

Grundvattenmodellering i Badelundaåsen

Martin Lorentzon

Referat

Grundvattenmodellering i Badelundaåsen

Martin Lorentzon

Under en längre tid har det funnits planer på att upprätta en ny, gemensam vattentäkt för Borlänge och Falu kommun i Badelundaåsen i Lennheden nordväst om Borlänge stad. Falu kommun är missnöjd med vattenkvaliteten i sin ytvattentäkt och Borlänge är oroad över riskerna med att ha sin nuvarande vattentäkt i Badelundaåsen lokaliserad i nära anslutning till riksväg 70 och järnvägen. Beslut i frågan ska tas under 2006 och Midvatten AB har fått i uppdrag att genomföra geohydrologiska undersökningar i och runt Lennheden som underlag till beslutet.

Syftet med det här examensarbetet är att skapa en fungerande grundvattenmodell för området mellan Lennheden, plats för planerat vattenuttag, och Övre Tjärna, plats för befintligt vattenuttag, för att få en större förståelse för grundvattenmagasinet. En grundvattenmodell möjliggör simulering av olika scenarion så som föroreningstransport i grundvattnet och bestämning av skyddsområden. Målet är att modellen ska kunna användas som ett komplement i Midvattens undersökningar och även användas i framtida projekt i området.

Modellen är gjord i Processing Modflow 5.3 och omfattar ett $19,5 \times 11$ km stort område längs Badelundaåsen och Dalälven mellan Djurmo och Frostbrunnsdalen. Modellen består av 6 lager där cellernas upplösning är 50×50 meter och 50×100 meter. De fysiska parametrar som modellen är uppbyggd av är sammanställda från olika hydrologiska och geologiska undersökningar som har utförts i området de senaste 30 åren.

Badelundaåsen och Dalälven är de två komponenter som totalt dominerar grundvattensituationen i området. En stor del av arbetet har fokuserats på kalibreringen av den horisontella hydrauliska konduktiviteten i åsen och den vertikala hydrauliska konduktiviteten i Dalälvens botten. I modellen är den vertikala hydrauliska konduktiviteten i Dalälvens botten kalibrerad till intervallet $0,01 - 0,1 \text{ md}^{-1}$ beroende på bottens mäktighet.

På sträckan mellan Bäsna och Övre Tjärna så fungerar modellen bra. Simulerade och observerade grundvattennivåer stämmer väl överens. Även vattnets transporttider i åsen, simulerade i PMPATH, stämmer väl överens med uppskattade transporttider. Modellen kan användas för enklare studier av ämnestransport.

Vid simulering av provpumpningen i Lennheden så är överensstämmelsen god österut i åsen, från Lennheden till Övre Tjärna. Västerut i åsen, från Lennheden till Bäsna, är avsänkningen av grundvattennivån för kraftig. Möjliga orsaker till den för kraftiga avsänkningen är att åsens utbredning är underskattad och att Dalälvens botten har en för lågt ansatt vertikal hydraulisk konduktivitet längs sträckan Lennheden – Bäsna.

Den klart viktigaste åtgärden för att förbättra modellen skulle vara att grundligt undersöka Dalälven, särskilt längs sträckan Djurmo – Båtsta, med avseende på dess botten vertikala hydrauliska konduktivitet och mäktighet.

Nyckelord: grundvattenmodellering, rullstensås, RIVER, hydraulisk konduktans, hydraulisk konduktivitet, hydraulisk kapacitet, pumptest

Institutionen för Geovetenskaper

Uppsala Universitet

Villavägen 16

SE-752 36 Uppsala

Sverige

ISSN 1401-5765

Abstract

Groundwater modelling in the Badelunda esker.

Martin Lorentzon

Over an extended period of time there have been plans to establish a shared facility in Lennheden to extract groundwater from the Badelunda esker to provide drinking water for the cities of Borlänge and Falun. The city of Falun is dissatisfied with the quality of its drinking water and the city of Borlänge is concerned about the risk of contamination of its existing groundwater supply at its current location. To provide a basis for a decision on this issue, the company Midvatten AB has been commissioned to perform hydrogeological investigations in the area of Lennheden.

The purpose of this thesis is to design a functional groundwater model of the area between Lennheden, place of planned extraction, and Övre Tjärna, place of existing extraction, to get a better understanding of the groundwater situation in the area. A groundwater model enables simulations of different scenarios in risk assessment and contaminant transport. The aim of the thesis is that the model can be used as an aid in Midvatten's investigations in Lennheden and that it also can be used in future projects in the area.

The model has been made in Processing Modflow 5.3 and encompasses an area of 19,5 × 11 km along the Badelunda esker and the river Dalälven between Djurmo and Frostbrunnsdalen. The model has 6 layers and a cell resolution of 50 × 50 meters and 50 × 100 meters. The physical parameters of the model are comprised from different hydrological and geological investigations in the area.

The Badelunda esker and the river Dalälven totally dominate the groundwater situation in the area. A large part of the work in the thesis has been focused on the calibration of the horizontal hydraulic conductivity in the esker and the vertical hydraulic conductivity in the riverbed of Dalälven. The calibration of the model implies a vertical hydraulic conductivity of 0,01 – 0,1 md⁻¹ in the riverbed of Dalälven, depending on the riverbed thickness.

Between Bäsna and Övre Tjärna, simulated and observed groundwater levels correspond well. The transport time of the water in the esker, simulated in PMPATH, also corresponds well with estimated transport times. The model can be used for simpler studies of contaminant transport.

Simulation of the pumping test in Lennheden gives a good correspondence eastward in the esker from Lennheden to Övre Tjärna. Westward in the esker, from Lennheden to Bäsna, the draw down is sharper than observed. Possible reasons for the sharper draw down is an underestimation of the bulk of the esker and that the vertical hydraulic conductivity of the riverbed is set too low between Lennheden and Bäsna.

In order to improve the model, the most important step should be to thoroughly investigate the river Dalälven with regards to vertical hydraulic conductivity in the riverbed and riverbed thickness.

Keywords: groundwater modelling, esker, RIVER, hydraulic conductance, hydraulic conductivity, hydraulic transport capacity, pumping test

Förord

Det här examensarbetet är utfört på uppdrag av Midvatten AB i Borlänge. Jag vill tacka Jonatan Strömgren, handledare, och Per-Arne Rytta för stödet och för det stora tålamodet. Jag vill också tacka Manne, Eva, Bosse, Micke, Josef och Simon. Det har alltid varit trevligt att träffas. Extra tack till Manne för boendet.

Ett stort tack till min ämnesgranskare Rajinder Saxena vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.

Till alla mina vänner. Tack för fiket.

1	INLEDNING	1
2	UNDERSÖKNINGSOMRÅDET	2
2.1	GEOLOGI	3
2.2	HYDROLOGI	3
3	NUMERISK MODELL – PROCESSING MODFLOW	5
4	MODELLENS UPPBYGGNAD	6
4.1	INDATA	6
4.1.1	HÖJDDATA	6
4.1.2	OBSERVATIONSBRUNNAR	6
4.1.3	BERGGRUND	9
4.1.4	PROVPUMPNING OCH VATTENUTTAG	10
4.1.5	HYDRAULISK KAPACITET	11
4.1.6	TRANSPORTTIDER I ÅSEN	11
4.2	MODELLKONSTRUKTION	12
4.2.1	AVGRÄNSNING AV MODELLOMRÅDET	12
4.2.2	TIDSPARAMETRAR	13
4.2.3	DISKRETISERING	13
4.2.3.1	Rutnät	13
4.2.3.2	Lagerinställningar	13
4.2.3.3	Lagrens höjdnivåer	13
4.2.3.4	Randvillkor	15
4.2.4	HYDROLOGISKA PARAMETRAR	16
4.2.4.1	Hydraulisk konduktivitet	16
4.2.4.2	Initiala potentiometriska nivåer	18
4.2.4.3	Effektiv porositet	18
4.2.5	GRUNDVATTENBILDNING	18
4.2.6	RIVER	18
4.2.7	PUMPBRUNNAR	21
5	MODELLERING	22
5.1	NUMERISK MOTOR	22
5.2	INVERTERAD MODELLERING	22
5.3	KALIBRERING	23
5.3.1	DISKRETISERING	23
5.3.1.1	Rutnät	23
5.3.1.2	Berggrund	23
5.3.2	HYDRAULISK KONDUKTANS I ÄLVEN	28
5.3.3	HYDRAULISK KONDUKTIVITET I ÅSEN	30
5.3.4	HYDRAULISK KONDUKTIVITET UTANFÖR ÅSEN	31
5.3.5	RIVER - NORÅN OCH LUSTBÄCKEN	32
5.4	KÄNSLIGHETSANALYS	32

6	RESULTAT	33
6.1	HYDRAULISK KONDUKTIVITET	33
6.2	HYDRAULISK KONDUKTANS	34
6.3	GRUNDVATTENNIVÅER	35
6.4	TRANSPORTTIDER	40
7	DISKUSSION	41
7.1	BÄSNA - TJÄRNA	41
7.2	TJÄRNA - FROSTBRUNNSDALEN	42
7.3	HYDRAULISK KONDUKTIVITET	42
8	SLUTSATSER	43
	REFERENSER	44
	BILAGA 1: ÖVRIGA OBSERVATIONSBRUNNAR	45
	BILAGA 2: BERGGRUNDSKARTA	46
	BILAGA 3: KONDUKTIVITETSOMRÅDEN	47
	BILAGA 4: SIMULERADE GRUNDVATTENYTOR	50

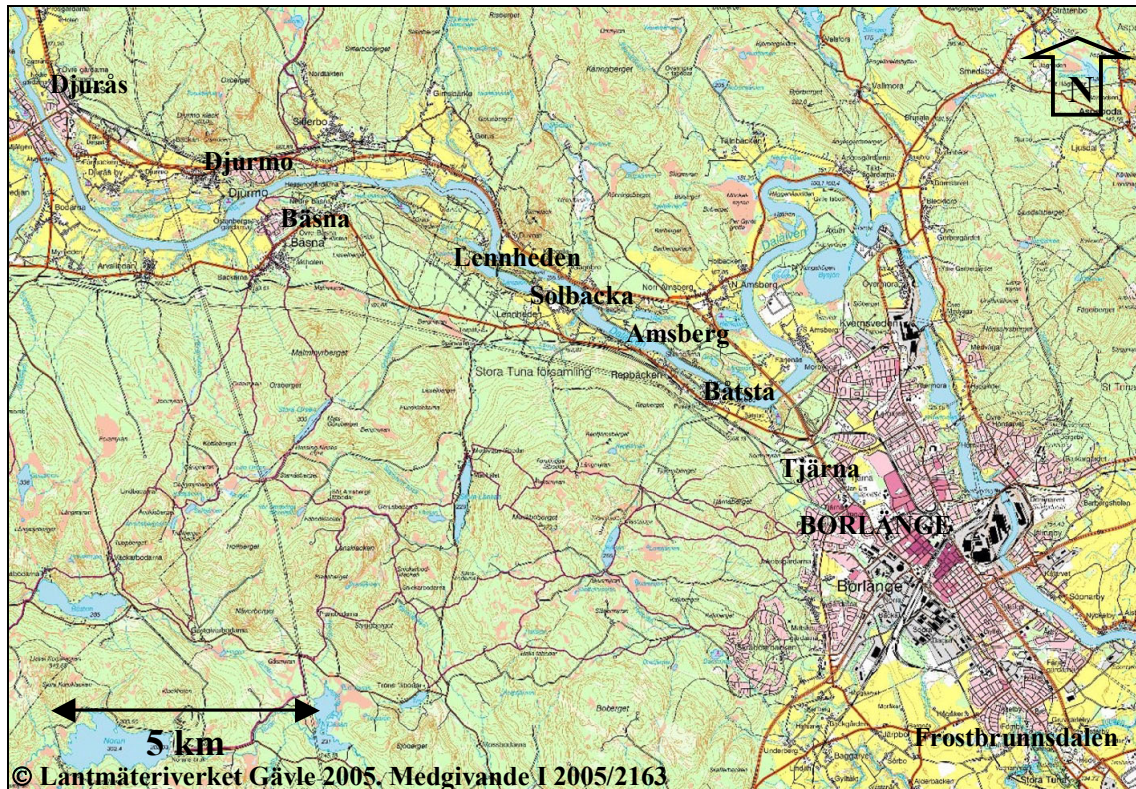
1 INLEDNING

Borlänge kommun tar sitt dricksvatten från Badelundaåsen som passerar under staden. Kvaliteten på vattnet är god men vattentäktens läge, mitt i centrala Borlänge, är inte den bästa. Huvudbrunnen är placerad endast ett tiotal meter från Riksväg 70 och järnvägen passerar genom vattentäktområdet. Det finns en oro för att grundvattnet kan förorenas vid en eventuell olycka längs vägen eller järnvägen. Samtidigt är Falu Kommun missnöjda med kvaliteten på sitt dricksvatten och är därför intresserade av alternativ till sin nuvarande ytvattentäkt. 1994 fick Midvatten AB (då med namnet Grundvattenteknik, GVT) i uppdrag att undersöka förutsättningarna för att anlägga en ny vattentäkt i Lennheden nordväst om Borlänge tätort. Grundvattenundersökningen omfattade borrhningar och en provpumpning som pågick under ett år. Resultaten visade att förutsättningarna för att anlägga en vattentäkt i Lennheden är goda. Falu Kommun beslutade dock att, tills vidare, inte flytta vattentäkten till Lennheden. Lennheden utgör nu Borlänge Kommuns reservvattentäkt, dock ej utbyggd. För några år sedan återupptogs planerna på att bygga ut vattentäkten i Lennheden som huvudvattentäkt för Falun och Borlänge. Falu Kommun tar slutgiltigt beslut i frågan 2006. I samband med dessa planer har Midvatten AB fått i uppdrag att utföra kompletterande grundvattenundersökningar som ska ligga till grund för tillståndsansökan till miljödomstolen.

Syftet med det här examensarbetet är att skapa en fungerande grundvattenmodell i Processing Modflow för området mellan Lennheden, plats för planerat vattenuttag, och Övre Tjärna, plats för befintligt vattenuttag, för att få en större förståelse för grundvattenmagasinet. En grundvattenmodell möjliggör simulering av olika scenarion så som föroreningstransport i grundvattnet och bestämning av skyddsområden. Målet är att modellen ska kunna användas som ett komplement i Midvattens undersökningar och även kunna användas i framtida projekt i området.

2 UNDERSÖKNINGSOMRÅDET

Badelundaåsen är ett mäktigt isälvsstråk som kan följas från norra Dalarna ner till Södermanland. Mellan Leksand och Avesta följer åsen Dalälvens lopp. Undersökningsområdet innefattar Dalälvens dalgång nordväst om Borlänge och Tunaslätten ner till Tunaån inklusive Borlänge tätort. I undersökningsområdet löper Badelundaåsen jäms med Dalälven i dalgången nordväst om Borlänge. På tre ställen, Djurmo, Solbacka och Båtsta, korsar älven och åsen varandra. Vid Båtsta gör Dalälven en krok norrut runt Borlänge för att sedan fortsätta åt sydost medan Badelundaåsen fortsätter åt sydost under Borlänge mot Tunaån. Undersökningsområdet visas i figur 2.1.



Figur 2.1: Undersökningsområdet.

2.1 Geologi

Jord

Från Frostbrunnsdalen upp till Tjärna är åsen inbäddad i postglaciala finsediment och framträder ej i topografin. Nordväst om Borlänge, där slätten övergår i en trång dalgång, har stora sandfält ackumulerats. Längre upp i dalgången är åsen som mäktigast och framträder tydligt i terrängen genom många åsgravar. Åsen består av isälvsmaterial från grus till sand med vissa inslag av finare material.

Berggrund

Berggrunden i dalgången nordväst om Borlänge och under staden utgörs av postorogena granitoider. Området söder om staden ner mot Tunaån utgörs av primorogena granitoider. I området följer åsen den fjärra i berggrunden som skapades av isälven under den senaste istiden. Dalgången i nordväst fortsätter, med lägre sidor, under Borlänge men är överlagrad av sediment och framträder bara sporadiskt i terrängen. Berggrunden under åsen sluttar oregelbundet från nordväst till sydost. I nordväst är berggrundens lägsta nivå ca 125 meter över havet och i sydost ca 75 meter över havet (förkortas härnäst möh) vilket motsvarar att berggrunden är, beroende på topografin, ca 30 – 50 meter under markytan. I mitten av området, runt Båtsta, där åsen och sandfälten är som mäktigast befinner sig berggrunden ca 90 meter under markytan.

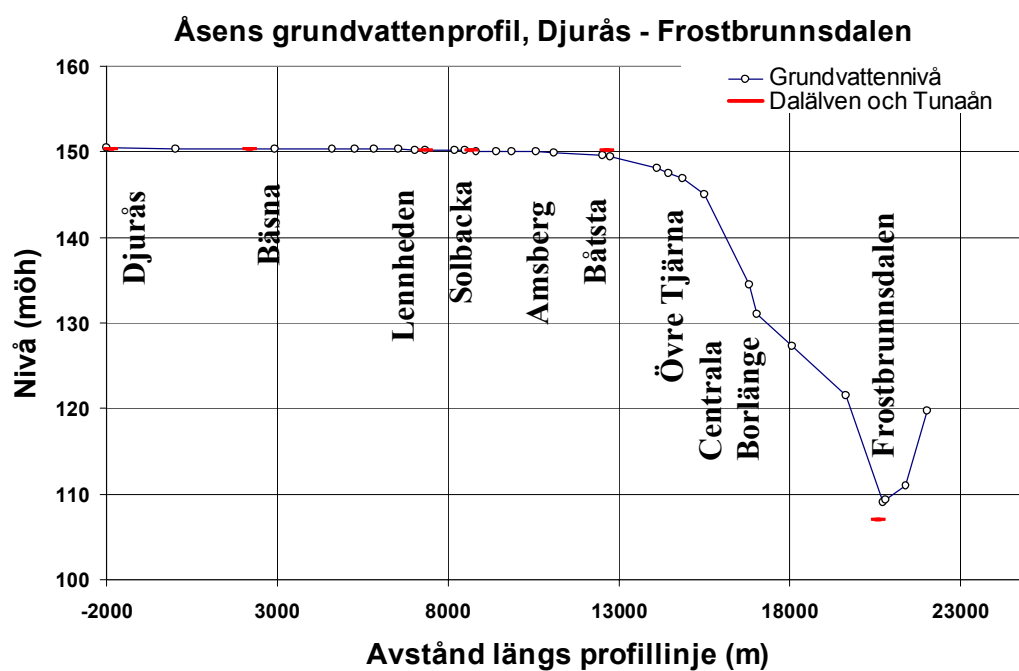
2.2 Hydrologi

Grundvattenbildning

Mellan Djurås och Lennheden är den hydrauliska gradienten i åsen mycket liten och grundvattnet ligger på en nivå runt 150 meter över havet. Grundvattennivån i åsen ligger något över Dalälvens vattennivå och grundvattnet kommer dels av nederbördsinfiltration och dels av ett flöde längs åsen från Djuråsområdet i väster. Mellan Lennheden och Amsberg börjar grundvattennivån sjunka och ligger något under Dalälvens vattennivå. Tillskott till grundvattnet sker genom nederbördsinfiltration och genom inläckage från Dalälven. Den hydrauliska gradienten i åsen är fortfarande liten. Mellan Amsberg och Båtsta ökar den hydrauliska gradienten på grund av att åsens hydrauliska kapacitet minskar. Vid Båtsta, där Dalälven viker av mot norr, ligger grundvattennivån ca en meter under Dalälvens vattennivå och stora mängder vatten infiltrerar åsen från älven. Från Båtsta ner till Frostbrunnsdalen är den hydrauliska gradienten i åsen mycket stor. Grundvattennivån sänks från ca 149 möh vid Båtsta till ca 109 möh vid Frostbrunnsdalen på en sträcka av 7,5 km.

Frostbrunnsdalen utgör en lågpunkt i grundvattenmagasinet längs åsen. Den piezometriska nivån i åsen överstiger marknivån med flera meter och ett stort utläckage av vatten sker vilket till stora delar skapar Tunaån som rinner ut i Dalälven.

Åsens grundvattenprofil visas i figur 2.2. Profillinjens 0-punkt på x-axeln motsvarar grundvattenmodellens västra rand. Modellområdets omfattning visas i avsnitt 4.2.1.



Figur 2.2: Åsens grundvattenprofil, Djurås – Frostbrunnssdalen.

Nederbörd och Infiltration

Den normala årsnederbörden i Borlänge är 617 mm (Ryttar, 1995). Erfarenheter från arbete i området anger grundvattenbildningen till runt 150 mm årligen (Ryttar, 2003).

3 NUMERISK MODELL – PROCESSING MODFLOW

Det grundvattenmodelleringsystem som använts i det här arbetet är Processing Modflow for Windows® (PMWIN), version 5.3 av Chiang och Kinzelbach (1991-2001). I systemet ingår flera olika program och modeller för att lösa ekvationer för grundvattenflöden och transportprocesser. Dessa är MODFLOW, MOC3D, MT3D, MT3DMS, PEST, UCODE och PMPATH.

MODFLOW är den största och vanligaste grundvattenmodellen. Den skapades 1984 av U.S. Geological Survey och har sedan dess stadigt utvecklats av både privatpersoner och företag då källkoden är fritt tillgänglig. MODFLOW använder finita differensmetoden för att simulera tvådimensionella, kvasi-tredimensionella och tredimensionella flöden i anisotropa, heterogena och stratifierade akviferer (McDonald och Harbaugh, 1988). MODFLOW kan användas för att simulera både stationära och transienta förlopp. MODFLOW löser den partiella differentialekvation som beskriver den flerdimensionella rörelsen av grundvatten med konstant densitet genom ett poröst medium:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

där

K_x, K_y, K_z	är den hydrauliska konduktiviteten i x-, y- och z-led (LT^{-1})
h	är hydraulisk potential (L)
W	är flödesvolymen per volymsenhet av akviferen per tidsenhet som representerar tillskott och uttag av vatten (T^{-1})
S_s	är den specifika magasinskoefficienten (L^{-1})
t	är tiden (T)

MOC3D, MT3D och MT3DMS är modeller för att simulera transport av lösliga ämnen. Modellerna har inte använts i det här arbetet.

UCODE och PEST är program för så kallad inverterad modellering. De kan användas till modellkalibrering, prediktiv analys och för tolkning av data. I det här arbetet har PEST använts för att kalibrera grundvattenmodellen, framför allt med avseende på uppskattning av hydrauliska konduktiviteter.

PMPATH (Chiang och Kinzelbach, 1998) är en modell som utifrån en MODFLOW-lösning kan beräkna lösta partiklars advektion. Partiklarnas förflyttning kan simuleras i tre dimensioner både framåt och bakåt i tiden. I det här arbetet har programmet använts för att få en bild av grundvattenflödet och för att studera grundvattnets flödes hastighet i områdets olika partier.

PMWIN har ett grafiskt användargränssnitt och en rad olika verktyg för att underlätta modelleringen. Grafik kan importeras från DXF- och rasterformat. *Results Extractor* kan ta fram simulerade resultat och antingen visa dessa i *Presentation* eller spara dem i ASCII- eller SURFER-kompatibla format. Mätdata kan interpoleras in i modellen med olika metoder i *Field Interpolator*. *Graph Viewer* visar utvecklingen över tiden för olika simulerade resultat såsom grundvattennivåer, avsänkning och koncentrationer.

