

# Grundvattenutflödet ur Badelundaåsen vid Frostbrunnsdalen

– kvantifiering och ursprungsbestämning  
med hjälp av spårämnen och massbalansmodell.

---

Joel Frandsen

## Referat

### **Grundvattenutflödet ur Badelundaåsen vid Frostbrunnsdalen – kvantifiering och ursprungsbestämning med hjälp av spårämnen och massbalansmodell.**

*Joel Frandsen*

Den mäktiga Badelundaåsen, vilken sträcker sig flera tiotalet mil genom Svealand, utgör en mycket viktig resurs för vattenförsörjningen i dess närhet. Söder om Borlänge passerar åsen en lågpunkt i terrängen och grundvatten som flödar genom åsen tränger fram i stor mängd. Det utflödande grundvattnet har sitt ursprung i två olika sträckor av åsen, som ligger norr respektive söder om utströmningsområdet. I området ligger en kommunal vattentäkt vars vatten håller en så hög kvalitet att det utan behandling distribueras direkt ut på nätet. Midvatten AB har fått i uppdrag att revidera vattenskyddsområdet för denna vattentäkt. Information om det utflödande grundvattnet är av stort intresse i arbetet med vattenskyddsområdet och bidrar även till den allmänna hydrogeologiska kunskapen om förhållandena i dessa delsträckor av Badelundaåsen. Platsen bjuder en ovanlig möjlighet att med relativt direkta metoder kunna bestämma storleken på grundvattenflödet i dessa avsnitt av åsen, vilket också är syftet med detta examensarbete.

Kvantiteten av utflödande grundvatten har sökts genom flödesmätningar i ytvattendrag, en numerisk massbalansmodell samt punktvisa mätningar av utströmningen via utströmningsmätare. I arbetet med detta har elektrisk konduktivitet och temperatur använts som spårämne.

Massbalansmodellen och mätningen via utströmningsmätare gav en liknande bild av utströmningen. Massbalansmodellen var dock känslig för vissa indata och resultatet varierade därmed mycket över tid. Mätdata från utströmningsmätarna varierade även det mycket, främst mellan olika platser. Resultaten visade att den totala utströmningen av grundvatten i undersökningsområdet var ca 200-220 l/s varav ca 160 l/s härstammade söderifrån och 40-60 l/s norrifrån. Dessutom uttogs 20 l/s i vattentäkten. Grundvattenflödet (från norr) i åssträckningen som passerade genom Borlänges centrala delar var större än 40-60 l/s vilket tidigare beräkningar också visat. En del av detta grundvattenflöde läckte ut norr om undersökningsområdet. De tidigare uppskattningar som finns på utströmningen av grundvatten härstammade från söder ligger i samma storleksordning som resultatet från dessa nya beräkningar.

Nyckelord: källflöde, grundvatten, Badelundaåsen, spårämne, massbalans, elektrisk konduktivitet

*Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala universitet.*

ISSN 1401-5765

## **Abstract**

### **Groundwater outflow from the Badelunda esker at Frostbrunnsdalen – quantification and determination of origin by tracers and a mass balance model.**

*Joel Frandsen*

The mighty Badelunda esker, which stretches a long distance through Svealand, represents a very important resource for drinking water in its vicinity. South of Borlänge the esker crosses a low point in the terrain and groundwater from the esker emerges in numerous springs. The spring water originates from two different sections of the esker, which lie to the north and to the south of the springs. Near the springs the municipality has wells from which water is distributed without need of treatment because of the excellent quality of the groundwater. Midvatten AB has been asked to revise the water protection area for this water source. Knowledge about the groundwater flow is of great interest for establishing the water protection zone and also contributes to the general hydrogeological knowledge of the Badelunda esker. The main aim of this thesis was to determine the quantity of the spring flow. The means used to accomplish this included developing a numerical mass balance model and measuring flows in the streams along with various measurements of electric conductivity and temperature. At some locations the flux of groundwater to the streams was measured using seepage meters.

The mass balance model proved to be very sensitive to some of the input data. However the model and measurements by seepage meters methods gave similar results. The total spring flow was about 200-220 l/s of which about 160 l / s originated from the south and 40-60 l / s from the north. In addition, the municipal wells were pumped at a rate of 20 l / s. The groundwater flow passing central Borlänge was larger than the quantity of spring flow from the north (40-60 l/s) indicated. This has also been showed in earlier calculations. Parts of the flow in this section of the esker discharge before the water reaches the area of studied spring flow. Previous estimates of the groundwater flow coming from the south show the same magnitude as the result of these new calculations.

**Keywords:** spring flow, groundwater, Badelundaåsen, tracer, mass balance, electrical conductivity

*Department of Earth Sciences, Uppsala university, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala universitet*

ISSN 1401-5765

## **Förord**

Följande examensarbete avslutar mina studier till Civilingenjör i Miljö och Vattenteknik vid Uppsala Universitet. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och har utförts hos Midvatten AB i Borlänge. Examinator var Allan Rodhe, professor i hydrologi på Uppsala Universitet.

Jag vill rikta ett varmt tack till alla på Midvatten AB som på ett eller annat sätt har bidragit till examensarbetet och särskilt till min handledare Erik Kellner för all hjälp och goda råd. Ett tack riktas också till min ämnesgranskare Sven Halldin, professor i hydrologi på Uppsala Universitet vid Institutionen för Geovetenskaper, för konstruktiva synpunkter på rapporten. Ett tack till Lars-Åke Persson vid Vatthammars vattenkraftsstation för bidragande av data.

Slutligen ett stort tack till min sambo Anna Göthlin, min familj och mina vänner!

Borlänge augusti 2009

Joel Frandsen

Copyright © Joel Frandsen och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W11018, ISSN 1401-5765

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

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Grundvatten är på många sätt mycket väl lämpat som råvara för att producera vårt dricksvatten. Jämfört med ytvatten som är den andra stora råvattenkällan har grundvattnet oftast en väsentligt bättre kvalitet vilket också för med sig lägre reningsbehov och därmed betydligt lägre kostnader på sikt. Dessutom är grundvattentäkter bättre skyddade mot olika typer av föroreningar som kan hota vårt dricksvatten. Vid kommunala vattentäkter finns normalt ett vattenskyddsområde, områdets gränser och restriktioner bestäms från fall till fall. Vid upprättandet av ett vattenskyddsområde för en grundvattentäkt är det viktigt att i så stor utsträckning som möjligt få information om grundvattnets rörelser i marken. Isälvsavlagringar utgör en betydelsefull och ofta använd resurs som grundvattentäkt, hit hör Badelundaåsen. Strax söder om Borlänge, vid Frostbrunnsdalen, ligger en vattentäkt i Badelundaåsen som försörjer delar av staden med vatten. Midvatten AB har fått i uppdrag att revidera vattenskyddsområdet för denna vattentäkt. I området finns otaliga källor där stora mängder grundvatten från åsen pressas fram. Genom att ta reda på hur mycket vatten som flödar fram så blir underlaget till det nya vattenskyddsområdet bättre och den översiktliga kunskapen om Badelundaåsen stärks.

För att ta reda på storleken av detta källflöde har flera metoder använts och kombinerats. Det utflödande vattnet från källorna bildar på ett par platser vattendrag som sedan mynnar ut i Tunaån. Tunaån strömmar fram genom området och rinner så småningom ut i Dalälven. Vid de två tydliga vattendrag som bildas av källvattnet mättes vattenflödet. I det ena fallet, vid Frostbrunnsdalen, byggdes en damm för att samla ihop vattenflödet och därigenom möjliggjordes noggranna flödesmätningar. I det andra fallet (vid Smäcken) fanns sedan tidigare en dammkonstruktion och mätningar av flödet kunde göras. Förutom dessa två vattendrag där flödet kunde mätas så mynnar ytterligare en del grundvatten ut i Tunaån (utan att passera dessa två mätplatser). För att försöka ta reda på storleken av detta utflöde utvecklades en matematisk datormodell. I modellen beräknades hur mycket lösta salter som borde passera i vattnet i Tunaån nedströms källflödesområdet om hänsyn togs till saltmängderna som passerade i Tunaån uppströms källflödesområdet. Då togs även hänsyn till det tillskott av salter som kom ifrån de vattendrag som mynnade i ån.

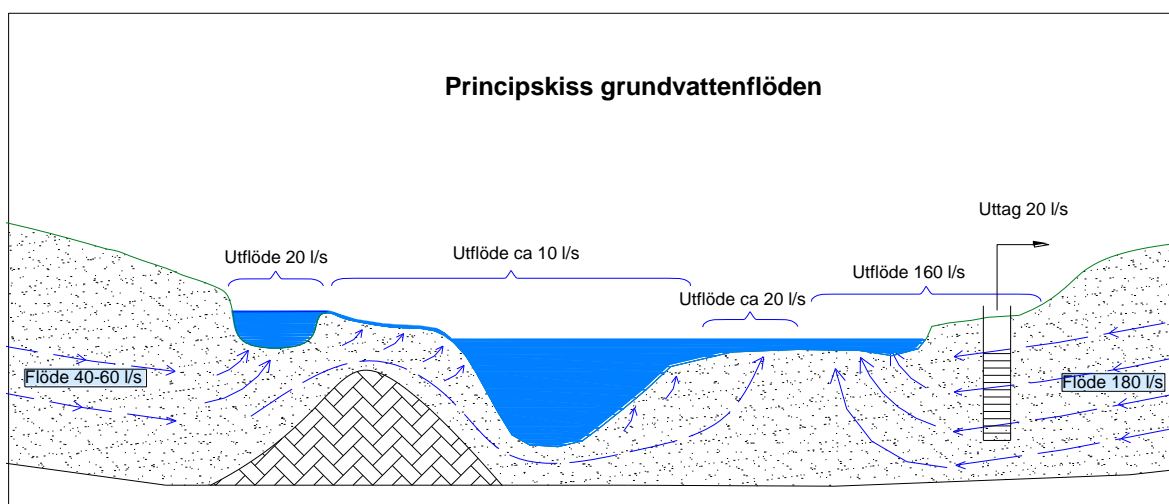
Halten löst salt i vatten kan mätas indirekt via vattnets elektriska konduktivitet vilket är ett mått på vattnets förmåga att leda ström. Salthalten i grundvattnet i området var ca 6 till 15 gånger högre än vattnet som kom från Tunaån. För att kunna beräkna mängden salt som kom från Tunaån uppströms området med källflöden mättes vattenflödet även här samt också i den bäck (Lusbäcken) som mynnar i Tunaån. I modellen togs även hänsyn till vattenståndsförändringar och tidsfördröjningar som inverkade på vatten- och saltflödet.

Mängden salt som beräknades passera i Tunaån nedströms källflödesområdet jämfördes sedan med den halt som uppmättes på samma plats. Skillnaden mellan beräknad och faktisk

uppmätt halt antogs bero på det utflöde av grundvatten till Tunaån som inte kunde mätas direkt. Därmed kunde detta utflöde bestämmas.

Utflödet av grundvatten mättes även med hjälp av burkar som pressades ner i åns botten, mängden vatten som flödade ut i burkarna registrerades. Burkarna placerades ut med vägledning av temperaturmätningar som gjordes i bottensedimenten. Där temperaturen var låg antogs det att den största utströmningen av grundvatten pågick eftersom grundvattnets temperatur var låg i jämförelse med vattentemperaturen i ån.

Resultaten visade att det sammanlagda flödet av grundvatten mot undersökningsområdet var ca 220 – 240 liter per sekund varav ca 180 l/s kom från en sträcka av Badelundaåsen som ligger söder om källflödesområdet och ca 40-60 l/s från en sträcka av åsen som ligger norr om källflödesområdet. Av de 180 l/s som kom söderifrån uttogs 20 l/s i vattentäkten. Se Figur 1. Dock är resultatet från modellen osäkert och en viss tidsvariation i flödet förväntas också.



**Figur 1. Undersökningsområdet i genomskärning från norr till söder med grundvattenflöden och flödesmängder. Tunaån ligger i mitten av figuren, "Smäcken" till vänster och Frostbrunnsdalen till höger.**

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING.....</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEM OCH SYFTE .....	1
1.2	UNDERSÖKNINGSOMRÅDET .....	2
1.2.1	Badelundaåsen .....	2
1.2.2	Badelundaåsen i Borlänges närområde.....	3
1.2.3	Det studerade området .....	5
<b>2</b>	<b>TEORI.....</b>	<b>10</b>
2.1	LITTERATURSÖKNING.....	10
2.1.1	Metoder funna i litteraturen.....	10
2.2	ELEKTRISK KONDUKTIVITET SOM SPÅRÄMNE .....	16
2.2.1	Elektrisk konduktivitet - ett mått på lösta joner .....	16
<b>3</b>	<b>METOD.....</b>	<b>17</b>
3.1	ELEKTRISK KONDUKTIVITET I YTVATTENDRAGEN.....	17
3.1.1	Kalibrering av temperaturberoendet.....	18
3.1.2	Temperaturkalibrering av WTW-mätaren .....	19
3.1.3	Temperaturkalibrering av CTD-diver.....	19
3.2	FLÖDESMÄTNINGAR.....	20
3.2.1	Vattenkraftsstationen vid Vatthammar.....	20
3.2.2	Damm med rektangulärt överfall i Frostbrunnsdalen.....	20
3.2.3	Lusbäcken.....	23
3.2.4	Smäcken .....	23
3.3	MASSBALANS.....	24
3.3.1	Ekvationssystem 1 .....	24
3.3.2	Kontroll av antaganden.....	26

3.3.3	Ekvationssystem 2 .....	26
<b>3.4</b>	<b>NUMERISK MODELL .....</b>	<b>27</b>
3.4.1	Uppbyggnad .....	27
3.4.2	Indata, vald tidsperiod .....	30
<b>3.5</b>	<b>SEDIMENTTEMPERATUR SOM UTSTRÖMNINGSINDIKATION .....</b>	<b>31</b>
3.5.1	Material och metod.....	31
<b>3.6</b>	<b>UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR.....</b>	<b>32</b>
3.6.1	Material och metod.....	33
<b>3.7</b>	<b>ELEKTRISK KONDUKTIVITET I AKVIFERERNA.....</b>	<b>33</b>
3.7.1	Analys av den elektriska konduktiviteten i akvifererna .....	33
3.7.2	Dominerande jonslags bidrag till den elektriska konduktiviteten .....	34
<b>4</b>	<b>RESULTAT OCH OBSERVATIONER.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>FLÖDESMÄTNINGAR.....</b>	<b>35</b>
4.1.1	Vatthammar .....	35
4.1.2	Damm med rektangulärt överfall i Frostbrunnsdalen.....	36
4.1.3	Lusbäcken.....	36
4.1.4	Smäcken .....	37
<b>4.2</b>	<b>ELEKTRISK KONDUKTIVITET I YTVATTNEN .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>VATTENSTÅND .....</b>	<b>40</b>
<b>4.4</b>	<b>MODELL .....</b>	<b>41</b>
4.4.1	Resultat från numerisk modell.....	41
4.4.2	Känslighet.....	44
<b>4.5</b>	<b>TEMPERATURSONDERING .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6</b>	<b>UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR.....</b>	<b>46</b>
<b>4.7</b>	<b>ELEKTRISK KONDUKTIVITET I AKVIFERERNA.....</b>	<b>51</b>



4.7.1	Beräknad elektrisk konduktivitet.....	54
<b>4.8</b>	<b>URSPRUNG AV UTFLÖDANDE GRUNDVATTEN I FROSTBRUNNSDALEN.....</b>	<b>54</b>
<b>4.9</b>	<b>LÅNGTIDSVARIATIONER AV UTFLÖDET.....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>56</b>
5.1	NUMERISK MODELL .....	56
5.2	UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR.....	56
5.3	UTFLÖDEN FRÅN ÅSEN .....	57
5.4	KONDUKTIVITETEN I AKVIFERERNA.....	59
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER.....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>62</b>
7.1	Muntliga Referenser.....	63
<b>8</b>	<b>BILAGOR.....</b>	<b>64</b>
8.1	MODELL I SIMULINK .....	64
8.2	DEL AV MODELL I SIMULINK .....	65

# 1 INLEDNING

Badelundaåsen är en långsträckt rullstensås med stor betydelse för vattenförsörjningen i dess närhet. Strax väster om Stora Tuna kyrka i Borlänges utkanter passerar åsen en lågpunkt i terrängen. Grundvatten härstammande både från norr och söder tränger fram på flera platser i området. Det är en väsentlig mängd grundvatten som tränger fram. Utflödet sker såväl diffust som i distinkta källor. Kännedom om storleken på detta utflöde bidrar till förståelsen av grundvattensituationen i åsen och kan bland annat användas till att beräkna uppehållstider, strömningshastigheter och vattentillgång. En del av området är klassat som naturreservat och en kartläggning av grundvattenförhållandena är även av intresse ur såväl ett naturvårdsperspektiv som ur en kulturhistorisk synvinkel. I Frostbrunnsdalen finns en kommunal vattentäkt med ett uttag om ca 20 l/s som försörjer ca 10 000 personer. Vattnet är av så god kvalitet att det inte behöver behandlas utan distributionen sker direkt ut på nätet. Det nuvarande vattenskyddsområdet som är upprättat runt vattentäkten fastställdes i mitten av 1980-talet och behöver revideras då det inte uppfyller de krav som föreligger idag. Information om utflödet av grundvatten är mycket värdefull i arbetet med att upprätta ett nytt vattenskyddsområde och för att kartlägga grundvattenförhållandena i denna del av Badelundaåsen. Kännedom om flödet i åsen kan tillsammans med information om åsens utbredning och grundvattenytans gradient användas för att beräkna grundvattnets strömningshastigheter i åsen. Strömningshastigheterna ligger sedermera till grund för hur skyddsområdet ska avgränsas. Ett vattenskyddsområdes gränser måste vara väl underbyggda, då för snålt tilltagna gränser medför en risk för både konsumenter och för resursen som sådan. Ett vattenskyddsområde ska inte heller vara för vidlyftigt, då de restriktioner som följer inte ska vara obefogade och för att insatser förknippade med vattenskyddet inte ska vara omotiverade. Risken finns också att alltför vidlyftiga vattenskyddsområden medför att dess tyngd förminsкас. Situationen i Frostbrunnsdalen bjuder en ovanlig möjlighet att mäta flödet av grundvatten i åsen med relativt direkta metoder. Skyddsområdesgränserna, som kan utarbetas i anslutning till Frostbrunnsdalen, blir vid välgrundad information om grundvattenflödet i åsen mycket väl avvägda.

## 1.1 PROBLEM OCH SYFTE

Flera försök att kvantifiera utflödet av grundvatten från Badelundaåsen i området har redan gjorts. För att bestämma det *sammanlagda* utflödet av grundvatten från åsen till ytvattendragen har flödesmätningar i ytvattendragen företagits vid ett par tillfällen. De stora flödesvariationerna som uppträder i ytvattendragen över korta tidsperioder innebär dock att osäkerheten i resultatet är mycket stort. Det är främst flödesmätningar i Tunaån, nedströms utflödet av grundvatten, som är svåra att genomföra på grund av det högst variabla vattenflödet i ån (Kellner, 2008a). Kellner (2008a) uppskattade också flödet av grundvatten från *söder* genom vattenbudgetberäkningar för tillrinningsområdet tillhörande detta avsnitt av Badelundaåsen.

Delar av de data som ligger till grund för vattenbudgetberäkningarna är emellertid osäkra och därmed även resultaten. Resultatet är en uppskattning på  $280 \pm 100$  l/s. Rytta & Gustafsson (1983) uppskattade det sammanlagda flödet i åsen från *söder* till mellan 110 och 170 l/s med hjälp av vattenbudgetberäkningar som emellertid baserades på äldre data än de som användes av Kellner. Utflödet av grundvatten från *norr* beräknades genom vattenbudget av Rytta & Gustafsson, (1983) till storleksordningen 130 l/s. Vid nuvarande förhållanden blir resultatet av vattenbudgeten 160 l/s, mycket stora osäkerheter föreligger även här. Grundvattenutflödet från *norr* beräknas i rapporten av Kellner (2008a) med hjälp av en numerisk modell byggd för att beskriva hydrogeologin i området i anslutning till anläggandet av en ny vattentäkt i Lennheden norr om Borlänge. Utflödet av grundvatten från *norr* beräknas i modellen till  $100 \pm 50$  l/s. Sammantaget kan sägas att de hittillsvarande resultaten av försöken att kvantifiera utflödet från åsen i området är osäkra.

Examensarbetet syftar till att undersöka och kvantifiera utflödet av grundvatten ur åsen med så god noggrannhet som möjligt, samt söka dela upp detta utflöde i de två huvudsakliga komponenterna (grundvatten från *norr* och grundvatten från *söder*).

## **1.2 UNDERSÖKNINGSOMRÅDET**

Området som examensarbetet kretsar kring är dominerat av Badelundaåsen, här följer en bakgrund om åsen i stort och Frostbrunnsdalens närområde i synnerhet.

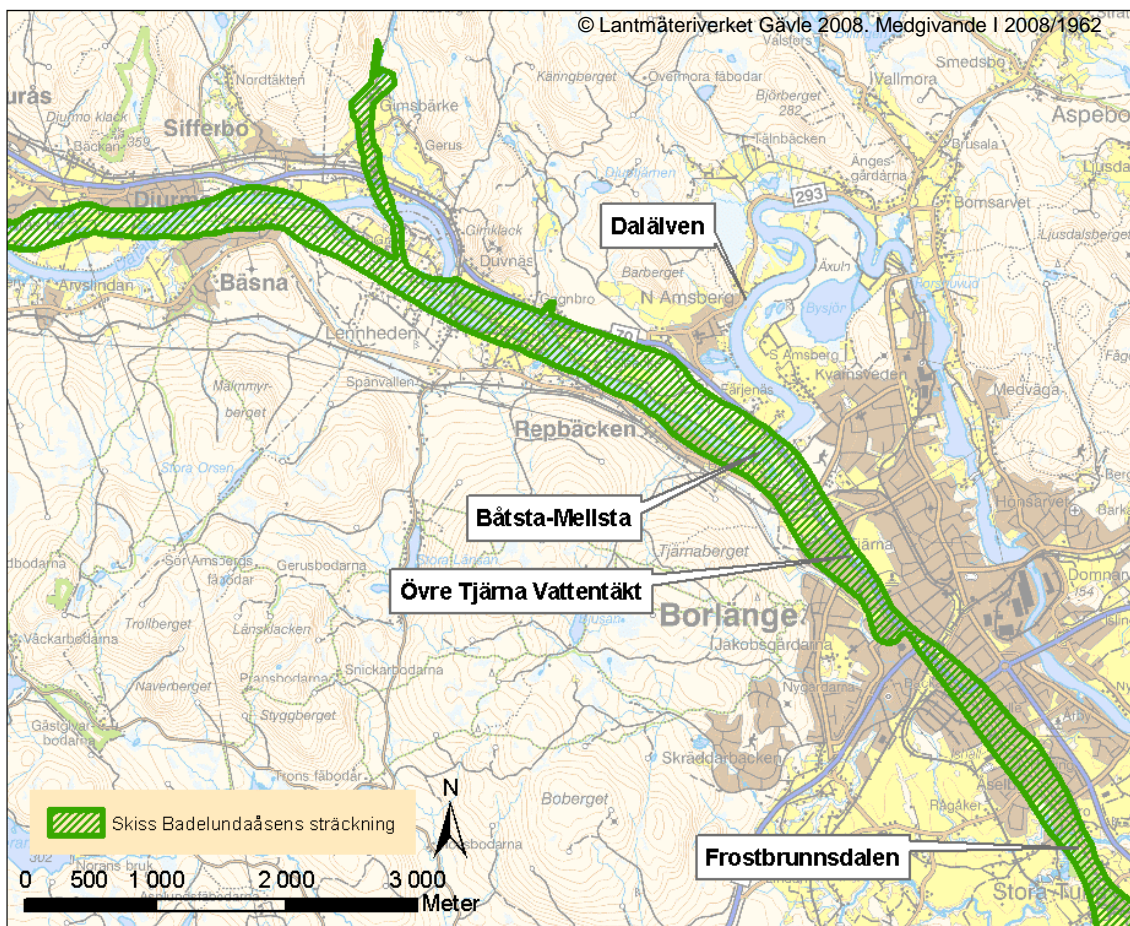
### **1.2.1 Badelundaåsen**

Badelundaåsen har bildats vid inlandsisens avsmältning under den senaste istiden. Bildningen har skett när smältvatten som skapat en isälv forsat fram transporterandes material som frilagts ur isen. Materialet har med vattnets hjälp slipats och rundats samt som regel avlagrats i väl sorterade fraktioner. Isälvsavlagringen Badelundaåsen är en av Sveriges längsta och mäktigaste. Den kan spåras från Siljan, förbi Mälaren och ända ner mot Nyköping. Badelundaåsen är mycket betydelsefull för den nuvarande vattenförsörjningen i flertalet av de kommuner som den genomlöper och betydelsen kan i framtiden komma att bli än större.

