

Upprättande av numerisk grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn

Construction of a numerical groundwater
model of the Sundsvall Port for petroleum
product distribution

Mårten Osanius

REFERAT

Upprättande av numerisk grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn

Mårten Osanius

Sundsvalls oljehamn är belägen på Vindskärsudde, cirka 2,5 km öster om Sundsvalls centrum. Sedan 1930-talet har petroleumprodukter hanterats inom Sundsvalls oljehamn. Lagring sker dels i cisterner ovan jord och dels i bergrumsanläggningar. Flertalet miljö- och geotekniska undersökningar under slutet av 1990-talet har visat att marken och grundvattnet i stora delar av oljehamnen är förorenade av petroleumkolväten och olja har påträffats i fri fas på grundvattnet på ett antal ställen. Sedan dess har marken och grundvattnet provtagits kontinuerligt.

Syftet med detta examensarbete var att upprätta en grundvattenmodell över Sundsvalls oljehamn med hjälp av programvaran MODFLOW. Modellen skall sedan kunna användas till att utvärdera olika scenarier med förändrad grundvattensituation. Exempel på ett sådant scenario kan vara då bergrummen inte längre behövs för lagring och man slutar pumpa ut grundvattnet, vilket medför att bergrummen fylls.

Data inhämtades dels genom platsbesök med provtagning och intervjuer och dels från tidigare markundersökningar, SMHI och Sundsvalls kommun. För att göra data kompatibla med varandra och tillämpbara i modellen genomfördes omfattande bearbetning. Identifiering av jordartslagerföljden skedde genom analys av borrhålsdata och de 38 stycken olika varianter av jordarter delades in i klasser där jordarter som antogs ha likvärdig hydraulisk konduktivitet fick utgöra en enhetlig jordart och gavs ett gemensamt värde. Det gav slutligen sex stycken marklager där bergytan utgjorde det understa lagret.

Själva modellen upprättades genom att först göra en konceptuell modell som sedan översattes till en matematisk modell. Kalibreringen av modellen resulterade i en relativt bra överensstämmelse mellan beräknade och observerade grundvattennivåer. Valideringen uppvisade något varierande resultat. Det tänkta flödet i åsen simulerades på ett bra sätt och visade, bland annat, att vatten rinner i åsen ländriktning, vilket stämmer överens med antaganden som gjorts. Skillnaden mellan beräknade och observerade värden på grundvattennivån kan förklaras av de olika marklagrens heterogenitet och de komplexa hydrogeologiska förhållanden som råder inom oljehamnen.

Denna typ av modell är svår att använda på det aktuella modellområdet. Oljehamnen har utsatts för stor antropogen påverkan både i jorden och på ytan. Bättre kunskaper om geologin i området, framförallt om det översta marklagret med fyllningen, skulle öka på säkerheten och noggrannheten i modellen.

Nyckelord: grundvattenmodellering, numerisk modell, oljehamn

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Villavägen 16, SE-752 36 UPPSALA
ISSN 1401-5765*

ABSTRACT

Construction of a numerical groundwater model of the Sundsvall Port for petroleum product distribution

Mårten Osanius

The Sundsvall port for petroleum product distribution is situated on Vindskärsudde, approximately 2.5 km east of Sundsvall town. Since the 1930s, petroleum products have been handled at the port. The products are stored both in tanks and in below ground storage facilities. Several environmental- and geotechnical investigations during the 1990s found that the soil and groundwater in most parts of the harbour is contaminated and in some places there is a product phase on the groundwater. Since then the soil and water has been sampled continuously.

The purpose of this thesis work was to establish a groundwater model covering the harbour using the software MODFLOW. The aim of the model was to be able to evaluate different scenarios with changes of the groundwater situation, e.g. when the below ground storage facilities are no longer needed and the groundwater no longer has to be pumped out.

Data were collected through a site visit which included measurements and interviews, by use of previous investigations, from the Swedish Meteorological and Hydrological Institute and from the Sundsvall Municipality. A thorough analysis and restructure of the data was carried out in order to make it compatible and importable to the model. The different soil layers were identified by analyzing bore hole data. 38 different types of soil were identified. These were grouped together into six layers according to their hydraulic properties.

The model was constructed by first creating a conceptual model which was translated into a numerical model. After calibrating the model, a relatively good agreement between observed and calculated groundwater levels was archived. The groundwater flow in the Sundsvall ridge was created in a satisfying way and was in compliance with earlier assumptions. The difference between calculated and observed groundwater levels can be explained by the heterogeneity of the different soil layers and the complex hydrogeological situation.

This kind of numerical groundwater model is difficult to use in an area like the Sundsvall Port. The port area has been subjected to significant anthropogenic affects both on the soil surface and under ground. It is likely that the accuracy of the model would increase with increased knowledge of the geology in the area, in particular the top soil layer consisting of various filling material.

Keywords: groundwater modeling, numerical model, port for petroleum product distribution

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

FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 20 poäng och ingår i civilingenjörsutbildningen i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet har utförts på Golder Associates AB i Stockholm och på plats i Sundsvall. Handledare för projektet har varit Anna Jonsson och Thomas Jansson på Golder Associates AB. Ämnesgranskare har varit Auli Niemi, professor i grundvattenmodellering vid Institutionen för geovetenskaper, *Luft-, vatten- och landskapslära*, Uppsala universitet. Examinator har varit Allan Rodhe, professor i hydrologi vid Institutionen för geovetenskaper, *Luft-, vatten- och landskapslära*, Uppsala universitet.

Ett stort tack till Kent Werner på Golder Associates AB för ovärderlig hjälp med modellerandet.

Slutligen vill jag tacka Åsa Dyberg som varit till stor hjälp i den skrivande processen och ställt många bra frågor som fått mig att fundera ett varv extra.

Stockholm, augusti 2006

Mårten Osanius

INNEHÅLL

1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND	2
2.1	Beskrivning av området	2
2.2	Geologi och hydrogeologi	3
2.3	Nederbörd och grundvattenbildning.....	3
3	TEORI OCH METODER	4
3.1	Grundvattenmodellering.....	4
3.2	Grundvattenströmning.....	5
3.2.1	Darcys lag	6
3.2.2	Kontinuitetsekvationen.....	7
3.2.3	Styrande ekvation vid grundvattenflöde.....	8
3.2.4	Randvillkor	8
3.3	Numeriska metoder	9
3.3.1	Finita differensmetoder	10
3.3.2	Upprättande av rutnät	10
3.4	Data	11
3.5	Konceptuell modell	12
3.6	Matematisk modell	12
3.7	Kalibrering och validering.....	13
3.8	Utvärdering av modellresultat.....	13
4	UTFÖRANDE	15
4.1	Platsbesök	15
4.2	Konceptuell modell	15
4.3	Upprättande av rutnät.....	17
4.4	Bearbetning av data.....	18
4.4.1	Topografi	18
4.4.2	Lagerföljder i marken.....	18
4.4.3	Bergytan	20
4.5	Villkor	20
4.5.1	Randvillkor	20
4.5.2	Grundvattenbildning.....	22
4.6	Korrigerig av celler	23
4.7	Hydraulisk konduktivitet	24
4.8	Kalibrering	24
4.9	Validering	27
5	RESULTAT	28
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	30
7	KÄLLFÖRTECKNING	32
7.1	Tryckta källor	32

7.2	Muntliga källor	33
7.3	Kartor	33
7.4	Datorprogram	33

Bilaga 1 Fotografier från platsbesöket

Bilaga 2a Översiktsbild i plan med sektioner markerade

Bilaga 2b Marksektioner

Bilaga 3 Resultatplottar

1 INLEDNING

Sedan 1930-talet har det pågått hantering av petroleumprodukter inom Sundsvalls oljehamn. Hamnen är centrum för hanteringen av petroleumprodukter för mellersta Norrland, en verksamhet som successivt utökats under årens lopp. Petroleumprodukterna lagras dels i cisterner ovan jord, dels i bergrumsanläggningar.

Miljö- och geoteknikföretaget Golder Associates AB engagerades våren 1997 för miljötekniska markundersökningar på ett delområde i Sundsvalls oljehamn. Det konstaterades att marken på flera ställen var förorenad med petroleumkolväten och man hittade även olja i fri fas på grundvattnet. När Vägverket senare samma år genomförde en geoteknisk undersökning i anslutning till en annan del av hamnen uppgavs det att de jordprover som togs luktade olja. Mot bakgrund av detta beslutade Sundsvalls hamn och de oljebolag som är verksamma inom hamnen att kartlägga föroreningssituationen i hela oljehamnen. (Jansson, 1998)

Golder Associates AB har sedan dess, på uppdrag av Sundsvalls Hamn AB, kontinuerligt genomfört undersökningar av såväl jord som grundvatten. Resultaten har visat att marken och grundvattnet i vissa delar av oljehamnen är förorenade av petroleumkolväten och att olja påträffas i fri fas på ett antal ställen. Oljan och övriga petroleumkolväten härrör från spill, vanligast i samband med in- och utlastning från oljetankers. Men även läckage från markförlagda ledningar har skett. (Jansson, 1998) Det har dock inte skett några läckage från de underjordiska bergrum där petroleumprodukter förvarats. Att olja finns i fri fas i marken har lett till att ett grundvattensaneringsprojekt startade under 2005.

Grundvattennivåerna i området uppvisar stor rumslig variation vilket gör det svårt att förutsäga i vilken riktning grundvattnet rör sig. I de norra delarna av området sker avrinningen i riktning mot Sundsvallsfjärden (Östersjön). I de södra delarna sluttar berggrunden ner mot Sundsvallsåsen, vilken fungerar som ett dränerande dike. Det gör att grundvattnet istället rör sig mot åsen. Sundsvallsåsen utgör för övrigt en potentiell grundvattentäkt. I de centrala delarna är strömningsmönstret mer komplicerat, något som delvis orsakas av de underliggande bergrummen. Eftersom grundvattnet ständigt strömmar mot och pumpas från bergrummen, ger det upphov till ett lägre grundvattentryck runtomkring bergrummen. Det, i sin tur, ger ett lägre grundvattentryck i de överliggande jordlager som, via sprickzoner, står i kontakt med berget runt bergrummen.

Syftet med detta examensarbete var att bygga upp en grundvattenmodell över ovan nämnda område, med hjälp av programvaran MODFLOW. Modellen skall sedan kunna användas till att utvärdera olika scenarier med förändrad grundvattensituation, där grundvattnets strömningsmönster förändras, och hur det i sin tur kan påverka spridningen av föroreningar i marken. Exempel på ett sådant scenario kan vara då bergrummen ska avvecklas. Sedan 1997 har Golder Associates AB genomfört markundersökningar och Sundsvalls oljehamn har utfört grundvattenmätningar i oljehamnen. Det innebär att tillgången på data är god, vilket i sin tur gör det möjligt att skapa en realistisk datormodell.

2 BAKGRUND

På Vindskärsudde, ungefär 2,5 km öster om Sundsvalls centrum (figur 2.1), fanns under senare delen av 1800-talet ett varv, Vindskärsvarv, med timmerupplag och en ångsåg. Sedan dess har det bedrivits schaktarbeten inom området i olika omgångar, vilket väsentligt har ändrat markförhållandena. Till exempel har vägbyggnationer medfört att, på vissa platser, upp till sju meter jord har schaktats bort. Uppemot 120 000 m³ schaktmassor har deponerats som utfyllnadsmaterial.

Landhöjningen den senaste 100 åren, samt utfyllnad med diverse massor, har även förändrat strandlinjen. Det är särskilt tre vattenområden som har blivit utfyllda: Vindskärsbukten är utfylld med cirka 55 000 m³, Kubikensborg har blivit utfyllt med 63 000 – 100 000 m³ schaktmassor som sedan har tryckt upp sediment från havsbotten till en två meter hög vall och slutligen har västra sidan av Vindskärsudde fått sin strandlinje förflyttad ungefär 70 meter ut från den ursprungliga (innan 1917) genom cirka 48 000m³ schaktmassor utefter en 640 meter lång sträcka.

2.1 BESKRIVNING AV OMRÅDET

Sundsvalls oljehamn, fastighetsbeteckning Skönsmon 2:1, täcker en yta av cirka 16 hektar och är belägen på Vindskärsudde. Hamnen omgärdas av Sundsvallsfjärden i norr och väster, industriområde i väster och E4:an söder innan Sundsvallsåsen tar vid (studiebesök, 2004). Verksamheten i hamnen omfattar distribution, hantering och lagring av petroleumprodukter som bensin, diesel, flygfotogen, eldningsolja, additiver m.m. Dessa lagras både i cisterner ovan jord och i bergtrum belägna direkt under depåområdet (Jansson, 1998).

Det har i flera av undersökningarna inom hamnen konstaterats att det på vissa platser finns olja i fri fas på grundvattenytan. Särskilt på de platser där grundvattenytan är relativt låg finns det ansamlingar av olja. (Jansson, 1999)



FIGUR 2.1 Översiktskarta över Sundsvall med oljehamnen inringad. (copyright Lantmäteriverket, ärende nr M2004/2092)

2.2 GEOLOGI OCH HYDROGEOLOGI

Markytan inom oljehamnen förefaller att vara relativt plan, förutom i det nordvästra hörnet där berget ligger i dagen. Överst påträffas ett lager med fyllning, som övervägande består av sand och grus men även en del gamla byggrester som tegel, metallbitar, glas och stockar. Detta indikerar att delar av området tidigare använts som avfallsupplag. Under fyllningen påträffas ett diskontinuerligt lager med moränlera av varierande utbredning och mäktighet. Därunder påträffas siltiga avlagringar med linser av fuktig sand. Detta lager följs av fin- till mellankornig sand, som ställvis är grov, ned till berget. Vissa av markskikten står i förbindelse med havet eller åsen där vattentrycket är lägre. Den komplexa geologin gör att grundvattnets strömningsmönster blir komplicerat.

Berget är i dagen på områdets nordvästra hörn varefter bergytan sluttar relativt kraftigt neråt mot Sundsvallsåsen söderut. Eftersom det naturligt finns sprickor och sprickzoner i berget kan grundvatten tränga in i bergrummen. För att bergrummen ska hållas fria från vatten har grundvattenridåer anlagts. Det innebär att grundvatten pumpas bort från det berg som omger bergrummet. Det, i sin tur, medför att det bildas en avsänkning av grundvattenytan, samt en strömning av grundvatten mot denna avsänkning.

2.3 NEDERBÖRD OCH GRUNDVATTENBILDNING

Inom oljehamnen domineras markytan av hårdgjorda ytor av olika slag, mestadels asfalt (se figur 2.2). Där markytan inte är hårdgjord består den av hårt packad singel eller upptas av byggnader. Andelen infiltrerbar mark är alltså liten. Dessutom förs vatten bort från markytan via ett dagvattensystem. Det finns ingen direkt växtlighet att tala om inom hamnområdet, förutom enstaka ogräs, vilket gör att transpirationen kan antas vara nästintill obefintlig. Detta sammantaget medför att endast en liten del av den totala nederbörden infiltrerar marken och kan bidra till grundvattenbildningen.



FIGUR 2.2 Flygfoto från söder över Sundsvalls oljehamn. Bilden illustrerar den lilla andelen infiltrerbar mark. (OKQ8 AB, 2003-09-22)

3 TEORI OCH METODER

3.1 GRUNDVATTENMODELLERING

En modell ger en mer eller mindre förenklad bild av verkligheten. Det är lämpligt att inleda en grundvattenundersökning med att upprätta en konceptuell hydrogeologisk modell. En sådan är en kvalificerad bedömning i form av en generaliserad beskrivning och/eller principfigur av hur ett grundvattensystem fungerar i stort. Från den konceptuella modellen kan man sedan konstruera en matematisk modell där ytterligare förenklingar oftast är nödvändiga. (Knutsson och Morfeldt, 1995)

I vissa förenklade fall kan en analytisk lösning tas fram. Men på grund av att naturen nästan undantagslöst är heterogen, oregelbunden och ibland anisotropisk, kan förenklingar oftast inte göras. Därför används numeriska lösningsmetoder. (se till exempel Charbeneau, 2000)

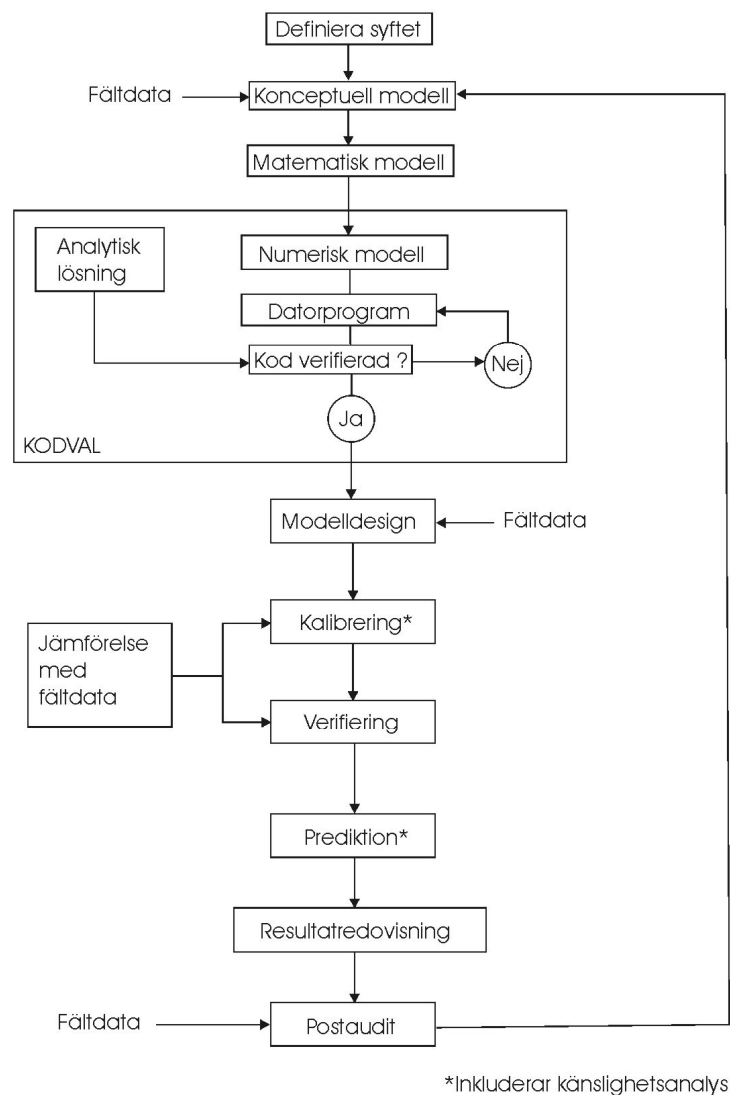
En vanlig avsikt med en grundvattenmodellering är att ta reda på hur vattnet i ett grundvattensystem beter sig. Strömningsmönster tas fram i en virtuellt uppbyggd modell. Detta utförs med hjälp av insamlade data och förenklingar av de ofta komplexa systemen. Syftet eller vilka frågor som ska kunna besvaras med hjälp av modellen måste vara väl definierade, och är avgörande vid valet av styrande ekvationer och lösningsmetodik (Anderson och Woessner, 2002).

En konceptuell modell tas fram som sedan översätts till en matematisk modell och vidare till en numerisk modell. För att numeriskt lösa den matematiska modellen diskretiseras ekvationerna. Den numeriska modellen kan antingen implementeras i befintlig programvara eller programmeras i ett beräkningsprogram, så som Matlab eller Fortran. Modellen delas sedan in i mindre beräkningsvolym, detta kallas *grid design*.

Beslut måste fattas om tillräckligt med data för att modellera över tiden (*transient*) finns eller om en tidsberoende (*steady-state*) modellering skall genomföras. Vid tidsberoende modellering, krävs förutom randvillkor även begynnelsevillkor. (Anderson och Woessner, 2002)

För att erhålla en överensstämmelse mellan befintliga data, fältmätningar, och modellgenererade resultat måste modellen utvärderas och kalibreras. Detta utförs antingen genom *trial-and-error* eller med ett automatiserat parameteruppskattningsprogram, till exempel PEST (*parameter estimation*). En validering görs för att testa modellen mot mätdata som inte har använts i kalibreringen. Därefter kan modellen användas för att utvärdera olika scenarier. Vid både kalibrering och användning av modellen kan en känslighetsanalys genomföras. Känslighetsanalysen går ut på att olika in-parametrar förändras och deras inverkan på resultatet studeras. Syftet är att se vilka parametrar som påverkar resultatet mest och således är känsligast för störningar eller fel. (Anderson och Woessner, 2002)

Generell arbetsgång vid grundvattenmodellering ses i figur 2.3.



