

# Nitrat i grundvattnet – Modellanalys av vattenflöde till Hörviks vattentäkt

Nitrate in the groundwater – Model analysis  
of water flow to Hörvik's water supply

---

Terje Petersson

# Sammanfattning

## Nitrat i grundvattnet – Modellanalys av vattenflöde till Hörviks vattentäkt

*Terje Petersson*

En brunn som förser Hörvik med dricksvatten har en hög halt av nitrat. Hörvik ligger på Listerlandet i västra Blekinge. Vatten med för hög nitrathalt är hälsovådligt för människor i allmänhet och spädbarn i synnerhet.

Området som omger brunnen består till största delen av dränerad jordbruksmark med några större djurgårdar för broiler och mink. Brunnen är bergborrad och går djupare än de flesta andra nitratpåverkade brunnar i Sverige. Berggrunden i området domineras av kalkberg med ett relativt högt vattenflöde.

Ett projektarbete utfördes för att ta reda på ursprungskällan till nitraten. I arbetet skapades en grundvattenmodell som skulle simulera vattenflödena i området och sedan spåra en partikels väg till brunnen för att ta reda på den mest troliga källan. GMS Modflow och Modpath är de dataverktyg som användes.

Valideringen av modellen visar att den fungerar tillfredsställande och kan användas för fortsatta undersökningar av grundvattenförhållanden i området.

Modellresultat tyder på att ursprungskällan för den största delen av nitraten är några stora minkfarmar som ligger på en sluttning upp mot Listers huvud söder om brunnen; dock har det tagit ca 25 år för vattnet att ta sig från ursprungskällan till brunnen. Jordbruket i närheten av brunnen bidrar sannolikt med en del nitrat, men en omfattande dränering leder den större delen av vattnet från jordbruksområdet ut i Östersjön.

Slutsatsen är att ett stort antal minkfarmar i ett begränsat område är en bidragande orsak till brunnens höga nitrathalt. Vidare undersökningar bör visa vilka åtgärder som behövs för att minska nitrathalten i brunnen.

Nyckelord: nitrat, grundvatten, kalkberggrund, minkfarm, Listerlandet

## Abstract

### **Nitrate in the groundwater – Model analysis of water flow to Hörvik's water supply**

*Terje Petersson*

A well, situated on Listerlandet in the western part of Blekinge in Sweden, has a very high content of nitrate. Water with a too high content of nitrate is hazardous to human health, in particular to small children. The area surrounding the well is mostly drained agricultural land with some larger farms for chicken and mink. The well takes its water from the bedrock and is deeper than most other wells affected by nitrate. The bedrock in the area is dominated by limestone with a relatively high flow of water.

This thesis was performed in order to find the source of the nitrate. A groundwater model, simulating the water flow, was created. The model was used to trace the particles flowing to the well in order to find the most likely source. GMS Modflow and Modpath were used to create the model.

The validation of the model shows that the model is good enough to be used for further investigation of the groundwater in the area.

The model result indicates that the original source for most of the nitrate is some large mink farms situated on the slope of a hill south of the well. Calculation shows that it takes the water 25 years to flow from the farms to the well. There is also a probable contribution of nitrate from the agriculture in the vicinity of the well. But an extensive drainage system brings most of the water from the cultivated area into the Baltic Sea.

Conclusions are that a large amount of mink farms placed in a small area contributes to the high content of nitrate in the well. Further examinations are needed to show which measures should be taken in order to diminish the content of nitrate in the well.

Keywords: nitrate, groundwater, limestone bedrock, mink farm, Listerlandet

*Institutionen för Geovetenskaper, Villavägen 16, 752 36 Uppsala*

ISSN 1405 – 5765



## Förord

Rapporten är ett examensarbete inom Civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik som gjorts på uppdrag av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och Sölvesborgs kommun. Handledare var Mattias Gustafsson, SGUs Hydrogeologiska avdelning, Lund och ämnesgranskare var Lars-Christer Lundin, Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära, Uppsala universitet. Resultatet av examensarbetet har använts av Mattias Gustafsson i rapporten "Grundvattenmodellering Sölvesborg" som publicerades av SGU 2004.

Texten i rapporten är riktad till allmänheten i Sölvesborgs kommun, men den är uppbyggd som en akademisk rapport med en teoridel, som följs av metod, resultat och diskussion. På grund av att rapporten är skriven för allmänheten är teoriavsnittet relativt förenklat och grundläggande. Kapitel 2.1.3 ger en teoretisk grund, som dock inte är nödvändig för förståelsen av resultatet. Kapitel 4 ger en detaljerad beskrivning av grundvattenmodellen för dem som vill sätta sig in i förutsättningarna för att nå de slutsatser som presenteras.

