mätningar från strängssystemet gjordes en temperaturkorrigering då mätningarna för konduktivitet med strängssystemet gjordes vid den faktiska vattentemperaturen och månadsmätningarna gjordes i laboratorium vid 25 °C. Korrigeringen utfördes enligt *Metod 2* som finns beskriven i Sorensen & Glass (1987) och som enligt Hayashi (2004) är den metod som vanligtvis används för mätningar i naturliga vatten. Efter temperaturkorrigering stämde storleken för månadsmätningar och mätningar från strängssystemet överens.

Att mätsystemets läge förändrats efter upptagning och placerats på en djupare nivå återspeglas även i CT-data. Temperaturen var efter upptagningen något lägre och konduktiviteten något högre. Korrigering bedömdes ej vara nödvändig.

### 3.2.3 Syredata

Tidsserierna för syrgashalt på olika nivåer jämfördes och rimligheten analyserades utifrån förväntade säsongsvariationer. En kontroll av att syrgashaltens variationer stämde överens med omblandning och skiktning gjordes. Skiktning och omblandning för perioden återfinns i avsnitt 4.1.

För att undersöka rimligheten för de översta syresensorerna gjordes en jämförelse med solstrålningen. Data för fotosyntetiskt aktiv strålning beräknade med *STRÅNG*, en modell för solstrålning, hämtades från SMHI. Syretoppen infaller mot slutet av dagen och är vanligen relaterad till primärproduktionen (Tengberg, pers. k.). Jämförelsen visade att data från mätaren på 4,9 meters djup i Brunnsviken varken stämde överens med den fotosyntetiskt aktiva strålningen eller månadsmätningar av syrgas. På grund av detta uteslöts mätningarna från sensorn på 4,9 meters djup. Efter service 2010-06-29 då sensorn byttes ut, minskade variansen för mätningarna och de började följa solstrålningen. Inte heller de två sensorer som placerats på störst djup följde solstrålningen under produktionsperioden. Det beror emellertid på att vattnet var grumligt under perioden. Mätningarna gjorda med dessa sensorer bedömdes vara tillförlitliga. Även mätningarna gjorda med sensorn som var placerad på omkring 6,9 meters djup bedömdes vara tillförlitliga då de stämde överens med både den fotosyntetiskt aktiva strålningen och månadsmätningarna.

Ett par av syresensorerna visade under perioder negativa värden på syrgashalt. Det skulle kunna förklaras av att koncentrationen vid kalibreringen inte var riktigt noll och korrigerades i efterhand genom att lägga till motsvarande koncentration (0,03 mg/l).

### 3.2.4 Kompletterande vattenståndsmätningar

Utifrån de kompletterande tryckmätningar som gjordes i Brunnsvikens södra del och i Ålkistan, beräknades vattenståndet. En jämförelse med vattenståndsdata från Hammarbyslussen gjordes. Dessutom utfördes en jämförelse mellan det uppmätta vattenståndet i Brunnsvikens södra del och vid Ålkistan. De båda jämförelserna visade att den tryckmätare som varit placerad i vikens södra del varit ovanför vattenytan under delar av mätperioden. Under dessa perioder är tryckserien överensstämmande med lufttrycksmätningarna vid Ålkistan. I övrigt tycks vattenståndsserierna vara tillförlitliga.

### 3.2.5 Skiktning

Salinitet- och temperaturskiktningens läge och stabilitet är en faktor som är avgörande för omblandning av vattnet och därmed också för syresättningen. För att kartlägga skiktningen i Brunnsviken beräknades densiteten för vattnet utifrån temperatur-, tryck- och konduktivitetmätningarna. Konduktivitetmätningarna konverterades till salinitet,  $S$ , i enligt med *The Practical Salinity Scale 1978 (PSS-78)*, vars giltighet ligger i intervallet  $2\text{‰} \leq S \leq 42\text{‰}$  och  $-2\text{ °C} \leq T \leq 35\text{ °C}$  (se t.ex. Lewis, 1980). Saliniteten definieras i PSS-78 som en funktion av konduktivitet, temperatur och tryck. Densiteten,  $\rho$ , beräknades utifrån salinitet, tryck och temperatur enligt samband framtagna av *JPOTS* (Unesco/ICES/SCOR/IAPSO Joint

Panel on Oceanographic Tables and Standards, 1981). Utifrån densitetsberäkningarna kunde perioder av skiktning och omblandning bestämmas.

### 3.3 SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN

Den relativa osäkerheten, CV, används ofta i studier av kustområden för att skapa konfidensintervall för empiriska data men kan även användas för att skapa statistiska modeller för prediktion av olika variabler (Håkansson & Duarte, 2008).

För att undersöka syredynamiken i Brunnsviken jämfördes månadsmätningar av syrgashalt med mätningar från strängsystemet. Den relativa osäkerheten beräknades enligt ekvation 1 för att undersöka hur osäker en månadsmätning är.

$$CV = \frac{SD}{MV} \quad (1)$$

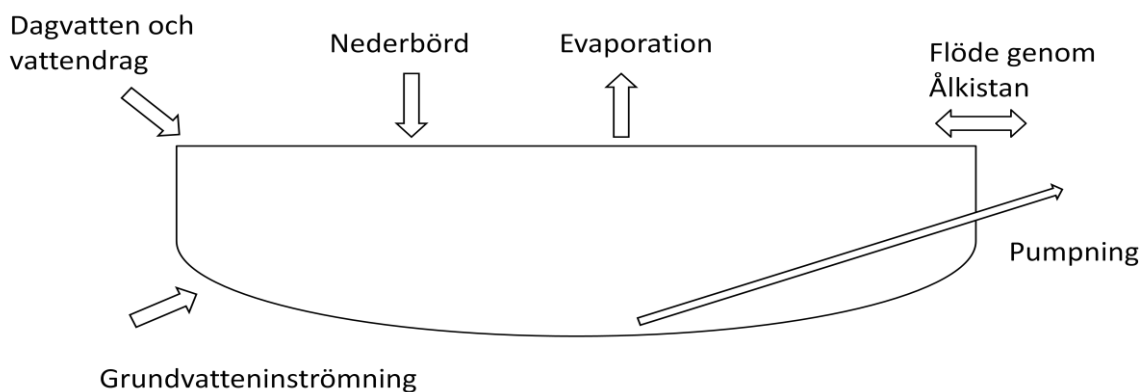
där        SD = Standardavvikelse  
              MV = Medelvärde

Utifrån den högupplösta syreserien, uppmätt med strängsystemet, beräknades CV-värdet för varje månad under den studerade perioden. Medianvärdet av dessa fick därefter representera CV-värdet för en typisk månad. Utifrån detta CV-värde beräknades ett 95 % konfidensintervall för månadsmätningarna genom att lägga till samt dra ifrån 1,96·CV (Håkansson & Duarte, 2008).

För att kvantifiera hur stora variationerna i syrgashalt kan vara för olika mätintervall plockades olika mätintervall ut ur den dataserie som genererats av strängsystemet. Utifrån dessa mätintervall bestämdes den maximala differensen samt medeldifferensen för två på varandra följande mätpunkter för respektive mätintervall. De mätintervall som studerades var tio minuter, en timme, ett dygn, en vecka och en månad.

### 3.4 VATTENUTBYTE

En enkel vattenbalans för Brunnsviken beskriver flöden till och från viken. Vatten tillförs viken genom vattendrag, dagvattenutlopp, grundvatteninströmning, nederbörd direkt på vattenytan, samt inflöde genom Ålkistan och förs bort från viken som utflöde genom Ålkistan, evaporation direkt från vattenytan samt utpumpning av bottenvatten (figur 6).



**Figur 6** Schematisk skiss över flöden till och från Brunnsviken

Med vattenbalansen som utgångspunkt beräknades flödet genom Ålkistan. Beräkningarna gjordes i MATLAB och utgick från att volymförändringen i viken förklaras av de flöden som ingår i Brunnsvikens vattenbalans (ekvation 2). Tidsupplösningen på flödet var omväxlande tio minuter och en timme beroende på tidsupplösningen på tryckdata. Ytareaförändringar i samband med vattenståndsförändringar försumrades.

Rimligheten i detta antagande testades genom att variera ytarean vid flödesberäkningarna. En beräkning av nettoflödet genom Ålkistan gjordes även på månadsbasis, utgående från månadsvisa vattenståndsförändringar.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} = Q + Q_f + PA - EA - Q_p \quad (2)$$

där	V = Volym	[m <sup>3</sup> ]
	A = Ytarea	[m <sup>2</sup> ]
	$\frac{dh}{dt}$ = Vattenståndsförändring per tidsenhet	[m/s]
	Q = Flöde genom Ålkistan, Q > 0 inflöde, Q < 0 utflöde	[m <sup>3</sup> /s]
	Q <sub>f</sub> = Tillflöde från vattendrag, dagvatten och grundvatten	[m <sup>3</sup> /s]
	P = Nederbörd direkt på vattenytan	[m/s]
	E = Evaporation direkt från vattenytan	[m/s]
	Q <sub>p</sub> = Flöde för utpumpning av bottenvatten	[m <sup>3</sup> /s]

### 3.4.1 Indata

#### Vattenstånd

Vattenståndet beräknades utifrån tryckdata från mätningarna gjorda med strängssystemet vid provpunkten *Tivoli*. Eftersom konduktivitetmätningarna var gjorda i diskreta punkter användes medelvärdet av densiteten för de fyra mätnivåerna vid beräkningen av vattenståndet. För att beräkna vattenståndet måste lufttrycket subtraheras från tryckmätningen då tryckmätningen visar summan av vattentryck och lufttryck. Då inga lufttrycksmätningar gjorts vid Brunnsviken i samband med CTD - mätningarna användes lufttrycksdata från Stockholm och Uppsala läns luftvårdsförbund, gjorda på Torkel Knutssongatan på Södermalm i Stockholm. Lufttrycksmätningarna hade en upplösning på en timme och antogs till en början vara konstanta under timmen för att ge samma tidsskala som tryckmätningarna, som var gjorda med tio minuter respektive en timmes intervall. Antagandet att lufttrycket var konstant under varje timme medförde emellertid att orimligt stora flödestoppar genererades varpå linjär interpolation användes för punkter mellan mätningarna.

Att tryckmätaren i vikens södra del befunnit sig ovanför vattenytan delar av november månads vattenståndsmätningar medförde att en jämförelse mellan lufttrycket vid Ålkistan, vid Brunnsvikens södra del samt vid Torkel Knutssongatan på Södermalm i Stockholm kunde göras för att undersöka rimligheten i att använda lufttrycksdata från Södermalm i flödesberäkningarna.

### *Vattendrag, dagvatten och grundvatteninströmning*

Råstaån är det enda vattendrag som har sitt utlopp i Brunnsviken. Utöver detta tillförs dagvatten på ett antal platser och grundvatten strömmar in från Stockholmsåsen som ligger på Brunnsvikens västra sida. För att beskriva det bidrag som dagvatten, grundvatten och Råstaån gav under 2009 användes modellberäknade värden för 2009 från SMHI:s *Vattenweb* (Område 658558-162475). De modellerade värdena är simulerade med simuleringsmodellen S-HYPE och har en upplösning på ett dygn. Noggrannheten för de modellberäknade flödesdata är  $\pm 10\%$  (SMHI, 2010). Modellen inkluderar alla bidrag från alla eventuella delavrinningsområden uppströms det valda avrinningsområdet och de modellerade värdena inkluderar all sötvattentillrinning till det aktuella området, d.v.s. Brunnsviken. Modellen inkluderar inte den nederbörd som faller direkt på vattenytan (Hjerdt, pers. k.).

För 2010 fanns inga modellberäknade värden. Istället användes månadsmedelvärden framräknade utifrån modellberäknade flödesvärden för perioden 1995-2009. Även dessa data hämtades från SMHI:s *Vattenweb*. Flödet från vattendrag, dagvatten och grundvatten antogs vid beräkningen av flödet genom Ålkistan vara konstant under dygnet för att ge samma tidskala som mätningarna gjorda med strängsystemet i Brunnsviken.

### *Evaporation*

Under sommarmånaderna uppgår evaporationen från svenska sjöar som mest till omkring 120 mm/månad (Sveriges nationalatlas, 1995). Det gör att den maximala evaporationen från Brunnsvikens yta blir omkring  $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ . Detta flöde är betydligt mindre än övriga flöden i vattenbalansen och kunde på grund av detta försummas i beräkningen av flödet genom Ålkistan.

### *Nederbörd*

Nederbörd som faller direkt på Brunnsvikens vattenyta inkluderades inte i de modellberäknade data som användes för att beskriva sötvattenstillflöden i form av vattendrag, dagvatten och grundvatten. För att beskriva nederbörden användes data uppmätta på Torkel Knutssongatan (Södermalm, Stockholm) från Stockholms och Uppsala läns Luftvårdsförbund. Dataseriens upplösning var en timme och nederbörden antogs vara konstant under timmen. Saknade värden kompletterades genom linjär interpolation.

### *Pumpning*

Pumpen startades den 16 mars 2010 och pumpningen pågick sedan utan avbrott under hela den studerade perioden. Pumpen ska konstant ge 600 l/s, men det har inte kontrollerats (Lännergren, pers. k.).

## **3.4.2 Felsökning**

Det beräknade flödet genom Ålkistan jämfördes med strömmätningar gjorda i Ålkistan 2006/2007 (avsnitt 2.1.3). I ett försök att utreda skillnader i resultat mellan de olika metoderna utfördes en spektralanalys. Den hypotes som testades var att det framräknade flödet inte har samma periodicitet som det flöde som beräknats utifrån strömmätningar i Ålkistan 2006/2007.

Tryckmätningarna gjorda under november 2010 (avsnitt 3.1.3) medförde att brus i tryckdata orsakade av vågor kunde konstateras. Filtrering med hjälp av glidande medelvärde användes

för att släta ut de hastiga variationer i tryckdata som orsakade orimligt höga flöden. Filtreringen gjordes för de perioder då tryckdata hade en upplösning på tio minuter. Tryckdata med en upplösning på en timme påverkades inte av störningar från vågor. För att minimera risken för störningar i form av brus bedömdes, utifrån vattenståndsmätningarna, att tryckdata behövde filtreras motsvarande en tidsupplösning på 30 minuter.

### 3.4.3 Rimlighetsbedömning av flödesberäkningar

Rimlighetsbedömning av det beräknade flödet genom Ålkistan utfördes på två sätt; genom massbalansberäkningar av salt samt genom att studera vattenståndsmätningarna gjorda under november månad.

#### *Massbalans av salt*

Massbalansmodellering av salt är ett verktyg för kvantifiering av vattenutbytet i kustområden. En enkel massbalans kan uttryckas som att förändringen i totala massan i systemet är lika stor som skillnaden mellan den mängd som tillförs systemet och den mängd som försvinner från systemet (ekvation 3).

$$V \frac{dC}{dt} = \sum Q_{in} C_{in} - \sum Q_{ut} C_{ut} \quad (3)$$

där

- V = Volym
- C = Koncentration i vattenmassan
- C<sub>in</sub> = Koncentrationen i inkommande vatten
- C<sub>ut</sub> = Koncentrationen i utgående vatten
- Q<sub>in</sub> = Inflöde
- Q<sub>ut</sub> = Utflöde

En massbalans för salt gjordes för Brunnsviken för att validera det flöde genom Ålkistan som beräknats på månadsbasis utgående från vattenbalansen.