FIGUR 2.3 Generell arbetsgång vid grundvattenmodellering (Andersson och Woessner, 1992).

3.2 GRUNDVATTENSTRÖMNING

Vid beräkningar av grundvattnets strömningshastighet skiljer man på Darcyhastigheten (skenbara medelströmhastigheten) och den verkliga medelströmhastigheten eller nettohastigheten, som är vattnets verkliga hastighet (Knutsson och Morfeldt, 1995). Om grundvattennivåerna i ett stort antal punkter i ett område är kända kan en nivåkarta för grundvattenytan, vid öppen akvifär, eller en karta för den piezometriska ytan, vid slutet akvifär, upprättas. Den horisontella komponenten i strömningsfältet förutsätts här vara helt dominerande. Ur denna typ av kartor kan strömningsmönstret och grundvattnets in- respektive utströmningsområden utläsas. (Knutsson och Morfeldt, 1995)

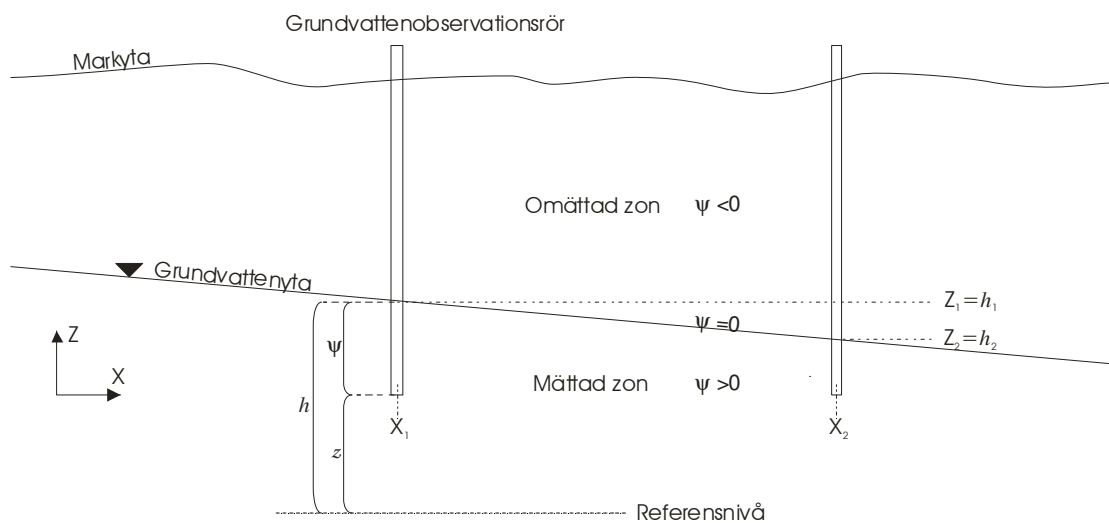
Grundvattenflödet drivs av en hydraulisk gradient vilket är ekvivalent med skillnad i den totala potentialen över en viss sträcka. Totala potentialen (h) är höjden en vattenyta ställer in sig på i ett grundvattenrör och är således väldigt enkel att mäta i fält, se figur 3.1. Den kan delas in i två komponenter, tryckpotential (ψ) och lägespotential (z), vilket ger uttrycket

$$h = \psi + z \quad (3.1)$$

Tryckpotentialen är vattnets tryck i förhållande till atmosfärens. Det innebär att i den omättade zonen är tryckpotentialen negativ, på grundvattenytan är den noll och i den mättade zonen är den positiv (se figur 3.1). Lägespotentialen är förändringen i förhållande till en bestämd referensnivå. Den är ett mått på det arbete som krävs för att flytta en massenhet i ett kraftfält. (Grip och Rodhe, 1994)

Den hydrauliska gradienten uppstår när det finns skillnader i den totala potentialen, se ekvation 3.1. Det bygger på principen att vatten flödar från en högre totalpotential till en lägre. Om den totala potentialen är känd i flera punkter kan ett potentialfält ritas upp. Utifrån det kan en potentialyta interpoleras fram och på så vis riktningen på flödet bestämmas. (Domenico och Schwartz, 1997)

Hydraulisk gradient i x-riktning.
$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \quad (3.2)$$



FIGUR 3.1 Bild som illustrerar de grundläggande begreppen inom grundvattenströmning.

För att ta fram den styrande ekvationen som beskriver grundvattenflödet i modellen används två kända samband: 1) Darcys lag och 2) kontinuitetsekvationen.

3.2.1 Darcys lag

Darcys lag, som är empirisk, uttrycker sambandet mellan drivande kraft och flöde i marken och är grunden för nästan alla beräkningar av vattenflödet i markvattenzonen och grundvattenzonen (Grip och Rodhe, 1994). Sambandet visar att flödes hastigheten är proportionell mot den hydrauliska gradienten. Darcys lag för ett anisotropiskt (hydrauliska

konduktiviteten inte densamma i alla riktningar) medium definieras enligt ekvation 3.3 (Freeze och Cherry, 1979).

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Där

- q_x, q_y, q_z – flödeshastighet i x-, y- respektive z-led
- K_x, K_y, K_z – hydraulisk konduktivitet i x-, y- respektive z-led
- h – totalpotential
- $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}$ – hydraulisk gradient i x-, y- respektive z-led

eller på vektoriell form, med $K_x = K_y = K_z$, (isotrop medium),

$$q = -K\nabla h \quad (3.4)$$

(Charbeneau, 2000)

3.2.2 Kontinuitetsekvationen

Kontinuitetsekvationen säger att för en godtycklig kontrollvolym är inflödet plus förändring i lagringen lika med utflödet. Detta gäller under antagande om konstant densitet då det egentligen är massflöde som avses.

$$\text{utflöde} - \text{inflöde} = \text{förändring i lagring}$$

Utryckt på matematisk form blir konserveringen av massa för en tänkt volym med dimensionerna $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.5)$$

där

- R^* – Källa / Sänka
- $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ – Förändring i volym över tid

Högerledet i ekvation 3.5 kan även skrivas som:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.6)$$

där

S_s – Specifik lagring

$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ – Förändring av totalpotential över tid

Ekvation 3.5 kombinerat med ekvation 3.6 ger den slutgiltiga formen av vattenbalans ekvationen:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (3.7)$$

(Andersson och Woessner, 2002)

3.2.3 Styrande ekvation vid grundvattenflöde

Den styrande ekvationen vid grundvattenflöden är en kombination av ekvation 3.3 och ekvation 3.7, som ger en partiell differentialekvation (PDE):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.8)$$

Ekvation 3.8 beskriver, kombinerat med randvillkor och begynnelsevillkor, flödet i ett anisotropiskt medium i tre dimensioner.

3.2.4 Randvillkor

Randvillkoren är matematiska uttryck som bestämmer den sökta variabeln, till exempel grundvattennivån, eller derivatan av den sökta variabeln, till exempel grundvattenflödet, vid randen/kanten av modellområdet.

Det finns tre matematiska varianter av hydrogeologiska randvillkor

- *Dirichlet*, Bestämd totalpotential

$$h = C \quad (3.9)$$

C – bestämt värde

- *Neumann*, Bestämd derivata av grundvattnets totalpotential

$$\frac{dh}{dN} = C \quad (3.10)$$

C – bestämt värde

N – normalen till gränsytan

- *Cauchy*, En blandning av de två första, ett värde på flödet ges av ett givet värde på nivån.

Det är mycket viktigt att randvillkoren upprättas på ett korrekt sätt då modellen definieras. Vid steady-state simuleringar är det i princip randvillkoren, och topografin, som bestämmer hur flödesmönstret utfaller. Gränserna kan vara fysiska eller hydrauliska. Exempel på fysiska gränser är ogenomsläppligt berg eller sjöar. Hydrauliska gränser är till exempel vattendelare eller flödeslinjer. (Andersson och Woessner, 2002)

3.3 NUMERISKA METODER

Ekvation 3.8 går att lösa analytiskt i vissa specialfall, om förenklingar görs, till exempel antaganden om homogenitet eller endimensionellt flöde. Oftast går det inte att göra dessa förenklingar och då måste numeriska lösningsmetoder användas. Det finns ett flertal numeriska metoder att tillgripa vid lösning av grundvattenflödesproblem, till exempel finita differensmetoder, finita elementmetoder, integrerade finita differensmetoder och analytiska elementmetoder (Anderson och Woessner, 2002).

Det finns explicita och implicita lösningsmetoder. De explicita använder endast värden från tidigare nivåer vilket gör dem ganska enkla och relativt snabba. Implicita metoder är bättre eftersom de är ovillkorligt stabila och större steglängder kan användas. Dock blir varje steg mer krävande då ett system av ekvationer måste lösas. (Heath, 1997)

För att kunna överföra den matematiska modellen till en numerisk modell måste den diskretiseras till ett antal algebraiska ekvationer. Det är här valet av numerisk metod kommer in. Av de ovan nämnda används i huvudsak två sätt för att diskretisera en matematisk modell på, finita differensmetoder (FDM) och finita element metoder (FEM). De båda metoderna konverterar den matematiska modellen till en form som kan lösas med hjälp av en dator. Det resulterande systemet med algebraiska ekvationer kan uttryckas på matrisform. Detta system kan sedan delas upp i: 1) en koefficientmatris, 2) en vektor med alla sökta värden på totala potentialen och 3) en vektor med villkoren för den totala potentialen, se ekvation 3.8. (Domenico och Schwartz, 1997)

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad (3.11)$$

$[A]$ – Koefficientmatrisen
 $\{h\}$ – Vektor med sökta värden på totala potentialen
 $\{q\}$ – Vektor med villkor för den totala potentialen

Koefficientmatrisen är ofta bandad och gles vilket kan utnyttjas vid val av lösningsalgoritm (Heath, 1997).

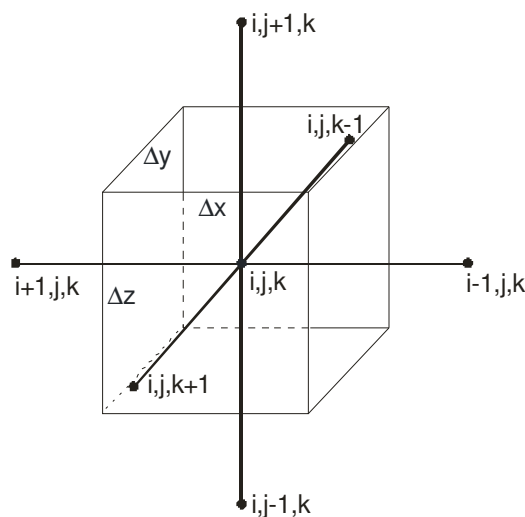
För att kunna beräkna potentialfältet i ett område måste det delas in i ett rutnät av beräkningsceller. Då finita differensmetoder används delas området in i ett regelbundet vinkelrätt rutnät, medan finita elementmetoder kan använda ett mer oregelbundet rutnät. Detta gör finita elementmetoder mer flexibla. Gemensamt för de båda metoderna är att totala potentialen beräknas i varje nod (Domenico och Schwartz, 1997).

I en finit elementmetod kan de hydrauliska egenskaperna anges antingen till noden eller till elementet. Olika modeller gör på olika sätt och det är ofta upp till användaren att bestämma. Om linjära triangulära element används kan det vara lättare att tillskriva egenskaperna till noden eftersom det alltid finns färre noder än element. Ifall det råder kraftiga variationer i akvifärens egenskaper bör parametrarna anges till elementen istället. (Anderson och Woessner, 2002)

MODFLOW använder finita differensmetoder varför dessa beskrivs utförligare nedan.

3.3.1 Finita differensmetoder

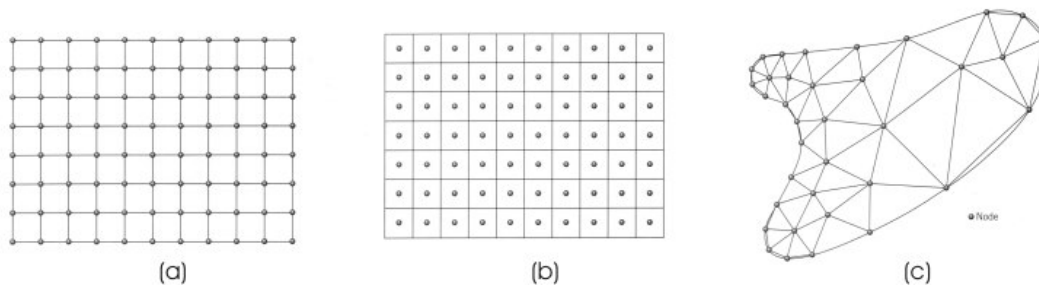
Finita differensmetoder används för att numeriskt lösa ordinära differentialekvationer (ODE) och partiella differentialekvationer (PDE). Derivatorna som representerar kontinuerliga gradienter i ODE:n eller PDE:n approximeras med finita differenser och en numerisk lösning beräknas i varje nod. Noden representerar ett medelvärde för den aktuella beräkningsvolymen (se figur 3.2). Felet som uppstår vid denna typ av approximation, när man ersätter en oändlig derivata med en ändlig differens, kallas diskretiseringsfel eller trunkeringsfel. (Heath 1997).



FIGUR 3.2 Beräkningsmolekyl, med en nod i centrum, för en beräkningscell med dimensionerna $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

3.3.2 Upprättande av rutnät

För att kunna lösa differentialekvationer måste området delas in i mindre avgränsade beräkningsområden, så kallade celler. Inom eller i hörnen av varje cell placeras en beräkningspunkt, så kallad nod. Cellindelningen åstadkoms med hjälp av ett rutnät, *grid*. Rutnätet görs tätare där större noggrannhet krävs. Sett i plan finns det två olika typer av rutnät, ett för finita differensmodeller, rätvinkliga och fyrkantiga rutor, och ett för finita elementmodeller, oregelbundna trianglar, se figur 3.3.



FIGUR 3.3 Olika typer av modellområdesindelning i rutnät. (a) visar en finit differensindelning med noder i hörnen av varje beräkningscell, (b) visar en finit differensindelning med noder i mitten av varje beräkningscell och (c) visar en finit elementindelning. (Domenico och Schwartz, 1997)

För finita differensmodeller gäller att i varje beräkningscell är in-parametrarna konstanta och ett värde på grundvattennivån beräknas för varje nod. MODFLOW använder detta.

Det är viktigt att välja rätt storlek på celler/rutor. Ett stort antal små celler ger stor noggrannhet och hänsyn kan tas till små lokala variationer. Nackdelen är att modellen kräver noggrannare indata och blir väldigt tung att köra. Det bästa är att förfina rutnätet kring intressanta områden och kring punkter med stora lokala flödesvariationer, till exempel uttagsbrunnar. (Andersson, Woessner 2002)

Övergång från stora celler (grovt rutnät) till mindre celler (fint rutnät) måste ske successivt för att undvika att numeriska problem uppstår då modellen körs. Maximalt bör inte storleken ändras med mer än 50 % mellan angränsande celler (muntligen från Kent Werner, Stockholm 2005).

3.4 DATA

De data som krävs för att utföra en grundvattenmodellering kan delas in i två kategorier; 1) modellens geometri (den rumsliga strukturen) och 2) hydrogeologiska data. Data som hör till modellens geometri består bland annat av en terrängmodell, som baseras på topografiska data, samt utbredning och mäktighet av de olika jord- och berglager som skall ingå. (Andersson och Woessner, 2002)

Topografiska data, inklusive nivåer på ytvattendrag, kan erhållas antingen genom flygmätningar eller avvägning med teodolit. För att avgränsa de geologiska enheterna i en markvolym kan till exempel sondering, borrhning, användas alternativt används någon typ av geofysisk mätmetod som till exempel markradar eller VLF. (Triumpf, 1992)

Till hydrologiska data hör grundvattennivåer, nederbörd, nivåer på ytvattendrag, hydraulisk konduktivitetsfördelning för de olika jord- och berglagren samt värden på evapotranspirationen (Andersson och Woessner, 2002). Grundvattendata erhålls genom att sätta grundvattenobservationsrör som antingen manuellt lodas vid bestämda tidpunkter eller så installeras automatloggrar som kontinuerligt mäter grundvattenytans fluktuationer.

Nederbörds- och temperaturdata erhålls från väderstationer. I Sverige finns vanligen tabellerade värden publicerade av SMHI. För att kunna beräkna grundvattenbildningen krävs även en uppskattning av marktäckningen samt värden på evapotranspirationen.

Marktäckningen kan uppskattas med hjälp av flygfotografier och GIS. Evapotranspirationen beräknas med hjälp av empiriska formler utifrån kända värden på bland annat nederbörd, temperatur och solinstrålning (Jones, 1997).

Den hydrauliska konduktiviteten är ett mått på jord- och berglagrens vattengenomsläpplighet. Eftersom jordarter kan ha vitt skilda egenskaper, kan således även den hydrauliska konduktiviteten variera kraftigt. Lägst genomsläpplighet, och därmed lägst värde på den hydrauliska konduktiviteten, har tätt berg medan grovt grus har den största genomsläppligheten, upp till 12 tiopotenser högre. För att ta fram värden på de hydrauliska konduktiviteter finns i huvudsak tre olika sätt; fältförsök, labbtester och halvempiriska eller empiriska beräkningar utgående ifrån kornstorleksfördelningar. Mest noggranna och tillförlitliga är fältförsök med till exempel pumptester eller spårämnesförsök. I brist på pumptester är det vanligt att tabellerade värden används, se tabell 3.1. (Domenico och Schwartz, 1997)

TABELL 3.1 Tabell över hydrauliska konduktiviteter från Domenico och Schwartz, 1997.

Material	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
Grus	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Grov sand	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
Medel sand	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
Fin sand	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
Silt, löss	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
Morän	$1 \times 10^{-12} - 2 \times 10^{-6}$
Lera	$1 \times 10^{-11} - 5 \times 10^{-9}$

3.5 KONCEPTUELL MODELL

En konceptuell, eller begreppsmässig, hydrogeologisk modell är en schematisk beskrivning av ett grundvattensystem med en översiktlig genomgång av grundvattenflödet och vad som påverkar det. Den skall i generella drag redogöra för geohydrologin inom området, till exempel grundvattendelare, ytvattendrag mm. Även nederbördsdata och topografin bör vara med samt en avvägning av vilka delar av det verkliga systemet som skall vara med och vilken detaljeringsnivå modellen skall ha. Syftet med att upprätta en konceptuell modell är att identifiera och förenkla egenskaper och processer samt att organisera fältdata för att kunna få en översikt över området.

3.6 MATEMATISK MODELL

När den konceptuella modellen skall omsättas till en matematisk modell måste först mätparametrar från fältdata anpassas till den skala man valt att ge modellen. En beräkningscell i den matematiska modellen ges samma egenskaper som en viss mätpunkt i fält. Storleken på beräkningscellen bestäms av modellens skala. Vad som avgör hur fältdata anpassas till modellskalan varierar beroende på vad syftet är med modellen. Nästa steg är att definiera hur många beräkningsceller som skall ges samma egenskaper som en viss punkt, det vill säga hur stor volym i modellen som mätpunkten i fält ska representera. För att göra det, måste den rumsliga utbredningen av likartade faktorer identifieras, till exempel utbredningen och tjockleken av en viss jordart. Ifall en beräkningscell omfattas av två skilda egenskaper

används antingen det geometriska eller det aritmetiska medelvärde av de två egenskaperna, beroende på om olikheterna uppträder slumpmässigt eller regelbundet. Resultatet blir att modellens rutnät delas in i zoner, så att vissa uppsättningar av noder har samma egenskaper. (Andersson och Woessner 2002)

3.7 KALIBRERING OCH VALIDERING

Modellen måste kalibreras och sedan, om tillräckligt med data finns, även valideras för att man ska få en uppfattning om hur pass väl den överensstämmer med verkliga förhållanden. Vid både kalibrering och validering används uppmätta data som referens, men syfte och tillvägagångssätt skiljer sig åt. Som referens vid kalibreringen används data från ett år som anses vara så representativt som möjligt. En körning av modellen, med indata för det aktuella året, resulterar i ett beräknat värde. Detta jämförs med det uppmätta värdet, det vill säga resultatet utvärderas (se 3.8). Beroende på hur stor skillnaden är mellan beräknat och uppmätt värde, måste indata justeras. Efter justering av indata görs en ny modellkörning vars resultat utvärderas än en gång. Förfarandet fortskrider till dess att överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta värden är så god som möjligt.