Den största delen av de fakta som användes för att skapa modellen kommer från Mattias Gustafsson och består till stor del av utdrag från brunnsarkivet och vattenmätningar som han har gjort, på uppdrag av Sölvesborgs kommun, i arbetet med den större modell som beskriver grundvattenflödet för hela Listerlandet. Viss hjälp med datasammanställning har fåtts från Jonas Gierup. Övrig information till utförandet har erhållits från Sölvesborgs kommun, bibliotek och Internet.

Arbetet med modellen bestod av lika mycket databashantering som av modellförändring. Att använda databaser är ett enkelt och snabbt sätt att göra förändringar i modellen. Dessutom skapade det möjligheten att göra nya modeller med samma grundfakta som den förra på ett enkelt sätt.

Jag, Terje Petersson, tackar Sveriges Geologiska Undersöknings hydrologiska avdelning i Uppsala för hjälpen med datorer, dataprogram, indata och deras fantastiska tålamod. Tålamod har även min handledare Mattias Gustafsson haft och jag hoppas att han är nöjd med resultatet. Han har dessutom kommit med viktiga frågor och vi har haft utvecklande samtal vilket hjälpt mig förbättra modellen och diskussionsavsnittet.

Tackar dessutom min ämnesgranskare universitetslektor Lars-Christer Lundin för hans snabba svar med konstruktiv kritik och Sölvesborgs kommun för deras hjälp med fakta och bilder.

Eftersom jag inte får någon annan möjlighet vill jag dessutom tacka alla mina vänner i Uppsala som har gjort studietiden där till den bästa tiden i mitt liv.

Som en del av uppdraget att kartlägga grundvattenflödena på Listerlandet har SGU hjälpt till med utformningen av dammar som skall minska vattenåtgången på sommaren. Dammarna förhindrar att det näringsrika dräneringsvattnet från Listerlandets jordbruk leds ut i Östersjön. Därigenom minskar bidraget till eutrofieringen samtidigt som vattnet kan användas till att bevattna åkrarna igen. Återanvändningen minskar även belastningen på grundvattnet eftersom det ersätts av det insamlade dräneringsvattnet. Dessutom innehåller vattnet redan mycket näringsämnen och behovet av gödsling blir inte lika stort. Dammarna blev färdiga våren 2004.



# Nitrat i grundvattnet – Modellanalys av vattenflöde till Hörviks vattentäkt

1	Inledning och syfte.....	1
1.1	Inledning.....	1
1.2	Syfte.....	2
2	Teori.....	3
2.1	Grundvattenbildning och hydrologi.....	3
2.1.1	Den hydrologiska cykeln.....	3
2.1.2	Grundvatten.....	4
2.1.3	Vattnets flöde.....	6
2.2	Sedimentära bergarter och kritberggrund.....	8
2.3	Kväve och nitrat.....	9
2.3.1	Nitrat i grundvatten.....	10
2.4	Nitratkällor.....	10
2.4.1	Nitrifikation.....	10
2.4.2	Luftburen kvävebelastning.....	11
2.4.3	Jordbruket.....	12
2.4.4	Skogsbruket.....	12
2.4.5	Djurhållning.....	13
2.4.6	Övriga nitratkällor.....	13
3	Listerlandet och Hörvik.....	14
3.1	Listerlandets geologi.....	15
3.2	Området kring Hörviks vattentäkt.....	16
4	Utförande.....	18
4.1	Modellverktyg.....	18
4.2	Modelluppbyggnad.....	19
4.2.1	Bakgrundsbilden.....	19
4.2.2	Randen.....	19
4.2.3	Lagerindelningen.....	20
4.3	Parametrar.....	23
4.3.1	Konduktiviteterna.....	23
4.3.2	Porositet.....	23
4.3.3	Grundvattenbildning.....	23
4.4	Källor och sänkor.....	24
4.4.1	Brunnar.....	24
4.4.2	Dräneringen.....	24
4.5	Simulering.....	24
4.5.1	Kalibrering.....	24
4.5.2	Validering.....	26
4.5.3	Nitratimplementering.....	26
4.5.4	Tidsberäkningar.....	26
5	Resultat.....	27
5.1	Den slutliga modellen.....	27
5.2	Modpathresultatet.....	30
6	Diskussion.....	32
6.1	Modellen.....	32
	Referenser.....	36





# 1 Inledning och syfte

## 1.1 Inledning

Vatten är en väsentlig del av vårt dagliga liv och vårt viktigaste livsmedel. Vi dricker det, använder det för allehanda rengöring, transporterar material med och trafikerar på det. Vattnet finns överallt omkring oss; människan består till 70 % av vatten, haven tar upp dubbelt så mycket av jordens yta som land och både i polarisarna och under oss finns (som det uppfattas) oändliga mängder vatten lagrade.