Även denna beräkning utfördes i MATLAB. Utgående från ekvation 3 kan Brunnsvikens saltflöden sammanfattas i ekvation 4.

$$\frac{dS}{dt} V = Q_f S_f + Q_{in} S_{in} - Q_{ut} S_{ut} - Q_p S_p \quad (4)$$

där

- S = Koncentrationen salt i vattenmassan
- V = Brunnsvikens volym
- Q<sub>f</sub> = Tillflöde från vattendrag, dagvatten och grundvatten
- S<sub>f</sub> = Koncentrationen salt för Q<sub>f</sub>
- Q<sub>in</sub> = Inflöde genom Ålkistan
- S<sub>in</sub> = Koncentrationen salt för Q<sub>in</sub>
- Q<sub>ut</sub> = Utflöde genom Ålkistan
- S<sub>ut</sub> = Koncentrationen salt för Q<sub>ut</sub>
- Q<sub>p</sub> = Flöde för utpumpning av bottenvatten
- S<sub>p</sub> = Koncentrationen salt för Q<sub>p</sub>

För positiva värden på  $Q$  i ekvation 2 sattes  $Q_{in}=|Q|$  samt  $Q_{ut}=0$  i massbalansen och för negativa värden på  $Q$  sattes  $Q_{in}=0$  samt  $Q_{ut}=|Q|$ . Rimlighetsbedömningen gjordes därefter genom att kontrollera att vänsterledet överensstämde med högerledet i ekvation 4.

Vid beräkningen av koncentrationen salt i vattenmassan,  $S$ , delades Brunnsviken in i två delbassänger (bilaga 4) vars salinitet representerades av mätpunkterna *Tivoli* och *Kräftrike*. Indelningen i delbassänger gjordes utifrån den tröskel som skiljer de två bassängerna åt. Utifrån Brunnsvikens batymetri skulle ytterligare indelningar vara möjliga. Detta gjordes emellertid inte då konduktivitetmätningar endast är gjorda i två punkter. Då en saltgradient förekommer delades delbassängerna även in i vertikalled i åtta delvolymmer. Tjockleken på skikten bestämdes av de djupnivåer månadsmätningarna var utförda på (bilaga 4).

En uppskattning av delvolymerna genomfördes i ArcGIS genom att djupkartan i figur 1 scannades in och digitaliserades. Kartan är gjord av Myrica AB 1999 och baseras på GPS-positionerad ekolodning. Digitaliseringen gjordes genom att djupkurvor och djuppunkter lades in. Linjär interpolation användes för att beräkna djupet för vikens övriga delar. Utifrån detta kunde volymberäkningar för de olika delvolymerna utföras (bilaga 4).

Koncentrationen salt i tillflödet från vattendrag, dagvatten och grundvatten,  $S_f$ , är så liten att termen försummas i beräkningarna. Det vatten som pumpas ut ur Brunnsviken kommer från botten i provpunkten *Tivoli*. Koncentrationen på detta vatten representeras därför av saliniteten på bottenvattnet vid *Tivoli*.

Det inströmmande vattnet kommer från ett djupintervall på 0-3 meter. Det beror på att Brunnsviken är en trösklad vik, där inloppet är omkring tre meter djupt. Koncentrationen av salt på inkommande vatten,  $S_{in}$ , representerades i massbalansmodellen av medelvärdet för djupen 0,5 och 3 meter vid provpunkten *Ekhagen*. Koncentrationen på utflödande vatten representerades i beräkningarna av koncentrationen för det översta skiktet vid provpunkten *Tivoli*, då utflödande vatten till största del tas från detta skikt.

#### *Vattenståndsmätningar*

Rimlighetsbedömning av storleken på flödet genom Ålkistan gjordes utifrån november månads vattenståndsmätningar. Perioder av konstant vattenståndsminskning eller konstant vattenståndsökning identifierades. Perioderna kontrollerades så att vattenståndsförändringarna mellan Ålkistan och Brunnsviken södra del var överensstämmande. Det gjorde att problemet med brus från vågor eliminerades och att en säker vattenståndsförändring kunde fastställas för perioderna. Längden på perioderna varierade mellan tre och fem timmar. Utifrån vattenståndsförändringarna kunde sedan storleken för flödet genom Ålkistan uppskattas.

### **3.5 FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN**

Hur stor inverkan flödet genom Ålkistan har på syredynamiken i Brunnsviken studerades genom att grafiskt identifiera perioder med stort inflöde och långa perioder av inflöde i det utifrån vattenståndsdata beräknade flödet genom Ålkistan. Dessa perioder jämfördes med motsvarande syredata.

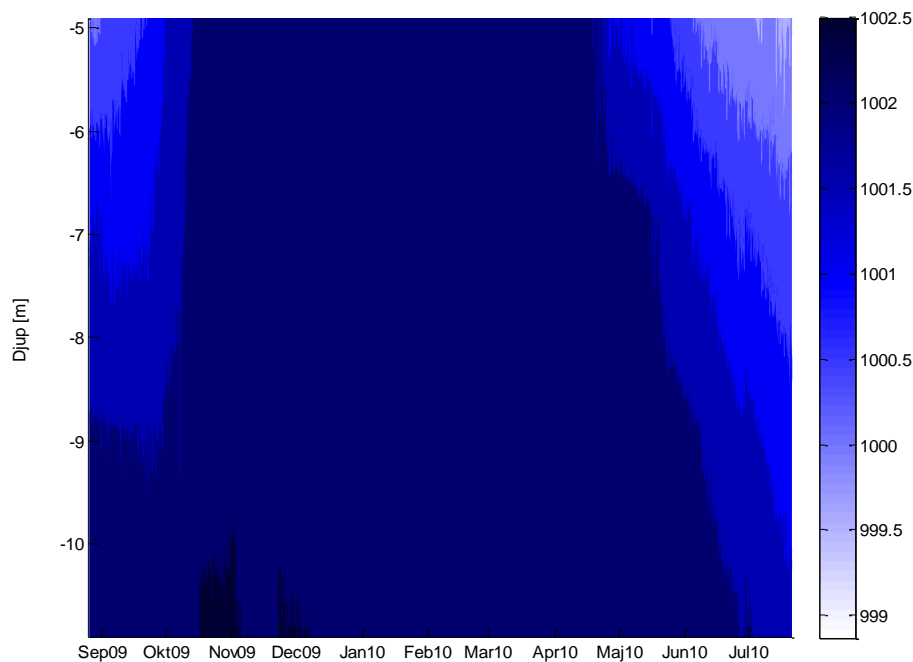
## 4 RESULTAT

### 4.1 ANALYS AV MÄTDATA

Databearbetningen visade sensorerna, med undantag för en syresensor, fungerat tillförlitligt under hela den studerade perioden. I mitten av april avvek data från den sensor som var placerad närmast ytan från data från övriga sensorer genom att konduktiviteten på detta djup avtog snabbare än konduktiviteten på övriga djup. Nästkommande sensor, d.v.s. sensorn på omkring 6,9 meters djup, avvek därefter på samma sätt i mitten av maj (bilaga 2). Data från Edsviken uppvisade ett liknande mönster med start med sensorn närmast vattenytan. Det förekom hastiga variationer i konduktivitetsdata som inte var möjliga att urskilja ur månadsmätningarna av konduktivitet (bilaga 5). Variationerna var dock inte lika stora som variationerna i syrgashalt (se avsnitt 4.2) och förekom främst under hösten i samband med omblandning.

Syrgashalten i Edsviken följde ett liknande mönster som syrgashalten i Brunnsviken på motsvarande djup, med högre syrgashalter med start i skiftet mellan höst och vinter och sedan avtagande syrgashalter fram mot våren. Under sommaren och hösten var syrgashalterna låga. I Brunnsviken varierade temperaturskillnaden mellan sensorer på samma djup mellan 0,002–0,012 °C.

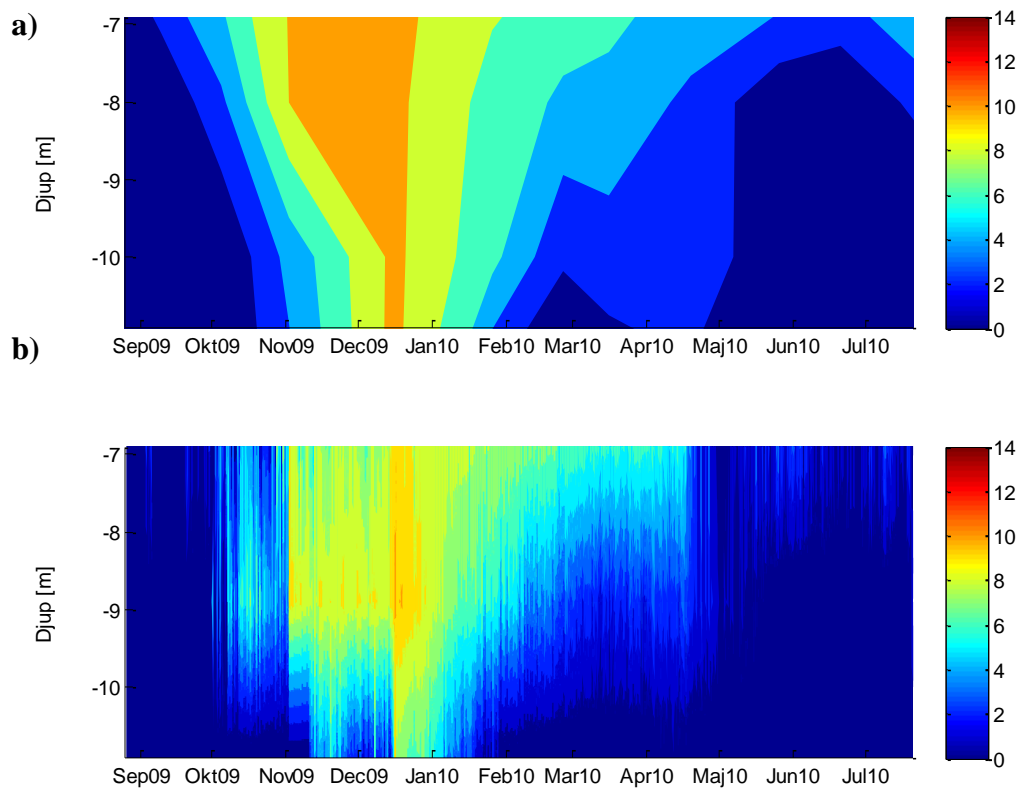
Relativt konstant temperatur och konduktivitet under perioden 20 december 2009–15 april 2010 indikerar isformation under perioden (Tengberg, pers. k.). Syredata tycktes vara mindre brusiga under perioden av is. Höstomblandningen inträffade i början av oktober 2009 och en skiktning till följd av ökande temperaturer uppträdde i början av maj (figur 7).



**Figur 7** Vattnets densitet under den studerade perioden [ $\text{kg/m}^3$ ].

## 4.2 SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN

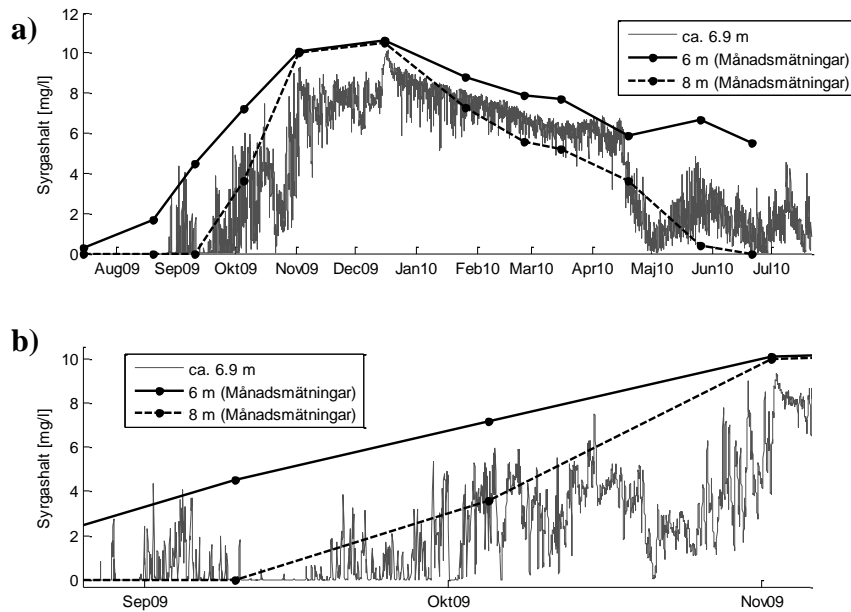
Grafer över hur syrgashalten varierade med djup och tid visar att den storskaliga trenden var lika för både månadsmätningarna och högupplösta data uppmätta med hjälp av strängssystemet (figur 8). Under perioden september 2009–november 2009 samt under perioden maj 2010–juli 2010 var oxyklinens läge inte möjligt att bestämma då den låg på ett mindre djup än sju meter (figur 8).



**Figur 8** Djupprofiler för syrgashalten i mg/l. **a)** Baserad på månadsmätningarna. **b)** Baserad på mätningar gjorda med intervallet tio minuter och 1 timme.

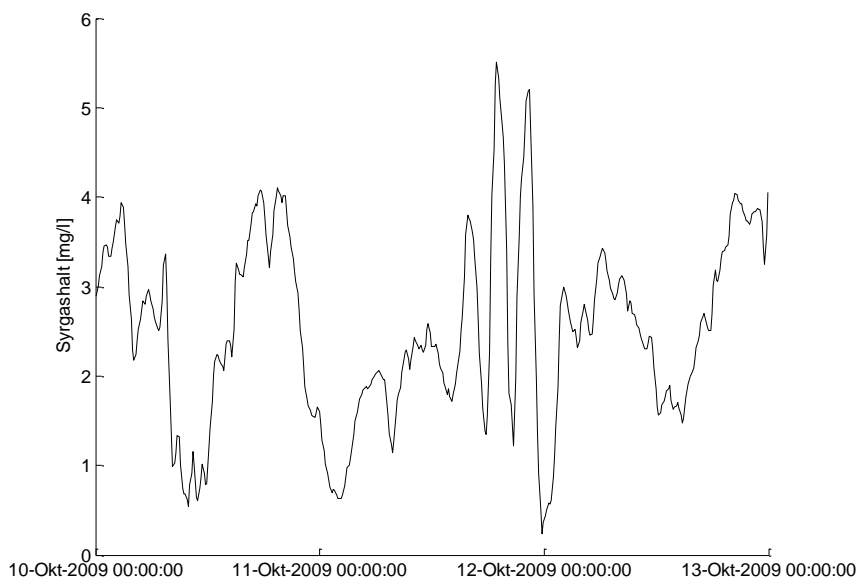
Månadsmätningarna följde i grova drag den trend som mätningarna gjorda med kortare tidsintervall visade, men missade helt kortare variationer (figur 9). Figuren visar en jämförelse för endast en djupnivå. På övriga djupnivåer förekom också att hastiga variationer som inte kunde beskrivas av månadsmätningar (bilaga 6).