Syftet med valideringen är att kontrollera att de indatajusteringar som har utförts ger en bra överensstämmelse även för andra år, eller andra flödesförhållanden, än det som användes vid kalibreringen. Alltså används uppmätta data från andra år som referensvärden vid körning och utvärdering av modellen.

3.8 UTVÄRDERING AV MODELLRESULTAT

Modellresultatet kan utvärderas genom att titta på ett antal olika statistiska parametrar, till exempel *medelresidualen*, *absolutbeloppet av medelresidualen*, *kvadratroten ur medelkvadraten* eller *Normaliserade kvadratroten ur medelkvadraten*. Dessa parametrar är olika mått på hur väl beräknade värden stämmer överens med uppmätta. De definieras enligt följande:

$$\text{Medelresidualen} \quad \bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3.12)$$

I vissa fall då både överskattade och underskattade värden finns med kan dessa ta ut varandra och en medelresidual nära noll erhållas. Detta kan alltså felaktigt visa att kalibreringen och överensstämmelsen är bra.

$$\text{Absolutbeloppet av medelresidualen} \quad |\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i| \quad (3.13)$$

Detta värde visar den absoluta storleken på residualen vilket alltså är en bättre kalibreringsindikator än medelresidualen.

Kvadratroten ur medelkvadraten

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (3.14)$$

Normaliserade kvadratroten ur medelkvadraten

$$RMS_{norm} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}}{(x_{obs})_{min} - (x_{obs})_{max}} \quad (3.15)$$

$$R = h_m - h_s$$

n – antalet mätpunkter

h_m – uppmätt hydraulisk totalpotential

h_s – beräknad hydraulisk totalpotential

$(x_{obs})_{min} - (x_{obs})_{max}$ – Skillnad mellan högsta och lägsta uppmätta värdet på totalpotentialen.

Normalized Root Mean Squared är en procentsats som ger ett värde på hur bra de beräknade värdena är anpassade till de uppmätta. Till skillnad från standard *Root Mean Squared* tar den även hänsyn till antalet datapunkter vilket därför ger ett mer representativt värde. (Waterloo hydrogeologic Inc., 2003). Andersson och Woessner (2002) framhåller *Root Mean Squared* som det bästa kvantitativa måttet förutsatt att felet följer en normalfördelning. MODFLOW manualen menar att *Normalized Root Mean Squared* är ett bättre mått på överensstämmelsen.

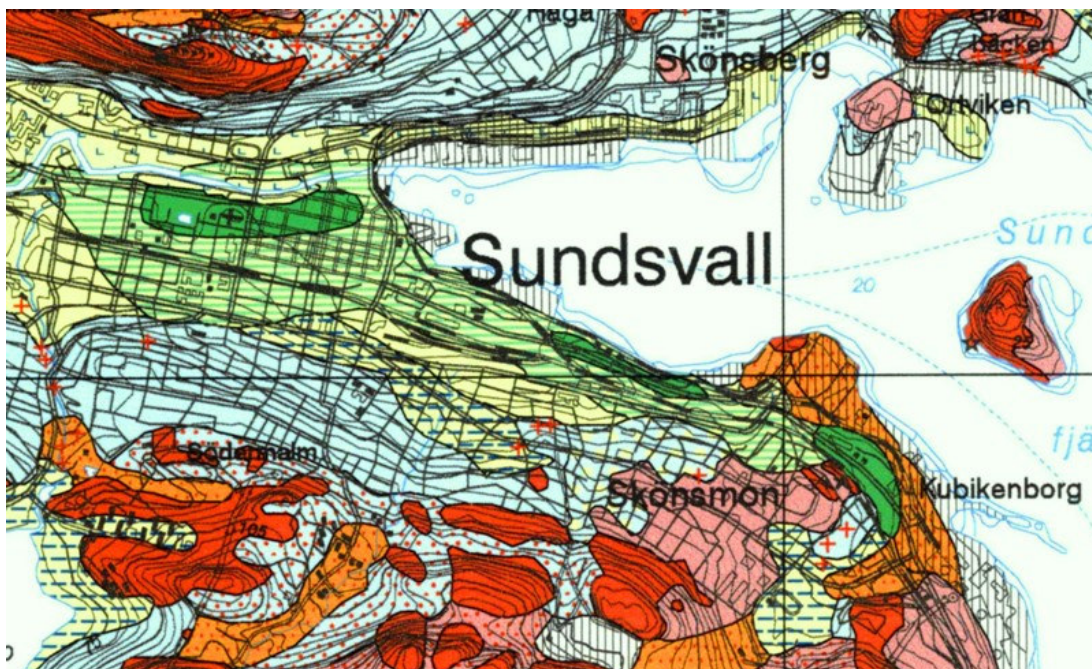
4 UTFÖRANDE

4.1 PLATSBESÖK

Som utgångspunkt för den aktuella modellkonstruktionen genomfördes ett platsbesök i syfte att få en allmän uppfattning om topografi och marktäckning i oljehamnen. Genom den okulära besiktningen identifierades platser där berget kom i dagen. Det konstaterades även att det knappt förekom någon växtlighet, utan marken täcktes mest av grus, singel och asfalterade ytor. Vidare utfördes grundvattenmätningar med tvåfaslod där både vattenytan och oljeytan mättes i marken. Lennart Engberg, ansvarig för Sundsvalls oljehamn, redogjorde för oljehamnens historia och de aktiviteter som har ägt rum genom åren. Bland annat omtalades att en del olyckor skett, bland annat med spill vid lastning och lossning av petroleumprodukter. Dessa spill, tillsammans med läckande ledningar, har bidragit till att det finns petroleumkolväten i fri fas på grundvattenytan. Besöket dokumenterades även med fotografier, se bilaga 1.

4.2 KONCEPTUELL MODELL

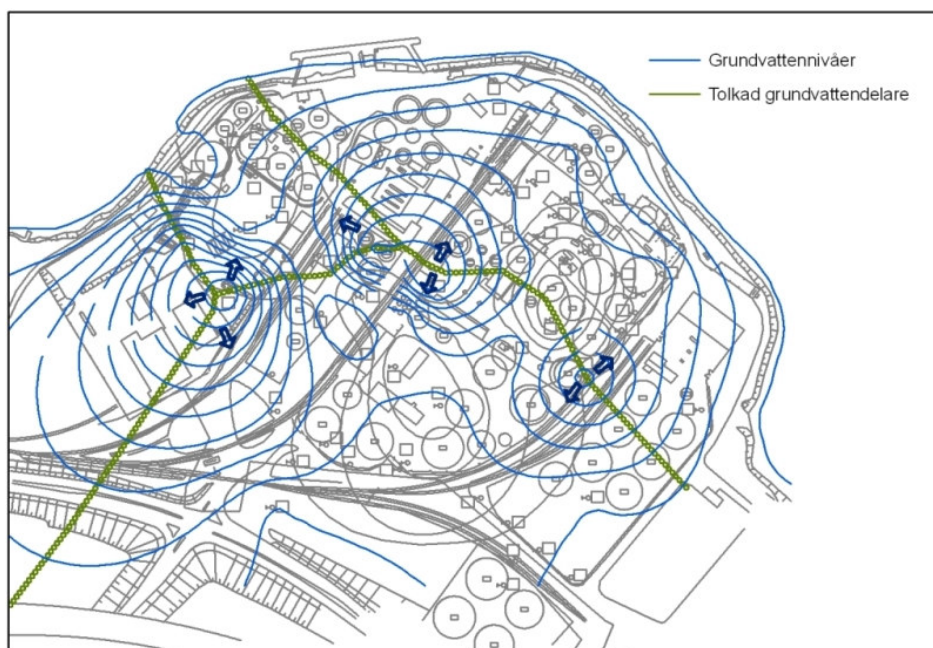
För att få en överblick av grundvattenflödena inom modellområdet behövdes både det regionala och lokala strömningsmönstret identifieras. Det regionala strömningsmönstret togs fram genom studier av en jordartskarta, som även visar topografin, från SGU (Kvitto plott JOGI 17H Sundsvall SO), se figur 4.1. Grundvattnet antas följa topografin och således rinna från den högre höjden uppe på Södra stadsberget ner, nord-nordost, mot åsen som ligger i en bergssvacka. Åsen i sin tur, antogs ha en stor vattenförande förmåga vilket ger upphov till ett kraftigt grundvattenflöde i åsens längdriktning ost-sydost.



FIGUR 4.1 Urklipp från jordartskarta. Åsen syns som det grönfärgade på bilden.

För att få en uppfattning om det lokala strömningsmönstret användes översiktliga beskrivningar av geologin och lagerföljder inom området (Jansson, 2000). Dessutom kunde isolinjer för grundvattenytan interpoleras fram utifrån befintliga grundvattendata (Jansson,

1998). På den södra delen av udden strömmar grundvattnet i sydlig riktning. Därför antogs att Sundsvallsåsen fungerar som ett dränerande dike (se figur 4.2).

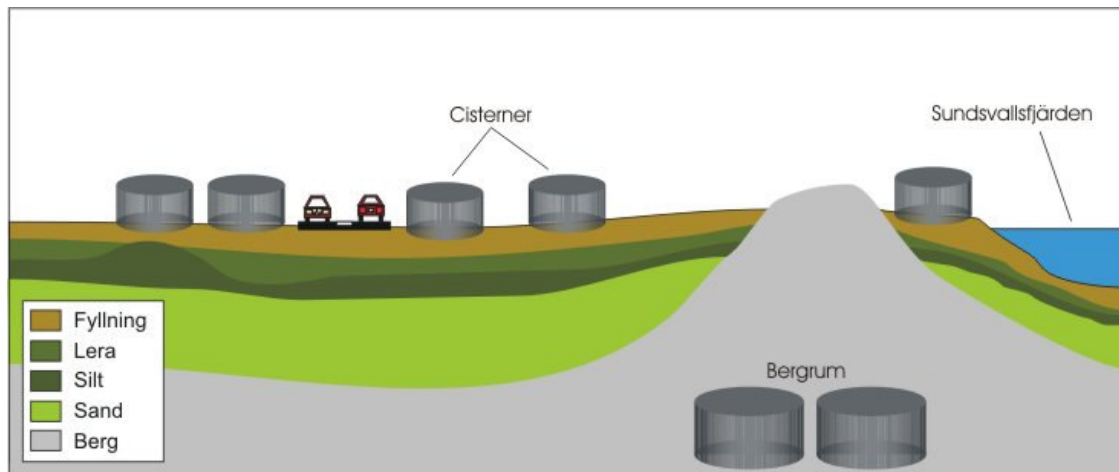


FIGUR 4.2 Schematisk bild av Vindskärsudde där isolinjer för grundvattennivåer, tolkade grundvattendelare och flödesriktningar (blå pilar) har ritats in (Jansson, 99-449. 1999). Åsen befinner sig i bildens nederkant, strax söder om udden.

Modellområdet avgränsas i norr och öster av Sundsvallsfjärden, vilket innebär att en konstant trycknivå kan användas där. I och med Sundsvallsåsens dränerande effekt antogs att grundvattnet i åsen huvudsakligen strömmar i åsens längdriktning. Därför ansattes en grundvattendelare i åsens mitt som definieras som en gräns över vilket det inte sker något flöde. På grund av att det är svårt att hitta en hydrologisk gräns inom rimligt avstånd västerut sätts en gräns med konstant inflöde av vatten tvärs igenom åsen strax väster om Vindskärsudde.

Infiltrationen antogs vara nästintill obefintlig på de platser där berg i dagen förekommer. Även den stora andelen hårdgjorda ytor gjorde det rimligt att anta att infiltrationen, och därmed grundvattenbildningen, är låg.

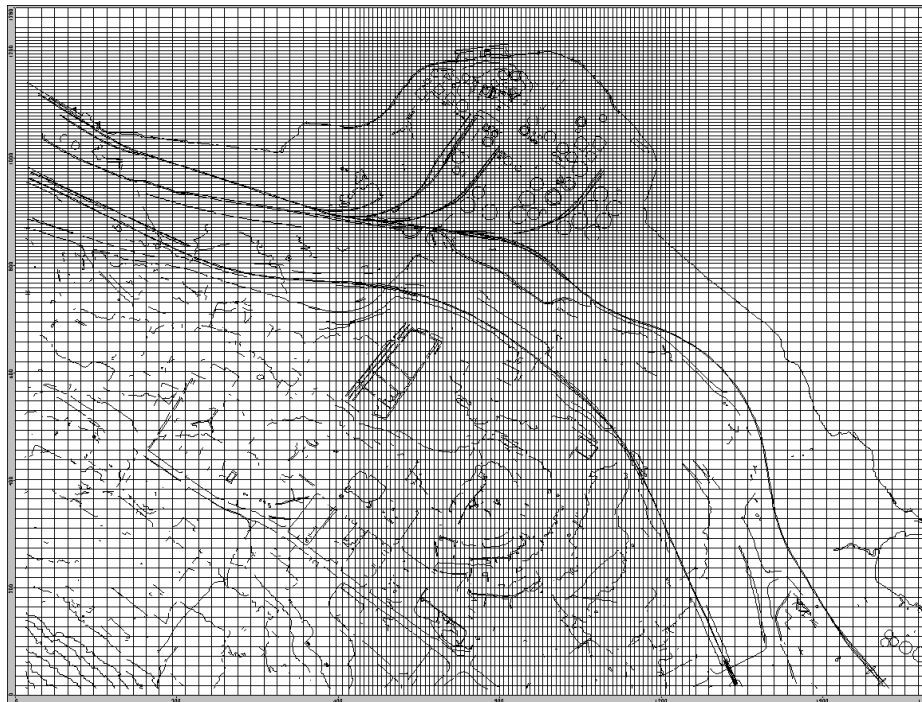
Enligt jordartskartan (Kvittoplott JOGI 17H Sundsvall SO) består marken inom Vindskärsudde av sand och åsmaterial. De undersökningar som har gjorts visar dock på en större variation. Inom oljehamnen överlagras den naturliga jorden vanligtvis av sand- och grusfyllning med inslag av diverse avfall, till exempel tegel och trä. Fyllningen underlagras av sand som övergår till silt eller lera. Finjordens sammansättning är sällan homogen, utan lagren innehåller ofta silt. Silt- och lerlagren underlagras av sand, som ställvis är relativt grov. (se figur 4.3)



FIGUR 4.3 Konceptuell modell, tvärsnitt av Sundsvalls oljehamn.

4.3 UPPRÄTTANDE AV RUTNÄT

För att få med en del av det regionala flödet, utökades modellen i sydlig, västlig och östlig riktning. Eftersom Vindskärsudde är det område som är mest intressant i den här studien, förtätades rutnätet över udden, vilket illustreras i figur 4.4.



FIGUR 4.4 Rutnätet över modellområdet.

4.4 BEARBETNING AV DATA

Huvudsakligen byggdes modellen på data från tidigare undersökningar utförda av Golder Associates AB, framför allt de geologiska förhållandena och grundvattennivåer i jord. Grundvattennivåmätningarna utförs av Sundsvalls oljehamn AB och ingår i ett kontrollprogram upprättat av Golder Associates AB (Jansson, 1999). Mätningarna har utförts i stort sett månadsvis sedan 1997, och pågår fortfarande. Dock har antalet mätpunkter varierat, nya mätpunkter har etablerats och gamla har övergivits. Kvaliteten och noggrannheten är bitvis bristfällig, till exempel har grundvattennivåskillnader på 15 meter upptäckts i samma rör för två på varandra följande mätningar.

Övriga data hämtades bland annat från Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI), avseende nederbörd och temperatur, Sundsvalls kommun, avseende topografi, och gamla geotekniska undersökningar för projektering av depåområdet, avseende bergytans topografi.

4.4.1 Topografi

Ett av de viktigaste momenten i en grundvattenmodellering är att ta fram en så korrekt terrängmodell som möjligt. Från lantmäterienheten på Sundsvalls kommun erhöles en dwg-fil, AutoCad 2004, med höjddata. I dwg-filen består höjddata av z-koordinater, vilket krävde en omfattande bearbetning för att ta fram z-koordinater som kunde användas i ModFlow. En stor del av bearbetningen bestod i att identifiera felaktiga z-koordinater. Med felaktig z-koordinat menas till exempel linjer som inte är höjdlinjer. Byggnadslinjer kan till exempel ha markerats som $z = 0$ och alla dessa ”byggnads-nollor” blir missvisande i terrängmodellen och fick därför avlägsnas manuellt. Byggnader är inte heller relevanta att ha med i en terrängmodell. Ett annat dilemma var höjdlinjer som saknade höjd, det vill säga att det, till exempel, förekom $z = 0$ meter som gränsade till $z = 6$ meter på vardera sida. Det är därför rimligt att anta att höjden mellan två stycken 6-meterspunkter är 6 meter.

För att avlägsna felaktiga z-koordinater användes datorprogrammet GEO (version 11.5 och 12, 1995-2000). I GEO kan ytan ritas upp relativt snabbt, vilket underlättar identifieringen av de felaktiga z-koordinaterna. I den jämna ytan syntes de felaktiga koordinaterna som distinkta ”spikar”, vilkas värden då kunde korrigeras alternativt avlägsnas. Efter att hela ytan genomarbetats exporterades samtliga x-, y- och z-koordinater från GEO som en pxy-fil vilken vidare kunde konverterades till en txt-fil (Notepad, version 5.1, 1981 – 2001) och läsas in i MODFLOW.

4.4.2 Lagerföljder i marken

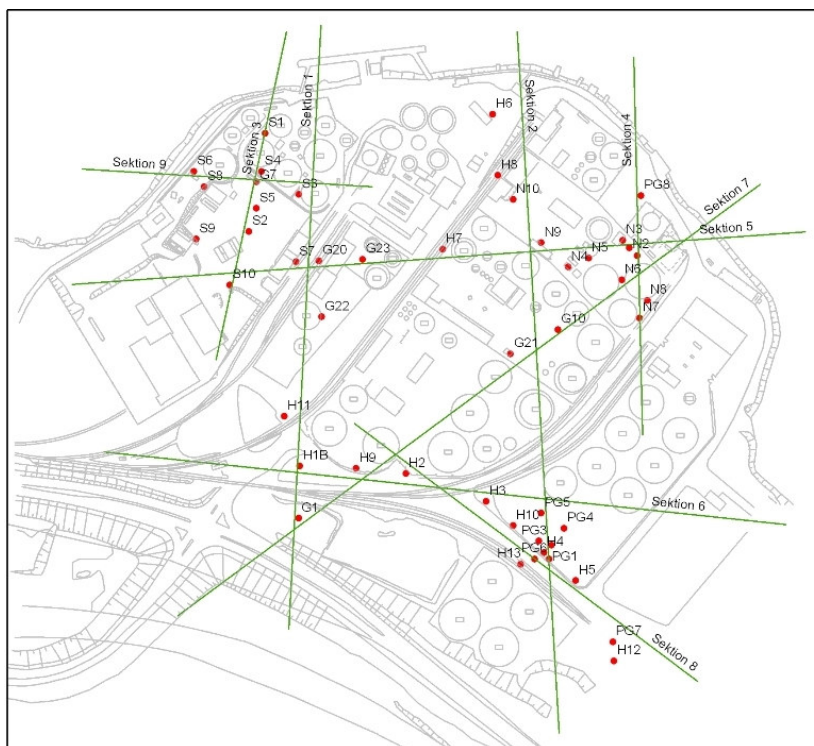
För att ta fram lagerföljden i marken samlades borrhålsdata från de miljötekniska och geotekniska undersökningar som har genomförts tidigare i oljehamnen. Data bestod av allt från xls-filer (Microsoft Excel 2003) till pdf-filer (Adobe Reader, 1984 – 2004), utförda i olika system. Alla fältprotokoll med borrhålsdata skrevs in och samlades i Microsoft Excel 2003.