Även om det finns väldigt stora mängder vatten att tillgå är inte allt placerat så att människan kommer åt det. Den största delen av jordens varelser är på ett eller annat sätt beroende av tillgång på vatten och vattnet är essentiellt för livets fortlevnad. Det är därför av största vikt att människan är försiktig med utnyttjandet och hanteringen av vattnet för att skapa en hållbar utveckling.

Övergödningen av haven är ett tydligt exempel på hur människan påverkar vattnet. En av de bidragande orsakerna till övergödningen är ett intensivt användande av kväve i jord- och skogsbruket. Marken gödslas med stall- och konstgödsel i sådana mängder att växterna inte kan tillgodogöra sig allting. Den resterande mängden kväve följer med vattnet till närmaste vattendrag och senare ut till haven.

På senare tid har det uppmärksammats att även många kommunala vattenreservoarer är påverkade av kvävet och då i dess stabilaste jonform, nitrat. Studier visar också på att det är hälsovådligt för spädbarn att dricka vatten med för hög nitrathalt. De kommunala brunnar som undersökts hittills får sitt vatten från närliggande vattendrag som i sin tur har fått sin nitratkoncentration från extensiv gödning i omliggande jordbruk. På samma sätt som jordbruket är en bidragande orsak till övergödningen är ett intensivt jordbruk av vissa näringskrävande grödor i samband med genomsläppliga jordar en vanlig orsak till förhöjda halter av nitrat i grundvattnet.

Den svenska regeringen gav år 2000 Naturvårdsverket i uppdrag att föreslå en miljö kvalitetsnorm för nitrat och förslaget presenterades under våren 2002. I förslaget preciseras vilken nitrathalt ett grundvatten får ha och dessutom en tidsplan för när kommunerna skall komma till rätta med problemet med för höga halter. Normen ska bidra till att miljö kvalitetsmålet ”Grundvatten av god kvalitet” kan uppfyllas.

På Listerlandet i Sölvesborgs kommun finns det en brunn som försör byn Hörvik med dricksvatten. Brunnen har länge haft för hög halt av nitrat. Skillnaden mellan den här brunnen och många av de andra som har för höga nitrathalter är att den får sitt vatten från berggrunden. Det är ovanligt och svaren på frågorna nedan kanske inte är de väntade.

- Vad är det som gör att brunnen har så hög nitrathalt?
- Har jordbruket en inverkan på grundvattnet eller kan det finnas en annan nitratkälla i området?

Modelleringsverktyget GMS Modflow används för att skapa modellen. Den används eftersom SGU gör en större modell för hela Sölvesborgs kommun med samma simuleringsverktyg. En annan vanlig modell för att simulera grundvattenflöden är MIKE-SHE. MIKE-SHE är mer komplex än Modflow och beskriver dessutom den omättade zonen och ytvattnet. Den är också mer krävande på indata. Enligt KASAMs offentliga utredning av kunskapsläget på kärnfallsområdet (2001) är modellen mest lämpad för avrinningsområden och formuleringen av ekvationerna innebär att den knappast är lämpad för simuleringar av sprickigt berg.

## **1.2 Syfte**

Syftet med det här examensarbetet är att med hjälp av modelleringsverktyget GMS Modflow och Modpath simulera grundvattenflödet i kritberggrunden i sydöstra delen av Listerlandet. Resultatet skall dessutom användas för att bestämma var mängden nitratet, som påverkat en brunn i närheten av Hörvik på Listerlandet, kommer ifrån. En litteraturstudie av nitratpåverkan och nitratkällor presenteras också.