För den studerade perioden gav månadsmätningarna i allmänhet en bild av att syrgashalten var högre och i dessa mätningar var den period av syrebrist som uppkom under början av december inte möjlig att urskilja (figur 8).



**Figur 9** Exempel på jämförelse mellan månadsmätningar gjorda på 6 och 8 meters djup och mätningar med högre tidsupplösning gjorda på omkring 6,9 meters djup. **a)** Hela den studerade mätperioden **b)** Perioden september 2009–november 2009.

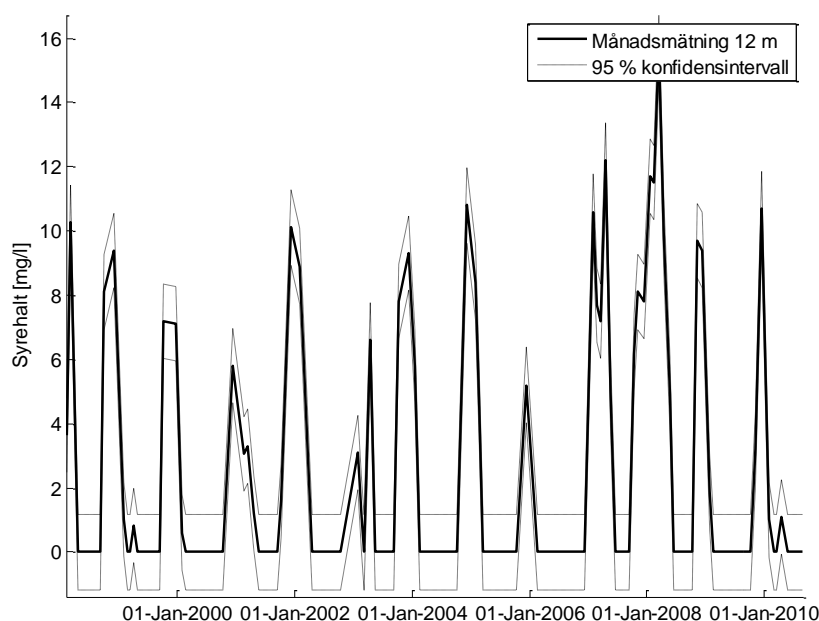
Stora dygnsvariationer i syrgashalt förekommer i Brunnsviken. Under till exempel den 11 oktober varierade syrgashalten mellan 0,5 och 5,5 mg/l på omkring 6,9 meters djup inom loppet av några timmar (figur 10). Lika stora variationer förekom även på andra djup och vid andra tidpunkter på året.



**Figur 10** Variationer i syrgashalt på omkring 6,9 meters djup under tre dygn i oktober.

Medianvärdet av CV-värdet för den studerade perioden var 0,59. För att bottendjuren statistiskt sett inte ska hotas av syrebrist måste följande olikhet vara uppfylld; månadsvärdet  $1,96 \cdot CV > 2 \text{ mg/l}$ , vilket innebär att värdet på månadsmätningen måste vara 1,2 mg/l högre än gränsvärdet på 2 mg/l.

Månadsmätningarna för perioden 1998–2010 visade att syrebrist förekommit i bottenvattnet under stora delar av varje år. Det konfidensintervall som beräknats utifrån CV-värdet visar att perioden av syrebrist blir omkring en månad längre varje år än om bedömningen görs endast utifrån månadsmätningarna (figur 11). Samma resultat fås även för andra djupnivåer.



**Figur 11** Månadsmätningar gjorda på ett djup av 12 meter, med konfidensintervall på 95 %.

Medeldifferensen mellan två på varandra följande mätvärden var som lägst för mätintervallet på tio minuter under den studerade perioden. Medeldifferensen ökade med ökat mätintervall. För ett mätintervall på en månad var medeldifferensen 1,7 mg/l, vilket går att jämföra med 0,06 mg/l som var medeldifferensen för mätintervallet tio minuter. Differensen mellan två på varandra följande mätningar ökar snabbare med ökat mätintervall om variabiliteten är stor. Den maximala differensen för två på varandra följande mätpunkter var ungefär lika stor för de olika mätintervallen (tabell 1).

**Tabell 1** Differensen mellan två på varandra följande mätpunkter för olika mätintervall.

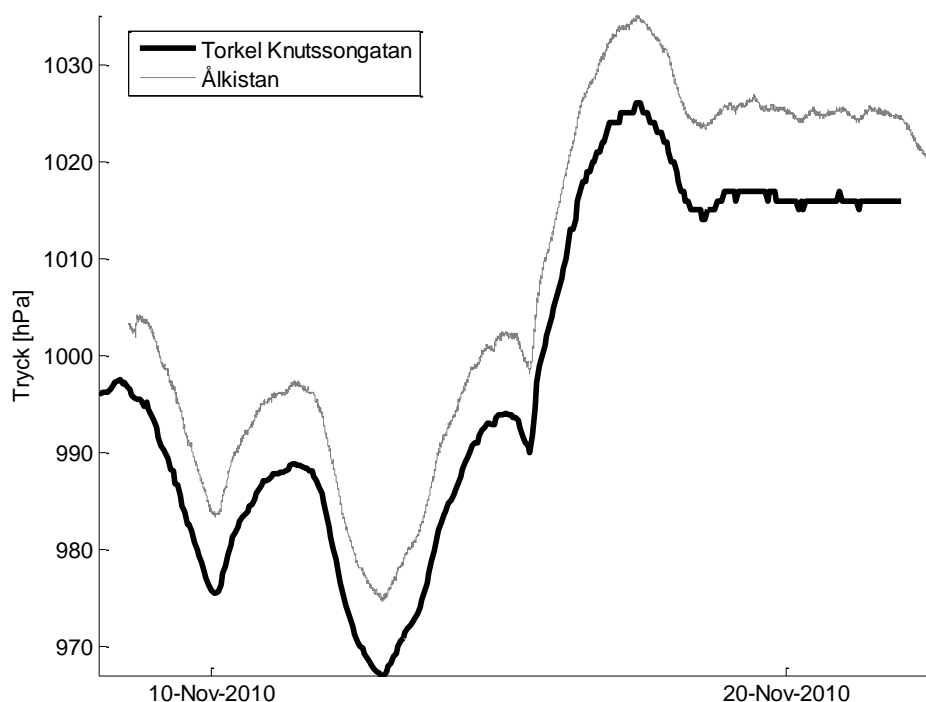
Mätintervall	Maximal differens <sup>1</sup> [mg/l]	Medeldifferens <sup>1</sup> [mg/l]
Tio minuter	5,3 <sup>2</sup>	0,06 <sup>2</sup>
En timme	6,3	0,20
Ett dygn	7,3	0,42
En vecka	6,6	0,73
En månad	6,3	1,7

1. Differenserna anges i absoluta värden. 2. Beräknat endast utifrån delar av den studerade perioden då tidsupplösningen för hela perioden inte var tillräcklig.

Under den studerade perioden var differensen mellan två på varandra följande mätningar som störst under oktober 2009. Det var under denna tidsperiod som den maximala differensen går att återfinna för samtliga mätintervall.

### 4.3 VATTENUTBYTE

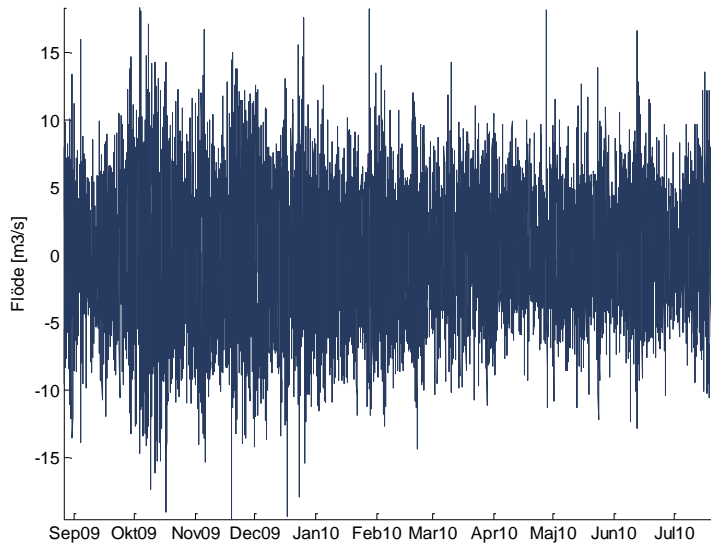
Luftrycket skiljde sig åt mellan Torkel Knutssongatan och Ålkistan. Skillnaden uppgick som mest till 8 hPa under den studerade perioden. Skillnader i luftryck fanns även mellan Brunnsvikens södra del och Ålkistan och uppgick under perioden till omkring 1 hPa. Luftrycksförändringarna skedde på likartat sätt på båda platserna, med endast ett fåtal undantag (figur 12).



**Figur 12** Jämförelse mellan luftrycksmätningar uppmätta vid Ålkistan (Brunnsviken) och Torkel Knutssongatan (Södermalm).

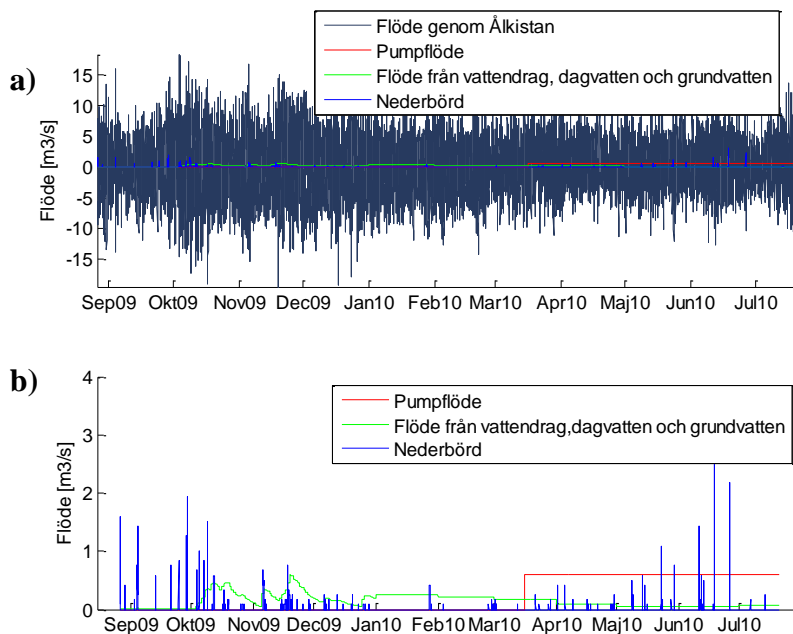
Flödet genom Ålkistan bytte riktning ungefär var 6:e timme, vilket innebär en periodicitet på omkring 12 timmar. Ett positivt värde innebär inflöde och ett negativt värde innebär utflöde ur Brunnsviken. Storleken på flödet varierade i huvudsak mellan 0 och 15 m<sup>3</sup>/s (figur 13). Jämfört med flödet beräknat utifrån strömmätningar gjorda 2006/2007 är detta flöde något större (bilaga 7). Ingen skillnad i periodicitet kunde påvisas utifrån den spektralanalys som gjordes.

Flödet genom Ålkistan förändrades varken till storlek eller periodtid då pumpen slogs på i mars 2010. Nettoflödet på månadsbasis var omväxlande in och ut ur Brunnsviken. Under hösten 2009 och början av vintern 2010 var nettoflödet i huvudsak riktat ut ur viken. Under våren och sommaren var flödet istället i huvudsak riktat in i viken. Flödesberäkningar gjorda utifrån säkra perioder av vattenståndsförändringar resulterade i flöden på 7-15 m<sup>3</sup>/s.



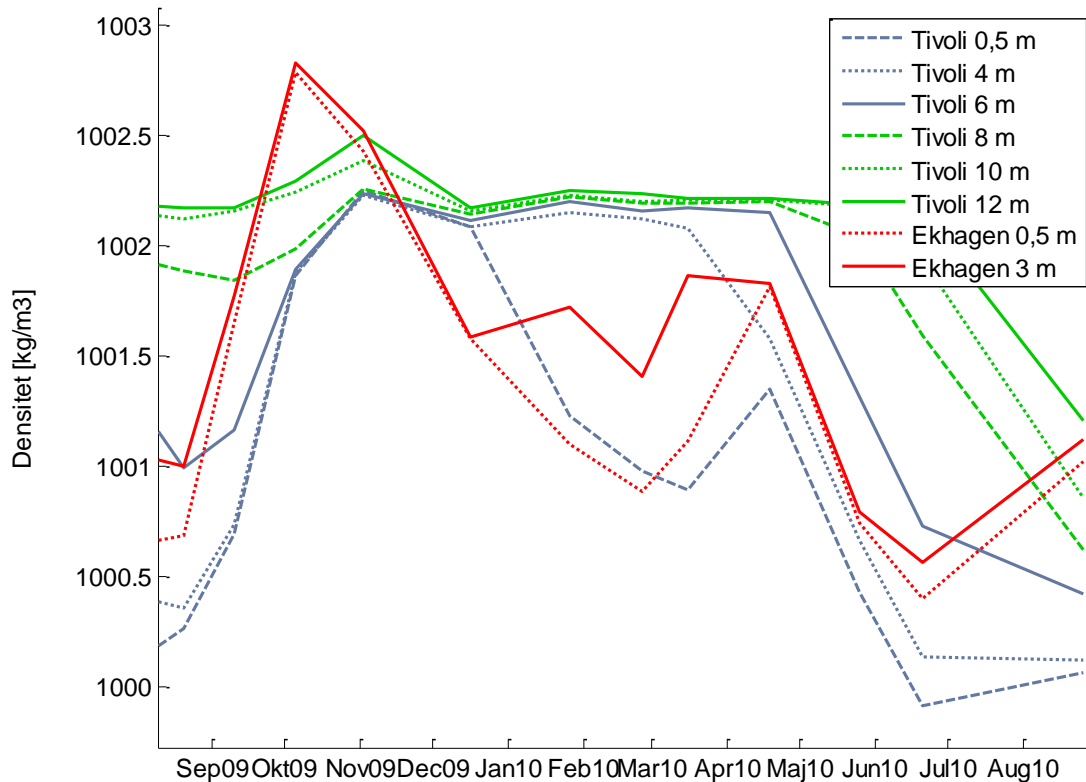
**Figur 13** Flöde genom Ålkistan beräknat utifrån Brunnsvikens vattenbalans.

Flödet genom Ålkistan var betydligt större än övriga flöden till och från Brunnsviken. Flödet genom Ålkistan var upp till 30 gånger större än pumpflödet (figur 14 a). Pumpflödet var av ungefär samma storlek som nederbörd direkt på vattenytan och tillflödet från vattendrag, dagvatten och grundvatten (figur 14 b). I jämförelse med nettoflödet genom Ålkistan på månadsbasis var pumpflödet av samma storlek och sötvattentillflödet ungefär hälften så stort. Det innebär att nederbörden direkt på vattenytan var försumbar.



