

Grundvattenmodellering vid en återinfiltrationsanläggning i åsakvifär

Joel Dahné

Referat

Grundvattenmodellering vid en återinfiltrationsanläggning i åsakvifär

Joel Dahné

En ny vattentäkt till Borlänge och eventuellt Falun är planerad i byn Lennheden någon mil väster om Borlänge. Byn Lennheden är belägen på Badelundaåsen vilken här har goda förutsättningar för en större vattentäkt. Anledning till att anlägga en ny vattentäkt är för Borlänges del att den nuvarande huvudtakten är känsligt belägen intill en mycket trafikerad väg, den gamla vattentakten kommer dock fortfarande behållas i drift. Falu kommuns huvudvattentäkt är idag en sjö men man är intresserad av att övergå till en grundvattenbaserad vattenförsörjning. Att Lennheden ska bli ny vattentäkt för Borlänge står redan klart och Falu kommun kommer ta beslut i ärendet under 2008. Vattnet från Lennheden håller god kvalitet men att få ner den redan låga manganhalten är av drifttekniska skäl önskvärt. Midvatten AB, vid vilket detta examensarbetet genomförts, har ålagts uppdraget att undersöka metoder för detta. En av metoderna som studerats är syresättning av grundvattnet genom återinfiltration. Genom syresättning kan mangan fällas ut i oxiderat mangan vilken sedan stannar i marken. För att vattnet som sedan går ut på ledningsnätet ska ha lägre halter av mangan är det viktigt att det återinfiltrerade vattnet når produktionsbrunnarna. Då geologin i brunnsområdet är komplex är strömningsförhållandena i brunnsområdet svåra att utreda.

Syftet med detta examensarbete är att beskriva hur en numerisk, hydrologisk, modell kan skapas med modellprogrammet Visual MODFLOW för att simulera grundvattenflödet mellan återinfiltrationen och produktionsbrunnarna i Lennheden. För detta ändamål har ett flertal olika modeller upprättats i programmet Visual MODFLOW. Dessa modeller har sedan utvärderats vad gäller användbarhet och hur väl de kan representera återinfiltrationen och geologin i området.

Resultatet visar att de hydrauliskt svår genomsläppliga skikt som finns i åsmaterialet under Lennheden bör modelleras i ett beräkningsnät med horisontell lagerföljd. Arbetet visar också på svårigheten med att hitta lämpliga randvillkor för denna typ av finskalig modellering.

Nyckelord: Grundvattenmodellering, återinfiltration, infiltration, hydraulisk konduktivitet, tunna lager, Visual MODFLOW, MODFLOW.

Abstract

Groundwater modeling at a re-infiltration plant in an esker aquifer

Joel Dahné

The cities of Borlänge and Falun are planning a new water plant in Lennheden outside Borlänge. Lennheden is located at the Badelunda esker which here has the right conditions for a larger water plant. The motivation for Borlänge to find a new supply of water is that the present location is close to a major road, therefore the risks for contamination are large. The city is planning to take water from both the old and new water plant in the future. Falun, on the other side, has no main supply of groundwater as today, and are therefore interested in Lennheden. Borlänge has decided to take its future supply of water from Lennheden while Falun will come to a decision in 2008.

The groundwater in Lennheden has good characteristics but to further reduce the presence of manganese in the pumped water can lead to large savings in maintenance of the water pipes. To reduce the manganese in the pumped water the method of infiltration *in situ* has been examined. By fountains in an infiltration pond oxygen levels will rise. This will start the process of manganese oxidation; which will make the manganese immobile. When the infiltrated water reaches the production wells lower levels of manganese will hopefully be observed. For this to happen it is important that the infiltrated water reaches the production wells. The geology beneath the area is complex and so the flow between the infiltration pond and the production wells is difficult to predict.

The aim of this thesis is to describe how a numerical, hydrological, model can be established in Visual MODFLOW to describe the flow between the infiltration pond and the production wells. For this purpose a number of different models has been created and evaluated according to their ability to run and simulate the problem.

The result shows that the thin layers of impermeable silt that are located beneath the area should be simulated in a model with straight model layers rather than of inclined. The thesis also shows the scale problem which rises due to the problem of finding appropriate boundary conditions close to the area of interest.

Keywords: Groundwater modeling, infiltration, hydraulic conductivity, thin layer, Visual MODFLOW, MODFLOW.

Department of Earth Sciences, Uppsala University
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden
ISSN 1401-5765

Förord

Det här examensarbetet omfattande 20 högskolepoäng har genomförts inom programmet Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala Universitet. Vård för examensarbetet har varit Midvatten AB i Borlänge som är det företag som fått uppdraget att göra de nödvändiga förundersökningarna vid vattentäkten i Lennheden.

Ett stort och varmt tack riktas till min handledare Josef Källgården vid företaget, tack även övrig personal och personer på kontoret för trevliga fikapausar. Ett extratack går till Erik Kellner och Per-Arne Rytter för hjälp med examensarbetet.

Vid Universitetet vill jag först och främst tacka min ämnesgranskare Auli Niemi vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet. Jag vill även sända ett stort tack till programledningen för ett brett, innehållsrikt och intressant kursutbud genom hela studietiden.

PO Nordell i Borlänge ges ett stort tack för tillåtelsen att låta mig att reproducera hans figurer i detta examensarbete.

Bland vänner vill jag speciellt tacka Dan Eklund med vars hjälp tentamensperioderna genom utbildningen blivit mer humana, Dan har även varit opponert på detta examensarbete. Malin Eriksson förtjänar också ett tack för de givande diskussioner vi fört angående våra respektive examensarbeten vid Midvatten AB.

Ett sista tack går till mor och far samt min flickvän Linda.

TACK!



Borlänge den 31/5-2007.

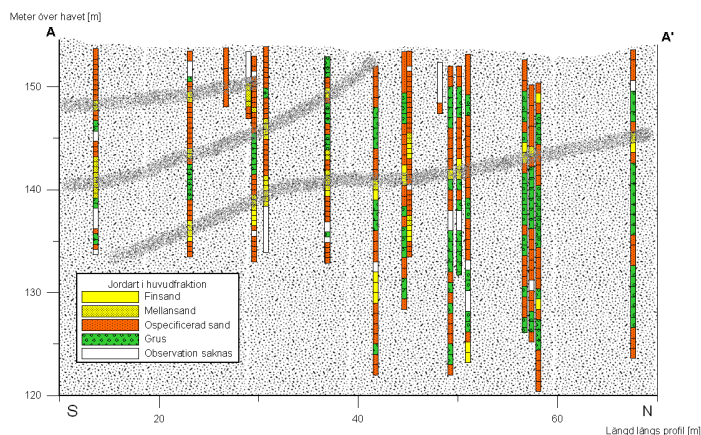
Grundvattenmodellering vid en återinfiltrationsanläggning i åsakvifär -populärvetenskaplig sammanfattning

Någon mil utanför Borlänge planeras en ny vattentäkt för städerna Borlänge och Falun. Platsen för täkten är bestämd och provpumpningar av vattnet pågår. Den nya vattentäkten kommer att ligga på en stor rullstensås strax intill Dalälven där vattenkvaliteten är god och uttagsmöjligheterna stora. Av drifttekniska skäl vill man ändå sänka halterna av mangan i det uppumpade vattnet innan det går ut på ledningsnätet till städerna.

För att få ner manganhalten finns ett antal olika behandlingsmetoder för vattnet. Den metod man provat här är återinfiltration. Att återinfiltrera vattnet innebär att man i en råvattenbrunn pumpar upp vattnet som sedan via en fontän och en infiltrationsbassän får rinna ner i marken igen. När vattnet passerar fontänen och bassängen kommer det att få en ökad halt av syre. Detta syre hjälper bakterier att omvandla manganet från en löst form i vattnet till en fast form som stannar i marken. När sedan vattnet återigen pumpas upp, denna gång i renvattenbrunnen, kommer halten av mangan att ha minskat. För att metoden ska fungera bra krävs att vattnet kan röra sig fritt i marken mellan infiltrationsbassängen och renvattenbrunnen.

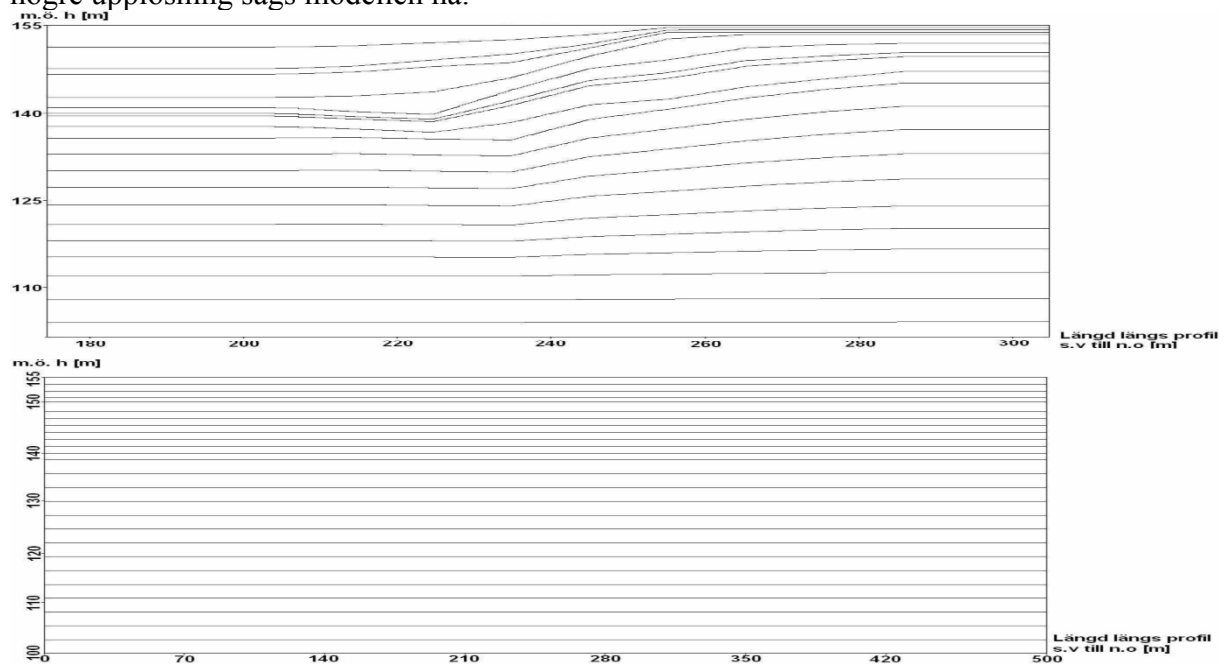
På den bestämda platsen har man byggt upp en infiltrationsanläggning med fontäner och bassänger. Vid grävningar i området har man stött på täta skikt av silt som eventuellt kan hindra flödet mellan infiltrationsbassängerna och renvattenbrunnen. Som en del i studien av återinfiltrationsprojektet har detta examensarbete genomförts för att hitta en metod att med datorprogrammet Visual MODFLOW simulera dessa skikt och flödet av vatten mellan bassängerna och renvattenbrunnen.

Data till modellerna kommer främst från observationsrör i området. Observationsrör är metallrör nedrivna i marken, normalt på djup från ett par upp till 100 meter. I observationsrören kan man sedan mäta grundvattenytans läge. För att få reda på markens genomsläpplighet för vatten finns mätvärden på dessa sedan tidigare framtagna genom s.k. provpumpningar. För få en finare struktur i modellerna så att jordlager med olika konduktivitet kan beskrivas, har data från drivningarna av observationsrör använts. När ett observationsrör drivs ner i marken noteras med jämna mellanrum vilken jordart som kommer upp. Utifrån jordarten kan man sedan sluta sig till om ett visst lager i marken har låg eller hög genomsläpplighet. En profil med sådana jordartsbestämningar har sedan ritats för att dra ihop dessa till lager där varje lager har en och samma genomsläpplighet.



Jordartbestämning från observationsrör samt lagerutsträckning för svårgeomsläppligt material.

I arbetet har fem olika modeller konstruerats. Modellerna skiljer sig åt i hur deras beräkningsnät är uppbyggt. Framförallt skiljer sig modellerna åt i hur modellagren är inlagda, där två varianter av modellager prövats (se figuren nedan). Beräkningsnätet i en simulering är det rutnät i vilket man representerar modellområdet i datorn. Ju finmaskigare rutnät desto högre upplösning sägs modellen ha.



De två varianter av modellager som prövats.

Modellerna har körts med så naturtrogna indata som möjligt. Med data från körningarna har de sedan jämförts med avseende på simuleringstid och stabilitet. Resultatet från körningarna visar att den räta varianten av lagerföljd i modellerna är att föredra, d.v.s. den nedre av bilderna i figuren ovan. Anledningen till detta beror troligen på ett beräkningsfel som lätt uppstår då grundvattenytan i en modell skär ett modellager. I och med den räta lagerföljden kan detta till stor del undvikas genom att modellagren läggs in så att den beräknade grundvattenytan kommer mitt i mellan två av modellagren.

Joel Dahné

1. INLEDNING	1
1.1. BAKGRUND	1
1.2. SYFTE	2
1.3. PLATSBESKRIVNING	3
1.3.1. Geografisk och geologisk beskrivning	3
1.3.2. Hydrologisk beskrivning	5
2. TEORI OCH METODER	6
2.1. GRUNDVATTENSTRÖMNINGSTEORI	6
2.2. MODELLTEORI	7
2.3. PROGRAMVARA, VISUAL MODFLOW	8
2.4. METODER FÖR INSAMLING AV MÄTDATA	9
2.4.1. Drivning av observations- och provtagningsrör.....	9
2.4.2. Mätningar av grundvattenytans nivå	10
2.4.3. Provpumpning	11
2.4.4. Övriga mätmetoder	11
2.5. UTVÄRDERING AV MODELLER	11
3. UTFÖRANDE	12
3.1. KONCEPTUELL MODELL.....	12
3.1.1. Yttre begränsningar.....	12
3.1.2. Geologi inom modellområdet.....	14
3.1.3. Flöden och vattenbalans	16
3.2. FÄLTDATA FÖR KALIBRERING OCH MODELLUPPBYGGNAD	17
3.2.1. Nivåmätningar.....	17
3.2.2. Spårämnesförsök	19
3.3. MODELLUPPBYGGNAD	19
3.3.1. Modeller	19
3.3.2. Modellområdets begränsningar och randvillkor	20
3.3.3. Modellområdets beräkningsnät.....	21
3.3.4. Åsens hydrauliska konduktivitet	27
3.3.5. Täta lager	28
3.3.6. Infiltration	30
4. RESULTAT	32
4.1. MODELLKÖRNINGAR, STABILITET	32
4.2. MODELLKÖRNING, REPRESENTERBARHET	32
4.3. UTVÄRDERING AV MODELLERNA	33
5. DISKUSSION	34
6. REFERENSER	36
6.1. LITTERATURREFERENSER	36
6.2. INTERNETREFERENSER	37
6.3. REFERENSER TILL ÖPUBLICERAT MATERIAL	37

1. INLEDNING

1.1. BAKGRUND

Vattenförsörjningen i Borlänge kommun utgörs till största delen av grundvatten. I dagsläget tas 90 % av det kommunala vattnet från grundvattentäkten strax norr om stadskärnan vid Tjärna vattentäkt. Vattenverket där levererar 16 000 m³ till stadsvattnenätet varje dygn (Borlänge Energi, www, 2007). På grund av det utsatta läget som vattentäkten har strax intill riksväg 70 är en ny vattentäkt planerad i byn Lennheden, någon mil nordväst om Borlänge. När den nya vattentäkten är i drift avser kommunen att använda både Tjärnas och Lennhedens vattentäkt för vattenförsörjning. Även Falu kommun har intresse av att använda Lennheden som vattentäkt. Idag tar Falu kommun ytvatten från Rogsjön ca en mil från staden då ingen lämplig lokal för en grundvattentäkt finns i närheten. Falu kommun ska fatta beslut i frågan under 2008.

Grundvattnet vid den föreslagna platsen vid Lennheden håller god kvalitet samtidigt som uttagsmöjligheterna är mycket goda. Manganhalten i vattnet anses dock vara något hög då detta kan medföra tekniska problem som på sikt höjer driftkostnaderna för ledningsnätet. En av de metoder som undersökts för att sänka halterna av mangan är att återinfiltrera syresatt vatten. Via fontäner i infiltrationsbassänger syresätts uppumpat vatten, se Figur 1.



Figur 1 Uppumpat vatten luftas i fontäner och återinfiltreras, på så sätt syresätts vattnet och mangan kan fällas ut.

Syret i vattnet behövs för att mangan ska oxideras och fällas ut. Vattnet som nu har minskad manganhalt perkolerar sedan ner till grundvattnet. Om inte allt syre redan är förbrukat kommer det infiltrerade vattnet även att syresätta grundvattnet närmast infiltrationsplatsen. Om så sker kan även en oxidation av mangan ske på större djup. Vattnet som sedan tas upp i produktionsbrunnarna har då förhoppningsvis en sänkt halt av mangan och risken för extra belastning på ledningsnätet har därmed minskat. Farhågor finns dock att hydrauliskt svår genomsläppliga siltskikt som vid rördrivningar och grävningar upptäckts inom brunnsområdet kan avleda det infiltrerade vattnet. Effekterna av återinfiltrationen kan då minska eller helt utebli.

1.2. SYFTE

Syftet med detta examensarbete är att beskriva hur en numerisk hydrologisk modell kan skapas med modellprogrammet Visual MODFLOW för att simulera grundvattenflödet mellan återinfiltrationen och produktionsbrunnarna i Lennheden. Arbetet kan ses som en förstudie till en fullt fungerande modell över området. På grund av detta är arbetet främst inriktat på de numeriska aspekterna av modelleringen.

Arbetet sker genom att olika modeller upprättas och deras prestanda (stabilitet och representerbarhet) värderas. Med stabilitet menas här hur noggrant och snabbt en modell löser flödesproblemet (konvergens). Representerbarheten beskriver här hur väl modellen kan återge förhållandena i Lennheden med avseende på återinfiltration och geologi. Syftet anses uppfyllt när en stabil och representativ modell är skapad. En stor del av arbetet har bestått i att analysera och bearbeta data från undersökningsplatsen, framförallt med avseende på grundvattennivåer och inverkan från de ovan nämnda tätare skikten.