### 1.2.2 Badelundaåsen i Borlänges närområde

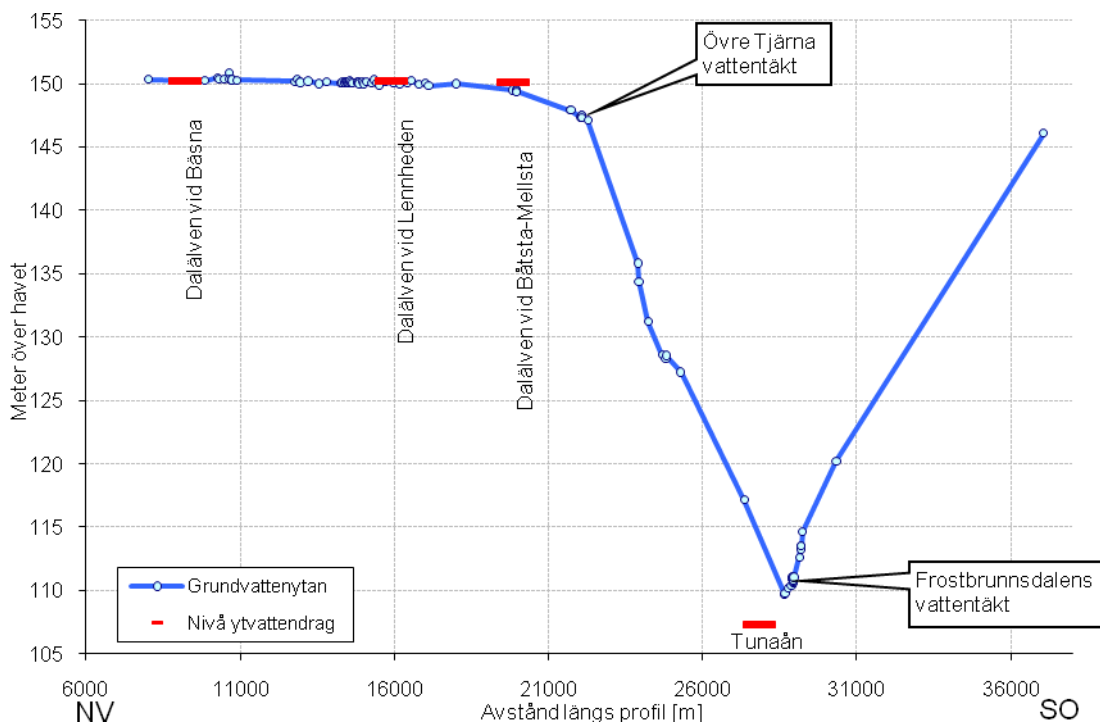
Badelundaåsen är i området avlagrad i den preglaciala älvfåra som är utmejslad ur berggrunden. Området ligger under högsta kustlinjen och åsen är huvudsakligen överlagrad av finkornigt material som en följd av detta. Norr om Borlänge sammanfaller delvis åsens och Dalälvens sträckning och på flera platser korsar åsen och älven varandra, se Figur 3 och Figur 2. Ett utbyte av vatten mellan älven och åsen sker på dessa platser. Vid korsningen mellan älven och åsen vid Båtsta-Mellsta strax norr om Borlänge sker en betydande infiltration från älven.

Åsavsnittet mellan Båtsta-Mellsta och Frostbrunnsdalen passerar till största del genom centrala Borlänge. Markanvändningen i detta avsnitt präglas starkt av staden, se Figur 2.



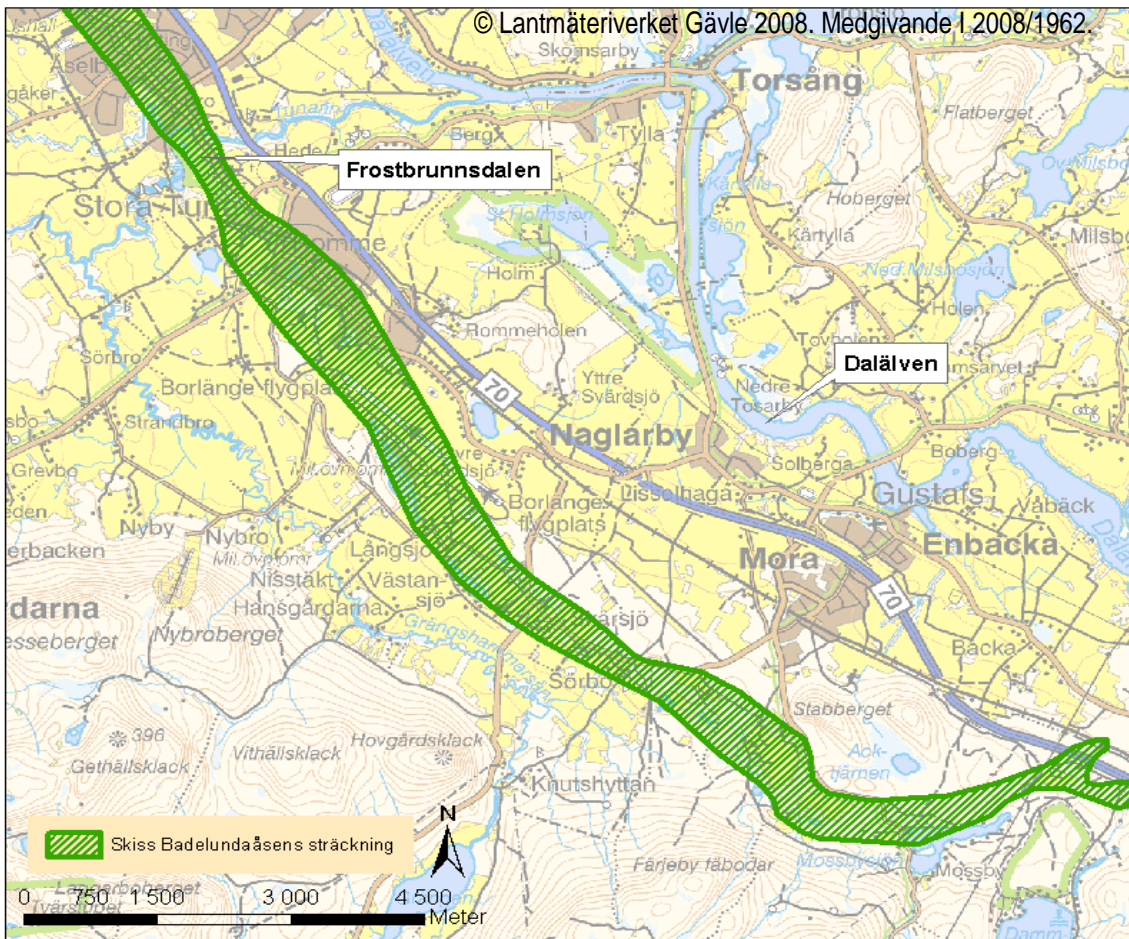
Figur 2. Badelundaåsens sträckning från Djurås genom centrala Borlänge till Stora Tuna.

Sträckan mellan Båtsta-Mellsta och den nuvarande huvudvattentäkten för Borlänge (Övre Tjärna) kännetecknas av en mycket god hydraulisk kapacitet (produkten av åsens transmissivitet och bredd) och grundvattnets gradient är liten (riktad åt söder)(Gustafson, 1974). Sydost om vattentäkten minskar den hydrauliska kapaciteten och grundvattenytans lutning mot Frostbrunnsdalen är väsentligt brantare, se Figur 3.



**Figur 3. Profil över grundvattennivån mellan Bäsna och Solvarbo.**

Badelundaåsen fortsätter från Frostbrunnsdalen mot sydost, se Figur 4. Grundvattenflödet är riktat från sydost mot nordväst i detta avsnitt av åsen, d.v.s. mot Frostbrunnsdalen. Marken strax söder om Frostbrunnsdalen används till stor del som jordbruksmark men här finns också en flygplats, bebyggelse och vägar. Avrinningsområdets (tillhörande detta avsnitt av åsen) södra delar är dominerat av skog.

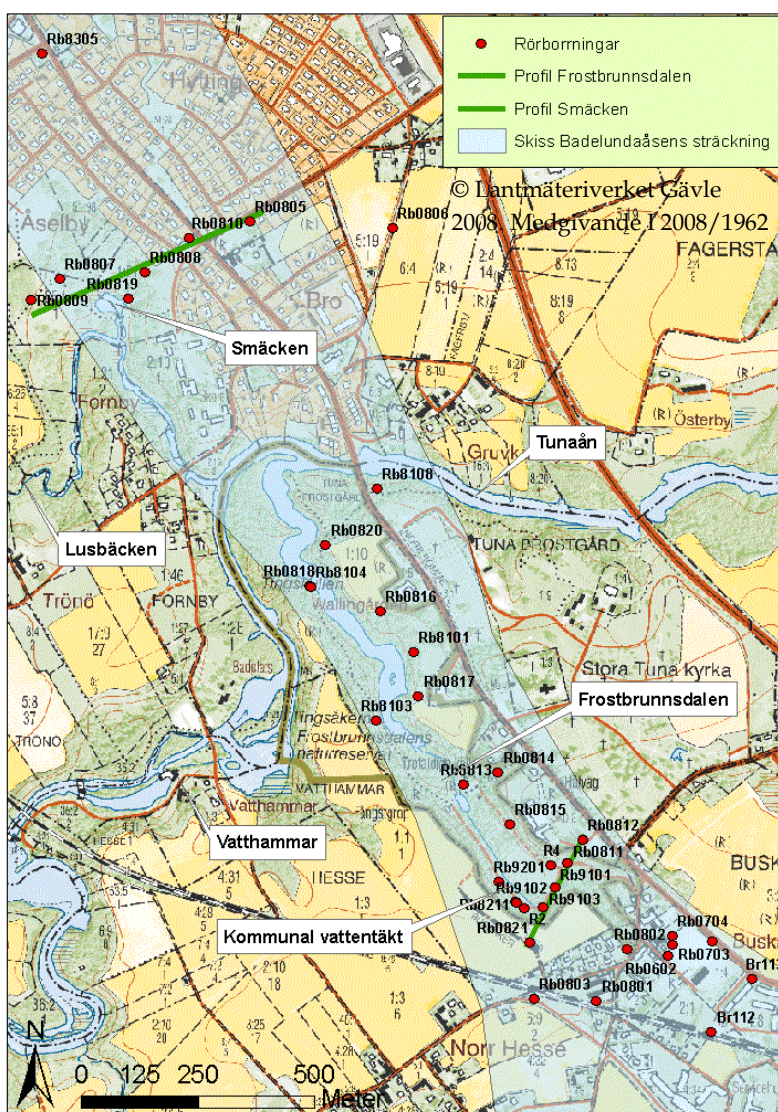


Figur 4. Badelundaåsens sträckning söder om Borlänge. Avrinningsområdets storlek är 47 km<sup>2</sup> (Kellner, 2008a).

### 1.2.3 Det studerade området

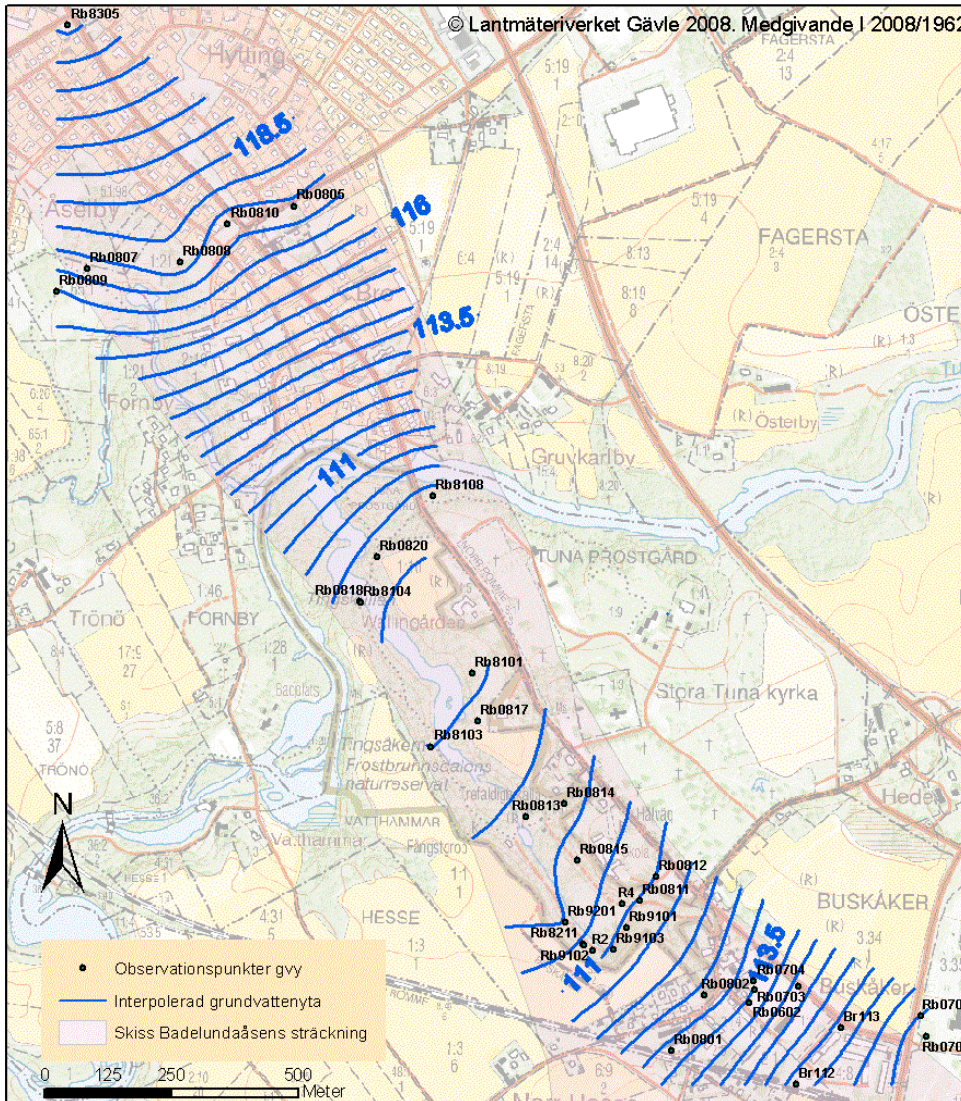
Examensarbetet fokuserar på området där Tunaån korsar Badelundaåsen (se Figur 5) och artesiskt grundvatten tränger fram i stor mängd. Utläckaget består av grundvatten tillströmmandes både från norr och söder. Ett antal observationsrör har drivits av Midvatten AB och från dessa erhålls information om lagerföljder, vattengenomträngligheten i lagren och en indikation på avståndet till berggrunden. Tack vare sådan information kan åsens utbredning skisseras. I Tunaån finns flera dammar vid Vatthammar samt en kraftstation (se Figur 5). Detta är också den sista platsen i Tunaån med en bestämmande sektion innan ån sedermera rinner ut i Dalälven. Tunaåns sträckning från Vatthammar och till Dalälven är väldigt flack, störningar från älven fortplantar sig därför lätt upp i Tunaån. I Tunaån avbördar också Lusbacken sitt vatten. Även Lusbackens nedre sträckning har en mycket svag lutning och en bestämmande sektion saknas. Däremot är fallhöjden mer påtaglig en bit uppströms i Lusbacken vid Trönö och här finns flera bestämmande sektioner och möjligheter att göra flödesmätningar. Lusbacken avvattnar en stor del av Borlänges dagvatten (Borlänge kommun, 2007), vilket tillförs Lusbacken längre uppströms. Smäcken

är en plats med framträngande grundvatten som bildar en vattensamling vilken avbördas över en horisontell dammkonstruktion. Vattnet rinner sedan vidare ut i Lusbäcken. I Smäcken mynnar även flera dagvattenledningar som avvattnar ytor främst bestående av ett villaområde i närheten. I Smäckens närområde och Lusbäckens nedre del har inga distinkta utströmningspunkter hittats men stundtals förekommer hydrofil växtlighet och marken är övervägande sank. 200 meter nedströms Lusbäckens utlopp i Tunaån har även Frostbrunnsdalens bäck sitt utlopp. Ursprunget till denna bäck är de källflöden som mynnar i Frostbrunnsdalens ravin och bäckens tillskott till Tunaån består enbart av grundvatten. Även Frostbrunnsdalens bäck påverkas av nivån i älven och någon bestämmande sektion finns inte heller här. Frostbrunnsdalens bäck är flera tiotal meter bred och ungefär en meter djup. I bäckens övre delar är botten rikligt beströdd av distinkta utströmningspunkter. Frostbrunnsdalen är en kraftig ravinbildning som skär genom de ytliga finkorniga jordarna.



Figur 5. Figuren visar rörborringar som finns i undersökningsområdet, en skiss av åsens sträckning och utmärkande platser.

Grundvattenytans läge i området har kartlagt via observationsrören, se Figur 6, grundvattnets trycknivå ligger på många låglänta platser över eller mycket över markytan. Grundvattnet i området kring Smäcken uppvisar en trycknivå som ligger upp till hela tio meter över markytan.

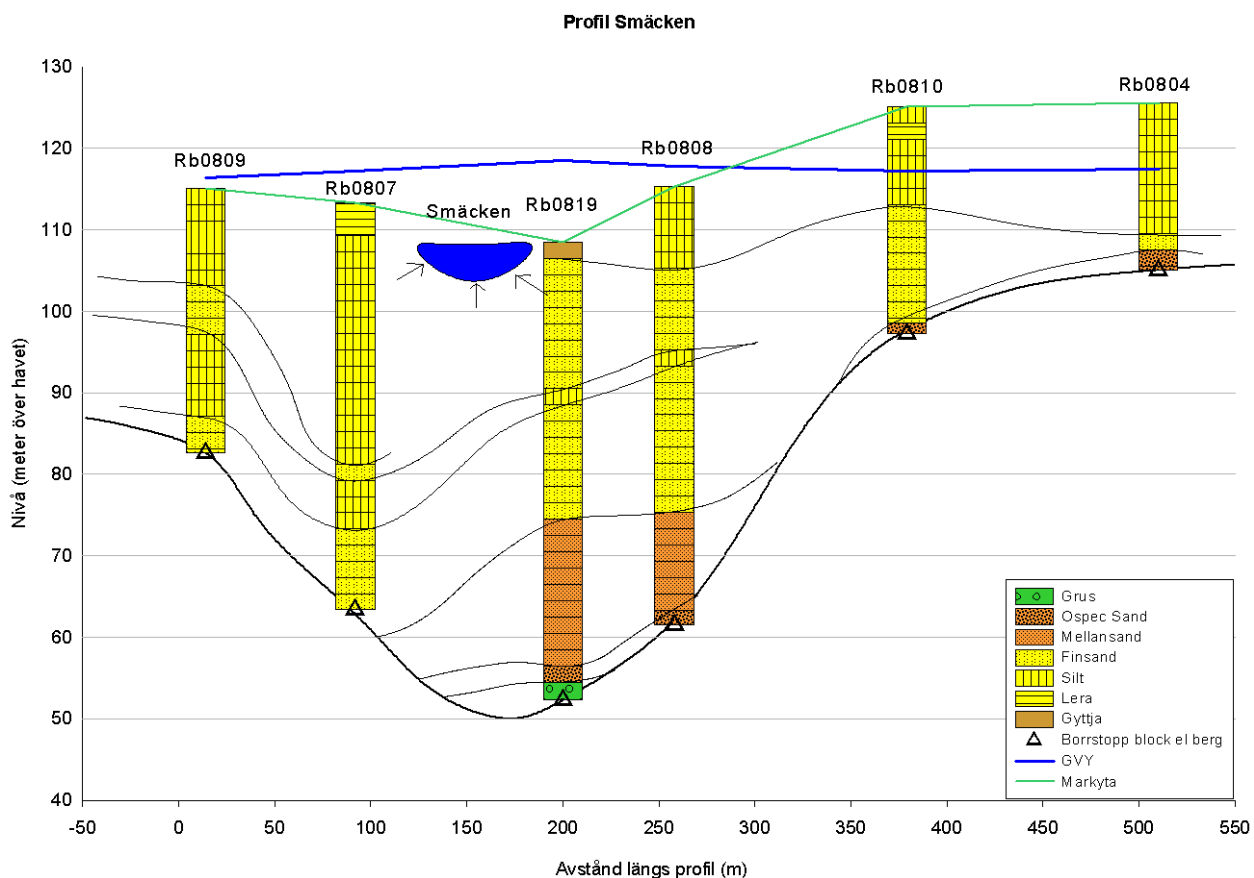


Figur 6. Grundvattennivån angiven i meter över havet, ekvidistans 0,5 m.

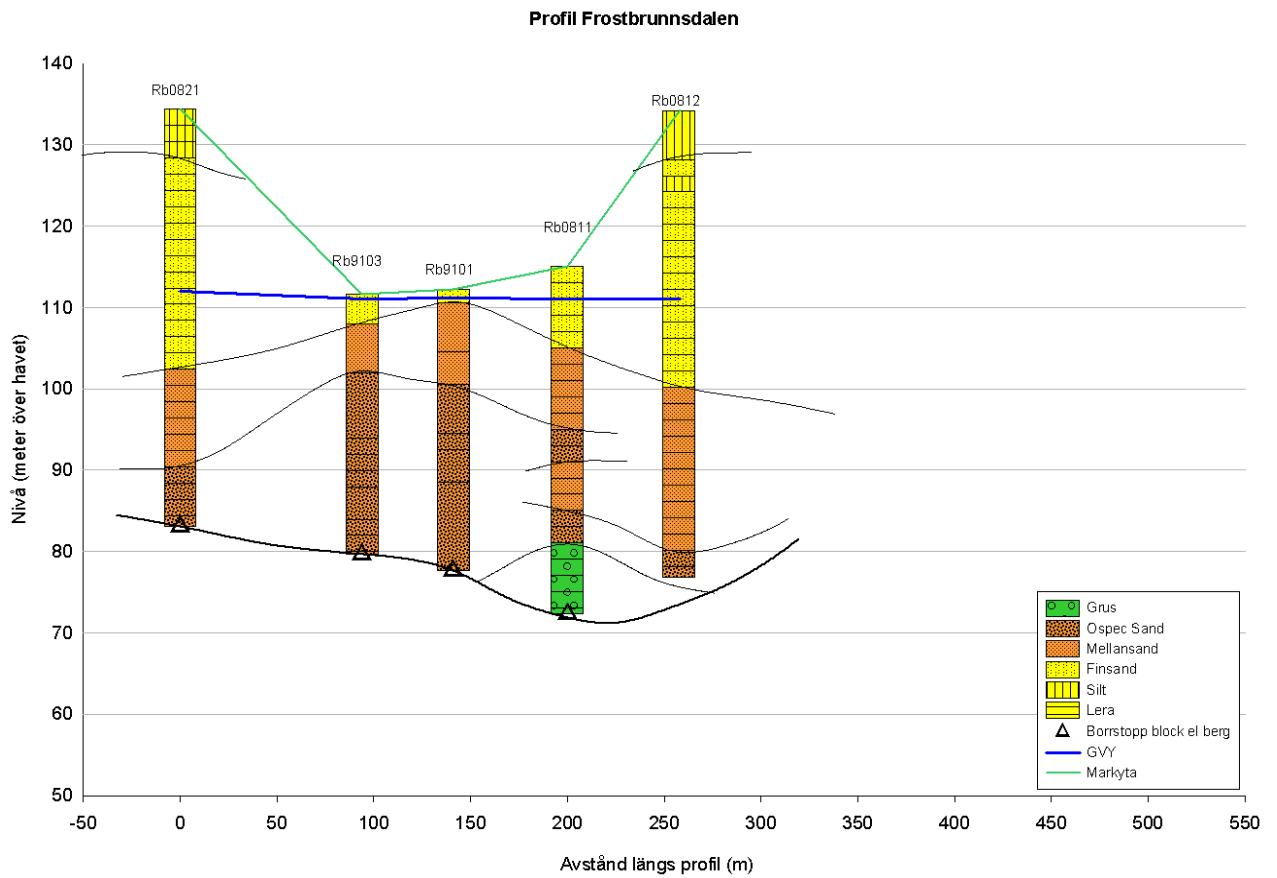
Området kring Smäcken är överlagrat av uppemot 40 meter mäktiga lager av finsand och silt, se Figur 7. Badelundaåsens grövre material återfinns under dessa finkorniga lager men bildningen är relativt liten under Smäcken-området. På södra sidan av Tunaån är omfattningen av de grova lagren större, se Figur 8. Det är också på den södra sidan om Tunaån som den lägsta berggrundsnivån påträffats (vid Rb0820). Mellan Rb0808 (vid Smäcken) och Rb0820 (i Frostbrunnsdalen) faller grundvattenytan brant och nivåskillnaden är 8,6 m, gradienten har beräknats till 12,2 %. Gradienten mellan Rb0820 och Rb8101 är väsentligt mindre (1,1 %) men det beräknade värdet underskattar sannolikt den verkliga



gradienten då grundvattenytan har en lågpunkt någonstans mellan dessa två rör. Grundvattennivån mellan Rb0820 och Rb0808 har troligtvis ett annat utseende än vad som ses i Figur 6 med en större del av nivåförändringen närmare Rb0808 där lagren med hög hydraulisk konduktivitet har mindre utbredning. Grundvattennivån i de centrala delarna av åsen har sin lågpunkt någonstans mellan Rb0820 och Rb0817. Den stora skillnaden i gradienterna indikerar en påtaglig förändring av åsens hydrauliska kapacitet. Orsaken är inte klarlagd men ett högt berggrundsläge mellan Smäcken och Frostbrunnsdalen, som skär av de djupt liggande lagren med hög hydraulisk konduktivitet, är en tänkbar orsak. En annan förklaring kan vara att de djupa lagren med god hydraulisk konduktivitet minskar kraftigt i omfattning eller inte är sammanhängande utan skiljs åt av finkornigare material.