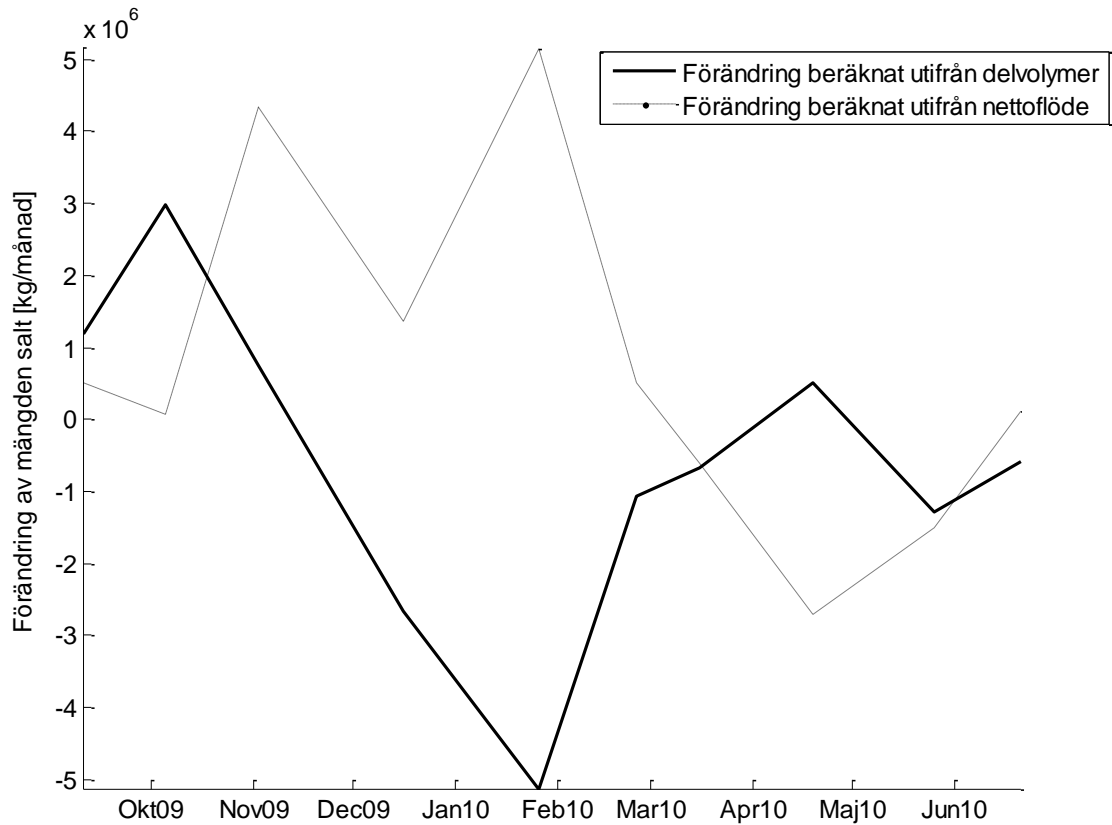
**Figur 14 a)** Storleksjämförelse mellan flödet genom Ålkistan, pumpflödet, tillflöde från vattendrag, dagvatten och grundvatten samt nederbörd direkt på vattenytan. **b)** Storleksjämförelse mellan pumpflödet, tillflöde från vattendrag, dagvatten och grundvatten samt nederbörd direkt på vattenytan.

Under den period som mätningar gjordes med strängsystemet var densiteten på det inströmmande vattnet lägre än densiteten på Brunnsvikens bottenvatten i provpunkten *Tivoli*, med undantag för perioden mitten av september till slutet av oktober då densiteten för det inströmmande vattnet var högre. Densiteten på det inströmmande vattnet var växelvis lägre respektive högre än vattnet i Brunnsviken på 0-6 meters djup (figur 15). Under perioden 1998–2010 var densiteten på det inströmmande vattnet endast högre än densiteten på Brunnsvikens bottenvatten vid ett fåtal tillfällen.



**Figur 15** Densiteten på inströmmande vatten och Brunnsvikens vatten i provpunkten *Tivoli* på djupnivåerna (0,5, 4, 6, 8, 10 och 12 meters djup) för perioden september 2009 – augusti 2010. Det inströmmande vattnet representeras här av provpunkten *Ekhagen* (0,5 och 3 meters djup). Grafen baseras på månadsmätningar av temperatur och konduktivitet.

Förändringen i mängden salt i Brunnsviken beräknat utifrån det månadsvisa flödet, som beräknats utifrån vattenbalansen, var inte överensstämmande med förändringen beräknad utifrån delvolym. Alltså var vänsterledet i ekvation 4 inte överensstämmande med högerledet (figur 16). Medeldifferensen mellan de båda sätten att räkna motsvarar en skillnad i salinitet på omkring 0,3 psu.



**Figur 16** Förändring av mängden salt i Brunnsviken beräknat utifrån delvolym samt utifrån det månadsvisa flödet genom Ålkistan.

#### 4.4 FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN

Mycket få perioder av extra stora inflöden eller extra långa perioder av inflöde gick att urskilja i flödet genom Ålkistan beräknat utifrån högupplösta vattenståndsdata då flödet byter riktning kontinuerligt. Under större delen av den studerade perioden tycks inflödet inte ha någon effekt på syrgashalten i Brunnsviken. Under oktober månad fanns variationer i syrgashalt som kan vara relaterade till inflödet, något entydigt samband gick inte att påvisa. Under våren/försommaren uppvisade syrgashalten på nivån + 4 m variationer i syrgashalt som även kan vara relaterade till inflödet genom Ålkistan. Inget samband mellan det månadsvisa nettoinflödet och ökad syrgashalt gick att påvisa.

## **5 DISKUSSION**

### **5.1 ANALYS AV MÄTDATA**

Det mönster som konduktivitetsdata uppvisade under perioden mitten av april till slutet av maj kan indikera att sensorernas funktion var nedsatt på grund av påväxt s.k. biofouling (Tengberg, pers. k.). Mönstret, med avtagande konduktivitet i förhållande till övriga sensorer, uppkommer till följd av att påväxten sker som snabbast på sensorn närmast ytan varefter efterkommande sensorer följer. Påväxten på sensorerna var vid upptagningen emellertid inte tillräcklig för att ge biofouling (Tengberg, pers. k.). En möjlig förklaring till konduktivitetsminskningen med start vid ytan skulle kunna vara att perioden sammanfaller med ismältningen och att sötvatten därmed tillförs och vartefter letar sig ned till de djupare skikten. Både foton och mätdata efter upptagning för service av mätsystemet indikerar att påväxt inte varit ett problem (Tengberg, pers. k.). Eftersom systemet i Brunnsviken och Edsviken legat i vattnet i omkring ett år medför detta att service för rengöring av sensorerna inte behöver göras oftare än en gång per år.

### **5.2 SYRETS VARIABILITET I BRUNNSVIKEN**

Den högupplösta mätserien för syrgashalt som studerats i detta examensarbete är en av mycket få i sitt slag och det är därför viktigt att mätningarna får fortsätta. Syrgashalten i Brunnsviken uppvisade stora variationer på kort tidsskala. Månadsmätningar av syrgashalt ger inte en representativ bild av syredynamiken då det endast utgör ett stickprov, vilket medför att längden av perioder med syrebrist kan både över- och underskattas.

Konfidensintervallet som beräknats för månadsmätningarna utifrån CV-värdet ger en antydning om hur syrgasförhållandena sett ut under de perioder då endast månadsmätningar av syrgashalt gjorts i Brunnsviken. Statistiskt sett hotas inte bottendjuren av syrebrist så länge värdet för en månadsmätning är 1,2 mg/l högre än tröskelvärdet på 2 mg/l. I realiteten är detta ett osäkert mått då den maximala differensen mellan två månadsmätningar var betydligt större än så, omkring 6 mg/l. Detta i kombination med att perioder av syrebrist i bottenvattnet, som registrerats av strängssystemet under 2009/2010, inte innefattades av det 95 % konfidensintervall som beräknats utifrån månadsmätningar för samma period, gör att CV-värdet bör användas med försiktighet.

Den stora variabiliteten i syrgashalt på kort tidsskala är inte något som är unikt för Brunnsviken. Syredata uppmätta i Edsviken uppvisade ett liknande mönster. I Finska viken utfördes syremätningar på tre platser från juli 2003 till maj 2004. Datasetet omfattar således nästan en årscykel, i likhet med datasetet från Brunnsviken. Resultatet av studien var att syrgashalten varierade mycket på kort tidsskala på samtliga mätpunkter (Viktorsson m.fl., 2011). Ett kustkontrollprogram startades 1995 av Helsingborgs stad för att undersöka och dokumentera tillståndet för Öresund. Sedan 2005 finns, på en av mätstationerna, ett mätsystem på 13 meters djup för mätning av ström, konduktivitet, temperatur och syre (Göransson m.fl., 2009). Tidsupplösningen har varierat mellan tio minuter och en timme. Sedan mars 2006 görs mätningarna varje timme. Den sexåriga tidsserien uppvisar snabba variationer i syrgashalt, liksom Brunnsviken. Tidsserien har jämförts med mätningar gjorda 1-24 gånger i månaden av SMHI och DMU (Danmarks Miljöundersøgelse). Resultatet av

jämförelsen var, liksom för Brunnsviken, att månadsmätningar av syrgashalt inte kan användas för att detektera längre perioder av syrebrist. Medeldifferensen mellan två på varandra följande mätningar var i Öresund 0,06 ml/l ( $\text{ml/l} \approx \text{mg/l}$ ) då ett mätintervall på tio minuter användes. Den maximala differensen var, för samma mätintervall, 2 ml/l. För ett mätintervall på en timme var den maximala differensen 4 ml/l och medeldifferensen 0,17 ml/l. Dagliga mätningar gav en maximal differens mellan två på varandra följande mätningar på 5 ml/l och en medeldifferens på 0,91 ml/l och veckovisa mätningar gav på motsvarande sätt 6 ml/l som maximal differens och 1,15 ml/l i medeltal. Utifrån data drogs slutsatsen att syremätningar bör göras varje timme för att fånga syredynamiken. Det konstaterades också att mätningar inte behöver utföras så ofta som var tionde minut (Tengberg, pers. k.).

Medeldifferensen mellan två på varandra följande mätningar ökade med ökat mätintervall i både Brunnsviken och Öresund. Differensen mellan två på varandra följande mätningar ökar snabbare med ökat mätintervall om variabiliteten är stor. Den maximala differensen i Brunnsviken var ungefär lika stor oavsett vilket mätintervall som användes. I Öresund ökade däremot den maximala differensen, mellan två på varandra följande mätningar, med ökat mätintervall. Denna skillnad kan bero på att höst- och våromblandning förekommer i Brunnsviken som gör att förändringar i syrgashalt sker mycket snabbt. I Öresund förekommer inte någon höst- och våromblandning.

För att beskriva syredynamiken på ett så korrekt sätt som möjligt bör syremätningar göras med så kort mätintervall som möjligt. Vilket mätintervall som bör användas beror på tillämpningen. Bottenlevande organismer är känsliga för stora variationer i syrgashalt. Johansson (1997) kunde genom laborieförsök med fallande syrgashalt påvisa beteendestörningar hos makrobentiska kräftdjur redan inom 24 timmar. Enligt Tengberg (pers. k.) får bottenfauna, i bland annat Öresundsregionen, stora problem om syrgashalten varit under 2 mg/l under mer än en veckas tid. I Östersjön är faunan mer tålig men efter två veckor med syrgashalter under tröskelvärdet finns endast ett fåtal arter kvar. Att bottenfaunan endast klarar en begränsad tid i syrefattigt vatten medför att syremätningar måste göras så pass ofta att variationerna på den tidsskalan innefattas. Timvisa mätningar är ett lämpligt mätintervall för denna tillämpning. Att mäta med tio minuters mellanrum är för denna tillämpning inte nödvändigt då medeldifferensen inte skiljer sig så mycket från timvisa mätningar.

Empiriska modeller av syrgashalten i akvatiska system utgår ofta från månadsmätningar men bör göras utifrån mer högupplösta data för att ge en rättvisande bild av syredynamiken. I dagsläget används bedömningsgrunder, som är ett klassificeringssystem för att lättare tolka miljödata, för att klassificera syrgasförhållandena i svenska sjöar. Enligt dessa rekommendationer skall syrgashalten mätas fyra gånger per år. Utifrån dessa mätningar bestäms sedan den antropogent orsakade syretåringen och den naturliga syretåringen för sjön. Med utgångspunkt i detta klassificeras syrgasförhållandena för sjön och beslut om åtgärder baseras på denna bedömning (Naturvårdsverket, 2007). På grund av de hastiga variationerna i syrgashalt är det ej lämpligt att klassificera syrgasförhållandena i svenska sjöar utifrån syremätningar fyra gånger om året då det är högst troligt att sjöar uppvisar lika hastiga variationer i syrgashalt och därmed ger inte mätningar med så långt mellanrum en rättvisande

bild. Det är ej heller meningsfullt att beräkna månads- och årsmedelvärden utifrån månadsmätningar av syrgashalt.

Liksom i Brunnsviken visade syremätningarna gjorda i Finska viken säsongsvariationer med högre syrgashalter med början under midvintern och sedan avtagande syrgashalter framåt början av maj då vårblomningarna normalt startar (Viktorsson m.fl. , 2011). Att syrgashalten i Brunnsviken och Edsviken varierade på ett likartat sätt indikerar att den rumsliga variationen i Brunnsviken sannolikt har mindre betydelse än den tidsmässiga.

## **5.3 VATTENUTBYTE**

### **5.3.1 Antaganden och modifikationer**

Då alla parametrar som användes för beräkning av flödet genom Ålkistan inte fanns uppmätta vid samma tidpunkt och på samma plats användes värden från andra platser och med andra tidsintervall. Tillförsel från vattendrag, dagvatten och grundvatteninströmning samt nederbörd direkt på vattenytan visade sig vara av en storleksordning mindre än det flöde som sker genom Ålkistan. Detta gör att skillnader i dessa parametrar till följd av platsspecifika och tidsmässiga differenser inte påverkar resultatet i någon större utsträckning.

#### *Upplösning på tryckdata*

Vid beräkning av flödet genom Ålkistan var resultatet mycket beroende av upplösningen på tryckdata från strängsystemet. Om tryckdata har för hög upplösning är risken att störningar i form av vågor gör att flödet genom Ålkistan överskattas eller underskattas. Det beror på att mätningarna ömsom görs i vågtoppar och ömsom i vågdalar. På kort tidsskala blir effekten av detta på vattenståndsförändringen större än om en längre tidsskala används. Om upplösningen däremot väljs för låg förloras information om förändringar på kort tidsskala.

Jämförelsen mellan tryckmätningar gjorda vid Ålkistan och Brunnsvikens södra del gav en bra indikation om hur stor upplösning av tryckdata som kan användas vid beräkning av flödet. För användning av tryckmätningar med högre upplösning bör filtrering användas för att undvika brus orsakade av vågor. Det finns sensorer tillgängliga på marknaden som har denna funktion inbyggd.