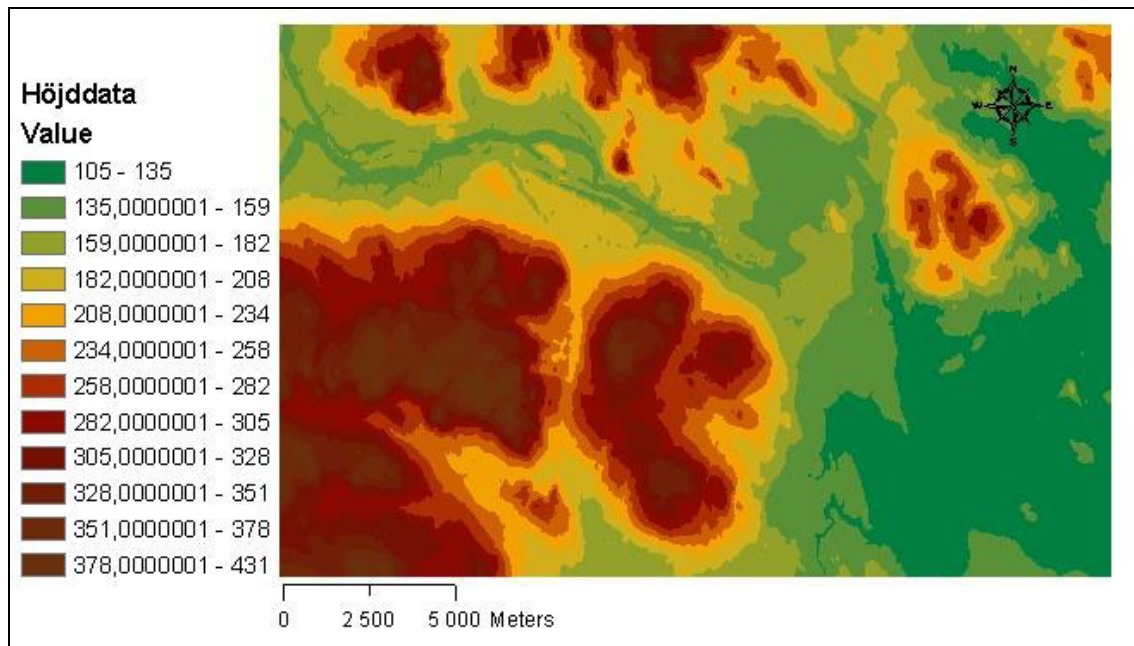
4 MODELLENS UPPBYGGNAD

4.1 Indata

Hydrogeologiska data spänner över en tidsperiod från 1972 till 2003 och inkluderar observationsbrunnar, dricksvattenbrunnar, provpumpningar och vattennivåobservationer i Dalälven. Geologiska data inkluderar en icke heltäckande berggrundsundersökning, höjddata från Metria, seismiska undersökningar och borrhdata från observationsbrunnar och dricksvattenbrunnar. Metria är Lantmäteriverkets affärsenhet.

4.1.1 Höjddata

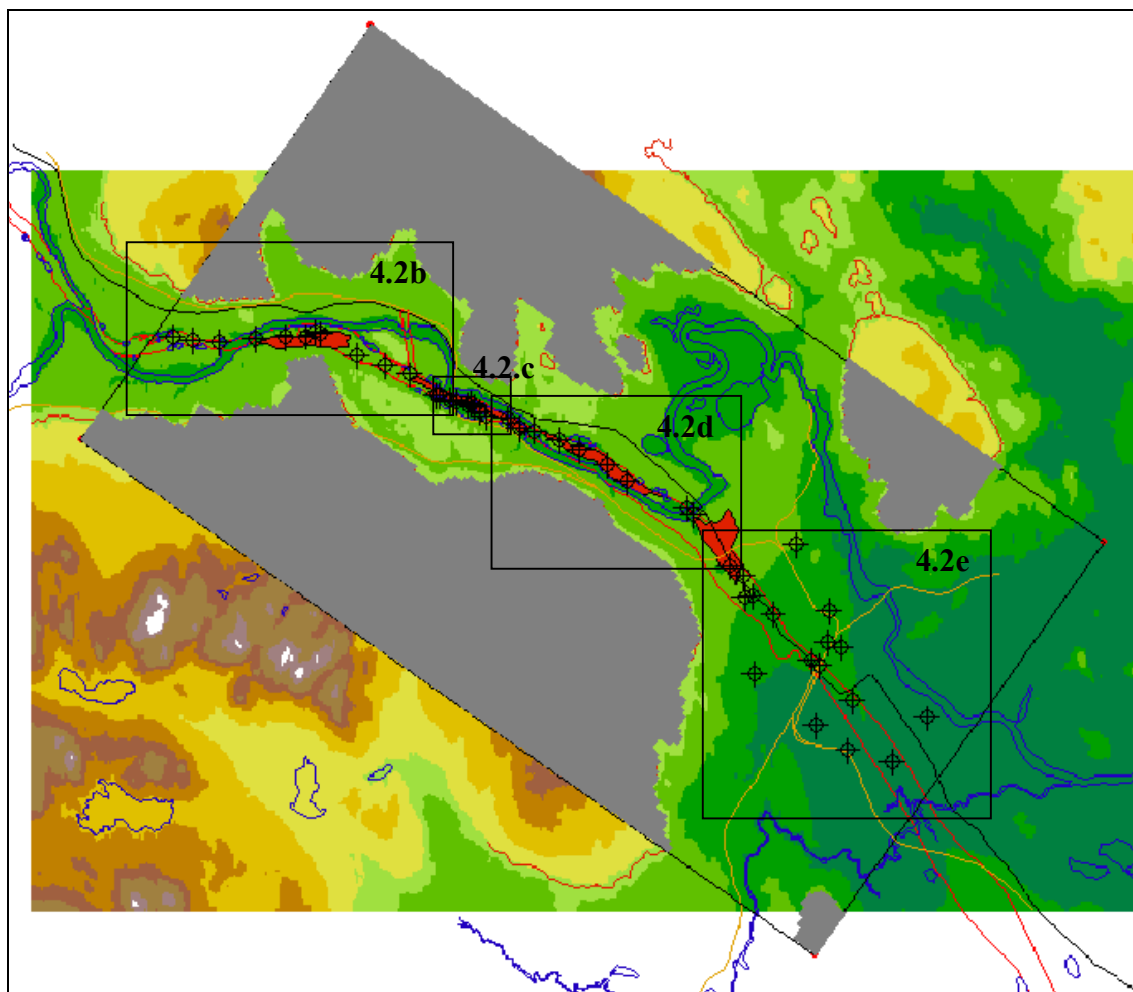
Höjddata över undersökningsområdet finns att tillgå från Metria och visas i figur 4.1.



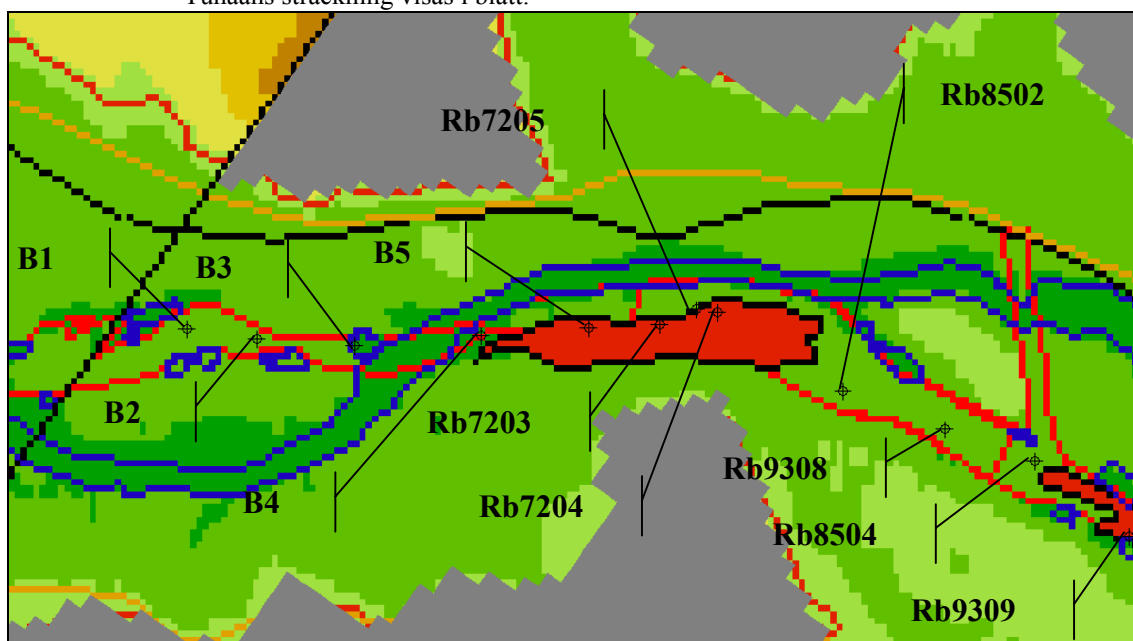
Figur 4.1: Höjddata från Metria.

4.1.2 Observationsbrunnar

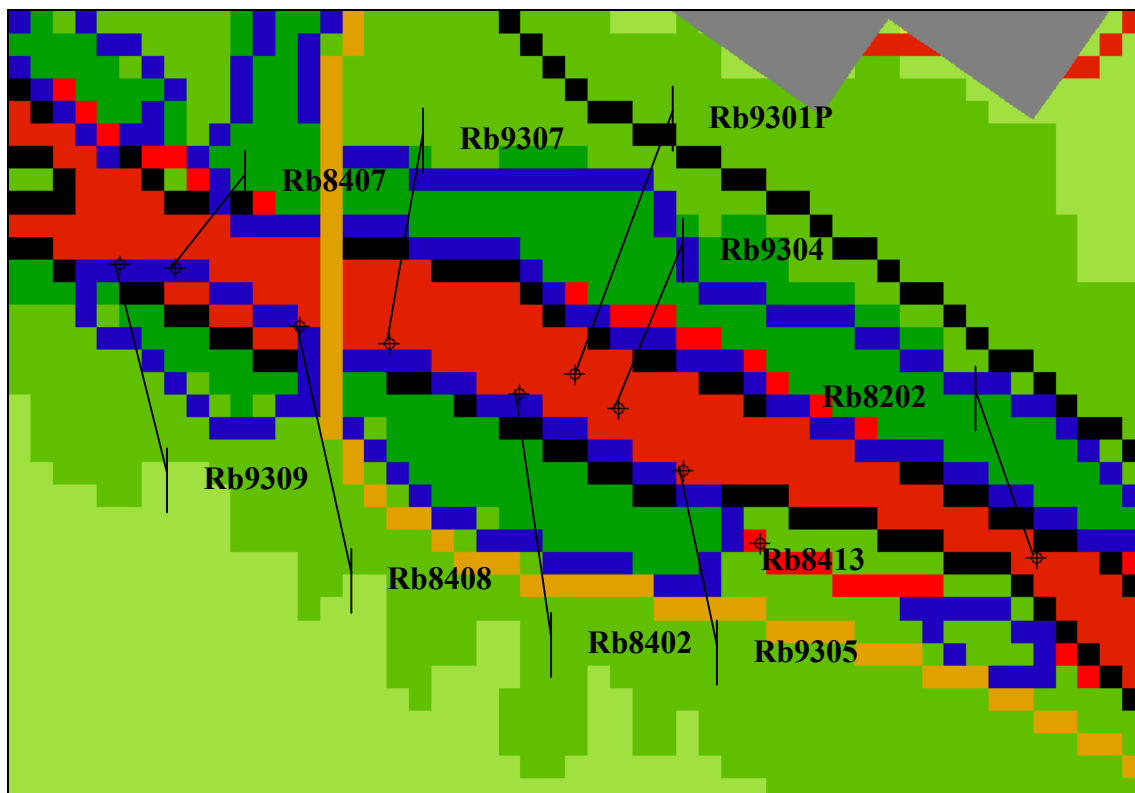
Data från ca 60 observationsbrunnar och privata brunnar har använts i arbetet. Information om varje brunn inkluderar grundvattennivå, jordlagerföljd, brunnens djup, berggrunds nivå och höjdnivå. Få brunnar har fullständiga data. Uppgifterna är sammanställda från flera olika rapporter och har insamlats vid ett flertal mätillfällen (Ryttar, 1995, 1999, 2002 och Nilsson, 1987 och, Ryttar och Gustafson, 1983). I figurerna 4.2 a-e visas de brunnar som har använts för att jämföra uppmätta grundvattennivåer med simulerade nivåer. I bilaga 1 visas brunnar som saknar information om grundvattennivå eller som är placerade i nära anslutning till brunnarna i figurerna 4.2 a-e. Dessa brunnars geologiska information har använts i modelluppgörandet.



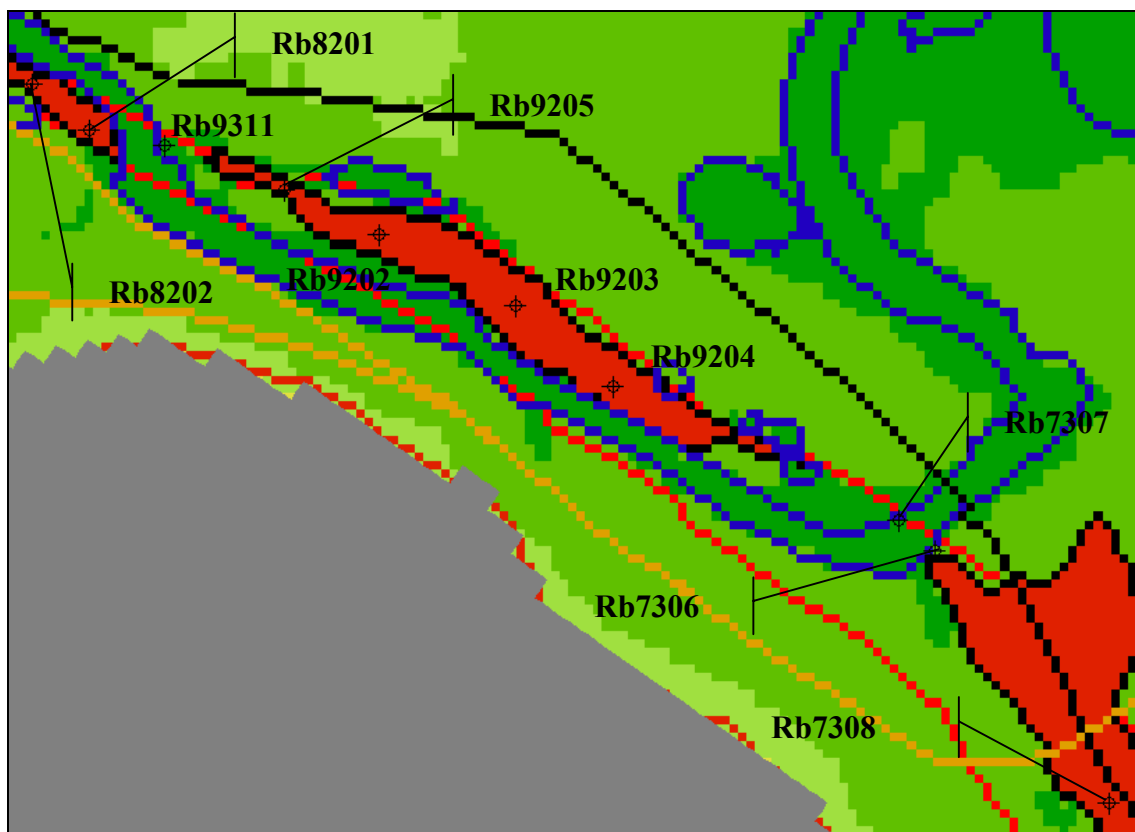
Figur 4.2a: Översiktsskarta över de observationsbrunnar vars grundvattennivåer har använts i simuleringsarbetet. Åsens uppskattade utbredning visas i rött. Dalälvens och Tunaåns sträckning visas i blått.



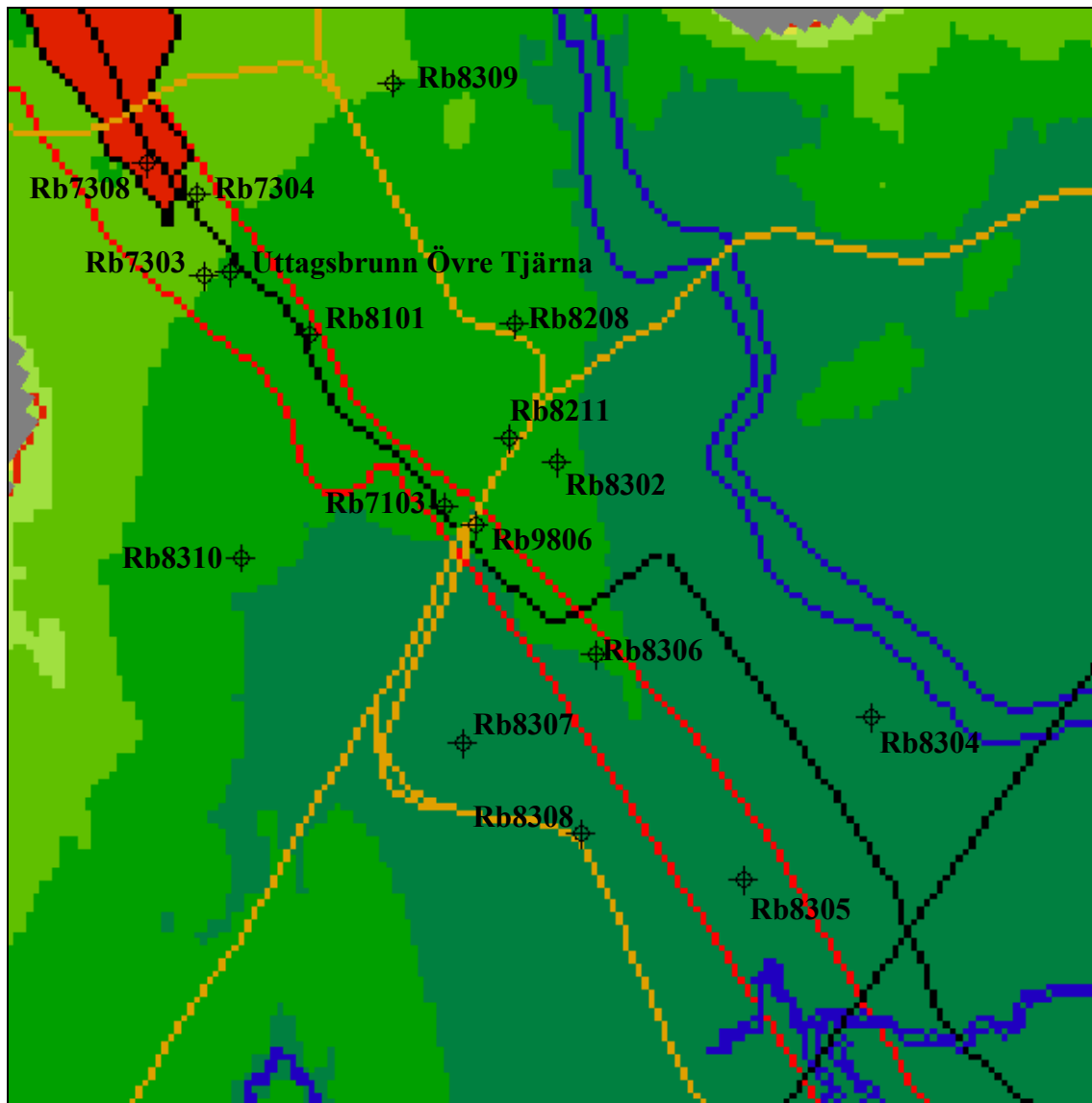
Figur 4.2b: Observationsbrunnar i modellens västra del. Brunnarna B 1-5 är imaginära brunnar som har använts i kalibreringen av modellen för att ge en bild av grundvattenytan i åsen där mätdata saknas.



Figur 4.2c: Observationsbrunnar i och runt Lennheden.



Figur 4.2d: Observationsbrunnar mellan Solbacka och Båtsta.



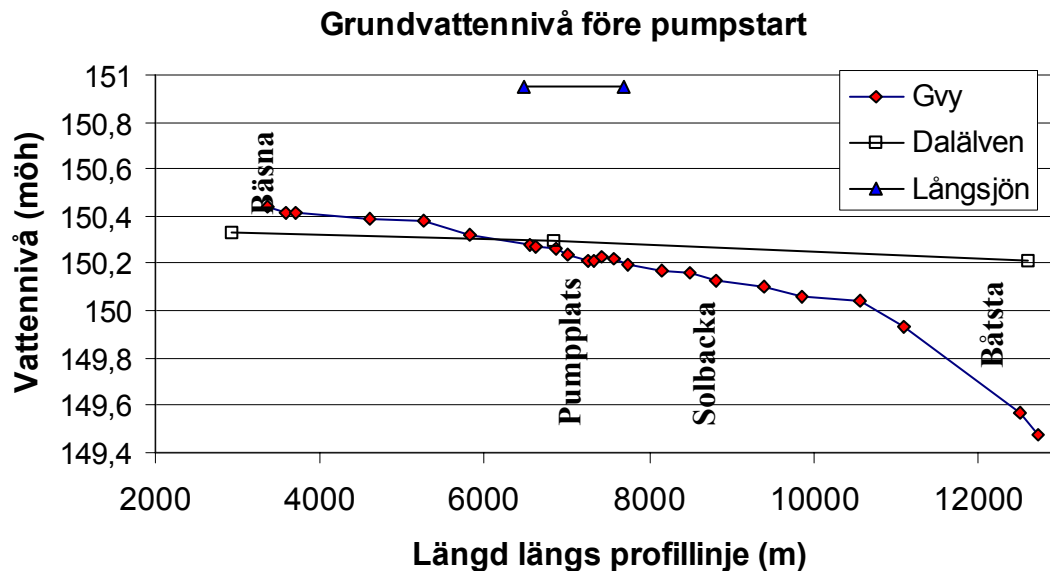
Figur 4.2e: Observationsbrunnar runt Övre Tjärna och på Tunaslätten.

4.1.3 Berggrund

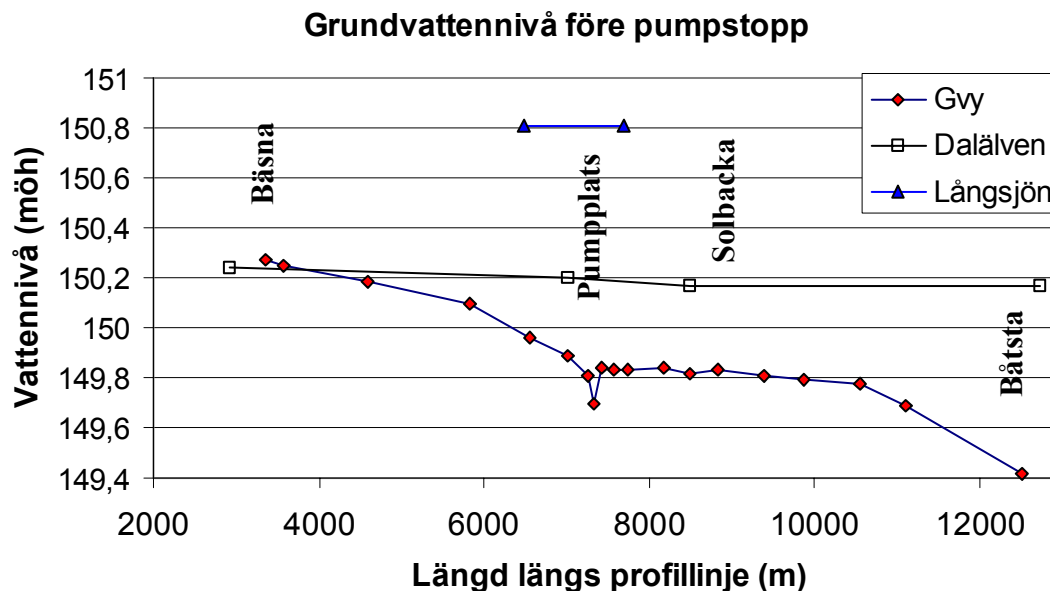
Det finns ingen heltäckande undersökning av berggrunden över området. Mellan Båtsta och Tunaån finns en bergrundsundersökning i anslutning till åsen, se bilaga 2 (VIAK, 1985). För området på Tunaslätten som ligger utanför VIAKs undersökningsområde finns ingen bergrundsdata. För dalgången nordväst om Borlänge finns endast information om berggrundens nivå från ett fåtal borrhål och brunnar som har borrats ner till berggrunden. Borrhål och brunnar som inte når berggrunden ger dock information om högsta möjliga berggrundsnivå.

4.1.4 Provpumpning och vattenuttag

Mellan januari 1994 och januari 1995 utförde Midvatten en provpumpning i åsen vid Lennheden (Ryttar, 1995). Den uttagna grundvattenmängden uppgick till 170-178 ls⁻¹ och vattnet avleddes till Dalälven. Mätningar av yt- och grundvattennivåer gjordes under perioden oktober 1993 till augusti 1995.



Figur 4.3: Grundvattennivåprofil 1994-01-18, före pumpstart



Figur 4.4: Grundvattennivåprofil 1995-01-10, före pumpstopp.

I vattentäkten vid Övre Tjärna, som förser Borlänge med dricksvatten, sker ett kontinuerligt uttag av grundvatten på 175 ls⁻¹ (Ryttar, 1995).

4.1.5 Hydraulisk kapacitet

Hydraulisk kapacitet, ofta benämnd TB, definieras som (Carlsson och Gustafsson, 1985):

$$TB = \int_0^B T(y)dy = \int_0^B \int_0^b K(y,z)dydz \cong T \cdot B \quad (2)$$

där

T är transmissiviteten i det vattenförande lagret [L^2T^{-1}]
 B är bredden på det vattenförande lagret [L]
 b är mäktigheten på det vattenförande lagret [L]
 K är den hydrauliska konduktiviteten i det vattenförande lagret [LT^{-1}]

Pumptestet i Lennheden användes för att uppskatta den hydrauliska kapaciteten i olika delar av åsen från Bäsna till Båtsta (Ryttar, 1995). För sträckan Båtsta till Frostbrunnsdalen finns det två uppgifter (Ryttar och Gustafson, 1983). Den hydrauliska kapaciteten i åsen visas i tabell 1.