**Figur 7. Profil genom jordlagren och åsen vid Smäcken.**



**Figur 8. Profil genom jordlagren och åsen vid Frostbrunnsdalen.**

## 2 TEORI

### 2.1 LITTERATURSÖKNING

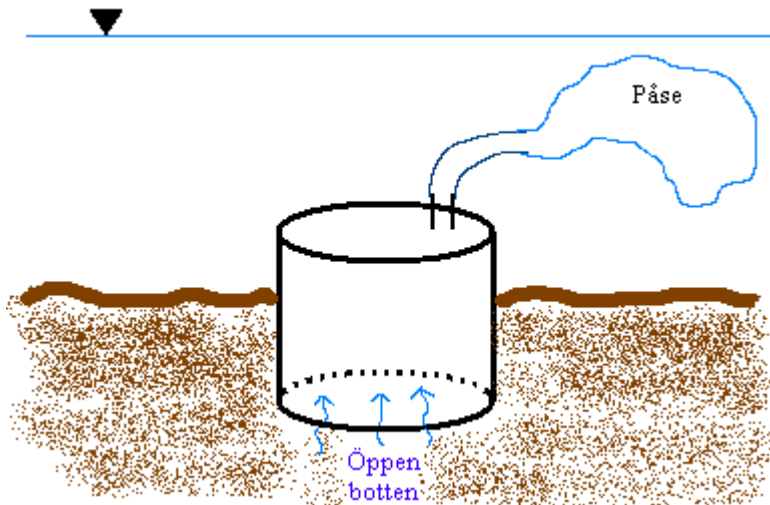
#### 2.1.1 Metoder funna i litteraturen

Kalbus *m.fl.* (2006) går igenom de metoder som används för att studera interaktion och utbyte mellan grundvatten och ytvatten (framförallt under mättade förhållanden). Rapporten kategoriserar metoderna enligt följande lämpliga indelning:

- Direkta mätningar av vattenutbyten (med hjälp av utströmningsmätare).
- Användningen av temperatur som spårämne för att hitta ut- respektive inströmningsområden och för att kvantifiera flöden via temperaturen samt litteraturdata.
- Metoder baserade på Darcy's lag.
- Massbalansmetoder.

#### Direkt mätning av utbyten

Direkta mätningar av utbytet mellan grundvatten och ytvatten kan genomföras genom användandet av olika typer av utströmningsmätare. Den grundläggande principen bygger på att en del av vattendragets botten avgränsas och utbytet över denna avgränsade area mäts. För själva avgränsningen brukar någon form av bottenlös cylinder användas, denna trycks ner i sedimenten så att det sluter tätt kring dess sidor. Cylindern förses med en mindre öppning som i de enklare fallen mynnar i en plastpåse. Plastpåsens uppsamlade eller avgivna volym vatten, mäts med lämpliga mellanrum. Från den uppsamlade (eller avgivna) volymen vatten på den avgränsade arean och mättiden kan utbytet beräknas. Mer avancerade metoder mäter flödet genom cylindern med automatiserade instrument vilket möjliggör att flödets tidsvariationer kan studeras i detalj. Det är viktigt att trycket i cylindern (och påsen) är detsamma som för det omgivande ytvattnet för att mätningarna ska vara giltiga. Mätningar som utförs med den enklare pås-metoden kan vara känsliga för mekanisk påverkan eftersom påsen kan störas eller deformeras. Speciellt i strömmande vatten är risken stor. Libelo & MacIntyre (1994) föreslår att påsen skyddas i en behållare.



**Figur 9. Principskiss utströmningsmätare.**

Utströmningsmätare är billiga att tillverka (åtminstone vad gäller pås-varianten) och dessutom är mättekniken enkel. De är användbara vid lokaliseringen av utströmningsområden men många mätpunkter krävs för att ta fram representativa värden på genomsnittligt utbyte då utbytet ofta har stora rumsliga variationer (Kalbus *m.fl.*, 2006). Detta gör tekniken opraktisk när studieområdet är stort.

#### Temperatur som spårämne

Temperaturen hos grundvatten är oftast stabil över året (Andersson, 2005), hos ytvatten däremot varierar temperaturen över året (och även inom dygnet). Resultatet är att temperaturen hos grundvattnet och ytvattnet ofta är åtskild vilket kan användas för att lokalisera och/eller kvantifiera utbytet mellan ytvatten och grundvatten (Silliman & Booth, 2004). Sedimentens temperatur påverkas i hög grad av genomströmmande vatten (Kalbus *m.fl.*, 2006) medans sedimentens eventuella variationer i värmeledande förmåga har liten inverkan på dess temperatur (Constantz & Stonestrom, 2003). Bottenområden med grundvattenutflöde har en jämn sedimenttemperatur över tid eftersom grundvattnet ofta håller en stabil temperatur. Områden där ytvatten infiltrerar däremot uppvisar temperaturvariationer över tid som en följd av att det infiltrerande ytvattnets temperatur varierar (Constantz & Stonestrom, 2003). Lokalisering av områden med inflöde respektive utflöde kan därför göras genom att ytvattentemperaturen och sedimenttemperaturen mäts. Bottenområden med ytvatteninfiltration uppvisar då temperaturer som samvarierar med ytvattnets temperatur och områden med grundvattenutflöde håller en konstantare temperatur som ligger nära grundvattentemperaturen. Brewster (2004) karterade sedimenttemperaturen över ett bottenområde i ett vattendrag genom många mätningar med tät rumslig upplösning över en kort tidsperiod (några dygn). Mätningarna skedde ett par decimeter ner i sedimenten för att minimera påverkan av ytvattendragets temperaturvariationer över dygnet. Områden som uppvisade stora avvikelser mellan

sedimenttemperaturen och ytvattentemperaturen antogs vara områden med stort grundvattenutflöde. Med hjälp av piezometrar (små tryckgivare som registrerar tryckskillnader mellan punkter i akviferen) togs även ett samband fram mellan sedimenttemperaturen och utflödehastigheten vilket möjliggjorde en kvantifiering av utflödet.

Värmetransport i sediment sker dels genom advektion (värmetransport med det flödande vattnet), dels genom konduktion (värmeledning). Denna värmetransport kan beskrivas med en ekvation som har en analogi i advektions-dispersionsekvationen för massflöden i grundvatten (Anderson, 2005). Samma lösningar kan därmed användas för att med analytiska eller numeriska metoder beräkna utbytet (om sedimentens temperaturprofil och värmeledande förmåga är känd).

Enkelheten och snabbheten hos temperaturmätningar gör dessa lämpliga vid detaljstudier av utbytet mellan ytvatten och grundvatten.

#### Användning av Darcy's lag

Genom kunskap om den hydrauliska gradienten och den hydrauliska konduktiviteten kan flöden beräknas med hjälp av Darcy's lag som kan skrivas

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

där  $Q/A$  = flöde [m/s]  
 $K$  = hydraulisk konduktivitet [m/s]  
 $dh/dl$  = hydraulisk gradient [enhetslös]

För att bestämma den hydrauliska gradienten måste information om tryckpotentialen i akviferen inhämtas, vilket kan göras genom neddrivning av observationsrör eller installation av tryckgivare direkt i akviferen. Åtminstone två punkter måste vara kända. Under antagandet att flödet i sedimenten sker vertikalt kan en av de två kända punkterna utgöras av vattenytan i ytvattendraget. Kunskap om den hydrauliska gradienten ger information om flödesriktningen, men för en kvantitativ beräkning krävs även information om den hydrauliska konduktiviteten. Den hydrauliska konduktiviteten kan, vid kunskap om sedimentens kornstorleksfördelning, uppskattas via empiriska samband. Uppskattningen är dock inte exakt, noggrannare data kan tas fram om mätningarna utförs utan att sedimentens struktur förstörs. Olika tekniker för detta existerar, exempelvis kan sedimentprover insamlas i fält och undersökas i så oförstört tillstånd som möjligt i laboratorium. Andra metoder mäter den hydrauliska konduktiviteten i fält genom att avgränsa mätarean och mäta flödet som uppstår vid kända hydrauliska gradienter (som mäts med piezometrar) (Kalbus *m.fl.*, 2006). Gemensamt för dessa metoder är att de utgör punktmätningar och

lämpar sig för att studera den hydrauliska konduktiviteten och dess heterogeniteter i sedimenten över liten rumslig skala.

Information över en något större rumslig skala ges då en känd volym vatten tillsätts eller tas ut ur en brunn och återhämtningen studeras. Den hydrauliska konduktiviteten över större rumsliga skalor studeras med fördel genom provpumpningar. Dessa resulterar i ett medelvärde på den hydrauliska konduktiviteten över påverkansområdet. Vid analysen av provpumpningar finns dock svårigheter att behandla gränsvillkoren korrekt i samband med interaktionen mellan ytvatten och grundvatten (Kalbus *m.fl.*, 2006).

Sambandet mellan grundvattnets flödes hastighet, Darcyflödet och porositeten kan också användas för beräkningar av utbyten

$$v = \frac{Q/A}{n} \quad (2)$$

där  $v$  = grundvattnets partikelhastighet [m/s]  
 $Q/A$  = flöde [m/s]  
 $n$  = kinematisk porositet [-]

Partikelhastigheten kan exempelvis bestämmas genom spårämnesförsök.

### Massbalansmetoder

Massbalansmetoder utgår från lagen om massans bevarande. En rättfram tillämpning av massbalans, för att bestämma utbytet mellan ytvattnet och grundvatten, är att använda styckvisa flödesmätningar, där flödet i ytvattendraget mäts på två platser. Skillnaden i flödet vid uppströmsmätningen respektive nedströmsmätningen antas då utgöra nettoflödet mellan de två vattentyperna. För att osäkerheterna inte skall bli för stora krävs att utbytet är väsentligt större än osäkerheterna associerade med mätningarna. Uppströms och nedströmsmätningarna måste därför företas på tillräckligt avstånd från varandra för att utbytets storlek i jämförelse med osäkerheterna skall bli tillräckligt stort. Metoden lämpar sig därför bättre för att ta fram medelvärden över längre sträckningar av vattendrag än för detaljstudium över en liten rumslig skala.

Kombineras flödesdata med mätningar av spårämnen kan flödesbidraget från enskilda komponenter räknas ut från blandningsförhållandet (Pellerin *m. fl.*, 2008). Vid gynnsamma förhållanden kan flödesbidraget från flera olika komponenter även beräknas över tid. Ett stort antal olika naturliga spårämnen finns att tillgå.

### Tidigare erfarenheter och metodval

De olika typerna av metoder dras naturligtvis med olika för- respektive nackdelar, framförallt är de olika lämpade beroende på vilken rumslig skala som skall undersökas. De metoder, som kan vara aktuella för kvantifiering av utflödet då undersökningsområdet är

flera hundra meter långt som det är i detta fall, är metoder baserade på Darcy's lag eller på massbalans. Möjliga metoder baserade på Darcy's lag kräver en stor ekonomisk insats eftersom de medför borrhandet av brunnar och provpumpningar. Flera massbalansmetoder fungerar dock utmärkt i undersökningsområdets rumsliga skala. Styckvisa flödesmätningar, hydrografseparering samt användandet av naturliga spårämnen hör till dessa. Styckvisa flödesmätningar är ett till synes väldigt rättframt sätt att bestämma utbytet. Metoden har också tidigare använts på det aktuella studieområdet.

Första försöket med styckvisa flödesmätningar gjordes hösten 2007, där SMHI mätte flödet på två platser i Tunaån samt i Lusbäcken. Den övre mätpunkten i Tunaån (vid Vatthammar) samt mätningen i Lusbäcken fungerade bra, vid den nedre mätpunkten i Tunaån blev det däremot problem. Orsaken var frånvaron av en bestämmande sektion mellan Tunaåns nedre del och Dalälven vilket gör att störningar från älven fortplantar sig upp i Tunaån och rör sig fram och tillbaka i ån. Vågrörelserna undersöktes med hjälp av tryckgivare och medelperiodtiden låg hösten 2007 på 72 minuter (Kellner, 2008a). Vågrörelserna påverkar flödet så till den grad att vattnet stundtals rör sig baklänges upp för ån innan det vänder nedåt igen. Nettoflödet rör sig naturligtvis fortfarande i förväntad riktning, men det blir omöjligt att genom några få mätningar ta fram en sann uppskattning av nettoflödet. Försöket att bestämma utbytet mellan vattentyperna blev därför inte någon framgång. I april 2008 medförde regleringen av Dalälven att vattenståndet nådde mycket låga nivåer. Denna speciella reglering hängde samman med att ett vattenkraftverk i älven reparerades. De låga nivåerna medförde att flödet blev entydigare i Tunaån och dess tillflöden. Vid detta tillfälle gjordes återigen försök med att bestämma flödet uppströms och nedströms i Tunaån. Nu blev utfallet av flödesmätningarna, som återigen utfördes av SMHI, bättre men av någon anledning stämde inte resultaten när de analyserades. Eventuellt var det en följd av en magasinering i systemet eller kanske ett resultat av att flödet från Vatthammars kraftstation varierade. Dessutom var flödet i ån så pass stort (över  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) att ett litet procentuellt fel i mätningen av flödet i ån medförde en väsentlig felkälla i det beräknade utflödet av grundvatten. Denna metod har alltså visat sig obrukbar under dessa förhållanden.

Förutsättningarna för att kunna använda flödesdata, i kombination med naturliga spårämnen, bedöms däremot som goda för aktuellt undersökningsområde. Ett stort antal olika naturliga spårämnen beskrivs i litteraturen, varav många av dessa kräver att vattenprover samlas in i fält för att sedan skickas för analys i laboratorium. Laboratorieanalyser har nackdelen att de är kostsamma samt att antalet prover har en övre gräns. Elektrisk konduktivitet är en robust parameter som är lätt att mäta i fält. Midvatten AB hade dessutom redan ett instrument för fältbruk med möjlighet till datalagring och ytterligare ett har köpts in under arbetets gång. Elektrisk konduktivitet har applicerats som spårämne med övervägande positiva resultat i åtminstone ett par fall. Laudon & Slaymaker (1997) jämför elektrisk konduktivitet som spårämne mot andra spårämnen som specifik

koncentration av kisel, den stabila isotopen syre-18 och deuterium och konstaterar att överensstämmelsen är relativt god. De vattenprover som fanns tillgängliga över området undersöktes under examensarbetets inledning för att se om några andra uppenbara alternativa spårämnen kunde lyftas fram. Några sådana alternativ kunde inte hittas.

1998 studerades Pine River, Ontario i Canada av Brewster (2004). Floden som undersöktes är storleksmässigt jämförbar med Tunaån och den ytliga geologin är någorlunda liknande med lager av finsand, grusig sand, silt, lera och torv. De hydrologiska förutsättningarna påminner om de i Tunaån med artesiska grundvattennivåer. Sedimenttemperaturen i Pine River karterades (med en mycket fin rumslig upplösning) och sattes i relation till utströmningen. Utströmningen kvantifierades bland annat med hjälp av piezometrar och kännedom om den hydrauliska konduktiviteten. I studien uppmättes utflöden mellan 0,03 och 446 l/m<sup>2</sup>/dygn. De likartade förutsättningarna gjorde att Tunaån bedömdes kunna studeras med en liknande metod.

Den bäst lämpade metoden för att i detta examensarbete kvantifiera utflödet bedömdes vara massbalans där mätningar av naturliga spårämnen och vattenflöden tillsammans kunde ge tillräcklig information för att bestämma nämnt utflöde. Som naturligt spårämne användes elektrisk konduktivitet på grund av dess många fördelar i jämförelse med andra spårämnen. Dessutom kartlades sedimenttemperaturen i Tunaån (om än i liten omfattning) i kombination med användandet av utströmningsmätare för att försöka lokalisera eventuella okända områden med stor utströmning.



## **2.2 ELEKTRISK KONDUKTIVITET SOM SPÅRÄMNE**

Generellt har naturligt förekommande stabila vattenisotoper föredragits i basflödesstudier (Pellerin *m. fl.*, 2008), men de analytiska kostnaderna är ofta stora. Den elektriska konduktiviteten däremot kan mätas enkelt, billigt och med hög frekvens. Särskilt på platser där en stor skillnad i den elektriska konduktiviteten mellan olika flödeskomponenter föreligger är elektrisk konduktivitet lämpligt som spårämne. Den elektriska konduktiviteten är ett mått på aktiviteten av de joner som är lösta i vattnet. Denna aktivitet är starkt temperaturberoende, så för att kunna jämföra den elektriska konduktiviteten vid mätningar i vatten med varierande temperatur används ett samband som normerar värdet och jämförelser kan göras. I allmänhet har man normerat till 20 eller 25 °C, numer är 25 °C vanligare. Om inget annat nämns är den elektriska konduktiviteten normerad till 25 °C i samtliga fall i detta examensarbete.

### **2.2.1 Elektrisk konduktivitet - ett mått på lösta joner**

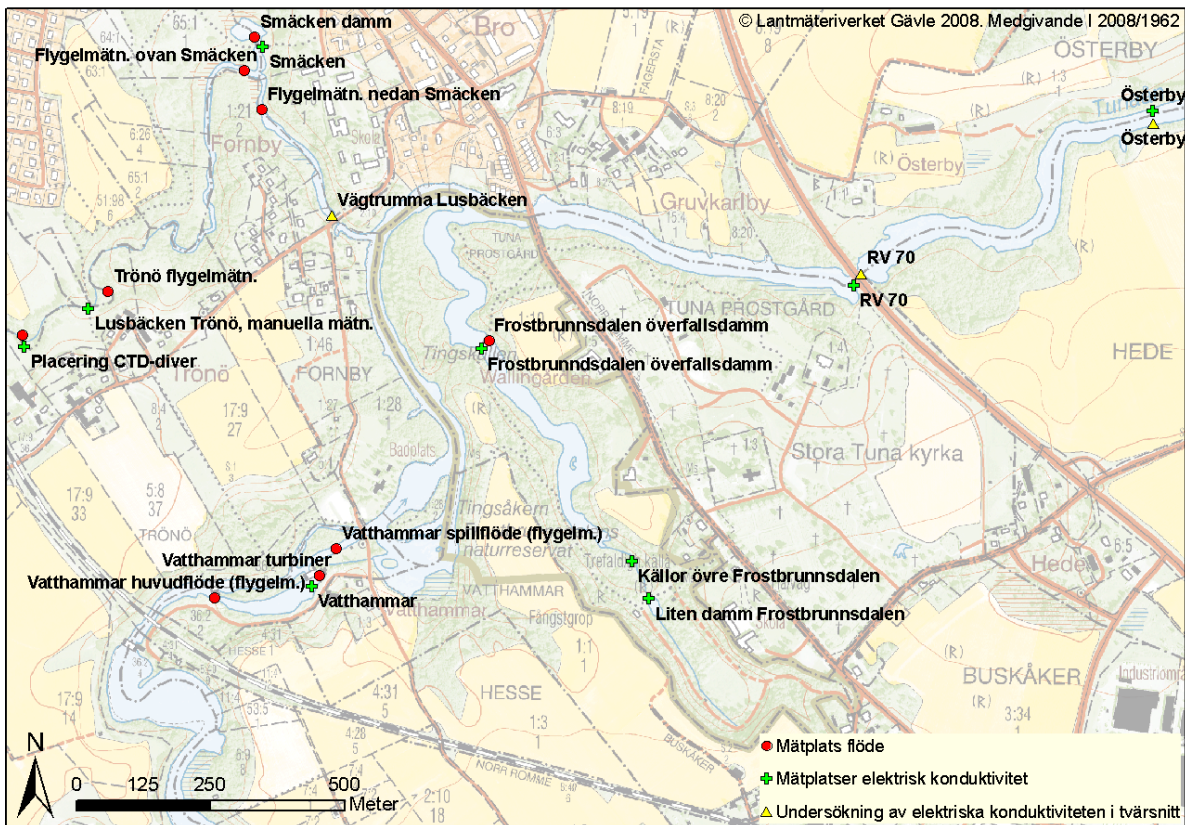
Elektrisk konduktivitet mäts genom att en ström sänds mellan två elektroder som är nedsänkta i en lösning vars elektriska konduktivitet önskas mätas. Spänningsskillnaden som uppstår mellan de två elektroderna är ett mått på lösningens förmåga att leda strömmen. Stor spänningsskillnad mellan elektroderna beror alltså på att lösningen har en dålig förmåga att leda ström. Lösningens förmåga att leda ström beror på hur många joner som finns i lösningen samt varje jons laddning och dess rörlighet i lösningen (Levlin & Hultman, 2008). Olika jonslag har olika strömledande egenskaper. Det är ett resultat av respektive jonslags laddning och rörlighet ju högre jonkoncentrationer i lösningen som mäts desto högre blir också påverkan från jonernas interaktioner sinsemellan (Walton, 1989). Denna interaktion varierar också mellan olika jonslag och kan beskrivas med hjälp av en aktivitetskoefficient, vilken kan beräknas. Interaktionen mellan jonerna är liten i sötvatten p.g.a. den låga koncentrationen av joner.

### 3 METOD

I följande kapitel beskrivs de metoder som använts i examensarbetet. I avsnitt 3.1 och 3.2 redogörs hur indata till modellen tagits fram. Modellen förklaras därefter i avsnitt 3.3 och 3.4. Resterande metoder och undersökningar förklaras i avsnitt 3.5 - 3.6.

#### 3.1 ELEKTRISK KONDUKTIVITET I YTVATTENDRAGEN

Den elektriska konduktiviteten mättes på de platser som finns redovisade i Figur 10. Mätplatsen vid RV 70 ersattes i början av juni med mätplatsen vid Österby efter det att omblandningen visat sig vara ofullständig vid riksvägen. Mätningarna vid Trönö (Lusbäcken) gjordes manuellt och från slutet av augusti även med täta intervall med automatisk datalagring. Likaså har mätningarna vid Österby skett både manuellt samt med automatisk datalagring under ett par perioder. Vid resterande mätplatser (Vatthammar, Frostbrunnsdalen överfallsdamm, liten damm Frostbrunnsdalen, Smäcken och källor övre Frostbrunnsdalen) har mätningarna skett manuellt. Omblandningen i vattendragen har kontrollerats vid vägtrumman i Lusbäcken, bron vid RV 70 och vid Österby. Omblandningen har undersökts genom att konduktiviteten sonderats i tvärsnitt vid dessa platser.



Figur 10. Mätplatser använda i examensarbetet.