De modeller som skapas avser endast att beskriva flödesförhållandena lokalt kring brunnsområdet i Lennheden varför flöden i den mer perifera delen av modellerna inte behöver beskriva de faktiska flödena korrekt. Inte heller bör modellerna användas till att simulera större återinfiltration än vad som prövats på plats. Detta eftersom modellerna inte hanterar omättad strömning utan tillför infiltrerat vatten direkt till grundvattnet.

1.3. PLATSBESKRIVNING

1.3.1. Geografisk och geologisk beskrivning

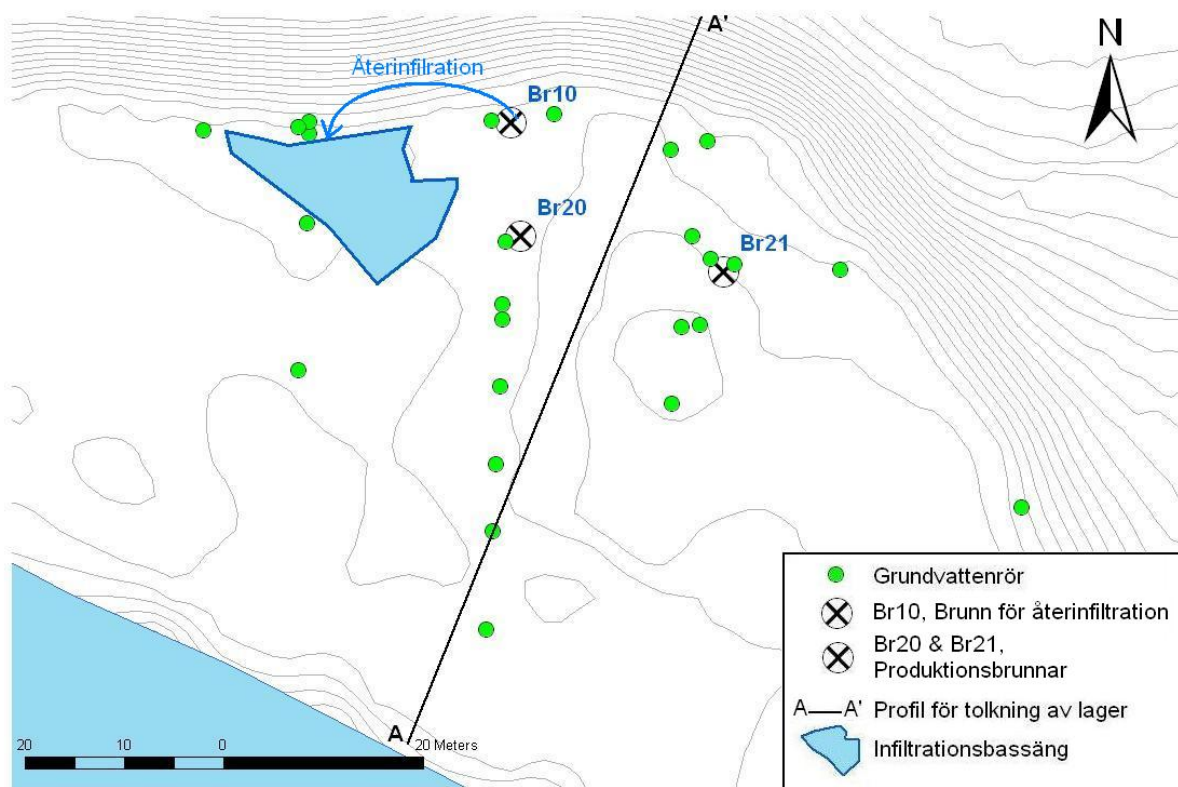
Byn Lennheden är belägen nio kilometer nordväst om Borlänge i södra Dalarna. Byn är belägen på södra sidan av Dalälven som här tätt följer Badelundaåsen på vilken en stor del av bebyggelsen i byn är placerad. Det är bara den övre delen av åsen som reser sig ovanför omgivande landskap. Åsens bredd är väsentligt större i de djupare partierna. Den gröna markeringen i Figur 2 ska tolkas som ”områden där åsmaterial kan påträffas vid borrning” och är således en tolkning av åsens utbredning (Midvatten AB opublicerat, 2007).



Figur 2 Översiktskarta över Lennheden. Det streckade området är en tolkning över åsens utbredning.

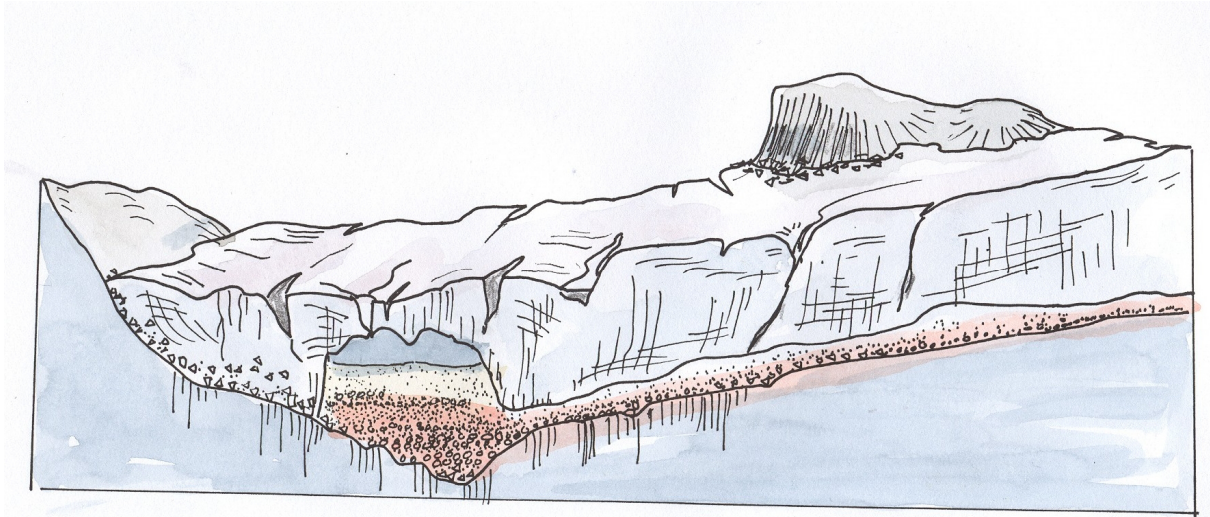
Produktionsbrunnarna vid den planerade vattentäkten i Lennheden ligger i ett avvecklat grustag vilket är utgrävt som en ficka i åsen (se Figur 3). Direkt söder om brunnsområdet ligger sjön Långsjön och på andra sidan åschrönet norrut flyter Dalälven.

I brunnsområdet återfinns de två produktionsbrunnarna Br20 och 21. En råvattenbrunn (Br10) som använts för återinfiltration av vatten i infiltrationsbassängen ligger i den norra delen av området. Ett flertal grundvattenrör finns också inom området, dessa berörs närmare under avsnitt 2.4.1. En profil för visualisering vid tolkning av lagerföljder syns i Figur 3, den berörs under avsnitt 3.3.5.



Figur 3 Översiktskarta över brunnområdet i Lennheden med grundvattenrör, pumpbrunnar, infiltrationsbassäng och en profillinje (A-A') inlagt. Profillinjen har använts för att åskådliggöra lagerföljden i området.

Badelundaåsen bildades i samband med att inlandsisen drog sig tillbaka efter den senaste istiden för omkring 9500 år sedan (Fromm, 1991). En stor isälv med många gånger större vattenföring än nuvarande Dalälvens flöt då fram på platsen och avsatte de grovkorniga sediment som så småningom byggde upp Badelundaåsen. De undre, och mest grovkorniga, lagren i åsen avsattes inuti en istunnel vilken isälven flöt genom i en tidig fas av avsmältningen (Nordell 2007), se Figur 4.



Figur 4 Bilden visar isavsmältningen vid Lennheden i ett tidigt skede. De grova sediment som ligger i botten på Badelundaåsen avsattes i en istunnel. Bilden från Nordell 2007.

Finare material som älven förde ut avsattes ca 1 mil österut där isälven mötte den nuvarande Tunaslätten vilken då fungerade som ett stort sedimentationsbäcken.

1.3.2. Hydrologisk beskrivning

Den hydrologiska bilden i området domineras av två element, Dalälven och Badelundaåsen. Dalälven rinner här med sitt fulla flöde (normalflöde $300-400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) sedan den ca en mil väster om Lennheden har flutit samman från de två vattendragen Österdalälven och Västerdalälven.

Badelundaåsen har genom sin höga genomsläpplighet och sitt stora tillrinningsområde en mycket god potential som vattentäkt då den tillåter stora uttagsvolymmer. Detta utnyttjas och betydelsen av åsen framgår redan i en handling från 1925 där det står skrivet: ”*Denna stora och mäktiga rullstensås utgör vattentäkt för ett flertal samhällen. Förutom ovannämnda köpingarna, Mora Strand och Borlänge, äro följande samhällens vattenverk byggda på utnyttjande av grundvattnet i nämnda ås, nämligen Hedemora, Avesta, Krylbo och Västerås.*”. (Stadsfullmäktiges i Falun Handlingar, 1925) Man insåg alltså tidigt åsens viktiga roll att tillgodose befolkningens vattenbehov. Åsen försörjer i dag nästan hälften av Dalarnas befolkning med dricksvatten (Knutsson G., Morfeldt C-O., 2002). Borlänge kommun, som är en av beställarna bakom undersökningarna i Lennheden, tar redan sitt vatten ur två platser i åsen, Tjärna och Frostbrunnsdalen.

2. TEORI OCH METODER

2.1. GRUNDVATTENSTRÖMNINGSTEORI

Det endimensionella flödet genom ett vattenmättat poröst medium beskrivs av Darcys lag:

$$q = -K \cdot \frac{dh}{d\ell} \quad (1)$$

där:

q är Darcyhastighet $[LT^{-1}]$

K är hydraulisk konduktivitet $[LT^{-1}]$

h är totalpotential $[L]$

ℓ är längd $[L]$

Om ekvation 1 är sann för alla riktningar och materialet i vilket flödet sker är isotropt kan Darcys lag utökas till att gälla även för tredimensionellt flöde. Ekvationen skriven på vektorform blir då:

$$\vec{q} = -K \cdot \nabla h \quad (2)$$

där:

$\vec{q} = [q_x, q_y, q_z]$ är hastigheten i riktningarna x, y, z $[LT^{-1}]$

$\nabla h = \left[\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z} \right]$ är förändringen av totalpotentialen i riktningarna x, y, z $[-]$

Derivatan i ekvation 2 blir nu partiell då $h = h_{(x,y,z)}$, dvs. totalpotentialen är beroende av läget i rummet (Wang och Anderson, 1982).

För att beräkna det volumetriska flödet multipliceras hastigheten (q) med den tvärsnittsarea genom vilken flödet passerar.

$$Q = q \cdot A \quad (3)$$

där:

Q är flöde $[L^3T^{-1}]$

A är tvärsnittsare av flödet $[L^2]$

Genom att införa begreppet specifik magasinskoefficient (specifik storativitet), $S_s [L^{-1}]$ kan ekvation 2 kombineras med kontinuitetsekvationen ($Massa_{in} - Massa_{ut} = \Delta Massa$). Under antagandet att vattnet är icke-kompressibelt ges då strömningsekvationen för mättad strömning (ekvation 4). Den specifika magasinskoefficienten definieras som den volym vatten som lämnar eller tillförs av en akvifär per volymenhet då grundvattnets totalpotential ändras en enhet (Carlsson och Gustafsson, 1984). Ekvationen gäller för flöden i en heterogen, anisotropisk akvifär. Ekvationen kallas allmänt flödesekvationen för tredimensionell strömning.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

där:

S_s är specifik magasinskoefficient [L^{-1}]

t är tiden [T]

För att modellera källor och sänkor i systemet (som t.ex. nederbörd eller uttag av vatten) behövs en term som beskriver dessa i ekvationen. Denna term betecknas här $W_{(x,y,z)}$ med storheten [T^{-1}]. Den beskrivs som den volym vatten uttaget eller tillsatt akvifären under en tidsenhet, ekvationen kan då skrivas

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W_{(x,y,z)} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

där:

$W_{(x,y,z)}$ är källor/sänkor i systemet [T^{-1}]

Ekvation 5 ger tillsammans med randvillkor samt en initial totalpotential en matematisk representation av ett flödessystem. Speciellt gäller för stationära förhållanden att högerledet är noll. Detta medför också att värden på den specifika magasinskoefficienten inte behövs i beräkningarna under sådana förhållanden.

Med en lösning till ekvation 5 menas att man beräknar totalpotentialen (h). Analytiskt är detta möjligt endast för mycket enkla problemställningar. Istället ges ofta problemet en diskret formulering vilken kan lösas med olika numeriska metoder, det är också så programmet Visual MODFLOW arbetar (McDonald och Harbaugh, 1988).

Ett känt specialfall av ekvation 5 gäller då materialet är homogent och isotropt ($K_x = K_y = K_z$). Systemet ska också vara under stationära förhållanden och inga interna källor eller sänkor får existera, ekvation 5 kan då skrivas om som:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

Ekvation 6 kallas Laplaces ekvation och återfinns inom ett flertal fysiska discipliner (Wang och Anderson, 1982).

2.2. MODELLTEORI

Varje modell är en förenkling av den verklighet vilken den är ämnad att beskriva. Men en modell är inte bara en beskrivning utan kan också vara ett verktyg för förståelse och ett underlag för beslutsfattande. En modell som bygger på tillräckligt många observationer av god kvalitet kan tänkas beskriva modellområdet väl och kan i användas för att simulera olika scenarier. Dessa scenarier kan vara en variation av någon parameter och/eller ett försök att förutsäga resultatet av någon förändring (t.ex. annan uttagsvolym, ett ändrat klimat osv.). Om resultatet från modellen är trovärdiga kan man använda modellen som underlag i beslutsfattande. Men även om den insamlade informationen till modellen är bristfällig och resultaten därför mindre trovärdiga kan man ha glädje av att konstruera en modell. Den

kommer då att ge fingervisningar var man bör lägga sina resurser för insamling av nya data (Wang och Anderson, 1982).

Datoriserad, numerisk modellering är idag dominerande vad det gäller simulering av grundvattenflöden i mark, men denna typ av modellering är inte den enda möjliga. Att närma sig lösningen med numeriska metoder är beräkningsmässigt mycket krävande då uppdelning av problemet i mindre beståndsdelar (d.v.s. finita differenser eller finita element) renderar en stor mängd mindre ekvationer att lösa. Innan datorn introducerades på allvar var det en i närmast omöjlig uppgift då tidsåtgången för dessa beräkningar var enorm. Vad man då använde sig av var s.k. analoga modeller eller sandtanksmodeller (Wang och Anderson, 1982). En vanlig typ av analog modell var den elektriska som bygger på likheten mellan Darcys lag (ekvation 1) och Ohms lag. Strömmen i en elektrisk modell blir då analog med grundvattenflödet. En liknande analogi finns också mellan Darcys lag och Fouriers lag för värmetransport (Wang och Anderson, 1982). En annan matematisk metod, förutom den numeriska, är att hitta en analytisk lösning på flödesekvationen (ekvation 5) givet problemställningen. En analytisk lösning ger till skillnad från den numeriska ett exakt svar. Problemet är att en analytisk lösning endast existerar för mycket enkla problem och sällan är något alternativ för mer komplexa (Andersson och Woessner, 2002).

2.3. PROGRAMVARA, VISUAL MODFLOW

I detta examensarbete har programvaran Visual MODFLOW version 4.0 använts för numerisk modellering av grundvattenflöden. Anledningen till valet av detta program är att det är en beprövad programvara som använts både av Uppsala Universitetet och av Midvatten AB tidigare.

Visual MODFLOW är ett modulbaserat modelleringsprogram utvecklat av Waterloo Hydrogeologic Inc. Själva kallar utvecklarna Visual MODFLOW för en modelleringsmiljö för tredimensionella flödes- och transportsimuleringar (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2004). Programmet Visual MODFLOW kan ses som ett hjälpmedel för att förbereda data så att en simulering kan genomföras, programmet innehåller också verktyg som 3-D Explorer och Calibration Plots för presentation och analys av simuleringar. Att programmet är modulbaserat betyder att det till huvudprogrammet finns kopplat en rad delprogram, t.ex. Vmelevation för att importera och interpolera höjddata. Även delprogrammet som utför de numeriska beräkningarna, VM Engine, är en modul i programmet. Via VM Engine kan man nå de numeriska motorerna. Den numeriska motorn avgör hur olika parametrar hanteras. Det finns olika sådana motorer beroende på typen av problem. I Visual MODFLOW finns det tre olika numeriska motorer för lösning av flödesekvationen och sex för transportsimulering. Dessa är:

Tabell 1: Numeriska motorer i Visual MODFLOW.

Flödessimulering	Transportsimulering
MODFLOW-96	MT3Dv1.5
MODFLOW-2000	MT3D96
MODFLOW-SURFACT	MT3DMS
	MT3D99
	RT3D
	RT3D 2.5

En skillnad mellan två numeriska motorer för samma typ av simulering kan vara vilka parametrar som ska anges. T.ex. skiljer sig MODFLOW-96 och MODFLOW 2000 åt bl.a. genom att man i MODFLOW-96 anger transmissiviteten för varje cell medan man i MODFLOW-2000 anger ett konduktivitetsvärde och en tjocklek för varje cell. Matematisk är det dock samma sak då:

$$T = K \cdot b \quad (7)$$

där:

$$\begin{array}{ll} T \text{ är transmissivitet} & [\text{L}^2\text{T}^{-1}] \\ b \text{ är cell- (eller lager)- tjocklek} & [\text{L}] \end{array}$$

Vilka parametrar man föredrar att ange beror delvis på vilken undersökningsmetod man använder. Från exemplet ovan, en provpumpning kan ge värden på transmissiviteten och via en jordartsanalys (t.ex. siktning) kan konduktiviteten skattas.