Åssektion	Hydraulisk Kapacitet (m^3s^{-1})
Bäsna - Duvtjärnen	300 - 400
Duvtjärnen - Solbacka	330 - 640
Solbacka - Rb9204	500 - 1030
Rb9204 - Båtsta	300 - 330
Båtsta - Tjärna	350
Tjärna	15
Frostbrunnsdalen	

Tabell 1: Hydraulisk kapacitet i åsen

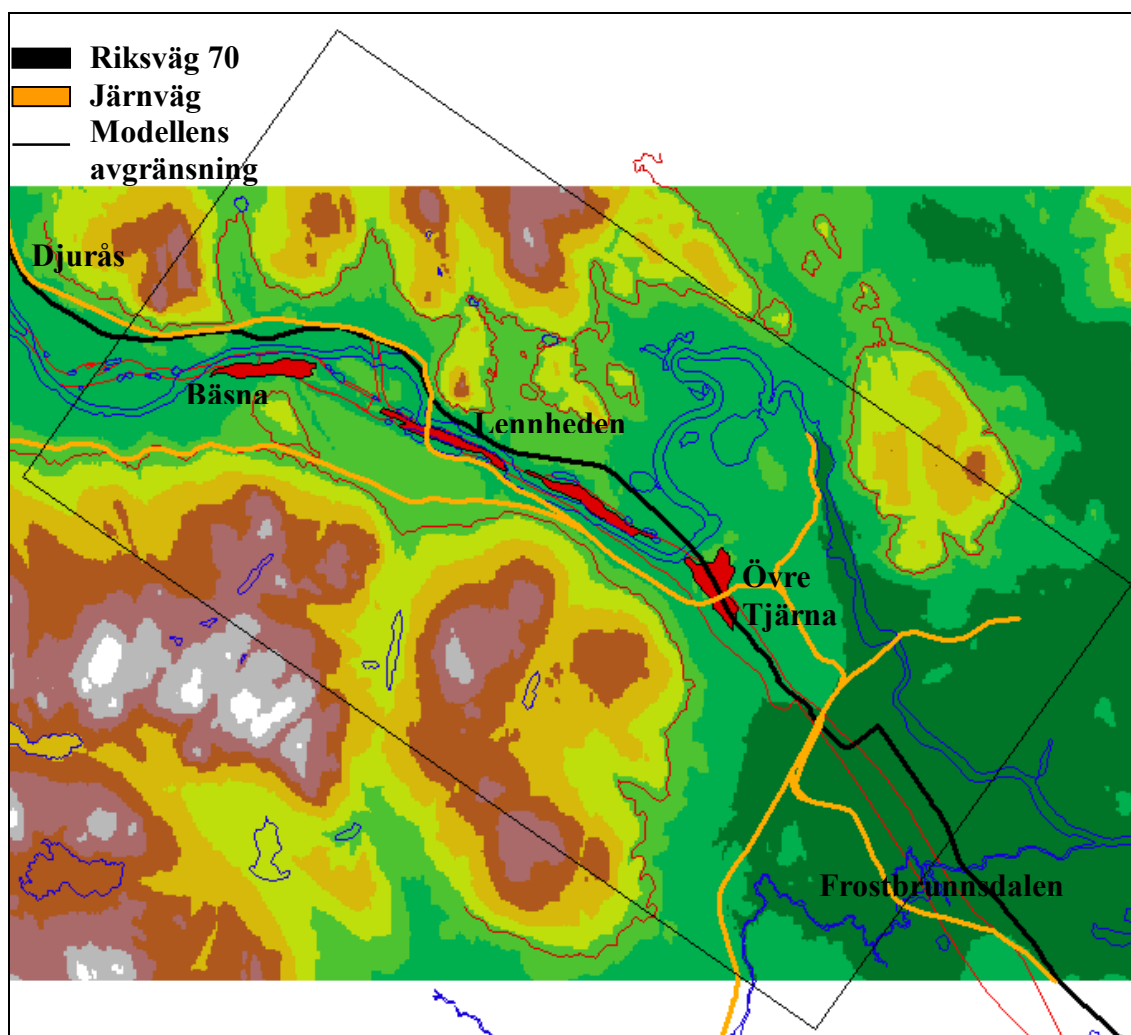
4.1.6 Transporttider i åsen

Grundvattnets hastighet i åsen mellan Bäsna och Båtsta, under naturliga förhållanden, är uppskattad till $0,5 - 2,0 \text{ md}^{-1}$ och transporttiden till några 10-tal år (Ryttar, 1995). Mellan Båtsta och Övre Tjärna uppskattas grundvattnets hastighet till 6 md^{-1} och transporttiden till ca 1 år (VIAK, 1977).

4.2 Modellkonstruktion

4.2.1 Avgränsning av modellområdet

Modellområdets omfattning är bestämd utifrån att Övre Tjärna, plats för befintligt vattenuttag, och Lennheden, plats för eventuellt framtida vattenuttag, är de två områden som är av störst intresse. Modellen har utformats så att dessa två platser ligger i mitten av det modellerade området. Randvillkor bör om möjligt väljas så att de sammanfaller med naturliga hydrauliska gränser. Den östra randen har satts där åsen korsar Frostbrunnsdalen och Tunaån eftersom detta är en naturlig lågpunkt för åsens grundvattenmagasin, se figur 2.2. I den västra delen av undersökningsområdet finns det ingen naturlig hydraulisk gräns som kan användas som randvillkor. Avsänkningen i åsen från pumptestet i Lennheden utbreder sig ca 5 km västerut och då det är viktigt att ett pumptest i en modell inte påverkar flöden och grundvattennivåer i närheten av hydrauliska randvillkor (Anderson och Woessner, 2002) så har den västra randen satts mellan Djurås och Bäsna i Dalälvens dalgång, ca 7 km från pumpbrunnen i Lennheden. I Processing Modflow kan endast rektangulära modeller skapas. För att minimera antalet celler i modellen så har modellområdet lagts så att dess x-axel ungefärligt följer Badelundaåsens sträckning. Modellens avgränsning i norr och söder är satt så att hela älven och hela åsen innefattas i det aktuella området utifrån gränserna i öst och väst. Modellens utsträckning visas i figur 4.5.



Figur 4.5: Modellområdets utsträckning.

4.2.2 Tidsparametrar

Modellens tidsenhet är angiven till dagar. Flödet beräknas enligt ”steady state” om en period på 365 dagar i ett tidssteg.

4.2.3 Diskretisering

4.2.3.1 Rutnät

Modellområdet är 19500 meter i x-led och 11000 meter i y-led och är indelat i 390 kolumner och 170 rader vilket ger 66300 celler i varje lager. Med sex lager har modellen totalt 397800 celler. Mellan rad 1 och rad 35 och mellan rad 156 och rad 170 är cellernas upplösning 50×100 meter. Mellan rad 36 och rad 155 är cellernas upplösning 50×50 meter. Modellens övre vänstra hörn har SRN-koordinaten (1469400, 6721200) och modellområdet är roterat till 325° .

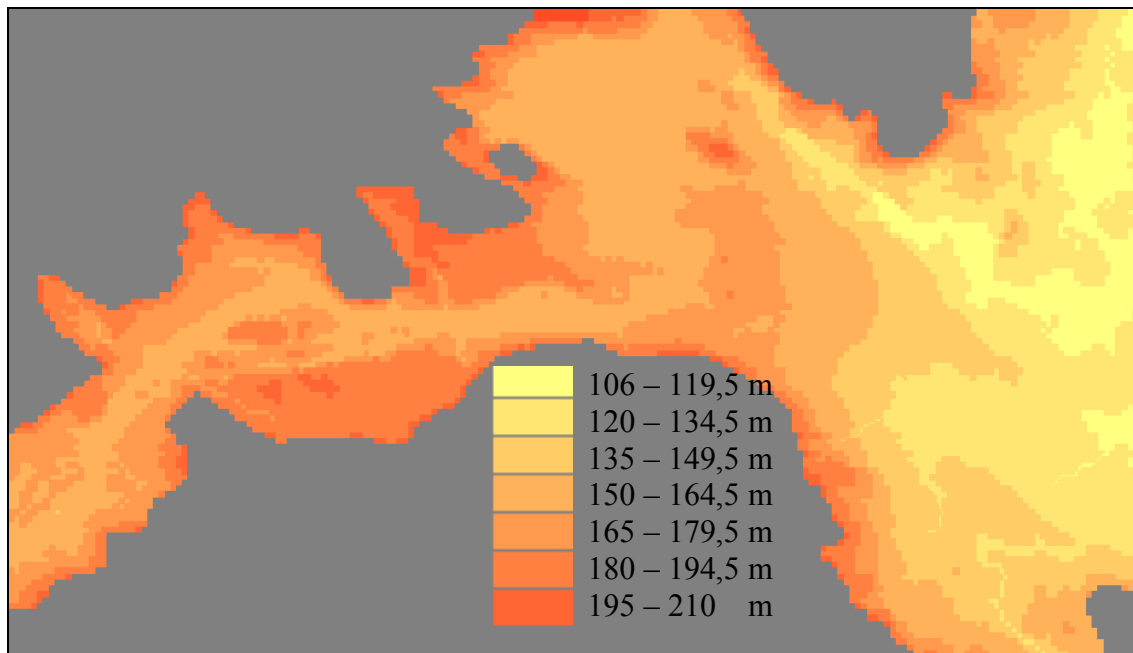
4.2.3.2 Lagerinställningar

I avvägningen mellan att kunna bygga upp åsen så noggrant som möjligt och att minimera antalet celler i modellen så har sex lager lagts in i modellen. Sex lager ger också en möjlighet att bättre beskriva området utanför åsen i den östra delen av modellområdet där marken är heterogen. Översta lagret, lager 1, är klassificerat som öppen akvifer (unconfined). Lager 2 – 6 är klassificerade som slutna eller öppen akvifer (confined/unconfined).

4.2.3.3 Lagrens höjdnivåer

Till cellernas överyta i lager 1 används höjddata från Metria. Eftersom modellområdet är vinklat så hamnar en del av modellområdet, en stor del av nordvästra hörnet och en mindre del av sydöstra hörnet, utanför området med befintlig höjddata. Se figur 4.5. Detta har inte så stor inverkan eftersom cellerna i dessa områden till största delen är klassificerade som inaktiva. För de celler i sydöstra hörnet som är aktiva har Gröna Kartan (13 F SO) använts för att komplettera höjddata. Innebörden av aktiva och inaktiva celler redovisas i avsnitt 4.2.3.4.

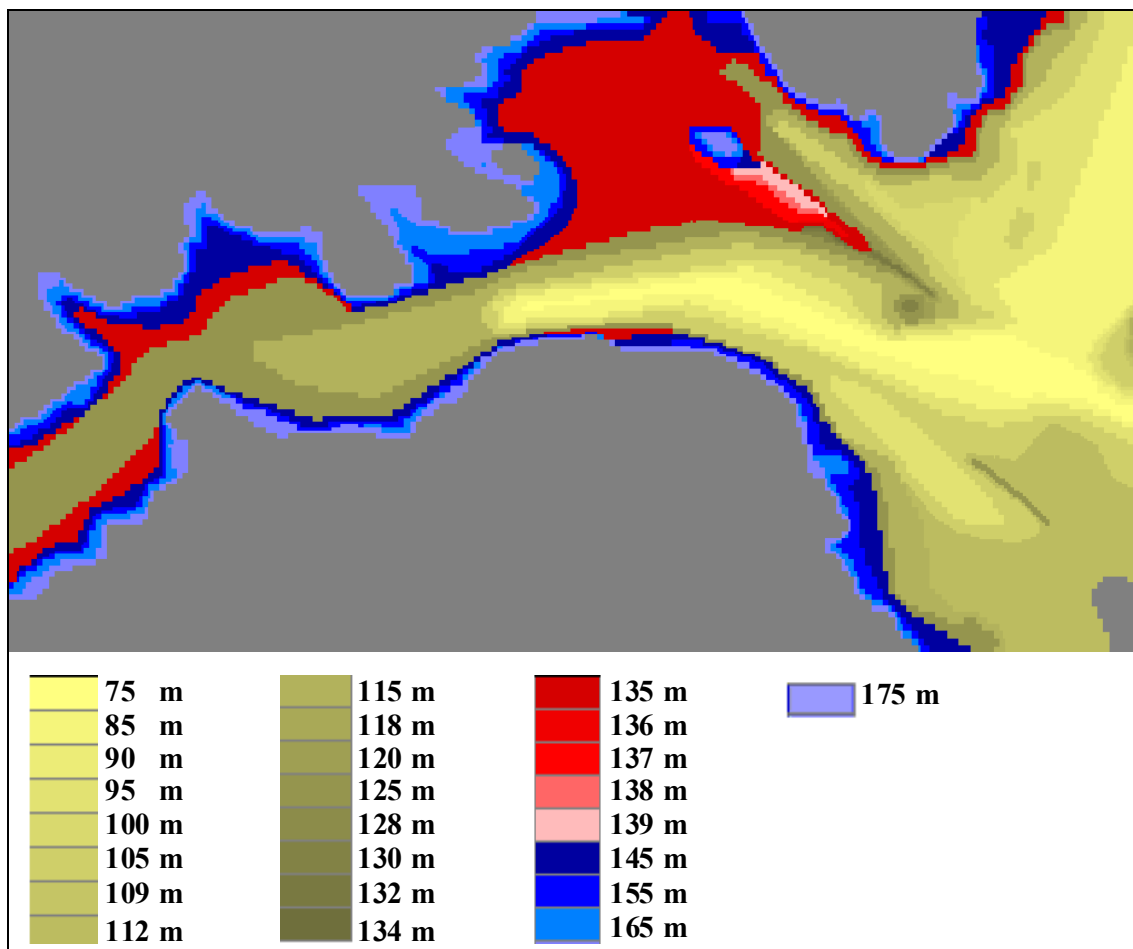
PMWIN klarar inte att direkt läsa filformatet för höjddata från Metria så programvarorna Surfer och Excel har använts för att manuellt skapa en matris med höjddata som sedan lagts in i lager 1. Höjddata i lager 1 visas i figur 4.6.



Figur 4.6: Höjddata inlagd i lager 1.

Till modellens undre gräns i lager 6 har VIAKs berggrundsundersökning använts som utgångspunkt. Under Borlänge följer åsen den djupaste delen av berggrunden, dvs. åsen följer den fåra som isälven skar ner i berget under senaste istiden. Om man gör antagandet att detta även gäller i dalgången nordväst om Borlänge så kan en enkel, u-formad berggrund byggas upp i dalgången utifrån de borrhål och brunnar som finns i och runt åsen samt utifrån topografiska data. Norr och söder om VIAKs undersökning finns det enbart topografisk information att tillgå som, kombinerat med muntlig information från personer med lokalkännedom (Ryttar, 2003), har använts för att bygga en förenklad bild av berggrunden i området.

VIAKs undersökning anger berggrunds nivåerna i tiometers-intervaller, t ex 80 – 90 möh, mellan 80 möh och 120 möh. Dessa data är satta till 85, 95, 105 respektive 115 meter i modellen. Nivån <80 möh är satt till 75 meter. Nivån 120 – 150 möh är problematisk då intervallet är stort men har ursprungligen satts till 125 meter vilket är en grov förenkling. Övriga nivåer är också satta i tiometers-intervall upp till 185 m. I kalibreringen av modellen har justeringar gjorts på berggrundsdatan i de områden där berggrunden är uppskattad eller angiven i ett stort intervall. Den ursprungliga berggrundskartan visas i figur 5.1 i sektion 5.3.1.2. Den slutgiltiga berggrundskartan visas i figur 4.7. Antagandet att bergets hydrauliska konduktivitet är mycket låg jämfört med jordlagrens har gjorts.



Figur 4.7: Berggrunden är inlagd i lager 6 som modellens undre gräns.

Övriga nivåttilldelningar i lager 1 – 6 är ursprungligen gjorda så att samtliga lager har samma mäktighet i varje enskild cellkolonn d.v.s. en cells mäktighet är en sjättedel av nivåskillnaden mellan markyta och berggrund i den punkten.

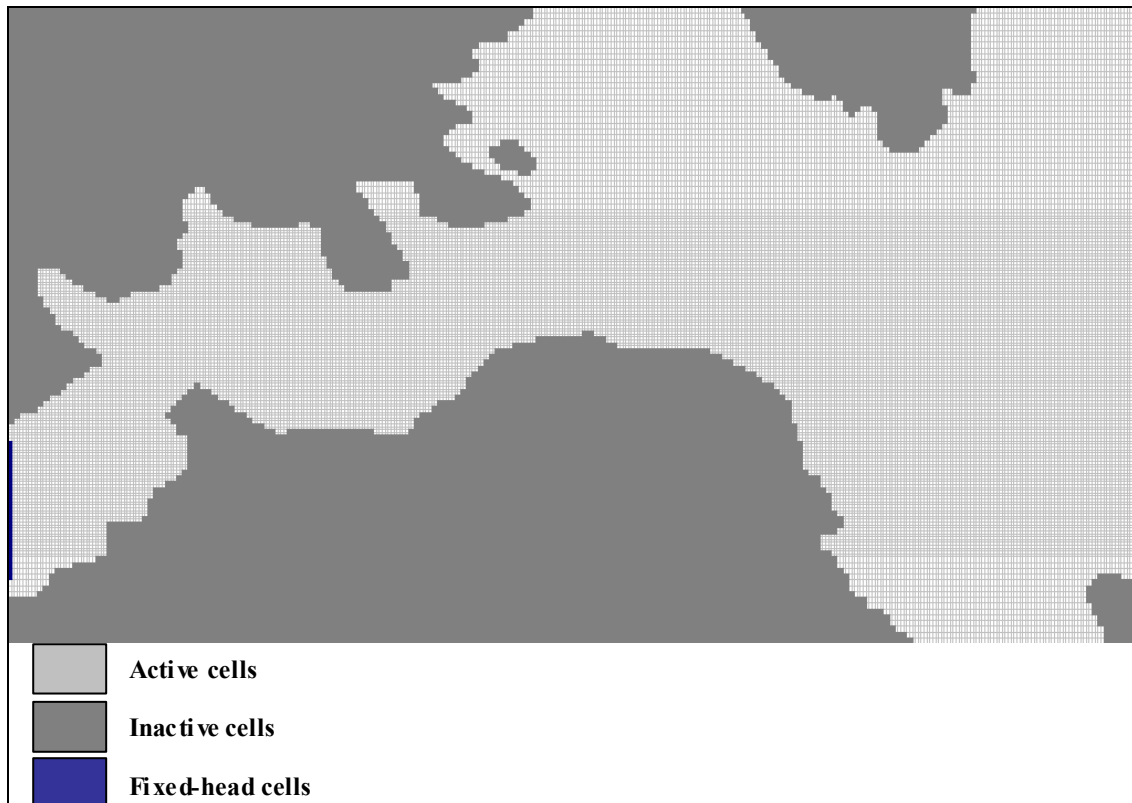
För att samla samtliga celler som representerar Dalälven, se avsnitt 4.2.6, i översta lagret har lager 1 gjorts mäktigare i vissa celler på bekostnad av underliggande lager.

4.2.3.4 Randvillkor

De flesta cellerna i modellen är "Active cells" vilket betyder att grundvattennivån i varje cell beräknas för varje tidssteg. De högt belägna områdena som omger dalgången och Tunaslätten är klassificerade som "Inactive Cells". I dessa celler förekommer inget flöde och grundvattennivån beräknas ej. Gränsen mot de aktiva cellerna blir en så kallad "no flow boundary". Som praktisk gräns mellan "Active cells" och "Inactive cells" har högsta kustlinjen använts eftersom den går längs med de branta bergsidorna som omger dalgången och Tunaslätten. Celler belägna ovanför högsta kustlinjen, 200 möh, är klassificerade som "Inactive cells" och celler belägna under högsta kustlinjen är klassificerade som "Active cells". Högsta kustlinjen är den nivå dit havet nådde som högst under eller efter den senaste istiden.

I stort sett hela den sydöstra randen och den del av den nordvästra randen som skär Dalälvens dalgång är klassificerade med hydrauliska randvillkor, i detta fall "fixed-head cells". Dessa celler har en konstant grundvattennivå och fungerar som ständiga källor av grundvatten.

I kalibreringen av modellen har randvillkoren utvecklats. De slutgiltiga randvillkoren visas i figur 4.8.



Figur 4.8: Modellens randvillkor

4.2.4 Hydrologiska parametrar

4.2.4.1 Hydraulisk konduktivitet

Modellen är indelad i tre huvudsektioner med avseende på hydraulisk konduktivitet. Dessa är åsen, sandfälten i dalgången och finsedimenten på Tunasläppen. Åsen är i sin tur uppdelad i mindre sektioner med olika konduktiviteter.

Åsen är uppbyggd så att den är som bredast underst, i lager 5 och 6, och som smalast överst, i lager 1. I lager 1 framträder åsen bara sporadiskt. Huvudsektionerna för den hydrauliska konduktiviteten och åsens utbredning i lager 1 - 6 redovisas i bilaga 3.

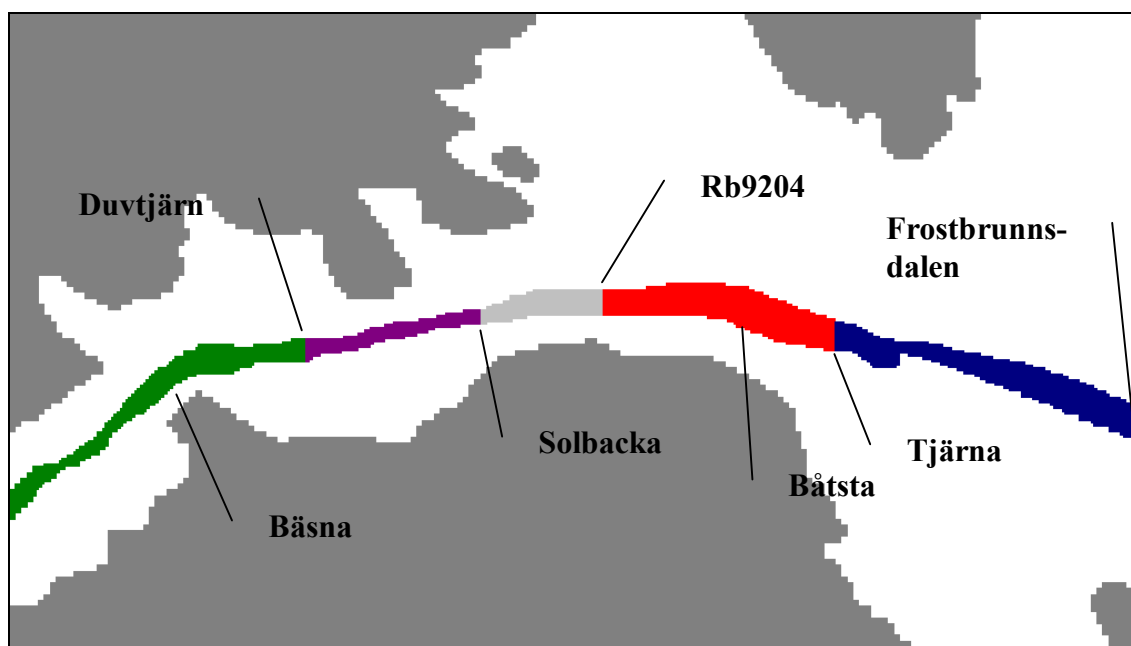
Den horisontella hydrauliska konduktiviteten för en subakvatisk rullstensås är i intervallet $10^{-5} - 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$ med det mest sannolika värdet 10^{-3} ms^{-1} (Vägverket, 1998). Uppgifterna om den hydrauliska kapaciteten i åsen i tabell 1, avsnitt 4.1.5, är beräknade utifrån en antagen genomsnittlig tvärsnittsarea av åsen på 25000 m^2 (Ryttar, 1995 och, Ryttar och Gustafson, 1983). Utifrån den hydrauliska kapaciteten och tvärsnittsarean kan man skaffa sig en uppfattning om den horisontella hydrauliska konduktiviteten i åsen. Se tabell 2.