#### *Luftryckets inverkan*

Luftrycksmätningar har inte gjorts vid Brunnsviken samtidigt som mätningarna med strängsystemet. Istället har luftrycksmätningar från Torkel Knutssongatan (Södermalm) som ligger omkring 6 kilometer bort använts. Luftrycksmätningarna vid Ålkistan gjorda i samband med vattenståndsmätningar under november 2010 visade att luftrycket skiljde sig åt mellan Brunnsviken och Södermalm. Dock förändrades luftrycket likartat med endast få undantag under den tvåveckorsperiod som mätningarna är gjorda. Det indikerar att endast det absoluta värdet på vattenståndet förändras men att vattenståndsförändringen inte påverkas med undantag för att enstaka orimliga flödestoppar kan uppkomma, samt att även enstaka orimliga dalar kan uppkomma. Att använda luftrycksdata från Södermalm kan därför anses som ett rimligt antagande. Luftrycksskillnaderna beror troligtvis på att mätningarna vid Torkel Knutssongatan utförts på en högre höjd samt skillnader i kalibreringen av tryckmätarna.

### 5.3.2 Storlek och periodicitet

Förändringen i mängden salt i Brunnsviken beräknat utifrån det månadsvisa flödet, som beräknats utifrån vattenbalansen, var inte överensstämmande med förändringen beräknad utifrån delvolym. Vid beräkningen av mängden salt representerades hela Brunnsviken av endast två mätpunkter för konduktivitet. Antagandet att ett skikt är horisontellt omblandat är ofta rimligt men det kan uppstå horisontella gradienter om det förekommer ett stort söt- eller saltvatteninflöde. Salinitetsberäkningar i kustvatten med låga salthalter är generellt väldigt osäkra mycket beroende på att jonsammansättning är olika i olika vatten. Det gör att det vanligtvis inte går att få ett salinitetsvärde med större noggrannhet än en decimal (Tengberg, pers. k.). Hur stor del av flödet genom Ålkistan som ska representeras av de olika mätpunkterna är svårt att avgöra. Medrivning kan dessutom medföra att en större mängd salt än beräknat förs med genom Ålkistan. Medrivning kan förekomma både för in- och utflöden. Detta gör att massbalansberäkningarna bedöms vara mindre tillförlitliga än beräkningarna gjorda utifrån Brunnsvikens vattenbalans.

En jämförelse mellan flödet genom Ålkistan beräknat utifrån Brunnsvikens vattenbalans och flödet beräknat utifrån strömmätningar gjorda 2006/2007 (avsnitt 2.1.3), visade att periodiciteten för flödet är lika, oberoende av vilken beräkningsmetod som används. Flödets storlek skiljer sig dock. Flöden beräknade utifrån strömmätningarna är i regel något lägre (bilaga 7), bortsett från en kortare period då storleksordningen för flödet är av samma storlek som flödet beräknat utifrån vattenståndsdata.

Uppskattningen av storleken på flödet genom Ålkistan som gjordes utifrån november månads vattenståndsmätningar, visade att flödet beräknat utifrån Brunnsvikens vattenbalans är rimlig. Beräkningarna gjorda utifrån strömmätningarna underskattar troligen flödet genom Ålkistan något.

Resultatet av jämförelsen mellan flödet genom Ålkistan beräknat utifrån högupplösta data och pumpflödet var att pumpningen har väldigt liten påverkan på det totala flödet. Pumpflödet är omkring 10 % av ett typiskt flöde genom Ålkistan. Då det månadsvisa nettoflödet genom Ålkistan jämfördes med pumpflödet var resultatet att flödena var i princip lika stora. Att tryckkurvorna för Brunnsviken och Edsviken följer varandra åt styrker påståendet att pumpningen inte påverkar flödets storlek nämnvärt. Detta behöver dock inte innebära att pumpningen är verkningslös. Jämfört med det naturliga flödet genom Ålkistan måste flödets storlek ändras motsvarande pumpflödets storlek. Då vattnet för pumpning tas vid botten måste detta vatten ersättas.

### 5.4 FLÖDETS INVERKAN PÅ SYREDYNAMIKEN

Flödet genom Ålkistan svänger med en relativt kort periodtid på tolv timmar. Allt inflöde ger inte effekt på syrgashalten i Brunnsviken. Orsaken till detta är troligen att densiteten på det inströmmade vattnet varit lägre än densiteten på vattnet i Brunnsviken på de djup där mätningar har utförts. Huruvida snabba fluktuationer i flödet påverkar syrgashalten i Brunnsviken eller inte är svårt att avgöra då densiteten på det inströmmade vattnet har varit låg. Perioder där flödet möjligen kan ha haft påverkan på syrgashalten identifierades. Att avgöra om det är flödet genom Ålkistan som påverkat syrgashalten under oktober månad var

emellertid svårt då effekten av flödet är svår att skilja från höstomblandningen som ägde rum under samma period. Densiteten på inströmmande vatten var under oktober högre än densiteten på bottenvattnet, vilket gör att flödet genom Ålkistan teoretiskt sett har potential att påverka syrgashalten. Under våren/försommaren är det svårt att skilja effekter av flödet från primärproduktion. Då densiteten under denna period var låg och syretopparna såg ut att följa solinstrålningen är det troligt att primärproduktionen haft störst inverkan på variationerna i syrgashalt under perioden.

## **5.5 PUMPNINGENS EFFEKT PÅ SYREDYNAMIKEN**

Att syrgashalten varierar mycket på kort tid i Brunnsviken gör att sammanställningen av månadsmätningarna för syre, som presenterades i avsnitt 2.1.3, inte är tillförlitlig. Jämförelsen mellan månadsmätningar och mätningar gjorda med kortare tidsskala, som presenterades i avsnitt 4.2, visar visserligen att trenden varit den samma för båda mätserierna under den studerade perioden. Osäkerheten för varje enskild månadsmätning är dock så stor att inga slutsatser om pumpningens effekt på syrgashalten kan dras utifrån månadsmätningarna. För att utvärdera vilken effekt pumpningen har haft i Brunnsviken bör alltså data med en hög tidsupplösning användas. Det är trots detta meningsfullt att göra månadsmätningar då dessa utgör ett bra hjälpmedel vid kontroll av data som härstammar från strängssystemet. För att kontrollen ska vara tillförlitlig är det viktigt att ange exakt tidpunkt för månadsmätningen.

För att studera pumpningens effekt på syredynamiken är det nödvändigt att använda ett dataset som innefattar syrgashaltens hastiga variationer. Pumpningen har under den studerade perioden inte gjort att syrgashalten för bottenvattnet kunnat hållas över tröskelvärdet på 2 mg/l. Det var heller inte väntat, då målet med pumpningen främst har varit att hålla ner oxyklinen. Förutom tröskelvärdet på 2 mg/l är även oxyklinens läge i djupled ett värdefullt mått på pumpningens effektivitet. Ett tänkbart scenario är att oxyklinens läge påverkas av pumpningen men att perioder med syrgashalter i bottenvattnet under tröskelvärdet inte går att undvika. Ett annat scenario som skulle vara intressant att studera är om längden på perioder med syrebrist kortas ned då pumpning utförs. Det skulle i så fall innebära en minskad stress för bottenlevande organismer.

Det hade varit värdefullt att ha syredata även för mindre djup i Brunnsviken eftersom det hade inneburit att oxyklinens läge samt pumpningens effekt på oxyklinens läge då varit möjlig att studera. Hur nära ytan syremätningar behöver göras går inte att bestämma utifrån tillgängliga data. Det är möjligt att det räcker med sensorn på omkring 4,9 meters djup som plockades bort på grund av otillförlitliga värden. För att avgöra det måste syremätningarna med strängssystemet fortsätta i Brunnsviken.

Inom ramen för detta examensarbete har det inte varit möjligt att utreda pumpningens effekt på syrgashalten i Brunnsviken. Syredynamiken i ett akvatiskt system är komplex och beroende av ett antal olika faktorer (se figur 3). För att urskilja pumpningens effekt från bland annat säsongsvariationer bör pumpningen varieras och responsen på syret studeras. Variationerna i pumpning bör ske under den period då skiktningens stabiliteten är som störst för att undvika effekter av naturlig omblandning i vertikalled. Pumpningen bör pågå under en tid

för att respons i syrgashalt ska uppnås och därefter bör pumpningen upphöra så att syrgashalten avklingar innan nästa pumpningsperiod påbörjas.

Utpumpningen av bottenvattnet är en kostsam åtgärd. Det vore därför önskvärt om pumpningen kunde styras så att den sker endast då förhållandena är gynnsamma, d.v.s. när effekt på syrgashalten uppnås. Att densiteten på inströmmande vatten i regel är lägre densitet än Brunnsvikens vatten gör att det betydande är att bottenvatten med låg syrgashalt pumpas bort. Det vatten som pumpas bort måste ersättas och givetvis syresätts även ytvattnet i Brunnsviken. Ju äldre det vatten som pumpas ut är desto bättre resultat ger pumpningen. Detta konstaterades även i studien av olika pumpscheman gjord av Engqvist (2007).

Om fortsatt utvärdering skulle visa att utpumpningen inte ger önskat resultat skulle alternativa pumpstrategier kunna utredas. Ett alternativ skulle kunna vara att istället pumpa ned syresatt ytvatten. Detta har gjorts framgångsrikt i Byfjorden genom projektet BOX där vattnet nu är syresatt ned till botten. Principen för pumpningen är att ytvatten pumpas ned, med en hastighet av  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , till omkring 35 meters djup där det skjuts ut i fyra strålar. Detta gör att inblandningen ökar med omkring en faktor 10. Det vatten som pumpas ned har lägre densitet än bottenvattnet och stiger uppåt i form av s. k. buoyancy plymer, med ytterligare inblandning som följd. Då det syre som pumpas ned i Byfjordens bottenvatten endast motsvarar omkring hälften så mycket som det som förbrukas vid botten är vikens vattenutbyte en viktig faktor. En sänkning av densiteten genom att ytvatten pumpas ned ökar chansen för att densiteten på inflödande vatten ska vara så hög att det tar sig ned och kan syresätta vikens bottenvatten (Stigebrandt, pers. k.). Andra frågeställningar som skulle kunna undersökas i Brunnsviken är hur stor den rumsliga variationen i syrgashalt är samt hur kopplingen mellan syre och fosfor ser ut.

## 6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

- Den högupplösta dataserie av konduktivitet, temperatur och syrgashalt som finns för Brunnsviken är en av få serier i sitt slag. Tidigare har övervakning av dessa parametrar skett med betydligt längre intervall, ofta på månadsbasis. Det gör att mätningarna i Brunnsviken är av stort intresse och det vore därför bra om de fick fortgå under en längre tid.
- Månadsmätningar bör inte användas för att beskriva syredynamiken i ett akvatiskt system då syrgashalten varierar mycket på kort tidsskala. Månadsmätningar är dock ett bra hjälpmedel för att upptäcka mätardrift. Viktigt är då att exakt tidpunkt för mätningen noteras. Vid miljöövervakning bör syremätningar göras kontinuerligt, åtminstone varje timme för att de hastiga variationerna i syrgashalt ska kunna observeras.
- Det är tillräckligt att rengöra sensorerna i Brunnsviken en gång per år för att inte felaktiga mätningar ska genereras.
- Den rumsliga variabiliteten i syrgashalt i Brunnsviken är troligen av mindre betydelse än den tidsmässiga variabiliteten.
- Vid beräkningar av flödet genom Ålkistan utgående från vattenståndsmätningar måste tryckdata med högre upplösningen än en halvtimme filtreras för att undvika att storleken på flödet över- eller underskattas till följd av störningar från vågor. Det finns sensorer tillgängliga på marknaden som har denna funktion inbyggd.
- Beräkningar gjorda utifrån strömmätningar 2006/2007 underskattar troligtvis flödet genom Ålkistan.
- Perioder av syrebrist har ej gått att undvika. Det var heller inte väntat då målet med pumpningen främst har varit att hålla ner oxyklinen. Oxyklinens läge har ej varit möjligt att studera p.g.a. trasig syresensor.
- Någon effekt i syrgashalt av flödet genom Ålkistan har inte gått att påvisa under den studerade perioden. Det beror troligen på att densiteten på det inströmmande vattnet i regel är lägre än densiteten på Brunnsvikens bottenvatten. I de fall då densiteten på det inströmmande vattnet är högre är det troligt att inflödet påverkar syrgashalten i Brunnsvikens bottenvatten. Det viktiga med pumpningen är att syrefattigt vatten förs bort från Brunnsviken och ersätts av syrerikare vatten. Pumpflödet är mycket litet i förhållande till flödet genom Ålkistan och förmår inte att öka inflödet nämnvärt.
- Tidigare sammanställningar av pumpningens effektivitet är inte tillförlitliga då dessa baseras på månadsmätningar av syrgashalt. Pumpningens effekt på syrgashalten i Brunnsviken har ej varit möjlig att utreda inom ramen för detta examensarbete. För att göra detta måste mätningarna i Brunnsviken fortgå.

## 7 ORDLISTA

<b>Advektion</b>	Transportprocess, där det som transporteras följer med en kropp i rörelse. Syremolekylerna följer med i vattnets rörelse.
<b>Aerob</b>	Fri tillgång på syre.
<b>Akvatisk</b>	Tillhörande eller bildat i vatten eller vattenmiljöer.
<b>Anaerob</b>	Utan tillgång på syre.
<b>Antropogen</b>	Då människan orsakar, påverkar eller skapar något. Miljöproblem som är antropogent orsakade hade inte uppstått utan mänsklig inblandning.
<b>Batymetri</b>	Terrängens fysiska form under vatten. Motsvarigheten till topografi som används om terrängens fysiska form på land.
<b>Bentisk</b>	Bottenlevande.
<b>Bioturbation</b>	Bottenlevande organismer som flyttar runt material i sedimentet.
<b>CTD-mätningar</b>	Mätningar av konduktivitet, temperatur och djup.
<b>Diffusion</b>	Transportprocess, där ämnestransport sker genom att atomernas eller molekylernas egenrörelsers slumpvisa förändring.
<b>Hypolimnion</b>	Den del av vattenmassan som ligger under språngskiktet i en termiskt skiktad sjö eller vik.
<b>In situ</b>	På plats. Används för till exempel för att beskriva att mätningar sker på plats och inte i laboratorium.
<b>Intern fosforbelastning</b>	När fosfor som finns i sedimenten läcker till vattenmassan och därmed blir tillgängligt för primärproducenter i vattenmassan.
<b>Makrobentos</b>	Bottenlevande organismer som är så stora att de är synliga med blotta ögat.
<b>Medrivning</b>	Massförflyttning mellan två vattenmassor orsakat av turbulens på gränsskiktet. Medrivning uppstår ofta mellan en relativt stillastående vattenmassa och en mer turbulent. Förflyttningen sker alltid till den mer turbulenta vattenmassan.
<b>Oxyklin</b>	Språngskikt för syre.
<b>Spångskikt</b>	Skikt i vattenmassan i en sjö eller havet där en egenskap, som till exempel temperatur, salthalt eller syrgashalt, förändras mycket på ett litet djupintervall.
<b>Syrebrist</b>	Enligt definition då syrgashalten är lägre än 2 mg/l i vatten.
<b>Tröskelvik</b>	En vik vars inlopp är grunt och därmed hindrar vattenutbyte.
<b>Uppvällning</b>	Då bottenvatten förflyttas uppåt i vattenmassan för att kompensera för det ytvatten som med vindens hjälp förflyttas ut från kusten.