I detta examensarbete har flödessimulering skett med MODFLOW-2000 som numerisk motor. Koden till MODFLOW är utvecklad av US Geological Survey och är något av en standard inom grundvattenmodellering (Domenico och Schwartz, 1990). I Visual MODFLOW finns ett antal olika så kallade lösningsrutiner (*solver*). Dessa kan sägas vara den matematiska kärnan i programmet och är den programkod som löser differensformuleringen av problemet (beräkningar genom finita differenser). I detta examensarbete har lösningsrutinen WHS använts. En närmare förklaring till denna ges inte här utan läsaren hänvisas till manualen till Visual MODFLOW.

2.4. METODER FÖR INSAMLING AV MÄTDATA

2.4.1. Drivning av observations- och provtagningsrör

Mycket av informationen om geologi och vattenförhållanden i Lennheden som används i detta examensarbete härrör från metodiken med rördrivningar (rörborringar) som Midvatten AB använder sig av. Med en borrhigg drivs ett rör ner i marken till önskat djup. Från ett drivet rör ges främst information om jordarter och grundvattenytans (g.v.y) läge. Midvatten AB använder sig av två olika spetsar vid rördrivningarna beroende på syfte. Om röret främst är tänkt att användas vid observation av grundvattenytan används ofta ett rör perforerat nedersta metern med 8 mm hål och tät spets, ett sådant rör kallas vanligen grundvattenrör eller observationsrör. Om det är jordartsbestämning som är det huvudsakliga syftet med drivningen används ofta ett rör med öppen krysspets utan hålperforering på sidorna. Ett sådant rör kallas för provtagningsrör. På grund av det mycket grova materialet i Lennheden har en del av provtagningsrören också kunnat användas vid nivåobservationer av grundvattenytan. Då information om grundvattenytans läge är av speciell vikt i detta arbete beskrivs dessa mätningar närmare i 2.4.2. Båda typerna av rör refereras till som grundvattenrör.

Områdets hydrauliska parametrar har utvärderats genom kortare provpumpningar som utförts av Midvatten AB under sommaren 2006 samt en längre som utförts 1994-95 (Ryttar, 1995). Under en provpumpning observerar man hur grundvattenytan förändras i observationsrören vid en introducerad störning i akvifären. Denna störning kan antingen vara att man pumpar in vatten i magasinet eller, vilket är det vanligare, pumpar upp vatten. En sådan provpumpning kan bl.a. ge information om transmissiviteten, magasinskoefficienten och magasinets (här

åsens) hydrauliska bredd (Carlsson L., Gustafsson G., 1984). Mer om provpumpning ges i avsnitt 2.4.3.

2.4.2. Mätningar av grundvattenytans nivå

Mätningen av grundvattenytans nivå har skett dels manuellt med ljuslod eller klucklod, dels med automatiska tryckgivare av typen diverlogger från Van Essen Instruments (typ DI245). Den automatiska tryckgivaren ger nivån mellan givaren och vattenytan. Med kännedom om tryckgivarens nivå i grundvattenröret samt grundvattenrörets nivå över havsytan kan grundvattenytans absolutnivå beräknas. När mätningen sker manuellt avläses djupet till grundvattenytan från rörkanten vilken är avvägd tidigare.

Onoggrannhet

Mätningarna av grundvattennivåerna är av särskild vikt i detta examensarbete då de används både till modellens randvillkor och vid kalibrering av konduktiviteten. För att uppskatta onoggrannheten i nivåmätningarna mättes vid ett tillfälle nivåerna i 19 rör både med klucklod och med ljuslod. Förutom en skillnad på 12 cm, som antas var ett avläsningsfel, uppgick den största skillnaden till 15 mm med ett medelvärde på 6 mm. Dessa värden kan ge en fingervisning om onoggrannheten och variationen hos de manuella nivåmätningarna. Rimligt är att onoggrannheten är ännu mindre då de flesta mätningar som använts i detta arbete är utförda av mer erfaret folk. I manualen till ljuslodet (SEBA electric contact meter type KLL) anges en noggrannhet på 1 cm per 100 m kabel. Onoggrannheten hos klucklodet beror dels på hur lodet är monterat på metallmättbandet, dels på i vilken grad metallmättbandet har veckats. Onoggrannheten hos klucklodet kan därför uppgå till någon centimeter. Den automatiska tryckgivarens relativa onoggrannhet ligger på omkring 5 mm (Van Essen Instruments B.V 2003).

En avgörande punkt för uppskattningen av onoggrannheten på nivåmätningarna är avvägningen av grundvattenrörens överdel då de tre ovan nämnda metoderna relaterar till dessa. Ett rör är sedan tidigare höjdbestämt från en fixpunkt i Borlänges höjdsystem och utifrån detta vägde man in de nya rören med ett avvägningsinstrument. Genom att börja mätningen vid det redan bestämda röret och sedan mäta in de nya rören ett efter ett varefter mätningen avslutas med en mätning på det rör där man började kan onoggrannheten i avvägningen uppskattas. Denna typ av mätningsskema kallas för mättåg. Vid en sådan mätning av sju rör i Lennheden var felet någon millimeter.

För examensarbetet är det den relativa onoggrannheten som är av vikt eftersom det är nivåskillnaderna och inte de absoluta nivåerna som är av betydelse för flödesberäkningarna (förenklat termen Δh i Darcys lag, ekvation 1). Vad gäller mätonoggrannheten medför detta att fel inbyggda i själva mätmetoden (exempelvis ett felvisande måttband) inte får något genomslag i modellresultaten så länge alla mätningar i de olika grundvattenrören utförts med samma metod. Det är därför viktigt att i så stor utsträckning som möjligt använda sig av samma utrustning och helst också samma mätpersonal för att minimera den relativa mätonoggrannheten.

De faktorer som är av relevans för den relativa onoggrannheten är avvägningarna av rör (någon mm) samt onoggrannheten i nivåmätningarna (~6 mm). Det gör att den relativa onoggrannheten uppskattas till maximalt 10 mm, detta med antagandet att felet i mätutrustningen är konstant mellan mätningarna.

2.4.3. Provpumpning

En provpumpning innebär en kontrollerad störning av en akvifär. Försöket sker genom att vatten pumpas ur eller injiceras i grundvattenmagasinet med konstant flöde. Störningen kommer att fortplanta sig genom magasinet och denna störning, mätt som skillnad från initial nivå, registreras i grundvattenrör i området tillsammans med tiden för mätningen. Beroende på antaganden om magasinets egenskaper samt om avsänkningens tidsberoende (stationärt eller transient förlopp) anpassas denna mätning till en analytisk lösning av den transienta flödesekvationen i två dimensioner (ekvation 8) för olika antaganden och approximationer (Carlsson L., Gustafsson G., 1984).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

där:

S är magasinskoefficient [-]

Eftersom varken provpumpningarna eller parameterskattning från dessa ingår i detta examensarbete ges endast denna överskådliga redogörelse för metodiken.

Under sommaren 2006 utfördes en serie kortare provpumpningar i Lennheden, vilka utvärderades med avseende på brunnsområdet. Detta medförde att de skattade parametrarna inte representerar modellområdet i sin helhet. Resultatet från dessa provpumpningar kommer att redovisas senare vid en projektsammanställning över Lennheden av Midvatten AB. En årslång provpumpning har också utförts i Lennheden mellan 1994 och -95. Utvärderingen och skattningen av parametrar från denna representerar bättre området i stort (Ryttar, 1995). I detta examensarbete används resultat både från de kortare och från den längre provpumpningen. Ytterliggare en längre provpumpning pågår vid tiden för skrivandet, våren 2007, men kommer inte avslutas inom tidsramen för detta arbete.

2.4.4. Övriga mätmetoder

Förutom ovan nämnda metoder har seismiska undersökningar och undersökningar med georadar använts i området. Data från dessa har varit svårtolkade och endast använts i mindre utsträckning här.

2.5. UTVÄRDERING AV MODELLER

De olika modellerna utvärderades med avseende på deras prestanda så som den definieras i syftet (avsnitt 1.2), nämligen stabilitet och representerbarhet. De värden på dessa faktorer som ansågs acceptabla redovisas i Tabell 2. Som ett mått på stabilitet utsågs körtid och diskrepans. Körtiden säger något om hur svårt det är för den numeriska motorn att lösa problemet. Diskrepansen är ett mått på hur väl problemet är löst numeriskt och uttrycks som ett förhållande mellan in- och utflöden i modellen. I ekvation 9 visas uttrycket för diskrepansen, ofta anges denna i procent.

$$\text{Diskrepans} = \frac{Q_{in} - Q_{ut}}{Q_{in}} \quad (9)$$

där:

Q_{in} är flöde in i modellen [L³]

Q_{ut} är flöde ut ur modellen [L³]

Då all simulering skett under stationära förhållande ska absolutbeloppet av denna term (ekvation 9) vara så liten som möjlig, se avsnitt 2.1.

För att mäta hur väl modellen kunde simulera återinfiltrationen och de tätare skikten undersöktes vilka värden på dessa som gick att ansätta. Värdet på flödet i återinfiltration som gjordes i fältförsöken i Lennheden varierade i de olika försöken, värden på mellan 40 och 100 $l \cdot s^{-1}$ förekom (Midvatten AB opubicerat, 2007). I detta arbete har det lägre av dessa värden fått representera återinfiltrationen. Vad gäller skillnad i konduktivitet mellan de tätare skikten och omgivande material är det sannolikt att de sanna värdena varierar mycket men att kvoten mellan dem är hög. Ett värde på kvoten på några tiotal till flera tusen är troligt (Knutsson och Morfeldt, 2002). Här har det lägre värdet på några tiotal gånger antagits tillräckligt för att effekten av ett tätare skikt ska framgå.

Tabell 2 Tabell över gränser för utvärdering prestanda.

Parameter	Acceptabel gräns	Motivering
Diskrepans	1 %	Litteraturuppgift ¹
Körtid	”någon minut”	Egen uppskattning
K_{kvot}	”flera tiotal gånger”	Ger effekt av tätare skikt
Återinfiltration	40 $l \cdot s^{-1}$	Verklig infiltration

¹-Andersson och Woessner, 2002

3. UTFÖRANDE

I detta kapitel behandlas utförandet av examensarbetet. Kapitlet börjar med en beskrivning av hur den konceptuella modellen för området har upprättats (avsnitt 3.1). På detta följer ett avsnitt där det förklaras hur tidigare insamlade fältdata har bearbetats och behandlas (avsnitt 3.2). I det sista avsnittet (avsnitt 3.3) beskrivs modellens uppbyggnad och hur fältdata har implementerats.

3.1. KONCEPTUELL MODELL

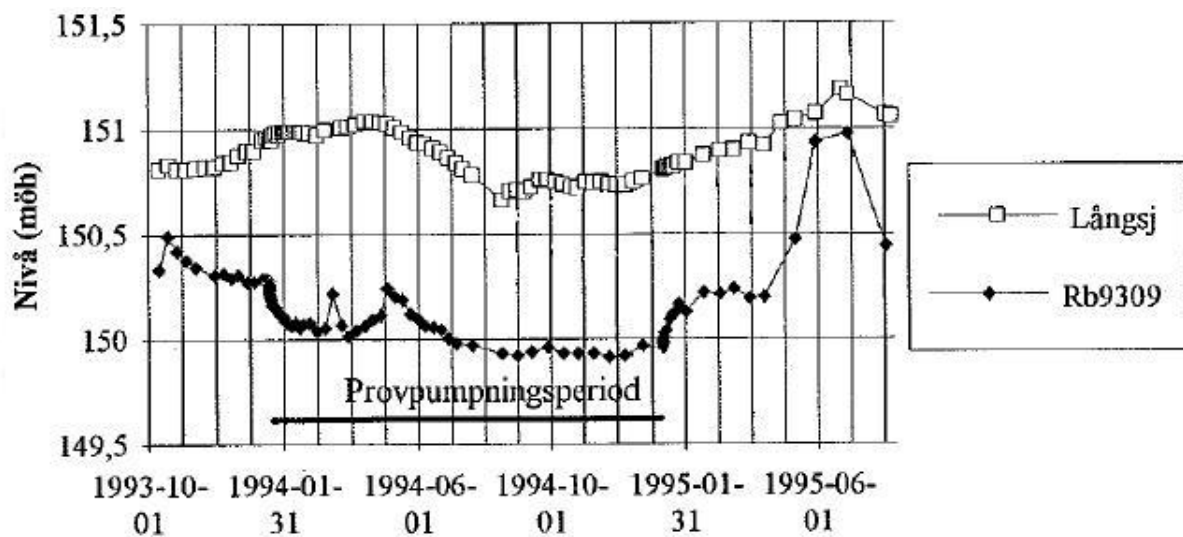
En konceptuell modell (ibland kallad begreppsmodell) är en översiktlig och generaliserad beskrivning av områdets beskaffenhet med avseende på geologi, vattenbalans samt hur flödena i området sker i grova drag. I den konceptuella modellen definieras också de yttre begränsningarna av modellen. En sådan modell är en nödvändig förstudie för upprättandet av en matematisk modell (Knutsson och Morfeldt, 2002). Utformningen av den matematiska modellens begränsningar och beräkningsnätets upplösning bestäms sedan med stöd från den konceptuella modellen (Andersson och Woessner, 2002). Följande stycken beskriver den generalisering och de antaganden som gjorts av området inom detta examensarbete.

3.1.1. Yttre begränsningar

För en matematisk, hydraulisk, modell behöver modellområdets begränsningar utgöras av fysiska eller hydrauliska gränser. En fysisk gräns kan utgöras av impermeabelt berg medan en hydraulisk gräns kan utgöras av en grundvattendelare (Andersson och Woessner, 2002). I båda dessa exempel ger gränserna samma villkor, nämligen det att flödet genom gränsen är noll.

Området är beläget på en ås och åsens sidor antas i detta arbete vara hydrauliskt täta. Med antagandet om täta sidor kan akvifären beskrivas med en kanalmodell (Ryttar, 1995), se också avsnitt 3.3.2. I en kanalmodell kan flödet antas linjärt och parallellt med åsens sidor tillräckligt långt från pumpbrunnen (Carlsson och Gustafsson, 1984). Dessa två antaganden ger begränsningar av utsträckningen av den konceptuella modellen. Antagandena ger också upphov till villkor vilka gäller för den matematiska modellens ränder, dessa beskrivs mer ingående i avsnitt 3.3.2.

En kontrollberäkning på läkagetermen utfördes för att verifiera antagandet om kanalflöde med försumbart inläckage inom modellområdet. Läckagetermen avser inläckage till akvifären från sprickor i berggrunden eller, vilket är troligast här, genom infiltration från ytvatten vilka är avgränsade mot akvifären genom ett svårgenomsläppligt skikt. Så är fallet med både Långsjön och Dalälven. Om något inläckage sker kommer det troligen från älven då ingen variation i Långsjöns vattenyta kan särskiljas till följd provpumpningar (Ryttar, 1995), se Figur 5.



Figur 5 Nivåmätningar visar att vattennivån i Långsjön inte står i direkt samband med akvifären (omgjord från Ryttar, 1995). Extra tydligt syns det i början av provpumpningsperioden där Rb9309 sänks av kraftigt medan Långsjöns nivå ökar.

Genom utvärderingen av provpumpningarna (Midvatten AB opublicerat, 2007, Ryttar, 1995) erhöles en skattning av läckagekoefficienten på omkring $4,5 \cdot 10^{-7} s^{-1}$. Detta läckage antas alltså här komma från Dalälven. Läckagekoefficienten är ett medelvärde baserat på flera observationer. För beräkningarna behövs också älvens nivå över grundvattennivån samt arean för läckaget. Nivåskillnaden mellan älven och grundvattnet inom modellområdet är omkring 0,5 m (Midvatten AB opublicerat, 2007). Arealen för inläckaget fås genom att multiplicera modellens längd (750m) med älvens bredd (~100m). Ekvation (1) och (3) kan tillsammans beskriva inläckaget som:

$$Q_l = \frac{K'}{b'}(h_{älv} - h_{akv}) \cdot A_l \quad (10)$$

där:

Q_l	är läckaget	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$\frac{K'}{b'}$	är läckagekoefficienten (K' är den vertikala konduktiviteten och b' tjockleken på det tätande skiktet)	$[T^{-1}]$
$(h_{älv} - h_{akv})$	är skillnaden i älvens nivå och akvifärens grundvattenyta	$[L]$
A_l	är arean genom vilket inläckaget sker	$[L^2]$

Med ekvation 10 beräknades det inläckande vattnet inom modellområdet till $13,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, det utgör därmed maximalt 4 % av det totala uttaget. Med den relativt låga siffran förmodas antagandet om hydrauliskt täta sidor vara rimligt.

Den underliggande berggrunden anses plan och hydrauliskt tät. Motiveringen till detta är de mycket stora skillnader mellan den hydrauliska konduktiviteten i åsmaterialet och berget som kan förväntas. Detta medför att merparten av flödet kommer ske i åsmaterialet och flödet mellan berg och ås kan försummas. Berggrunden antas vidare vara plan, detta för att berggrundens topografi förmodas ha liten inverkan på flödet lokalt kring brunnsområdet.

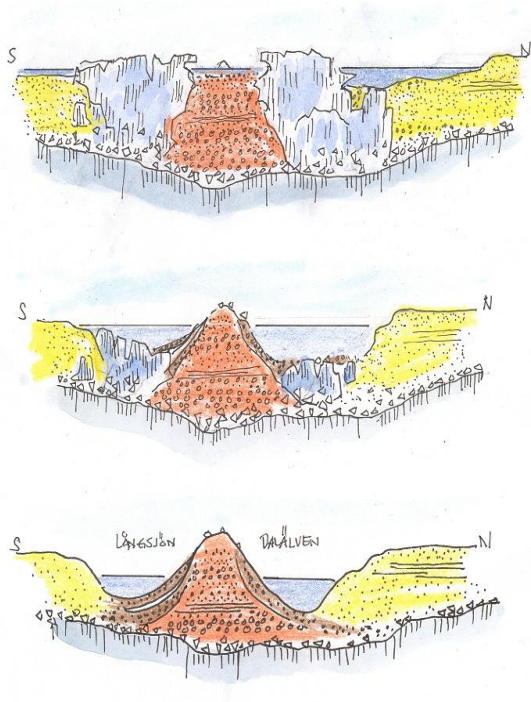
Vid utvärderingar av provpumpningarna har Midvatten AB använt sig av 50 meters mäktighet på akvifären (Midvatten AB opublicerat, 2007) detta värde har även använts här för att bestämma berggrundens läge vilken är satt till 100 m ö.h. Det finns få data att tillgå vid bestämningen av berggrundens djup under åsen, ett grundvattenrör är dock neddrivet till 50 meters djup utan att stöta på berggrund. Värdet är alltså det minsta tänkbara på akvifärens mäktighet.