Åssektion	Hydraulisk kapacitet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	K_h (ms^{-1})	K_h (md^{-1})
Bäsna - Duvtjärn	300 - 400	$1,2 \times 10^{-2} - 1,6 \times 10^{-2}$	1000 - 1400
Duvtjärn - Solbacka	330 - 640	$1,3 \times 10^{-2} - 2,6 \times 10^{-2}$	1150 - 2200
Solbacka - Rb9204	500 - 1030	$2,0 \times 10^{-2} - 4,1 \times 10^{-2}$	1700 - 3600
Rb9204 - Båtsta	300 - 330	$1,2 \times 10^{-2} - 1,3 \times 10^{-2}$	1000 - 1150
Båtsta - Tjärna	350	$1,4 \times 10^{-2}$	1200
Tjärna	- 15	$6,0 \times 10^{-4}$	50
Frostbrunnssdalen			

Tabell 2: Hydraulisk kapacitet och uppskattad horisontell hydraulisk konduktivitet i åsens olika sektioner.

Det finns inga uppgifter om den vertikala hydrauliska konduktiviteten i åsen men den anses generellt vara 10 % av den horisontella konduktiviteten (Vägverket, 1998).

De olika åssektionerna visas i figur 4.9. Sektionen mellan Bäsna och Duvtjärn är utdragen till modellområdets kant. Eftersom sektionerna Rb9204 - Båtsta och Båtsta - Tjärna har liknande hydraulisk kapacitet har de slagits ihop.



Figur 4.9: Åsens sektioner för den hydrauliska konduktiviteten.

I dalgången nordväst om Borlänge är åsen inbäddad och omgiven av mäktiga sandfält, s.k. älvmynnings sediment. Den hydrauliska konduktiviteten för älvmynnings sediment är i intervallet $10^{-6} - 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ för horisontell konduktivitet och $10^{-7} - 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ för vertikal konduktivitet med det mest sannolika värdet 10^{-4} ms^{-1} respektive 10^{-5} ms^{-1} (Vägverket, 1998).

Från Tjärna ner till Frostbrunnssdalen är marken heterogen. Åsen är helt inbäddad i finsediment bestående av en blandning av silt, finsand och morän. Runt Rb8307, Rb8308 och Rb8304 förekommer även lera. Intervallet för den hydrauliska konduktiviteten är stort, $<10^{-9} \text{ ms}^{-1} - 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ (Vägverket, 1995).

I kalibreringen av modellen har de hydrauliska konduktiviteter varierats för att finna rimliga värden i samtliga områden.

4.2.4.2 Initiala potentiometriska nivåer

För de aktiva cellerna används höjddata som initialt värde på grundvattnets potential. Det finns få mätdata utanför åsen och älven för att ange grundvattnets potential i ”fixed head”-cellerna. Utifrån gröna kartan (13F SV och 13F SO) och antagandet att grundvattnet når markytan där vattendrag förekommer har grundvattennivån kunnat bestämmas i vissa celler. Övriga randceller har sedan fått grundvattennivåer angivna, med hänsyn tagen till topografin, genom att fylla i tomrummen mellan kända nivåer och från kartan uppskattade nivåer och på så sätt skapa en kontinuerlig grundvattenyta längs ränderna. Grundvattennivån i åsen är satt till 150,5 meter vid den västra randen och 109 meter vid den östra randen.

4.2.4.3 Effektiv porositet

Den effektiva porositeten påverkar vattnets hastighet i marken och används av olika transportmodeller, i detta fall PMPATH. Åsens effektiva porositet är uppskattad till 12 % (Ryttar, 1995). Den effektiva porositeten är satt till 12 % i samtliga celler i modellen.

4.2.5 Grundvattenbildning

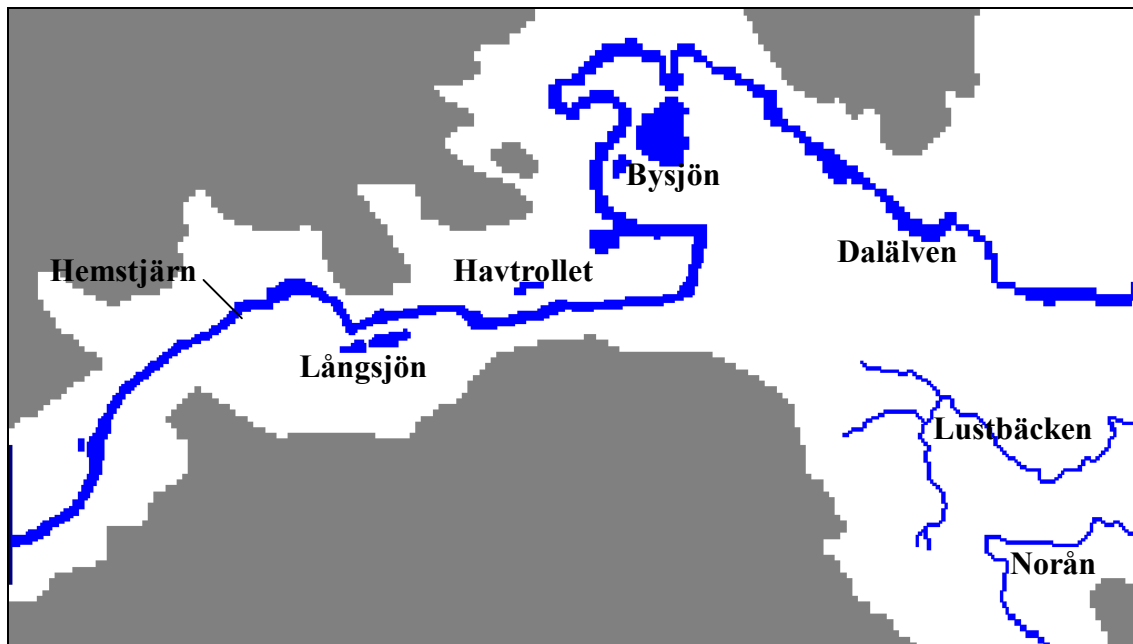
Nederbörden varierar över året och grundvattenbildningen kan variera beroende på jordmån och växtlighet men i modellen har ett medelvärde för hela tidsperioden använts. Grundvattenbildningen är satt till $4 \cdot 10^{-4} \text{ md}^{-1}$, utifrån 150 mm/år (Ryttar, 2003), i hela området.

4.2.6 River

”River”-paketet används för att simulera flödet mellan en akvifer och ett vattendrag så som en flod, en sjö eller en reservoar. Ordet flodbädd som används nedan är en översättning av ordet ”riverbed” och syftar till vattendragets botten och gäller alltså för både en flod och en sjö.

Ursprungligen lades Dalälven och de största sjöarna i området in i lager 1. Under kalibreringen av modellen tillkom ett par mindre vattendrag, Norån och Lustbäcken, i den sydöstra delen av modellen. Den slutgiltiga versionen visas i figur 4.12. Cellernas upplösning medför att vattendragen inte kan representeras exakt.

Hemstjärn är en mindre sjö som ligger strax intill älven längs med åsen. Hemstjärn är inte inlagd i modellen men tas upp i diskussionen. Hemstjärns position visas i figur 4.10.



Figur 4.10: Vattendrag i modellen. Hemstjärn är en mindre sjö som inte är inlagd i modellen men som tas upp i diskussionen.

En cell betecknad som "river" kräver tre inparametrar: Flodbäddens hydrauliska konduktans, flodbäddens höjdnivå och vattendragets vattennivå.

Den hydrauliska konduktansen beräknas enligt:

$$C_{RIV} = \frac{K \cdot L \cdot W}{M} \quad (3)$$

där

C_{RIV}	Flodbäddens hydrauliska konduktans [L^2T^{-1}]
K	Flodbäddsmaterialets vertikala hydrauliska konduktivitet [LT^{-1}]
L	Flodens längd inom en cell [L]
W	Flodens bredd inom en cell [L]
M	Flodbäddens tjocklek [L]

Flödet mellan vattendraget och akviferen beräknas enligt:

$$Q_{RIV} = C_{RIV} \cdot (H_{RIV} - h) \quad (4)$$

där

Q_{RIV}	Läckaget mellan vattendrag och akvifer [L^3T^{-1}]
C_{RIV}	Flodbäddens hydrauliska konduktans [L^2T^{-1}]
H_{RIV}	Ytvattennivå i cellen
h	Grundvattennivå i cellen

Om Q_{RIV} är positiv, flödar vatten från vattendraget till akviferen. Om Q_{RIV} är negativ, flödar vatten från akviferen till vattendraget och vattnet försvinner ur modellen.

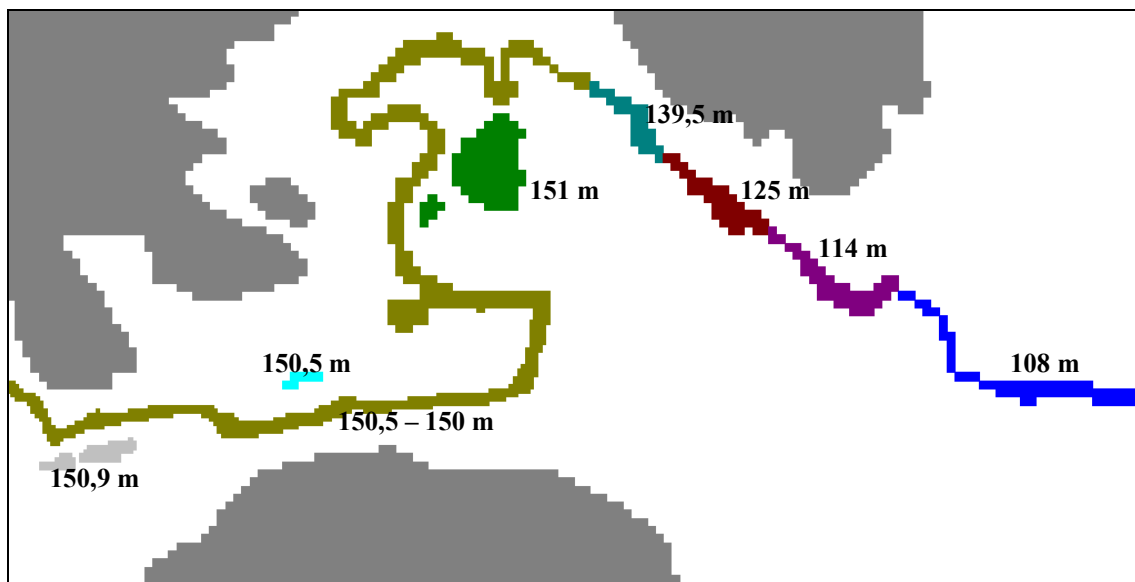
Det finns inga uppgifter att tillgå över flodbäddens hydrauliska konduktivitet och tjocklek, varken i undersökningsområdet, i andra delar av Dalälven eller i andra älvar i

Sverige. I en internationell litteraturstudie anges ett intervall på $0,001 - 100 \text{ md}^{-1}$ för flodbäddens vertikala hydrauliska konduktivitet inom och mellan olika flodsystem (Calver, 2001). I en undersökning av Little Miami River i Ohio, USA, uppmättes konduktiviteter från $0,14 \text{ md}^{-1}$ vid låg flödes hastighet i älven till $3,26 \text{ md}^{-1}$ vid hög flödes hastighet i älven pga. blottlagd finsand på flodbotten. Flodbäddens tjocklek var mellan 10 och 30 centimeter (Mercurio, 1999).

För en river-cell på 50×50 meter och med antagandet att bottentjockleken i Dalälven är mellan 10 cm och 1 meter så får man, utifrån Calvers konduktiviteter och ekvation 3, ett intervall på $2,5 - 2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ för älvens hydrauliska konduktans. Eftersom Dalälven är reglerad i modellområdet och flödes hastigheten är låg är utgångspunkten att konduktansen ligger i den lägre skalan av intervallet. I brist på data antas konduktansen i modellen vara identisk i hela älven förutom att celler på 50×100 meter har dubbla konduktansen jämfört med celler på 50×50 meter.

För sjöarna i området finns heller inga uppgifter om hydraulisk konduktivitet och bottentjocklek men ett pumptest i åsen som gjorts vid Lennheden i anslutning till Långsjön visar att grundvattennivån och vattennivån i sjön har svag eller ingen koppling vilket tyder på att sjöbotten är mycket tät (Ryttar, 1995). Den hydrauliska konduktansen för sjöarna antas därför vara mycket låg.

Vattendjupet i älven är generellt mellan 5 och 7 meter men kan lokalt vara ner mot 3 meter och upp mot 15 meter (Ryttar, 2003). Då det inte finns några tillgängliga mätdata över den aktuella älvsträckan är flodbäddens höjdnivå satt till 6 meter under vattennivån längs hela älven. Vattennivån i älven och sjöarna visas i figur 4.11. För älvsträckan mellan modellens västra rand och Båtsta har olika vattennivåer använts.



Figur 4.11: Älvens och sjöarnas vattennivåer. Den stegvisa sänkningen av Dalälvens nivå beror på att älven är reglerad av fyra kraftverksdammar.

Lustbäcken är någon eller några meter bred och Norån är ett tiotal meter bred. Cellernas upplösning är 50 till 100 meter så vattendragens sträckning blir något förenklad. Vattennivån har antagits lika med topografin i varje cell och flodbädden är satt till en meter under topografin i Lustbäcken och två meter under topografin i Norån. Konduktanserna antas vara låga.

I kalibreringen av modellen har försök gjorts med alternativa inställningar.

4.2.7 Pumpbrunnar

Uttagsbrunnen i Övre Tjärna är inlagd permanent i modellen. Vattnet pumpas från mellan 130 möh och 75 möh vilket motsvarar lager 3 till lager 6 (Ryttar, 2003). Den totala uttagsvolymen är $15000 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ vilken uppdelas på fyra brunnar i lager 3 – 6 om vardera $3750 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$.

Brunnen i Lennheden, Rb9301P, används i kalibreringen av modellen. Vattnet pumpas från mellan 140 möh och 129 möh vilket motsvarar lager 3 och lager 4 (Ryttar, 1995). Den totala uttagsvolymen är $15000 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ vilken uppdelas på två brunnar om vardera $7500 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$.

De båda brunnarna visas i figur 4.2b respektive 4.2d.

5 MODELLERING

5.1 Numerisk motor

Det är i första hand parametrarna i modellen som avgör hur väl modelleringen fungerar men inställningarna för den numeriska motorn har viss betydelse för om konvergens uppnås i beräkningen och hur snabbt detta går. En detaljerad genomgång av de numeriska metoderna i MODFLOW ligger utanför omfattningen av det här arbetet. En enklare beskrivning av, och inställningarna för, den numeriska motorn i PMWIN följer nedan.

Det finns fyra olika paket i PMWIN för lösningen av finita differens-metoden. Dessa är DE45-, PCG2-, SIP- och SSOR-package. I det här arbetet har PCG2, Preconditioned Conjugate-Gradient 2 package, använts.

Under arbetets gång har följande inställningar för PCG2 visat sig fungera bra och har, undantaget ”*Relaxation parameter*”, inte ändrats mellan körningar:

Preconditioning method: **Modified Incomplete Cholesky**

Allowed Outer Iterations: **40**

Allowed Inner Iterations: **99**

Convergence Criteria, Head Change: **0,01 m**

Convergence Criteria, Residual: **0,01 m³d⁻¹**

Damping Parameter: **1**

Relaxation parameter: **0,97 – 1**

I inställningen för ”*Preconditioning method*” kan man välja mellan alternativen ”Modified Incomplete Cholesky” och ”Neuman Polynomial Series”.

Inställningen för ”*Relaxation Parameter*” har varierats. Om en ändring av en parameter i modellen leder till instabilitet eller att körningen inte längre konvergerar kan en ändring av *Relaxation Parameter* ofta återföra konvergens. Inställningen för *Relaxation Parameter* har oftast varit 0,98 eller 0,99 men även 0,97 och 1 har förekommit.

Om ”Allowed Outer Iterations” kan man allmänt säga att om modellen inte har konvergerat efter 40 iterationer så kommer den inte att konvergera. Ett fåtal gånger har antalet iterationer behövts utökas till 60 eller 80.

5.2 Inverterad modellering

Försök gjordes att använda inverterad modellering i kalibreringsarbetet med programmen PEST och UCODE. I PEST och UCODE kan ett antal olika parametrar, t ex hydraulisk konduktivitet och hydraulisk konduktans, varieras i en sammanhängande serie modellkörningar där observerade grundvattennivåer jämförs med simulerade grundvattennivåer för att få fram bästa passning.

Den inverterade modelleringen gav få resultat, främst på grund av att det var svårt att få samtliga körningar att konvergera i den sammanhängande serien av körningar. Den inverterade modelleringen avbryts om en körning inte konvergerar. De magra resultaten

ledde till att inverterad modellering övergavs och att all kalibrering gjordes med ”trial and error”-metoden där ändringar och jämförelser gjordes för hand.

5.3 Kalibrering

I all kalibrering har jämförelser av simulerade och uppmätta grundvattennivåer gjorts visuellt.

Kalibreringsprocessen är svår att beskriva på ett tydligt sätt. Dels går man från parameter till parameter där alla parametrar påverkar, mer eller mindre, varandra och dels går man från område till område där samma parameter kan ha olika inverkan i olika områden. Under rubrikerna i följande avsnitt behandlas primärt den parameter som anges i rubriken men i vissa fall omnämns även andra parametrar.

Med hydraulisk konduktivitet menas horisontell hydraulisk konduktivitet i följande avsnitt. Den vertikala hydrauliska konduktiviteten har väldigt liten inverkan i modellen.

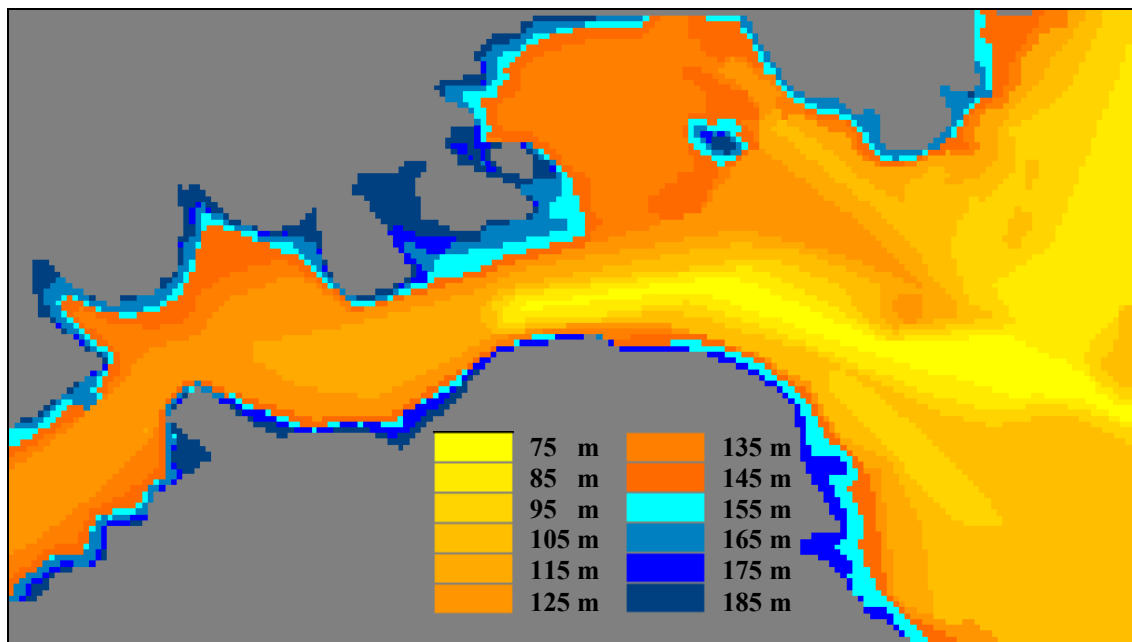
5.3.1 Diskretisering

5.3.1.1 Rutnät

Cellernas upplösning var från början 100×100 meter i hela modellen. För att bättre kunna beskriva åsen och älven, framför allt runt Lennheden där åsen är inklämd mellan älven och Långsjön, ändrades upplösningen till 50×50 meter längs hela åsen.

5.3.1.2 Berggrund

Den först framtagna berggrunden visas i figur 5.1. Den slutliga versionen visas i figur 4.7.

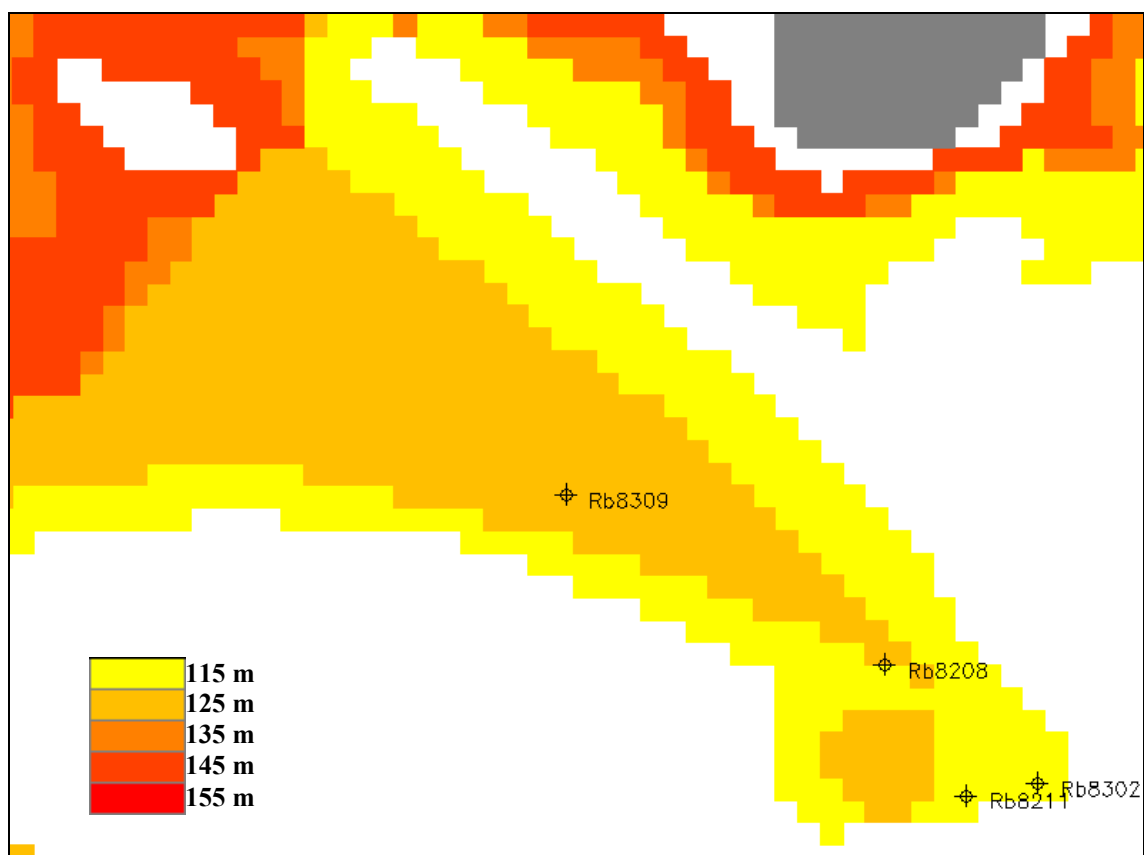


Figur 5.1: Den först framtagna berggrunden.