## 8 REFERENSER

- Conley, D. J., Björck, S., Bonsdorff, E., Carstensen, J., Destouni, G., Gustafsson, B. G., Hietanen, S., Kortekaas, M., Kousa, H., Meier, M. H. E., Müller-Karulis, B., Nordenberg, K., Norkko, A., Nürnberg, G., Pitkänen, H., Rabalais, N. N., Rosenberg, R., Savchuk, O. P., Slomp, C. P., Voss, M., Wulff, F. & Zillén, L. (2009) Hypoxia-Related Processes in the Baltic Sea. *Environmental Science and Technology*, vol. 43, No. 10, ss. 3412-3420
- Diaz, R. J. & Rosenberg, R. (2008) Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, vol. 321, ss. 926-929
- Engqvist, A. (2007) *Analys av förutsättningarna för att effektivisera Brunnsvikens vattenutbyte genom olika pumpschemor för bottenvattnet*. Konsultrapport, A&I Engqvist Konsult HB, 33 s.
- Eriksson, A. (2009) *Grundvattenmagasinet – Solna*. Statens geologiska undersökning. K 154, 9 s.
- Finlands miljöcentral.(2010) *Syresättning av havets botten testas i samnordiskt projekt i västra Finska vikens kustvatten och nära Stockholm (PROPPEN)*.  
<http://www.environment.fi/default.asp?node=23997&lan=sv#a0> (2010-12-01)
- Garcia, H. E., & Gordon, L. I. (1992) Oxygen Solubility in Seawater: Better Fitting Equations. *Limnology and Oceanography*. Vol. 37, No. 6, pp. 1307-1312.
- Gunnars, A. & Blomqvist, S. (1997) Phosphate exchange across the sediment-water interface when shifting from anoxic to oxic conditions - an experimental comparison of freshwater and brackish-marine systems. *Biogeochemistry*, vol. 37, No. 3, ss. 203-226.
- Göransson, P., Karlsson, M. & Tengberg, A. (2009) Öresund – havsmiljö i förändring. *HavsUtsikt* 2/2009, ss. 12-13
- Hayashi, M. (2004) Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 96, ss. 119-128
- HELCOM.(2007) *HELCOM Baltic Sea Action Plan*. HELCOM, Krakow, 101 s. (tillgänglig online).
- Holm, N. G. (1978) Phosphorus exchange through the sediment-water interface. Mechanisms studies of dynamic processes in the Baltic Sea. *Microbial Geochemistry*, vol. 3, s. 149.
- Hull, V., Parrella, L., & Falcucci, M. (2008) Modelling dissolved oxygen dynamics in coastal lagoons. *Ecological Modelling*, 211, ss.468-480.
- Hupfer, M. & Lewandowski, J. (2008) Oxygen Controls the Phosphorus Release from Lake Sediments – a Long-Lasting Paradigm in Limnology. *International Review of Hydrobiology*, vol. 93, ss. 415-432.

- Hydes, D. J., Hartman, M. C., Kaiser, J. & Campbell, J. M. (2009) Measurement of dissolved oxygen using optodes in a FerryBox system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 83, ss. 485-490.
- Håkansson, L. & Duarte, C. M. (2008) Data variability and uncertainty limits the capacity to identify and predict critical changes in coastal systems : A review of key concepts. *Ocean & coastal management*, vol. 51, no. 10, ss. 671-688.
- Johansson, B. (1997) Behavioural response to gradually declining oxygen concentration by Baltic Sea macrobenthic crustaceans. *Marine Biology*, vol.129, ss. 71-78.
- Lewis, E. L. (1980) The Practical Salinity Scale 1978 and Its Antecedents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 5, No. 1, ss.3-8.
- Marine System Analysis Group. (2010) <http://www.marsys.se> (2010-12-01)
- Mortimer, C. H. (1942) The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes: III and IV. *Journal of Ecology*, vol. 30, ss. 147-201.
- Naturvårdsverket. (2007) Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag - Bilaga A till *Handbok 2007:4*, 133 s. (tillgänglig online).
- Nicholson, D., Emerson, S. & Eriksen, C. C. (2008) Net community production in the deep euphotic zone of the subtropical North Pacific gyre from glider surveys. *Limnology and Oceanography*, vol. 53, ss. 2226–2236.
- Norberg, B. (1997) *Vattenundersökningar i Brunnsviken 1987-1996*. Examensarbete, Stockholms universitet, 45 s.
- Peña, M. A. Katsev, S., Oguz, T. & Gilbert, D. (2010) Modeling dissolved oxygen dynamics and hypoxia. *Biogeosciences*, vol. 7, ss. 933–957
- Routh, J., Meyers, P. A., Gustafsson, Ö., Baskaran, M., Hallberg, R., & Schöldström, A. (2004) Sedimentary geochemical record of human-induced environmental changes in the Lake Brunnsviken watershed, Sweden. *Limnology & Oceanography*, vol.49, No.5, ss. 1560-1569
- SMHI (2010) *Modellberäknad vattenföring och vattenkvalitet- Modellberäknad vattenföring och vattenkvalitet i Sveriges sötvattenförekomster*. Information om SMHI:s Vattenweb. (tillgänglig online)
- Sorensen, J. A. & Glass, G. E. (1987) Ion and temperature dependence of electrical conductance for natural waters. *Analytical Chemistry*, vol. 59, ss. 1594-1597.
- Stenström, P. (2007) *PM – Brunnsviken – Ström- och CTD-mätningar 2006-2007*. Konsultrapport, WSP, 18 s.
- Stockholm Vatten. (2000) *Vattenprogram för Stockholm - sjöar och vattendrag*. 10 s. (tillgänglig online).

Sveriges nationalatlas. (1995) *Klimat, sjöar och vattendrag*. 1:a uppl. Bra Böcker, Höganäs, s. 68

Tengberg A., Hovdenes, J., Andersson, J. H., Brocandel, O., Diaz, R., Hebert, D., Arnerich, T., Huber, C., Körtzinger, A., Khripounoff, A., Rey, F., Rønning, C., Sommer, S. & Stangelmayer, A. (2006) Evaluation of a life time based optode to measure oxygen in aquatic systems. *Limnology and Oceanography, Methods*, vol. 4, ss. 7-17.

Unesco/ICES/SCOR/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards (1981) *Background papers and supporting data on the international equation of state of sea water 1980*. Unesco Technical Papers in Marine Science, No. 38, 192 s.

Viktorsson, L., Almroth Rosell, E., Tengberg, A., Vankevich, R., Neelov, I., Isaev, A., Kravtsov, V. & Hall, P. O. J. Benthic phosphorus dynamics in the Gulf of Finland, Baltic Sea. Manuskript, Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs universitet.

WEBAP (2010) <http://webap.ivl.se/> (2010-12-01)

Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A. J., Levin, L., Naqvi, W. A., Middelburg, J. J., Scranton, M., Ekau, W., Peña, A., Dewitte, B., Oguz, T., Monteiro, P. M. S., Urban, E., Rabalais, N. N., Ittekkot, V., Kemp, W. M., Ulloa, O., Elmgren, R., Escobar-Briones, E. & Van der Plas, A. K. (2010) Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, vol. 7, ss. 1443-1467

Zillén, L., Conley, D. J., Andrén, T., Andrén, E. & Björck, S. (2008) Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth-Science Reviews*, vol. 91, ss. 77-92

Zumdahl, S. S. (2005) *Chemical Principles*. 5:e uppl., Houghton Mifflin Company, USA, 1070 s.

### **Personlig kommunikation**

Hjerdt, Niclas (2010) Marknadsansvarig, SMHI, Telefonsamtal (2010-11-09)

Lännergren, Christer (2010 & 2011) Stockholm Vatten, Mailkontakt (september 2010–januari 2011)

Stigebrandt, Anders (2011) Professor och chef för Marine System Analysis Group, Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs universitet. Telefonsamtal (2011-01-31)

Tengberg, Anders (2010 & 2011). Docent, Göteborgs universitet samt vetenskaplig rådgivare, AADI Baltic, Telefon- och mailkontakt (oktober 2010–januari 2011)

Värnhed, Bo (2010 & 2011) Stockholm Vatten, Mailkontakt (september 2010–januari 2011)

## BILAGOR

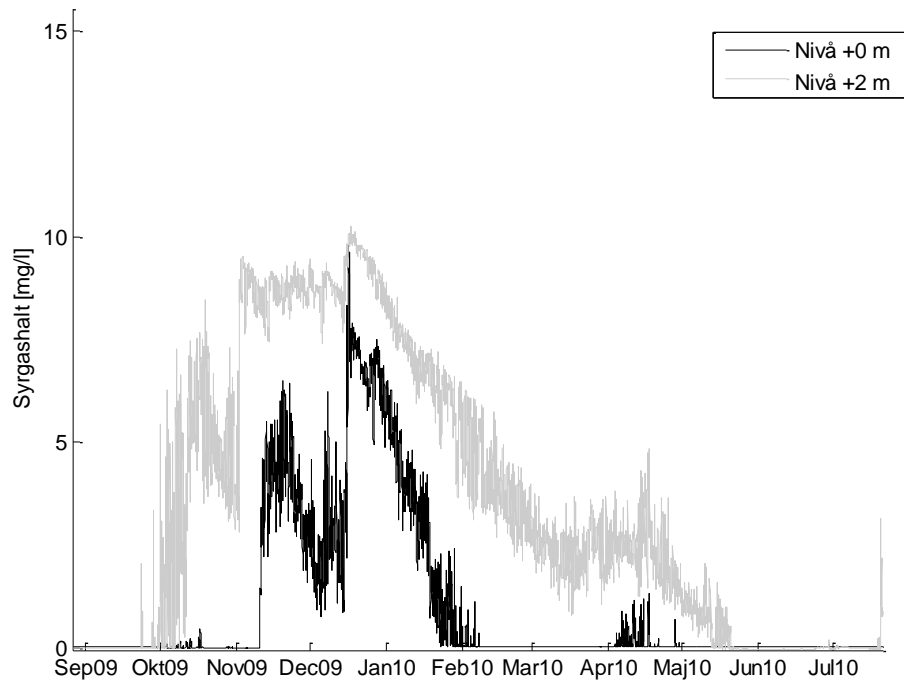
### BILAGA 1 Sammanställning av tidsupplösning för mätningarna med strängsystemet i Brunnsviken

Tabell B1 – Sammanställning av vilken tidsupplösning som använts för olika tidsperioder i Brunnsviken.

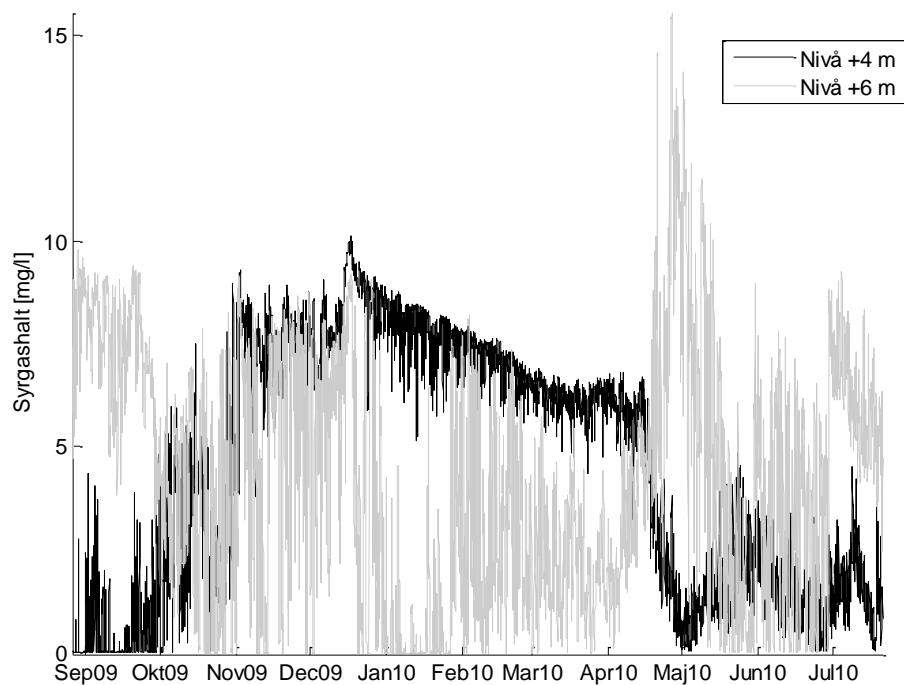
Mätning	Datum	Mätintervall [minuter]	Kommentar <sup>1</sup>
1-754	2009-08-26 11:50:14 – 2009-08-31 17:20:15	10	
755-1606	2009-08-31 18:46:51 – 2009-10-06 05:46:50	60	
1607-2050	2009-10-06 07:03:19 – 2009-10-09 08:53:20	10	
2051-5098	2009-10-09 09:17:00 – 2009-10-30 13:07:00	10	
5099-5785	2009-10-30 14:01:28 – 2009-11-04 08:21:28	10	
5786-9124	2009-11-04 08:55:52 – 2009-11-27 13:15:51	10	
9125-9837	2009-11-27 14:15:26 – 2009-12-02 12:55:26	10	
9838-10701	2009-12-02 13:11:52 – 2009-12-08 13:01:52	10	
10702-18047	2009-12-08 13:17:04 – 2010-01-28 13:27:04	10	
18048-22188	2010-01-28 13:46:00 – 2010-02-26 07:46:00	10	
22189-23341	2010-02-26 08:53:45 – 2010-04-15 08:53:45	60	Pumpen startades 16:e mars
23342-25139	2010-04-15 10:29:53 – 2010-06-29 07:29:53	60	Upptagning för byte av sensor 29/6-2010
25140-25668	2010-06-29 09:17:01 – 2010-07-21 09:17:01	60	
-	2010-07-21 09:17:02 – 2010-08-03 09:03:10	-	Data saknas, okänd anledning
25669-25860	2010-08-03 09:03:11 – 2010-08-11 08:03:11	60	Fel på mätsystemet

1. Kortare uppehåll i dataserien beror bland annat på omprogrammering av loggern.

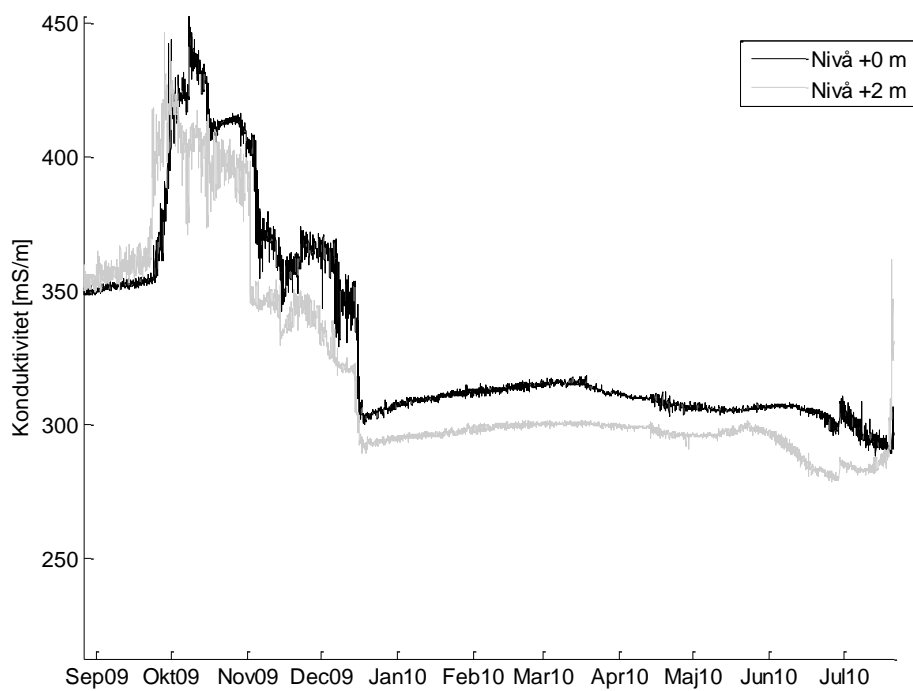
## BILAGA 2 Rådata från strängsystemet i Brunnsviken