Markytans topografi i området beskrivs som helt plan. Detta beror på att modellen endast simulerar strömning i mättad zon och marklager ovanför grundvattenytan skulle endast utgöras av inaktiverade celler i den matematiska modellen och därmed inte påverka modellresultatet. Nivån för det översta lagret är satt till 155 m ö.h., gott och väl över grundvattenytan som ligger runt 149 m ö.h.

3.1.2. Geologi inom modellområdet

Information om områdets geologi har inhämtats främst från rördrivningar, men också från kunskaper om åsar i stort och deras bildningssätt. Hela modellområdet utgörs av åsmaterial med en genomsnittlig hög hydraulisk konduktivitet. Åsen antas ha en kärna av mycket grovt material med en hydraulisk konduktivitet högre än den genomsnittliga, se Figur 4. Konduktiviteten anses vara horisontellt isotrop ($K_x = K_y$) medan den i vertikalled antas vara anisotrop ($K_x, K_y \neq K_z$). Åskärnan antas ligga direkt på berggrunden. Antagandena om åskärnan bygger på PO Nordells teorier om åsbildningen vid Lennheden (Nordell, 2007) som stöds av geologiska och hydrologiska s.k. förväntningsmodeller (Knutsson och Morfeldt, 2002). I brist på mätningar som mer exakt beskriver åskärnans form antogs den ha ett likformigt tvärsnitt längs med hela åsen. Inom brunnsområdet finns sluttande lager som är hydrauliskt mycket täta relativt omgivande åsmaterial, dessa beskrivs närmare i avsnitt 3.3.5. En teori för hur de bildats har framlagts av PO Nordell. Ett utdrag om åsens bildningssätt ur

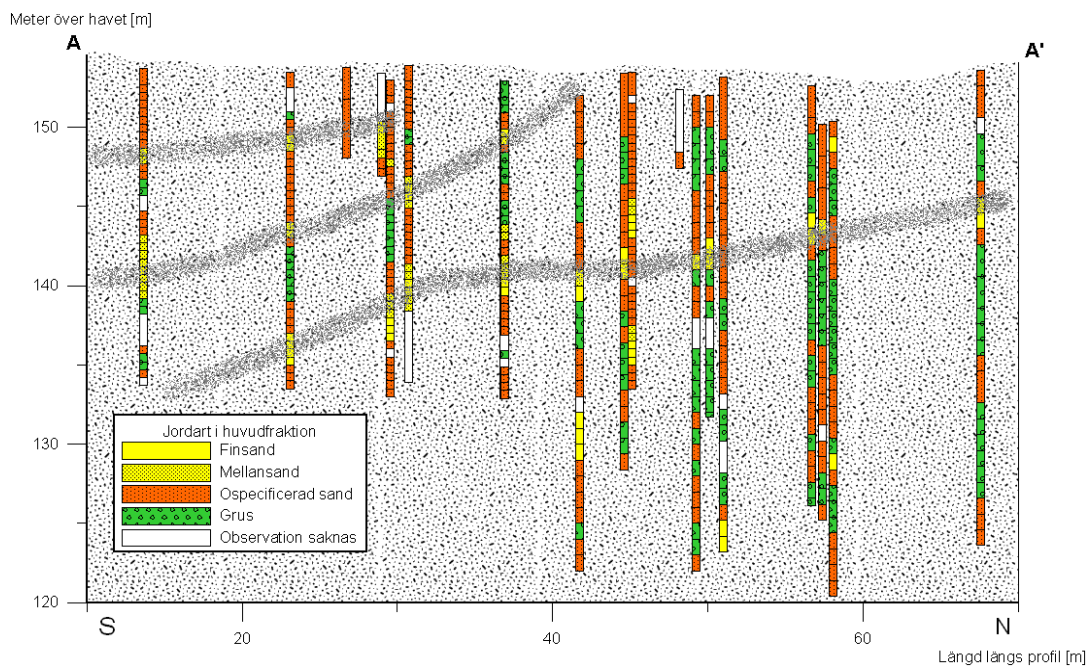
Nordells rapport följer nedan, se Figur 6. (Nordell, 2007, sid.21).



Figur 6 Bildningsförloppet för de täta lagren som återfinns under brunnsplatsen i Lennheden, enligt PO Nordell (Nordell, 2007).

”1. Glaciärtunnelns bottensediment bestående av avlagringar av olika grovlek ligger kvar in situ sedan transporten avstannat och hålls uppe av sidornas dödis. Huvuddelen av dalens smältvattendränning passerar norr om detta och skär sig in i släntens finsediment.
2. Fortsatt landhöjning. Vattennivåerna sänks. Dödisens översta delar har försvunnit. Åsmaterial har rasat ut åt sidorna. I det mer lugna vattnet söder om åsen avsätts slam på rasmaterialet. Ytterligare skredmaterial glider ned och täcker mjälalagret. Även rasmaterialet på åsens norra sida utsätts för både erosion och skred.
3. Landhöjning. Avtagande vattenföring norr om åsen övergår till dagens situation, där djuphålan på älvens botten vittnar om dödisrester liksom Långsjöns sänka söder därom.”

I en jordartsprofil över brunnsområdet kan man ana sig till tätare skikt vilka är markerade i Figur 7. I figuren redovisas endast bestämningen av jordartens huvudfraktion (se avsnitt 2.4.1). Hur profilen A-A' är dragen finns beskrivet i Figur 3 över brunnsområde.



Figur 7 Huvudfraktionen av jordarterna som påträffades vid rördrivningar inom brunnsområdet i Lennheden. Man kan ana sig till en skiktning vilken är markerade.

För att undersöka kvalitén hos Midvatten AB:s borrhdata utfördes en jämförelse mellan Midvatten AB:s i fält bestämda jordfraktioner och ett antal prover bestämda genom siktning i laboratorium. Jordartsprover var i 122 fall både analyserad i fält och genom siktning i laboratorium. Alla prover som jämfördes var hämtade från provtagningsrör i Lennheden. I 39 % av fallen stämde både jordartstillägget och huvudfraktionen överens mellan de i fält och de genom siktning bestämda jordarterna. I de flesta av de fall då tillägget inte stämde överens mellan analysmetoderna beror det på att Midvatten AB använder flera klasser i varje tillägg medan det från siktningen endast används en klass. Då enbart huvudfraktionen jämfördes stämde analyserna överens i 82 % av fallen. Jämförelsen ansågs visa på en hög grad av överensstämmande varför de i fält bestämda jordarterna genomgående användes i detta arbete.

3.1.3. Flöden och vattenbalans

Grundvatten antas strömma in i den konceptuella modellen genom åsens tvärsnitt (i öster och i väster). Två produktionsbrunnar (Br20 och Br21) finns i området, de pumpar vatten ut ur akvifären i Lennheden och bildar i modellen en sänka. Dessa är de enda nettoflödena in och ut ur modellen. Till återinfiltration som sker i området (se 1.1 Bakgrund) hör en pumpbrunn (Br10) samt infiltrationsbassänger (se Figur 3). Infiltrationen sker genom grävda bassänger på vilket vattnet från råvattenbrunnen (Br10) påförs. Inget vatten tänks lämna systemet genom evapotranspiration eller andra tänkbara sänkor.

Nederbörd inom området försummas då det antas att denna inte utgör en betydande del av det uppumpade vattnet och därför inte anses påverka strömningsförhållandena. Dalälvens och Långsjöns bottnar anses båda vara hydrauliskt helt täta. Grundat på detta antagande utesluts Dalälven och Långsjön ur den konceptuella modellen, se avsnitt 3.1.1.

För att bekräfta antagandet att nederbörden inte påverkar grundvattenflödena inom modellområdet utfördes en beräkning på hur stor del den infiltrerade nederbörden kan utgöra av det utpumpade vattnet. Inga mätningar har gjorts på hur stor del av nederbörden som bidrar till grundvattenbildningen. För beräkningen antogs därför att all nederbörd (100 %) bidrog till nybildandet av grundvatten. Medelårsnederbörden i området är 617 mm (Ryttar, 1995). Då modellområdets area är $3,75 \cdot 10^5 \text{ m}^2$ uppgår den infiltrerade volymen till $2,3 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{år}^{-1}$.

De två produktionspumparna i Lennheden ger tillsammans ett nettouttag av $352 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, ($1,1 \cdot 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{år}^{-1}$). Kvoten av de två årsvolymerna ger att det genom nederbörd infiltrerade vattnet i området maximalt kan utgöra 2 % av det uppumpade vattnet. Denna låga siffra anses styrka antagandet om att nederbörden över modellområdet kan försummas.

Sammanfattning av antaganden gjorda för den konceptuella modellen redovisas i Tabell 3 nedan. En förklarande bild av in- och utflöden till modellen ges i Figur 8.

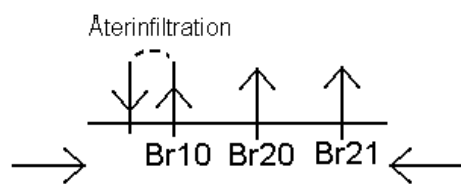
Tabell 3 Antaganden och randvillkor

Antagande/randvillkor	Antagandet grundat på
Hydrauliskt täta åssidor	Utvärdering av provpumpning ¹
Linjärt flöde långt från brunnområdet	Litteraturuppgift ²
Åskärna med hög konduktivitet	Litteraturuppgift ³
Åskärnan belägen på bergrund	Litteraturuppgift ³
Plan bergrund	Brist på data / förmodad liten betydelse
Akvifärens djup	Borrdata, tolkning av minsta djup
Mättade strömningsförhållanden	Endast tillgång till programvara för mättad strömning
Ingen nederbörd	För låg nederbörd för att inverka på flödesförhållandena

¹ - Rytta, 1995

² - Carlsson och Gustafsson, 1984

³ - Knutsson och Morfeldt, 2002



Figur 8 Principskiss för vattenflödena in och ut i den konceptuella modellen. Skissen beskriver ett tvärsnitt av modellen i riktning längs med åsen.

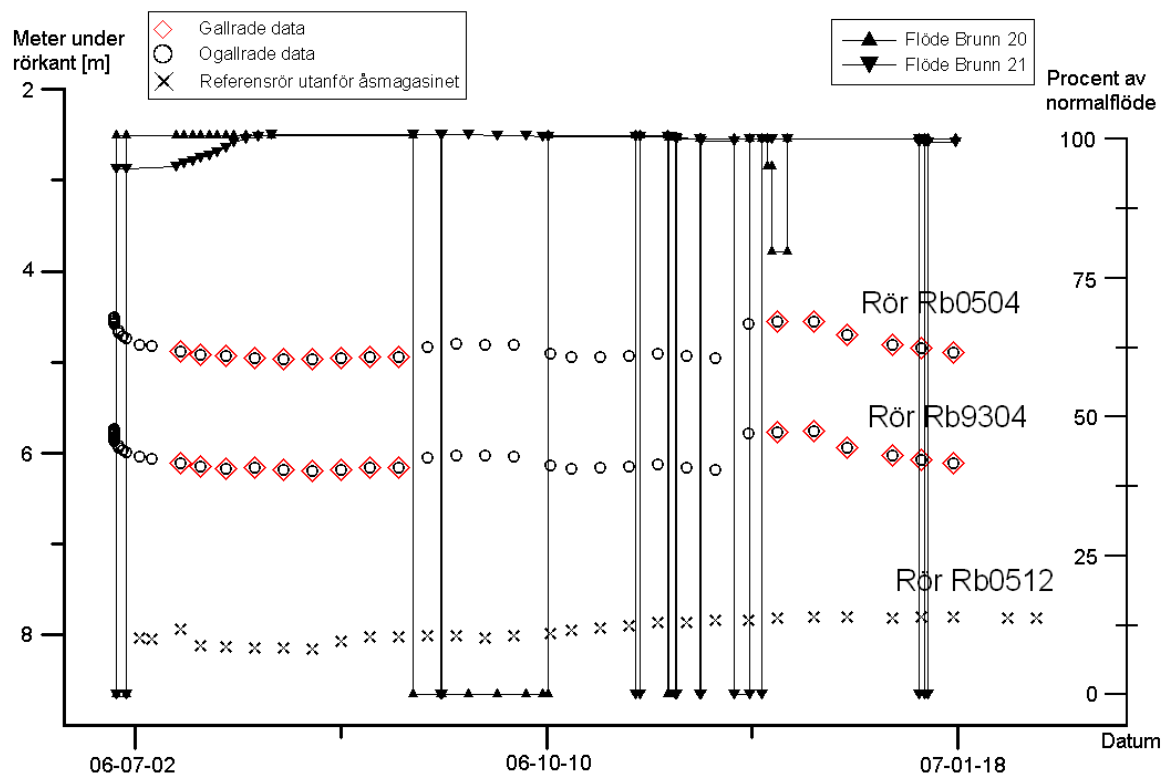
3.2. FÄLTDATA FÖR KALIBRERING OCH MODELLUPPBYGGNAD

3.2.1. Nivåmätningar

De mätningar som beskrivs under avsnitt 2.4.2 finns lagrade hos Midvatten AB i en databas. Grundvattennivåerna ändras över tiden men i modellkalibreringen behöver de beskriva ett stationärt tillstånd. Därför bildades medelvärden över nivåerna för varje grundvattenrör. Varje medelvärde bygger på flera observationer under en längre tid. En positiv sidoeffekt av medelvärdesbildningen är att eventuella fel (vilka lätt uppstår vid manuella mätningar) inte får lika kraftigt genomslag. Två tidsperioder sorterades ut från databasen. Den första tidsperioden representerade området utan infiltration och den andra perioden med infiltration.

Den första tidsperioden som sträckte sig från 7 juli 2006 till 29 januari 2007 var den period som representerade grundvattennivåerna utan infiltration. Flera pumpstopp inträffade under perioden. De observationer som sammanföll med ett pumpstopp gallrades bort. Likaså tilläts en återhämtningstid efter pumpstoppen inom vilken observationer ignorerades. Denna återhämtningstid återspeglar tiden det tar för grundvattennivån att stabilisera sig igen efter ett pumpstopp. Längden på återhämtningstiden sattes lika med pumpstoppets längd (Carlsson och Gustafsson, 1984). Med pumpstopp avsågs perioder då någon av de två produktionsbrunnarna (Br20, Br21) pumpades med mindre än 90 % av sin kapacitet i minst fyra timmar. Efter gallring fanns det mellan sju och arton observationer för vardera rör, i de flesta rör fanns sjutton observationer, se Figur 9. Referensröret som är inlagt i figuren står i ett litet grundvattenmagasin avskilt från åsakvifären. Detta rör påverkas nästan uteslutande av

nederbörd och syftar här till att visa på de naturliga fluktuationerna. De gallrade och ogallrade nivåvärdena för observationsrören ska läsas mot den vänstra axeln medan uttaget flöde ur Brunn 20 och 21 ska läsas mot den högra i figuren.



Figur 9 Nivåmätningar för tre grundvattenrör under perioden då ingen återinfiltration skedde. Ogallrade data representerar alla mätvärden under perioden medan de gallrade utgör de data som inkluderades i medelvärdet för perioden.

Den andra tidsperioden, tiden då infiltrationsförsöket pågick, sträckte sig från 3 februari 2007 till 22 februari 2007. Perioden innehöll inga pumpstopp så som de beskrivs ovan. Under denna period hade fler observationsrör satts i pumpplatsens närområde. Automatiska tryckgivare (se avsnitt 2.4.2) fanns nu också placerade i ett antal rör. Då dessa tryckgivare gör en mätning varje minut beräknades ett medelvärde för perioden. Detta värde behandlades sedan som en observation vid bildandet av medelvärdet för tidsperioden. Antalet observationer under den andra perioden varierade mellan en och fyra per rör.

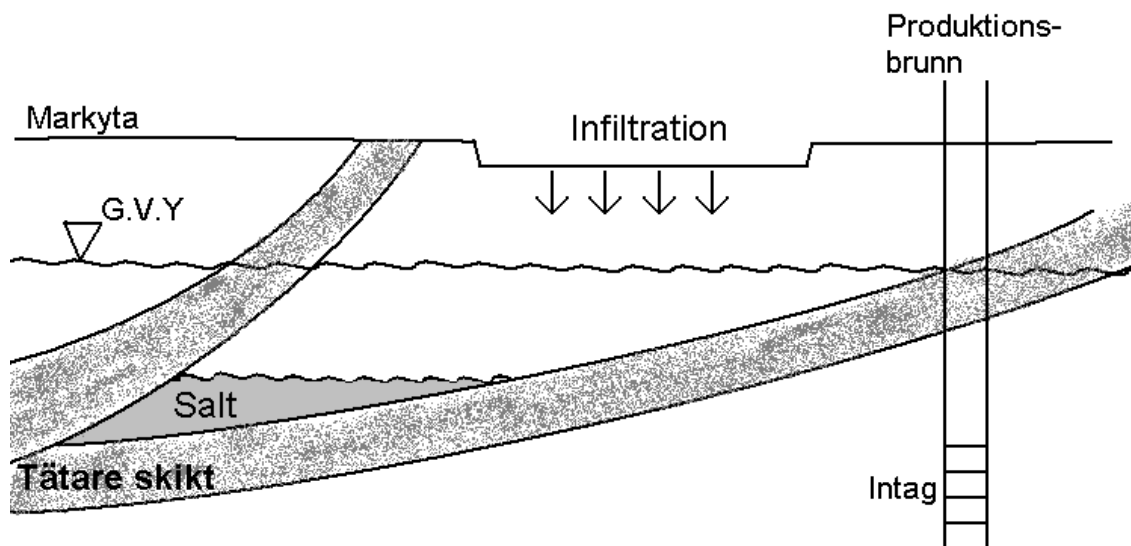
Att nivåmätningarna är exakta och att inga fel smyger sig in är särskilt viktigt i detta examensarbete. De beror på de små skillnaderna i totalpotential på de ränder i modellen där konstant totalpotential är satt som randvillkor. I perioden utan återinfiltration uppgick nivåskillnaden endast till 7,3 cm mellan randen i väst och den öst medan den i perioden med återinfiltration var 8,2 cm. Med så små skillnader i potential mellan ränderna är det viktigt att onoggrannheten hålls på en minimal nivå. Den kraftiga pumpningen gör dock att modellen blir något mindre känslig för de små skillnaderna mellan randvillkoren, det beror på att flödet kommer att ske mellan ränderna och pumpbrunnarna och inte mellan de båda ränderna i modellen. Ett alternativt sätt att se på saken är att termen $\frac{dh}{dl}$ i ekvation 1 blir större vid pumpning och således blir felet relativt sett mindre.