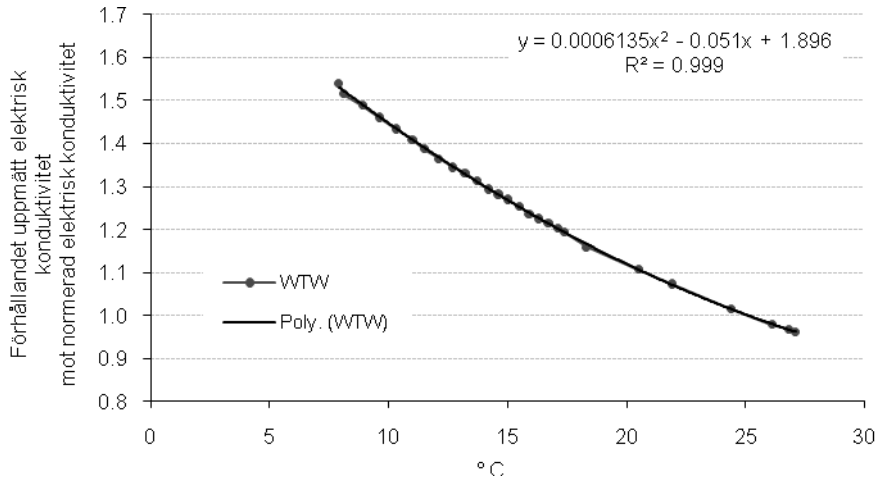
Den elektriska konduktiviteten har mätts med tre olika instrument av fabriken Hannah, WTW och Schlumberger. Hannah-mätaren är handhållen och har fördelen att dess mätprob är ansluten via en flera meter lång kabel vilket möjliggör mätningar på djupet i ytvattendrag. Mätaren från Schlumberger är en CTD-diver utan display, den registrerar förutom elektrisk konduktivitet också temperatur och tryck, lagringskapaciteten är 20 000 mätvärden. WTW-mätaren är liksom instrumentet från Hannah fältanpassat och har display. Kabellängden är ca 1,5 meter och instrumentet kan lagra 800 mätvärden inklusive temperatur. Eftersom mätplatserna var många och endast två instrument med datalagringsmöjlighet fanns så var möjligheten till kontinuerlig mätning på de flesta platser begränsad. CTD-divern placerades i Lusbäcken eftersom konduktiviteten här varierar kraftigt och dessutom var det önskvärt att mäta vattenståndet (mer om detta i nästa avsnitt). CTD-divern installerades i Lusbäcken först i slutet av augusti eftersom de två första exemplaren från tillverkaren var trasiga eller felprogrammerade, vilket upptäcktes vid test av instrumenten. Mätaren från Hannah är av lite enklare modell och temperaturen mäts men mätvärdet är inte tillgängligt för användaren, temperaturkorrektionen sker automatiskt i instrumentet. Hannah-mätaren har endast använts för att kontrollera variationerna i tvärsnitten. WTW-mätaren har använts vid alla resterande mätningar, även med automatisk lagring vid mätplasten i Österby.

### **3.1.1 Kalibrering av temperaturberoendet**

Den elektriska konduktivitets temperaturberoende förklaras av att förändringar i temperaturen i mediet för med sig en viskositetsförändring som påverkar de lösta jonerna (Walton, 1989). Låga temperaturer medför alltså att jonerna har svårare att röra sig och den uppmätta elektriska konduktiviteten påverkas. För att uppnå en så bra normering av den elektriska konduktiviteten som möjligt och därmed erhålla noggranna värden, har de två nyttjade instrumenten, som tillåter att användaren gör egen temperaturkorrektion, kalibrerats individuellt med hänsyn till deras temperaturberoende. Kalibrering har skett vid en elektrisk konduktivitet och en temperatur som ligger nära den som förekommer i fält. Detta medför att ekvationen för normeringen specialanpassats för rådande förhållanden.

### 3.1.2 Temperaturkalibrering av WTW-mätaren

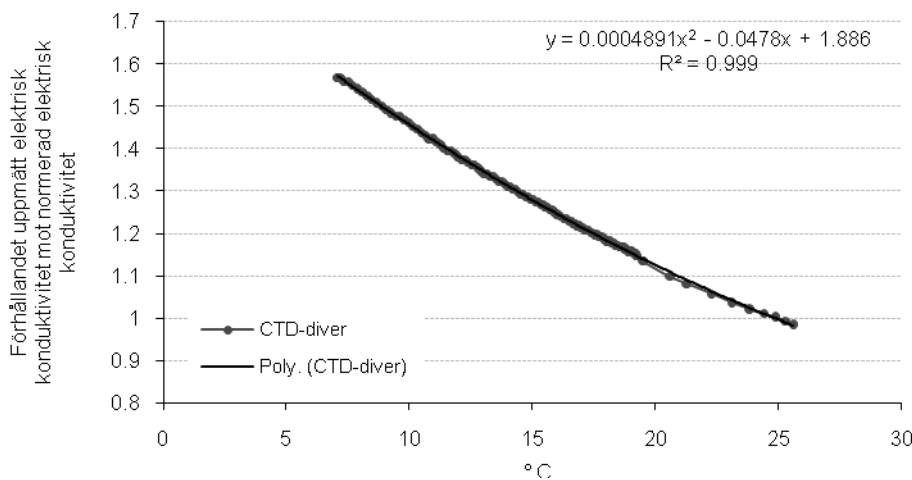
Kalibreringen ger ekvationen  $y = 0,0006135x^2 - 0,051x + 1,896$  där  $x$  = temperatur i °C och  $y$  är en faktor som multipliceras med den uppmätta konduktiviteten för normering.  $R^2$ -värdet ligger nära 1.



Figur 11. Kalibrering av temperaturberoendet hos WTW-mätaren framtagen vid en elektrisk konduktivitet på 277  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (normerad).

### 3.1.3 Temperaturkalibrering av CTD-diver

Kalibreringen ger ekvationen  $y = 0,0004891x^2 - 0,0478x + 1,886$  där  $x$  = temperatur i °C och  $y$  är en faktor som multipliceras med den uppmätta konduktiviteten för normering.  $R^2$ -värdet ligger nära 1.



Figur 12. Kalibrering av temperaturberoendet hos CTD-divern framtagen vid en elektrisk konduktivitet på 279  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (normerad).

## 3.2 FLÖDESMÄTNINGAR

Flera olika tekniker har använts för att mäta de olika flödeskomponenterna. Valet av teknik har baserats på de möjligheter som mätplatserna bjuder.

### 3.2.1 Vattenkraftsstationen vid Vatthammar

Vatthammars vattenkraftsstation består av tre turbiner och tre fördämningar, två av de tre turbinerna sitter parallellt med varandra vid kraftstationens nedersta damm. Den sammanslagna elproduktionen vid dessa två nedre turbiner registreras och sparas med en timmes upplösning. Vid flöden understigande ca  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  passerar huvuddelen av flödet genom turbinerna Persson (muntligen 2008) och det är möjligt att relatera mängden producerad el mot storleken på flödet. Den relation ( $Q = \text{faktor} * \text{producerad elektricitet}$ ) som Persson använder vid flödesberäkningar är linjär.

När vattenföringen i Tunaån gjorde det meningsfullt (flödet mindre än  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) att mäta flödet genom vattenkraftsstationen utfördes flygelmätningar mellan den övre turbinen och de två nedre. Mätplatsen har fördelen att vattnet flödar genom en cementkanal med väldefinierade dimensioner vilket medför att tvärsnittsarean blir noggrant uppskattad och dessutom är turbulensen liten. Ett mindre spillflöde passerar stationen utan att gå igenom turbinerna, även detta spillflöde kvantifierades genom flygelmätningar. Det linjära sambandet mellan vattenflödet och elproduktionen kalibrerades från dessa mätningar. Detta samband har sedan kunnat användas för att från elproduktionen ta fram en hydrograf. Ett problem i sammanhanget är att spillflödet har en viss variation beroende dels på vattenstånd och dels på driften av vattenkraftverket. Spillflödets storlek registreras inte kontinuerligt, dock utgör det en väsentligt mindre del än det flöde som passerar genom turbinerna.

### 3.2.2 Damm med rektangulärt överfall i Frostbrunnsdalen

Störst möda har lagts på att bestämma utflödet från Frostbrunnsdalen. Flödets ursprung är de källor som mynnar i dalgången. De synliga källflödena upptar en stor del av botten i den övre delen av Frostbrunnsdalens bäck. I Figur 13 återfinns en uppskattning av detta område.



**Figur 13. Område i Frostbrunnsdalens med distinkta utströmningspunkter samt mer diffus utströmning.**

Avsaknaden av bestämmande sektion i Frostbrunnsdalen medför att störningen i form av en vågrörelse som finns i Tunaån fortplantar sig upp i Frostbrunnsdalen och flödet rör sig cykliskt fram och tillbaka. Nettoflödet var därmed omöjligt att kvantifiera med de vanligaste enklare mätmetoderna (såsom flygelmätning och saltutspädning). Genom uppförandet av en damm löstes problematiken. Dammen uppfördes på en plats i den nedre delen av bäcken där de synliga källflödena hade upphört och den dominerande delen av utflödet troligtvis var avgränsad uppströms dammen. Genom dammbygget höjdes den övre vattenytan med upp till ett par decimeter i relation till den undre och en bestämmande sektion hade skapats och störningarna eliminerats.

Dammbygget var en utmaning då bredden på vattendraget vid byggplatsen var 35 meter och djupet drygt en meter. Tvärsnittsarean var  $45 \text{ m}^2$  och belastningen över hela tvärsnittsarean var ca 90 kN. En byggnadsställning uppfördes tvärs över vattendraget.

Ställningen var stommen i dammbygget och mot denna sattes staket som sedan täcktes med presenningar som spärrade vattenflödet. Efter en incident med läckage genom sedimenten under presenningarna överlappades de med ytterligare en presenning vilken hade en längd motsvarande åbredden. En stor mängd sandsäckar placerades på botten längs hela den friliggande främre kanten på den sista presenningen. Kombinationen med många sandsäckar samt tätning med den sista presenningen medförde att dammen fortsättningsvis höll tätt. I mitten av fördämningen lämnades en öppning i staketet på 3 meter med avsikten att göra plats för ett rektangulärt överfall. Figur 14 visar pågående dammbyggnation.



**Figur 14. Foto på pågående dammbyggnation. Till höger återfinns dammkonstruktionen, uppe till vänster syns en hängbro. I vattnet kan raderna med sandsäckar på presenningarna skymtas. De blå tunnorna var fyllda med vatten för att öka konstruktionens vikt. Vattnet flödar från vänster till höger i bilden.**

Anledningen till att ett rektangulärt överfall valdes var att minimera dämmningshöjden och därmed minimera påverkan uppströms samt att hålla påfrestningarna på konstruktionen så små som möjligt. Stora variationer i flödet förväntades inte heller i aktuellt fall och ett triangulärt överfall skulle därmed inte förbättra noggrannheten. Ett rektangulärt överfall med en bredd på 2,5 meter tillverkades i 2 mm tjock plåt. Vattenföringen har beräknats ur

formeln ursprungligen föreslagen av Kindsvater-Carter (1959)

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} (B + K_b)(h + K_h)^{2/3} \quad (3)$$

där  $h$  = vattenytans höjd över överfallskanten

$B$  = överfallets bredd

$C_d$  = avbördningskoefficient

$g$  = tyngdaccelerationen

$K_h$  och  $K_b$  = faktorer för effekterna av ytspänning och viskositet (tabellvärden)

Metoden rekommenderas av ISO (International Organization of Standards), ASTM (American Society for Testing and Materials) samt USBR (United States Bureau of Reclamation) enligt LMNO Engineering (internetkälla, lmnoeng.com). Vattenståndshöjden över överfallskanten har uppmätts dels manuellt, dels med en tryckgivare. En förhoppning var att kunna registrera förändringar i vattenföringen, samtidigt som tryckgivare placerade i observationsrör i akviferen kunde ge information om grundvattennivån för att söka hitta ett samband däremellan. Dammen byggdes inom naturreservatsområdet med tillstånd av Länsstyrelsen Dalarna.

### 3.2.3 Lusbäcken

Flödet i Lusbäcken varierar kraftigt vid nederbörd eftersom stora delar av avrinningsområdet består av hårdgjorda ytor med mycket snabb respons. I Lusbäcken installerades därför en tryckgivare med möjlighet till täta mätningar. Tryckgivaren placerades vid ett lugnvattenparti i bäcken vid Trönö. En enkel avbördningskurva skapades genom flödesbestämning med hjälp av flygel vid några olika flödessituationer (och därmed olika vattenstånd). De data som så småningom visade sig komma till nytta härrör från en period utan nederbörd och med ett långsamt avklingande flöde i Lusbäcken.

### 3.2.4 Smäcken

För att försöka bestämma utflödet som mynnar i Smäcken har två olika metoder använts eftersom förhållandena ändrats på platsen under examensarbetets gång. Den första mätningen gjordes med hjälp av flygel under våren när flödet i Lusbäcken p.g.a. lågt vattenstånd i Dalälven hade entydig flödesriktning. En flygelmätning före respektive en efter Smäckens utflöde i Lusbäcken utfördes. Differensen mellan dessa två mätningar antogs sedan utgöra utflödet från Smäcken. När vattenståndet senare medförde att flödet i Lusbäcken ej längre rörde sig entydigt nerströms och dessutom omöjliggjordes vadning så byttes taktiken. Smäckens utlopp sker över en horisontell kant med en bredd på ca 3,3 m. Längs en del av denna kant är det möjligt att komma under med en hink och därmed fylla hinken under tidtagning. Hinken som användes var ca en tiondel så lång som överfallskanten och flödet uppmätt med hinken antogs således utgöra ca en tiondel av det totala flödet.





Figur 15. Flygelmätning i Lusbäcken i april 2008. Foto Christian Johansson.

### 3.3 MASSBALANS

#### 3.3.1 Ekvationssystem 1

Antagandet om massans bevarande säger att summan av massflöden in i ett system motsvaras av summan av utflödande massa och därtill eventuellt lagrad massa. Användbara massflöden, i studien, var vattenflöden samt flöden av i vattnet lösta joner. Mängden i vattnet lösta joner kan mätas indirekt genom den elektriska konduktiviteten vilken behandlas som ett koncentrationsmått. Tanken var att använda massbalans för att lösa ut de komponenter (utströmmande grundvatten) i systemet som ej kunde mätas direkt. Idén byggde på flera antaganden om systemet och ledde fram till ett ekvationssystem där utflödet från åsens norra respektive södra del löstes ut. Examensarbetets övergripande syfte skulle därigenom kunna nås.

Definition av i systemet ingående komponenter

*Flöden  $Q$*

$Q_n$  = Nedströms i Tunaån vid RV 70

$Q_u$  = Uppströms i Tunaån vid Vatthammar

$Q_N$  = Utflöde av grundvatten från norr (totalt)

$Q_S$  = Utflöde av grundvatten från söder (totalt)

$Q_{N \text{ okänd}}$  = Utflöde av grundvatten från norr som inte mättes

$Q_L$  = Lusbäcken uppströms Smäcken

$Q_{L,n}$  = Lusbäcken nedströms Smäcken

$Q_{sm}$  = Smäcken

$Q_{FrBr}$  = Frostbrunnsdalen

### Koncentrationer C

$C_n$  = Tunaån nedströms RV 70

$C_u$  = Tunaån uppströms (Vatthammar)

$C_N$  = Grundvatten från norr

$C_S$  = Grundvatten från söder

$C_{N\text{ okänd}}$  = Utflödande grundvatten från norr (vars flöde inte kunde mätas direkt)

$C_L$  = Lusbäcken uppströms Smäcken

$C_{L,n}$  = Lusbäcken nedströms Smäcken

$C_{sm}$  = Smäcken

$C_{FrBr}$  = Frostbrunnsdalen

Mätplatserna för dessa koncentrationer och flöden kan ses i Figur 10 i metodavsnittet. Alla variabler förutom  $Q_n$ ,  $Q_N$ ,  $Q_{N\text{ okänd}}$ ,  $Q_S$ ,  $Q_{FrBr}$ ,  $Q_{L,n}$  och  $Q_{sm}$  antogs vara mätbara. Följande ekvationer kunde då ställas upp

### Massbalans vatten

$$Q_n = Q_u + Q_L + Q_N + Q_S \quad (4)$$

$$Q_{FrBr} = Q_N - Q_{sm} + Q_S \quad (5)$$

$$Q_N = Q_{sm} + Q_{N\text{ okänd}} \quad (6)$$

$$Q_{L,n} = Q_{sm} + Q_L \quad (7)$$

### Massbalans konduktivitet (egentligen lösta joner)

$$Q_n C_n = Q_u C_u + Q_L C_L + Q_N C_N + Q_S C_S \quad (8)$$

$$Q_{FrBr} C_{FrBr} = Q_N C_N - Q_{sm} C_{sm} + Q_S C_S \quad (9)$$

$$Q_N C_N = Q_{N\text{ okänd}} C_{N\text{ okänd}} + Q_{sm} C_{sm} \quad (10)$$

$$Q_{L,n} C_{L,n} = Q_{sm} C_{sm} + Q_L C_L \quad (11)$$

Ekvationslösning ger då

(5) och (11)  $\Rightarrow$

$$Q_{sm} = [ Q_L (C_L - C_{L,n}) ] / (C_{sm} - C_{L,n}) \quad (12)$$

Alla variabler kända förutom flödet från Smäcken!

(4), (8), (5) och (9)  $\Rightarrow$

$$Q_N = [ - Q_{sm} (C_{FrBr} + C_{sm}) (C_S - C_n) - (Q_u C_n + Q_L C_n - Q_u C_u - Q_L C_L) (C_S - C_{FrBr}) ] / (C_S (C_n - C_{FrBr}) + C_N (C_{FrBr} - C_n)), C_S \neq C_N \text{ ty division med } 0. \quad (13)$$

Alla variabler kända förutom utflödet från norr!

(4), (8), (5) och (9)  $\Rightarrow$

$$Q_S = [ ((Q_u + Q_L) C_n - Q_u C_u - Q_L C_L) (C_N - C_{FrBr}) + Q_{sm} (C_{FrBr} + C_{sm}) (C_N - C_n) ] / ((C_{FrBr} - C_S) (C_N - C_n) - (C_n - C_S) (C_N - C_{FrBr})) C_S \neq C_N \text{ ty division med } 0. \quad (14)$$

Alla variabler kända förutom utflödet från söder!

Om  $C_S = C_N$

(4), (8) och  $C_S = C_N \Rightarrow$

$$Q_N + Q_S = [Q_u C_u + Q_L C_L + C_n(-Q_u - Q_L)] / (C_n - C_S) \quad (15)$$

Flödet från de norra och de södra delarna av åsen kan här ej skiljas åt.

Ekvation 15 behövde bara användas om den elektriska konduktiviteten i grundvattnet från norr och söder hade allt för små skillnader. Förhoppningen var att ekvation 15 inte skulle behöva nyttjas. För att kunna lösa ovan beskrivna ekvationer behövdes en tidsserie med de mätbara variablerna. Datainsamling för detta inleddes vårvintern 2008 av Midvatten AB med avsikten att skapa en lång tidsserie med data.

### 3.3.2 Kontroll av antaganden

Tyvär visade det sig senare att den höga vattenföringen som förelåg under våren 2008 innebar att data från Vatthammar inte kunde ge tillräckligt bra vattenföringsinformation, då mycket vatten passerade vattenkraftstationen via breddöverfallet och inte genom turbinerna. Vid inledningen av fältarbetet i detta examensarbete kontrollerades omblandningen av vattenmassorna vid mätplatserna genom att den elektriska konduktivitetsvariationer i tvärsnitt av vattendragen sonderades. Den nedre mätplatsen vid vägtrumman i Lusbäcken hade ett kraftigt skiktat vatten, detsamma upptäcktes vid RV 70 (se Figur 10). Dessutom hade en stigande vattennivå i systemet medfört att vatten från Tunaån pressats in i Frostbrunnsdalens bäck och konduktiviteten var här starkt färgad av detta, tillståndet förbättrades inte heller under början av sommaren.

En följd av detta var att den tidsserie som samlats in för att kunna lösa ekvationerna delvis ej var användbar och dessutom hade antagandena som stödde de utvecklade ekvationer visat sig vara falska. Följaktligen behövde angreppssättet revideras.

### 3.3.3 Ekvationssystem 2

För att komma runt de svårigheter beskrivna i avsnittet ovan förflyttades mätplatsen av den elektriska konduktiviteten vid RV 70 i Tunaån några hundra meter nedströms, dessutom beslutade Midvatten AB att uppföra en damm i Frostbrunnsdalen. Möjligheten att använda tid-volym metoden för flödesbestämning vid Smäcken utvärderades också och utflödet bedömdes kunna kvantifieras på ett godtagbart sätt med denna metod. Ekvation 12 blev därmed överflödig. Nedflyttningen av den nedre mätplatsen i Tunaån medförde att vattnet gick igenom några kraftiga vindlingar samt att sträckan för omblandning förlängdes. Tvärsnittet vid den nya mätplatsen vid Österby (se Figur 10) visade också att omblandningen var betydligt bättre här. Med utflödet från både Frostbrunnsdalen och Smäcken avgränsade och direkt mätbara kunde en reviderad massbalansmodell användas för att ta reda på om dessa nu avgränsade utflöden utgjorde hela massbalansstillskottet i systemet eller om ytterligare ej mätta utflöden förekommer och i så fall i vilken kvantitet.

## Reviderade ekvationer

### *Massbalans vatten*

$$Q_n = Q_u + Q_L + Q_X + Q_{FrBr} + Q_{sm} \quad (16)$$

### *Massbalans konduktivitet (egentligen lösta joner)*

$$Q_n C_n = Q_u C_u + Q_L C_L + Q_X C_X + Q_{FrBr} C_{FrBr} + Q_{sm} C_{sm} \quad (17)$$

där  $Q_X$  = ytterligare utflöde  
 $C_X$  = koncentrationen i det ytterligare utflödet

Ekvationslösning ger då

$$Q_X = [Q_u(C_u - 1) + Q_L(C_L - 1) + Q_{FrBr}(C_{FrBr} - 1) + Q_{sm}(C_{sm} - 1)] / (1 - C_X) \quad (18)$$

Alla ingående variabler kända förutom det ytterligare ej mätta utflödet.

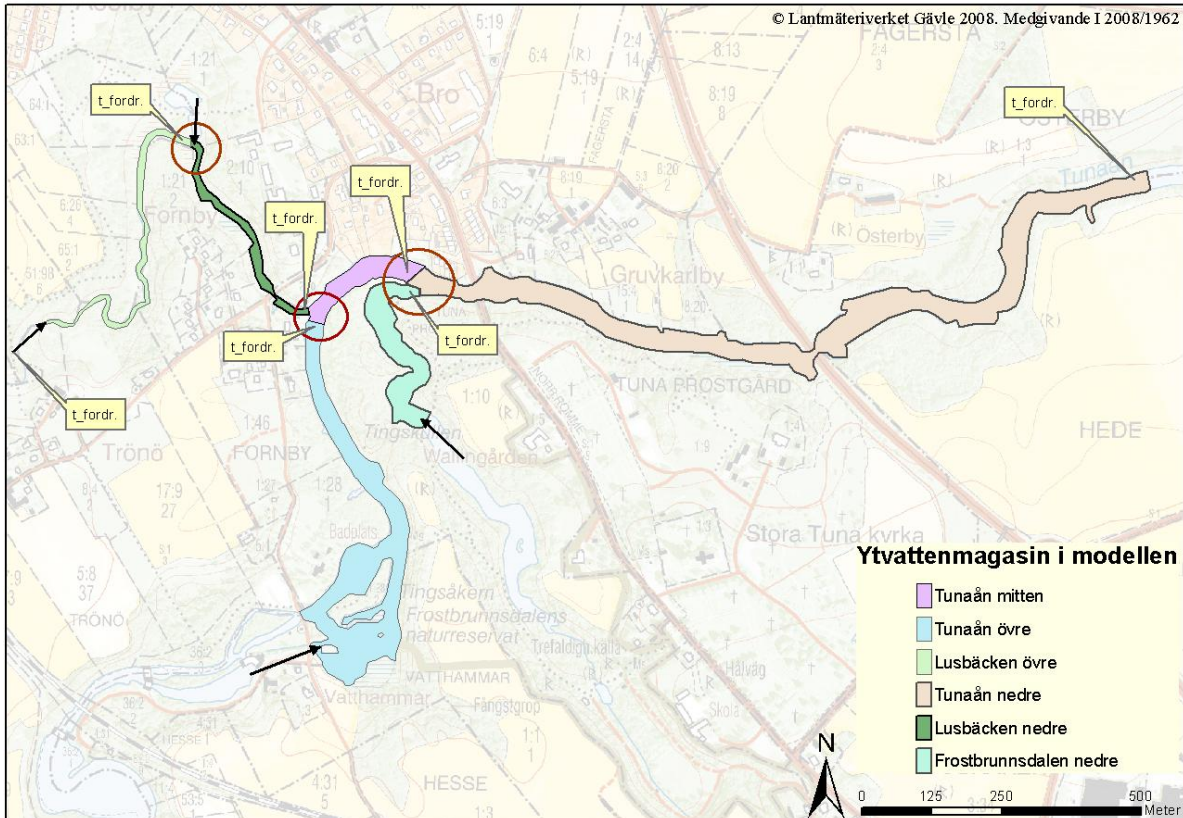
## **3.4 NUMERISK MODELL**

En numerisk modell behövde utvecklas eftersom systemets variabler som t.ex. lagring, konduktiviteter och vissa flöden visade sig variera mycket i tiden.