Först identifierades borrhålsdata koordinater. En lista med gamla och nya benämningar samt koordinater togs fram. Ett flertal punkter har bytt namn, många är inte inmätta och saknar således koordinater. Gamla kartor jämfördes med nya och med hjälp av ArcGIS togs koordinater fram. När de väl var koordinatsatta i ArcGIS kunde dessutom markytans höjd, z-

koordinaten, utläsas. I fältprotokollen anges alltid djupet från markytan till en viss geologisk enhet. Sedan räknades övre och undre z-värdet ut för varje lager.

Totalt identifierades 38 stycken olika varianter av jordarter, till exempel siltig sand, ler, mm. För att minska antalet jordartsvarianter, klassades jordarterna med avseende på hydraulisk konduktivitet. De jordarter som bedömdes ha likvärdig hydraulisk konduktivitet fick utgöra en enhetlig jordart och gavs ett gemensamt värde. Hydraulisk konduktivitet uppskattades utifrån jordart och tabellerade värden, se avsnitt 3.3. Resultatet blev sex stycken lager där bergytan utgjorde det understa lagret.

Alla borrhål, där koordinater kunnat fastställas, ritades upp på grundkartan över Sundsvalls oljehamn, med hjälp av ArcMap (version 9.0, 1999-2004). På så sätt var det lättare att bedöma vilka borrhål som låg i stråk och därför kunde plockas ut till sektioner, se figur 4.4. Sektionerna togs ut och projicerades i x- och y-led och borrhålen plottades sektionvis (se bilaga 2a). Sedan sammanfogades sektionerna till sammanhängande lager (bilaga 2b). Vissa punkter fick omdefinieras för att bättre stämma överens med kringliggande jordlager. De två översta lagren sammanfogades till ett fyllnings- och sandlager. Lagerföljden från markytan blev: Fyllning/Sand – Lera – Silt – Sand – Berg. Som nästa steg plockades x- y- och z-koordinaterna för de fyra definierade lagren ut. Z uttogs för överkanten på lagret. Genom hela arbetet med att definiera lagren i marken användes Matlab (version 6.5, 2002) för att rita upp ytorna och kontrollera att de inte gick i varandra eller såg onaturliga ut. I de punkter där vissa lager saknades helt eller information saknades, på grund av otillräckligt borrhjup, lades de lagren in ändå, fast med en tjocklek av endast 1 cm. Detta gjordes för att få en bra interpolerad yta. Dessa punkter kan sedan lätt identifieras i modellen och korrigeringar kan göras för diskontinuerliga lager eller för att få en bättre överensstämmelse med omkringliggande punkter.



FIGUR 4.5 Grundkarta över sundsvalls oljehamn med borrhåll och uttagna sektioner inritade.

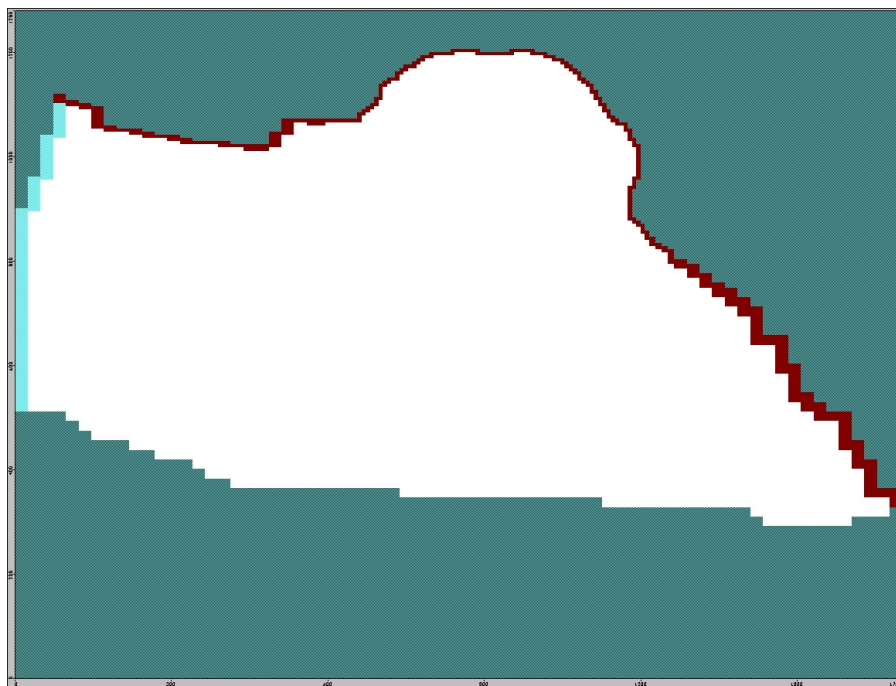
4.4.3 Bergytan

I endast ett fåtal borrhöjningar från markundersökningarna fanns uppgifter på djup till bergytan. Bristen på data gjorde att gamla projekteringskartor fick användas. Dessa gamla kartor scannades in och digitaliserades delvis. Efter inläsning koordinatsattes kartorna med hjälp av funktionen *georeferencing* i ArcGIS. En del områden saknade data, i dessa områden fick hjälppunkter läggas in för att få en bra interpolerad yta. Dessa punkter togs fram genom att beakta trender i bergytans topografi och göra kvalificerade bedömningar. Detta gav endast marktäckets mäktighet eftersom höjdsystemet i de gamla ritningarna inte överensstämde med numera använda lokala höjdsystemet. Exakta z-koordinater kunde dock tas fram med hjälp av programmet GEO och den tidigare nämnda terrängmodellen.

4.5 VILLKOR

4.5.1 Randvillkor

För att definiera randvillkor som inte påverkar det som är intressant inom modellområdet, nämligen själva oljehamnen, var det nödvändigt att utöka det totala modellområdet i sydlig riktning. Detta gjordes med hjälp av ytterligare kartor från Lantmäterienheten på Sundsvalls kommun samt en jordartskarta från SGU (Kvittoplott JOGI 17H Sundsvall SO). Även information från SGUs brunnsarkiv användes. Randvillkoren bestämdes utifrån följande resonemang: Grundvattendata från tidigare år tyder på att grundvattnet strömmar i sydlig riktning på den södra delen av udden och att det inte sker något grundvattenflöde från Sundsvallsåsen ut på udden. Istället fungerar åsen som ett stort dränerande dike. Alltså påverkas grundvattenströmningen endast av nederbörden och topografin. Randvillkoren kan följaktligen sättas vid mitten av åsen, som betraktas som en vattendelare, en *no flow boundary*.



FIGUR 4.6 Bild från modellen som visar randvillkoren. Det bruna är en *constant head boundary*, Det ljusblå är *constant flux* och allt utanför är inaktiva celler, vilket representerar *no-flow*.

Modellområdet avgränsas i norr och öster av Sundsvallsfjärden. Därför har randen till modellområdet i det översta marklagret givits en konstant trycknivå. Den definieras av medelvattenståndet som enligt karta från kommunen är -0,7 m.

I väster avgränsas modellområdet av Sundsvallsåsen. Hydrogeologiska data som studerats talar för att det sker ett stort inflöde av grundvatten till modellområdet från åsen (muntligen Werner, 2005). För att simuleringen ska ta hänsyn till detta inflöde av grundvatten var det nödvändigt att ge modellområdets västra kant egenskaper som överrensstämde så väl som möjligt med verkliga förhållanden. Detta skedde genom att modellområdets västra kant försågs med ett antal, fiktiva, pumpbrunnar. Det vill säga, var och en av de 71 stycken celler som löper längs med västra kanten av modellen gavs brunnsegenskaper så att vatten kunde tillföras modellen där. För att få fram flödet beräknades först tvärsnittsarean på modellområdets västra kant, där inströmningen sker. Med hjälp av den hydrauliska konduktiviteten för det vattenförande skiktet i åsen erhöles ett värde på grundvattenflödet, ca 20 000 m³/dygn. Detta motsvarar ett flöde av cirka 280 m³/dygn/brunn.

Ovanifrån påverkas modellen av *recharge*, se avsnitt 4.5.2 om grundvattenbildning.

4.5.2 Grundvattenbildning

För att beräkna grundvattenbildningen inom området användes ett empiriskt samband framtaget av Salo (2005) tillsammans med nederbörds- och temperaturdata från SMHI (Alexandersson och Eggertsson Karlström, 2001). Eftersom det inte finns någon växtlighet inom Sundsvalls oljehamn antogs att ingen transpiration förekom. Salo (2005) har funnit att Ol'decops formel, se ekvation 4.2, för beräkning av evaporation lämpar sig för områden i nordvästra Ryssland. Dessa områden bedöms ha tillräckligt liknande klimatförhållanden som Sundsvall.

$$E = E_0 \tanh(P / E_0) \quad (4.2)$$

$\tanh(P / E_0)$ - den hyperboliska tangenfunktionen för kvoten mellan nederbörd och potentiell evaporation.

E – Årlig evaporation i mm.

E_0 – Potentiell evaporation.

P – Årlig nederbörd i mm.

Den potentiella evaporationen är bland annat beroende av temperaturen. Korrelerad för 60 avrinningsområden med en årlig medeltemperatur på $-2,0^{\circ}\text{C}$ till $+4,6^{\circ}\text{C}$, blir uttrycket för E_0 (Salo 2005):

$$E_0 = 329 + 62T + 2,14T^2 \quad (4.3)$$

T – Medelårstemperatur i $^{\circ}\text{C}$.

Ekvation 4.2 i kombination med 4.3 ger den årliga grundvattenbildningen, se tabell 4.1. De nederbördsdata som har använts i modelleringen kommer från två olika väderstationer, en i Sundsvalls stad och en vid Sundsvalls flygplats.

TABELL 4.1 Årlig grundvattenbildning beräknad med uttryck framtaget av Salo (2005) se ekvation 4.2 och 4.3.

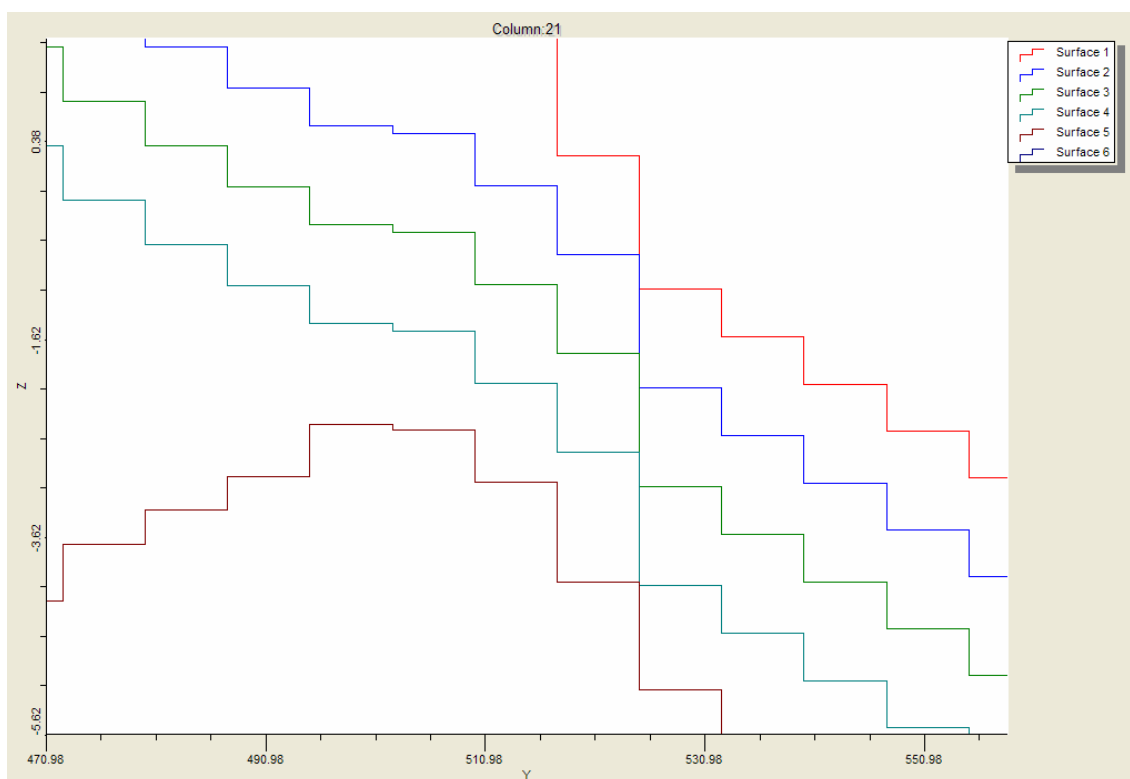
Station	Nederbörd [mm]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Evaporation(beräknad) [mm]	Grundvattenbildning [mm]
Sundsvall	629	3,6	461	168
Sundsvalls Flp	539	3,1	411	128
Medel	584	3,35	436	148

Den årliga grundvattenbildningen beräknades till 148 mm genom att ta medelvärdet av de två mätstationerna Sundsvall och Sundsvalls flygplats (se tabell 4.1). Efter samråd med Kent Werner (Stockholm, 2005) fick detta värde justeras ned. På de platser inom oljehamnen där berget är i dagen gavs motsvarande celler i modellen en avsevärt lägre grundvattenbildning. Det beror på att modellen inte kan simulera ytavrinning, på grund av att vatten från grundvattenbildningen tillförs cellerna i översta marklagret (infiltration) och inte markytan.

4.6 KORRIGERING AV CELLER

När modellen konstrueras enligt ovan, baserad på exakta topografiska koordinater, kan numeriska problem uppstå när angränsande celler inte har kontakt med varandra. När det är stora variationer i topografin i kombination med relativt tunt marklager är modellens cellindelning för grov för att representera det verkliga marklagret. Cellens storlek överlappar det tunna skiktet och kontakten mellan celler i samma lager bryts, se figur 4.6. För att lösa detta korrigerades samtliga felaktiga celler manuellt.

Ett annat problem uppstår när det finns berg i dagen. Modellen kräver att samtliga modell-lager är kontinuerliga. Där berg i dagen förekommer är de verkliga marklagren diskontinuerliga. Modellen låter då ovanpåliggande modell-lager bli så tunna som möjligt, men fortfarande ligga ovanpå berget, som ju är det understa lagret. Detta skapar felaktigheter dels genom att berget, i modellen, fortfarande är överlagrat med jord och dels genom att en kraftig variation i bergets topografi ger numeriska fel enligt stycket ovan. Lösningen blev att, på de platser där berg finns i dagen, sänka lagret som representerar bergytan genom att korrigera berörda cellers z-koordinat. De ovanpåliggande modell-lagren definierades om till att få samma, låga, hydrauliska konduktivitet som berglagret.

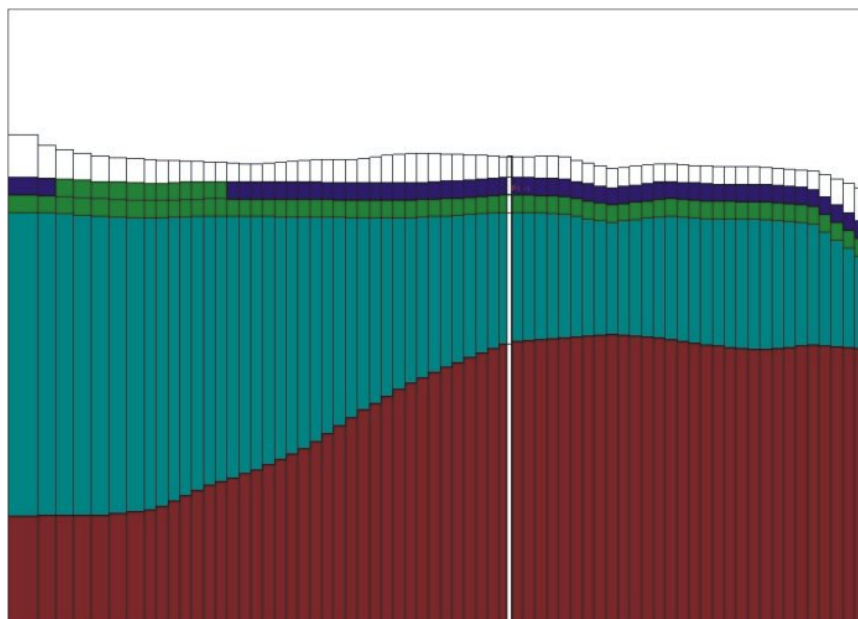


FIGUR 4.7 Exempel på problemceller där topografin gör att angränsande celler inte har kontakt med varandra. I grafen är z-axeln lika med markhöjden i meter och y-axeln är modellkoordinater.

4.7 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

I denna modellering antas respektive jordlager ha samma hydrauliska konduktivitet i horisontalled. Den hydrauliska konduktiviteten antas vara lägre i vertikalled än i horisontalled. Därför har den hydrauliska konduktivitetens z-komponent satts till en tiopotens lägre än x- och y-komponenten.

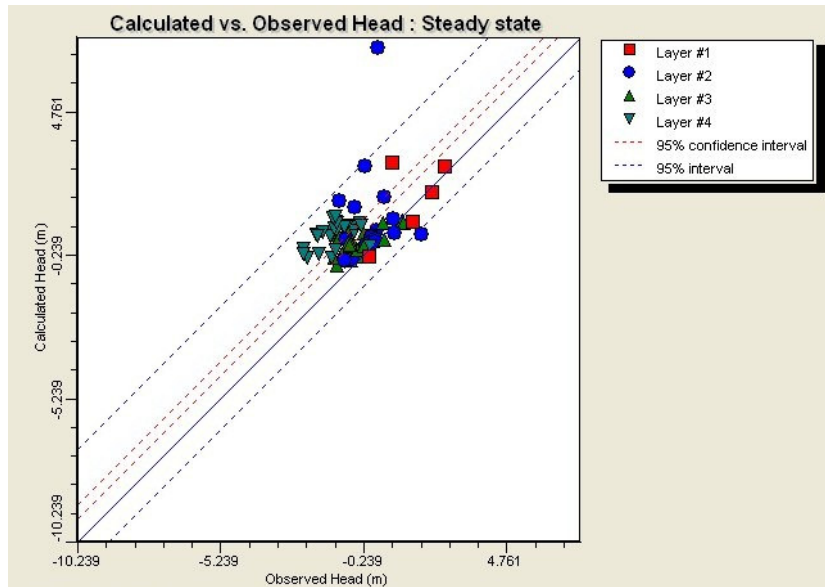
Följande hydrauliska konduktiviteter är satta efter bedömningar med hjälp av tabellerade värden (se avsnitt 3.3). Det översta lagret i modellen består av sandig/grusig fyllning och sand. Detta lager antas ha en hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-5} m/s. Fyllning- och sandlagret underlagras av ett lerlager. På grund av viss inblandning av silt i detta lager sätts den hydrauliska konduktiviteten till 1×10^{-8} m/s. Sedan följer ett siltlager med en hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-6} m/s och sedan ett sandlager med en hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-4} m/s. Understa lagret representerar berg med låg hydraulisk konduktivitet på 1×10^{-10} m/s. Se figur 4.7 för ett representativt tvärsnitt ur modellen.



FIGUR 4.8 Tvärsnitt ur modellen. Det vertikala vita sträcket är ett grundvattenobservationsrör. Observera det diskontinuerliga lerlagret, mörkblått. Det översta vita lagret är fyllningen/sanden, det gröna är siltlagret, det blå är sandlagret och det röda är berg.