3.2.2. Spårämnesförsök

Ett flertal spårämnesförsök med koksalt (NaCl) har utförts av Midvatten AB vid pumpplatsen i Lennheden. Saltet påfördes infiltrationsbassängen vid olika tidpunkter mellan vilka bassängen modifierades något. Vid försöken satt en automatisk mätare för elektrisk konduktivitet i den av produktionsbrunnarna (Br20) som låg närmast infiltrationsbassängen. Manuella mätningar av den elektriska konduktiviteten genomfördes i grundvattenrör belägna i brunnsområdet. Utvärderingen och sammanställning av resultaten från spårämnesförsöken har skötts av Midvatten AB.

I Br20, till vilken den största delen av det påförda saltet förväntades komma, återfanns bara en liten del. Så var fallet i flera spårämnesförsök som gjordes i området. Den återfunna andelen salt i Br20 varierade mellan 4,6 och 11,7 % i tre olika försök (Midvatten AB opublicerat, 2007). Bassängen modifierades något mellan varje försök vilket kan förklara skillnaderna i värde.

En möjlig förklaring till den låga andelen återfunnet salt är att det finns ”fickor” i marken med hydrauliskt mycket täta sidor som skulle utgöras av de tätare skikt som tidigare diskuterats (se 3.1.2 Geologi inom modellområdet). Väl fångat mellan två av dessa tätare skikt kan det infiltrerade saltet vara i det närmaste immobiliserat och inte nå uttagsbrunnarna inom rimlig tid, se Figur 10.



Figur 10 Hydrauliskt tätare lager i marken kan bilda fickor som hindrar det påförda saltet att nå produktionsbrunnarna.

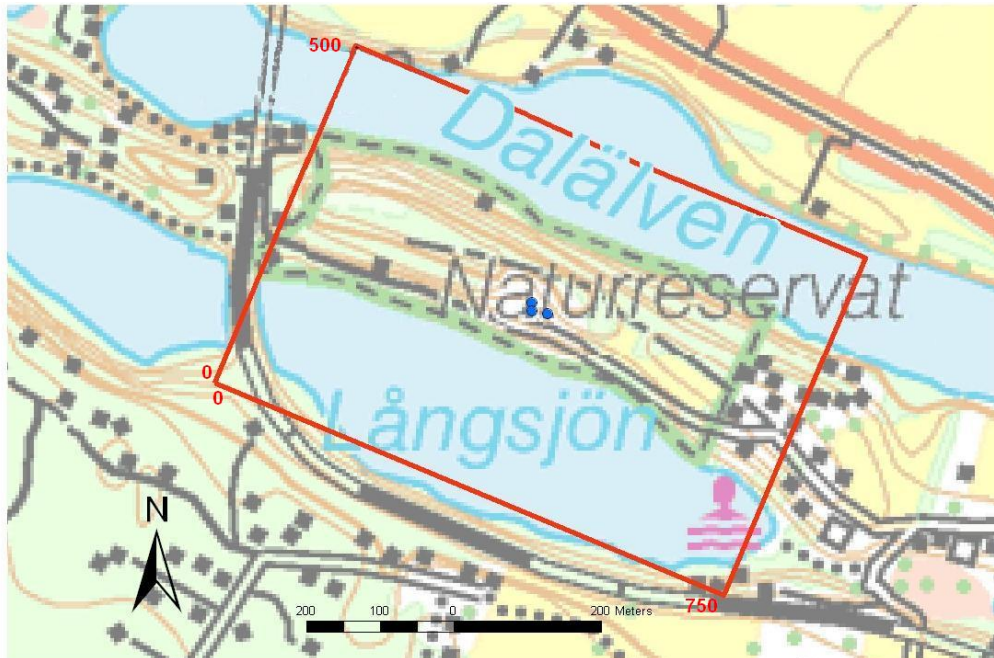
3.3. MODELLUPPBYGGNAD

3.3.1. Modeller

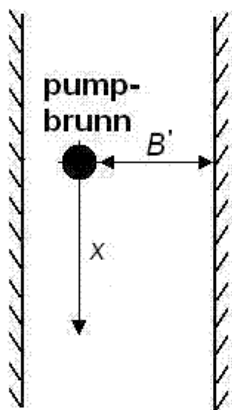
Två olika typer modeller upprättades med samma konceptuella modell som grund. De yttre begränsningarna och randvillkoren var desamma för de bägge modellerna, det som skiljde dem åt var främst hur beräkningsnätet var uppbyggt (se 3.3.3), speciellt gäller detta den vertikala diskretiseringen. Även hur konduktivitet har ansatts och hur åskärnans är beskriven skiljer sig åt mellan de två modellerna.

3.3.2. Modellområdets begränsningar och randvillkor

I modellering med finita differenser är modellområdet rektangulärt. Modellområdet har passats in i åsen riktning. På detta sätt kan modellarean minimeras vilket gör att körtiderna för modellerna blir kortare, se Figur 11.



Figur 11 Modellområdet är vridet från nord-sydlig riktning för att bättre passa in längs åsen. Detta är ett vanligt sätt för att minimera antalet celler i en modell.



Figur 12 Linjärt flöde kan antas då avståndet $x \geq B'$

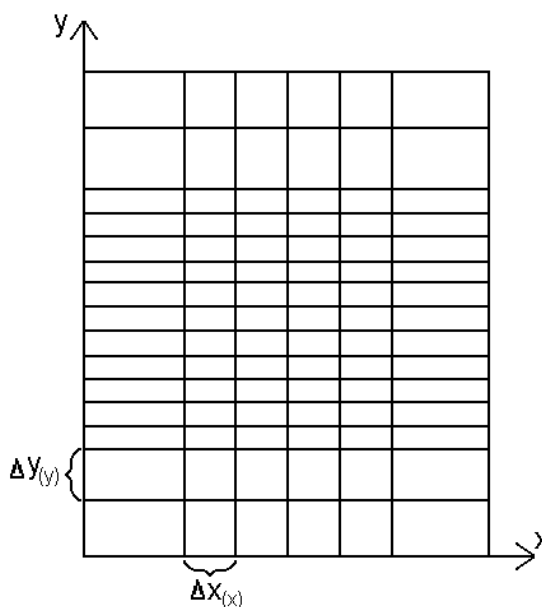
I ett första skede skapades en grov modell över det aktuella området, se 3.1.1 Yttre begränsningar. Modellens bredd gavs från propumpningar med stöd av jordartsbestämningar från rördrivningar samt en seismisk undersökning. Akvifärens bredd bestämdes till 500m vilket också ansattes som modellbredd. Vid den utvärdering av propumpningarna som användes för detta syfte gjordes antagandet om hydrauliskt täta sidor.

För att bestämma modellens längd var en enkel lösning att anta att flödet i åsen, tillräckligt långt från pumpplatsen, kan beskrivas som linjär strömning i åsens längdriktning. Detta gör att ett bestämt värde på totalpotentialen kunde ansättas på vardera randen tvärs över åsen. Ett kriterium säger att om man befinner sig på ett avstånd (markerat x i Figur 12) lika med eller större än det längsta, vinkelräta, avståndet från pumpbrunnen till kanalavgränsningarna (B' i Figur 12) kan man anta linjärt flöde (Carlsson och Gustafsson, 1984). Längden på modellen beräknades enligt detta kriterium till 750 m.

3.3.3. Modellområdets beräkningsnät

Beräkningsnätet i Visual MODFLOW är av typen finita differenser. Detta medför att vid diskretiseringen av modellområdet delas detta upp i 3-dimensionella celler med räta vinklar. Sidorna i cellerna benämns allmänt Δx , Δy och Δz . Uppdelning sker genom att rader och kolumner delar området horisontellt och i djupled delas det in i lager. Vanligtvis är sidorna Δx , Δy orienterade horisontellt medan sidan Δz är vertikalt. Så är också fallet i detta

examensarbete. Den horisontella uppdelningen blir alltid likformig i alla modellager i modellering med finita differenser (Andersson och Woessner, 2002), d.v.s. varje lager i modellen kommer ha samma horisontella uppdelning. Med modellens upplösning menas storleken på cellernas sidor ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), ju mindre dessa är desto högre upplösning har modellen. T.ex. så har mittenpartiet av Figur 13 en högre upplösning än de yttre delarna. Fördelen med en högupplöst diskretisering är att problemet kan beskrivas mer noggrant samt att lösningen blir mer exakt. Detta gäller framförallt områden i modellen där totalpotentialen varierar mycket över en kort sträcka (Andersson och Woessner, 2002). Fördelen med ett grovt beräkningsnät är att en kortare körtid uppnås vilket inte ska underskattas då modellen blir mer lätthanterlig att jobba med. Detta gäller framförallt vid kalibrering av modellen då många ändringar och körningar av modellen kan behöva genomföras.



Figur 13 Oregelbundet beräkningsnät, bredden på rader och kolumner ($\Delta y, \Delta x$) varierar.

Eftersom man eftersträvar en modell som är snabbkörd men samtidigt tillräckligt detaljerad för det man vill beskriva är det oftast praktiskt att använda sig av ett så kallat oregelbundet beräkningsnät. Ett sådant beräkningsnät har använts i detta examensarbete. Idén bakom oregelbunden diskretisering är att cellerna tillåts ha olika utsträckning, d.v.s. kolumner och rader variera i bredd ($\Delta x = \Delta x_{(x)}, \Delta y = \Delta y_{(y)}$), se Figur 13.

Områden i modellen av extra stort intresse eller där totalpotentialen förväntas variera kraftigt bör delas upp i ett finare nät. I grundvattenmodeller där pumpbrunnar används är det ofta befogat att beskriva deras närområden mer detaljerat då totalpotentialen ofta varierar kraftigt nära dessa. En tumregel för oregelbundna beräkningsnät är att en beräkningscells längsta sida inte ska vara längre än tio gånger den kortaste sidan i samma cell (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2004). Att diskretisera problemet med ett oregelbundet beräkningsnät medför dock större numeriska fel än med ett regelbundet nät (Andersson och Woessner, 2002).

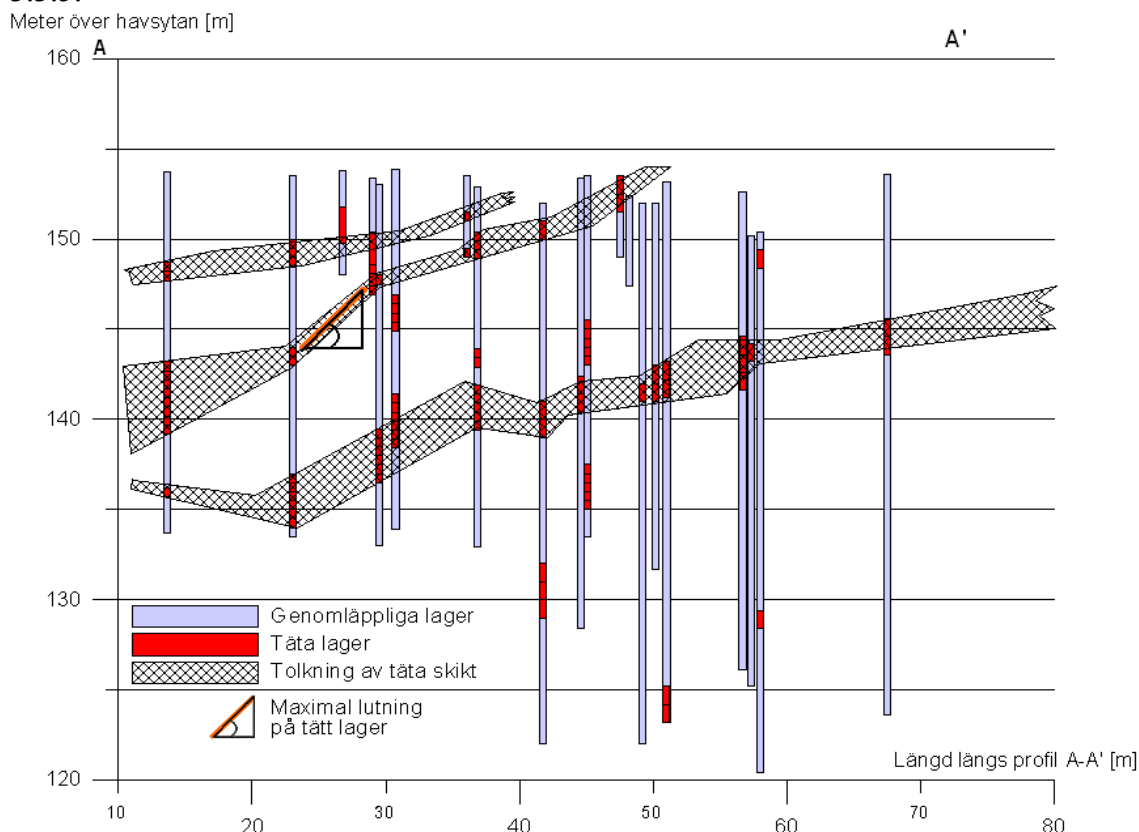
Vertikalt delades modellområdet in i lager. Som i resonemanget med den horisontella upplösningen kan lagerindelningen vara regelbunden, d.v.s. Δz är konstant för alla lager alternativt så tillåts Δz variera från lager till lager ($\Delta z = \Delta z_{(z)}$, oregelbunden lagerföljd). I

uppdelning av modellager finns i MODFLOW också en möjlighet som inte finns med den horisontella uppdelningen, det är att låta tjockleken hos ett visst modellager att variera ($\Delta z = \Delta z_{(x,y,z)}$). Med denna metod kan man lättare anpassa geologiska lager till

beräkningsnätet vilket gör att antalet celler i modellen kan minskas (Andersson och Woessner, 2002). Den sistnämnda varianten kallas för deformerad lagerföljd (Reilly och Harbaugh, 2004). Nedan följer en beskrivning över de två beräkningsnät som användes vid modelleringen, dessa kallas Beräkningsnät 1 och 2 (förkortas Ber.nät).

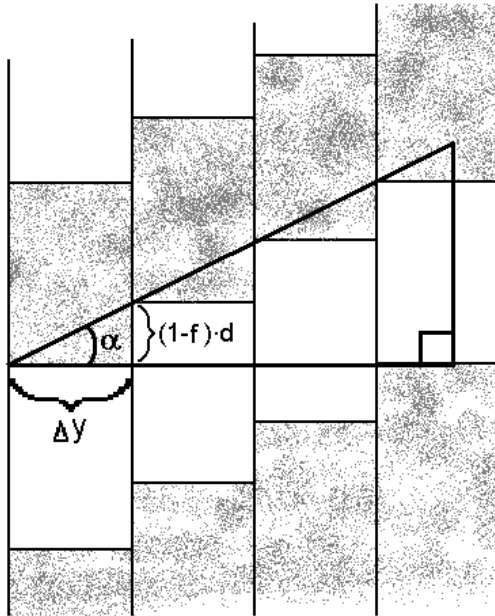
Beräkningsnät 1

I det beräkningsnät som skapades först, fortsättningsvis kallad beräkningsnät 1, ansattes en deformerad lagerföljd i de övre lagren medan lagerföljden var regelbunden i de nedre. Området kring pumpplatsen (innerområdet) beskrivs i ett högre upplöst beräkningsnät än den yttre delen av modellen. Diskretiseringen av innerområdet visade sig begränsas av de tätare lager som beskrivs i avsnitt 3.3.5. Resonemanget vid diskretiseringen av innerområdet är som följer: Det minsta djupintervallet för provtagning vid Midvatten AB:s rörborrningar är 0.5 m och därför ansattes detta värde som den minsta tjockleken ett lager i modellen tilläts, (i delar av modellen har de översta lagren en tjocklek på 0.1 m men dessa celler ligger ovanför vattenytan och blir därför inaktiva i simuleringen). Provgropar i området visade på tunnare lager men utifrån borrhdata, varifrån merparten av antalet observationer kommer, kan sådana tjocklekar alltså inte bestämmas. Från Figur 14 ses vidare att den största lutningen i något av skikten uppgår till omkring 30°. Hur de tätare skikten har tolkats beskrivs närmare i avsnitt 3.3.5.



Figur 14 Profil sammanställd från rördrivningsprotokoll med inlagd tolkning av tätare lager. Profilen är längs linjen A-A', vilken är redovisad i Figur 3. Den största lutningen på något av de tätare lagren uppgår till omkring 30°.