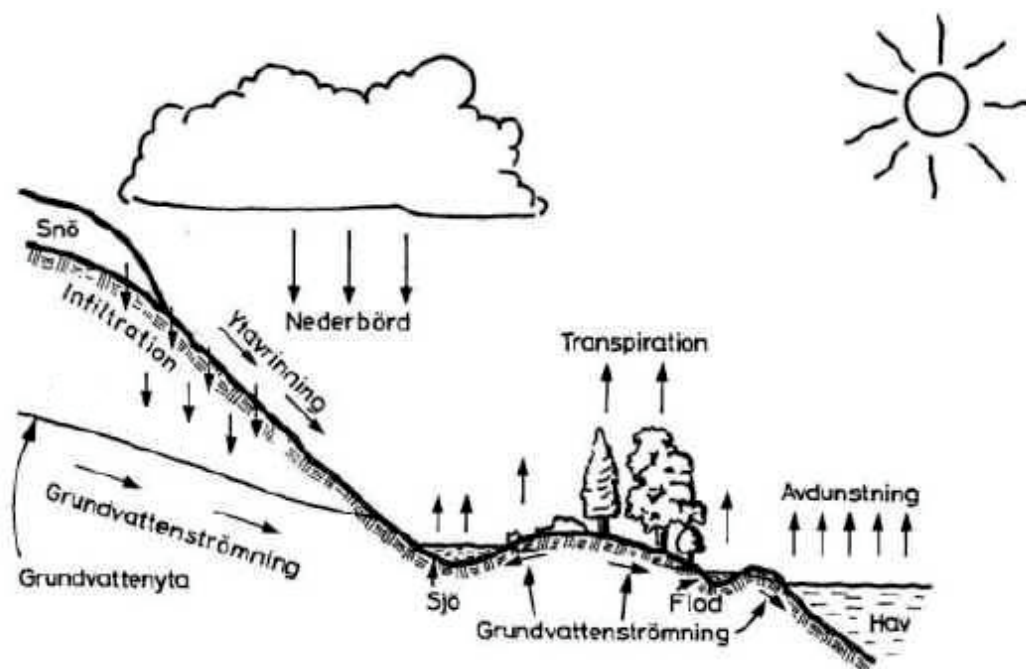
## 2 Teori

### 2.1 Grundvattenbildning och hydrologi

#### 2.1.1 Den hydrologiska cykeln

Allt vatten på jorden har alltid funnits här. Inget nytt vatten har bildats och inget har försvunnit. Dock byter vattnet skepnad när temperatur och tryck bestämmer vilken fysikalisk fas som vattnet befinner sig i; is (fast), vatten (vätska) och vattenånga (gas).

Vattnet finns överallt omkring oss hela tiden. I luften finns vattenånga och moln, på land finns sjöar och åar, haven har en mängd vatten som omger allt land och i marken finns det grundvatten. Dessa olika ansamlingar av vatten kallas magasin och beskrivs med olika egenskaper som storlek, omsättningstid och uppehållstid (Grip & Rodhe, 1994). Storleken bestämmer hur mycket vatten ett magasin kan innehålla. Ett magasinets omsättningstid bestäms av tiden det skulle ta att byta ut allt vatten i magasinet med den genomströmning som finns. Upphållstiden anger hur länge nyss inkomna partiklar i medeltal stannar i magasinet.



Figur 1. Den hydrologiska cykeln.

Vattnets rör sig hela tiden mellan magasinerna i den hydrologiska cykeln (Figur 1). Den drivande kraften i cykeln är solens värme och tyngdkraften. Solen värmer öppna vattenytor och förångar en del vatten som bildar moln i atmosfären. Molnen rör sig in över land och ger upphov till nederbörd i form av regn eller snö. Vattnet som når jordytan rör sig med gravitationens hjälp ner mot djupare marklager. Växterna tar upp vatten ur marken med energi hämtad från solens strålar. En del vatten tas upp av växterna och transpireras tillbaka till atmosfären med hjälp av fotosyntesen. Samtidigt pågår en viss avdunstning från bladytor och bar mark. Resten av vattnet bidrar till att skapa grundvatten som söker sig, mer eller mindre parallellt med markytan, mot närmaste vattendrag. Förr eller senare letar sig vattnet tillbaka till en öppen vattenyta och cykeln kan starta om igen.

Jorden stora vattenmagasin är haven; 97,5 % av allt vatten som existerar finns i haven, därutöver finns 1,75 % i permafrost, glaciärer och polarisarna och 0,74 % grundvatten. Den lilla del som återstår finns i atmosfären och i floder och sjöar. (Lundin (red.), 2000)

Omsättningstiden varierar väldigt mellan de olika vattenmagasinen. Havet har en omsättningstid på 3 000 år, medan atmosfärens vattenånga är helt utbytt efter 10 dagar.

Till alla vatten, ytvatten som grundvatten, hör ett avrinningsområde. Inom detta område faller all nederbörd som slutligen kan fylla på vattenmagasinet. Ett avrinningsområde bestäms av markens topografi och mellan dem finns en så kallad vattendelare. Vattendelaren följer en linje mellan de högsta punkterna i landskapet och därifrån rinner vattnet mot närmaste vattendrag.

### 2.1.2 Grundvatten

I marken finns två sorters vatten:

- Grundvatten – som finns under grundvattenytan
- Markvatten – finns mellan grundvattenytan och markytan

Grundvattnet skapas av markens förmåga att hålla vatten. Förmågan gör att vatten ansamlas i marken; ett grundvattenmagasin byggs upp. Markens fysikaliska egenskaper bestämmer hur mycket vatten som hålls och var grundvattenytan ligger. På vattnets väg genom jord och berg förändras dess innehåll av mineraler och lösta ämnen p.g.a. reaktioner med omgivningen. Omgivningen och uppehållstiden har därför stor påverkan på vattenkvaliteten.