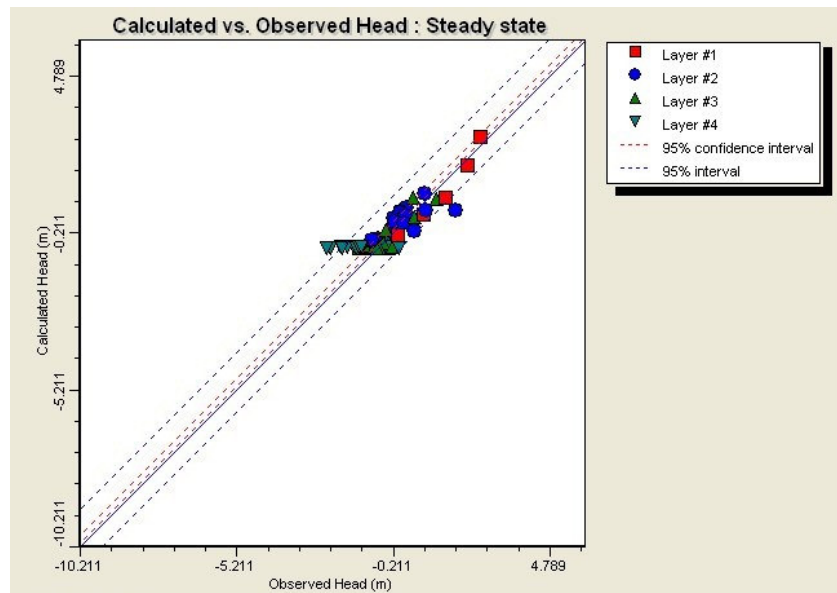
4.8 KALIBRERING

Kalibrering av modellen skedde genom att resultaten analyserades och sedan justerades de indata som bedömdes ha störst inverkan. Analysen bestod i att modellens beräknade grundvattennivåer jämfördes med 2002 års uppmätta grundvattennivåer (figur 4.9). Detta år ansågs vara mest representativt samt ha bäst kvalitet på indata. Med bra kvalitet menas, i det här fallet, ett dataset med minst antal uppenbart felaktiga värden. De plottar som visas i figur 4.9 illustrerar modellens resultat (beräknade värden) jämfört med uppmätta värden. Punkter som ligger nära mittlinjen visar bra överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden. Punkter ovanför mittlinjen indikerar att modellen överskattar grundvattennivåerna och punkter under mittlinjen indikerar en för lågt beräknad grundvattennivå.



FIGUR 4.9 Resultatplott från MODFLOW, med observerad totalpotential från 2002, före kalibrering.

De parametrar som bedömdes ha störst inverkan på grundvattennivån var lagrens hydrauliska konduktivitet, grundvattenbildningen samt flödet i åsen. Eftersom för mycket grundvatten ackumulerades i de övre lagren ökades den hydrauliska konduktiviteten i dessa. På motsvarande sätt blev överrensstämelsen för de nedre lagren bättre när värdet på den hydrauliska konduktiviteten istället minskades. Grundvattenbildningen reduceras över hela modellområdet. Detta stämmer bra överrens med antagandet att den stora andelen hårdgjorda ytor bidrar till att det mesta av det potentiellt infiltrerbara vattnet förs bort via ytavrinning och i dagvattenledningar (muntligen från Werner, Stockholm, 2004). Enligt tidigare identifierade grundvattenflöden (stycke 4.2) är åsens påverkan på Sundsvalls oljehamn att, i princip, dränera bort vatten. I modellen gjorde åsens relativt stora vattenflöde att vatten från åsen flödade ut över udden. Eftersom det inte överensstämmer med verkligheten fick det simulerade flödet i åsen reduceras.



FIGUR 4.10 Resultatplott från MODFLOW, med observerad totalpotential från 2002, efter kalibrering.

TABELL 4.2 Horisontella hydrauliska konduktiviteter (m/s) före och efter kalibrering

Lager	Material	Ursprunglig hydraulisk konduktivitet	Kalibrerad hydraulisk konduktivitet
1	Fyllning	1.00E-05	1.00E-03
2	Lera	1.00E-08	5.00E-07
3	Silt	1.00E-06	8.00E-07
4	Sand	1.00E-04	1.00E-05
5	Berg	1.00E-10	1.00E-08

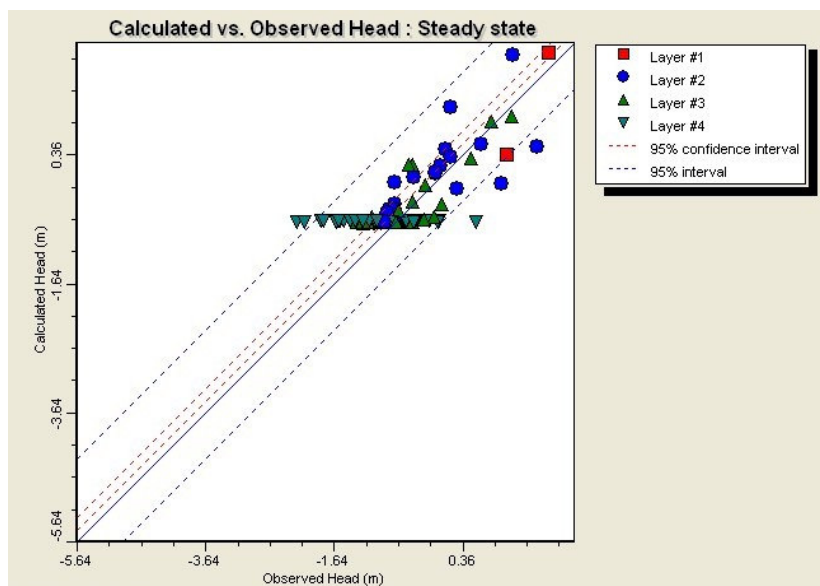
I tabell 4.3 visas de statistiska parametrar (stycke 3.7) som har använts vid utvärdering av modellresultaten, före och efter kalibrering.

TABELL 4.3 Statistiska parametrar före och efter kalibrering.

Statistisk parameter	Före kalibrering	Efter kalibrering
<i>Residual Mean</i>	1.064 m	0.25 m
<i>Absolute Residual Mean</i>	1.141 m	0.41 m
<i>Root Mean Squared</i>	1.514 m	0.538 m
<i>Normalized Root Mean Squared</i>	30.74%	10.93%

4.9 VALIDERING

Efter kalibreringen utfördes en validering där det slutliga modellresultatet jämfördes med grundvattennivåer från år 1998 till 2003. Dock användes inte år 2002 eftersom det året redan använts för kalibreringen. Samtliga resultatplottar redovisas i bilaga 3. Jämförelse gjordes även mot det sammanräknade medelvärdet för alla år, 1998-2003, se figur 4.10. Tabell 4.4 visar de statistiska parametrarna (stycke 3.6) från samtliga valideringssimuleringar.



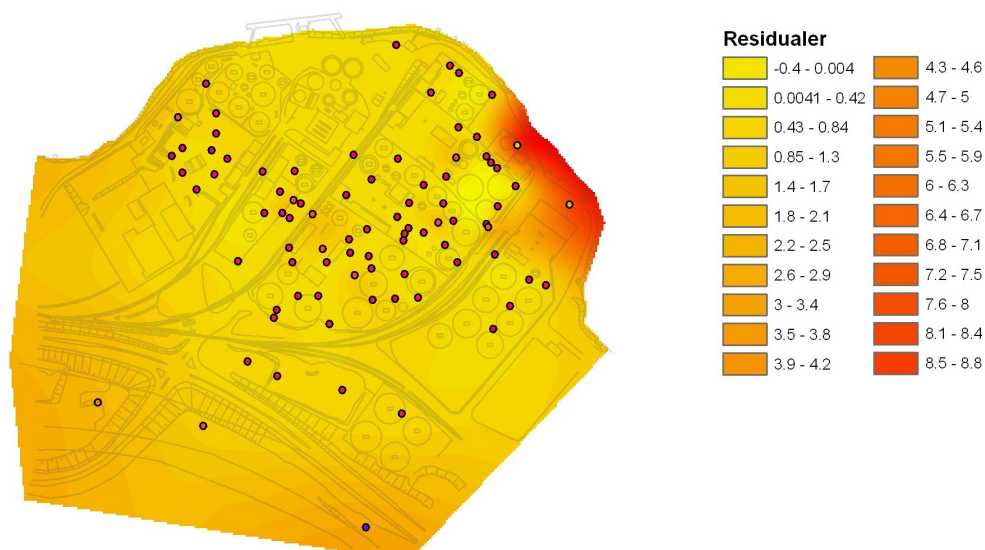
FIGUR 4.11 Resultatplott från MODFLOW med observerade medelgrundvattennivåer från 1998-2003.

TABELL 4.4 Statistiska parametrar från valideringen av modellen.

Statistisk parameter	1998	1999	2000	2001	2003	medel 98-03
<i>Residual Mean</i>	0.514 m	0.255 m	0.226 m	0.164 m	0.354 m	0.28 m
<i>Absolute Residual Mean</i>	0.562 m	0.506 m	0.404 m	0.44 m	0.49 m	0.473 m
<i>Root Mean Squared</i>	0.662 m	0.609 m	0.521 m	0.559 m	0.582 m	0.574 m
<i>Normalized Root Mean Squared</i>	47.21%	15.63%	13.58%	13.02%	14.29%	14.70%

5 RESULTAT

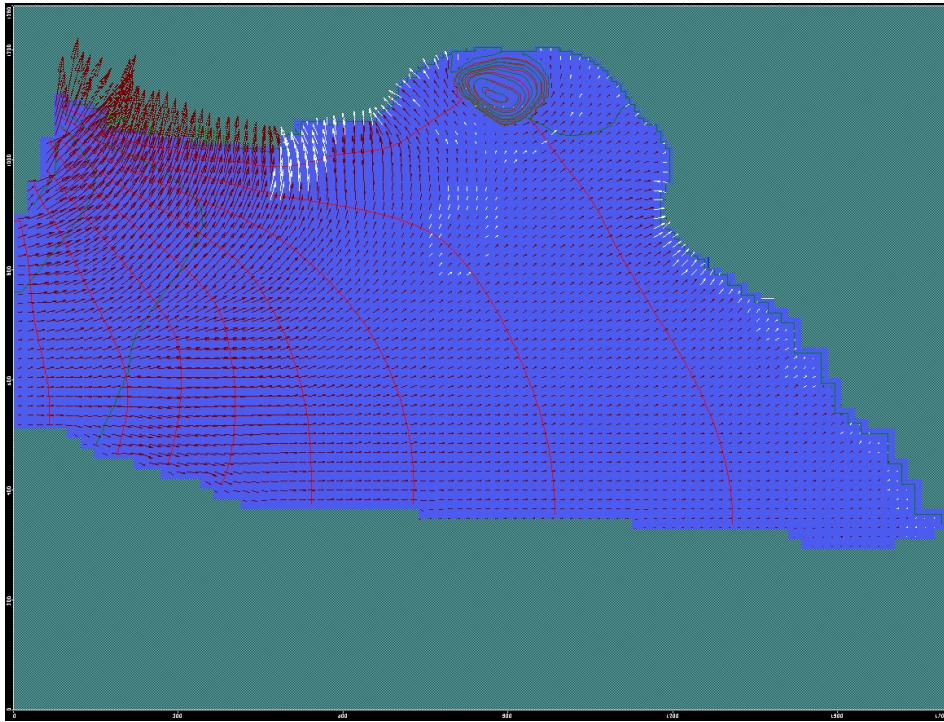
Kalibreringen av modellen resulterade i en relativt bra överensstämmelse mellan beräknade och observerade grundvattennivåer. Överensstämmelsen illustreras i figur 5.1 där färgerna visar interpolerade värden för residualerna. Hela den färgade ytan representerar modellområdet och färgskiftningarna visa den geografiska fördelningen av residualerna, med grundvattendata från 2002. Av figuren framgår det att residualerna uppvisar liten variation, eftersom modellområdet är jämnt färgat. Den största avvikelsen mellan beräknade och observerade värden syns i det nordöstra hörnet. Generellt sett har modellområdets yttre kanter något sämre överensstämmelse än den del som utgör oljehamnen. De punkter som har sämst överensstämmelse mellan beräknade och observerade värden ligger långt väster i modellområdet, nära randen där de fiktiva pumpbrunnarna är belägna (syns ej i figur 5.1).



FIGUR 5.1 Planritning över Vindskärsudde visandes den geografiska fördelningen av residualerna inom modellområdet. Gul färg representerar bra överensstämmelse och röd färg sämre överensstämmelse mellan beräknade och observerade grundvattennivåer från år 2002. Residualernas enhet är meter.

Valideringen uppvisade något varierande resultat. Grundvattendata från 1998 gav en dålig överensstämmelse mellan beräknade och observerade grundvattennivåer. Med grundvattendata från 1999 blir överensstämmelsen bättre. Övriga år är jämna och relativt bra.

Det tänkta flödet i åsen, se avsnitt 4.2, simulerades på ett bra sätt, se figur 5.2. Figuren illustrerar att vatten rinner i åsen ländriktning.



FIGUR 5.2 Det simulerade flödet i Sundsvallsåsen, i modellens lager 4 som utgörs av sandigt åsmaterial. Pilarna visar grundvattenflödet och de röda linjerna är ekvipotentiallinjer.

6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Kalibreringen av modellen resulterade i en relativt bra överensstämmelse mellan beräknade och observerade grundvattennivåer, vilket valideringen sedan bekräftar i varierande grad. Generellt sett har modellområdets yttre kanter något sämre överensstämmelse och de punkter som har sämst överensstämmelse ligger nära randen där de fiktiva pumpbrunnarna är belägna. De fiktiva pumpbrunnarna introducerades i modellen för att simulera grundvattenflödet i åsen, vilket ger mycket vatten i modellen nära brunnarna. Därför blir överensstämmelsen med de uppmätta grundvattennivåerna dålig i dessa punkter. Om de västligaste punkterna utesluts, de ligger dessutom utanför det intressanta området, fås en bättre överensstämmelse.

I figur 5.1 är skillnaden mellan uppmätta och beräknade värden på grundvattennivå relativt stor i nordöstra hörnet. Skillnaden är distinkt jämfört med övriga modellområdet. En trolig orsak till detta är felaktigheter i indata i det området. Enligt indata har punkter nära strandlinjen väldigt låga nivåer i förhållande till medelhavsnivån. Av hydrogeologiska skäl är det inte särskilt troligt. Det talar istället för att de beräknade värdena är mer tillförlitliga.

Resultatet av simuleringen av grundvattenflödet i åsen stämde väl överens med antagandet från den konceptuella modellen, se avsnitt 4.2, att åsen har ett kraftigt grundvattenflöde i dess längdriktning.

Valideringen gav sämst överensstämmelse för år 1998, se bilaga 3. En analys av data från det aktuella året indikerar att kvaliteten på data är relativt dålig. Att kvaliteten bedömts vara dålig beror, bland annat, på få mätningar i få punkter.

Att det finns en skillnad mellan beräknade och observerade värden på grundvattennivån kan förklaras av de olika marklagrens heterogenitet och de komplexa hydrogeologiska förhållanden som råder inom oljehamnen. Eftersom de marklager som kan anses vara ursprungliga till stor del består av svallsediment, medför det att lagren kan ställvis ha hög konduktivitet. Vissa lager med högre konduktivitet kan stå i förbindelse med antingen Sundsvallsfjärden eller Sundsvallsåsen. Förutom de ursprungliga marklagren har oljehamnen fyllts ut på olika platser under olika perioder, se avsnitt 2. De fyllnadsmaterial som har använts har egenskaper som skiljer sig delvis från de naturligt förekommande jordarna inom oljehamnen. Det gör det svårt att förutspå de hydrogeologiska egenskaperna i fyllnadslagret.

En annan faktor som kan ge upphov till skillnader mellan beräknade och observerade värden på grundvattennivåerna är det understa marklagret i modellen, berget. Berg är ett heterogent medium där det förekommer omväxlande sprickzoner med hög hydraulisk konduktivitet och kompakt berg med mycket låg hydraulisk konduktivitet. Vidare kan förekomsten av bergrum inom oljehamnen eventuellt ha dränerande effekt, via eventuella sprickzoner, som sänker av grundvattennivån i jorden. Bergrummen och sprickzoner finns inte med i modellen.

För att förutspå hur grundvattnets strömningsmönster påverkas vid en eventuell nedläggning av bergrumsanläggningarna krävs ytterligare undersökningar av vattenförande sprickzoner i berget och att dessa ihop med bergrummen sedan läggs in i modellen som dräner eller *constant head-cells*. Dessutom fordras information om hur stort flöde de länshållningspumpar som pumpar grundvatten från bergrumsanläggningarna har.

Den centrala frågeställningen är huruvida den modell som skapats inom ramen för den här studien kommer att kunna användas för att förutsäga hur grundvattnets strömningsmönster

inom oljehamnen förändras vid eventuell förändrad grundvattensituation. Ett exempel på vad som skulle kunna simuleras i modellen är ett pågående grundvattensaneringsprojekt på Vindskärsudde, där fri fas av olja pumpas från grundvattenytan. Detta kommer sannolikt att innebära en förändring av grundvattennivån, vilket i sin tur skulle kunna förändra strömningsmönstret.

Denna typ av modell är svår att använda på det aktuella modellområdet. Vindskärsudde med oljehamnen har utsatts för stor antropogen påverkan både i jorden, området består delvis av en gammal tipp och är utfyllt i etapper, och på ytan, med mycket bebyggelse och hårdgjorda ytor. Bättre kunskaper om geologin i området, framförallt om det översta marklagret med fyllningen, skulle öka säkerheten och noggrannheten i modellen, till exempel genom noggrannare och tydligare borrhålsdata.

7 KÄLLFÖRTECKNING

7.1 TRYCKTA KÄLLOR

- Alexandersson, H. och Eggertsson Karlström C., (2001). *Temperaturen och nederbörden i Sverige 1961-1990. Referensnormaler – utgåva 2. Nr. 99*, SMHI Meteorologi
- Anderson, M. P. och Woessner, W. W., (1992). *Applied groundwater modelling: simulation of flow and advective transport*, Academic Press. ISBN: 0-12-059485-4
- Charbeneau, R. J., (2000). *Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport*, Prentice Hall. ISBN 0-13-975616-7
- Domenico, P. A. och Schwartz, F. W., (1997). *Physical and chemical hydrogeology*, Second edition, John Wiley & Sons Inc. ISBN: 0-471-59762-7
- Grip, H. och Rodhe, A., (1994). *Vattnets väg från regn till bäck*, Hallgren & Fallgren Studieförlag AB. ISBN: 91 7382 724 X
- Heath, M. T., (1997). *Scientific computing: an introductory survey*, McGraw-Hill International editions, Computer Science Series. ISBN: 0-07-027684-6
- Jansson, T., (1998). *Miljötekniska markundersökningar inom oljehamnen i Sundsvall – Huvudrapport*, Golder Associates AB, 97-906
- Jansson, T., (1999). *Kontrollprogram avseende grundvattenföroreningar inom Sundsvalls oljehamn*, Golder Associates AB, 99-449
- Jansson, T., (2000). *Kompletterande miljötekniska markundersökningar inom norddepots oljedepå i Sundsvall*, Golder Associates AB, 0070379
- Jones, J. A. A., (1997). *Global Hydrology, Processes, resources and environmental management*, Addison Wesley Longman Limited. ISBN: 0 582 09861 0
- Knutsson, G. och Morfeldt, C-O., (1995). *Grundvatten, Teori & tillämpning*, Svensk byggtjänst. ISBN 91-7332-740-9
- Salo, Y. A., (2005). *A problem of inhomogeneity and method for correction of annual precipitation records*, 15th International Northern Research Basins Symposium and Workshop Luleå to Kvikkjokk, Sweden, 29 Aug. – 2 Sept
- Triumpf, C., (1992). *Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar*, Byggeforskningsrådet, Stockholm. ISBN: 91-540-5493-1
- Visual MODFLOW v.3.1 User's Manual, The proven standard for 3-D Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling using MODFLOW MODPATH, Stream Routing Package, MT3DMS, and RT3D, (2003). Waterloo Hydrogeologic Inc.

7.2 MUNTliga KÄLLOR

Engberg, Lennart, 2004. Sundsvalls oljehamn AB.

Jonsson, Anna, 2004 – 2006. Golder Associates, löpande diskussioner.

Jansson, Thomas, 2004 – 2006. Golder Associates, löpande diskussioner.

Werner, Kent, 2004 – 2006. Golder Associates, löpande diskussioner.

7.3 KARTOR

Figur 2.1 Översiktskarta över Sundsvall från Lantmäteriverket, ärende nr M2004/2092, SeSverige (<http://geoimager.lantmateriet.se/ssn/site/>), 2006-03-16

Jordartskarta SGU, Kvittoplott JOGI 17H Sundsvall SO.