För att undvika konvergensproblem i modellen till följd av skarpt lutande lager ger Waterloo Hydrogeologic (företaget bakom Visual MODFLOW) ett råd om ett minsta överlapp på 50 % i höjddled mellan närliggande celler i samma lager (Waterloo hydrogeologic Inc, www). Detta råd kallas här för regeln om överlapp (tumregel 3, Figur 16). Grundläggande trigonometri ger då att den sidan i lutningsriktningen, vilken i modellen är Δy , beräknas som (se Figur 15):



Figur 15 Figuren ger en beskrivning av hur sidan Δy kan beräknas då lagerlutningen (α) samt graden av överlapp (f) är bestämda.

$$\Delta y = \frac{(1-f) \cdot d}{\tan \alpha} \quad (11)$$

där:

d är lagrets tjocklek [L]

f är graden av överlapp [-]

α är lagrets lutning [-]

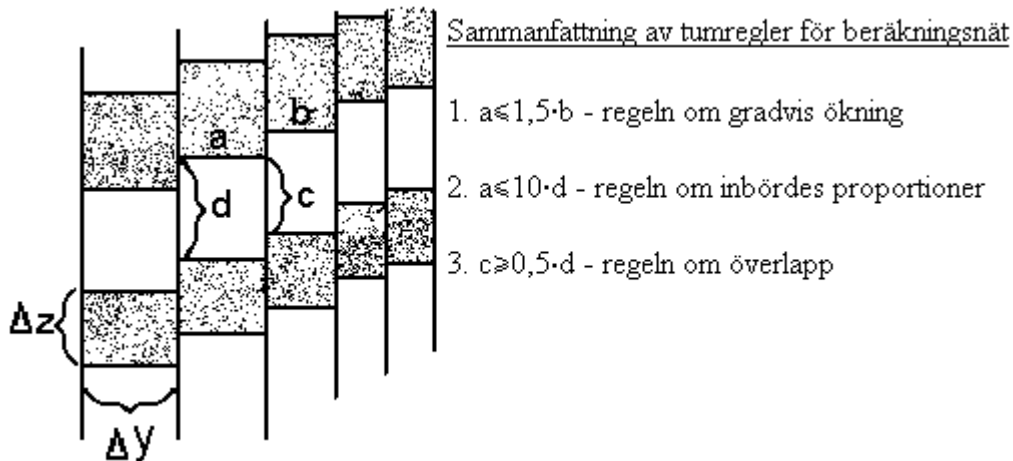
Här med värdena, $d = 0,5$ [m], $f = 0,5$ och $\alpha = 30^\circ$. Värdena insatta i ekvation 11 ger ett värde på 0,43 m som maximal längd på cellsidan i lutningsriktningen (Δy). I modellen avrundades denna siffra nedåt till 0,4 m. Detta kan ses som en marginal för brantare lager eller ett större överlapp. Längden hos sidan i den andra horisontalriktningen (Δx) angavs till 0,8 m för innerområdet. Denna siffra ansågs som en lämplig kompromiss mellan hög och låg upplösning.

Längden hos sidorna i innerområdet bestämmer också den maximala längden hos sidorna i ytterområdet. Detta påstående bygger på en tumregel ur manualen till Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2004). Tumregeln säger att den längsta sidan hos en cell inte ska vara mer än tio gånger längre än någon annan sida hos samma cell. Applicerad i två dimensioner ger regeln att:

$$\begin{aligned} \Delta x_y &\leq 10 \cdot \Delta y_i \\ \Delta y_y &\leq 10 \cdot \Delta x_i \end{aligned} \quad (12)$$

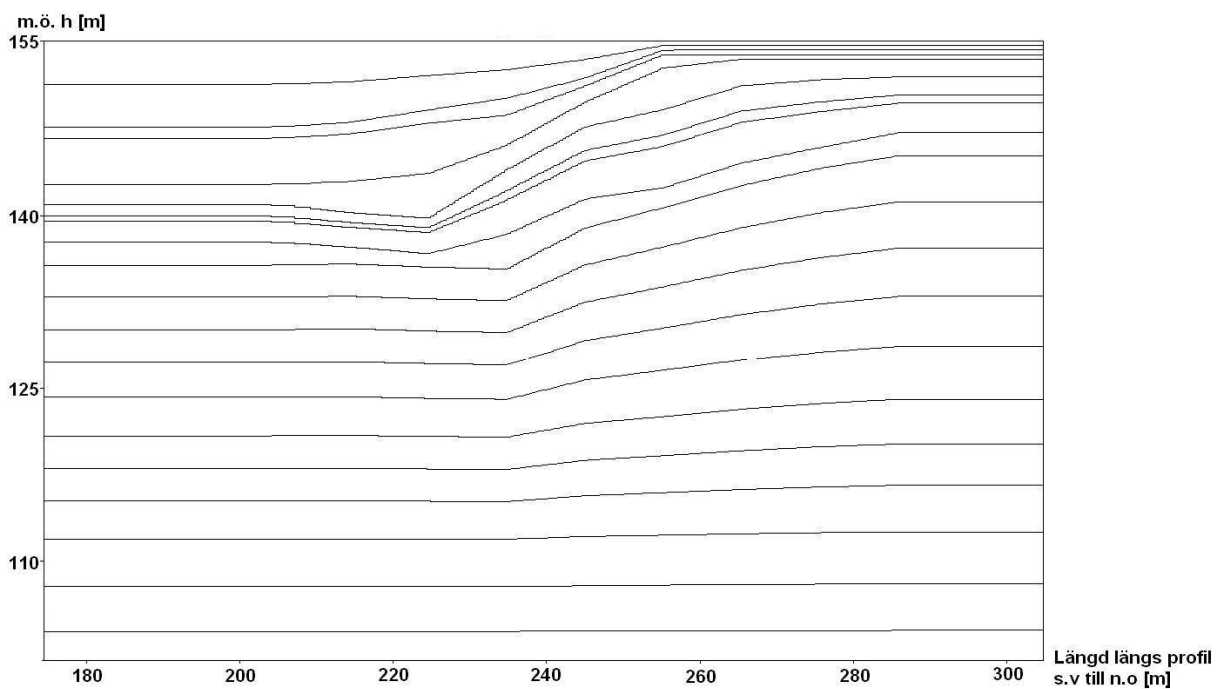
där index i, y betecknar innerområde resp. ytterområde. Denna tumregel kallas här för regeln om inbördes proportion (tumregel 2, Figur 16). Den största horisontella utbredning hos en cell i ytterområdet blev enligt ekvation 12 4×8 meter. I modellen angavs den dock till 4×4 meter. Den maximala lagertjockleken angavs till 4 meter enligt samma resonemang.

I övergången i horisontalplanet mellan ett finmaskigt nät och ett grövre (övergången mellan inner- och ytterområdet) har det använts ytterliggare en tumregel som säger följande: Längden hos sidan i en cell i en bestämd riktning ska inte avvika från längden hos sidan i en angränsande cell i samma riktning med mer än 50 %, (Fetter, 2001). Denna tumregel kallas här regeln om gradvis ökning (tumregel 1, Figur 16).

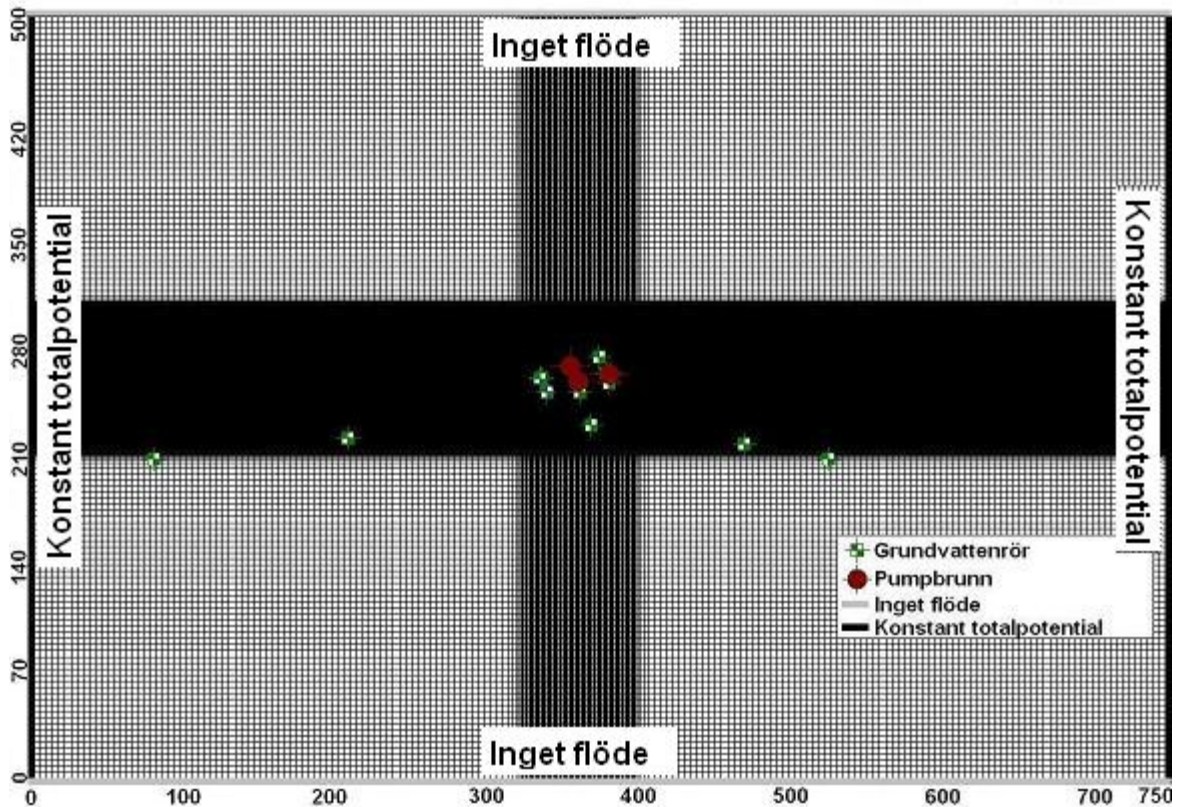


Figur 16 Sammanfattning av tre tumregler som används då man ska bestämma beräkningsnätet till en modell. Bilden representerar ett tvärsnitt av en modell med deformerad lagerföljd.

Figur 17 och Figur 18 nedan visar hur Beräkningsnät 1 har ansatts. Den deformerade lagerföljden i Figur 17 minskar antalet modellager som behövs i modellen.



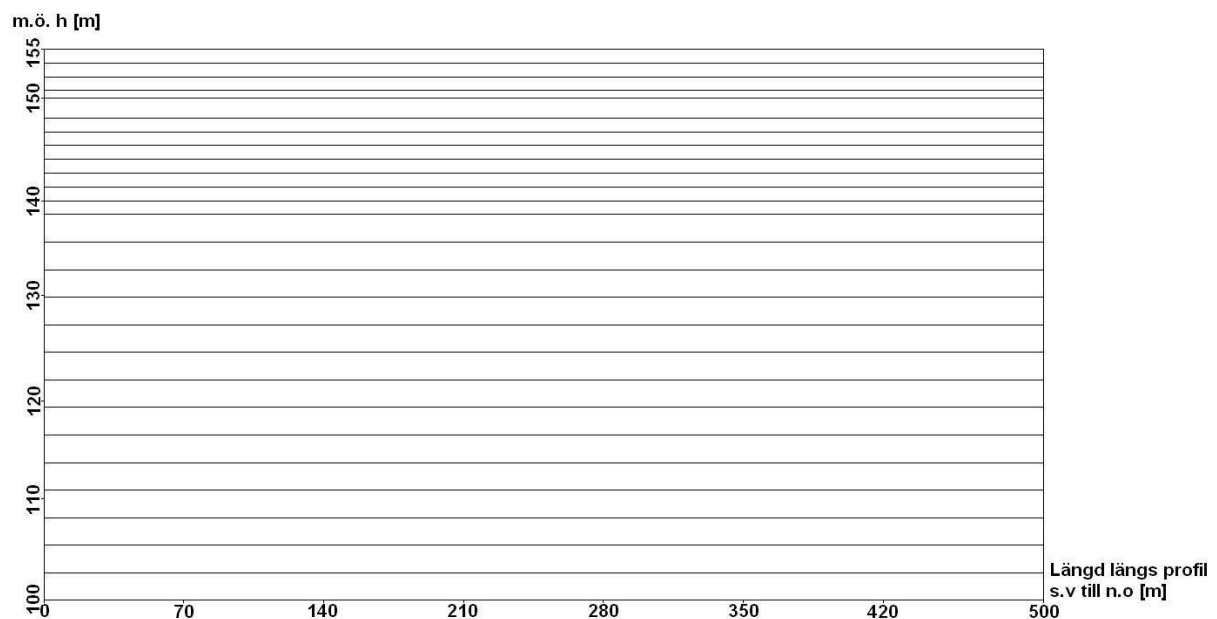
Figur 17 I Beräkningsnät 1 är den vertikala uppdelningen i så kallade deformerade modellager.



Figur 18 Den horisontella uppdelningen av Beräkningsnät 1. Det svarta fältet i mitten av figuren beror på den höga upplösningen som används där.

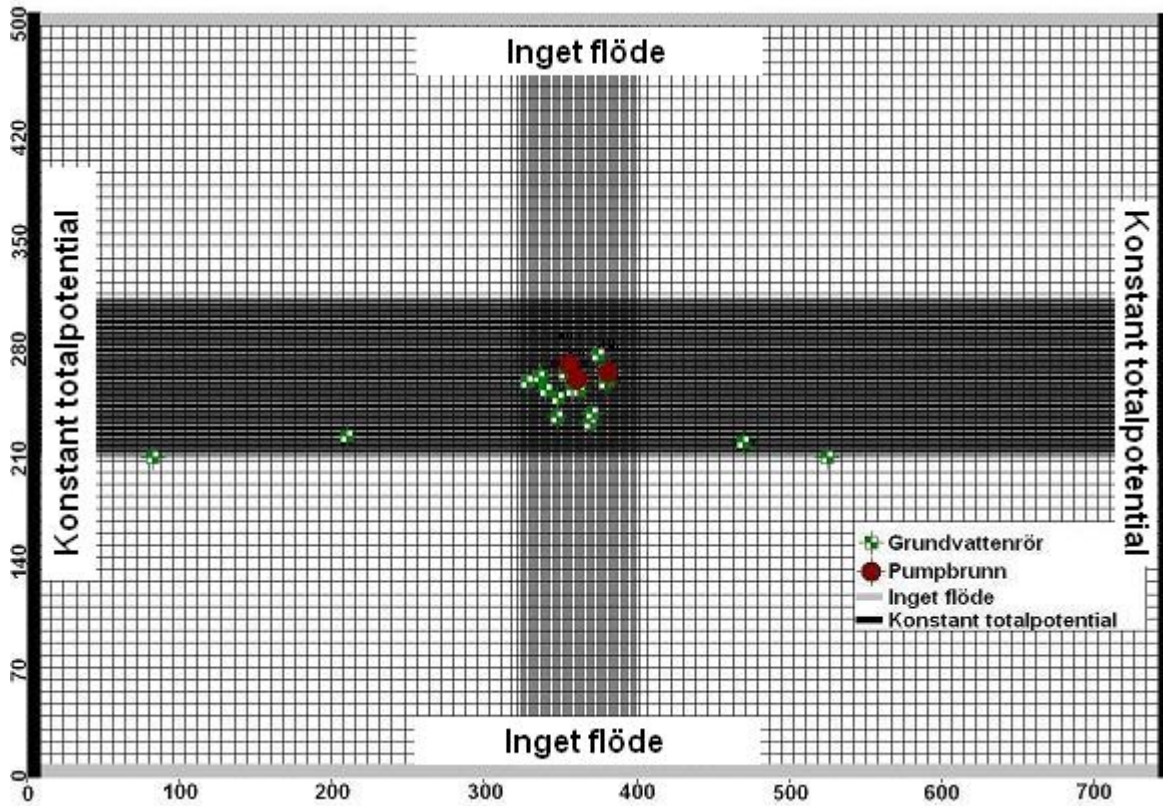
Beräkningsnät 2

I den andra modellen som skapades ansattes en oregelbunden lagerföljd, se Figur 19. En oregelbunden lagerföljd gör att det behövs fler modellager men att beräkningsnätets struktur blir enklare jämfört med en deformerad lagerföljd.



Figur 19 Den vertikala uppdelningen av Beräkningsnät 1 i en oregelbunden lagerföljd.

Beräkningsnätets horisontella upplösning i Beräkningsnät 2 ansattes till en ca fjärdedel av det i Beräkningsnät 1, dvs. både antalet rader och kolumner halverades, se Figur 20.



Figur 20 Den horisontella uppdelningen av Beräkningsnät 2 liknar den som används i Beräkningsnät 1 men antalet rader och kolumner.

En sammanfattning av de båda modellernas beräkningsnät ges i Tabell 4.

Tabell 4 Sammanfattning av de två modellernas beräkningsnät

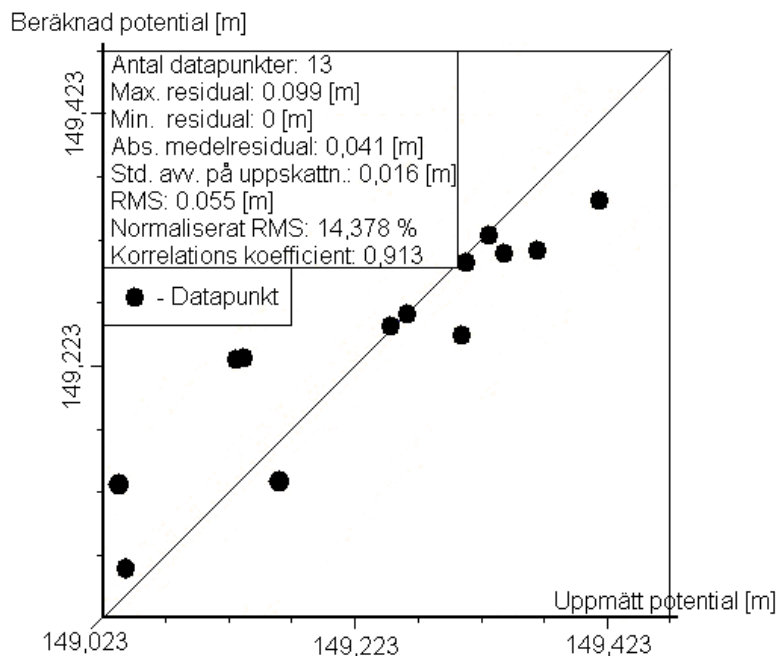
Parameter	Beräkningsnät 1	Beräkningsnät 2
Antal rader:	346	178
Antal kolumner:	268	134
Antal lager:	20	26
Upplösning innerområdet: Δx :	0,8 m	1,6 m
Δy :	0,4 m	0,8 m
Upplösning ytterområdet: Δx :	4 m	8 m
Δy :	4 m	8 m
Typ av horisontellt nät:	Oregelbundet	Oregelbundet
Typ av lagerföljd:	Deformerat	Oregelbunden

3.3.4. Åsens hydrauliska konduktivitet

Det dominerade åsmaterialet ansattes i de bägge modellerna en konduktivitet hämtad från Midvatten AB:s provpumpningar. Det värde som ges där är $0,018 \text{ ms}^{-1}$ (Midvatten AB, opublicerat, 2007). I Beräkningsnät 1 ansattes värdet $0,02 \text{ ms}^{-1}$ medan det i modell 2 gav bättre resultat vid kalibreringen med värdet $0,01 \text{ ms}^{-1}$. Att de värden som ansatts modellerna inte är desamma som de genom provpumpning uppmätta beror på att de mindre provpumpningarna endast representerar en begränsad del av området samt osäkerheten i resultaten från provpumpningarna då akvifärens mäktighet inte är känd. Därför tilläts värdena på konduktiviteten variera då modellerna kalibrerades efter grundvattenytan.