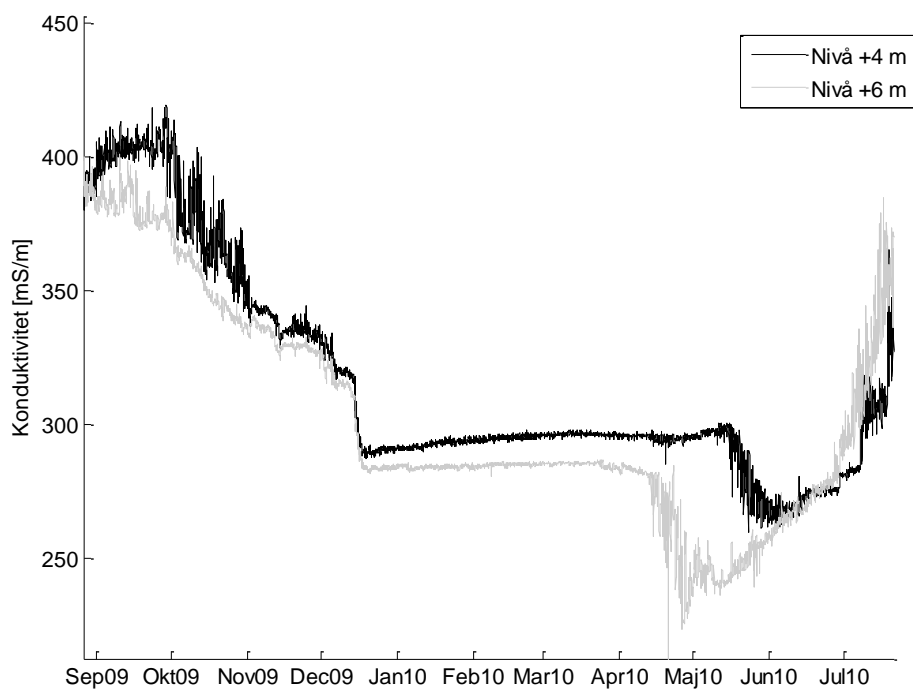
**Figur B1** Syredata för mätnivåerna 0 och 2 meter över loggern. Nivån 2 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 8,9 meter.



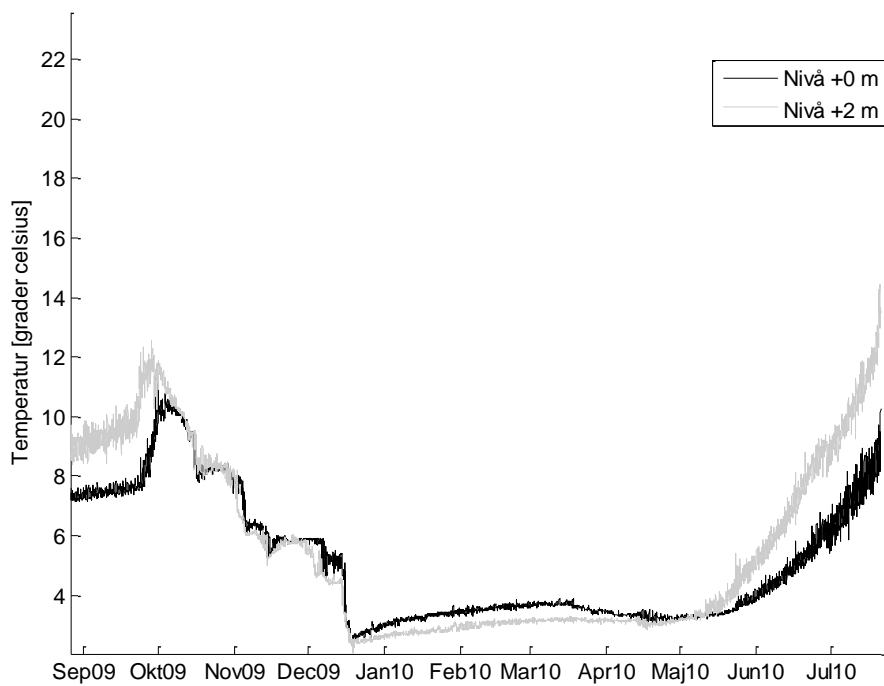
**Figur B2** Syredata för mätnivåerna 4 och 6 meter över loggern. Nivån 6 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 4,9 meter.



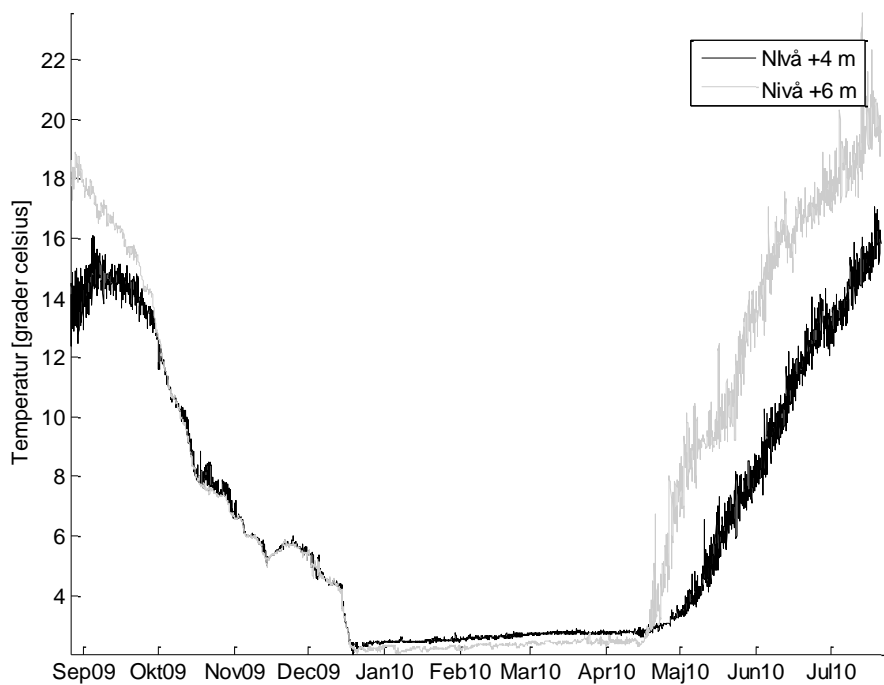
**Figur B3** Konduktivitetsdata för mätnivåerna 0 och 2 meter över loggern. Nivån 2 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 8,9 meter.



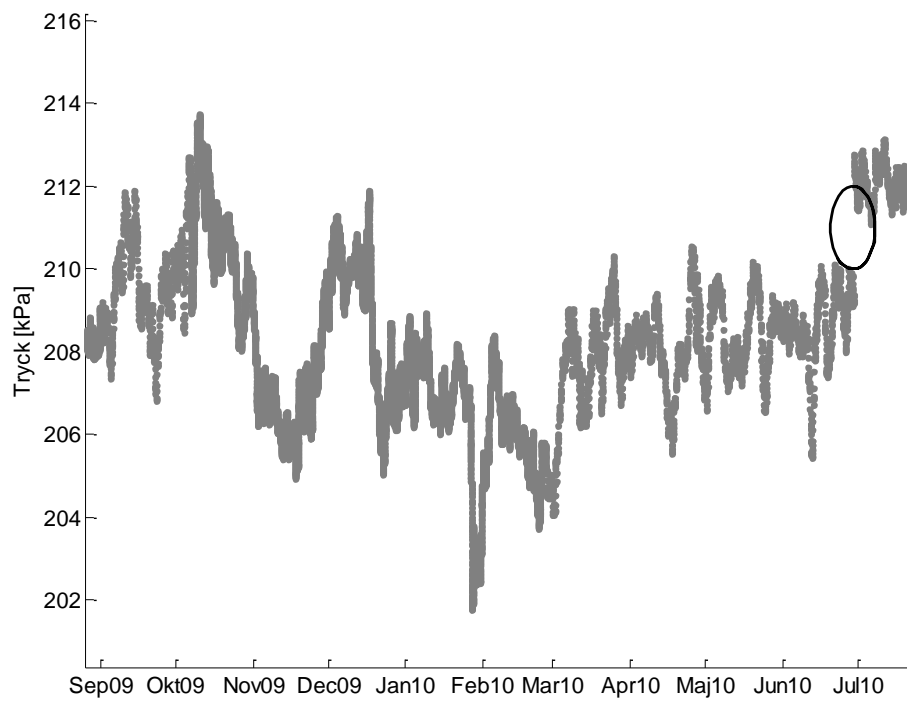
**Figur B4** Konduktivitetsdata för mätnivåerna 4 och 6 meter över loggern. Nivån 6 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 4,9 meter.



**Figur B5** Temperaturdata för mätnivåerna 0 och 2 meter över loggern. Nivån 2 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 8,9 meter.

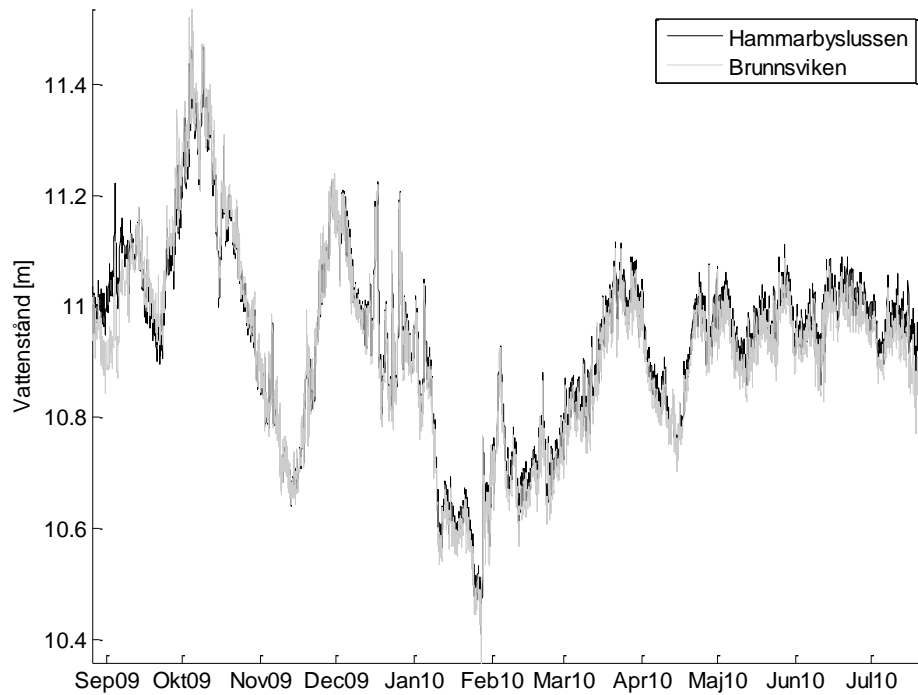


**Figur B6** Temperaturdata för mätnivåerna 4 och 6 meter över loggern. Nivån 6 meter över loggern motsvarar ett djup av omkring 4,9 meter.



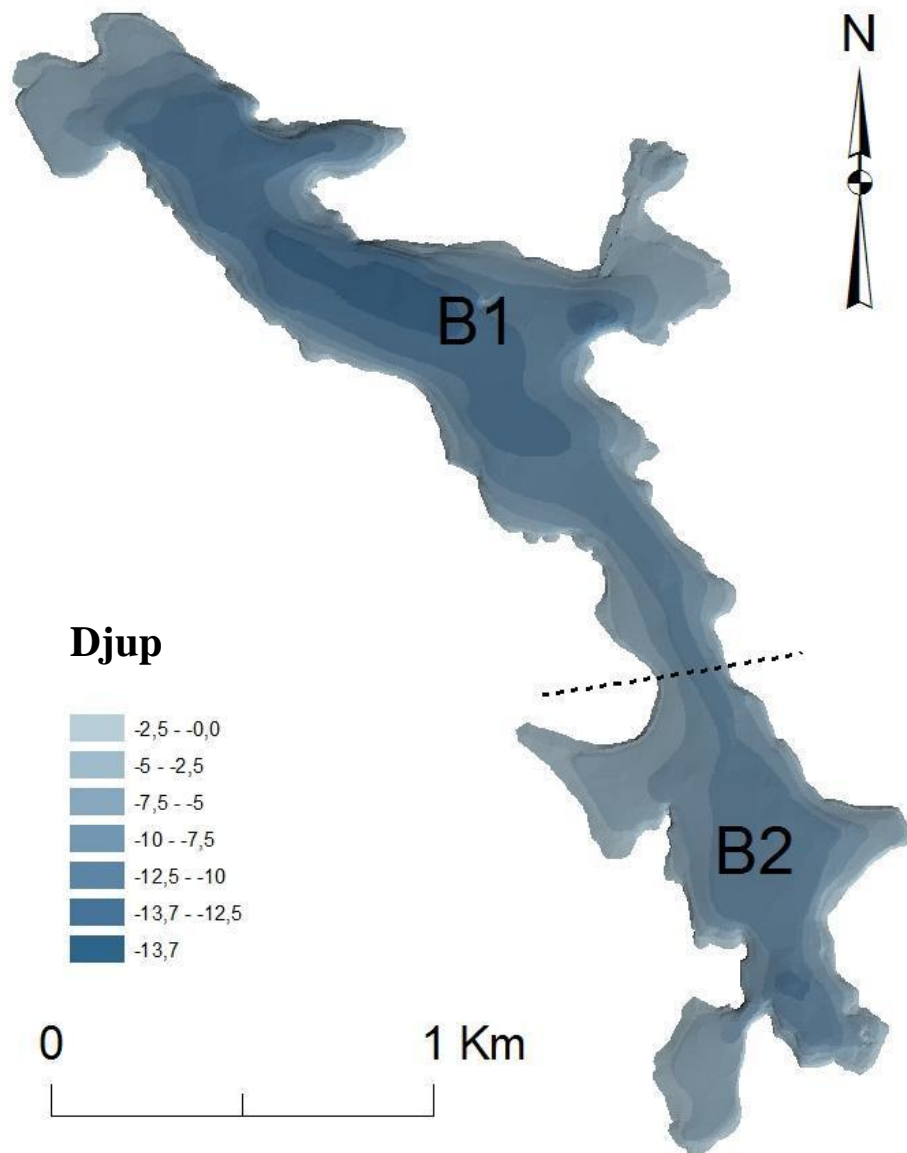
**Figur B7** Tryckdata för mätnivån 0 meter över loggern. Brott i tryckdata till följd av upptagning av mätsystemet är markerat med en svart cirkel.