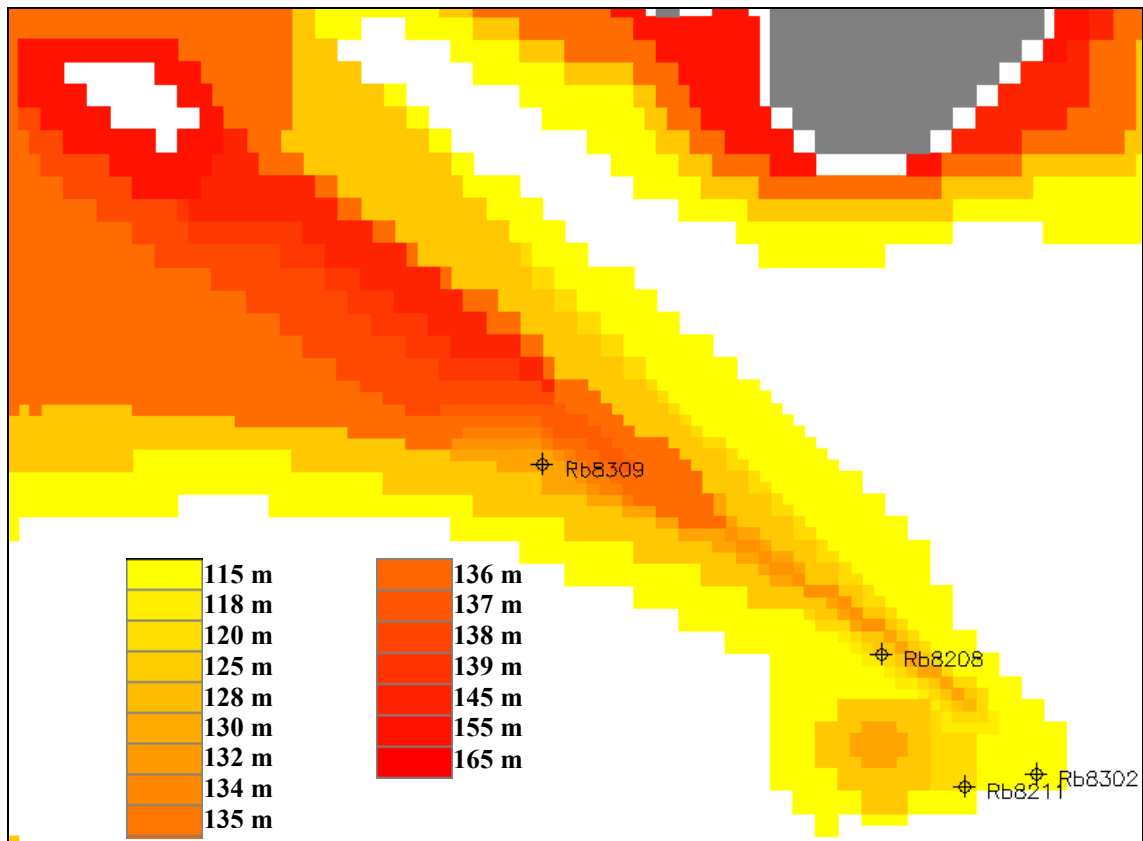
I vissa enskilda celler längs dalgångsidorna, där berggrunden var satt till 185 möh, kunde väldigt höga grundvattennivåer, t ex 10000 meter, uppstå i de första modellversionerna. Högsta berggrundsnivå sänktes till 175 möh i hela modellen vilket ledde till att samtliga celler högt upp längs dalgångssidorna torrlades. Sänkningen gav även stabilare körningar av modellen.

Förenklingen till 125 möh av berggrunds-nivån 120 – 150 möh i VIAKs undersökning visade sig vara otillräcklig. Den modellerade grundvattennivån runt Rb8309 låg till en början ca 12 meter under den observerade nivån. Detta berodde i huvudsak på att berggrunden låg för lågt och inte kunde agera som barriär mellan åsen och älven vilket ledde till att älven sänkte grundvattennivån avsevärt.

Berggrunden ändrades och byggdes upp mer detaljerat där högsta punkten till en början sattes till 150 meter. Detta ledde, i kombination med kalibreringen av den hydrauliska konduktiviteten, till instabilitet i körningarna. Högsta nivån sänktes därför successivt till 139 meter. Figur 5.2 och 5.3 visar utseendet av berggrunden runt Rb8309 före och efter ändringarna. Jämför även med figur 5.1 och figur 4.7.

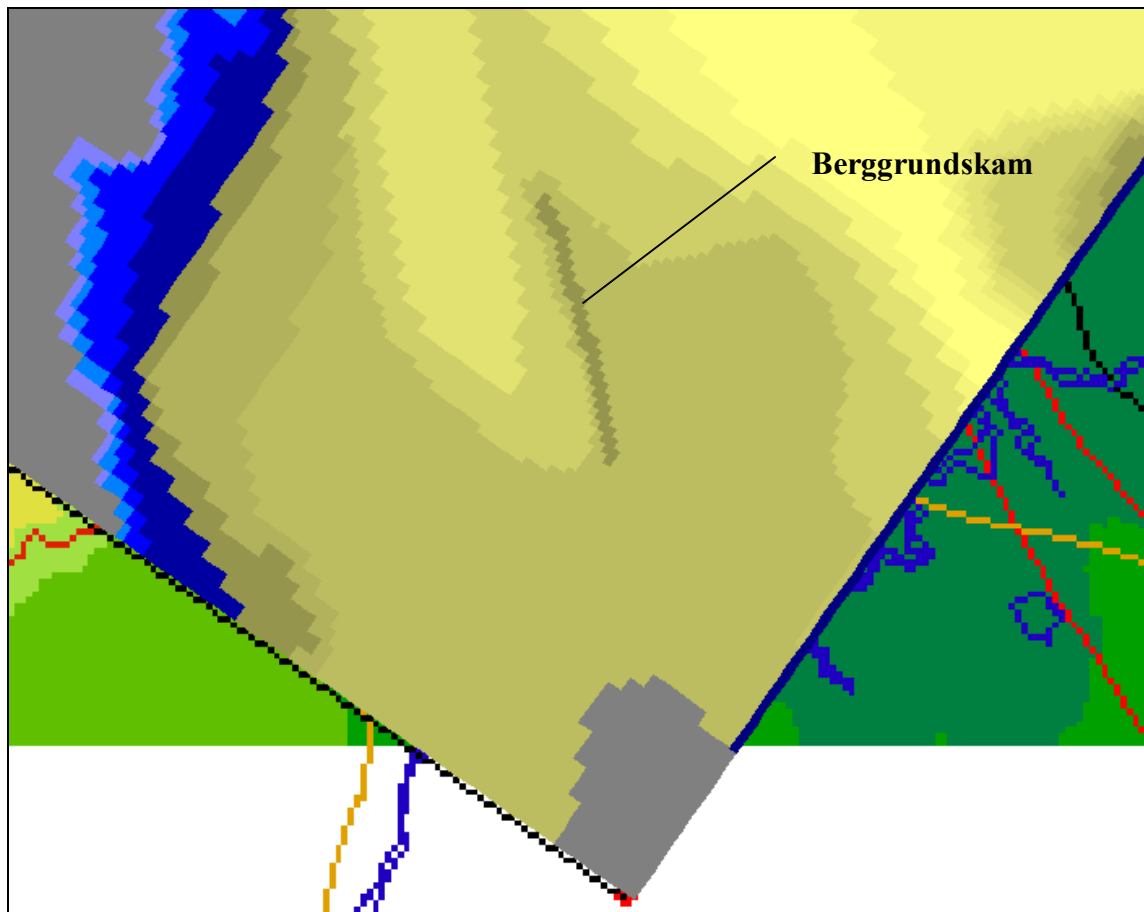


Figur 5.2: Berggrunden runt Rb8309 i de första modellversionerna.



Figur 5.3: Berggrunden runt Rb8309 i senare modellversioner.

Under arbetets gång blev nytt material tillgängligt (Nilsson, 1987 och Rytter, 2003) som visade att en smal berggrundskam löper ca 1,5 kilometer i nord-sydlig riktning i det sydöstra hörnet av modellen. Se figur 5.4. Kammens höjd varierar mellan ca 120 – 145 möh och går i dagen på de högsta ställena. Man kan anta att kammen i någon mån påverkar grundvattenflödet då den utgör en barriär mellan högre liggande områden i väster och åsen och älven i öster. Stora delar av kammen ligger på ca 135 möh (Rytter, 2003) så berggrunden ändrades till denna nivå längs hela sträckan. Detta gav stabilitetsproblem i körningarna. I vissa enskilda celler längs kammen ackumulerades vatten till väldigt höga nivåer. Det gick att få stabilitet i körningarna genom att höja den hydrauliska konduktiviteten i hela området men detta gav sämre simulerade grundvattennivåer i övriga delar av modellen så idén övergavs. Istället för att ändra berggrunden testades också att lägga ”inactive cells” i de undre lagren upp till ca 135 möh längs kammens sträckning men detta gav samma problem som ovan. För att få stabilitet i modellen sänktes kammen successivt till 125 meter. Skapandet av berggrundskammen hade ingen inverkan på grundvattennivån i åsen men påverkade vattennivåerna lokalt vilket kan vara av intresse i en vidareutveckling av modellen.

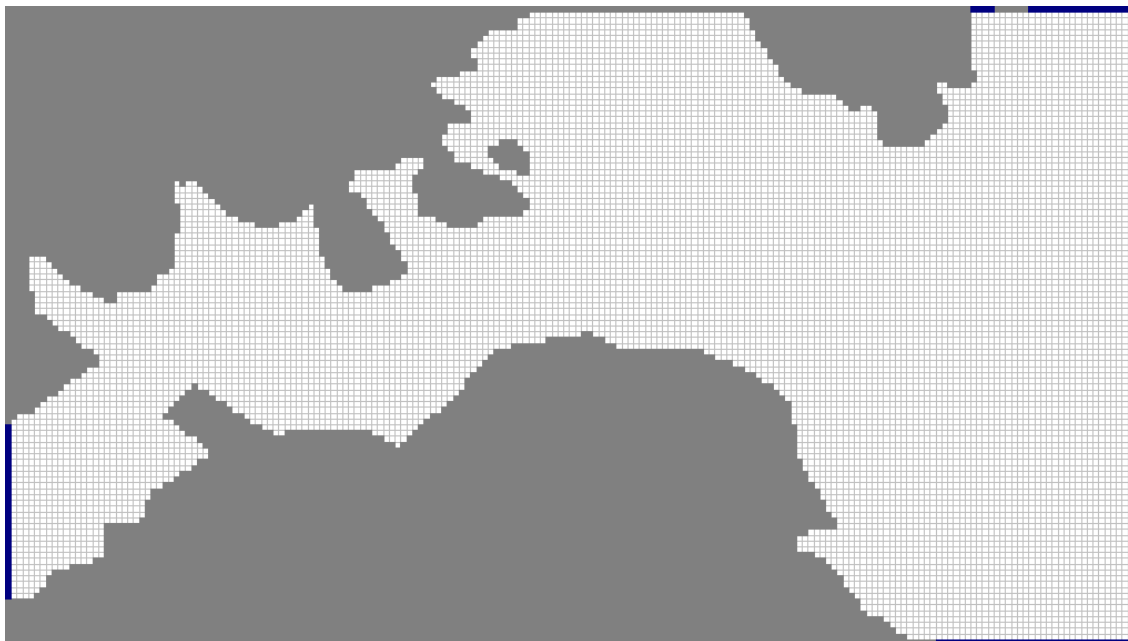


Figur 5.4: Berggrundskam i den sydöstra delen av modellen.

I samband med kalibreringsproblematiken avseende pumptestet i Lennheden, se avsnitt 5.3.3, undersöktes om den uppskattade berggrundsnivån i dalgången mellan Lennheden och modellens västra rand hade någon inverkan på grundvattennivån i åsen. Berggrundsnivåerna under åsen mellan Lennheden och modellens västra rand höjdes och sänktes med fem meter i olika körningar. Grundvattennivåerna i åsen påverkades med maximalt någon centimeter av förändringarna av berggrundsnivån så de ursprungliga inställningarna behölls.

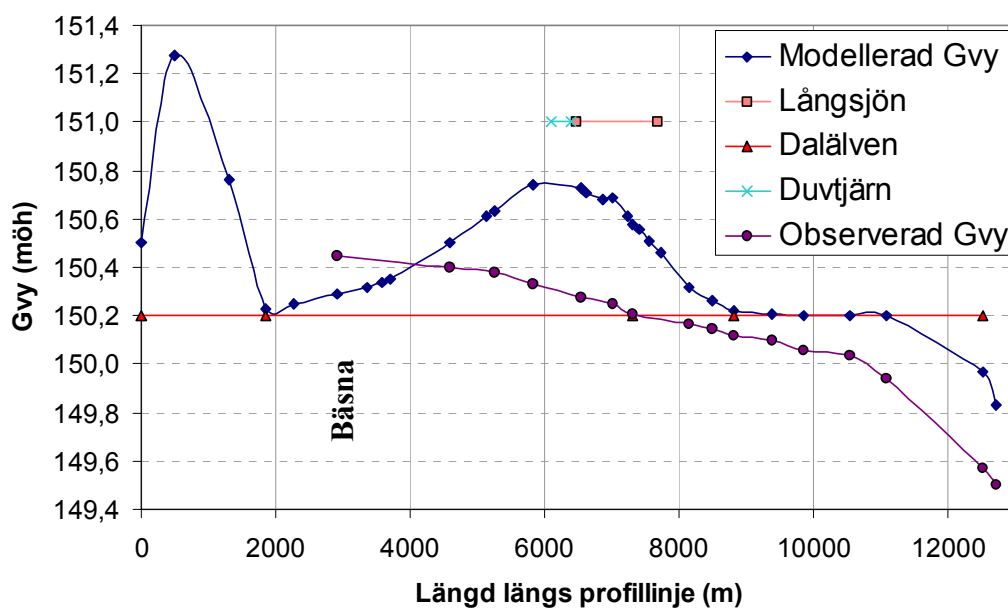
5.3.1.3 Randvillkor

De ursprungliga randvillkoren i de första modellversionerna visas i figur 5.5.



Figur 5.5: Randvillkor i en tidig modellversion.

I figur 5.6 visas, från en tidig simulering, grundvattennivåerna i åsen mellan modellens västra rand och Båtsta. Vid den västra randen är det en kraftig topp i den modellerade grundvattenytan som beror på att "fixed head"-cellerna går hela vägen upp längs dalgångssidan, se figur 5,5, och som på grund av berggrundsnivån måste ha höga grundvattennivåer angivna. Detta höjer grundvattennivån i området. Problemet åtgärdades genom att göra om "fixed head"-cellerna högst upp längs dalgångssidorna till "active cells". De återstående "fixed head"-cellerna utgjorde då en ganska platt yta i dalgångens botten.



Figur 5.6: Grundvattennivåer i åsen mellan västra randen och Båtsta från en tidig simulering.

Längs den nordöstra och den sydöstra randen gav ”fixed head”-cellerna långt upp på bergssidorna, på samma sätt som vid västra randen, stora bidrag till grundvattennivåerna men påverkan var lokal. I ett test där samtliga ”fixed head”-celler längs den nordöstra och den sydöstra randen omvandlades till ”active cells” skedde vissa mindre förändringar precis vid ränderna men grundvattennivåerna i det inre av modellen påverkades inte alls. Därför behölls de nya inställningarna.

I sydöstra hörnet av modellområdet finns en höjd som ligger under högsta kustlinjen på 200 möh. Under arbetets gång framkom att höjden har mycket tunt jordtäckte eller har berg i marknivå (Ryttar, 2003). Därför har en del av sydöstra hörnet omklassificerats till ”inactive cells”.

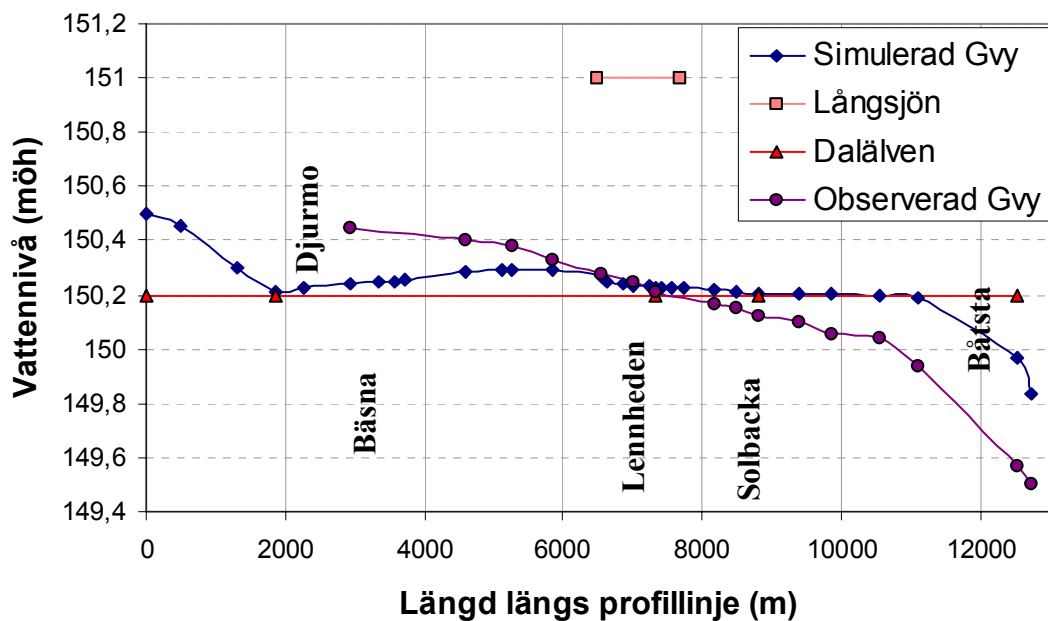
Eftersom modellområdets gräns automatiskt medför att inget flöde kan ske ut ur modellen så togs de ”inactive”-celler bort som låg i mittenpartiet längs den norra randen.

För att se de förändringar som gjordes i randvillkoren, jämför figur 5.6 med figur 4.8 i avsnitt 4.2.3.

5.3.2 Hydraulisk konduktans i älven

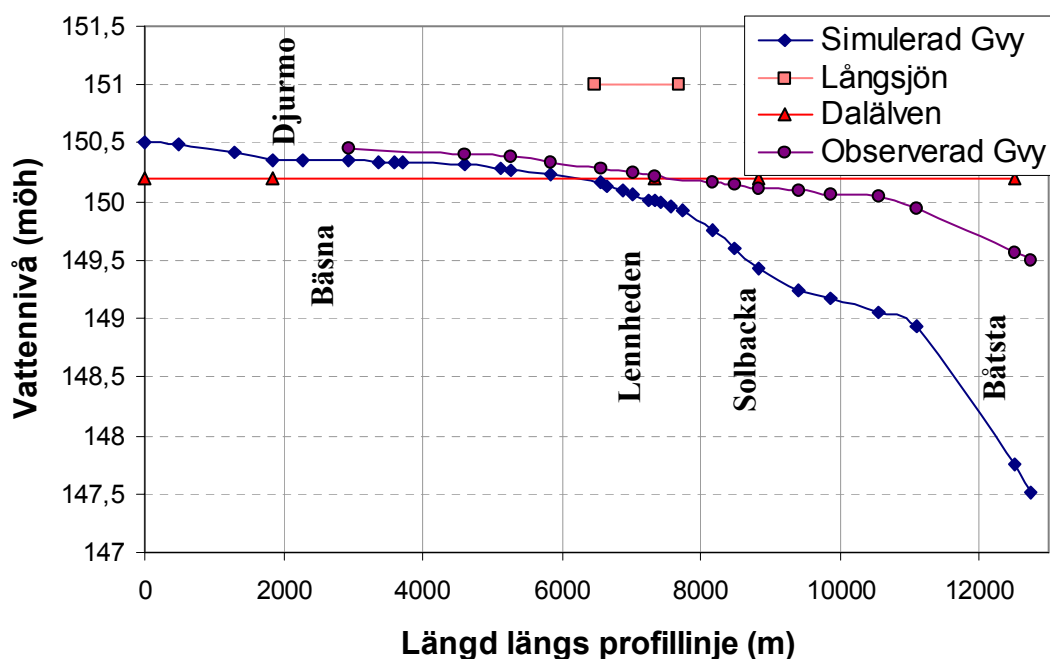
Figur 5.7 visar grundvattennivån i den västra delen av åsen i en tidig simulering. Den hydrauliska konduktansen i älven är $10000 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$. Där älven och åsen är i kontakt med varandra, älvkorsningarna och sträckan Solbacka – Båtsta, infiltrerar åsen och älven varandra fullständigt. Detta tyder på att den hydrauliska konduktansen i älven är för hög. Alla övriga parametrar i modellen har ingen eller liten inverkan på grundvattennivån när den hydrauliska konduktansen är så hög. Notera att vattennivån i älven är förenklad till 150,2 i den här tidiga modellversionen och att något andra förhållanden rådde med avseende på vattennivån när den observerade grundvattennivån uppmättes.

Den hydrauliska konduktansen för sjöarna längs åsen är, i figur 5.7, mycket lägre än älvens konduktans. Jämför med figur 5.6, med likartade modellparametrar, där sjöarna har samma hydrauliska konduktans som älven. Om Långsjön har hög hydraulisk konduktans så höjer det grundvattennivån vid Lennheden avsevärt.



Figur 5.7: Grundvattennivåer i åsen mellan västra randen och Båtsta från en tidig simulering. Den hydrauliska konduktansen i älven är $10000 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$.

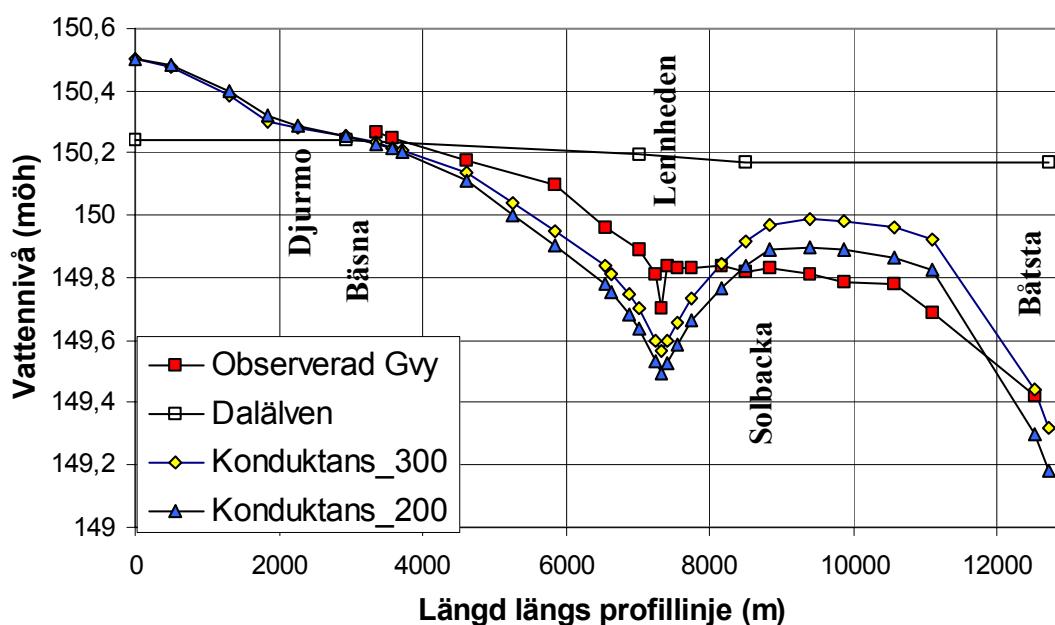
I figur 5.8 är den hydrauliska konduktansen $400 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$. Övriga inställningar är likartade de i modellen i figur 5.7. Vid älvkorsningen i Djurmo sker en viss avsänkning av grundvattennivån vilket tyder på att den hydrauliska konduktansen fortfarande är för hög. Den kraftiga avsänkningen från Lennheden mot Båtsta beror på att andra parametrar, framförallt den hydrauliska konduktiviteten, påverkar grundvattennivån.



Figur 5.8: Grundvattennivåer i åsen mellan västra randen och Båtsta. Den hydrauliska konduktansen i älven är $400 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$.

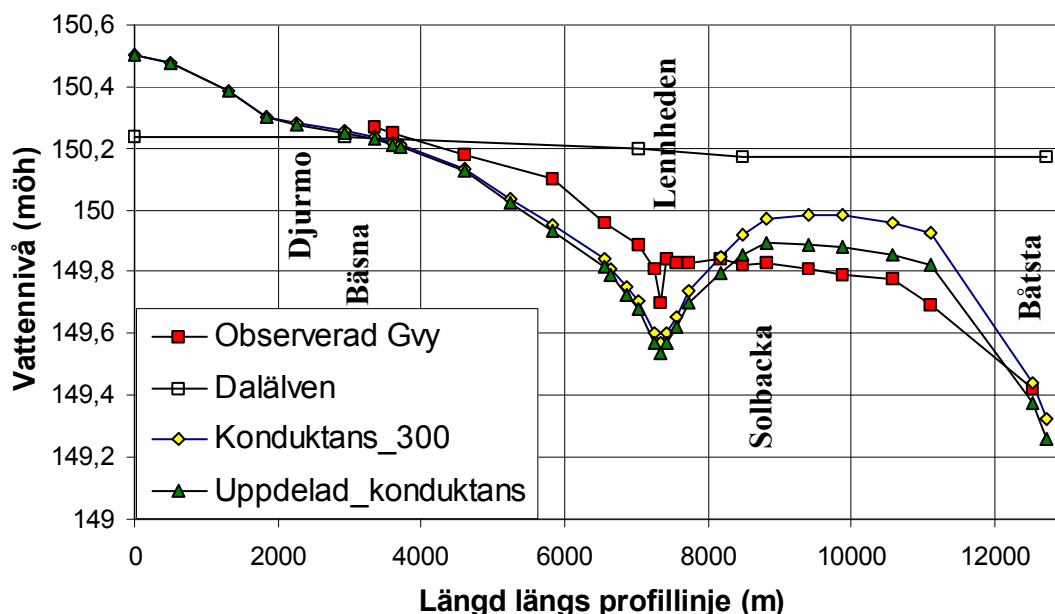
5.3.3 Hydraulisk konduktivitet i åsen

I kalibreringen av de hydrauliska konduktiviteterna i åsen och i den fortsatta kalibreringen av den hydrauliska konduktansen i älven används pumptestet i Lennheden. (Huvuddelen av kalibreringsarbetet har koncentrerats på detta och en mängd olika idéer har testats vilka alla inte redovisas här.) Problematiken i kalibreringen av den hydrauliska konduktiviteten i åsen och den hydrauliska konduktansen i älven sammanfattas ganska väl i figur 5.9. Figuren jämför två simuleringar, som har exakt samma inställningar förutom den hydrauliska konduktansen i älven, med den observerade grundvattennivån i åsen vid pumptestet. De hydrauliska konduktiviteterna i åssektionerna är satta till maximum utifrån respektive intervall i tabell 2. Den hydrauliska konduktansen i älven är satt till $200 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ respektive $300 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ i de två simuleringarna. Öster om pumpplatsen är avsänkningen för svag. Vid pumpplatsen och väster om pumpplatsen är avsänkningen för kraftig. En höjning eller sänkning av den hydrauliska konduktansen i älven förbättrar grundvattennivåerna på ena sidan av pumpningen och försämrar grundvattennivåerna på den andra sidan.