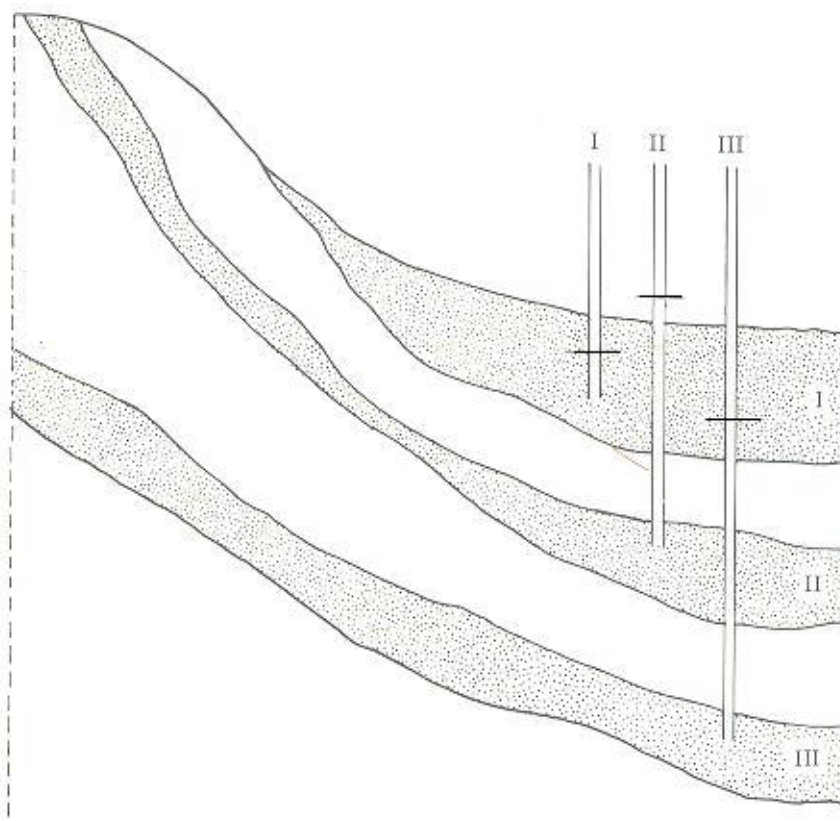
Tillförseln av vatten till grundvattenmagasinen varierar under året eftersom årstiderna har olika temperaturer och varierande mängd regn. Sommaren har störst nederbörd, men är även varmest och därför är också avdunstningen och transpirationen från växtligheten som störst under den här tiden av året. Den vanligaste tiden för tillförsel av grundvatten är därför under höststormar eller vid snösmältningen på våren, när vattentillgången är riklig och avdunstningen liten. Det är också viktigt att uppmärksamma skillnader i nederbörd mellan år. Under ett år med riklig nederbörd fylls magasinen på medan år utan tillräcklig nederbörd medför att de töms. Flera sådana år i följd kan orsaka vattenbrist och, i extrema fall, torka.

Enligt Grip & Rodhe varierar grundvattentillförseln mycket mellan södra och norra Sverige. I norra Sverige är vinterns snölager ett stort magasin som binder vatten under tiden det är kallt. Först när snösmältningen kommer igång på våren kan nederbörden komma grundvattnet tillgodo. Det kan vara mycket vatten som rinner till på en gång och då fylls även markvattenmagasinet och avrinningen till de stora norrländska vattendragen blir mycket snabb. I södra Sverige smälter den snö som faller under vintern normalt i omgångar eftersom det med jämna mellanrum blir varmare perioder på vintern. Här får snösmältningen inte lika stor inverkan på grundvattenytan och vattentillgången (Grip & Rodhe, 1994).

Den grundläggande egenskapen som beskriver grundvattenmagasinets storlek i marken bestäms av porvolymens andel av den totala volymen, porositeten. Markens uppbyggnad av fast material varierar med mineralkornens storlek, form och struktur vilka bestämmer porernas utseende och egenskaper. Den volym som finns i porerna fylls av vätska eller gas, vanligtvis vatten och luft (Grip & Rodhe, 1994).

Porvolymen och strukturen skiljer sig åt mellan markens jordgrund och berggrund. En jordarts porer är någorlunda jämt fördelade över volymen. En berggrund har sprickor i det fasta materialet där vattnet kan flöda och dessa sprickor styr vattnets utbredningsmöjligheter. Det finns skillnader mellan olika bergarter. En berggrund uppbyggd av svaga bergarter kan få en jordliknande struktur med många små sprickor som går kors och tvärs i berget. En sådan berggrund ger bättre förutsättningar för ett extensivt vattenflöde i alla riktningar än en berggrund uppbyggd av hårda bergarter med färre och större sprickor. Urberget är oftast uppbyggt av hårda bergarter och vattenhalten i en sådan berggrund kan vara en tiondels procent (Grip & Rodhe, 1994) (Lindh & Falkenmark, 1972).