7.4 DATORPROGRAM

Adobe Reader, Version 7.0.1, 1984 – 2004, Adobe Systems Inc.

ArcMap 9.0, ESRI ArcMap 9.0 (Build 580), 1999-2004, ESRI Inc.

GEO, Version 11.5, 1995-2000, Svensk byggnadsgeodesi AB.

GEO, Version 12, 1995-2000, Svensk byggnadsgeodesi AB.

Notepad, Version 5.1, 1981 – 2001, Microsoft Corporation.

MatLab, Version 6.5.0.180913 Release 13, June 18 2002, The MathWorks Inc.

Microsoft Excel 2003, Microsoft Corporation.

Visual MODFLOW 4.0.0.126, 1995-2003, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Bilaga 1

Fotografier från platsbesöket

Bilaga 1. Foton, Sundsvalls oljehamn



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Många cisterner och andra byggnader täcker området.



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Stora asfalterade ytor ger litet utrymme för infiltration.



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Lastningsställe för petroleum produkter.



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Området är platt och har många vägar, järnvägar och ledningar.

Bilaga 1. Foton, Sundsvalls oljehamn



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Läns för att samla upp olja som läcker ut från marken i hamnen.



Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Området är platt och har stora hårdgjorda ytor.



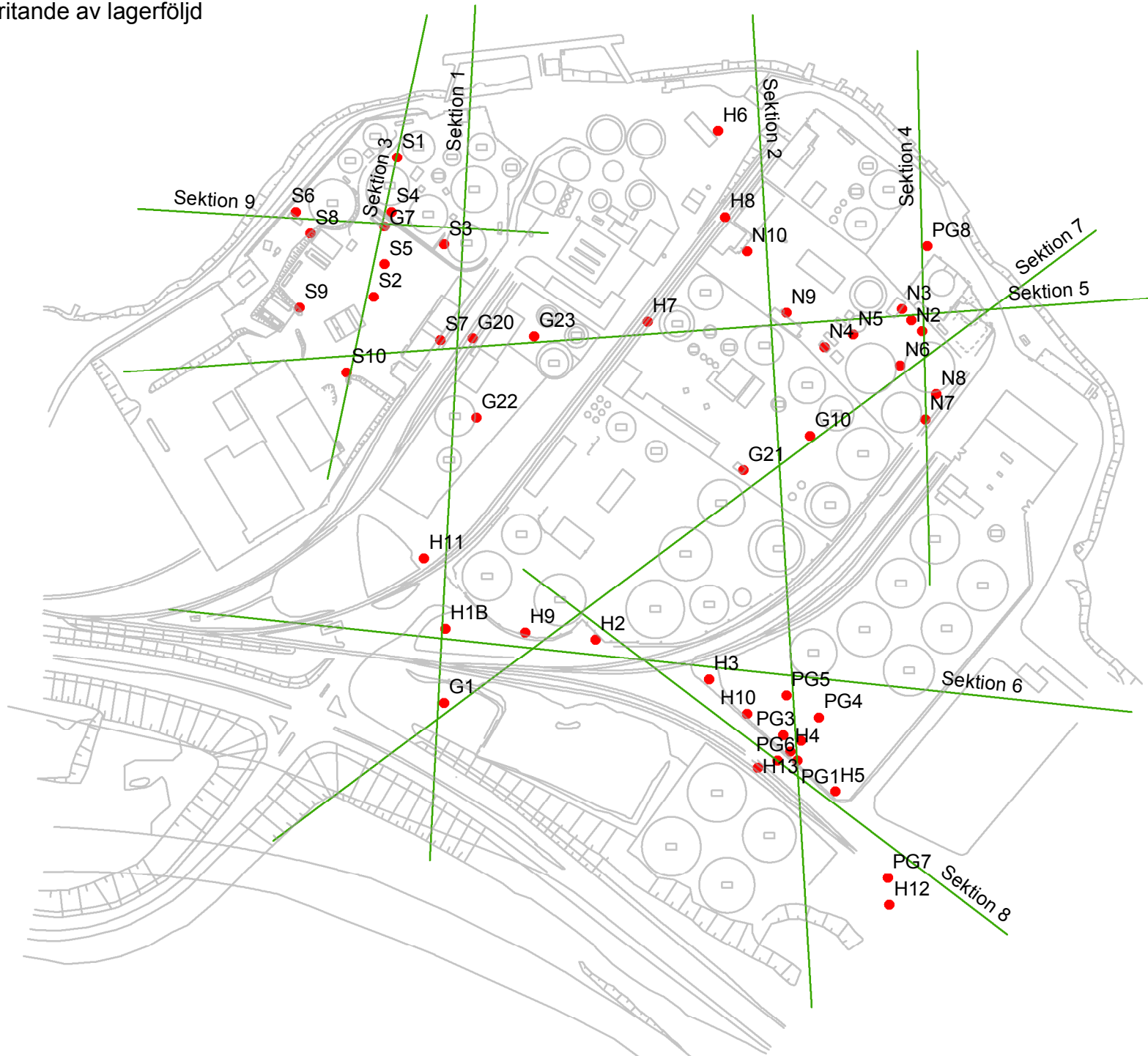
Foto: M. Osanius, 2004-04-26

Grundvattenobservationsrör.

Bilaga 2a

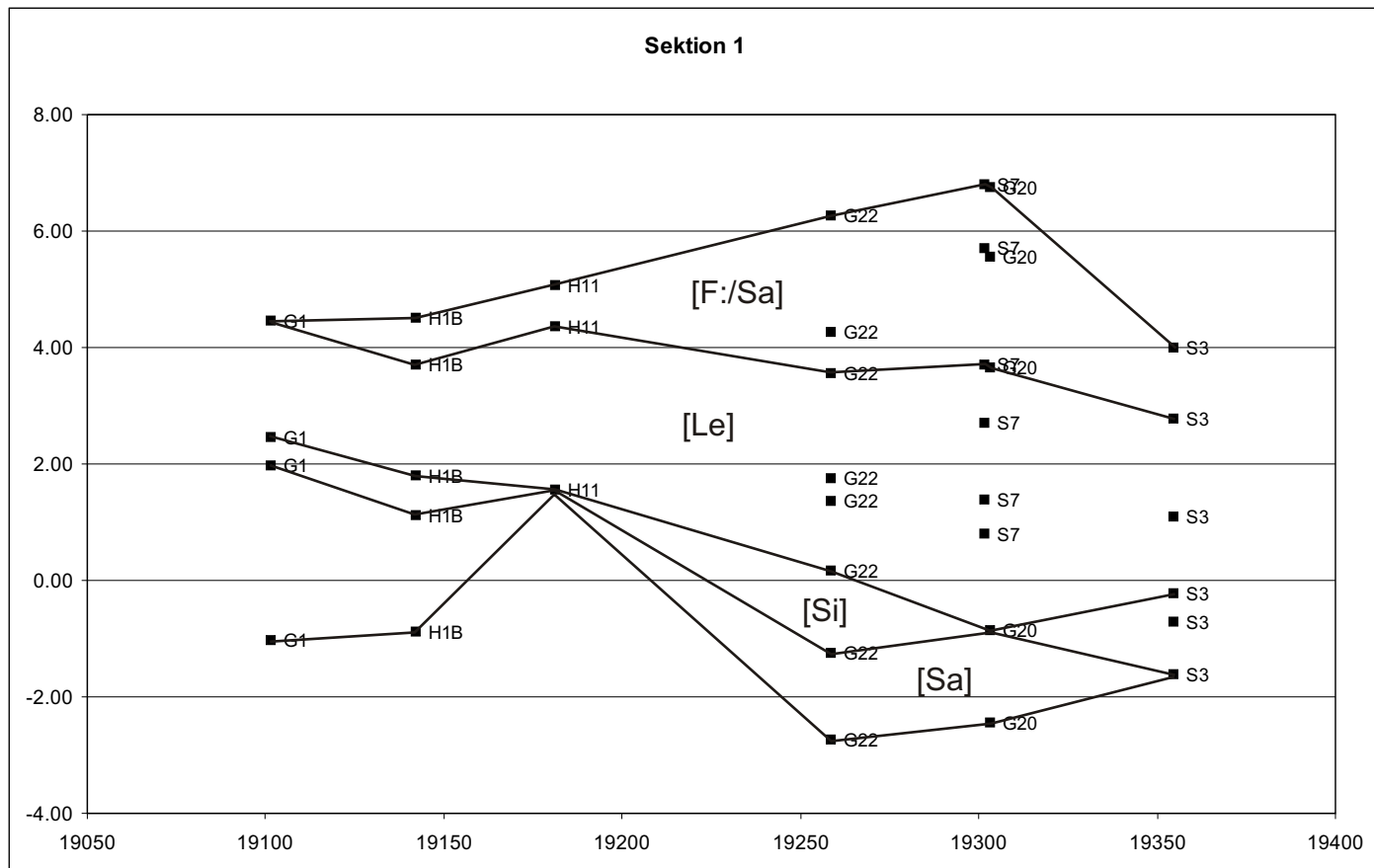
Översiktsbild i plan med sektioner markerade

Sektioner för uppritande av lagerföljd

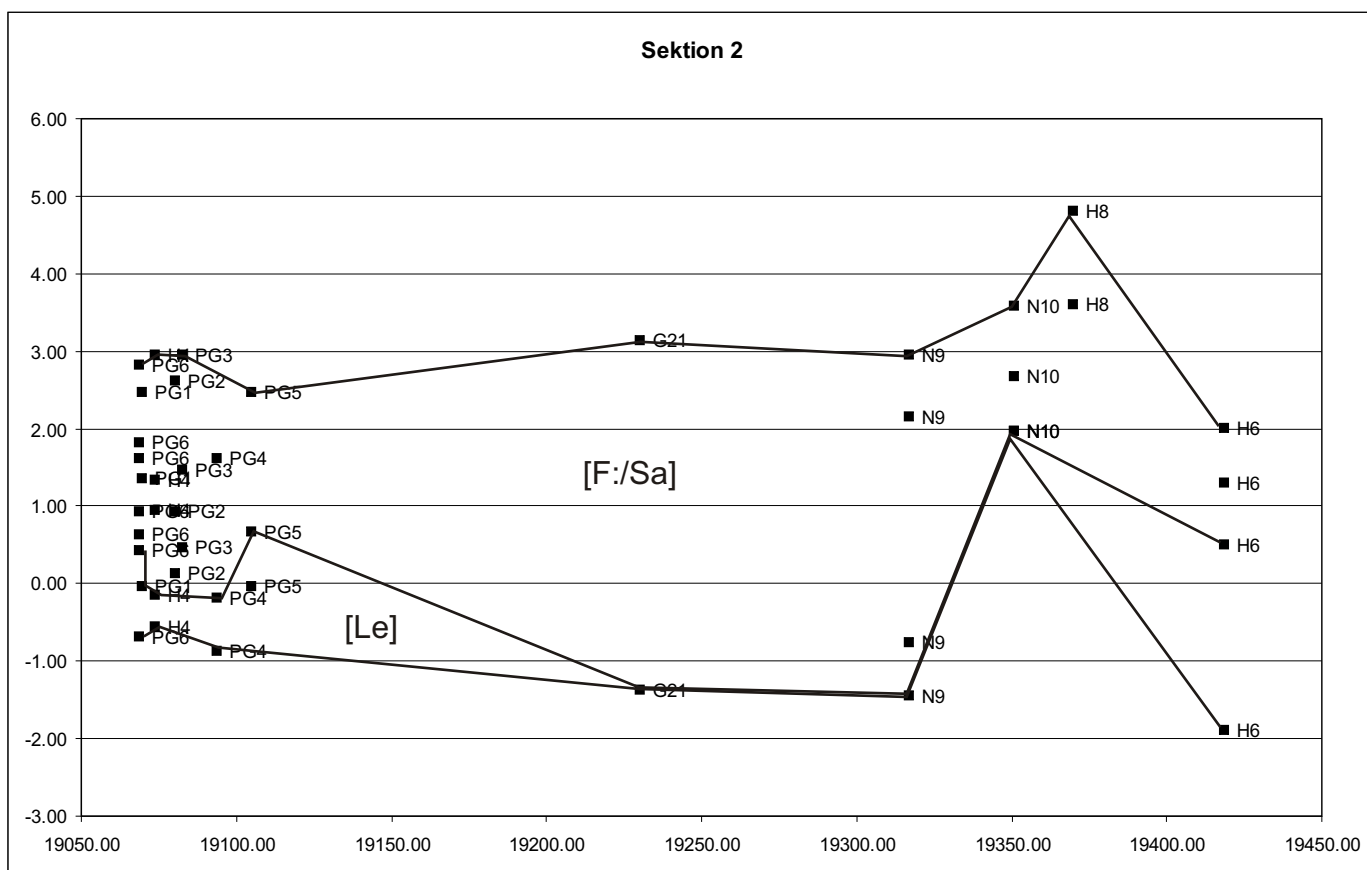


Bilaga 2b

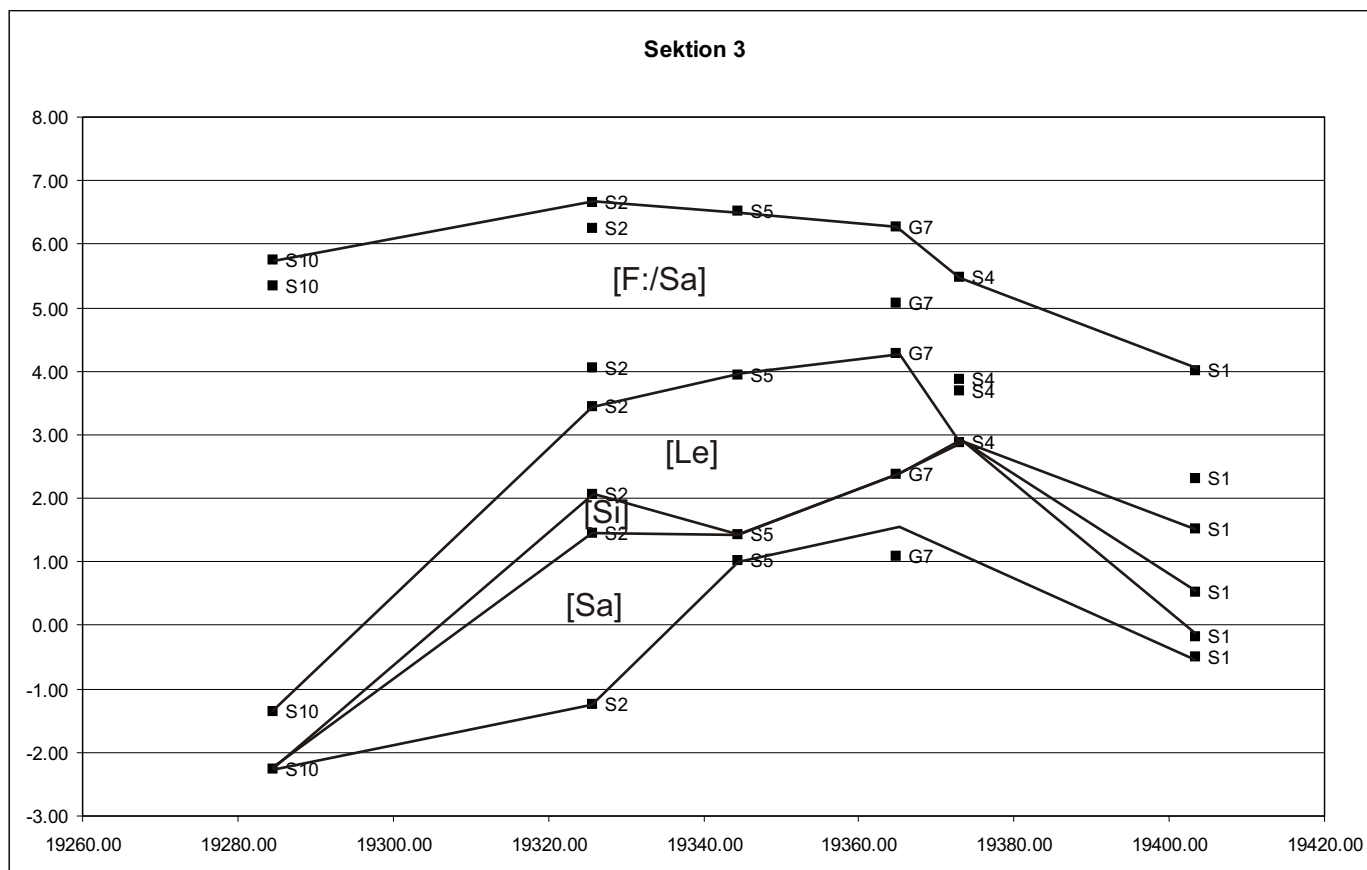
Marksektioner



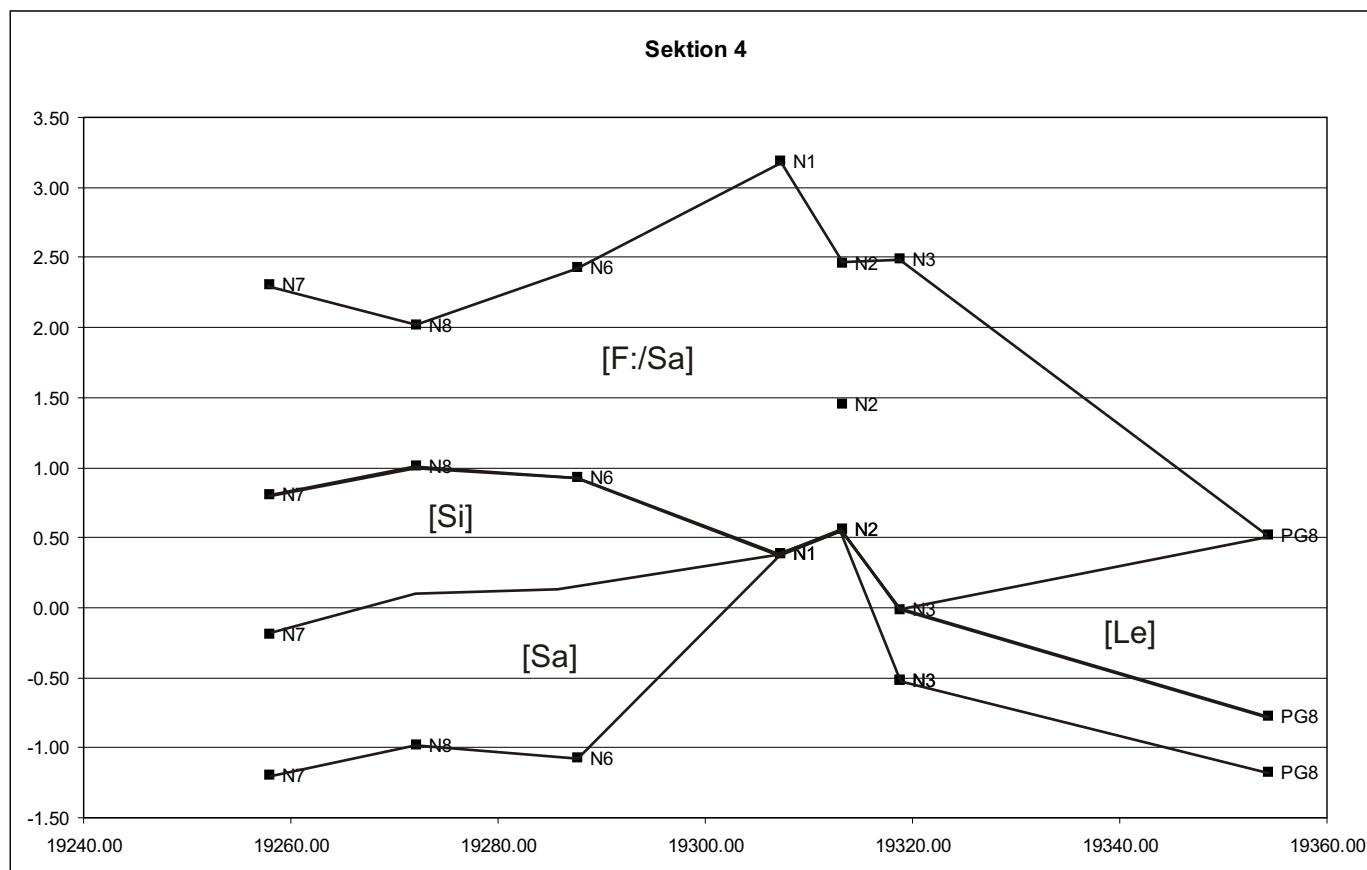
Sektion 1 projicerad i nord-sydlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive y-kordinater på x-axeln.