### **3.4.1 Uppbyggnad**

Modellverktyget Simulink användes i modellbyggandet. Simulink är en del av programpaketet i Matlab och kan användas för att med ett grafiskt angreppssätt analysera komplexa system, såväl kontinuerliga som diskreta (Stokes, 2006).

Ytvattendragen delas i modellen upp i sex ytvattenmagasin: ”Lusbäcken övre”, ”Lusbäcken nedre”, ”Tunaån övre”, ”Tunaån mitten”, ”Tunaån nedre” och ”Frostbrunnsdalen nedre” (se Figur 16). Vattenbalans upprättas för vart och ett av dessa ytvattenmagasin. Tidssteget som användes i modellen är på en timme. Vissa data med tätare tidsintervall har därför medelvärdesbildats medan andra har extrapolerats för att anpassas till tidssteget.



**Figur 16. Komponenter i den numeriska modellen. Svarta pilar symboliserar inflöden från mätningar. De röda ringarna utmärker platser med omblandning. Rutorna med t\_fodr visar var tidsfördröjning lades in i modellen.**

### Vatten och massflöden i modellen

Inflödesdata av vatten och elektrisk konduktivitet till ytvattenmagasinet ”Lusbacken övre” kommer från resultatet av mätningarna i Lusbacken vid Trönö. Inflödesdata av vatten och elektrisk konduktivitet till ytvattenmagasinet ”Tunaån övre” kommer från resultatet av mätningarna vid Vathammar. Inflödesdata av vatten och elektrisk konduktivitet till ytvattenmagasinet ”Frostbrunnsdalen nedre” kommer från resultatet av mätningarna vid överfallsdammen i Frostbrunnsdalen.

Utflödet från varje ytvattenmagasin beror på inflödet och eventuell förändring i magasineringen. Förändringen i magasineringen räknades fram ur skillnaden i vattenstånd multiplicerat med ytvattenmagasinets ytarea (som antas vara konstant). Ekvationen för utflödet i varje ytvattenmagasin såg då ut som följer i modellen

$$Q_{ut} = Q_{in} - Ytarea * \text{förändring\_vattenstånd} \quad (19)$$

där  $Q_{ut}$  = Utflödet från respektive ytvattenmagasin  
 $Ytarea$  = Respektive vattenmagasins ytarea  
 Förändring\_vattenstånd = Förändringen i vattenstånd under tidssteget

Inflödet av vatten till ytvattenmagasinen ”Lusbäcken nedre”, ”Tunaån mitten” och ”Tunaån nedre” räknas fram genom att de flöden som mynnar i respektive ytvattenmagasin summeras. För ”Lusbäcken nedre” summeras utflödet från ”Lusbäcken övre” och utflödet från Smäcken. Inflödet till ”Tunaån mitten” är summan av utflödet från ”Lusbäcken nedre” och ”Tunaån övre”. Inflödet till ”Tunaån nedre” i sin tur är summan av utflödet från ”Tunaån mitten” och ”Frostbrunnsdalen nedre”.

Den elektriska konduktiviteten i det inflödande vattnet till respektive ytvattenmagasin räknades fram under antagandet att omblandningen mellan de två bidragande komponenterna är ideal. Antagandet är en förenkling, som inte riktigt stämmer med verkligheten, eftersom omblandningen antas ske direkt när de två komponenterna flödar samman, denna omblandning sker i själva verket under vattnets vidare färd i ytvattendragen. Ekvation för omblandningen i modellen

$$C_{ombladad} = (Q_1 * C_1 + Q_2 * C_2) / (Q_1 + Q_2) \quad (20)$$

där  $Q_1$  = Flödet från komponent 1  
 $Q_2$  = Flödet från komponent 2  
 $C_1$  = Elektriska konduktiviteten från komponent 1  
 $C_2$  = Elektriska konduktiviteten från komponent 2

### Tidsfördröjning

Flödet av vatten och elektrisk konduktivitet fördröjs genom varje ytvattenmagasin i modellen. Ett antagande om kolvflöde har gjorts vid beräkningen av tidsfördröjningen. För att erhålla fördröjningen beräknas vattnets medelhastighet genom ytvattenmagasinet. Detta åstadkoms genom att utflödet av vatten från magasinet divideras med magasinets tvärsnittsarea. Tvärsnittsarean antogs vara konstant i beräkningarna eftersom vattenståndsförändringarnas inverkan på arean var marginell. Tvärsnittsarean för respektive ytvattenmagasin har dels erhållits vid flygelmätningar, dels vid flödesmätningar. Även ytareor och ytvattendragens längd, tillsammans med kvalificerade gissningar om medeldjup, har använts för uppskattningen av tvärsnittsareor. Dessa areor har sedan minskats med en faktor i ett försök att beskriva över hur stor del av respektive tvärsnitt som något egentligt vattenflöde sker. Faktorn har uppskattats från rekognosering i fält och kunskapen om vilka ungefärliga flöden som sker i respektive ytvattenmagasin. För exempelvis ”Frostbrunnsdalen nedre” är tvärsnittsarean stor i jämförelse med flödet och faktorn uppskattades delvis på grund av detta vara jämförelsevis liten. Vid besök i fält var det också tydligt att den största delen av flödet genom ”Frostbrunnsdalen nedre” skedde i en strömfåra mycket smalare än vattendragets totala bredd.

**Tabell 1. Data för beräkning av vattnets medelhastighet i den numeriska modellen.**

Ytvattenmagasin	Tvårsnittsarea [m <sup>2</sup> ]	Aktiv andel av tvärsnitt
Tunaån övre	82	0,7
Tunaån mitten	82	0,6
Tunaån nedre	82	0,6
Lusbäcken övre	6,1	0,8
Lusbäcken nedre	8,8	0,7
Frostbrunnsdalen nedre	35	0,5

Vattnets medelhastighet i respektive ytvattenmagasin och ytvattenmagasinets längd användes sen för att beräkna tidsfördröjningen. Ekvationen för beräkningen av tidsfördröjningen i respektive ytvattenmagasin var således

$$t_{\text{fördr}} = \frac{\text{sträcka}}{Q_{\text{ut}} / (\text{Tvårsnittsarean} * \text{aktivandel av tvärsnitt})} \quad (21)$$

Den längsta tidsfördröjningen genom systemet uppgick i modellen till ca 10 timmar under de aktuella förhållandena.

### 3.4.2 Indata, vald tidsperiod

Avgörande för att med hjälp av modellen kunna erhålla giltiga resultat var vilka indata som användes. Den enda dataserie som fanns att tillgå sträckte sig över nästan nio dygn under slutet av september. Resterande data som fanns var inte fullständiga, t.ex. saknades det ofta tillförlitliga flödesdata från vattenkraftstationen vid Vatthammar. Dessutom begränsades mätningarna till den tid då dammen i Frostbrunnsdalen var uppförd. Begränsningar fanns även inom de nio dygnen som användes, då den elektriska konduktiviteten vid Österby ej var mätt med tillräckligt täta intervall och vissa flödesdata från Vatthammar var tveksamma. Hela denna serie användes som ursprunglig indata i modellen, en mindre del av denna dataserie har sedan valts ut som extra tillförlitlig. Kriterierna för avgränsningen av den mindre delen av dataserien var:

- Täta mätningar av den elektriska konduktiviteten vid Österby finns.
- Variationerna i vattenföringen vid Vatthammar är rimliga och resultaten av tidigare orimliga variationer har hunnit försvinna ur modellen.
- Ingen nederbörd.

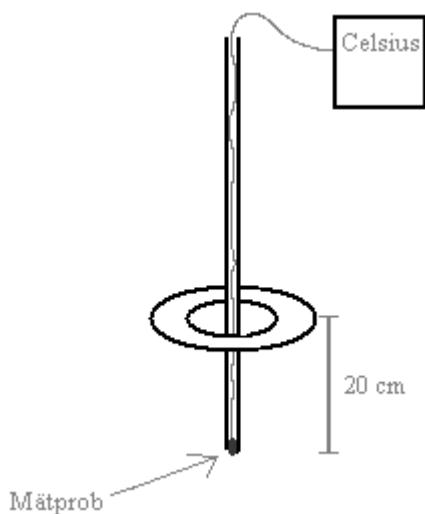
Dessa kriterier avgränsade den tillförlitliga tidsserien till tiden mellan 2008-09-26 21:00 och 2008-09-29 14:00.

### 3.5 SEDIMENTTEMPERATUR SOM UTSTRÖMNINGSINDIKATION

Massbalansstudien kompletterades med försök att dels hitta ytterligare utströmningsområden än de kända, dels försök att få en bild av dessas utflöde. En kartläggning av ytterligare utströmningsområden gjordes med en temperaturkartläggning medan försök till kvantifiering utfördes med hjälp av utströmningsmätare.

#### 3.5.1 Material och metod

En temperatursond tillverkades av en vanlig digital hushållstermometer med mätproben placerad i änden på en sladd. För att kunna få ned mätproben på önskat djup fästes den i spetsen på en jordartssonderingskäpp av en längd på ca en meter. Käppen förlängdes med ett träskaft på ett par meter. Två decimeter ovan käppens nedre spets fästes en platta för att hejda nedförandet i sedimenten på detta önskade djup (2 dm).



**Figur 17. Principskiss mätanordning för sedimenttemperatur.**

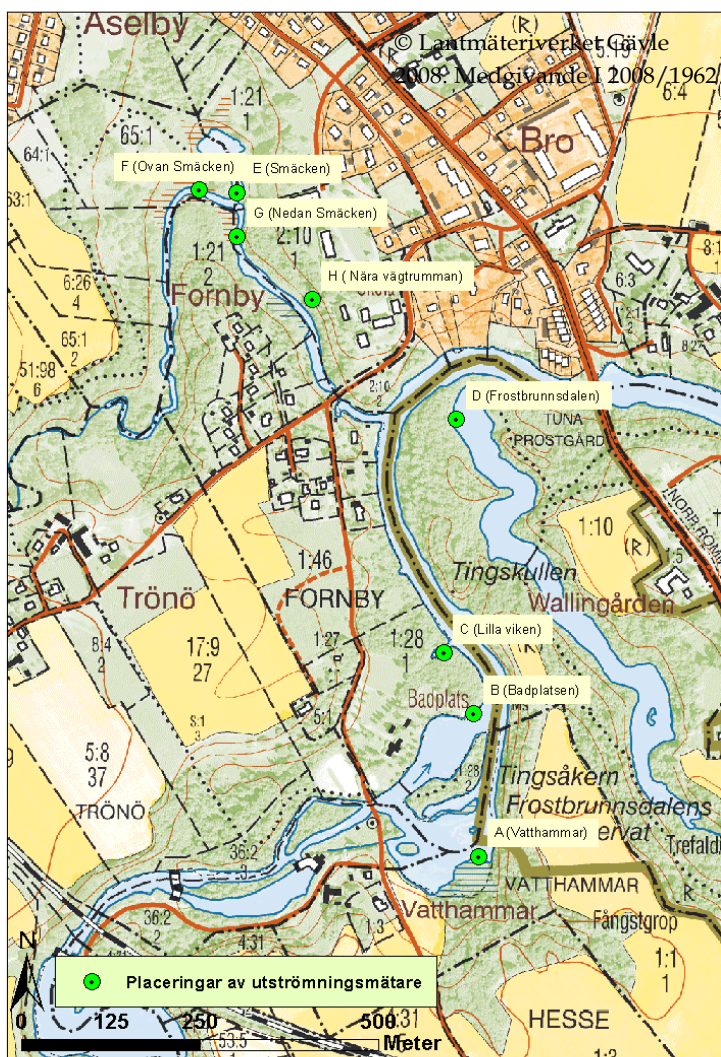
Konstruktionen visade sig lyckad förutom att det tog en stund innan temperaturmätningen stabiliserade sig. Kartläggningen utfördes sedan från en vanlig roddbåt längs Tunaån mellan utskovet vid Vatthammar och sammanflödet med Frostbrunnsdalen. Anledningen att sträckan längre nedströms inte undersöktes var att vattentemperaturen här var starkt påverkad av utströmningen av det kalla källvattnet från Frostbrunnsdalen och att en tillräckligt hög temperaturkontrast därför ej uppnåddes. Samtidigt antogs att något större utflöde ej torde äga rum längre nedströms eftersom åsens förmodade sträckning löper längre uppströms. Provtagningspunkterna, 19 till antalet, registrerades med en handhållen GPS-enhet där noggrannheten vid de flesta punkterna uppgavs ligga på  $\pm 2$  meter och i några fall på upp till  $\pm 8$  meter. Vid alla punkter utom en gick det bra att sondera på önskat djup, den avvikande punkten sonderades på ett djup av ca 15 cm istället som i de övriga fallen på 20 cm. Bottensedimenten upplevdes vara finkorniga.



Vid samma tillfällen som sedimenttemperaturen mättes noterades även ytvattentemperaturen ca en decimeter ovan botten. Platser med stor differens mellan ytvattnet och sedimenten borde i enlighet med tidigare studier vara de med störst utströmning.

### 3.6 UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR

De platser som via temperaturkartläggningen visade störst anomalier mellan ytvattentemperaturen och sedimenttemperaturen undersöktes med utströmningsmätare. Plats B vid badplatsen (Figur 18) valdes då synliga spår av utströmning sågs vid rekognosering på platsen. Även platser intill Smäckens utlopp valdes ut på grund av att markerna i närheten är fuktiga och att grundvattenytan i närliggande observationsrör ligger upp till tio meter över markytan.



Figur 18. Placeringar av utströmningsmätare.

### **3.6.1 Material och metod**

De utströmningsmätare som användes har en enkel konstruktion i form av en metallcylinder med den ena änden öppen och den andra slutet så när som på en anslutning till vilken en slang kopplas. Radien är 7,5 cm och mätarna täcker således in ca 177 cm<sup>2</sup> av botten. Till änden på slangen kopplas en snabbkoppling med en treliters plastpåse. Snabbkopplingen möjliggör att plastpåsen enkelt kan kopplas lös för mätning. Vid installation av mätaren trycks den öppna änden av cylindern ner i sedimenten så att det sluter tätt och den nu avgränsade bottenareans enda utlopp eller inlopp går igenom slangen som sitter i locket av cylindern. Eftersom påsen som sätts i änden på slangen lätt kan anta ny form så är trycket i vattnen utanför påsen ekvivalent med trycket i vattnet i påsen. Vid mätningarna skyddades påsen genom att den placerades i en hink som ställdes på botten, hinken försågs med lock som inte slöt tätt så att en öppen förbindelse fanns mellan hinken och vattenmassan utanför. Fördelen med detta var att påsen skyddades mot påverkan av strömmande ytvatten samt att den skyddades mot yttre påverkan som exempelvis skulle kunna punktera den. Utströmningsmätarna placerades i par några decimeter ifrån varandra på botten för att kontrollen av samstämmigheten inom paren skulle kunna göras. Påsarna fylldes ursprungligen halvfulla med vatten för att möjliggöra registrering av såväl ut- som inströmning. Påsarna togs upp med några dagars mellanrum och deras vikter antecknades. Efter 14 dagar flyttades sex av tio mätare då de bedömdes kunna ge intressantare information på nya platser. Figur 18 visar de olika mätplatserna.

## **3.7 ELEKTRISK KONDUKTIVITET I AKVIFERERNA**

Vid de, under 2008, genomförda borrhningarna i undersökningsområdet, har vattenprover samlats in under själva rördrivningen, vilket gjort det möjligt att erhålla prov på flera nivåer i akvifererna. När en rördrivning är färdigställd är det endast möjligt att ta prover på den nivå som rörets filterdel sitter i. I samtliga här nydrivna rör sitter filterdelen längst ner i röret på den sista metern. Sammanlagt har nästan 150 stycken prov tagits på de drygt tjugotal rör som borrats. Provtagningen skedde när rören blåstes ur med tryckluft på varje nivå. Innan vattenproven samlades in blåstes borrkaxet ur. Spetsens djup under markytan noterades och vattenproven analyserades sedan inomhus.

### **3.7.1 Analys av den elektriska konduktiviteten i akvifererna**

Variationerna i den elektriska konduktiviteten har analyserats för att söka identifiera olika vattenmassor och eventuellt underlätta tolkningen av huvudsakliga flödesvägar för grundvattnet. Vid tolkningen har även annan information från borrhningarna använts såsom information om lager med hög respektive låg hydraulisk konduktivitet men framförallt grundvattenytans nivå. Samband har sökts mellan akviferernas elektriska konduktivitet, vattengenomträngligheten samt jordart.

### 3.7.2 Dominerande jonslags bidrag till den elektriska konduktiviteten

I ett flertal rör har vattenprover tagits och skickats på analys till laboratorium (Alcontrol i Karlstad). Proven har där analyserats med avseende på de i grundvatten vanligen dominerande jonslagen såsom kalium, magnesium, kalcium, natrium, sulfat, alkalinitet, klorid, järn och mangan. Även den elektriska konduktiviteten har analyserats på laboratoriet.

Den teoretiska elektriska konduktiviteten kan räknas fram från analysresultaten med de dominerande jonslagen. Den teoretiska konduktiviteten jämförs med den uppmätta, dessutom erhålls bidraget från respektive jonslag.

Walton (1989) beskriver hur den teoretiska konduktiviteten kan beräknas med följande formel

$$EC_{25} = \Lambda_{\infty} \cdot C \quad (22)$$

där  $EC_{25}$  = Teoretisk elektrisk konduktivitet normerad till 25 ° C

$\Lambda_{\infty}$  = molär ledningsförmåga vid oändlig utspädning

C = koncentration

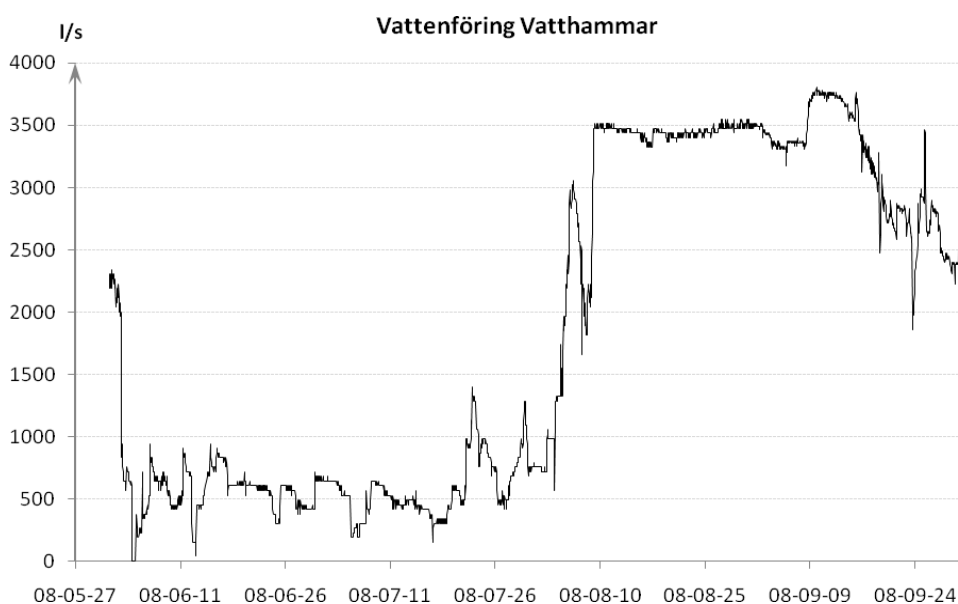
Molär ledningsförmåga för ett jonslag påverkas av hur hög koncentration lösningen har eftersom jonerna interagerar. Oändlig utspädning inträffar i praktiken kring ca  $10^{-4}$  molar vilket motsvarande ett  $EC_{25}$  på ca 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Walton, 1989). Avvikelsen mellan teoretisk och uppmätt elektrisk konduktivitet ökar med ökande koncentrationer på grund av interaktionen. För lösningar där sammanlagda jonkoncentrationen understiger 0,5 M kan Davies ekvation användas för att räkna ut en aktivitetskoefficient, med vilken den teoretiska elektriska konduktiviteten kan justeras med hänsyn till jonernas interaktion med varandra.

## 4 RESULTAT OCH OBSERVATIONER

### 4.1 FLÖDESMÄTNINGAR

#### 4.1.1 Vatthammar

Flödet vid Vatthammar var mycket lågt under högsommaren. Den kraftiga flödesökningen i början av augusti var ett resultat av det myckna regnandet. Efter regnen blev flödet så pass stort att det översteg 3500 l/s och därigenom är kapacitetstaket i kraftverket nådd och flödet överstigande detta registreras inte. Detta är också förklaringen till att flödet i augusti ser ut att vara stabilt, vilket vi alltså inte vet om det är.



**Figur 19. Vattenföring vid Vatthammars kraftstation framräknat ur producerad elektricitet. Faktorn som använts för omräkning från producerad elektricitet till vattenföring är 37,8 [(l/s)/kWh]. Flöden överstigande ca 3500 l/s registreras ej.**

Resultaten av flygelmätningarna och dess samband med producerad elektricitet kan ses i Tabell 2. Faktorn som beskriver sambandet mellan producerad el och flödet genom turbinerna har små variationer. Tas även hänsyn till spillflödet blir variationerna av faktorn större vilket beror på att spillflödet kan variera utan att det har någon effekt på mängden producerad elektricitet.

**Tabell 2. Flygelmätningar utförda vid Vatthammar och resulterande effektfaktor för turbinerna i vattenkraftverket.**

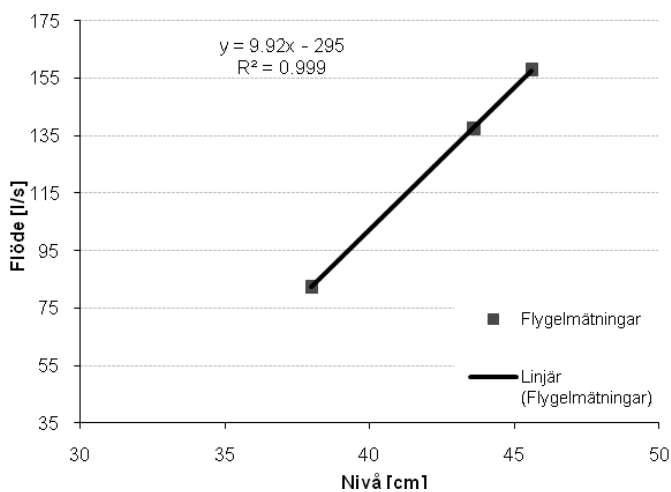
Plats	Dag	Tid	Producerad el [kWh]	Flöde flygelmätning [l/s]	Faktor [ $\frac{l/s}{kWh}$ ]
Huvudfåra	23/9	9:15-10:00	70,2	2652	Genom turbin: 36,7
Spillfåra	23/9	10:15-10:45	70,2	76	Inkl spillflöde: 37,8
Huvudfåra	29/9	15:00-15:50	63,6	2716	Genom turbin: 38,0
Spillfåra	29/9	16:20-17:00	63,6	297	Inkl spillflöde: 42,7
Huvudfåra	30/9	9:40-10:40	66,0	2821	Genom turbin: 38,7
Spillfåra	30/9	11:00-11:40	64,8	270	Inkl spillflöde: 42,7
Medelvärde					Genom turbin: 37,8 Inkl spillflöde: 41,1

#### 4.1.2 Damm med rektangulärt överfall i Frostbrunnsdalen

Data från tryckloggen stämmer ej överens med manuella mätningar p.g.a. att lufttryckskompensationen inte stämmer. Manuella mätningar vid överfallet visar en stabil vattennivå i förhållande till överfallskanten på ca 11,6-11,9 cm vilket med teoretisk ekvation för rektangulärt överfall ger ett flöde om ca 182 l/s.