Figur 5.9: En jämförelse av den hydrauliska konduktansens betydelse för en simulering.

En uppdelning av den hydrauliska konduktansen i älven kan förbättra överensstämmelsen med observerade grundvattennivåer. Ett exempel ges i figur 5.10 där den hydrauliska konduktansen i älven mellan Solbacka och strax innan Båtsta är sänkt till $100 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$. Resten av älven har $300 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ i hydraulisk konduktans. I övrigt är modellens inställningar likadana som i ovanstående exempel. Grundvattennivån mellan Solbacka och Båtsta blir då lägre.



Figur 5.10: En jämförelse av grundvattennivåer vid enhetlig hydraulisk konduktans och vid uppdelad hydraulisk konduktans i älven.

Med samma konduktans i hela älven måste man höja konduktiviteterna i hela åsen, och då gå utanför det intervall som ges i tabell 2, för att få en bättre överensstämmelse med observerade grundvattennivåer i åsen. Huvuddelen av kalibreringsarbetet med de hydrauliska konduktiviteterna i åsen har gjorts med ett enhetligt värde på den hydrauliska konduktansen i hela älven.

5.3.4 Hydraulisk konduktivitet utanför åsen

I den tidiga utvecklingen av modellen användes samma konduktivitet, med utgångspunkt i den högre konduktiviteten i älvmyningssedimenten i väster, i hela området utanför åsen. I figur 5.8 ser man att avsänkningen vid Båtsta är väldigt kraftig vilket, huvudsakligen, beror på den höga konduktiviteten i hela det östra området. Konduktiviteten utanför åsen delades därför upp mellan sandfält i väster och finsediment öster.

Till en början, med en hög hydraulisk konduktans i älven, kunde älvmyningssedimentens hydrauliska konduktivitet varieras ganska kraftigt utan stabilitetsproblem i körningarna. Med en lägre hydraulisk konduktans i älven är det dock svårt att gå lägre än 10 md^{-1} och högre än 40 md^{-1} i hydraulisk konduktivitet för älvmyningssedimenten utan att stöta på svåra stabilitetsproblem.

En höjning eller sänkning av älvmyningssedimentens hydrauliska konduktivitet har samma effekt på åsens grundvattennivå som den effekt en höjning eller sänkning av älvens hydrauliska konduktans har som visas i figur 5.9.

För finsedimenten är det svårt att uppnå stabilitet i körningarna om man underskrider en hydraulisk konduktivitet på $0,5 \text{ md}^{-1}$. Det går att gå lägre i ett eller två lager.

Försök gjordes att lägga in lerlinser runt Rb8307 och Rb8308 men detta gav instabila körningar så idén övergavs.

5.3.5 River - Norån och Lustbäcken

Området runt Rb8307 är en lågpunkt i terrängen. I de tidiga simuleringarna låg grundvattennivåerna över markytan i lågpunkten och ändringar av den hydrauliska konduktiviteten kunde inte komma till rätta med problemet. Först lades Norån in för att se om det påverkade grundvattennivåerna, dels runt Rb8307 och dels i åsen. Detta hade väldigt liten inverkan på grundvattennivån kring Rb8307 och ingen inverkan på grundvattennivån i åsen oavsett hydraulisk konduktans i ån. I närområdet av Norån är effekten större men här finns det inga mätdata att jämföra med. När Lustbäcken lades in hade det inverkan på grundvattennivåerna utanför åsen men ingen inverkan på grundvattennivåerna i åsen. Den hydrauliska konduktansen i bäcken är helt avgörande för effekten på Rb8307, Rb8306 och Rb 8310.

5.4 Känslighetsanalys

För det område som är av störst intresse i modellen, åssträckan mellan Bäsna och Tjärna, har den hydrauliska konduktansen i Dalälven klart störst betydelse och påverkar alla andra parametrar mer eller mindre. Den horisontella hydrauliska konduktiviteten i åsen har också relativt stor betydelse men är beroende av värdet på den hydrauliska konduktansen i älven. I Båtsta, där effekten är som störst, kan en förändring av den hydrauliska konduktansen i älven med en faktor 2 påverka vattennivån i åsen upp mot 30 centimeter samtidigt som en förändring med en faktor 2 av den horisontella hydrauliska konduktiviteten i åsen påverkar vattennivån upp mot 10 cm.

Den hydrauliska konduktiviteten i åsen mellan Tjärna och Frostbrunnsdalen har relativt liten inverkan på grundvattennivåerna i sitt närområde men har relativt stor inverkan på grundvattennivåerna runt Båtsta.

Den horisontella hydrauliska konduktiviteten för älvmynningssedimenten har inte så stor inverkan på vattennivåerna i modellen men har betydelse för stabiliteten i körningarna.

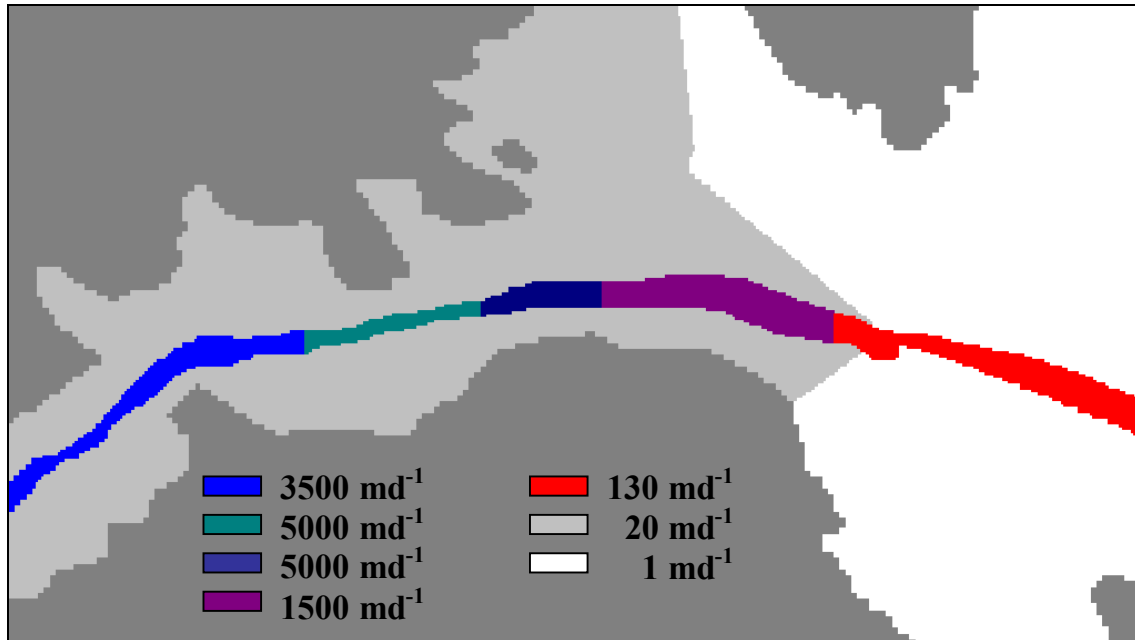
Berggrunden har stor betydelse lokalt, t.ex. runt Rb8309, i kombination med den horisontella hydrauliska konduktiviteten utanför åsen. Stabiliteten i modellen påverkas om berggrunden ligger nära markytan och särskilt om den hydrauliska konduktiviteten samtidigt är låg.

Den vertikala hydrauliska konduktiviteten har liten inverkan på simuleringarna.

6 RESULTAT

6.1 Hydraulisk konduktivitet

De hydrauliska konduktiviteter som ger det bästa resultatet i modellen visas i figur 6.1. De hydrauliska konduktiviteterna visas även i tabell 3 i olika enheter.



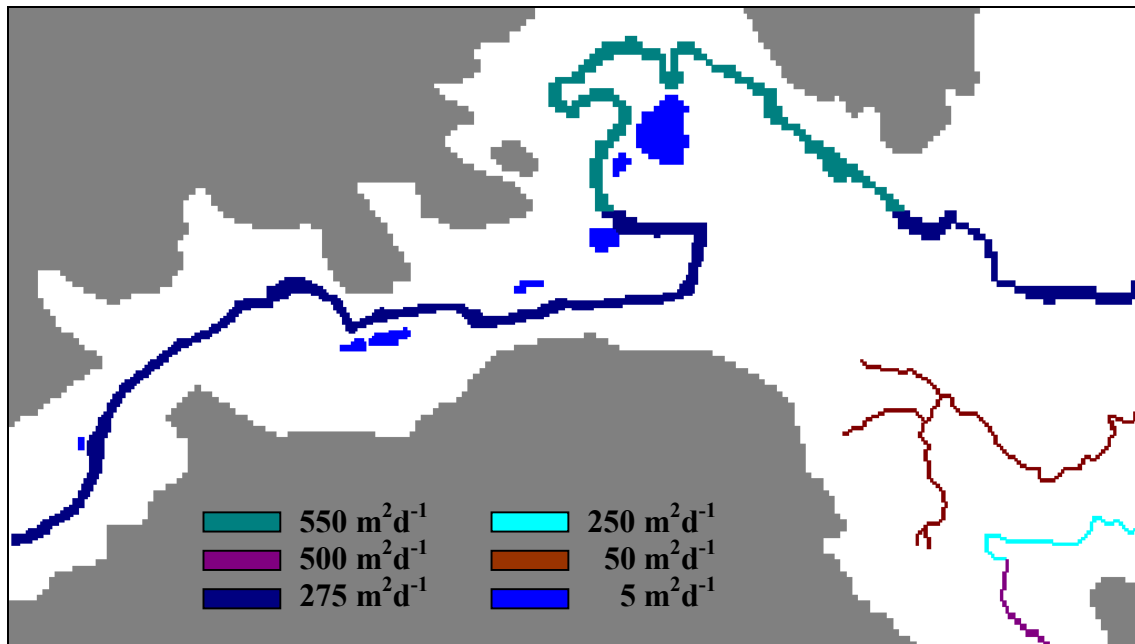
Figur 6.1: De horisontella hydrauliska konduktiviteterna i modellen. $K_v = 0,1 \cdot K_h$.

Sektion	$K_h \text{ (md}^{-1}\text{)}$	$K_h \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
Bäsna - Duvtjärn	3500	$4,1 \times 10^{-2}$
Duvtjärn - Solbacka	5000	$5,8 \times 10^{-2}$
Solbacka - Rb9204	5000	$5,8 \times 10^{-2}$
Rb9204 - Tjärna	1500	$2,5 \times 10^{-2}$
Tjärna - Frostbrunnsdalen	130	$2,1 \times 10^{-3}$
Älvmynningssediment	20	$2,3 \times 10^{-4}$
Finsediment	1	$1,7 \times 10^{-5}$

Tabell 3: De hydrauliska konduktiviteterna i modellen

6.2 Hydraulisk konduktans

De hydrauliska konduktanser som ger bäst resultat i modellen visas i figur 6.2.

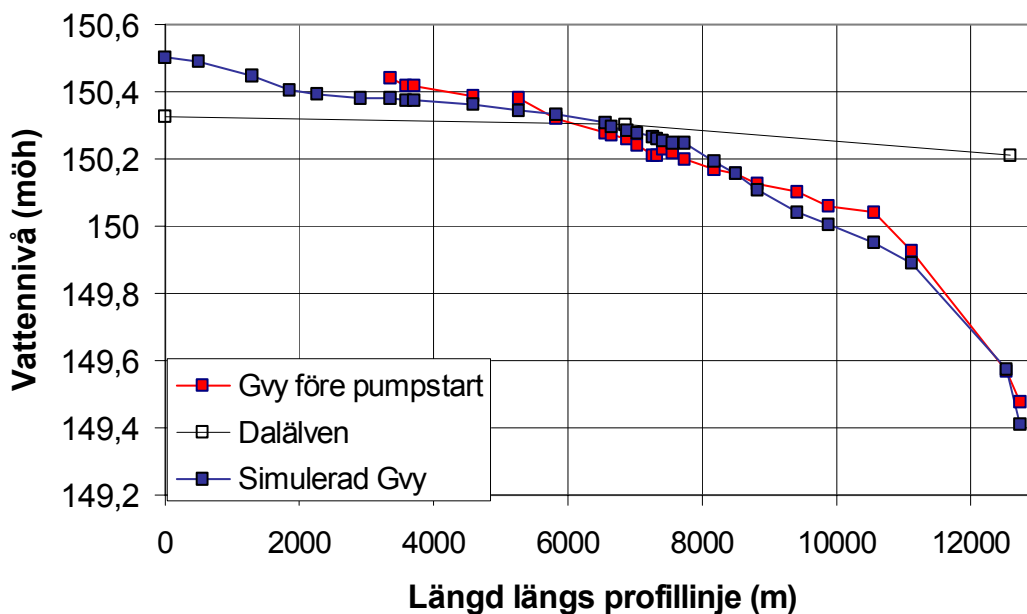


Figur 6.2: De hydrauliska konduktanserna i modellen.

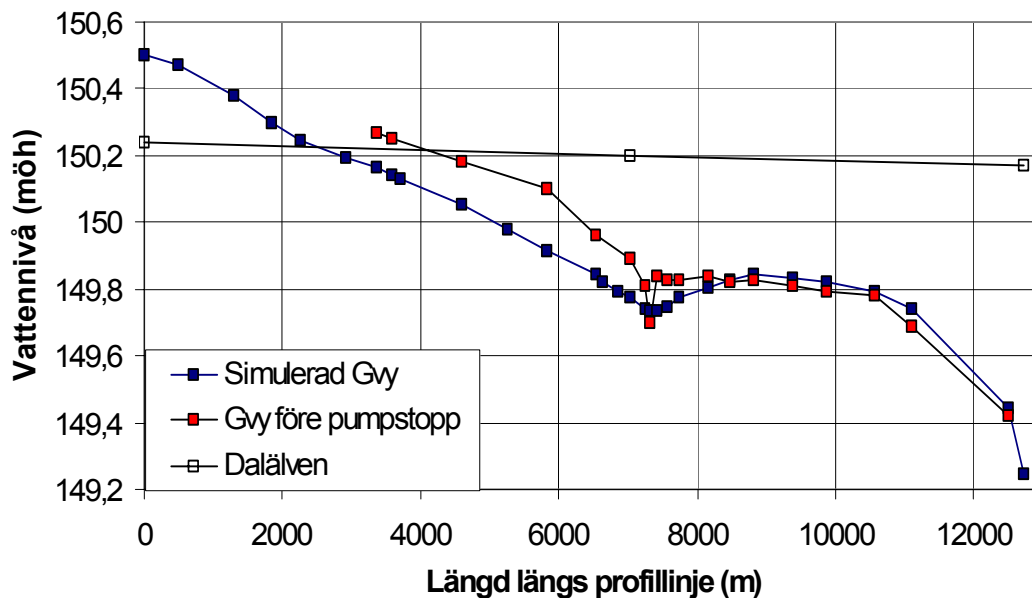
Älvens hydrauliska konduktans på 275 m^2d^{-1} i en cell på 50×50 meter ger en kvot för den vertikala hydrauliska konduktiviteten och älvbottens tjocklek, utifrån ekvation 3, på 0,11 d^{-1} . Med en antagen botten tjocklek på 0,1 – 1 meter är den vertikala hydrauliska konduktiviteten för Dalälvens botten sediment i intervallet 0,011 – 0,11 md^{-1} .

6.3 Grundvattennivåer

Figur 6.3 och figur 6.4 visar de simulerade och observerade grundvattennivåerna mellan Bäsna och Båtsta utan respektive med pumptestet i Lennheden. Notera att vattennivån i Dalälven var olika vid de olika mättillfällena vilket har tagits hänsyn till i modellen.

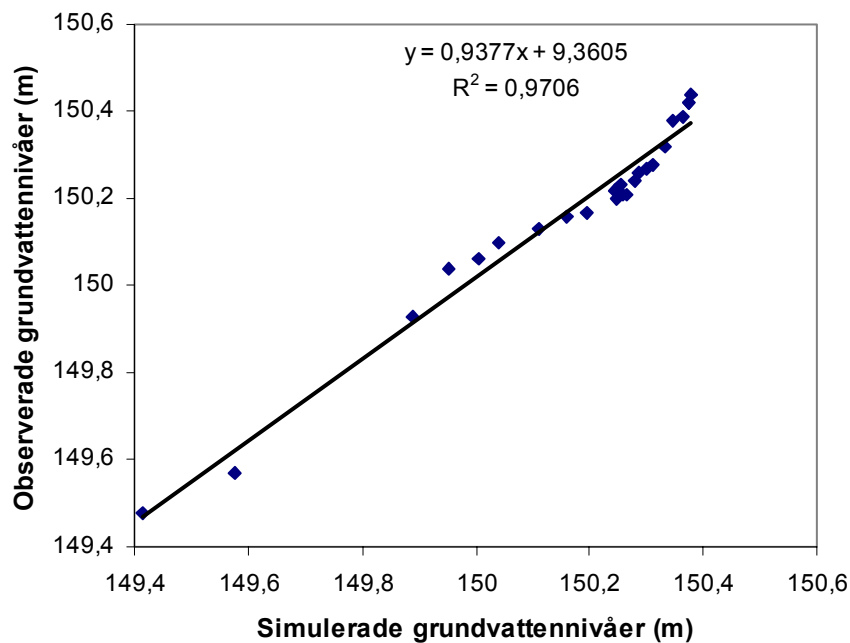


Figur 6.3: Jämförelse av simulerade och observerade grundvattennivåer i åsen före pumpstart mellan Bäsna och Båtsta.



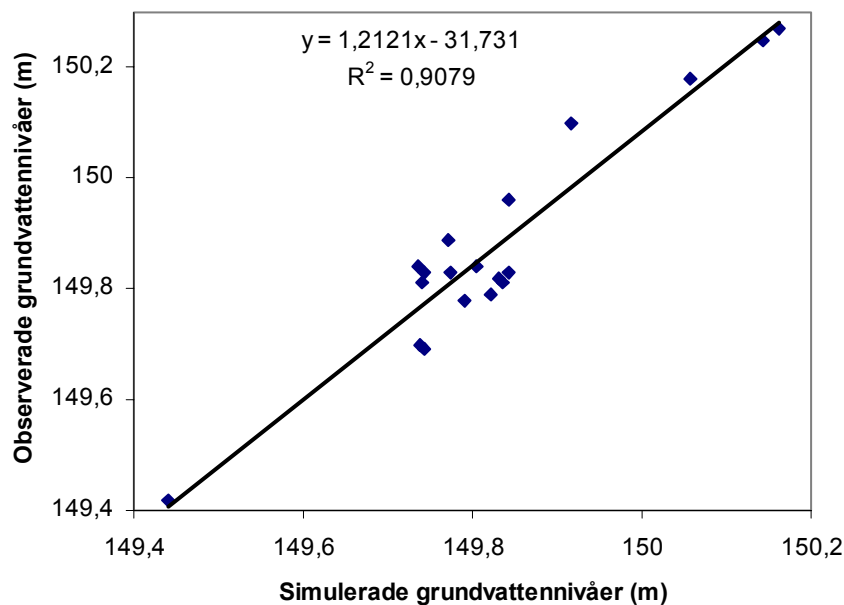
Figur 6.4: Jämförelse av simulerade och observerade grundvattennivåer i åsen före pumpstopp mellan Bäsna och Båtsta.

I simuleringen av situationen före pumpstart ligger de flesta av de simulerade nivåerna inom 5 centimeter från de observerade nivåerna. Den största skillnaden är 9 centimeter. Se figur 6.5.



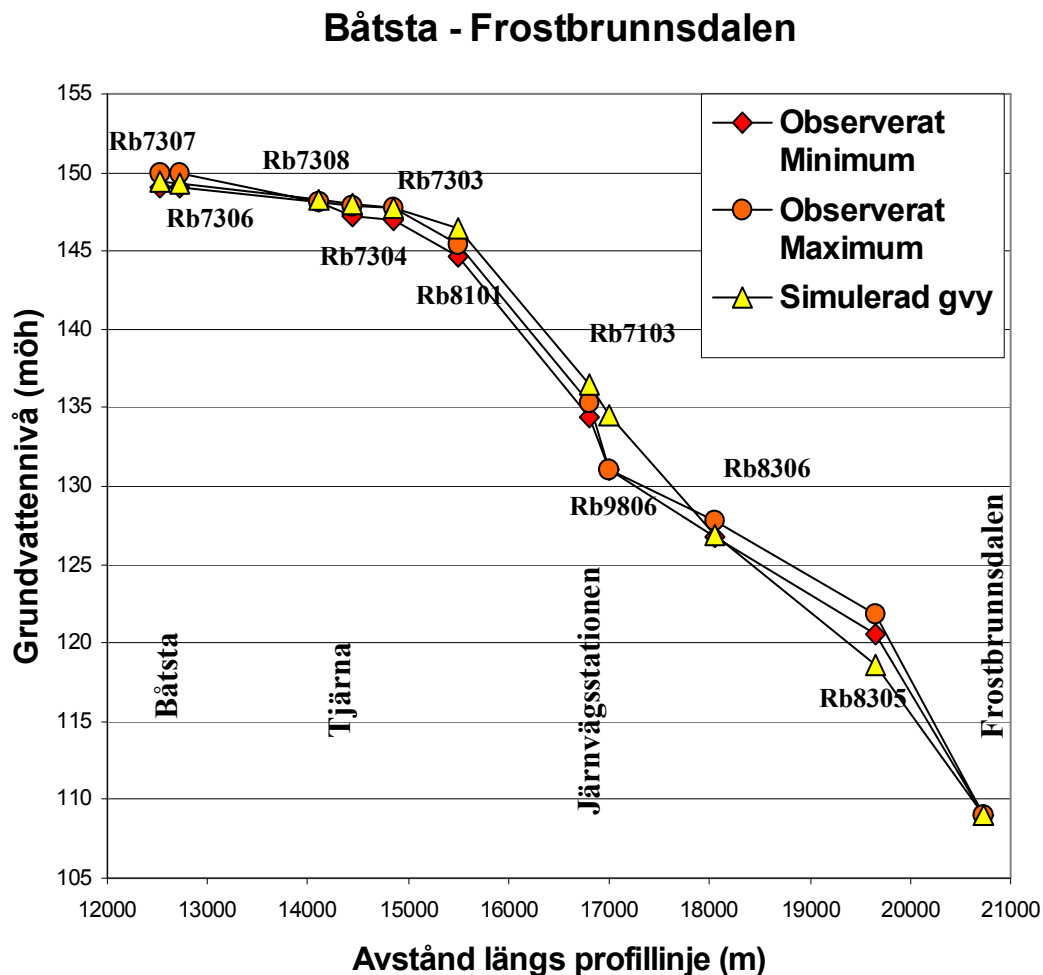
Figur 6.5: En jämförelse av observerade grundvattennivåer och simulerade grundvattennivåer före pumpstart mellan Bäsna och Båtsta. Den linjära regressionslinjen med tillhörande ekvation visas tillsammans med R^2 -värdet.

I simuleringen av situationen före pumpstopp ligger de flesta av de simulerade nivåerna inom 10 centimeter från de observerade nivåerna. Den största skillnaden är 19 centimeter. Se figur 6.6.