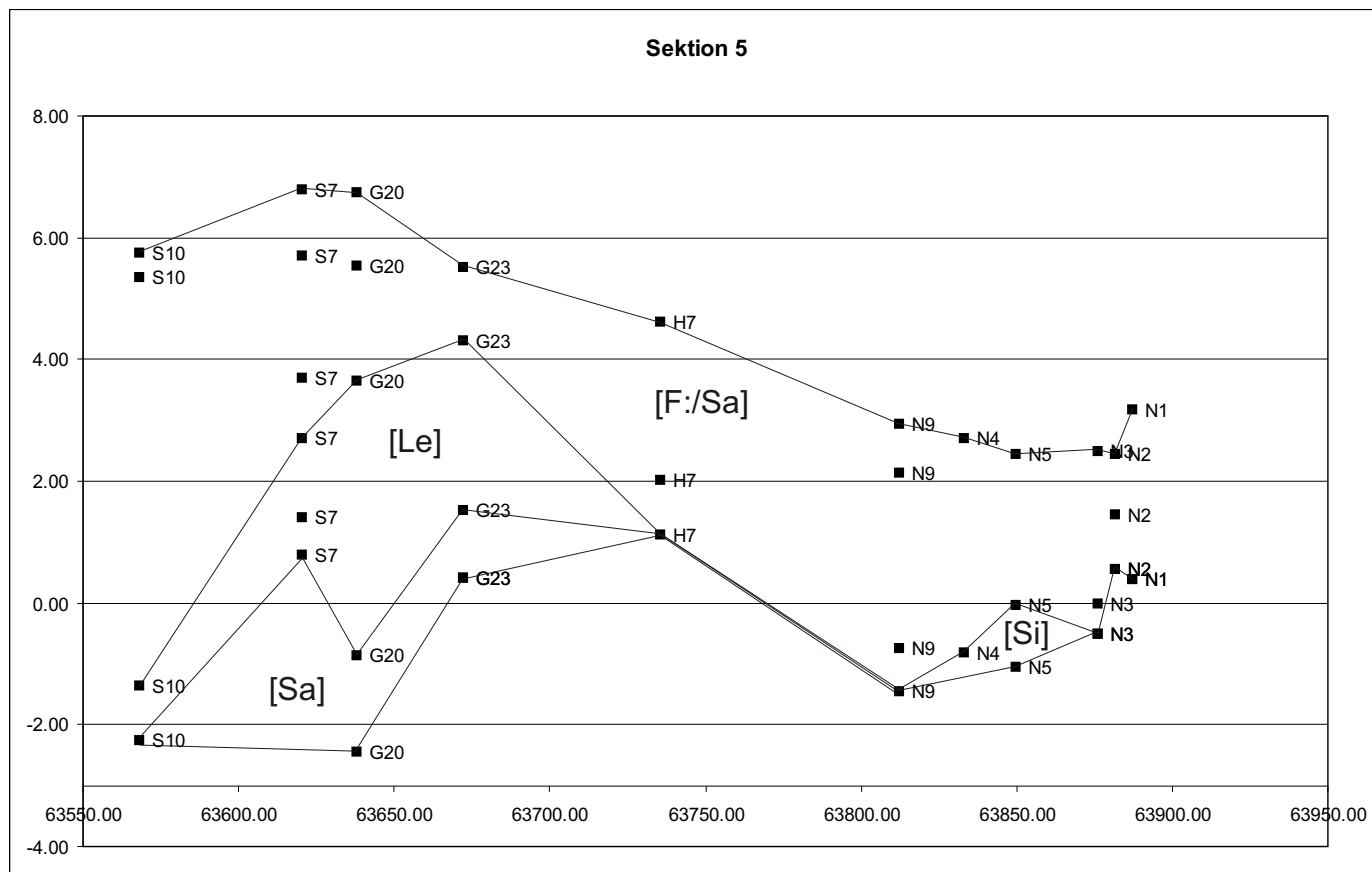
Sektion 2 projicerad i nord-sydlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive y-kordinater på x-axeln.



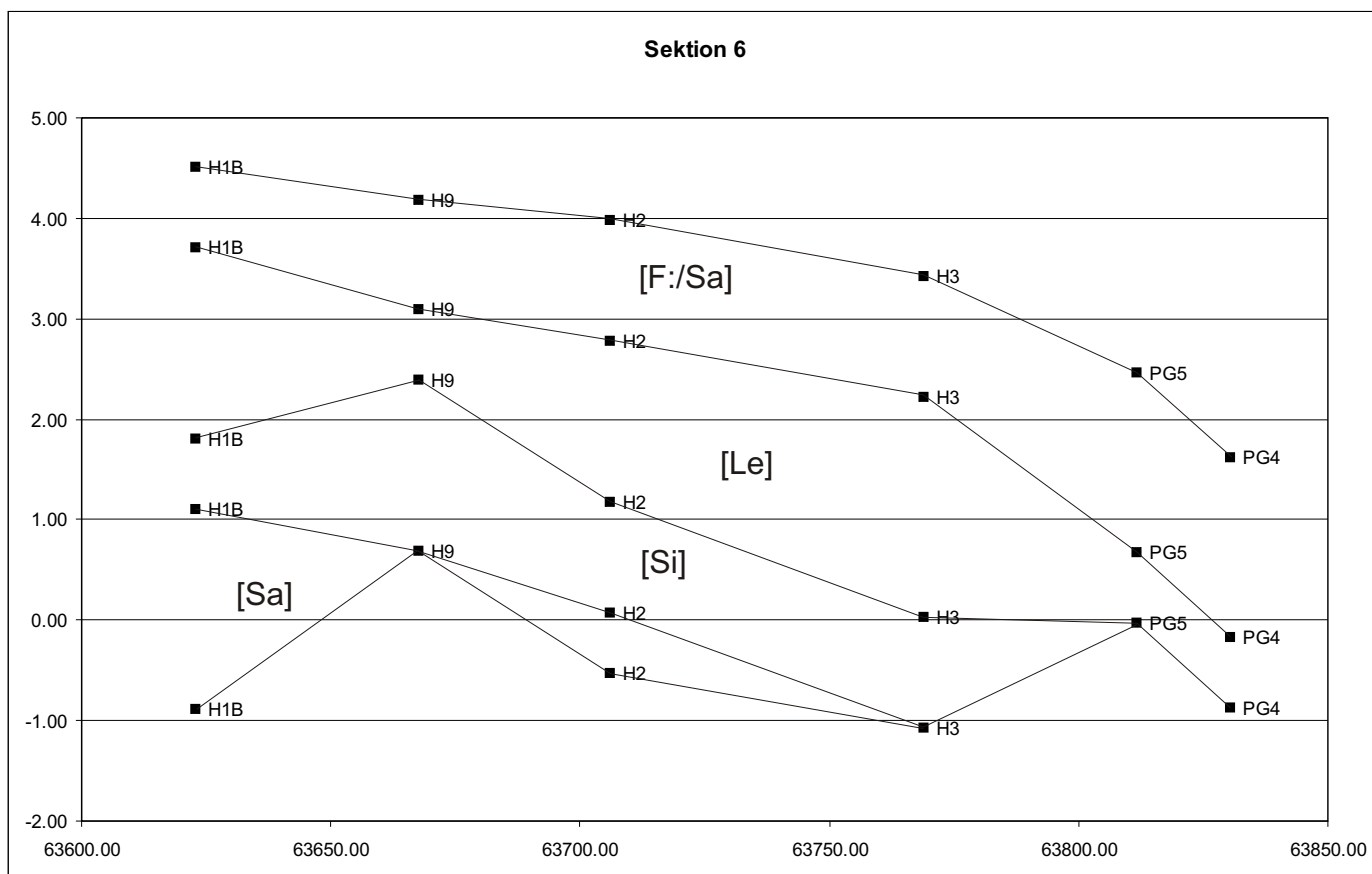
Sektion 3 projicerad i nord-sydlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive y-kordinater på x-axeln.



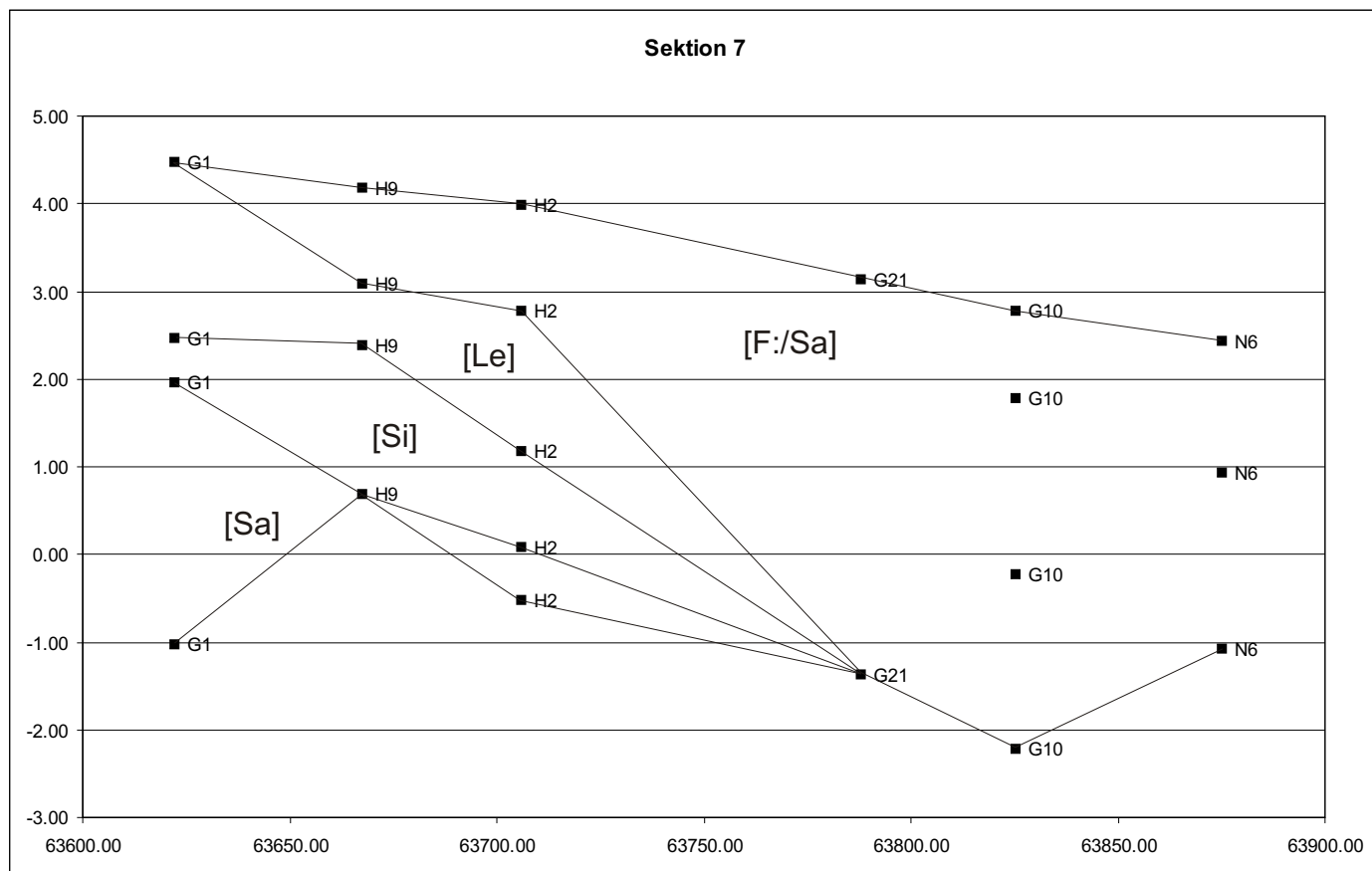
Sektion 4 projicerad i nord-sydlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive y-kordinater på x-axeln.



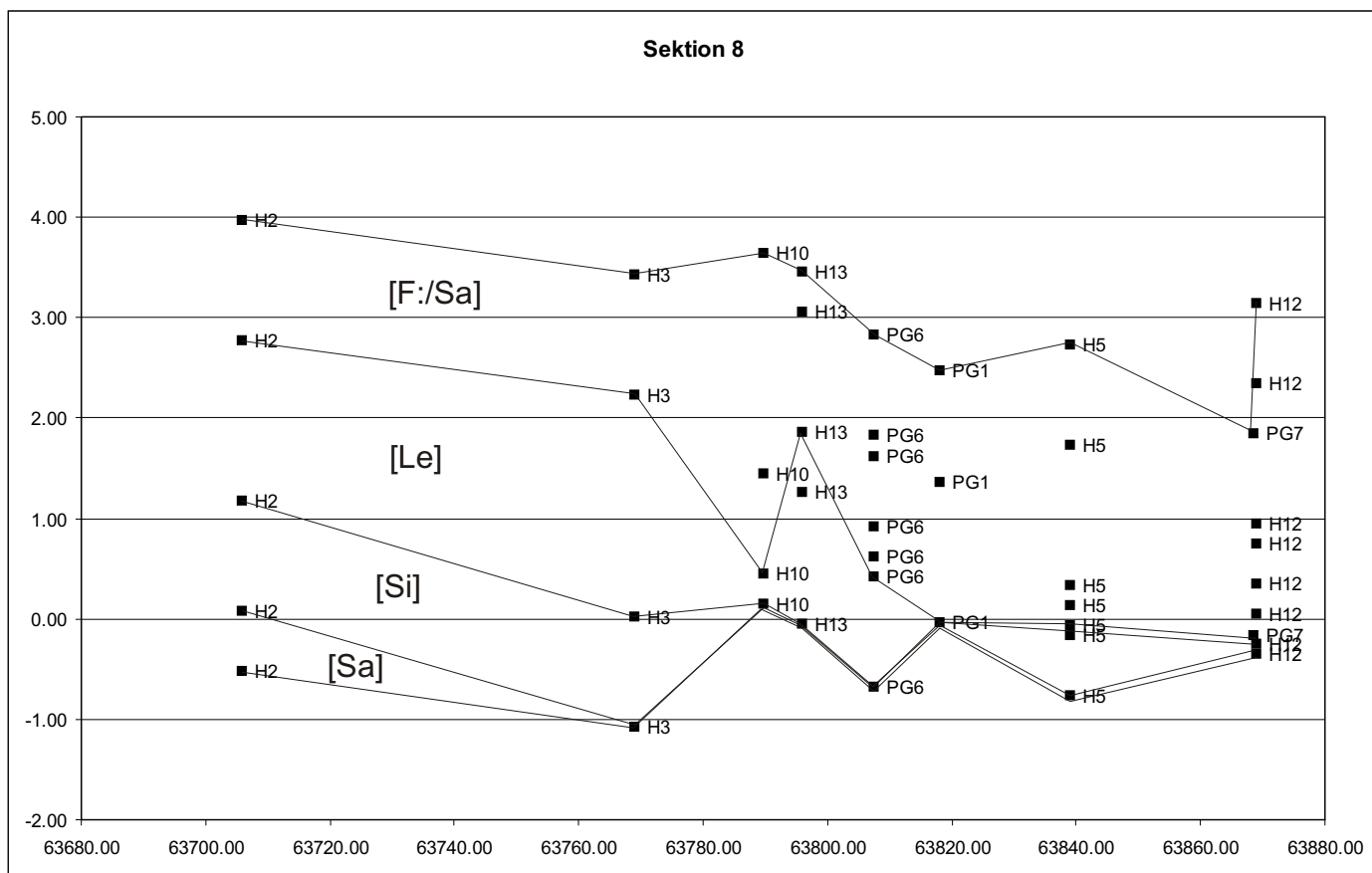
Sektion 5 projicerad i öst-västlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive x-kordinater på x-axeln.



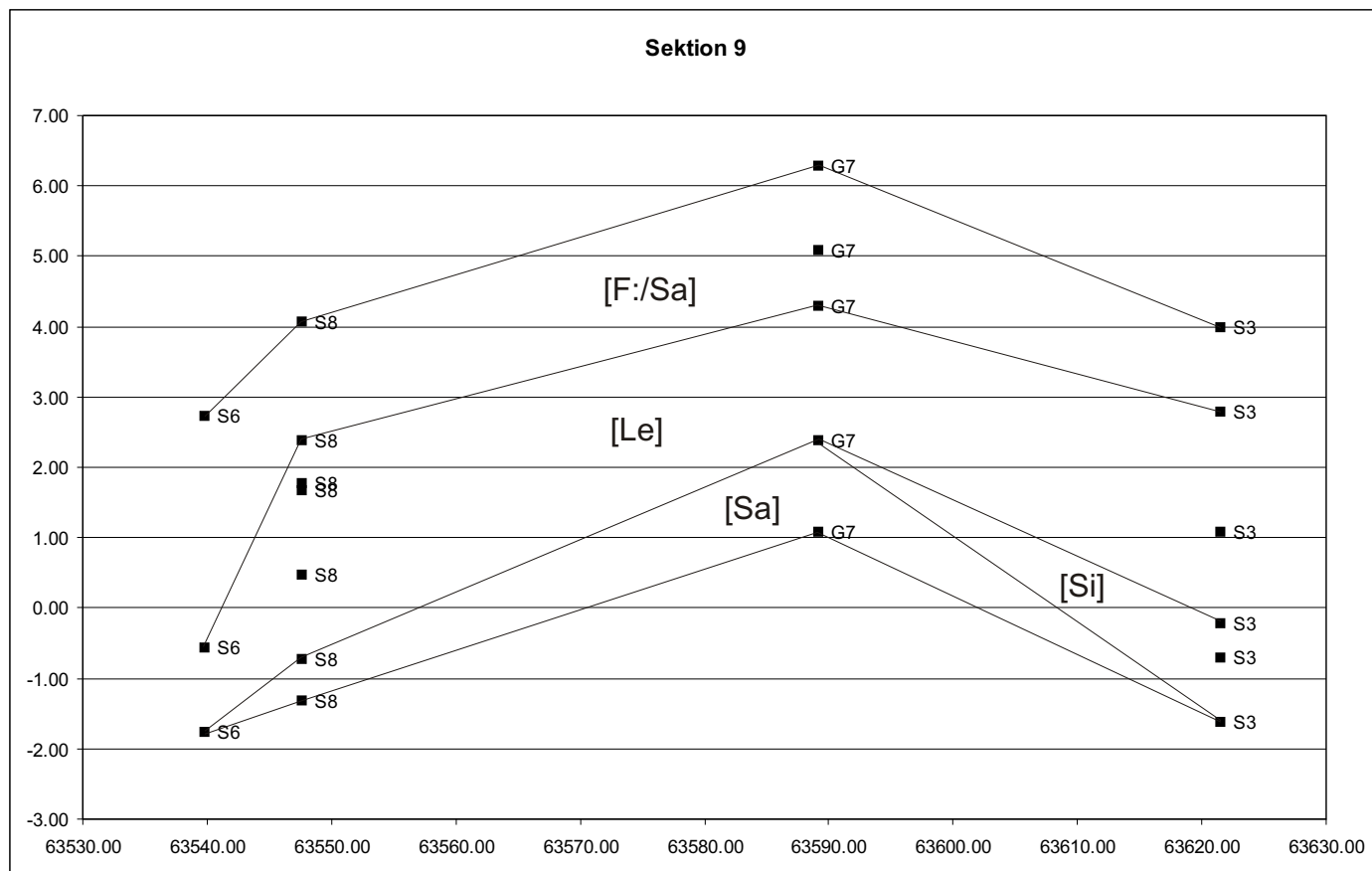
Sektion 6 projicerad i öst-västlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive x-kordinater på x-axeln.



Sektion 7 projicerad i öst-västlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive x-kordinater på x-axeln.