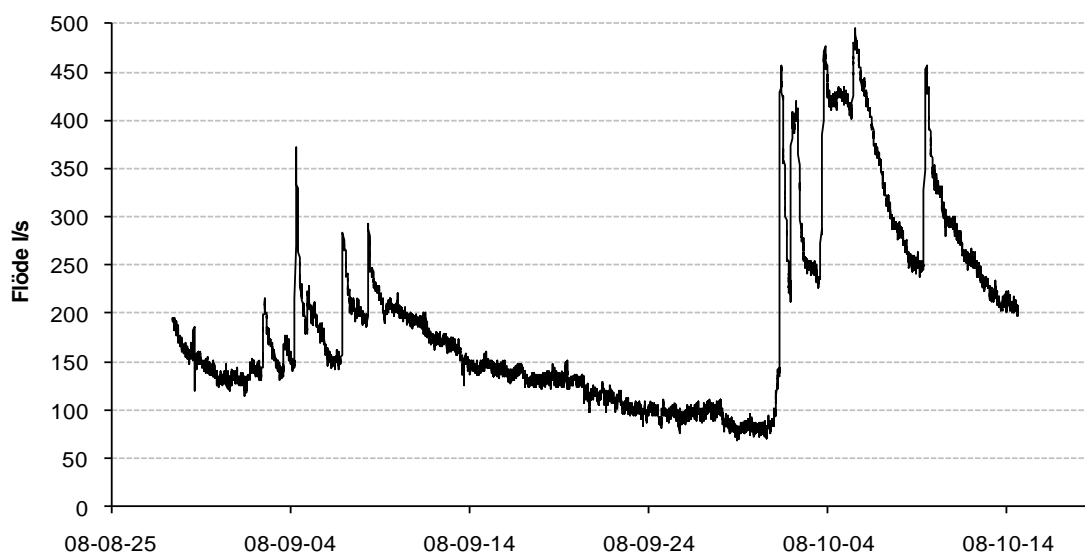
#### 4.1.3 Lusbäcken

Flödet i Lusbäcken mättes med flygel vid flera tillfällen men vid de tre som använts har också tryckgivaren varit installerad. Resultatet av dessa tre flygelmätningar visas som de tre mätpunkterna i Figur 20.



**Figur 20. Samband mellan vattenstånd och vattenföring i Lusbäcken.**

Figur 21 visar flödet i Lusbäcken beräknat från vattenståndet mätt med tryckgivaren genom den enkla avbördningsekvationen.



**Figur 21. Flödet i Lusbäcken vid Trönö beräknat från vattenstånd och en enkel avbördningsekvation. Flöden som ligger långt utanför spannet 75-160 l/s bör tolkas med försiktighet.**

#### 4.1.4 Smäcken

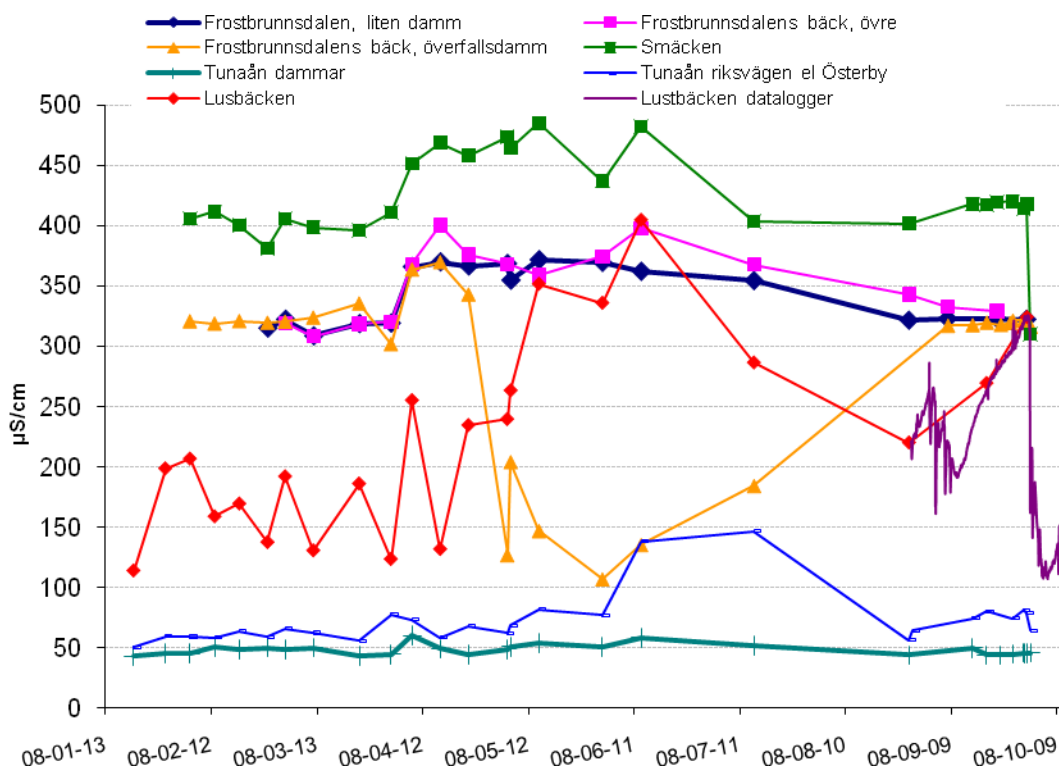
Flödesmätningarna vid Smäcken visar på ett utflöde med relativt små variationer. I den numeriska modellen har 20 l/s använts.

**Tabell 3. Flödesmätningar av utflödet från Smäcken.**

Typ	Tid	Resultat [l/s]
Flygel	08-04-17	17,3
Tid-Volym	08-09-26	20,7
Tid-Volym	08-10-27	20,4
Medelvärde		19,5

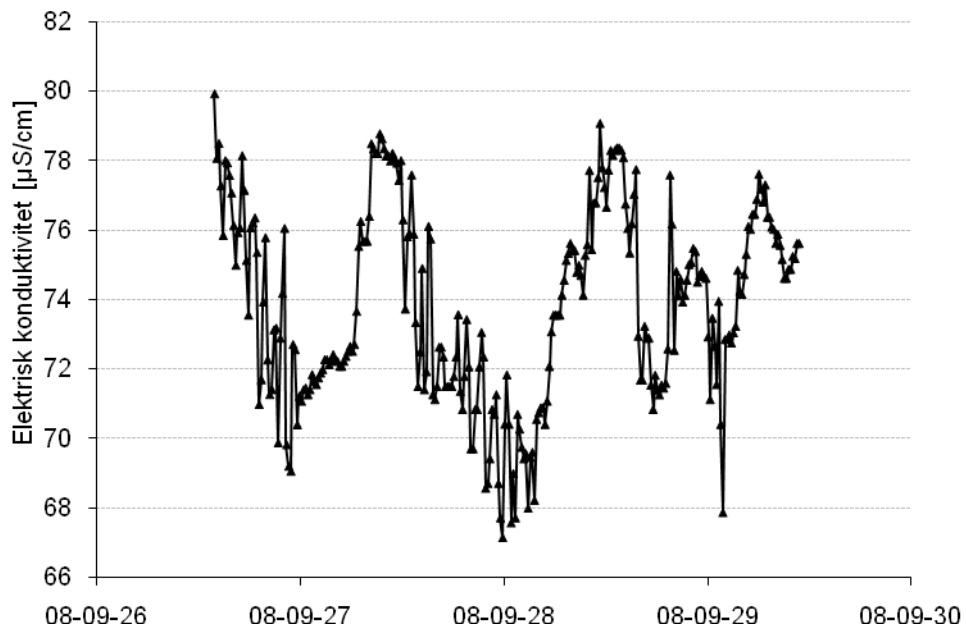
## 4.2 ELEKTRISK KONDUKTIVITET I YTVATTNEN

Den elektriska konduktiviteten varierar mycket i Lusbäcken. I Smäcken finns också variationer men de är små under perioder med lite nederbörd. Den elektriska konduktiviteten nedströms i Tunaån (vid RV 70 eller Österby) varierar en del. Särskilt under högsommaren när flödet i ån är litet och grundvattenflödet utgör en större andel av vattenmassan så stiger den elektriska konduktiviteten markant eftersom grundvattnet har en högre elektrisk konduktivitet än åvattnet. Värdet på den elektriska konduktiviteten i Frostbrunnsdalens nedre källflöde (vid hängbron), Frostbrunnsdalens övre källflöde (vid mindre damm) och Frostbrunnsdalens källflöde vid källföreningen (mitt emellan de två först nämnda) är likartat förutom under den tid då vatten från Tunaån trängt upp i Frostbrunnsdalen och påverkar mätningarna vid Frostbrunnsdalens nedre källflöde.



Figur 22. Samlad tidsserie över uppmätt elektrisk konduktivitet på de huvudsakliga mätplatserna. I slutet av mätperioden påverkas mätresultaten av kraftig nederbörd. Ytterligare data från Österby finns redovisade i separat figur.

Figur 23 visar resultatet från de täta mätningarna med automatisk datalagring vid Österby, dessa visar oväntat stora variationer.

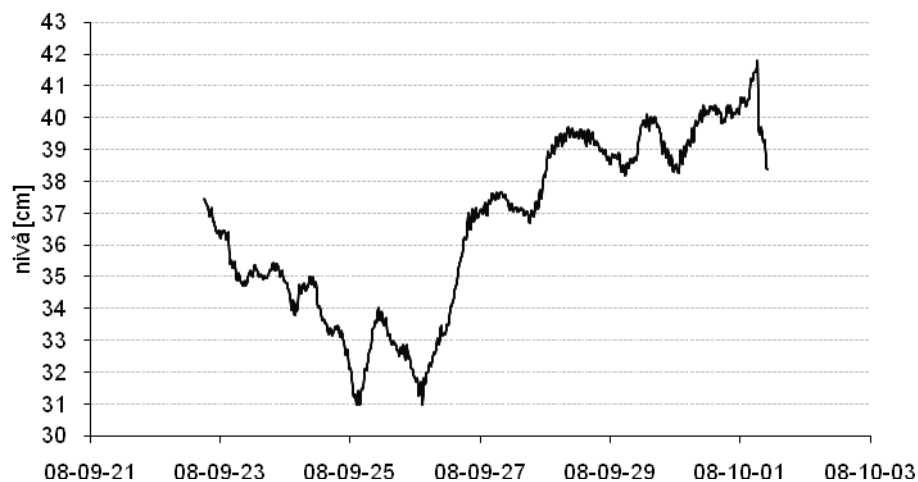


Figur 23. Uppmätt elektrisk konduktivitet vid Österby sparad med automatisk datalagring.



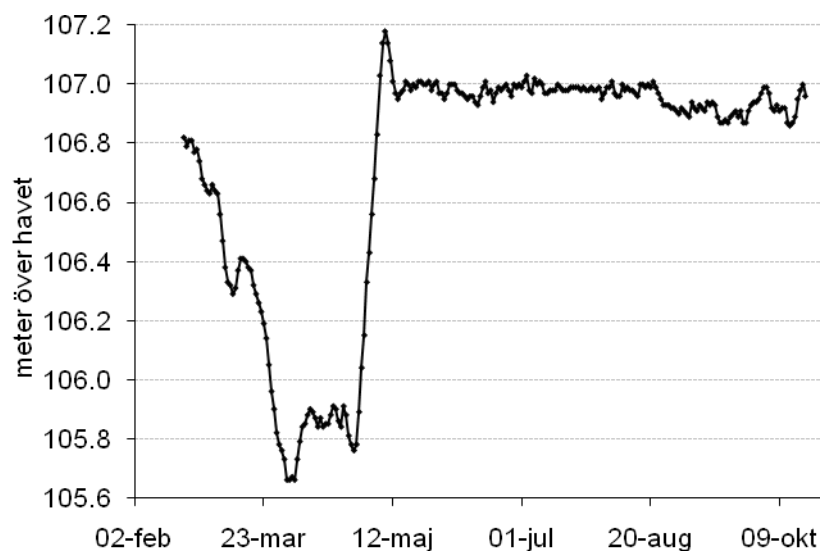
### 4.3 VATTENSTÅND

Vattenståndsdata har använts, dels i den numeriska modellen, dels i bedömningen av resultatet från utströmningsburkarna.



**Figur 24. Relativt vattenstånd i Frostbrunnsdalen nedan dammen uppmätt med tryckgivare med automatisk datalagring.**

Observera att tidsperioderna för vattenståndsdata skiljer sig markant. Vattenståndet i Frostbrunnsdalen har använts i den numeriska modellen. Vattenståndet har huvudsakligen varit i stigande under den tid som simulerats i den numeriska modellen.



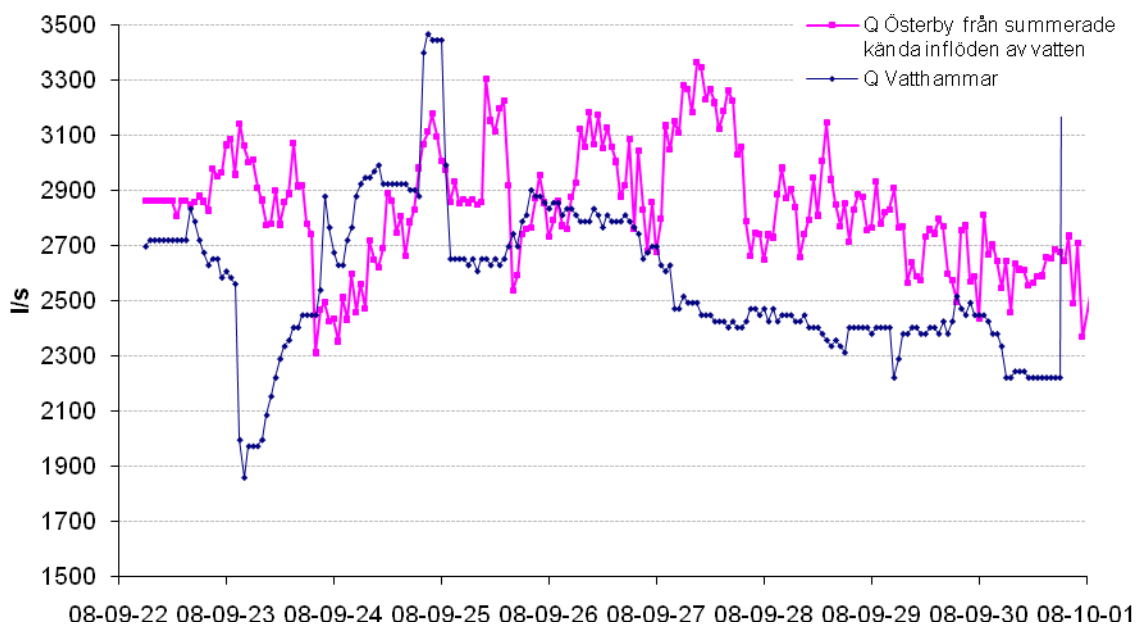
**Figur 25. Vattenståndsdata vid Torsång registrerad dygnsvis av vattenregleringsoperatören.**

Lågt vattenstånd brukar förekomma under våren, detta år renoverades dessutom ett vattenkraftverk i Avesta vilket krävde låga vattennivåer.

## 4.4 MODELL

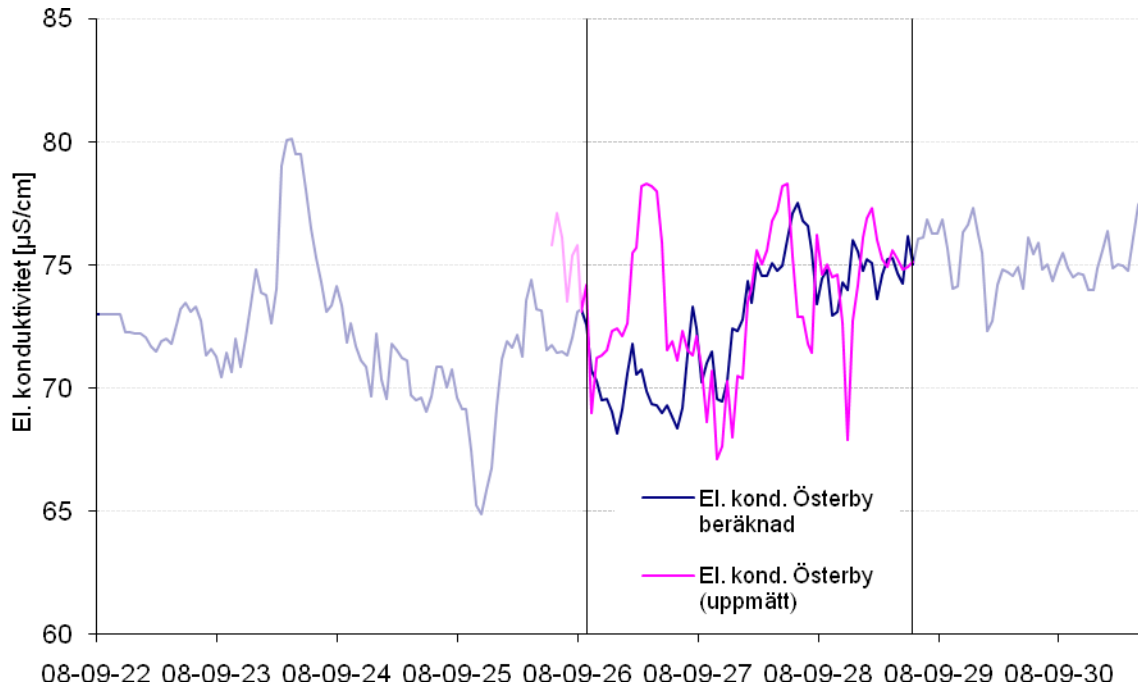
### 4.4.1 Resultat från numerisk modell

Antagande för körningen i modellen: Det inflöde av vatten till systemet som inte kan förklaras av de inflöden som mäts har sitt ursprung från det nordliga avsnittet av åsen. Den elektriska konduktiviteten på detta vatten ansattes därför till  $340 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Notera tidsfördröjningen mellan Vatthammar och Österby (Figur 26), särskilt tydligt vid det låga flödet i början av perioden som sedan följs av ett högt flöde. Figuren visar också beräknad förändring av flödet i Tunaån mellan Vatthammar och Österby. Även fast flödet vid Vatthammar i slutet av perioden är relativt stabilt så är variationerna påtagliga vid Österby.



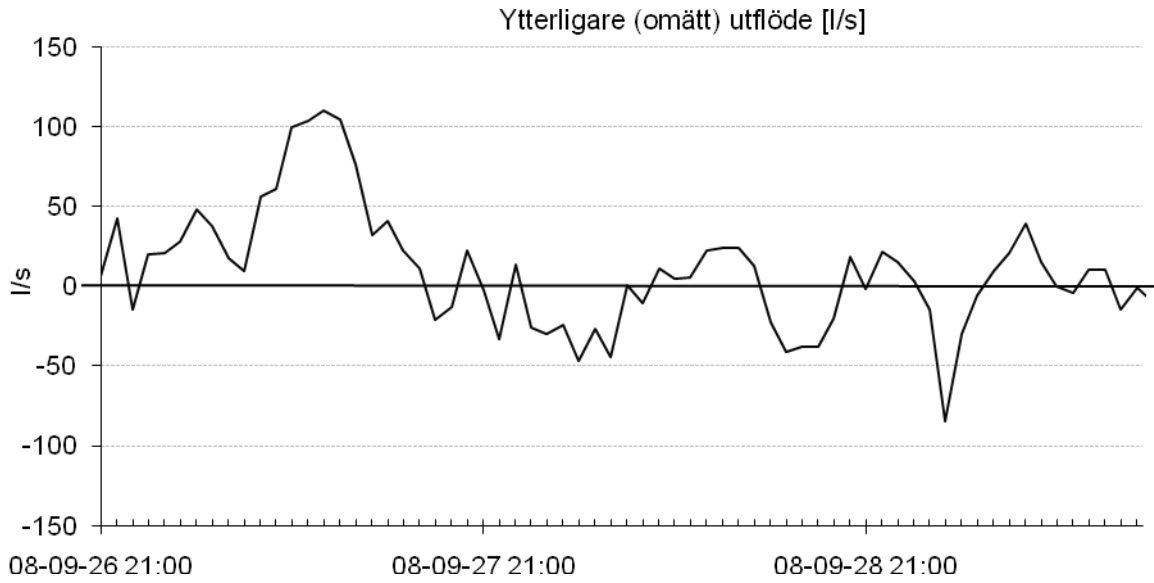
**Figur 26. Flödet i Tunaån vid Vatthammar samt Österby. Flödet i Österby är beräknad m.h.a. den numeriska modellen och flödet vid Vatthammar genom upprättat samband med producerad elektricitet.**

Figur 27 visar överensstämmelsen mellan modellerad och uppmätt elektrisk konduktivitet vid Österby. Det är tydligt att den elektriska konduktiviteten som är beräknad påverkas kraftigt av de stora flödesvariationerna i inledningen av perioden. Den dåliga överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt elektrisk konduktivitet i början av perioden har sin största förklaring i frånvaron av täta mätningar vid Österby. Dålig överensstämmelse under den tid då täta mätningar finns i Österby kan antingen bero på att modellen inte förklarar verkligheten till fullo eller att en ytterligare (omätt) utströmning sker, d.v.s. utströmning som sker utanför de två avgränsade platserna där flödet mäts, Frostbrunnsdalen och Smäcken.



**Figur 27. Modellerad och uppmätt elektrisk konduktivitet i Österby, den tillförlitliga tidsperioden framhävd.**

Figuren över den omätta utströmningen (figur 28) uppvisar variationer över tid, även under tiden då indata bedöms som mest tillförlitliga. Dock är variationerna betydligt mindre under tidsperioden med pålitliga indata. Huvudsakligen varierar den omätta utströmningen, under denna tidsperiod med tillförlitliga indata, mellan - 50 l/s och + 50 l/s, med ett par kortvariga undantag. Medelvärdet under tidsperioden med så tillförlitliga indata som möjligt visar ett omätt utflöde på nästan 10 l/s.



**Figur 28.** Figuren visar det flöde förbi Österby som inte kan förklaras av de uppmätta inflödena till systemet. Positiva värden betyder att en ytterligare utströmning sker till systemet.