En åskärna med högre hydraulisk konduktivitet än övriga åsen lades in i de bägge modellerna. Genom ett kalibreringsförfarande mot uppmätta grundvattennivåer under stationärt tillstånd bestämdes denna kärnas konduktivitet och form. Konduktivitet bestämdes då till $0,15 \text{ ms}^{-1}$ i Beräkningsnät 1 och $0,085 \text{ ms}^{-1}$ i Beräkningsnät 2. Bägge är mycket höga värden men rimliga för grus eller grovsand (Knutsson och Morfeldt, 2002). Även åskärnans form skiljde sig något åt mellan modellerna vilket framgår av Figur 23 och Figur 24. Eftersom flera parameterpar på kärnans tvärsnitt och konduktivitet gav goda resultat vid kalibrering ansattes värden som verkade troliga. Värdena på totalpotentialen som användes vid denna kalibrering var hämtade från tidsperioden då ingen återinfiltration skedde.

Efter kalibrering stämde den modellerade potentialen väl överens med de i fält uppmätta. Den störta skillnaden mellan den modellerade potentialen och den uppmätta uppgick till ca en decimeter (se Figur 21).



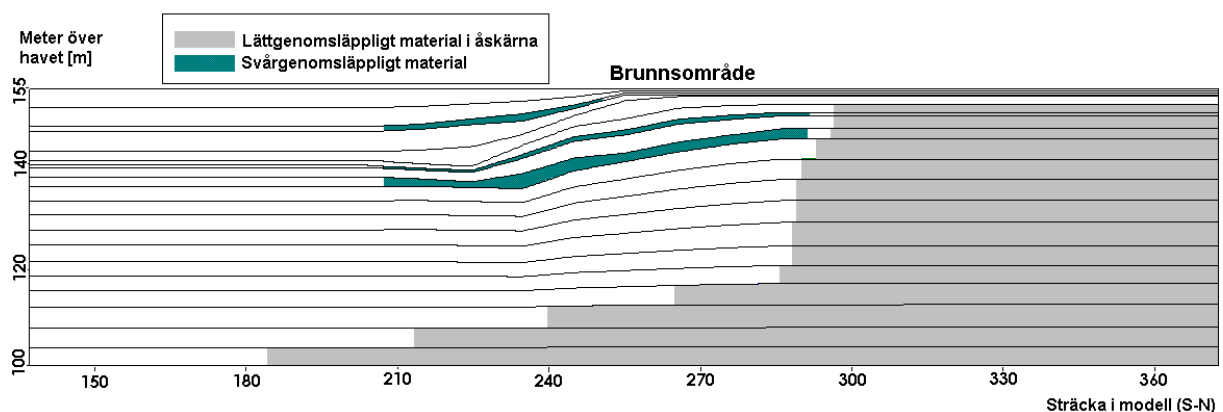
Figur 21 Kalibreringsplot över modellerade och uppmätta värden. Den störta skillnaden mellan värdena uppgår till ca en decimeter

3.3.5. Täta lager

I brunnsområdet återfinns hydrauliskt relativt omgivande åsmaterial tätare lager på olika djup. Den information som finns om dessa återfinns främst i protokoll förda vid rördrivningar och provgrovsgrävningar i området. För att så tydligt som möjligt åskådliggöra tolkningen av lagerföljden ritades ett antal profiler utifrån rördrivningsdata upp, se Figur 7 och Figur 14. Jordarterna, som bestämdes av Midvatten AB vid borrhittfallet, klassificerades om för detta ändamål till att endast beskrivas av två typer av material, hydraulisk tätare och hydrauliskt mer genomsläppligt. Vid jordartsbestämningen används en huvudfraktion och en eller flera jordartstillägg för varje jordprov som bestäms, t.ex. siltig finsand då finsand är huvudfraktionen av jordprovet och silt är jordartstillägget. De jordarter som av Midvatten AB klassades som silt, finsand eller mellansand, antingen i huvudfraktionen eller i jordartstillägget har här klassificerats som relativt åsmaterialet hydrauliskt tätare med en låg konduktivitet. Någon fraktion med lera har inte påträffats i området. Övriga jordarter har klassats som hydrauliskt genomsläppliga. Även de partier av rörborringarna som inte blivit jordartsbestämda klassades här som genomsläppliga. Skillnad i konduktivitet mellan omgivande material och lagrens kan beskrivas med kvoten $K_{\text{grov}}, K_{\text{fin}}$, där K_{grov} är konduktiviteten i det dominerade åsmaterialet och K_{fin} är konduktiviteten i de tätare skikten. I tolkningen av lagrens utsträckning användes också profiler från georadar samt tidigare tolkningar gjorda av Midvatten AB. Den horisontella utsträckningen av dessa skikt har varit svår att bestämma. Grundvattenrören inom modellområdet är koncentrerade kring brunnsområdet och få borrhittprotokoll med jordartsbestämning finns att tillgå utanför detta. Speciellt gäller detta tvärs över åsen, vilket bl.a. framgår av Figur 18 där grundvattenrören i området finns redovisade. För modelleringen gjordes tre versioner av de tätare skiktens utsträckning tvärs åsen (nord-syd) och två versioner av utsträckning i åsens riktning (öst-väst). Dessa tolkningar har senare kombinerats i olika körningar av modellerna.

Utsträckning av lagren tvärs åsen

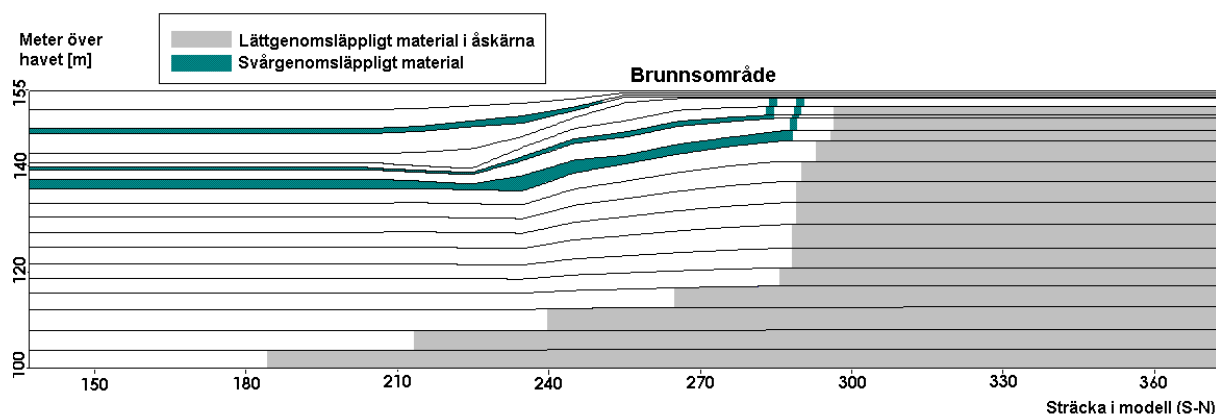
Tre olika versioner av de tätare lagrens utsträckning tvärs åsen (nord-sydlig riktning) prövades (kallade n-s.1, 2, 3). I den version som ansattes först var utsträckningen av lagren begränsad och återspeglade tolkningen i Figur 14. I riktning längs åsen infördes de i modellen bara under och i angränsning till brunnsområdet. Denna variant prövades i enbart Beräkningsnät 1, se Figur 22.



Figur 22 Figuren beskriver version 1 av lagerutsträckningen i nord-sydlig riktning. Det gråa partiet visar hur åskärnan är inlagd i modellen.

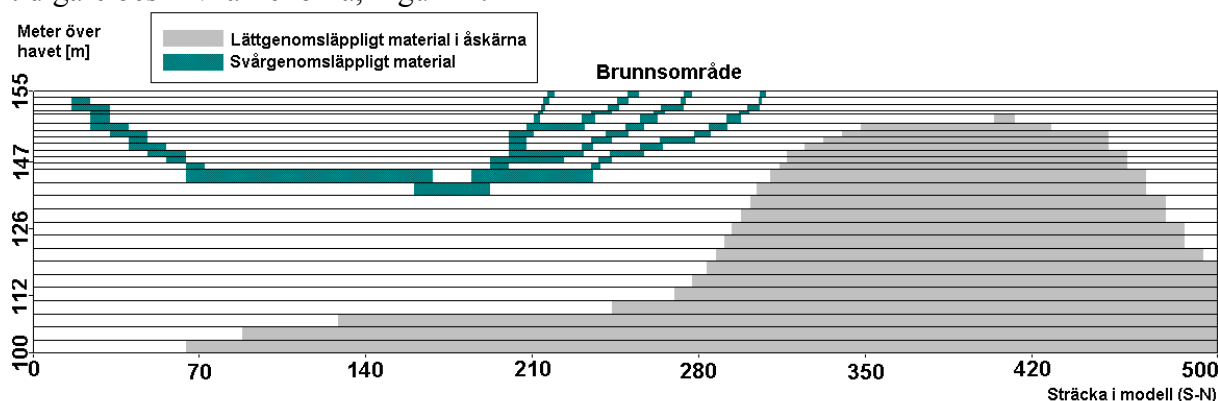
Senare i arbetet sträcktes skikten ut. Denna variant kallas här för version 2. Fortsättning av lagren åt söder (dvs. åt vänster i Figur 14) ansattes då plan och horisontell medan de åt norr

drogs upp ovanför vattenytan (~149m i modellen), se Figur 23. Detta grundar sig på teorier om åsbildning i avsnitt 3.1.2.



Figur 23 I version 2 av lagerutsträckningen, här i modell 1, fortsatte de tätare lagren ut till modellavgränsningen i söder medan i norr går upp ovanför grundvattenytan.

Den tredje varianten av lagrens utsträckning upprättades med tanke på den teori som framkastats om hydrauliska fickor, se avsnitt 3.2.2 i samband med spårämnesförsöken. Här lades ett till lager in i modellen som fick representera Långsjöns täta bottensediment. Lagren som sträcker sig ut från brunnssområdet sammanslöt då med botten och bildade på så sätt de tidigare beskrivna fickorna, Figur 24.

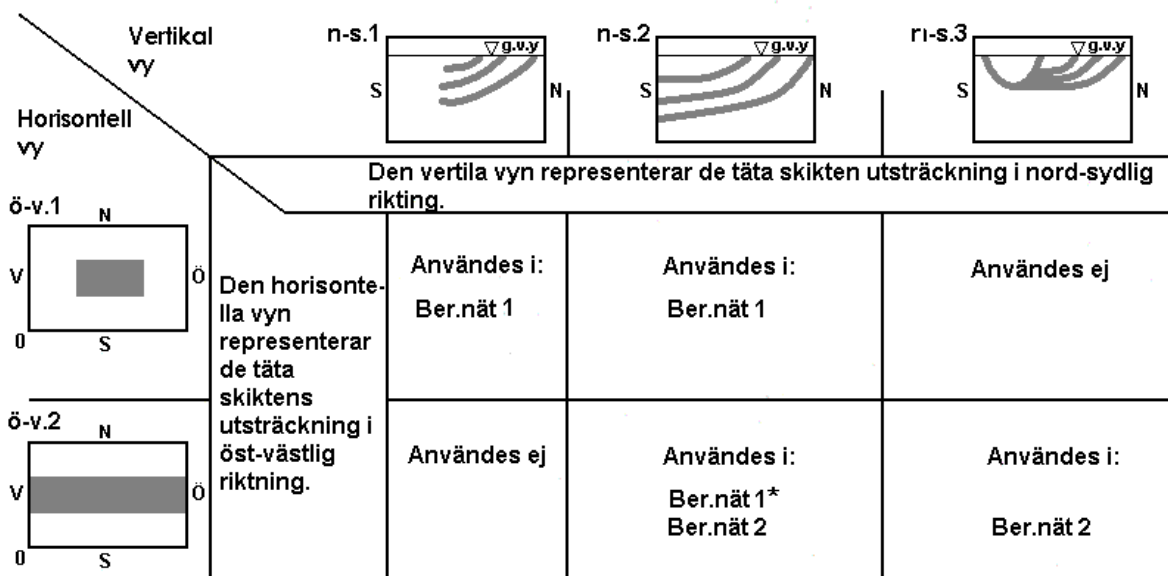


Figur 24 De tätare skikten sammansluter i version 3 av Beräkningsnät 2 med Långsjöns botten.

Utsträckning av lagren längs åsen

I åsens längdriktning är det brist på data för tolkning av lagrens utsträckning. På grund av detta har ytterligare två typer av öst-västlig utsträckningar (kallade ö-v.1, 2) skapats, en med de tätare skikten endast belägna under brunnssområdet (ö-v.1) och en med skikten utdragna längs hela modellen i åsriktningen (ö-v.2). Praktiskt gjordes detta genom att ansätta konduktiviteten på önskvärdt sätt i en kolumn i modellen och sedan kopiera tvärsnittet till alla andra kolumner.

Figur 25 sammanfattar hur de skikten ansattes i de olika modellerna. Totalt testades fem olika kombinationer av lagerutsträckningar och beräkningsnät. Den vertikala vyn återger lagrens tolkning i nord-sydlig riktning (n-s.1,2,3). I den horisontella vyn återspeglas skiktens utsträckning längs med åsen (öst-västlig riktning) med den utsträckta varianten nederst.



* -med en fjärdedel av upplösningen

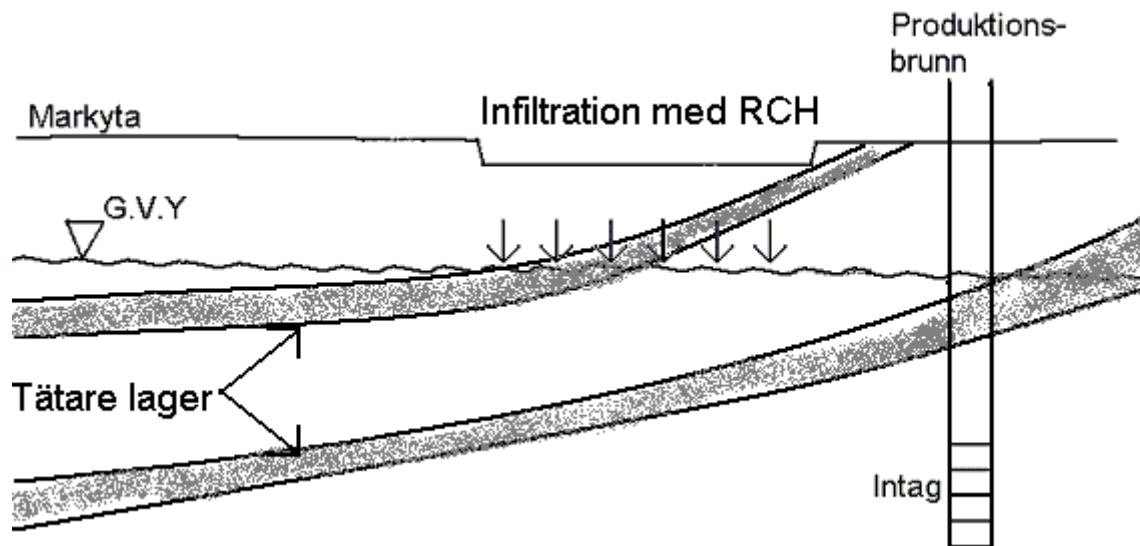
Figur 25 En sammanfattning av hur olika tänkbara utsträckningar av de tätare skikten har tolkats i modellerna.

3.3.6. Infiltration

Syftet med detta examensarbete är att beskriva hur en modell för att simulera flödena mellan infiltrationsanläggningen och pumpbrunnarna i Lennheden kan skapas. Därför blir hanteringen av infiltrationen extra viktig i modellen.

Infiltrationen lades in i modellen med paketet RCH (*Recharge Boundary Condition*) i Visual MODFLOW. Då enheten på denna ska vara i $mm \cdot \text{år}^{-1}$ räknades den om från flödet genom Br10 (infiltrationsbrunnen) som var givet i enheten $l \cdot s^{-1}$. För beräkningen behövs arean på infiltrationsbassängen. Från inmätningar av bassängen beräknades dess area till $178m^2$. Då Br10 pumpades med $40 l \cdot s^{-1}$ gav detta att RCH sattes till $7\,087\,000 mm \cdot \text{år}^{-1}$. Eftersom MODFLOW inte kan hantera flöden i den omättade zonen appliceras infiltrationen via RCH till det översta aktiva lagret under infiltrationsytan i modellen.

Att återinfiltrationen påfördes det översta aktiva lagret i modellen medförde vissa problem. Dessa hade sin grund i att ett av de tätare skikt som beskrivits tidigare skär grundvattenytan just under infiltrationsplatsen. I Lennheden är det möjligt att det tätare lagrets lutning påverkar vattnets strömning genom den omättade zonen, det beskrivs inte i modellen där det via RHC påförda vattnet hamnar både över och under detta skikt, se Figur 26.



Figur 26 Figuren beskriver hur infiltration läggs in i modellen med RCH-paketet i MODFLOW-2000. Strukturer som finns ovanför grundvattenytan och som påverkar den omättade strömningen kan inte simuleras i MODFLOW.