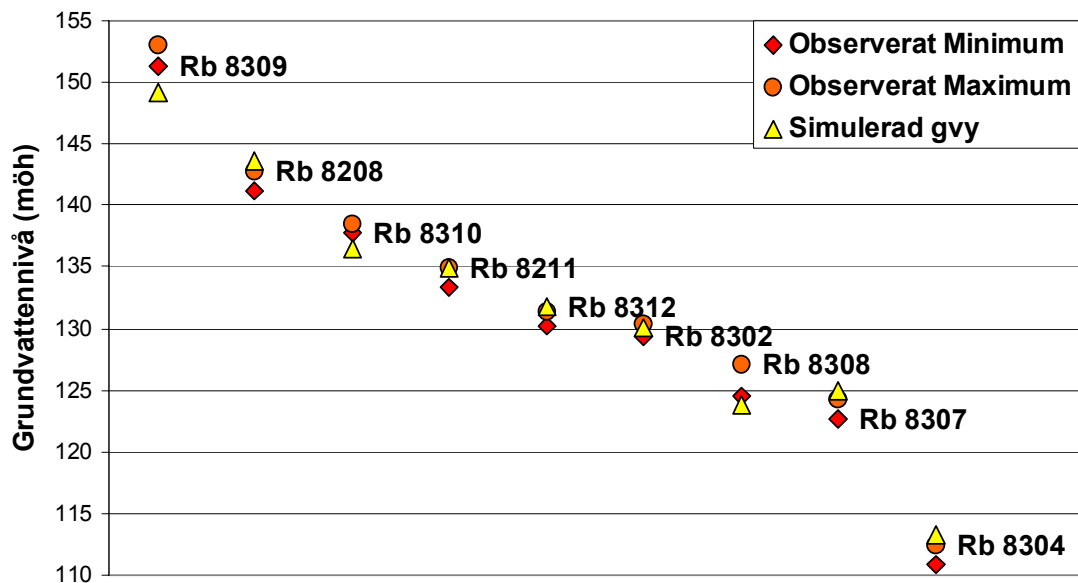
Figur 6.6: En jämförelse av observerade grundvattennivåer och simulerade grundvattennivåer vid pumpstopp mellan Bäsna och Båtsta. Den linjära regressionslinjen med tillhörande ekvation visas tillsammans med R^2 -värdet.

De simulerade grundvattennivåerna och den lägsta och högsta observerade grundvattennivån i åsen mellan Båtsta och Frostbrunnsdalen visas i figur 6.7. De simulerade vattennivåerna är från samma simulering som i figur 6.3. För Rb7308 och Rb9806 finns det bara en observation. Mellan Båtsta och Tjärna ligger de simulerade grundvattennivåerna inom de observerade nivåerna. Mellan Tjärna och Frostbrunnsdalen är överensstämmelsen inte lika god.



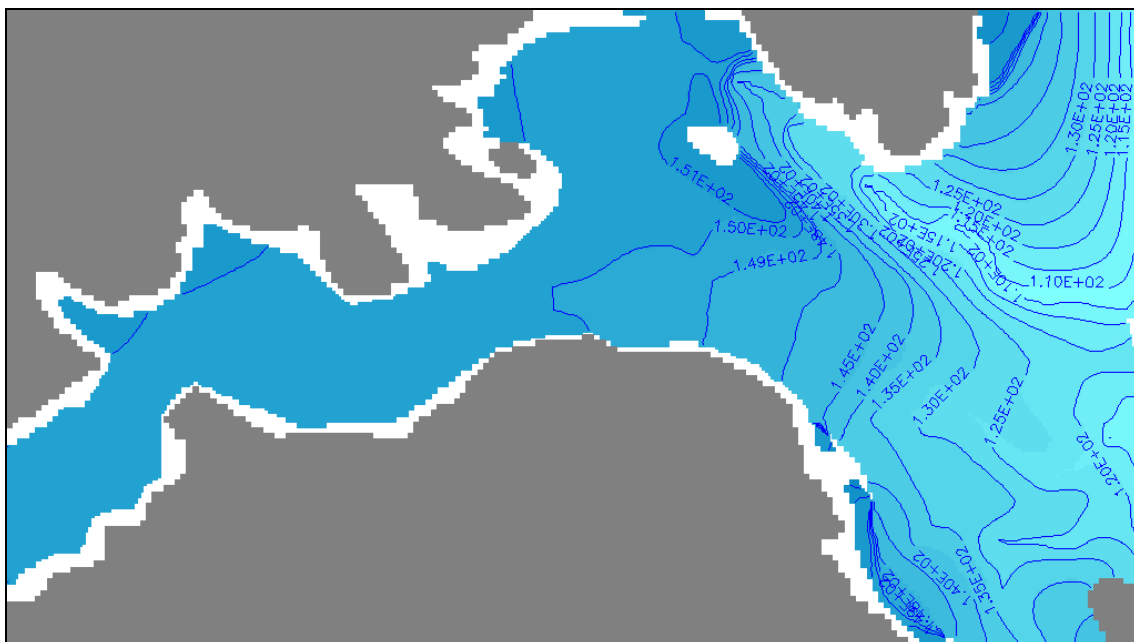
Figur 6.7: Jämförelse av simulerade och observerade grundvattennivåer i åsen mellan Båtsta och Frostbrunnsdalen.

De simulerade och observerade grundvattennivåer utanför åsen på Tunaslättan visas i figur 6.8. De observerade grundvattennivåerna är, som i figur 6.7, en sammanställning av observationer från olika mättillfällen och visar högsta och lägsta observerade nivå. De simulerade nivåerna ligger över, under och inom intervallen. Största skillnaden finns i Rb8309 där den simulerade nivån ligger 2 meter under lägsta observerade nivå.



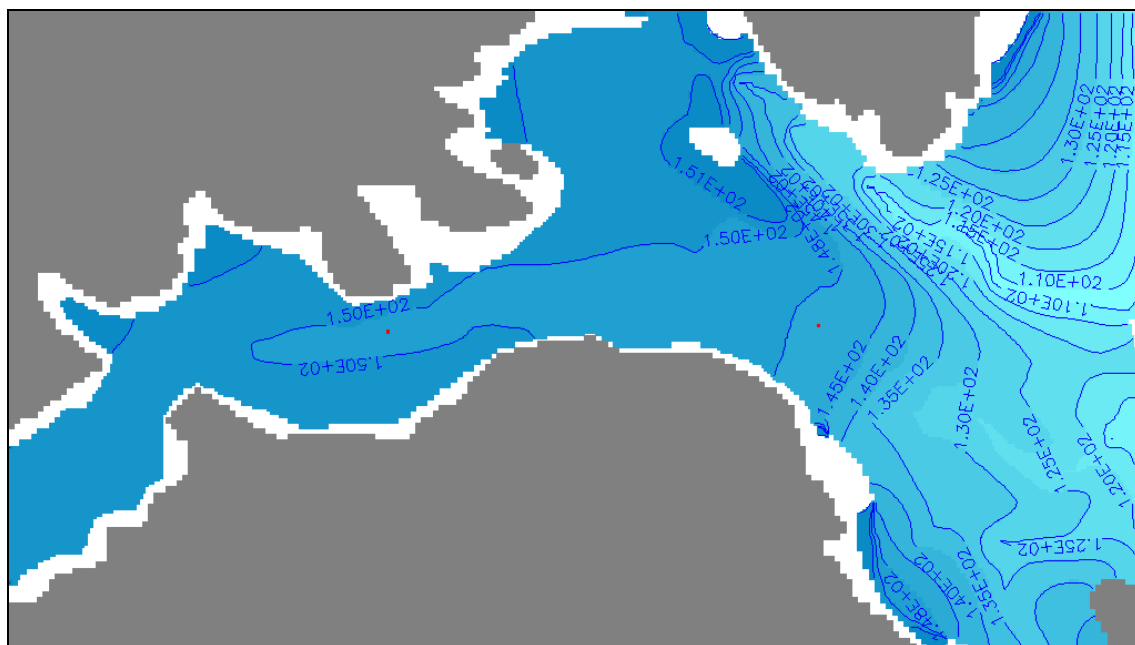
Figur 6.8: Jämförelse av simulerade och observerade grundvattennivåer utanför åsen på Tunaslättan.

Den simulerade grundvattenytan för hela modellen visas i figur 6.9. En större figur visas i bilaga 4.



Figur 6.9: Grundvattenytan för hela modellen.

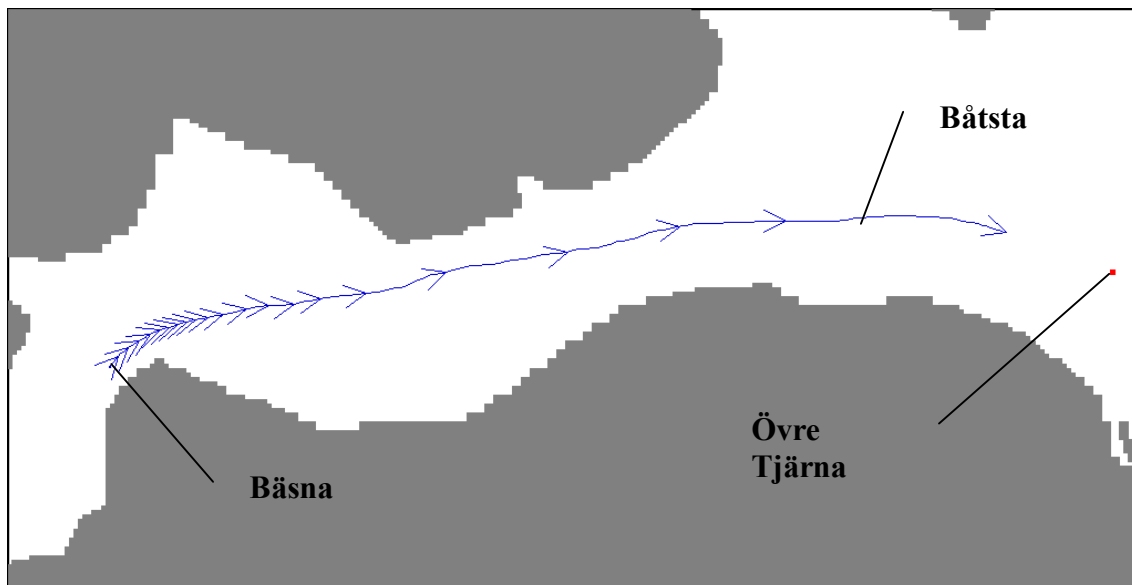
Den simulerade grundvattenytan för hela modellen med pumptestet i Lennheden visas i figur 6.10. En större figur visas i bilaga 4.



Figur 6.10: Grundvattenytan för hela modellen med pumpning i Lennheden

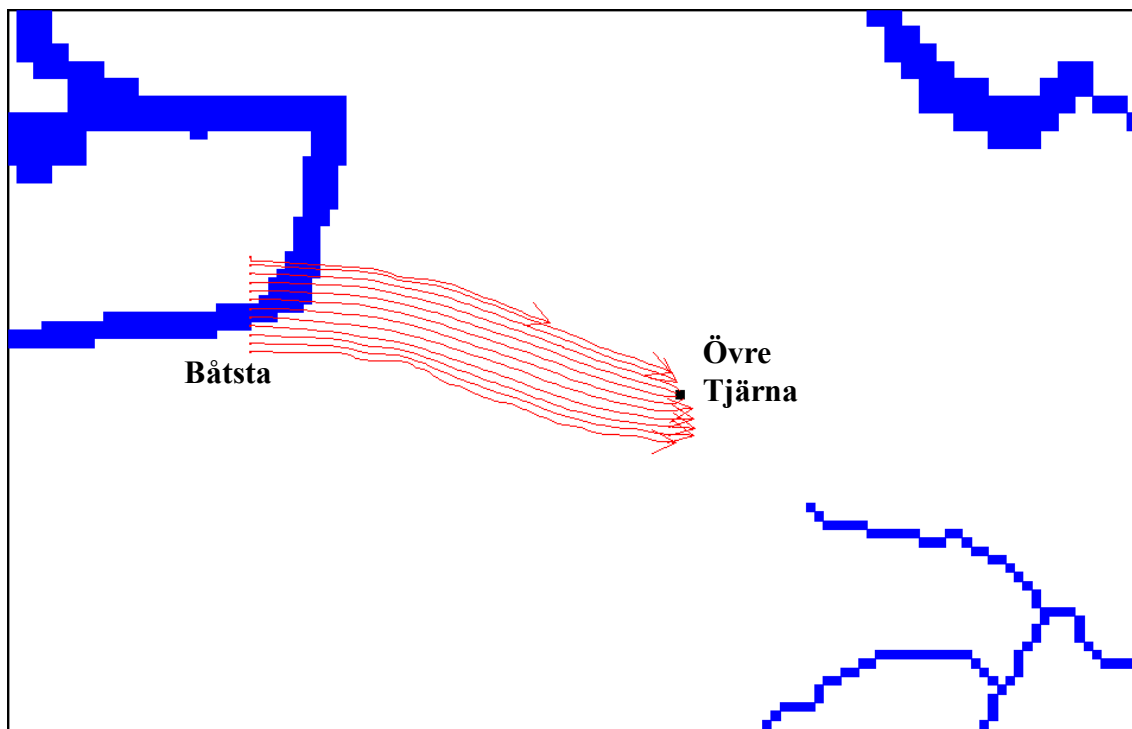
6.4 Transporttider

Figur 6.11 visar flödesvägen, beräknad i PMPATH, för en vattenpartikel i åsen. Varje pilhuvud motsvarar ett tidssteg på ett år. Uppehållstiden mellan Bäsna och Båtsta är ca 20,5 år enligt modellen vilket stämmer väl överens med uppskattningen av transporttiden på några 10-tal år.



Figur 6.11: Flödesvägen för en vattenpartikel i åsen mellan Bäsna och Båtsta. Ett pilhuvud motsvarar ett tidssteg på ett år. Transporttiden är ca 20 år.

Figur 6.12 visar flödet i åsen mellan Båtsta och Övre Tjärna. Uppehållstiden för grundvattnet i modellen är ca 10 månader att jämföra med den uppskattade transporttiden på ca ett år.



Figur 6.12: Flödet i åsen mellan Båtsta och Övre Tjärna. Transporttiden är ca 10 månader.

7 DISKUSSION

Den framtagna modellen har en bra överensstämmelse med observerade grundvattennivåer och flöden. Särskilt i det område som är av störst intresse, åssträckan mellan Bäsna och Övre Tjärna, fungerar modellen bra.

Om man ser generellt på hela modellområdet så kan en del av skillnaderna mellan simulerade och observerade grundvattennivåer förklaras av följande:

- Grundvattenbildningen är satt till ett medelvärde för hela perioden, och för hela modellområdet, utan några säsongsvariationer och utan några lokala variationer.
- Berggrundsytan är okänd i ett stort område av modellen. Uppskattningen av berggrunden är ganska grov och orsakar antagligen fel i modellen. Dessutom har, på en del ställen, den kända berggrunden inte kunnat representeras så verklighetstroget som möjligt på grund av stabilitetsproblem i modellen.
- Modelleringen är gjord under ”steady state”-förhållanden där man försöker få modellen att stämma överens med data från ett fåtal mättillfällen. Faktorer såsom kraftig nederbörd, snösmältning, torka eller hastiga vattennivåändringar i den reglerade älven kan ha stor inverkan på grundvattennivåerna och älvens vattennivå vid mättillfället men är svåra att ta hänsyn till i ”steady state”-modelleringen.
- Data över grundvattennivåer är från olika mättillfällen i olika delar av modellen.

7.1 Bäsna - Tjärna

På sträckan mellan Bäsna och Tjärna fungerar modellen bra. I den jämförelse av modellerade och observerade grundvattennivåer som visas i figur 6.6 är R^2 lika med 0,97 vilket får anses vara ganska bra. De simulerade transporttiderna i PMPATH stämmer också bra med Rytters (1995) utförda beräkningar. Om man ser på pumptestet så är överensstämmelsen inte riktigt lika bra. R^2 är lika med 0,90, se figur 6.6. Det är framför allt den för kraftiga avsänkningen västerut i åsen, se figur 6.4, som inte stämmer så bra med observerade nivåer. Med den kunskap om området som finns i nuläget går det inte att få en bättre överensstämmelse.

Det enkla exemplet i figur 5.10 visar att om den hydrauliska konduktansen är olika i olika delar av älven så får det stor inverkan på modellen. Särskilt förutsättningarna för kalibreringen av de hydrauliska konduktiviteterna i åsen skulle påverkas.

Den klart största osäkerheten för grundvattennivåerna i modellen är den hydrauliska konduktansen i älven men andra faktorer som har, eller kan ha, betydelse är följande:

- Åsgravsjöarnas roll längs åsen är oklar. De antas få sitt vatten från ytavrinning och nederbörd men alla sjöar är inte undersökta. Långsjön har liten inverkan men mindre sjöar, som inte är inkluderade i modellen, kan ha större inverkan. Om exempelvis Hemstjärn, som ligger i nära anslutning till både älven och åsen, har ett större vattenutbyte med älven och åsen skulle det kunna ha viss betydelse för avsänkningen västerut i åsen vid modelleringen av pumptestet i Lennheden. För närvarande finns det inga observationer eller data över Hemstjärn. Hemstjärns läge visas i figur 4.10.
- Samspelet mellan åsen och älven är komplicerat samtidigt som åsens utbredning endast är ungefärligt känd. Särskilt situationen vid Båtsta är speciell där grundvattennivån ligger så mycket som en meter under vattennivån i älven. Då samspelets mekanismer inte är helt klarlagda så är det svårt att simulera de förhållanden som råder.
- Hänsyn har inte tagits i modellen till avrinningen från områdena ovanför högsta kustlinjen ner i dalgången.

7.2 Tjärna - Frostbrunnsdalen

I området från Tjärna till Frostbrunnsdalen stämmer inte modellen särskilt bra, varken i åsen eller utanför åsen. Det är dock inte på det här området som fokus har legat i modelleringen. Den ökande gradienten i åsen vid Rb7103 som följs av en minskande gradient mellan Rb9806 och Rb8306, se figur 6.7, går inte att simulera i modellens nuvarande form. Lustbäcken förbättrar dessutom resultatet utanför åsen en del. Det är tveksamt om funktionen "River" egentligen kan representera ett så litet vattendrag på ett korrekt sätt. Antagligen skulle Streamflow Routing-paketet vara bättre för att beskriva Lustbäcken, och kanske även Norån, men då behöver man ha tillgång till flödesmätningar i bäcken och ån. Som modellen är nu så skulle man kunna ta bort Norån och Lustbäcken men för en eventuell vidareutveckling av modellen kan de vara bra att ha kvar.

Huvudorsakerna till det mindre bra resultatet är:

- Jorden i hela området är väldigt heterogen. Att endast använda en hydraulisk konduktivitet för finsedimenten utanför åsen är en för grov förenkling.
- Åsens utbredning och sammansättning från Övre Tjärna till Frostbrunnsdalen är inte lika väl utforskad som sträckan mellan Bäsna och Övre Tjärna.
- Hela området ovanpå åsen är bebyggt vilket påverkar infiltration och avrinning. Uppgifter om t.ex. dräneringar och utdikningar saknas.

7.3 Hydraulisk konduktivitet

De kalibrerade hydrauliska konduktiviteterna i åsen ligger högre än de konduktiviteter som beräknats utifrån uppgifterna om den hydrauliska kapaciteten. De ligger dock inom intervallet på $10^{-5} - 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$ som anges för subakvatiska rullstensåsar. Dessutom är den uppskattade tvärsnittsarean för åsen på 25000 m^2 ganska stor och används för att få fram ett medelvärde över den hydrauliska kapaciteten i hela det vattenförande lagret i och runt åsen. I modellen är det den tydligt definierbara delen av åsen som har lagts in och dess tvärsnittsarea är inte så stor som 25000 m^2 . Exempelvis är åsens tvärsnittsarea vid Lennheden ca 10000 m^2 . Mellan Rb9204 och Tjärna är åsens tvärsnittsarea i modellen $20000 - 25000 \text{ m}^2$ och det är just den sektionens hydrauliska konduktivitet, 1500 md^{-1} , som ligger närmast den uppskattade hydrauliska konduktiviteten, $1000 - 1200 \text{ md}^{-1}$.

Den kalibrerade hydrauliska konduktiviteten på $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ för älvmyrningssedimenten i den västra delen av modellen stämmer bra överens med det angivna mest sannolika värdet på 10^{-4} ms^{-1} .

Det är svårt att ansätta ett värde på konduktiviteten för finsedimenten i öster. Jorden är alldeles för heterogen för att kunna beskrivas med ett enda värde på konduktiviteten.

8 SLUTSATSER

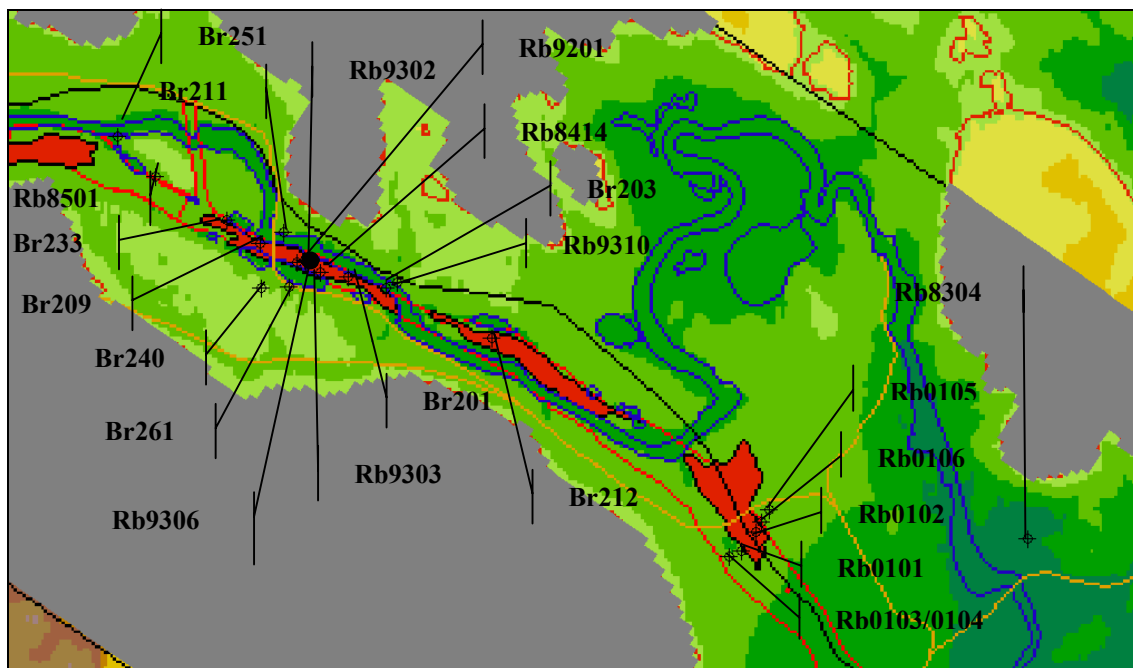
Modellen ger en god bild av grundvattenförhållandena i området mellan Bäsna och Tjärna och kan användas för enklare studier av ämnestransport i åsen. Mellan Bäsna och Båtsta ligger de flesta simulerade grundvattennivåerna i åsen inom 5 cm från uppmätta nivåer med en maximal skillnad på 9 cm. Mellan Båtsta och Tjärna ligger de simulerade grundvattennivåerna inom lägsta och högsta uppmätta nivå. De simulerade transporttiderna för grundvattnet i åsen mellan Bäsna och Tjärna stämmer väl överens med uppskattade tider.

För att utveckla och förbättra modellen krävs, i första hand, en kartläggning av den vertikala hydrauliska konduktiviteten i Dalälven och en utförligare undersökning av åsen och dess intilliggande områden, med fokusering på bestämning av konduktivitetvärden, från Bäsna till Lennheden och från Tjärna till Frostbrunnsdalen. Dessutom, för att få mer data att arbeta med i simuleringsarbetet skulle det vara bra, att dels ha fler observationspunkter i hela undersökningsområdet, och dels att under en längre tid göra kontinuerliga mätningar, exempelvis varje månad, av observationsbrunnar och av vattennivåer i älven.