Jordarternas och bergarternas olika egenskaper varierar mellan olika geologiska skikt och ger förutsättningar för grundvattenmagasin av varierande storlek på olika djup i marken (Figur 2). Grundvattenmagasinen kallas akviferer och det finns två typer. I en öppen akvifer finns en grundvattenyta där vattentrycket underifrån är det samma som atmosfärtrycket ovanifrån. Ovanför grundvattenytan finns en zon med porer innehållande både fukt och luft. Fukten kallas markvatten och är det vatten som växterna utnyttjar (Grip & Rodhe, 1994). En sluten akvifer finns djupare ner i marken i magasin med andra geologiska förutsättningar och med svårgenomträngliga lager ovanför sig (Grip & Rodhe, 1994).



Figur 2. Akviferer med olika vattentryck, på olika djup i marken (Lindh & Falkenmark, 1972).

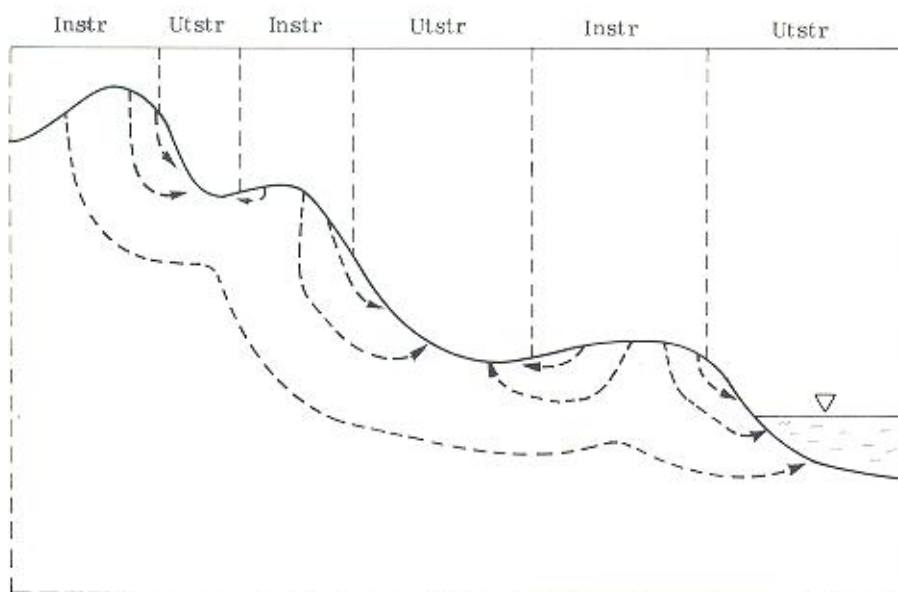
En akvifer har ett påfyllnadsområde. Inom detta område faller den nederbörd som kan fylla på akviferen med nytt vatten. De öppna akviferernas upptagningsområde är vanligtvis relativt begränsade och hör till avrinningsområdet för närmaste ytvattenmagasin, som en flod eller en sjö. En sluten akvifers påfyllnadsområde kan dock täcka ett väldigt stort område och ligga långt ifrån akviferens centrum (Grip & Rodhe, 1994).

### 2.1.3 Vattnets flöde

Begreppet potential används inom hydrologin för att beskriva olika krafters påverkan på vattnet och dess flöden. Den totala potentialen hos markvattnet utgörs av lägespotential och tryckpotential. Lägespotentialen beskriver tyngdkraftens inverkan och definieras som det arbete som skulle krävas för att förflytta en massenhet av vattnet från en referenshöjd till aktuell höjd. Tryckpotentialen är vattnets tryck jämfört med atmosfärens tryck. I grundvattenytan är då tryckpotentialen noll, medan den är negativ ovanför och positiv nedanför (Grip & Rodhe, 1994).

Enligt Grip & Rodhe uppkommer vattenflöde när skillnader i krafter skapar skillnader i potential. Vattnet flödar mot en lägre potential. Markvattnet påverkas i huvudsak av tyngdkraften och söker sig därför neråt i marken. Grundvattenflöde är den rörelse som vattnet under grundvattenytan företar och den är mer horisontellt orienterad, även om krafter i marken kan få vattnet att röra sig både uppåt och neråt (Grip & Rodhe, 1994).