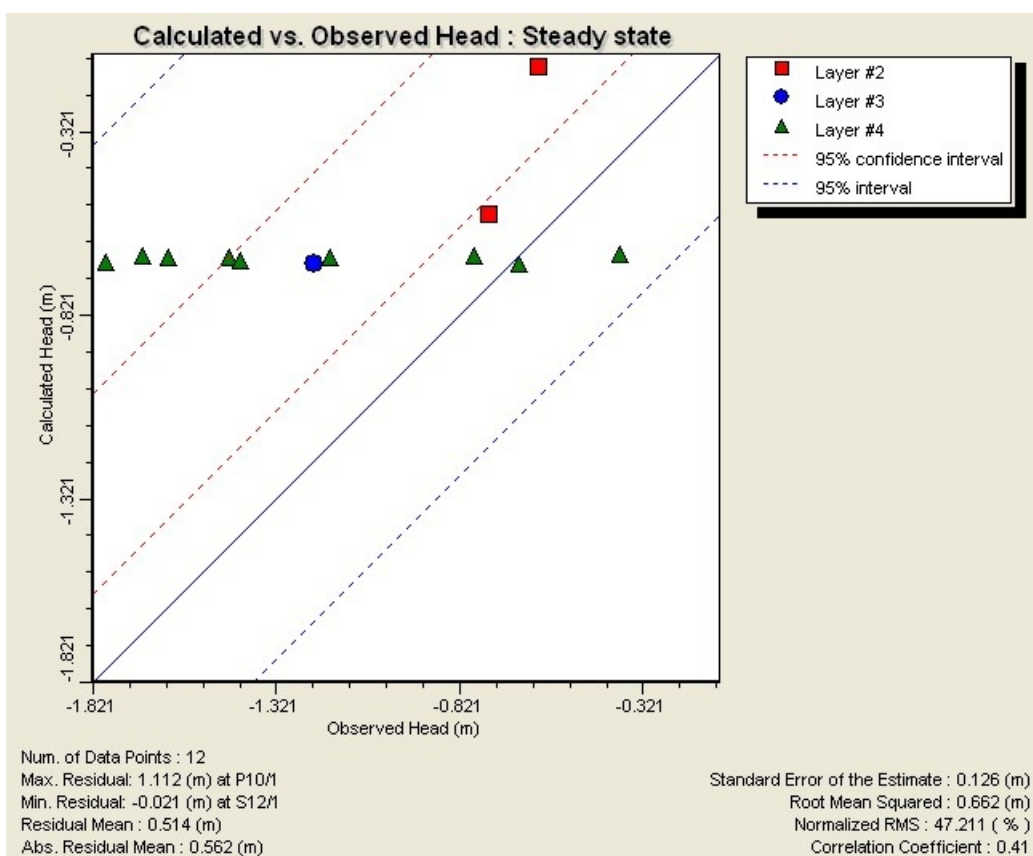
Sektion 8 projicerad i öst-västlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-kordinater på y-axeln respektive x-kordinater på x-axeln.



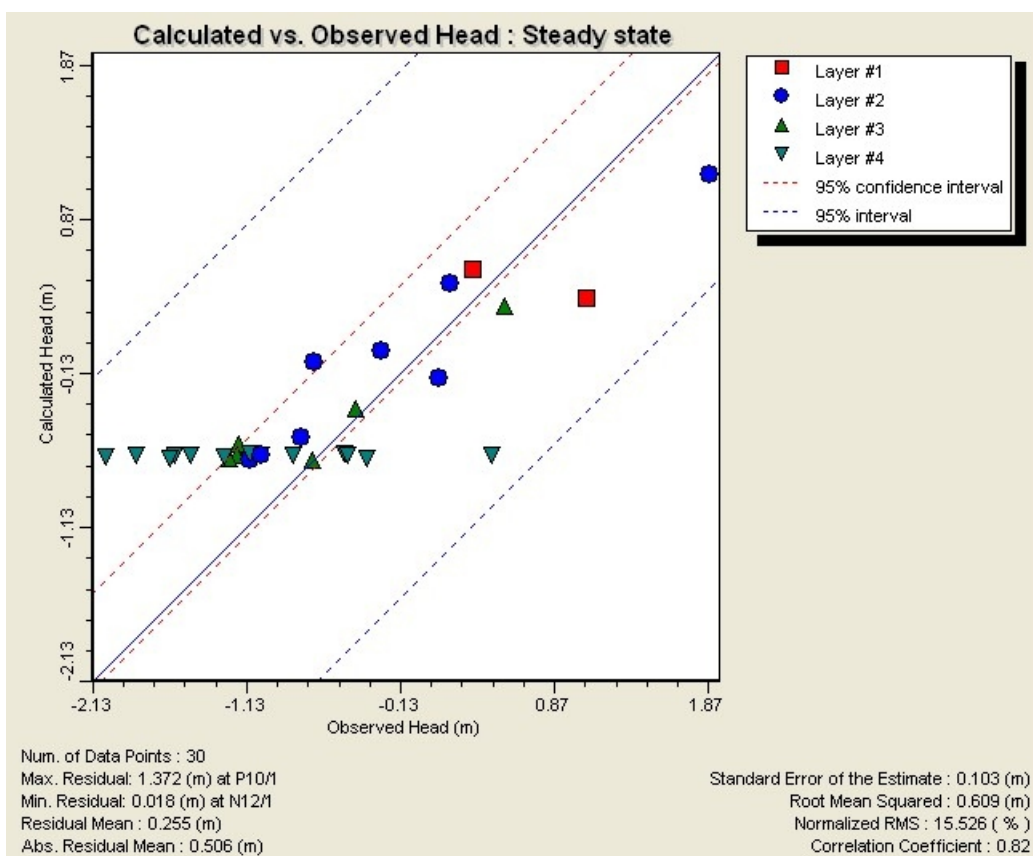
Sektion 9 projicerad i öst-västlig riktning. Enheten är meter på de båda axlarna, z-koordinater på y-axeln respektive x-koordinater på x-axeln.

Bilaga 3

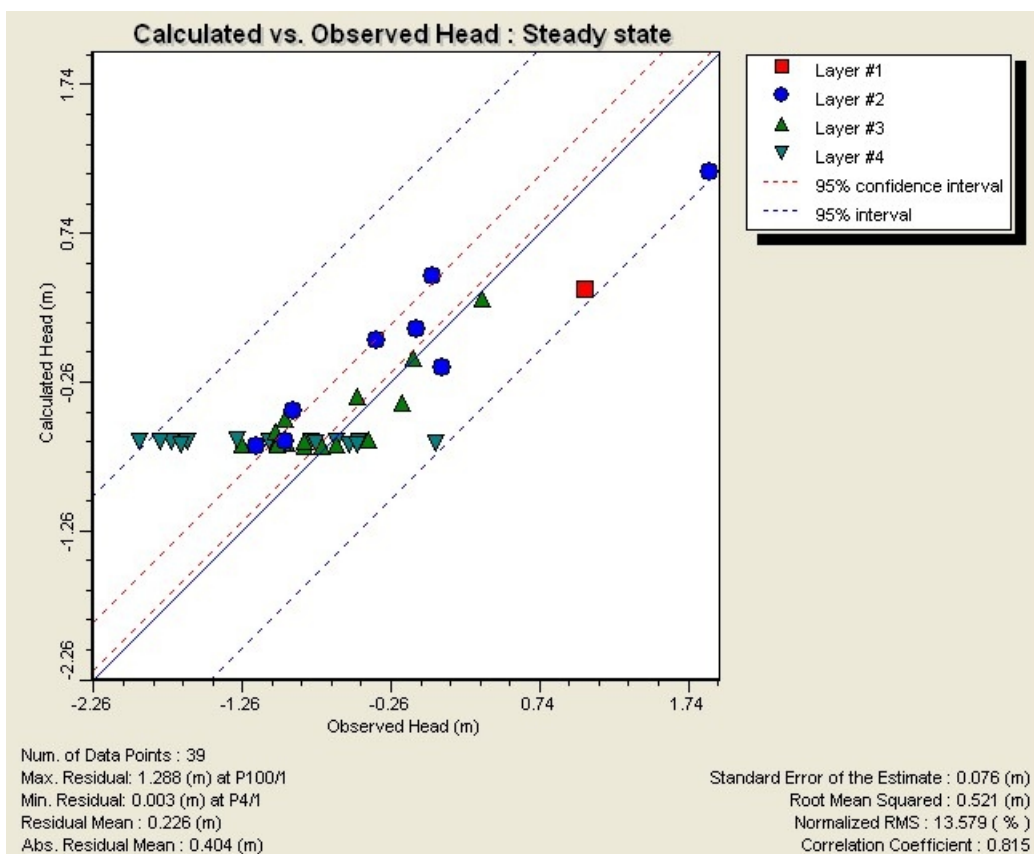
Resultatplottar



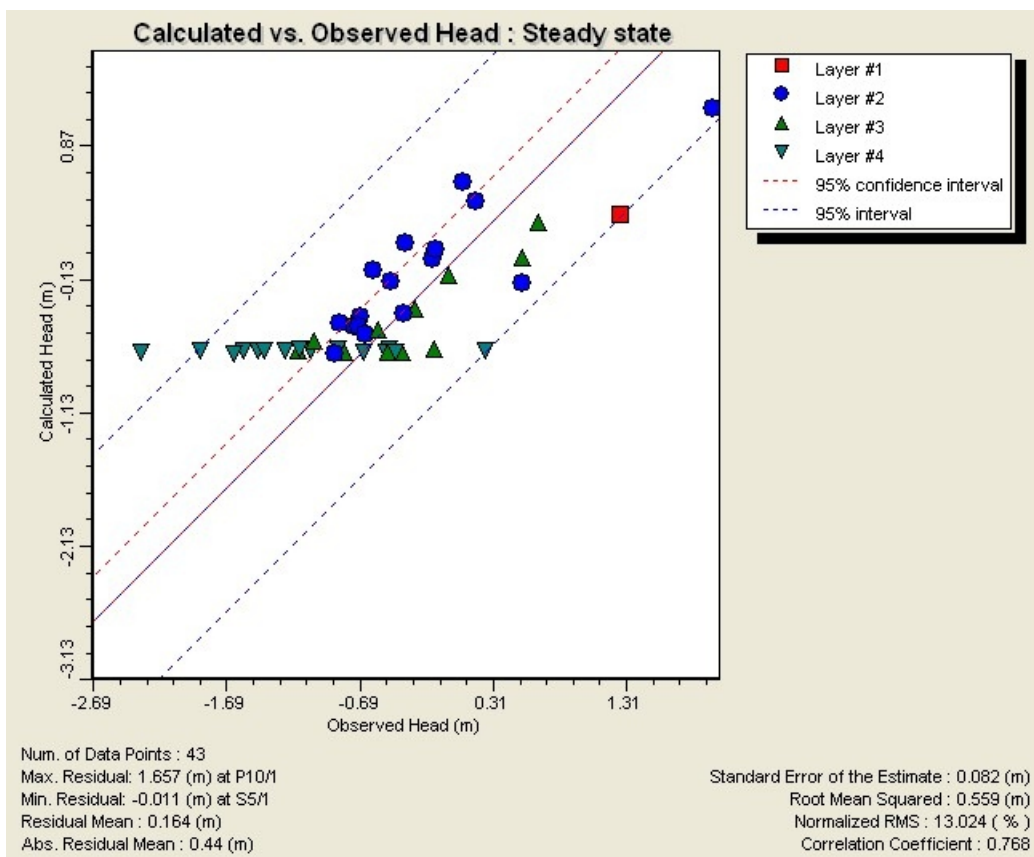
Resultatgraf för medelgrundvattennivån 1998



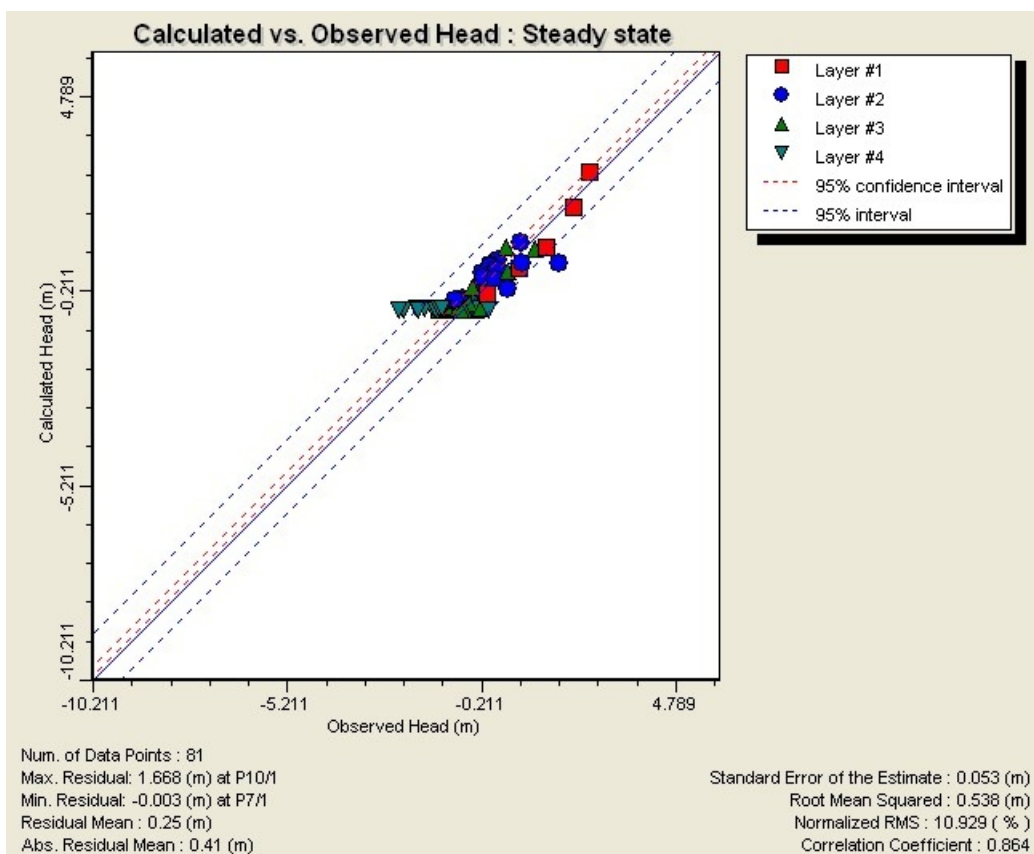
Resultatgraf för medelgrundvattennivån 1999



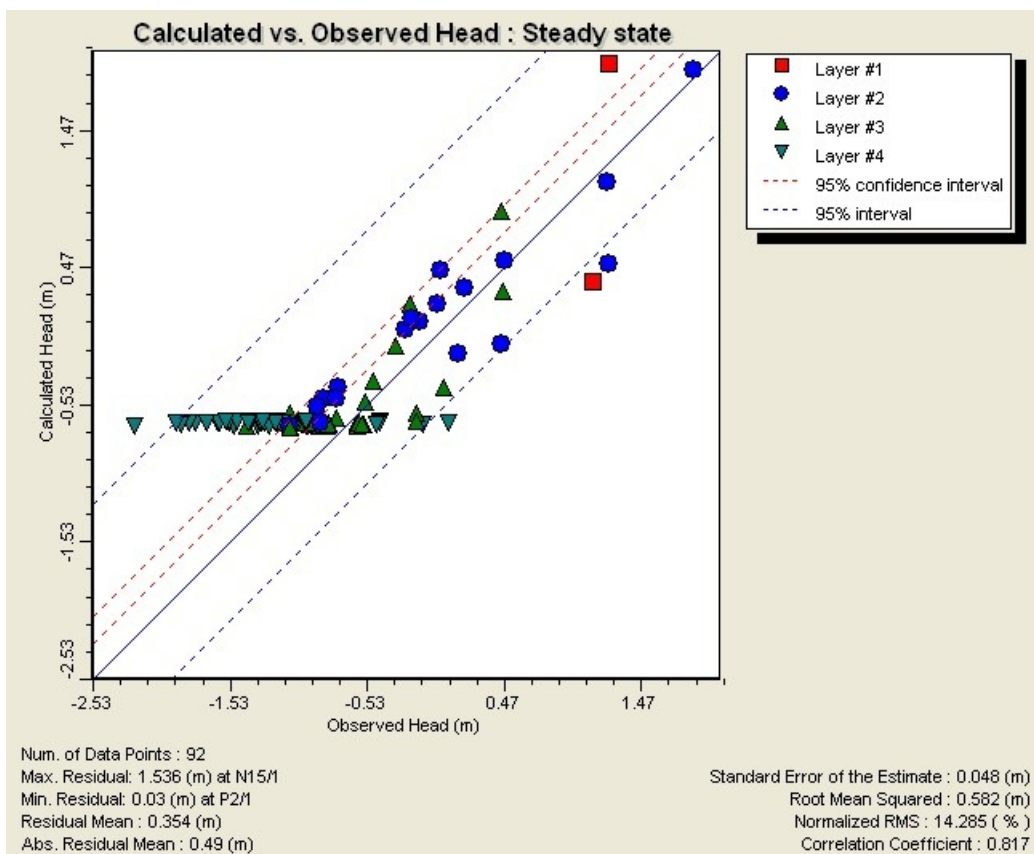
Resultatgraf för medelgrundvattennivån 2000



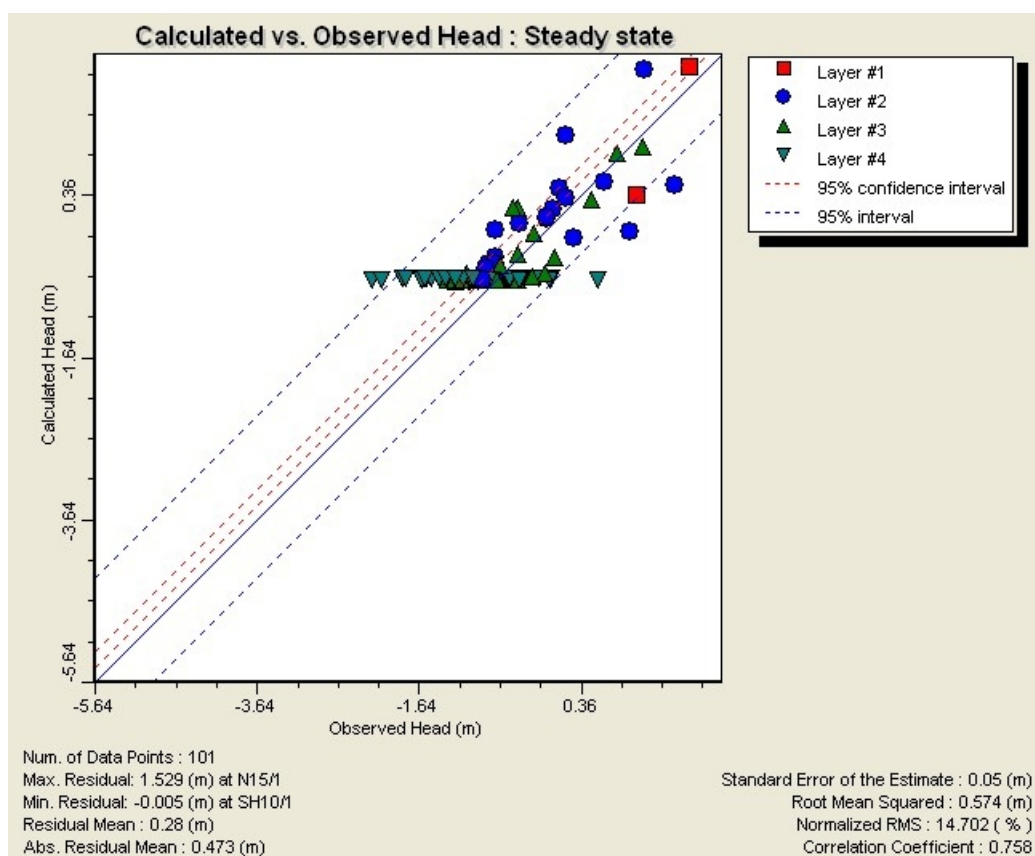
Resultatgraf för medelgrundvattennivån 2001



Resultatgraf för medelgrundvattennivån 2002



Resultatgraf för medelgrundvattennivån 2003



Resultatgraf för medelgrundvattennivån 1998 - 2003