### BILAGA 3 Jämförelse av vattenståndet mellan Brunnsviken och Hammarbyslussen

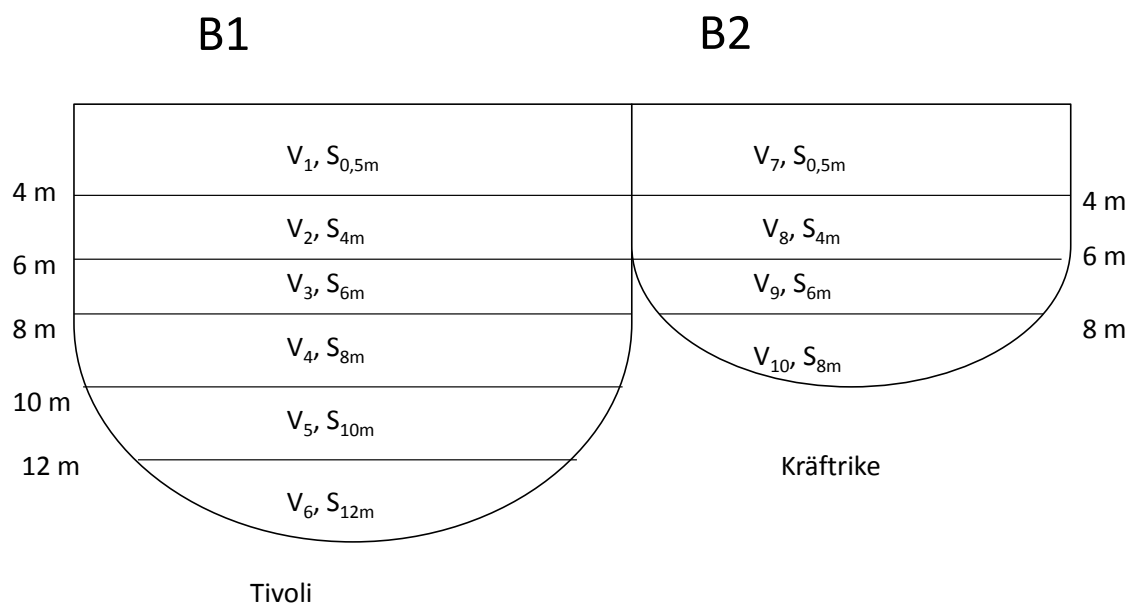


**Figur B8** Jämförelse mellan vattenståndsmätningar gjorda vid Hammarbyslussen och vattenståndsmätningar gjorda med strängsystemet i vid provpunkten *Tivoli* i Brunnsviken. Vattenståndet för Hammarbyslussen är upplyft till en nivå motsvarande vattenståndet i Brunnsviken för en enklare jämförelse.

## BILAGA 4 Delbassänger och delvolymmer för massbalansberäkningar



**Figur B9** Indelning i två delbassänger för beräkning av mängden salt i Brunnsviken



**Figur B10** Schematisk skiss över indelningen av delvolymerna för beräkning av mängden salt i Brunnsviken

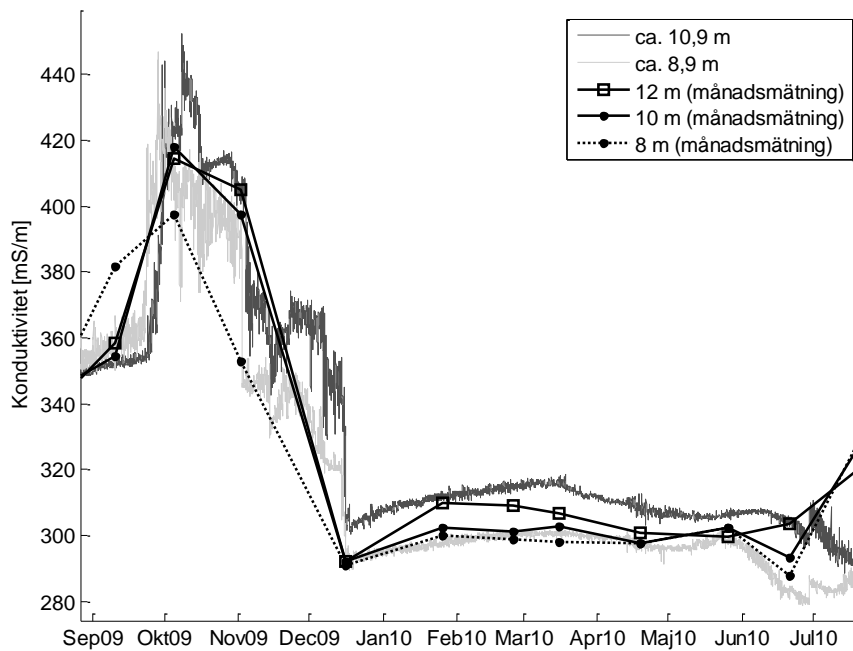
**Tabell B2** Delvolymerna i delbassäng 1 för beräkning av totala mängden salt i Brunnsviken.

Djup [m]	Volym(B1 –Tivoli)	Volym [m <sup>3</sup> ]
0-4	V1	3591441,22
4-6	V2	1405691,01
6-8	V3	1139222,33
8-10	V4	770266,49
10-12	V5	299778,56
> 12	V6	50983,79

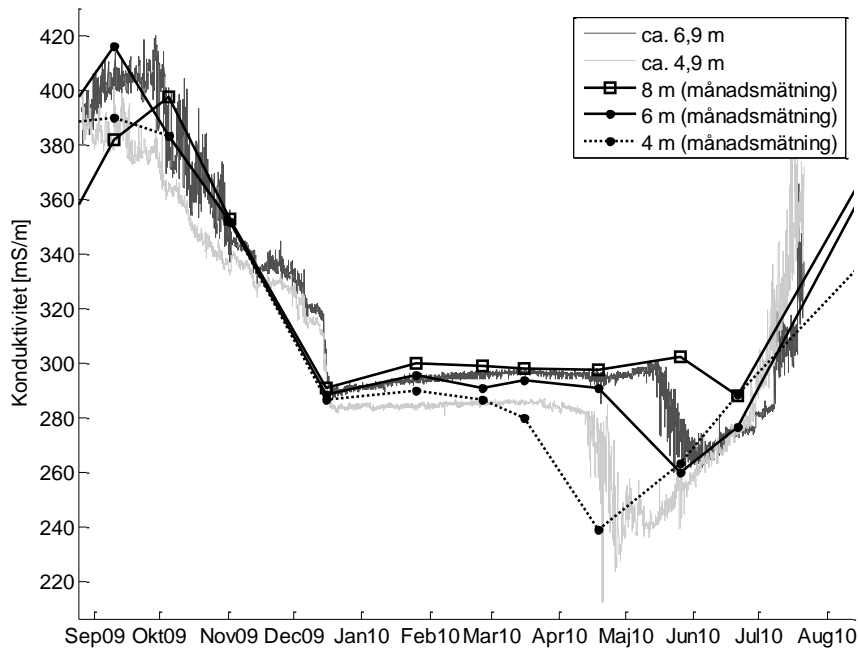
**Tabell B3** Delvolymerna i delbassäng 2 för beräkning av totala mängden salt i Brunnsviken.

Djup [m]	Volym (B2-Kräfftrike)	Volym [m <sup>3</sup> ]
0-4	V7	1733598,89
4-6	V8	560155,39
6-8	V9	376905,3
> 8	V10	81027,11

## BILAGA 5 Jämförelse mellan konduktivitetsmätningar med strängssystemet och månadsmätningar

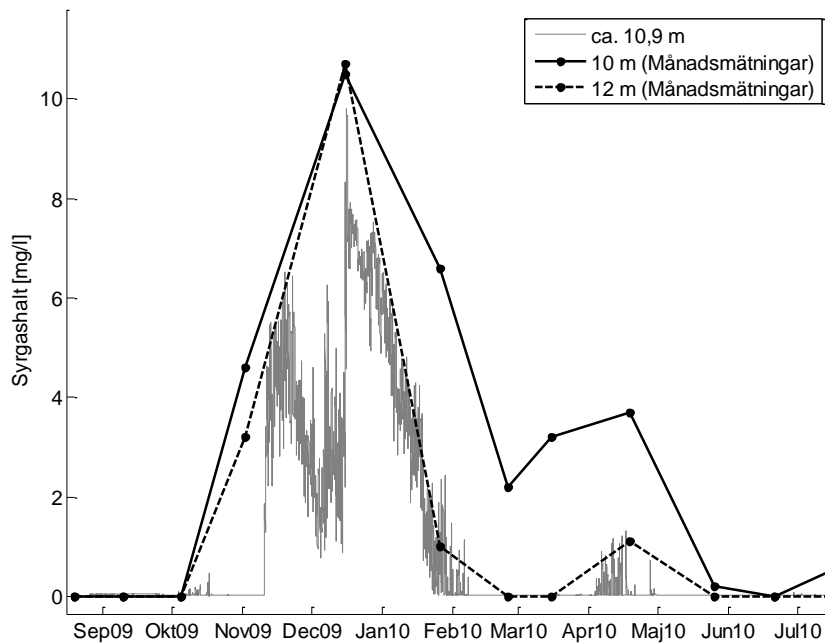


**Figur B11** Jämförelse mellan månadsmätningar på 8, 10 och 12 meters djup och mer högupplösta mätningar utförda med strängssystemet på omkring 8,9 och 10,9 meters djup.

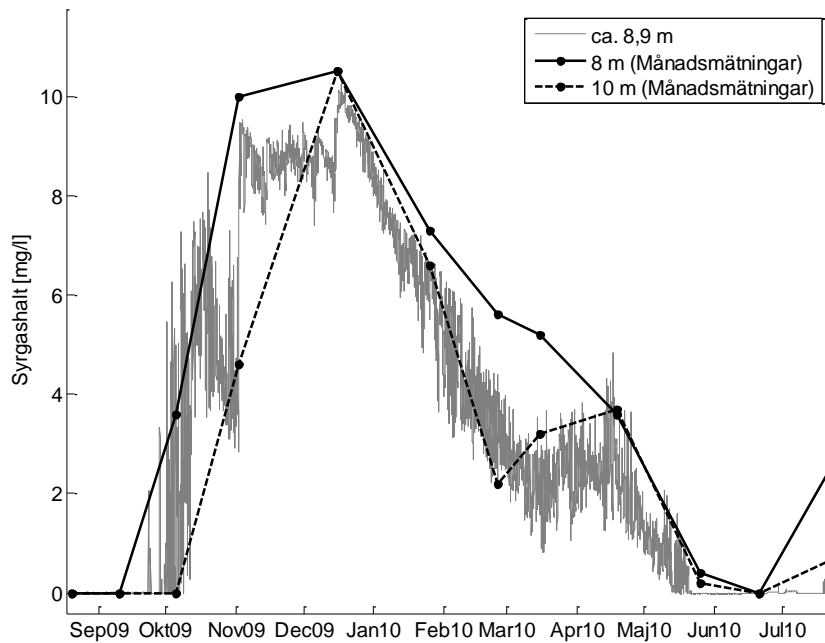


**Figur B12** Jämförelse mellan månadsmätningar på 4, 6 och 8 meters djup och mer högupplösta mätningar utförda med strängssystemet på omkring 4,9 och 6,9 meters djup.

## BILAGA 6 Jämförelse mellan syremätningar med strängsystemet och månadsmätningar

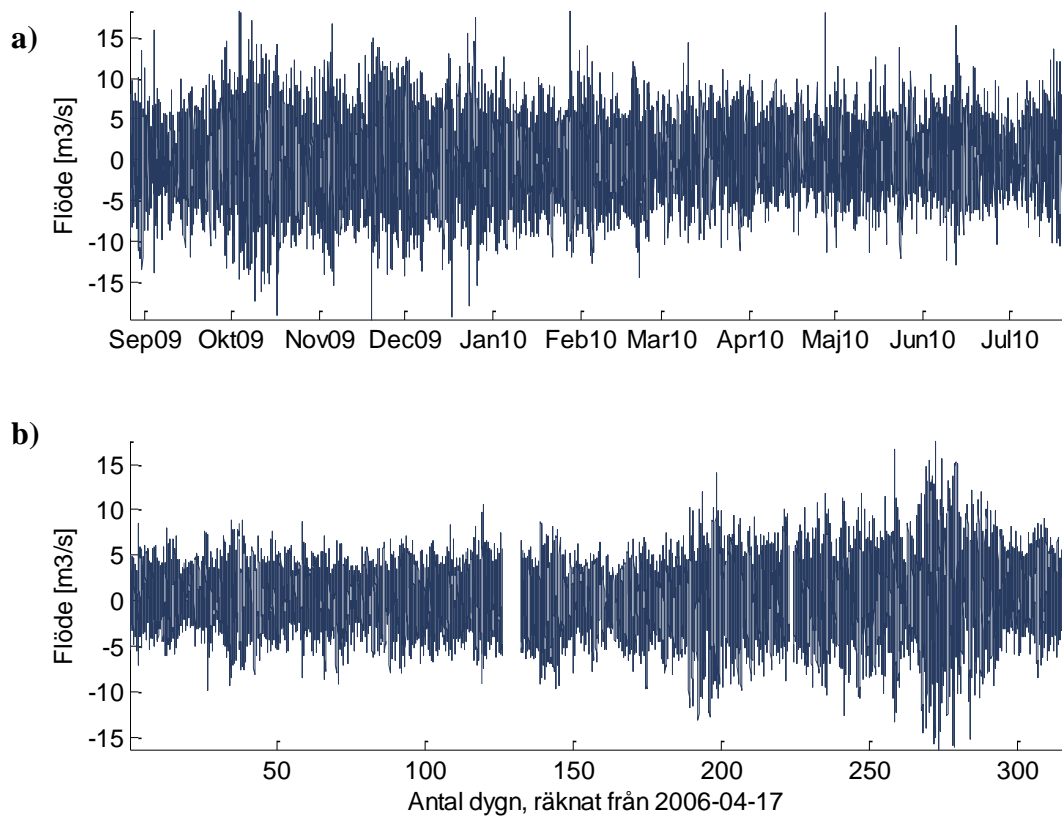


**Figur B13** Jämförelse mellan månadsmätningar på 10 och 12 meters djup och mer högupplösta mätningar utförda med strängsystemet på omkring 10,9 meters djup.



**Figur B14** Jämförelse mellan månadsmätningar på 8 och 10 meters djup och mer högupplösta mätningar utförda med strängsystemet på omkring 8,9 meters djup.

**BILAGA 7 Flöde genom Ålkistan beräknat utifrån strömmätningar gjorda 2006/2007.**



**Figur B15 a)** Flöde genom Ålkistan beräknat utifrån vattenbalansen 2009/2010. **b)** Flöde genom Ålkistan beräknat utifrån strömmätningar 2006/2007.