I terrängen finns inströmnings- och utströmningsområden (Figur 3). Vanligtvis finns inströmningsområden högt upp i terrängen och utströmningsområde längre ner. I inströmningsområdena sker den s.k. grundvattenbildningen. Det betyder att grundvattnet fylls på av markvattnet. Därifrån strömmar sedan grundvattnet mot utströmningsområdet där källor kan skapas vilket gör att ytvattnet kan fyllas på av grundvatten (Lindh & Falkenmark, 1972).



Figur 3. Inströmnings- och utströmningsområden i terrängen (Lindh & Falkenmark, 1972).

Markens förmåga att leda vatten beskrivs av dess hydrauliska konduktivitet. Konduktiviteten varierar med markens porositet, struktur och vattenhalt (Grip & Rodhe, 1994). Den konduktivitet som vanligtvis anges är konduktiviteten då marken är vattenmättad d.v.s. när porerna är vattenfyllda. Ett högt värde på konduktivitet betyder att marken har enklare att leda vatten. En mark med större porer har större möjlighet att leda vatten än en mark med mindre porer och har därför en högre konduktivitet. Även sprickor och maskhål ger marken en högre konduktivitet. Skillnader i struktur mellan sand- och lerjordar gör att de kan ha samma porositet, men olika hydraulisk konduktivitet. Även jordar och bergrunder kan ha samma porositet, men olika konduktivitet.

Den formel som används för beräkning av grundvattenströmningar formulerades 1856 av fransmannen Henri Darcy och kallas därför Darcys lag (Grip & Rodhe, 1994). Den visar att flödet mellan två näraliggande punkter i marken är proportionellt mot den totala potentialskillnaden mellan punkterna.

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{d\phi}{dx} \quad (1)$$

Q = vattenföring

K = jordens hydrauliska konduktivitet

A = tvärsnittsarea hos det betraktade markskiktet

$\phi$  = vattnets totala potential

x = sträcka

$\frac{d\phi}{dx}$  = ändring i totalpotential per längdenhet s.k. potentialgradient

Minustecknet i ekvationen anger att flödet är positivt när potentialskillnaden är negativ, dvs. flödet sker mot den lägre potentialen från den högre. Ekvationen fungerar även vid omänskade förhållanden och uttrycker då att flödet brukar gå neråt (lägre lägespotential) och mot torrare områden (lägre tryckpotential).

Flöde brukar beskrivas som vattenföringen per tvärsnittsarea hos det betraktade markskiktet (Grip & Rodhe, 1994), vilket ger

$$Q = -K \cdot \frac{d\phi}{dx} \quad (2)$$

Tvärsnittsarean och porositeten används för att beräkna de enskilda vattenpartiklarnas genomsnittshastighet vid grundvattenströmning.

I öppna vattendrag räknas partikelhastigheten ut med

$$V_d = Q/A \quad (3)$$

I jord och berg finns en mindre yta för partiklarna att röra sig igenom på grund av de fasta ämnen som bygger upp strukturen. Vid grundvattenströmning utnyttjas därför porositeten och genomsnittshastigheten för vattenpartiklarna räknas ut med

$$V_p = Q/A_p = V_d/p \quad (4)$$

Framförallt gäller den här strömningen för grovkorniga jordar och berg. Markens struktur varierar och beroende på porernas form skapas snabbare och långsammare vägar för vattnet att ta sig fram (Grip & Rodhe, 1994). Den hastighet som beräknas med ekvation (4) är en genomsnittshastighet som den största delen av vattenpartiklarna rör sig med och den tar inte hänsyn till de kemiska och fysiska processer som sprider ut eller binder partiklarna.

Enligt Grip & Rodhe (1994) anger tryckhastigheten hastigheten av en förändring av trycket medan de fysiska partiklarna inte har rört sig speciellt långt. Det är tryckets fortplantning som gör att en grundvattenyta kan höja sig snabbt efter ett regn. Det är inte vattnet från regnet som höjer vattenytan, men de nya vattenpartiklarna trycker på närmaste partikel som trycker på nästa osv. och en tryckvåg skapas som höjer vattenståndet.

## 2.2 Sedimentära bergarter och kritberggrund

Sedimentära bergarter bildas av sediment som packas ihop under några miljoner år och bildar berg. Ursprungsmaterialet är små partiklar som eroderats från markytans material av sönderdelande och nötande processer som vindar, vågor och strömmar. Därefter faller partiklarna till havets botten och bildar sediment. Ursprungsmaterialet är det samma som skapar jordarter, men sedan packas materialet ihop hårdare för att bilda berg. Processen som omvandlar partiklarna till bergarter brukar sammanfattas med begreppet diagenes. Diagenes pågår under väldigt lång tid och tre delprocesser är särskilt viktiga; kompaktion, omkristallisation och cementering (Svensson, 2003-01-20).