#### 4.4.2 Känslighet

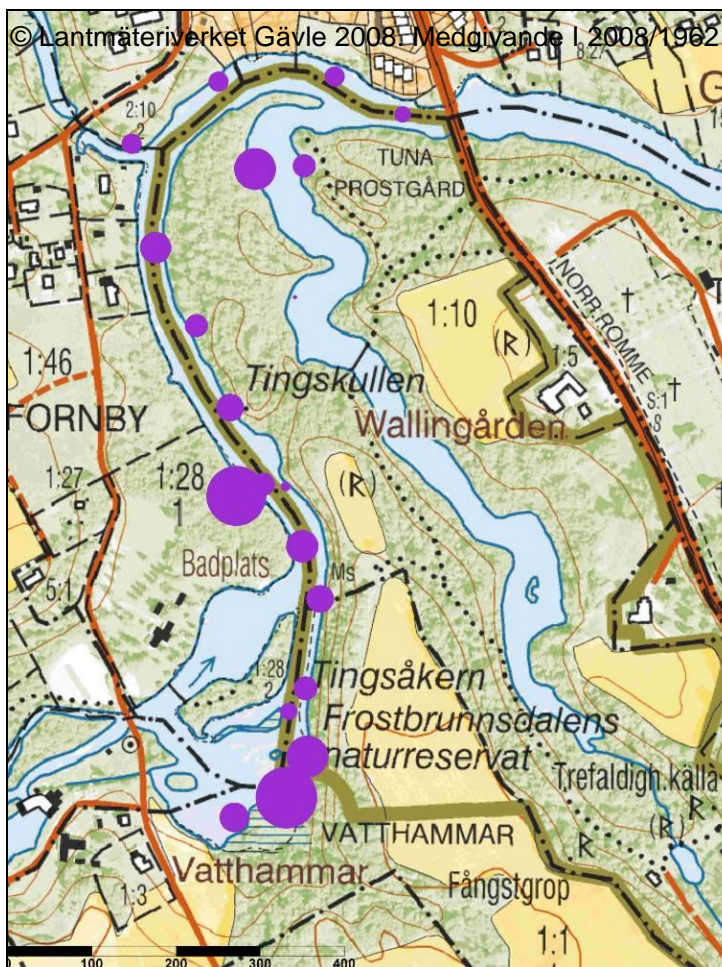
Känslighetsanalysen visar att modellen var mycket känslig för fel i den elektriska konduktiviteten i Österby och även vid Vatthammar. Osäkerheten för dessa variabler uppskattas dock vara relativt låg ca  $\pm 2$  till  $\pm 4$  % vilket påverkar medelvärdet på det omätta utläckaget med ca  $\pm 15$  l/s vardera. Modellen var även mycket känslig för osäkerheter i flödesdata vid Vatthammar. Osäkerheten i denna variabel uppskattas ligga omkring  $\pm 10$  % vilket medför en förändring av medelvärdet för det omätta utläckaget med omkring  $\pm 25$  l/s. Den uppskattade osäkerheten i flödesdata vid Frostbrunnsdalen respektive Lusbäcken ger en förändring av medelvärdet kring  $\pm 10$  l/s i båda fallen. Tidsfördröjningen och vattenståndet hade en mindre inverkan på resultatet av medelvärdet i modellen, däremot medförde en förändring av dessa parametrar att resultaten förskjuts i tiden och kurvorna i Figur 26, Figur 27 och Figur 28 förändrades något både i x-led och i y-led. Förändringar i koncentration och flöden däremot gav i större utsträckning ett utslag på kurvornas amplitud.

**Tabell 4. Test av modellens känslighet vid förändring av några nyckelvariabler.**

Variabel	Förändring i modellen	Omätt utflöde [l/s] (medel under tillförlitlig tidsperiod):	Uppskattad faktisk osäkerhet:	Omätt utflöde [l/s] (medel under tillförlitlig tidsperiod):
Samtliga	ingen	9,5		
C Österby	+ 10 %	93,5	+ 2 %	25,9
	- 10 %	- 70,0	- 2 %	- 6,8
C Vatthammar	+ 10 %	- 35,9	+ 4 %	- 8,7
	- 10 %	54,8	- 4%	27,6
Vattenståndsdata	+ 10 %	9,0	+ 10 %	9,0
	- 10 %	7,2	- 10 %	7,2
Q Frostbrunnsdalen	+ 10 %	- 6,8	+ 5 %	0,8
	- 10 %	24,6	- 5 %	18,6
Q Vatthammar	+ 10 %	36,2	+ 10 %	36,2
	- 10 %	- 18,2	- 10 %	- 18,2
Q Lusbäcken	+ 10 %	- 1,2	+ 10 %	- 1,2
	- 10 %	14,9	- 10 %	14,9
Tidsfördröjningen generellt i modellen	+ 10 %	5,0	+ 25%	8,0
	- 10 %	5,5	- 25%	5,1

## 4.5 TEMPERATURSONDERING

Figur 29 ger en grafisk redovisning av resultaten från temperatursonderingen.



Figur 29. Skillnad mellan vattentemperatur och sedimenttemperatur på mätplatserna. Största pricken visar en sedimenttemperatur som var 2,8 °C kallare än temperaturen i ån, den minsta pricken visar en sedimenttemperatur som var 0,4 °C kallare än temperaturen i ån.

Huvuddelen av mätpunkterna visade en temperaturskillnad på 0,4 till 1,75 °C men två mätpunkter utmärkte sig med en skillnad som på 2,8 respektive 2,7 °C. Vattentemperaturen i Tunaån låg mellan 16,4 och 16,8 °C. Bland annat vid de två utmärkande platserna placerades senare utströmningsmätare.

#### 4.6 UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR

Över lag uppmättes liten utströmning vid användandet av utströmningsburkarna i jämförelse med det totala utflödet av grundvatten i området. Ibland noterades till och med inströmningar. Fluktuationerna ser ut att ha ett samband med vattenståndet.

Utströmningsmätarna var placerade i par med upp till några decimeters mellanrum men de uppvisade trots varandras närhet ofta stora variationer i utbytet.

Utströmningen vid mätplatsen i Frostbrunnsdalen (Tabell 5) var relativt stor i utströmningsmätare 1 men relativt låg i utströmningsmätare 2 som till och med uppvisade inströmning vid ett tillfälle.

**Tabell 5. Utströmningsmätningar vid punkt D i Frostbrunnsdalen,  $q_1$ =utströmningsmätare nr 1,  $q_2$ =utströmningsmätare nr 2.**

Plats: Frostbrunnsdalen					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-09-25	40	10	+ 7	29	25
08-09-29	25	4	Först ökande tot. - 3	21	15
08-10-07	32	- 7	- 4	40	13
08-10-14	30	12	+ 11	18	21
08-10-17					
Medel	32	5		27	18

Utströmningen i Smäcken (Tabell 6) utmärkte sig genom att vara störst i jämförelse med de andra platserna, detta gällde både för utströmningsmätare 1 och 2. Utströmningen skiljde sig åt mellan utströmningsmätarna med den största utströmningen i utströmningsmätare 1. Vid den sista mätningen minskade utströmningen något i båda utströmningsmätarna.

**Tabell 6. Utströmningsmätningar vid mätplats E i Smäcken. Observera att den första mätningen antagligen skulle ha visat en högre utströmning om det inte varit för att påsarna blivit fulla innan de tömdes. Värdena från den första tömningen är inte medtagna vid beräkningen av medelvärdena.**

Plats: Smäcken					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-09-26	108 <sup>a)</sup>	87 <sup>a)</sup>	Först ökande sedan sjunkande tot. + 4	21	98
08-10-07	153	97	+ 1	56	125
08-10-10	157	83	- 5	74	120
08-10-14	115	57	+ 11	59	86
08-10-17					
Medel	142	79		63	110

a)  $\leq$  detta värde p.g.a. full påse.

Utbytet vid badplatsen i Tunaån visade på inströmning i medeltal. Utströmningsmätare 2 visade större siffror än utströmningsmätare 1, både vad gäller inflöde och utflöde. Vid den sista mätningen visade båda utströmningsmätarna ett inflöde.

**Tabell 7. Utströmningsmätningar vid mätplats B i Tunaån.**

Plats: Badplats					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-09-26	- 1	13	Först ökande sedan sjunkande tot. + 4	13	3
08-10-07	- 3	- 57	+ 1	54	- 30
08-10-10					
Medel	- 2	- 22		34	- 12



Tabell 8 visar utbytet närmast Vatthammar, utströmningsmätare 1 hade i jämförelse ett litet utbyte medan utströmningsmätare 2 visade på ett medelstort utflöde. Medelutbytet på platsen var lågt.

**Tabell 8. Utströmningsmätningar vid mätplats A i Tunaån.**

Plats: Vatthammar					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-09-26	4	11	Först ökande sedan sjunkande tot. + 4	7	8
08-10-07	- 8	17	+ 1	25	5
08-10-10					
Medel	- 2	14		16	6

Utbytet vid Lilla viken (Tabell 9) var litet i jämförelse med de andra platserna och samstämmigt mellan de två utströmningsmätarna.

**Tabell 9. Utströmningsmätningar vid mätplats C i Tunaån.**

Plats: Lilla viken					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-09-26	9	6	Först ökande sedan sjunkande tot. + 4	2	8
08-10-07	- 2	-2	+ 1	0	- 2
08-10-10					
Medel	3	2		1	3

Tabell 10 visar att samstämmigheten mellan dessa två utströmningsmätare var god. Vid första mätningen var utströmningen relativt stor för att vid den andra minska kraftigt.

**Tabell 10. Utströmningsmätningar vid mätplats F i Lusbäcken.**

Plats: Ovan Smäcken					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-10-10	27	22	- 5	5	25
08-10-14	7	3	+ 11	4	5
08-10-17					
Medel	17	13		4	15

Utströmningen vid mätplats G i Lusbäcken nedanför Smäcken (Tabell 11) följde samma mönster som platsen i Lusbäcken strax ovan Smäcken dock med något större siffror.

**Tabell 11. Utströmningsmätningar vid mätplats G i Lusbäcken.**

Plats: Nedan Smäcken					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-10-10	46	43	- 5	3	25
08-10-14	11	8	+ 11	4	5
08-10-17					
Medel	29	25		4	27

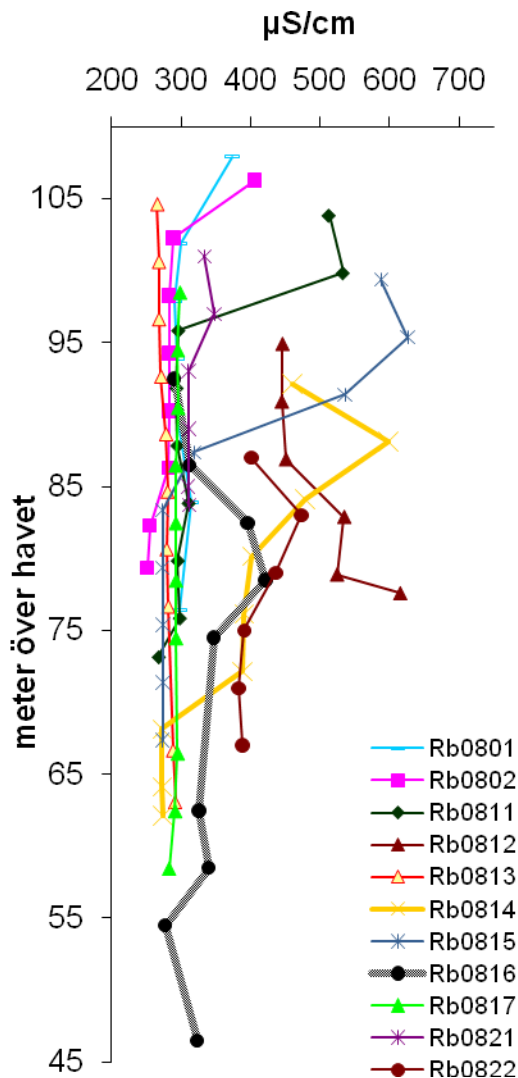
Utbytet redovisat i Tabell 12 är mindre än på de andra två platserna längre uppströms i Lusbäcken för utströmningsmätare 1. Utströmningsmätare 2 visade dock i storleksordningen likartad utströmning som längre uppströms i Lusbäcken.

**Tabell 12. Utströmningsmätningar vid mätplats H i Lusbäcken.**

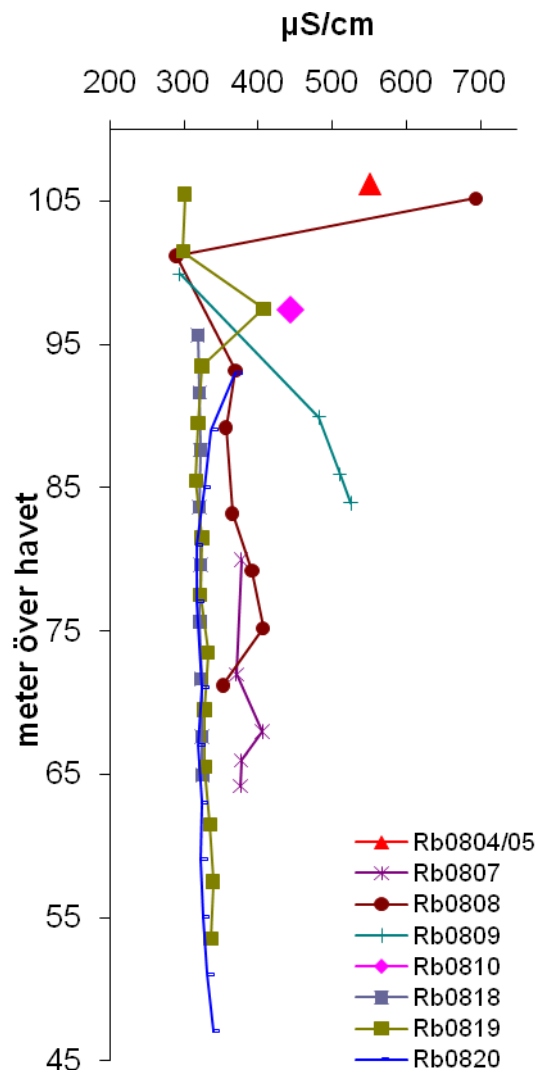
Plats: Nära vägtrumma					
Tidpunkt för tömning	$q_1$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$q_2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]	Vattenståndsförändring under mättiden [cm]	$ q_1 - q_2 $ [l/s*km <sup>2</sup> ]	$(q_1 + q_2)/2$ [l/s*km <sup>2</sup> ]
08-10-10	2	23	- 5	21	13
08-10-14	0	8	+ 11	8	4
08-10-17					
Medel	1	15		14	8

#### 4.7 ELEKTRISK KONDUKTIVITET I AKVIFERERNA

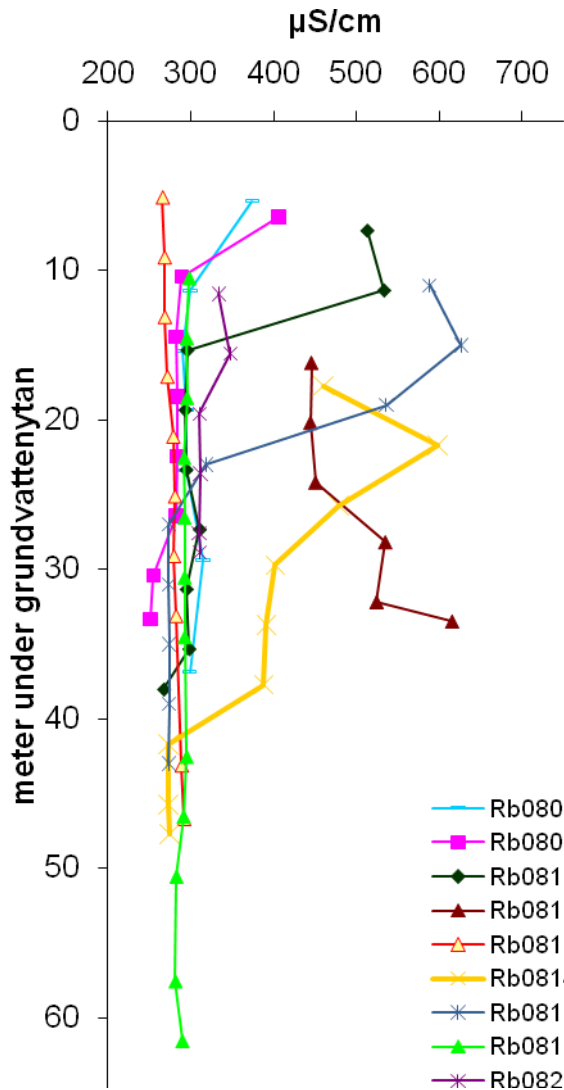
Stora variationer uppmättes i den elektriska konduktiviteten i akvifererna, speciellt de prov som är tagna ytligt och i åsens utkanter varierar mycket. Prover tagna i åsens kärna hade väsentligt mindre spridning. Grundvatten i åsens centrala delar, som flödar från norr, hade en elektrisk konduktivitet kring 340  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . I grundvatten som flödar från söder låg värdet på omkring 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



Figur 30. Elektrisk konduktivitet på olika djup vid borrningar i den södra delen av åsen.

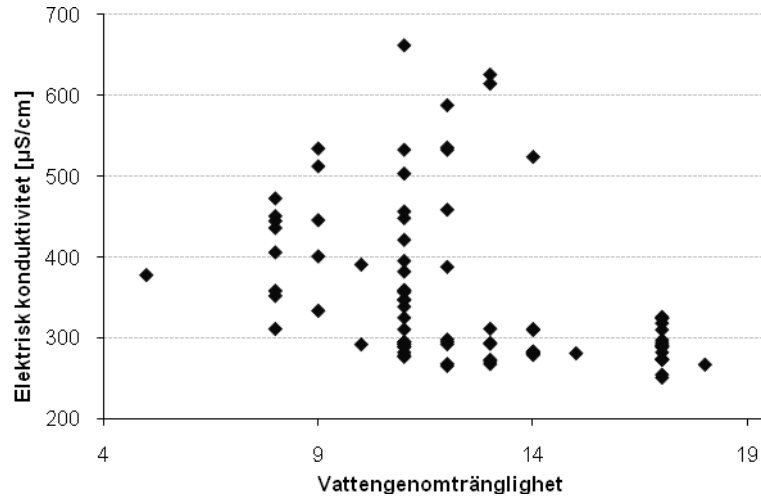


Figur 31. Elektrisk konduktivitet på olika djup vid borrningar i den norra delen av åsen.

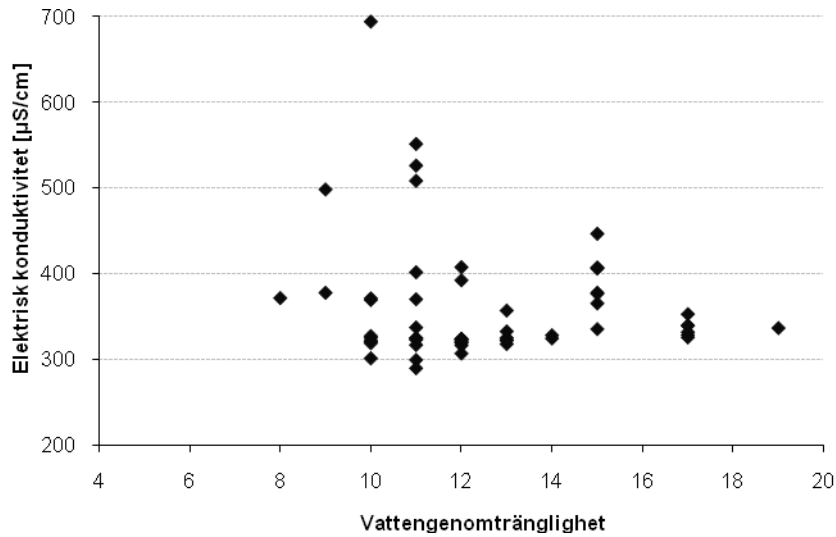


Figur 32. Elektrisk konduktivitet i den södra akviferen på olika djup under grundvattenytan.

Vattengenomträngligheten bedöms vid borring enligt en diskret skala. Det är ett mått på vattenflödet in i röret vid urlåsning eller pumpning. Figur 33 och figur 34 visar större spridning av den elektriska konduktiviteten vid låg vattengenomtränglighet än vid en hög.



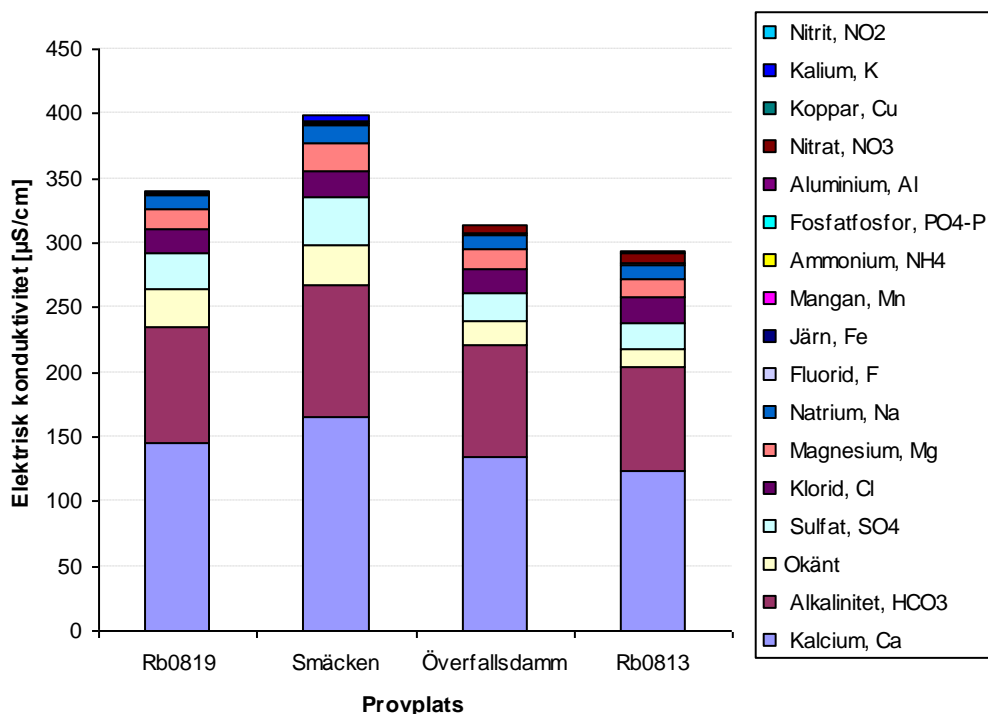
**Figur 33. Elektrisk konduktivitet vid olika vattengenomtränglighet under borrhningar lokaliserade söder om grundvattentans lågpunkt i Frostbrunnsdalen.**



**Figur 34. Elektrisk konduktivitet vid olika vattengenomtränglighet under borrhningar lokaliserade norr om grundvattentans lågpunkt i Frostbrunnsdalen.**

#### 4.7.1 Beräknad elektrisk konduktivitet

Beräkningar av bidraget till den elektriska konduktiviteten utifrån vattenanalyser med de huvudsakliga jonerna har gjorts. Kalcium, karbonat, sulfat, klorid, magnesium och natrium utgör (i fallande ordning) de största bidragen till den elektriska konduktiviteten.



Figur 35. Figuren visar vilka jonslag som enligt teoretisk beräkning ger upphov till den elektriska konduktiviteten på respektive provplats. Beräkningen baseras på koncentrationen av respektive jonslag från vattenanalyser. Även den andel som inte kan förklaras då bidraget från de kända jonslagen summeras finns med som okänt. Halterna av kalium är analyserade med lägre analysgränser i vattenproven från Smäcken och Rb0813.

Kalcium, alkalinitet och den del av den elektriska konduktiviteten som inte kan förklaras då bidraget från samtliga analyserade jonslag summeras ger upphov till de största skillnaderna mellan Rb0819 och Rb0813 (som representerar prover från åsens centrala delar, Rb0819 sitter i norra delen och Rb0813 i den södra). Ett äldre vattenprov där även halten kiselnsyra analyserats har visat på förekomst av kiselnsyra i vattnet i den södra åsdel. Kanske kan detta förklara hela eller delar av det okända bidraget till den elektriska konduktiviteten.

#### 4.8 URSPRUNG AV UTFLÖDANDE GRUNDVATTEN I FROSTBRUNNSDALEN

Beräkningar av blandningsförhållandet mellan grundvatten med ursprung från norr och från söder som flödar ut i Frostbrunnsdalen har gjorts. Detta för att söka bestämma hur stor del av utflödet som består av grundvatten från norr respektive söder. Eftersom allt för små skillnader förelåg i vattentypernas elektriska konduktivitet användes istället data från några vattenprov. Ur vattenproven valdes analyserna av fluorid, nitrat och sulfat ut eftersom

dessa ämnen är relativt stabila och för att det fanns en tillräckligt markant skillnad mellan vattentyperna vad gällde just dessa ämnen. Blandningsekvationen som använts är ekvivalent med ekvation 6 dock här med andra variabler. Blandningsförhållandet visar på en utströmning av grundvatten från norr i Frostbrunnsdalen på ca 20-40 l/s.