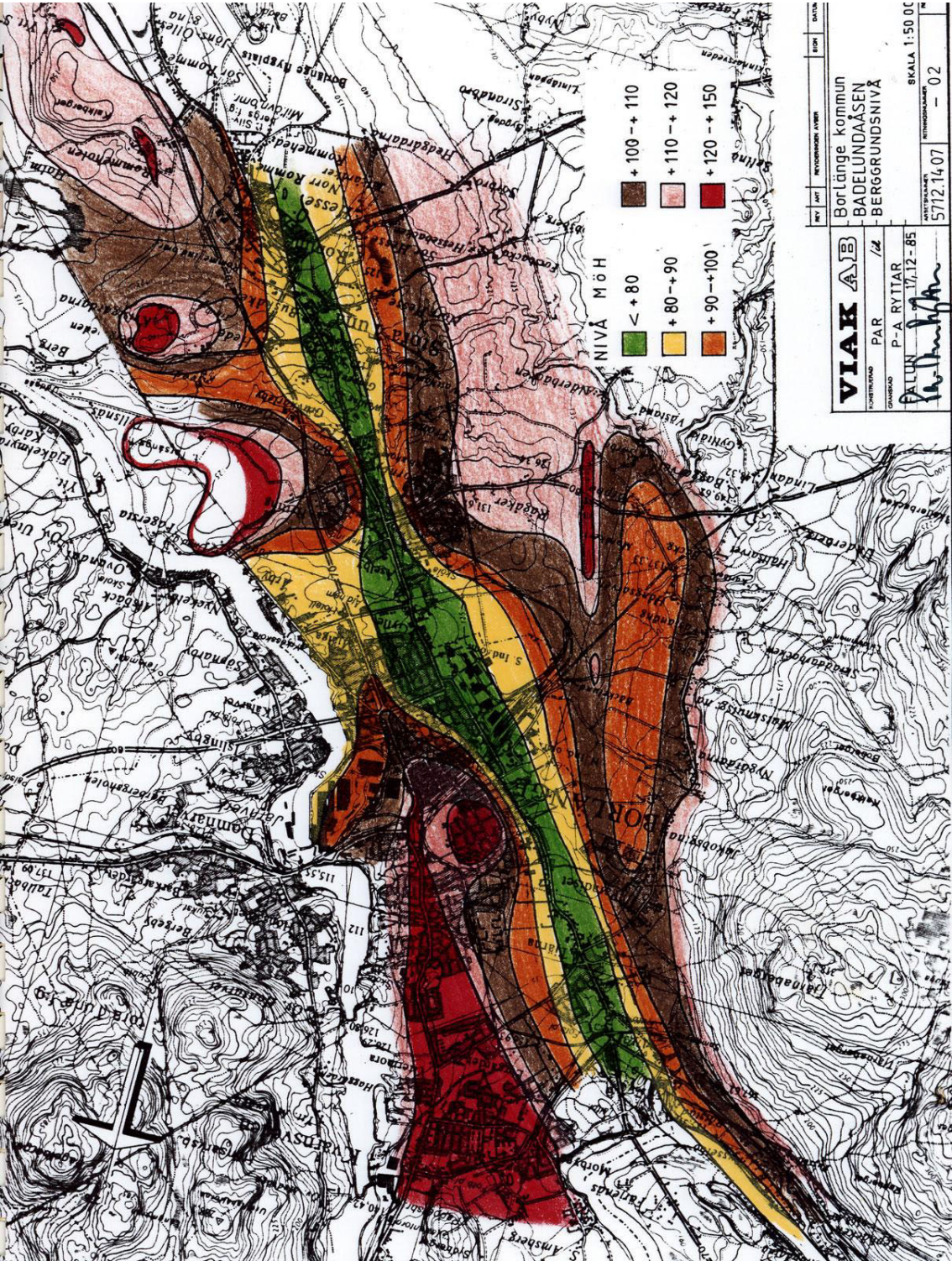
REFERENSER

- Anderson, M.P. och Woessner, W.W., (2002). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, San Diego.
- Calver, A., (2001). Riverbed Permeabilities: Information from pooled data. *Ground Water* 39, no. 4: 546-553.
- Carlsson, L. och Gustafsson, G. (1985) *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*. Statens råd för byggnadsforskning, R41:1984
- Chiang, W.H. och Kinzelbach, W., (1998). *PMPATH 98*. An advective transport model for Processing Modflow and Modflow.
- Chiang, W.H. och Kinzelbach, W., (2001). *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. Springer Verlag, Heidelberg.
- McDonald, M.G. och Harbaugh, A.W., (1988). *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*. Technical report, U.S. Geol. Survey, Reston, VA
- Mercurio, J.W. och Beljin, M.S. och Maynard, J.B.J., (1999). Groundwater models and wellfield management: a case study. *Environ Engg and Policy*, nr. 1, 155-164.
- Nilsson, D., (1987). *Planeringsförutsättningar: Grundvattenförhållanden 1984 – 1987 inom Borlänge tätort*. Borlänge Kommun, Plansektionen. Borlänge.
- Ryttar, P-A. och Gustafson, G., (1983). *Borlänge Kommun: Borlänge Reservvattentäkt*. VIAK AB. Falun.
- Ryttar, P-A., (1995). *Falu Kommun, Lennheden: Hydrogeologisk undersökning*. Grundvattenteknik (GVT). Borlänge.
- Ryttar, P-A., (1999). *Banverket: Utsläpp av HNO₃ på bangården i Borlänge, Sanering av mark och grundvatten*. Grundvattenteknik (GVT). Borlänge.
- Ryttar, P-A., (2002). *Borlänge Energi, Vägverket Region Mitt: Övre Tjärna Grundvattentäkt – RV70, Seismik och rörborrningar 2001*. Midvatten AB. Borlänge.
- Ryttar, P-A., muntligen (2003). Midvatten AB. Borlänge.
- VIAK AB, (1977). *Borlänge Kommun: Grundvattentäkten vid Övre Tjärna – rapport 87.1057*. Falun.
- VIAK AB, (1985) (Berggrundsundersökning, fråga Jonatan om namn)
- Vägverket, (1995). *Yt- och grundvattenskydd*. Publ. 1995:1. Borlänge.
- Vägverket, (1998). *Förorening av vattentäkt vid vägtrafikolycka – hantering av risker med petroleumutsläpp*. Publ. 1998:064. Borlänge.

Bilaga 1: Övriga Observationsbrunnar

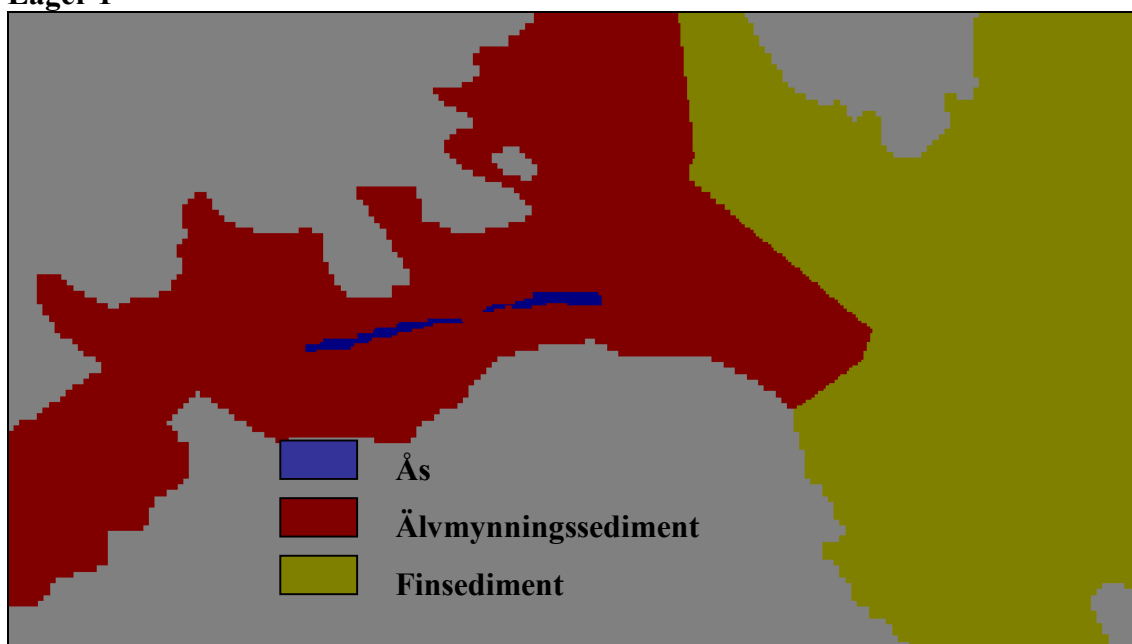


Bilaga 2: Berggrundskarta

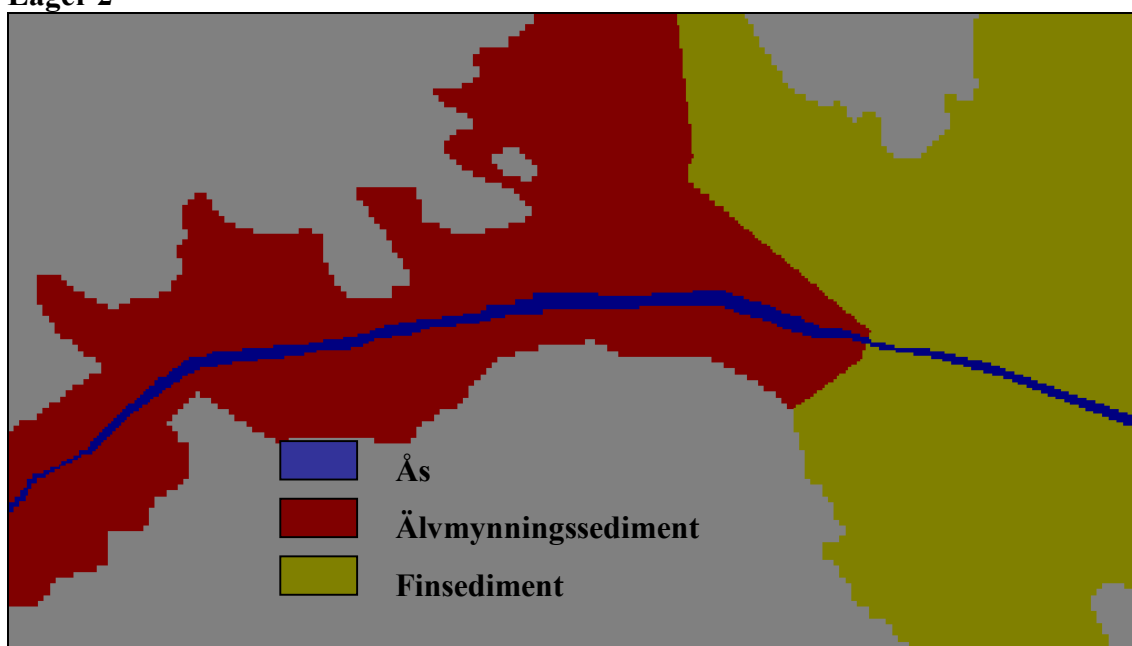


Bilaga 3: Konduktivitetsområden

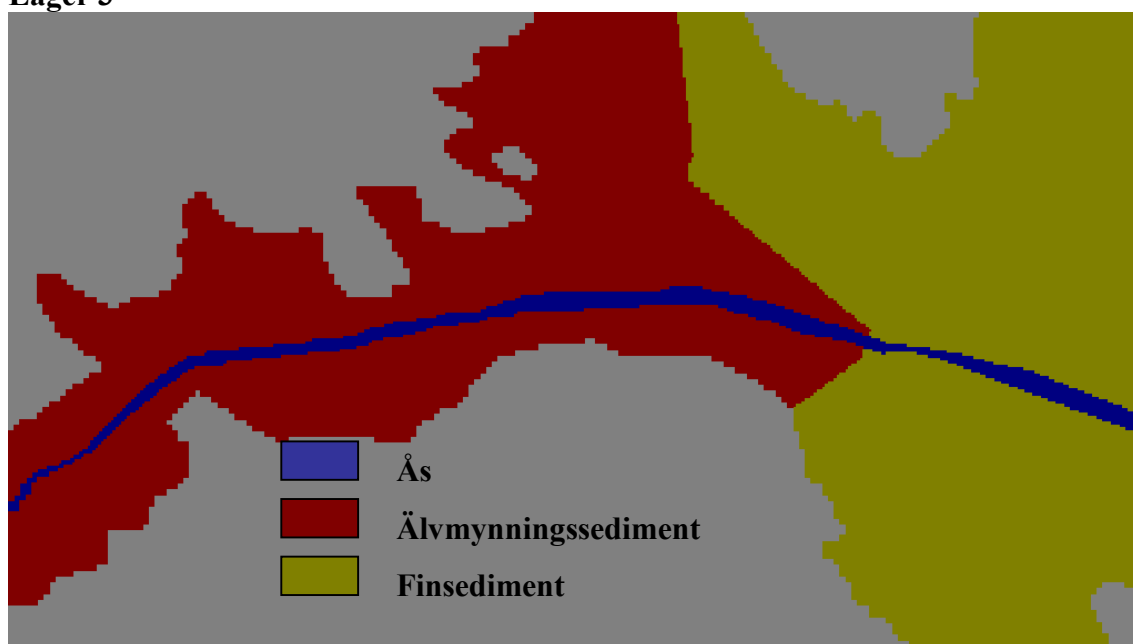
Lager 1



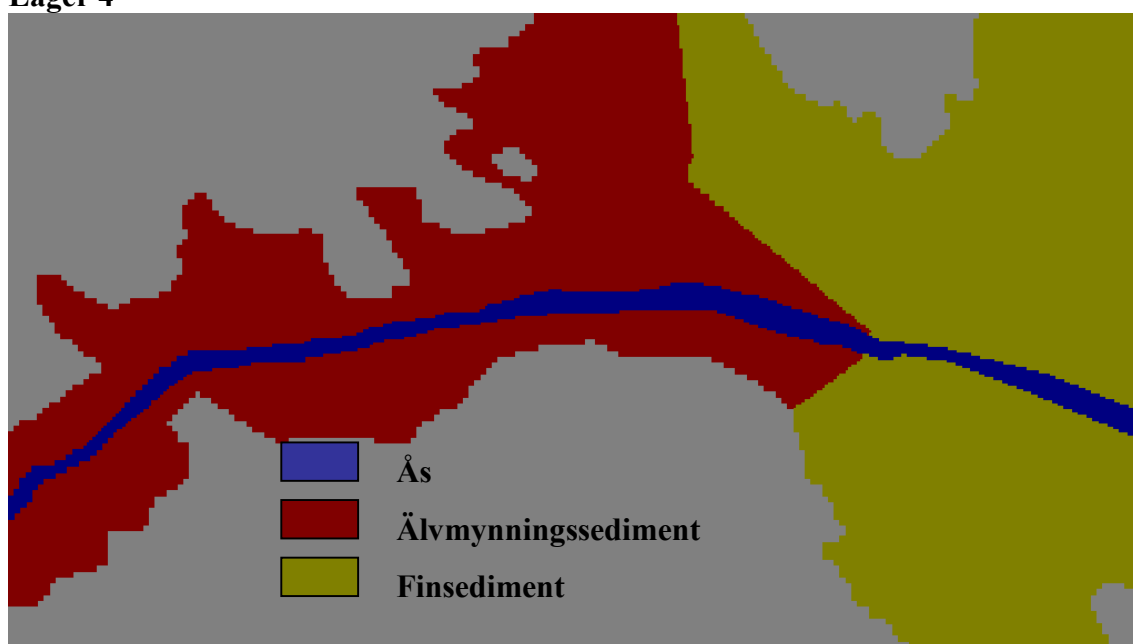
Lager 2



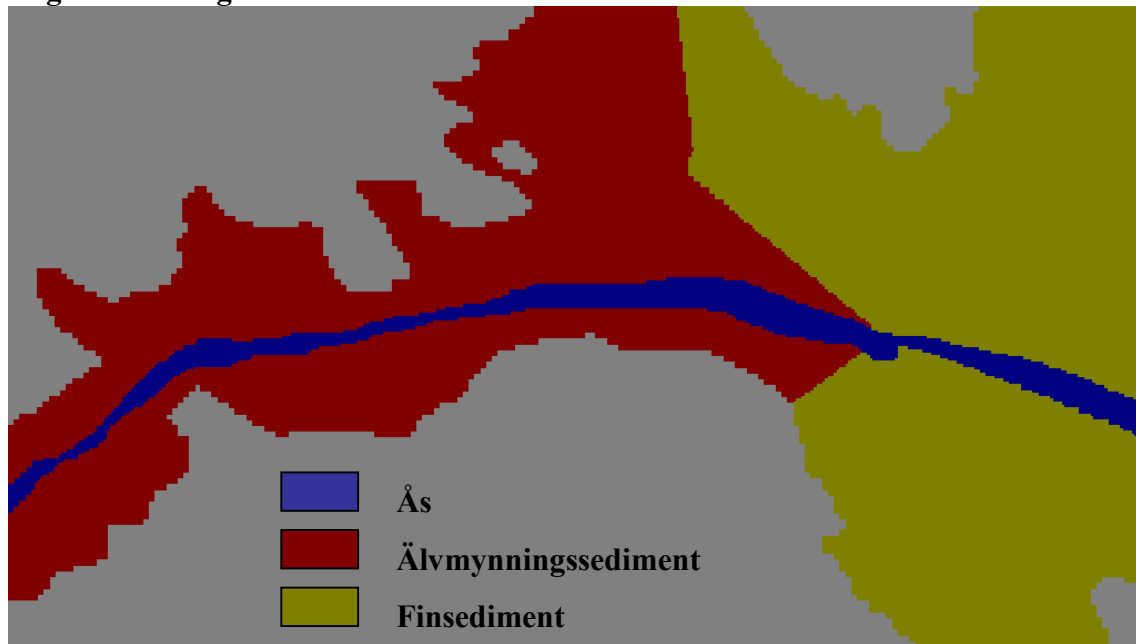
Lager 3



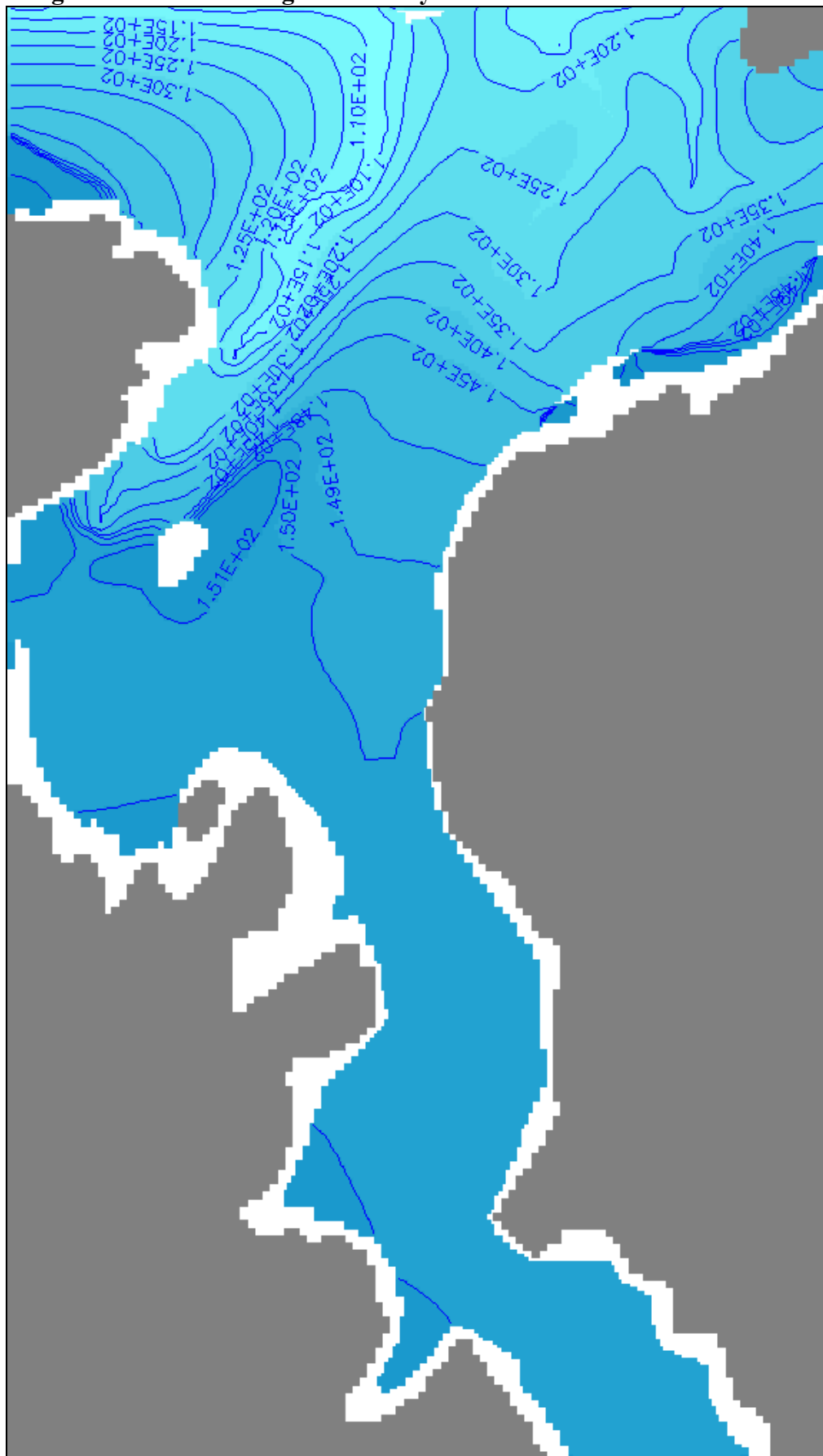
Lager 4



Lager 5 och Lager 6



Simulerad grundvattenyta före pumpstart



A topographic map of the study area, showing elevation contours and the location of the study site (red dot). The map includes labels for various contour lines, such as 1.20E+02, 1.25E+02, 1.30E+02, 1.35E+02, 1.40E+02, 1.45E+02, 1.50E+02, 1.55E+02, 1.60E+02, 1.65E+02, 1.70E+02, 1.75E+02, 1.80E+02, 1.85E+02, 1.90E+02, 1.95E+02, 2.00E+02, 2.05E+02, 2.10E+02, 2.15E+02, 2.20E+02, 2.25E+02, 2.30E+02, 2.35E+02, 2.40E+02, 2.45E+02, 2.50E+02, 2.55E+02, 2.60E+02, 2.65E+02, 2.70E+02, 2.75E+02, 2.80E+02, 2.85E+02, 2.90E+02, 2.95E+02, 3.00E+02, 3.05E+02, 3.10E+02, 3.15E+02, 3.20E+02, 3.25E+02, 3.30E+02, 3.35E+02, 3.40E+02, 3.45E+02, 3.50E+02, 3.55E+02, 3.60E+02, 3.65E+02, 3.70E+02, 3.75E+02, 3.80E+02, 3.85E+02, 3.90E+02, 3.95E+02, 4.00E+02, 4.05E+02, 4.10E+02, 4.15E+02, 4.20E+02, 4.25E+02, 4.30E+02, 4.35E+02, 4.40E+02, 4.45E+02, 4.50E+02, 4.55E+02, 4.60E+02, 4.65E+02, 4.70E+02, 4.75E+02, 4.80E+02, 4.85E+02, 4.90E+02, 4.95E+02, 5.00E+02, 5.05E+02, 5.10E+02, 5.15E+02, 5.20E+02, 5.25E+02, 5.30E+02, 5.35E+02, 5.40E+02, 5.45E+02, 5.50E+02, 5.55E+02, 5.60E+02, 5.65E+02, 5.70E+02, 5.75E+02, 5.80E+02, 5.85E+02, 5.90E+02, 5.95E+02, 6.00E+02, 6.05E+02, 6.10E+02, 6.15E+02, 6.20E+02, 6.25E+02, 6.30E+02, 6.35E+02, 6.40E+02, 6.45E+02, 6.50E+02, 6.55E+02, 6.60E+02, 6.65E+02, 6.70E+02, 6.75E+02, 6.80E+02, 6.85E+02, 6.90E+02, 6.95E+02, 7.00E+02, 7.05E+02, 7.10E+02, 7.15E+02, 7.20E+02, 7.25E+02, 7.30E+02, 7.35E+02, 7.40E+02, 7.45E+02, 7.50E+02, 7.55E+02, 7.60E+02, 7.65E+02, 7.70E+02, 7.75E+02, 7.80E+02, 7.85E+02, 7.90E+02, 7.95E+02, 8.00E+02, 8.05E+02, 8.10E+02, 8.15E+02, 8.20E+02, 8.25E+02, 8.30E+02, 8.35E+02, 8.40E+02, 8.45E+02, 8.50E+02, 8.55E+02, 8.60E+02, 8.65E+02, 8.70E+02, 8.75E+02, 8.80E+02, 8.85E+02, 8.90E+02, 8.95E+02, 9.00E+02, 9.05E+02, 9.10E+02, 9.15E+02, 9.20E+02, 9.25E+02, 9.30E+02, 9.35E+02, 9.40E+02, 9.45E+02, 9.50E+02, 9.55E+02, 9.60E+02, 9.65E+02, 9.70E+02, 9.75E+02, 9.80E+02, 9.85E+02, 9.90E+02, 9.95E+02, 1.00E+03. The map also shows the location of the study site (red dot) and the location of the sampling station (blue dot).