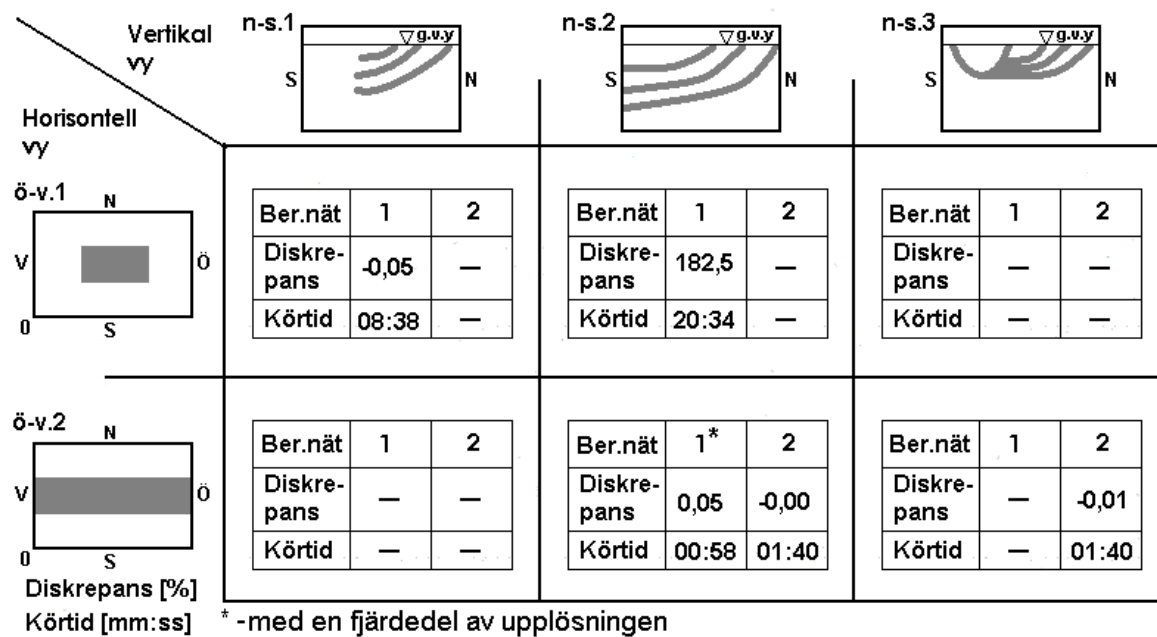
Detta kan i sin tur ha en avgörande betydelse för strömningen hos det infiltrerade vattnet. För att komma till rätta med problemet prövades en variant med injektionsbrunnar i modellen. Istället för att infiltrera vattnet pumpades det då in i marken i det lager där det verkade troligt att det hamnar vid en infiltration. Försöket föll inte väl ut och istället justerades lagren vertikalt för att nå samma effekt. Ett ytterligare förslag till lösning av detta problem diskuteras i kapitel 5.

4. RESULTAT

I detta kapitel redovisas resultaten från modellkörningarna. Som nämns i syftet utvärderades körningarna med avseende på stabilitet och representerbarhet, dvs. tyngdpunkten ligger på de numeriska aspekterna. Nedan följer förklaringar på hur stabiliteten och representerbarheten mättes samt de värden som kom av modellkörningarna.

4.1. MODELLKÖRNINGAR, STABILITET

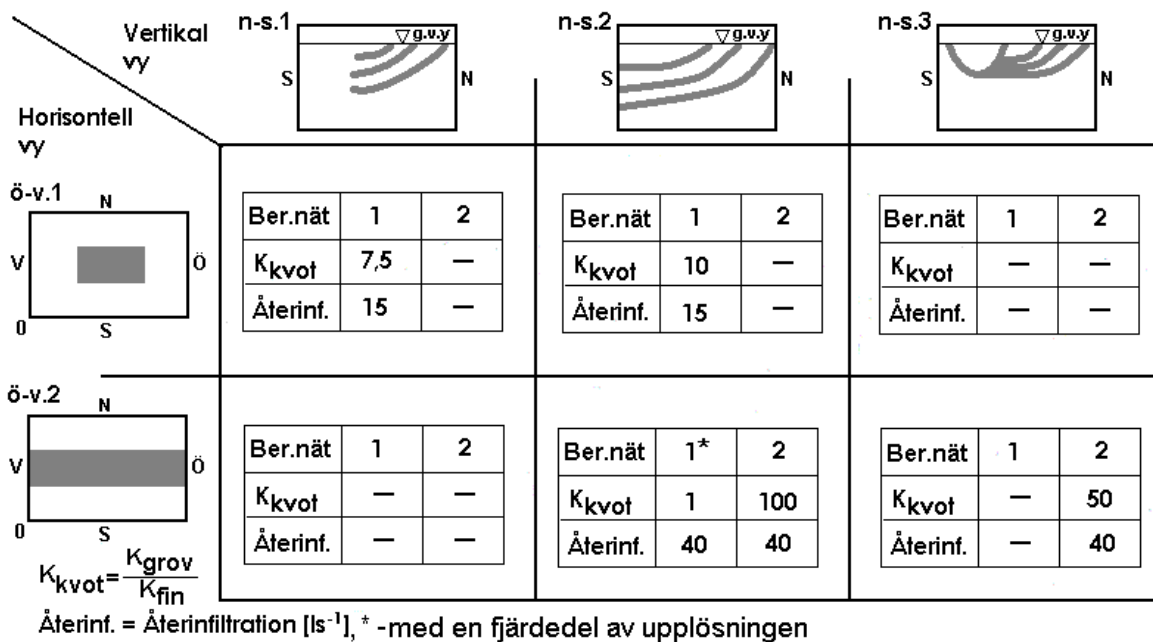
Modellernas resultat med avseende på diskrepans och körtid redovisas i Figur 27.



Figur 27 Figuren sammanfattar modellernas resultat med avseende på stabiliteten. Med stabilitet avses här modellens diskrepans samt körtid.

4.2. MODELLKÖRNING, REPRESENTERBARHET

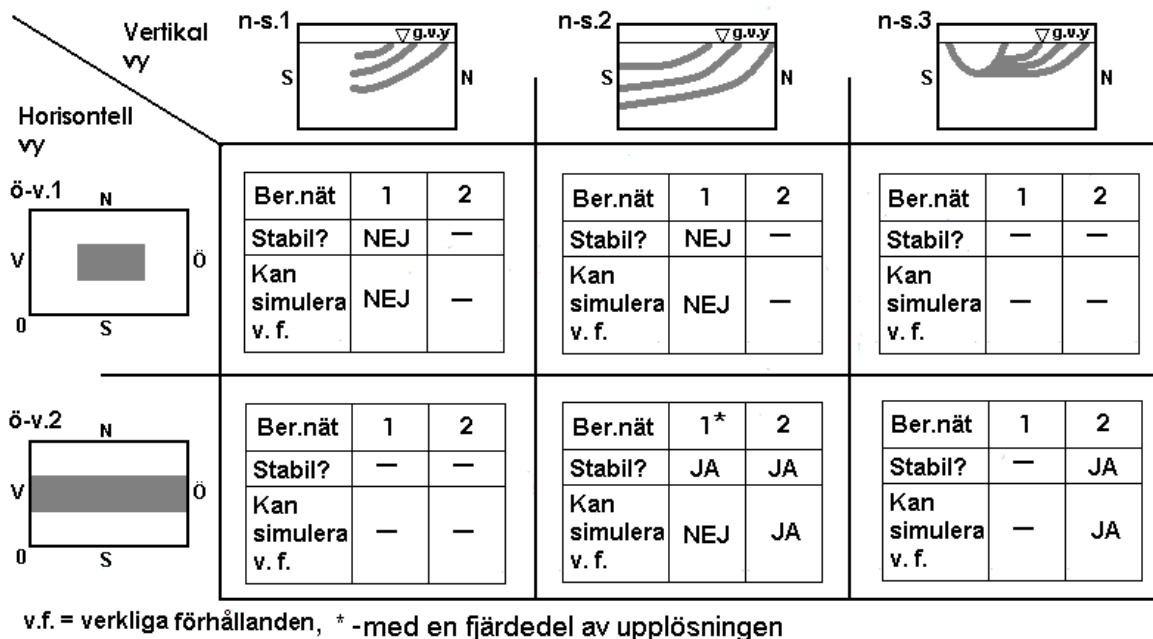
Det visade sig i de flesta fall vara svårt att få konvergens i modellerna när ett högt värde på flödet till infiltrationen användes. Likaså hade modellerna svårt att konvergera för när stor skillnad i konduktivitet mellan de tätare skikten och omgivande material användes. Både när det gäller återinfiltrationen och skillnaden i konduktivitet var det önskvärt att kunna simulera höga värden. Ofta var det ett samspel mellan konduktivitetkvoten och återinfiltrationen. Detta gjorde att om man minskade värdet på den ena parametern kunde man höja värdet på den andra, därför är de redovisade värdena bara ett bland flera möjliga. I Figur 28 redovisas ett värde på konduktivitetkvoten samt ett värde på återinfiltrationshastigheten som gav konvergens vid modellkörning.



Figur 28 De högsta värdena på återinfiltrationen och kvoten mellan låg och hög konduktivitet i lagren som gick att använda i modellerna. Högre värden gjorde att konvergens inte uppnåddes.

4.3. UTVÄRDERING AV MODELLERNA

Från resultatet av modellkörningarna (Figur 27 och Figur 28) kan modellerna som helhet utvärderas. Detta sker med stöd av med stöd av Tabell 2 i avsnitt 2.5. Resultatet av utvärderingen presenteras i Figur 29.

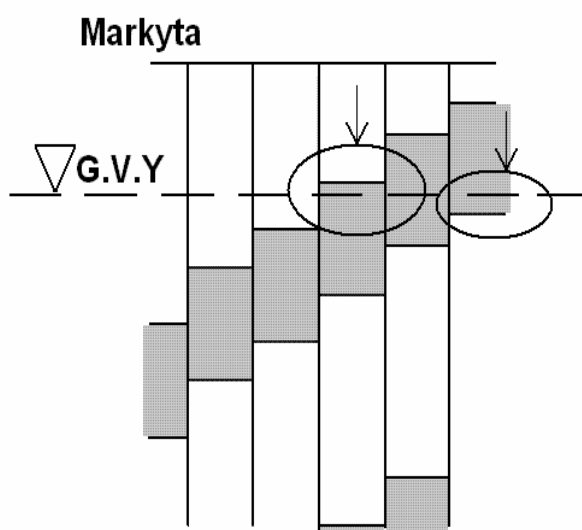


Figur 29 Resultat av utvärdering av de olika modellerna.

Som framgår av Figur 29 ger Beräkningsnät 2 stabila körningar och inparametrarna kan ansättas så att de representerar problemet. Beräkningsnät 1 anses här inte stabil förutom i det fall då den horisontella upplösningen minskades men inte heller då klarar Beräkningsnät 1 att beskriva återinfiltrationen och geologin så som önskas.

5. DISKUSSION

Från Figur 29 dras slutsatsen att en oregelbunden lagerföljd, Beräkningsnät 2, (Figur 19) är att föredra framför en deformerad lagerföljd, Beräkningsnät 1, (Figur 17) i modelleringen. Upplösningen i modellen bör också ges särskilt beaktande, speciellt vad gäller antalet beräkningsceller.



Figur 30 Modellen har svårt att konvergera då vattennivån ligger nära gränsen mellan två lager. Två sådana områden är markerade i figuren.

En anledning till att Beräkningsnät 1 med deformerad lagerföljd hade svårt att konvergera var troligen att modellagren skar grundvattenytan. Problemet grund ligger i hur den vertikala transmissiviteten beräknas. I MODFLOW-2000 ansätts ett värde på konduktiviteten för varje cell och transmissiviteten beräknas sedan utifrån cellens tjocklek (Δz) om cellen är mättad med vatten. I de celler där vattenytan befinner sig, och som alltså inte är mättade, beräknas transmissiviteten utifrån avståndet mellan vattenytans nivå och cellens botten. Om vattenytan ligger nära gränsen mellan två celler kommer detta att ge problem, se Figur 30. I och med att vattenytans position beräknas genom en iterativ process kommer vattenytan då att variera mellan de två cellerna i beräkningarna. Detta kommer i sin tur leda till att den beräknade transmissiviteten kommer att ändras kraftigt, från att beräknas från en cell som är nästan torr till en som är nästan

mättad. Om det övre lagret också har en lägre konduktivitet än det nedre kommer denna effekt att förstärkas ytterligare. I äldre varianter av MODFLOW används det s.k. BCF-paketet (*Block centered flow*) där varje cell tilldelas ett värde på den vertikala transmissiviteten. Det finns en möjlighet i MODFLOW-2000 att använda BCF-paketet vilket skulle kunna minska problemet (Waterloo Hydrogeologic¹, 2007), detta har inte prövats. Den höga upplösningen som användes i Beräkningsnät 1 kan också ha bidragit till problemet då den ökade sannolikheten för vattenytan att befinna sig nära gränsen mellan två lager i modellen.

Ett mer principiellt problem vid modelleringen har varit skalan. Det som var ämnat att simuleras, brunnsområde med återinfiltration och hydrauliskt svårgenomsläppliga lager, var i storleksordningen 1-10m. På denna nivå fanns det tämligen gott om information inom det aktuella området. För att kunna ansätta rimliga randvillkor behövdes dock en modellskala på 100m. Detta gjorde att stora delar av modellen kom att sakna information på totalpotential och lagerföljder utifrån fältmätningar. Det var också indirekt på grund av denna skillnad i skala som så stort antal celler behövdes i modellerna.

För att komma till rätta med skalproblemet beskrivet tidigare kan en metod som kallas teleskopisk nätförfining, (*telescopic mesh refinement, TMR*) eventuellt vara framgångsrik. Förenklat går metoden ut på att man gör en grov, storskalig, modell över området utan att beskriva intresseområdet speciellt noggrant. Det viktiga här är att kunna ansätta bra randvillkor till modellen. Man använder sedan simuleringsresultaten från den grova modellen till att sätta randvillkor på en modell som beskriver intresseområdet mer exakt. Detta kan sedan göras i flera steg tills man nått önskad modellstorlek. Metoden är tämligen rättfram men det kan vara svårt att utvärdera resultatet (Mehl m.fl., 2006).

Att mer korrekt beskriva hur det återinfiltrerade vattnet når grundvattenytan är svårt med den numeriska motor som nu användes (MODFLOW-2000). Ett alternativ är att använda en numerisk motor som förutom strömning i den mättade zonen även klarar omättad strömning. Till programmet Visual MODFLOW finns en sådan som tillägg (MODFLOW SURFACT). Att simulera omättad strömning kräver bl.a. att man kan bestämma den omättade konduktiviteten för området (Rehbinder, m.fl., 1995). I slutändan kan det visa sig att en sådan modell inte ger bättre resultat på grund av den ökade komplexiteten för att beskriva problemet.

Att använda sig av fler fältdata är ett sätt att göra modellen mer tillförlitlig. Efter det att den nu pågående (våren 2007) provpumpningen blir klar kommer nya värden på parametrar att skattas. Dessa kan förväntas ge bättre värden på bl.a. den hydrauliska konduktiviteten samt ge en klarare bild över hur de hydrauliska gränserna fungerar. I modellerna användes mycket höga värden på konduktiviteten i åsens kärna, som förhoppningsvis kan verifieras av den nya provpumpningen. Under provpumpningen kommer grundvattennivåerna att kontinuerligt mätas i området. Mätningarna kan sedan användas i vidare modellarbete till kalibrering och validering.

6. REFERENSER

6.1. LITTERATURREFERENSER

Andersson M.P., Woessner W.W., (2002). *Applied groundwater modeling*. Academic Press, San Diego.

Carlsson L., Gustafsson G., (1984). *Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik*. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Domenico P.A., Schwartz F.W., (1990). *Physical and chemical hydrogeology*, andra upplagan. John Wiley & Sons Inc, New York.

Fetter C.W., (2001). *Applied Hydrology*, fjärde upplagan. Prentice-Hall Inc., New Jersey.

Fromm E., (1991). *Varve Chronology and Deglaciation in South-Eastern Dalarna, Central Sweden*. GFF Avhandlingar och Uppsatser Nr 77, Uppsala.

Knutsson G., Morfeldt C-O., (2002). *Grundvatten*, tredje upplagan. Svenskt Tryck AB, Stockholm.

McDonald M.G., Harbaugh A.W., (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S Geological Survey, Vreston.

Mehl S., Hill M.C., Leake S.A., (2006). *Comparison of local grid refinement methods for MODFLOW*. Groundwater, Volym 44, sid. 792. National groundwater association.

Van Essen Instruments, (2003). *Operating instructions Diver CTD-Diver OTD-Diver*. Van Essen Instruments B.V.

Reilly T.E., Harbaugh A.W., (2004). *Guidelines for evaluating ground-water flow models*. Scientific Investigations Report 2004-5038. U.S Geological Survey, Vreston.

Ryttar P.A., (1995). *Lennheden hydrogeologisk undersökning*. Grundvattenteknik, Borlänge.

Stadsfullmäktiges i Falun Handlingar, (1925). Nr. 113.

Wang H.F., Anderson M.P., (1982). *Introduction to groundwater modeling*. Academic Press Inc., San Diego.

Waterloo Hydrogeologic Inc., (2004). *Visual MODFLOW v.4.0 User's manual*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario.

6.2. INTERNETREFERENSER

Borlänge Energi, (2007). <http://www.borlange-energi.se>, 19/4-2007.

Waterloo Hydrogeologic¹, (2007). <http://www.flowpath.com>, 14/6-2007.

Waterloo Hydrogeologic², (2007). <http://www.flowpath.com>, 25/5-2007.

6.3. REFERENSER TILL OPUBLICERAT MATERIAL

Midvatten AB opublicerat, (2007). *Dokumentation av hydrogeologisk undersökning inom projektet vattentäkt Lennheden*. Midvatten AB, Borlänge. Ej publicerat material.

Nordell P.O., (2007). *Landformer och jordarter omkring Dalälven mellan Bäsna och Båtsta*. Midvatten AB, Borlänge. Ej publicerat material.