**Tabell 13. Beräkningar av ursprunget till utflödande grundvatten i Frostbrunnsdalen uppströms dammen (baserade på blandningsförhållande).**

	Överfallsdamm medelvärde från två analyser [mg/l]. (Q = 182 l/s)	Medelvärde från söder (Rb0813, Rb0815, Rb0811) [mg/l].	Medelvärde från norr (Rb0819, Rb0808) [mg/l].	Q <sub>norr</sub>	Q <sub>söder</sub>
				[l/s]	[l/s]
Fluorid, F	0,46	0,44	0,64	21	161
Nitrat, NO <sub>3</sub>	5,55	7,07	0,00	39	143
Sulfat, SO <sub>4</sub>	15,0	13,0	22,0	40	142

#### 4.9 LÅNGTIDSvariationer av utflödet

Föreliggande examensarbete grundar sig på mätningar som skett över en relativt kort tidsperiod och resultatet är därför närmast en ögonblicksbild av rådande flöden. Grundvattennivåer och flöden av grundvatten varierar normalt över tid. Dessa variationer är dock ofta utjämnade i akviferer av åstyp och speciellt när magasinet är stort. Information från SGU:s hemsida säger att grundvattennivåerna under mätningarna var för årstiden normala i området. Under 1984 – 1987 mättes grundvattennivåerna i Borlänge noggrant (Nilsson, 1987), bland annat i Rb8305 som ligger ca 500 meter norr om Smäcken. Högsta grundvattennivån som uppmättes under dessa år var 121,9 möh och den lägsta var 120,6 möh, en skillnad på 1,3 m. Grundvattennivån i samma rör var 2008-10-01 121,54 möh. I relation till nivåerna 1984 – 1987 en ganska hög grundvattennivå, ca 4 dm lägre än den då uppmätta maxnivån. Med nuvarande kännedom om åsens utbredning, grundvattennivåer och här beräknade flödesmängder (ca 50 l/s) från norr har åsens transmissivitet mellan Rb8305 och Rb0819 beräknats till 0,042 m<sup>2</sup>/s (TB = 6,3 m<sup>3</sup>/s). Antas vidare att grundvattennivån vid Rb0819 intill Smäcken är konstant i tiden, varierade flödet i detta åsavsnitt år 1984 – 1987 mellan 55 l/s och 38 l/s dvs 10 % ökning till 24 % minskning mot nuvarande flöde. Antagandet att grundvattennivån vid Rb0819 är konstant i tiden medför sannolikt en överskattning av grundvattenflödets variationer eftersom grundvattennivån vid Rb0819 antagligen följer tendensen i nivåvariationerna längre uppströms i akviferen (vid Rb8305) och därmed varierar gradienten inte så mycket.



## 5 DISKUSSION

### 5.1 NUMERISK MODELL

Den numeriska modellen indikerade att det utflöde som mäts ( $Q_{FrBr}$  och  $Q_{Sm}$ ) utgör det huvudsakliga utflödet av grundvatten och att det omätta utflödet endast utgör en mindre del (ca 10 l/s). Variationerna i det omätta utflödet, beräknat med den numeriska modellen, ligger huvudsakligen inom  $\pm 50$  l/s under den tillförlitliga tidsperioden (medelvärde är ca 10 l/s). Den uppmätta och den modellerade elektriska konduktiviteten i Österby skiljer sig från varandra. Ett generellt högre värde på den uppmätta elektriska konduktiviteten jämfört med den modellerade antogs ha sin förklaring av ett ytterligare (omätt) utflöde av grundvatten. Kortvariga och stora skillnader mellan uppmätt och modellerad elektrisk konduktivitet däremot är sannolikt ett resultat av att modellen inte beskriver systemets dynamik fullt ut. Gjorda antaganden medför en förenkling av vattnets flöde genom ytvattendragen och de snabba störningar (variationer i vattenstånd) som rör sig fram och tillbaka i ytvattendragen. Felkällor från mätningarna bidrar sannolikt också något till nämnda variationer och avvikelser.

Modellen är speciellt känslig för felkällor i den elektriska konduktiviteten i Österby och Vatthammar. Den elektriska konduktiviteten vid Vatthammar bedöms vara relativt stabil över tid vilket inverkar positivt på noggrannheten. Vid Österby finns större variationer över tid vilket inverkar negativt på noggrannheten, dock har mätningarna här skett med täta intervall. Vid mätningar av tvärsnittet vid Österby har variationer på upp till 3-4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  noterats.

Dessa problem gör att modellens resultat över korta tidsperioder måste tolkas med försiktighet och att medelvärden över längre tidsperioder ger ett säkrare resultat. Utströmningen av grundvatten, som uppmätts vid Frostbrunnsdalen och Smäcken, visade väldigt små variationer under den tid mätningarna företogs. Att medelvärdesbilda resultatet från modellen bedöms därmed inte medföra några fel orsakade av variationer i utströmningen av grundvatten över tidsperioden.

### 5.2 UTSTRÖMNINGSMÄTNINGAR

Jämförs resultaten från utströmningsmätningarna med förändringen i ytvattenstånd mellan mätningarna finns tendenser till påverkan på utströmningen från denna vattenståndsvariation. När vattenståndet stiger i ån minskar den uppåtriktade gradienten mellan ytvattnet och grundvattnet, vilket ser ut att ha gett en minskad utströmning. Sambandet är inte helt entydigt, men det kan förklaras av att vattenståndsförändringen mellan mättillfällena var mer komplex än att den kan beskrivas med en enkel differens mellan de tidpunkter då utströmningsmätarna tömdes.

Jämförs flödesskillnaderna inom respektive par av utströmningsmätare så var de små för mätplatserna C, F och G. På mätplatserna D, E och H var skillnaderna däremot större och

för mätplatserna A och B var de störst. Skillnaderna inom paren av utströmningsmätare visar svårigheten att erhålla ett noggrant och representativt värde på utströmningen på en plats. Kanske är det så att utströmningen faktiskt varierar mycket även mellan närliggande platser. Förändringar över tid var oftast liknande inom respektive par av utströmningsmätare.

Utströmningsmätningarna som gjordes på platser utvalda via temperatursonderingen visade inte på någon utströmning av betydelse. Temperaturavvikelserna i sedimenten kan ha varit ett resultat av utströmning vars storlek var tillräcklig för att ge ett tydligt utslag på temperaturen men inte tillräckligt för att påvisa någon tydlig utströmning i den direkta mätningen av utflödet. En annan förklaring kan vara att platserna faktiskt uppvisade ett tydligare utflöde under temperatursonderingen än under mätningarna med utströmningsburkarna på grund av ett förändrat vattenstånd. Det är inte omöjligt att områden med större utströmning missats vid temperatursonderingen då sonderingen inte skett med särskilt tät rumslig upplösning, särskilt om utströmningen sker på små och mycket distinkta punkter.

Multiplieras de största värdena från utströmningsmätningarna (d.v.s. de vid Smäcken) med den uppskattade arean på de utströmningsytor som mynnar direkt i Lusbäcken invid Smäcken, hamnar utströmningen kring ett par tiotal liter per sekund. Detta är dock en kalkyl baserad på maximala siffror och denna stora utströmning sker sannolikt inte över hela utströmningsområdet. Rimligen är utströmningen mindre än denna beräkning, kanske hälften så stor. Utströmningen är sålunda i samma storleksordning som resultaten från den numeriska modellen indikerar.

### **5.3 UTFLÖDEN FRÅN ÅSEN**

Resultaten från både den numeriska modellen och mätningarna med utströmningsburkarna tyder på att endast en liten del av utläckaget sker utanför Frostbrunnsdalen och Smäcken. Således ger mätningarna av flödet vid överfallet i Frostbrunnsdalen och mätningarna av flödet vid dammen i Smäcken tillsammans den huvudsakliga utströmningen. Inverkan av de mäktiga lagren av finkornigt material som finns i området kanske kan förklara att utflödet ser ut att ske på dessa relativt väl avgränsade platser. Det finkorniga materialet överlagrar större delen av undersökningsområdet och endast på de platser där dessa lager är tunna och/eller genomträngs av kanaler kan ett väsentligt utflöde ske.

De utflöden som mätts visade ett utflöde från Smäcken på 20 l/s och från Frostbrunnsdalen på 180 l/s. Grundvattenytans lågpunkt ligger i Frostbrunnsdalen och ett flöde härstammande från norr, flödar under Tunaån och upp i Frostbrunnsdalen. Jämförelse av grundvattenytans gradient norr och söder om platsen för dammbygget i Frostbrunnsdalen ger en indikation om lager med lägre hydraulisk konduktivitet mellan Smäcken och Tunaån. Detta verkar sannolikt hindrande på flödet från norr. Eventuellt är åsens djupa delar med grovt material mer eller mindre avsnörda av ett högt berggrundsläge och/eller

lager med finkornigt sediment. Under dessa omständigheter flödar endast en mindre mängd nordligt grundvatten förbi Smäcken och vidare söderut. Samtidigt skulle sådana förhållanden kunna förklara varför grundvattnet vid Smäcken är så kraftigt artesiskt och pressas fram i källor just här. Beräkningarna av blandningsförhållandet mellan grundvatten från norr och från söder i Frostbrunnsdalens bäck visar ett utflöde av nordligt grundvatten på ca 20-40 l/s. Dock är den elektriska konduktiviteten i Frostbrunnsdalens bäck näst intill oförändrad både före och efter grundvattenytans lågpunkt i dalen, vilket den inte borde ha varit om en betydande utströmning av grundvatten från norr skett. Området med synlig utströmning i Frostbrunnsdalen är dessutom nästan uteslutande lokaliserat söder om grundvattenytans lågpunkt. Sammantaget kan sägas att utflödet av grundvatten från norr i Frostbrunnsdalen säkerligen ligger mellan 10 till 50 l/s - men omkring 20 l/s är troligast.

I Frostbrunnsdalen är uttaget i den kommunala vattentäkten i medeltal 20 l/s. Sammantaget är då flödet från söder ca 180 l/s (inklusive uttaget i vattentäkten). Utflödet med nordligt ursprung ligger på 20 l/s från Smäcken och ytterligare några liter som flödar ut mer diffust samt den del som flödar ut i Frostbrunnsdalen, totalt rör det sig om ca 40 - 60 l/s. Det sammanlagda utflödet från åsen blir då ca 200-210 l/s (exklusive uttaget i vattentäkten). Jämförs grundvattenflödet från norr med det från söder är skillnaden i flödesmängd stor, frågan är om det är rimligt.

Tillrinningsområdet i norr går till stora delar genom Borlänge tätort med mycket hårdgjorda ytor och infiltrationen skulle därmed kunna vara liten. Enligt Rytter (1985) härstammar en del av flödet, i denna del av åsen, från grundvatten som flödar norrifrån under älven vid Båtsta- Mellsta (ca 40 l/s) och en del från infiltration vid samma älvkorsning (ca 240 l/s) samt från ett tillskott av nederbördsinfiltration som totalt bedömdes vara 75 l/s. I Borlänge tätort ligger också stadens nuvarande huvudvattentäkt med ett uttag på ca 170 l/s (Kellner, 2008b), en betydande mängd i jämförelse med utflödet från Frostbrunnsdalen. Gustafson (1974) skriver att infiltrationen vid Båtsta- Mellsta induceras av uttaget i vattentäkten och storleken på denna infiltration är då föränderlig och beroende på uttagsmängden i vattentäkten. Därmed är inverkan från varierande uttagsmängder i vattentäkten svår att direkt dra ifrån eller lägga till i åsens grundvattenflöde. Söder om vattentäkten i Övre Tjärna sjunker åsens hydrauliska kapacitet kraftigt som ett resultat av att isälvsedimenten är finkornigare och av mindre mäktighet (Gustafson, 1974). Agerstrand (1972) skriver att stora delar av området mellan Båtsta-Mellsta och Frostbrunnsdalen har ett artesiskt grundvatten med utläckage till Lustbäcken i väster som följd. Gustafson (1974) utvärderade vattentillgången vid Övre Tjärna bland annat genom provpumpning. I rapporten skriver Gustafson:

”I naturligt tillstånd och vid nuvarande medeluttag vid Övre Tjärna läcker en del av flödet, som passerar vattentäkten, ut från magasinet söder om Rb7103. Detta läckage sker huvudsakligen mot väster och Lustbäcken<sup>1)</sup> på bred front, vilket givit upphov till torvbildningar i detta område. Läckaget förekommer dessutom längre söderut vid Tunaån i form av källor dels vid Fornby norr om ån, dels och i större omfattning i

Frostbrunnsdalen söder om ån. När medeluttaget ur vattentäkten ökar, kommer läckaget mot Lustbäcken<sup>1</sup> att minska och upphöra helt, då grundvattennivån blir lägre än marknivån.”

Uttaget var 1974 ca 195 l/s enligt Gustafson vilket kan jämföras med dagens uttag om ca 170 l/s. Rekognosering vid Lusbäcken väster om centrala Borlänge har stärkt uppfattningen om att grundvatten från åsen läcker ut här. Exempelvis hittades flertalet mindre vattendrag som rann ut i bäcken och dessutom ett grundvattenrör med grundvattenytan minst ett par meter ovan markytan. Kvantiteten av detta utläckage är mycket svårt att uppskatta men det bedöms åtminstone överstiga 20 l/s. Berggrundshöjden finns skisserad längs med åsen i Borlänge (Ryttar, 1985). Mellan djupfåran, i vilken åsen är avlagrad, och Dalälven i öster finns ett parti med lägre berggrundshöjd mellan centrala Borlänge och Frostbrunnsdalen. Kart och platsundersökningar visade också att utströmning sker i området. En mycket grov uppskattning av flödet som mynnade från området och ut i Dalälven gjordes. Detta flöde var i storleksordningen ca 10 – 40 l/s. Tiden före och under besöket i fält förekom ingen nederbörd.

De tidigare beräkningar som gjorts av utflödet ur åsen från norr till Smäcken och dess närområde ( $100 \pm 50$  l/s och ca 180 l/s) ger bilden av ett större flöde jämfört med vad som nu framkommit. Sannolikt beror skillnaden främst på att en del av flödet, i detta avsnitt av åsen, läcker ut norr om undersökningsområdet men det kan även vara ett resultat av en högre noggrannhet i denna undersökning. De tidigare beräkningarna på flödet i åsen från söder ( $280 \pm 100$  l/s och 110-170 l/s) ligger i samma storleksordning som resultatet från de nya beräkningarna. De nya beräkningarna har dock en högre noggrannhet och är till stor nytta vid upprättandet av nytt vattenskyddsområde för Frostbrunnsdalen. Det övergripande syftet med examensarbetet - att bestämma utflödet och ursprunget av i undersökningsområdet utflödande grundvatten - har därmed uppnåtts.

#### **5.4 KONDUKTIVITETEN I AKVIFERERNA**

Från mätningarna av den elektriska konduktiviteten i akviferen kan platser med grundvatten från norr och söder skiljas åt, åtskillnaden stämde väl överens med utifrån gradienter förväntade flödesvägar. Grundvatten nära markytan uppvisade ofta en förhöjd elektrisk konduktivitet jämfört med grundvatten på större djup. Dessutom hade mätplatserna som ligger nära saltade vägar en förhöjd elektrisk konduktivitet nära markytan jämfört med andra platser. Orsaken till detta torde vara resultatet av saltningen från väghållningen. De mätpunkter i akviferen med en starkt avvikande elektrisk konduktivitet (jämfört med centrala delar av åsen) kan tolkas som punkter där det huvudsakliga grundvattenflödet som rör sig längs med åsen ej passerar.

<sup>1</sup>Bäcken kallas både för Lusbäcken och Lustbäcken.

Mätningen av den elektriska konduktiviteten i grundvatten har under detta examensarbete visat mycket god reproducerbarhet och flaskor med vatten som förvarats en längre tid uppvisar mycket liten förändring av uppmätta värden.

Andra grundvattenundersökningar kan dra nytta av liknande kartläggning av grundvattnets elektriska konduktivitet i akviferer. Särskilt på platser där den elektriska konduktiviteten har en förväntad variation i vertikalled kan metoden vara intressant. Exempel på sådana platser är akviferer i närheten av saltade vägar (som dessutom historiskt ofta haft en sträckning längs med åsbildningar), platser med infiltration från ytvattendrag, platser med en påverkan av havsvatten (även relik) o.s.v. Vid borrningar för grundvattenundersökningar på sådana platser kan den elektriska konduktiviteten mätas på detta sätt, vilket kan ske till liten ansträngning och låg kostnad. När borrningen är avslutad finns ofta inte någon möjlighet till liknande mätningar på varierande djup.

## 6 SLUTSATSER

Det totala utflödet av grundvatten från Badelundaåsen i undersökningsområdet (inklusive uttaget i vattentäkten) uppgår till 220-240 l/s.

Storleken på den utströmning som inte mynnar direkt i Frostbrunnsdalen eller Smäcken (och därmed inte mäts direkt) är osäker på grund av känsligheter i den numeriska modellen. Både den numeriska modellen och utströmningsmätningarna ger dock liknande resultat (omkring 10 l/s).

Flödet av grundvatten från söder uppgår till ca 180 l/s (inklusive uttaget i vattentäkten).

Utflöde av grundvatten från norr i undersökningsområdet är 40-60 l/s varav minst 20 l/s flödar fram vid Smäcken och resten i Frostbrunnsdalen. Det är troligt att flödet i åsen är större än så, men detta vatten avbördas sannolikt inte i området kring Smäcken och Frostbrunnsdalen utan längre norrut.

Resultaten är en ögonblicksbild av grundvattenflödena vilka varierar över tid. Tidsvariationerna rör sig sannolikt om upp till  $\pm 10-20$  % av här erhållna flöden.

## 7 REFERENSER

Anderson, M.P., (2005). *"Heat as a Ground Water Tracer"* Ground Water 43, No. 6 pp. 951 - 968.

Agerstrand, T., Sörensen, U., Gustafson, G., Nygårds, K., (1972). *Dalälvsåsen inom Borlängeregionen en geohydrologisk översikt*. VIAK, Nr. 87.1012.

Borlänge kommun, (2007). *Miljötillståndet i Borlänge*. Borlänge kommun.

Brewster, C.J., (2004). *"Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperatures."* Ground Water 42, No. 2 pp. 243 - 257.

Constantz, J., Stonestrom, D., (2003). *Heats as a Tool for Studying the Movement of Ground Water Near Streams*. Edited by: Constantz, J., and Stonestrom, D., U.S. Geological Survey. Circular 1260.

Gustafson, G., (1974). *Grundvattentäkten vid Övre Tjärna utvärdering av vattentillgången*. VIAK, Nr. 87.1057.

Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M., (2006). *"Measuring methods for groundwater - surface water interactions: a review"* Hydrology and Earth Systems Sciences 10 pp. 873-887.

Kellner, E., (2008a). *Grundvattenutflödet vid Frostbrunnsdalen*. Midvatten AB, Borlänge.

Kellner, E., (2008b). *Tjärna vattentäkt - grundvattenundersökning angående detaljplan för område inom Övre Tjärna*. Midvatten AB, Borlänge.

Kindsater, C. E., Carter, R. W., (1959). *Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs*. Transactions, American Society of Civil Engineers. v. 24. Paper No. 3001.

Laudon, H., Slaymaker, O., (1997). *"Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example"* Journal of Hydrology 201 pp. 82 - 101.

Levlin E., Hultman B., (2008). *Konduktivitetmätningar som mät- och kontrollmetod vid kommunala avloppsanläggningar*. Kgl Tekniska Högskolan, Nr: 2008-04.

Libelo, E.L., MacIntyre, W.G., (1994). *"Effects of surface-water movement on seepage-meter interface"* Journal of Hydrogeology 2 pp. 49-54.

LMNO Engineering

<http://www.lmnoeng.com/Weirs/RectangularWeir.htm>, besökt 2008-09-01.

- Nilsson, D., (1987). *Grundvattenförhållanden 1984-87 inom Borlänge tätort, planeringsförutsättningar*. Borlänge kommun, Plansektionen.
- Pellerin, B.A., Wollheim, W.M., Feng, X., Vörösmarty, C.J., (2008). "The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments" *Hydrological Processes* 22 pp. 1810-1818.
- Ryttar, P.A., (1985). *Badelundaåsens grundvattentillgång resursbeskrivning och förslag till regler*. VIAK, Nr. 59.1407.
- Ryttar, P.A., Gustafsson, G., (1983). *Borlänge kommun, Borlänge reservvattentäkt*. VIAK, Nr. 5712.59.
- Silliman, S.E., Booth, D.F., (1998). "Analysis of Time-series Measurements of Sediment Temperature for Identification of Gaining vs. Losing Portions of Juday Creek, Indiana" *Journal of Hydrology*, 146, 131-148, 1993.
- SMHI/Naturvårdsverket, (1979). *Vattenföringsbestämning vid vattenundersökningar*. Bratts Tryckeri AB, Jönköping.
- Stokes, V.P., (2006). *An introduktion to simulink. 1.0 Rev A*. Uppsala Universitet, IT.
- Walton, N., (1989). "Electrical conductivity and total dissolved solids: what is their precise relationship" *Desalination DSLNAH* 72 pp. 275-292.

## **7.1 MUNTliga REFERENSER**

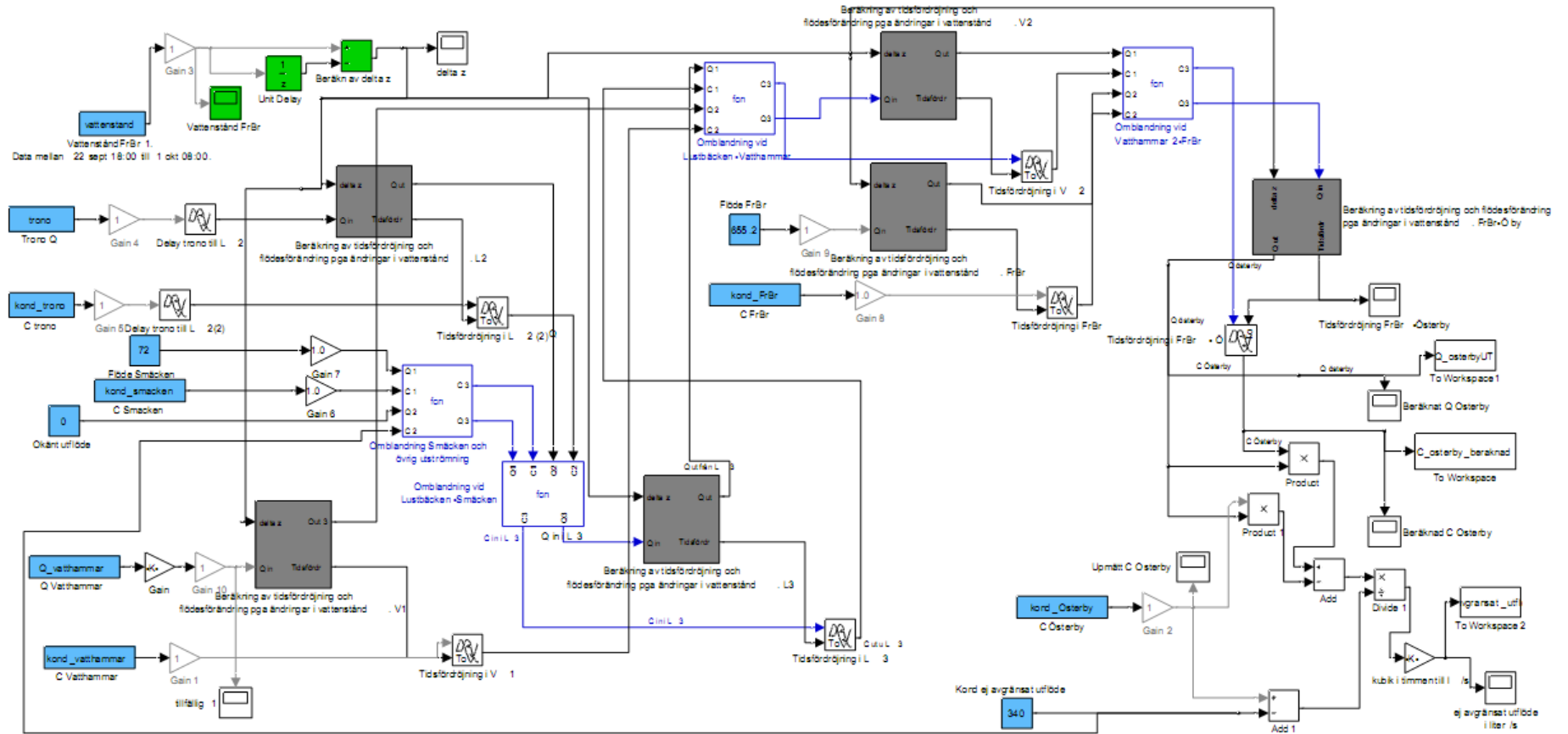
Lars-Åke Persson (2008). Ägare till Vatthammars vattenkraftsstation.



# 8 BILAGOR

## 8.1 MODELL I SIMULINK

Grafisk översikt över numerisk modell i Simulink.



## 8.2 DEL AV MODELL I SIMULINK

Funktion i modellen som beräknar flöde och tidsfördröjning i respektive ytvattenmagasin. Funktionen syns som grå rutor i översiktsfiguren ovan.