Kompaktion kallas den process som sker när kornen packas tätare, sedimentet konsolideras. Konsolideringsgraden är ett mått på hur väl packat sedimentet är av naturliga processer. Omkristallisation kan ske mellan korn p.g.a. främst tryck och temperatur och då kristalliseras kanterna och kornen fäster vid varandra. Cementering är kemiska förändringar mellan kornen som klistrar ihop dem, det vanligaste cementerande materialet är kalcit (Svensson, 2003-01-20).

Enligt Svensson (2003-01-20) påverkas sammansättningen av bergarten framförallt av ursprungsmaterialet och var det sedimenterat. Ursprungsmaterialets tålighet och kemiska egenskaper bidrar till att ge bergarten en viss struktur. Platsen där sedimenteringen skett och dess möjligheter att blanda eller separera korn påverkar bergartens egenskaper. Sedimenten kan variera avsevärt i kornstorlek och mineralinnehåll beroende på vilken miljö de bildats i. Dessutom finns det organiska partiklar som sedimenterar. Sker sedimenteringen i närheten av en strand blir det mest sand i dem och de ger upphov till sandsten. På djupare vatten är det ler i en kalkhaltig miljö som sedimenterades och med tiden kommer kalksten att bildas.

Ytterligare påverkan på bergartens egenskaper kommer sig av att diagenesens olika delprocesser gör att bergarter med samma grundmaterial kan skilja sig åt väldigt i egenskaper och struktur. Diagenesen kan variera från att vara obefintlig i vissa sedimentära bergarter och mycket väl utvecklad hos andra. Utvecklingen behöver inte alls hänga ihop med ålder. Sandsten kan t.ex. ha utvecklad diagenes och vara så lösa att det med lätthet går att gräva i dem, men även ha en så utvecklad diagenes att stenen är mycket hård och har en hög hållfasthet (Svensson, 2003-01-20).



Kalksten är en av de vanligaste sedimentära bergarterna och kan bildas på en mängd olika sätt. Kalkmineral kan samlas på havets botten, djur kan dö och skelettet samlas på havets botten eller kemiska processer kan fälla ut kalk som samlas och stelnar till berg. Den viktiga beståndsdel och grundmineralet i all kalksten är kalcit som till största delen består av kalciumkarbonat med kemiska beteckningen  $\text{CaCO}_3$ . Det är väldigt ovanligt att kalksten består av 100 % kalcit, utan istället brukar berggrunden vara utblandad med andra mineral eftersom det är svårt att finna en sedimentär miljö enbart uppbyggd av kalcit. Dock är halten kalcit tillräckligt stor för att ge tydlig påverkan på bergartens egenskaper (Svensson, 2003-01-20).

### 2.3 Kväve och nitrat

Grundämnet kväve upptäcktes 1772. Vid rumstemperatur uppträder kväve i gasform ( $\text{N}_2$ ) då dess smält- och kokpunkt är  $-210$  respektive  $196^\circ\text{C}$ . Kvävgas saknar både färg och lukt. Några grundläggande egenskaper för kväve och nitrat presenteras i Tabell 1.

Atmosfären består till 78 procent av kvävgas och atmosfärkvävet vikt har uppskattats till  $4 \cdot 10^{15}$  ton. Denna mängd är bara ett par procent av jordens totala kväveförråd. Den största delen kväve finns bundet i kemiska föreningar i naturen, exempelvis i nitrater, proteiner och mineral. De vanligaste kväveföreningarna är lustgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), kvävemonoxid ( $\text{NO}$ ) och kvävedioxid ( $\text{NO}_2$ ). Nitrat har molekylformen  $\text{NO}_3^-$ .

Tabell 1. Grundläggande egenskaper för kväve, salpetersyra och nitrat (Aylward & Findlay, 1994)

Ämne	Kemisk Beteckning	Atomvikt u	Densitet $\text{g/cm}^3$	Frys punkt $^\circ\text{C}$	Kokpunkt $^\circ\text{C}$
Kväve	N	14,01	0,81	-210	-196
Salpetersyra	$\text{HNO}_3$	63	1,5	-42	83
Nitratjon	$\text{NO}_3^-$	62			

Hög koncentration av nitrat kan vara farligt för människor. Det är inte nitraten i sig utan omvandlingsprodukten nitrit som orsakar skadorna. I brunnar med vatten som har låg syre- och hög järnhalt kan nitrat omvandlas till nitrit. För en vuxen person utgör de koncentrationer som finns i naturen i allmänhet ingen fara (Naturvårdsverket, 2002).

Enligt naturvårdsverket kan nitrat omvandlas till nitrit av bakterier som infekterat människans mage. Detta kan vara farligt för spädbarn. Om nitrit bildas i magen angriper det sedan hemoglobinet - det ämne i blodet som transporterar syre. Barnet får dålig syresättning (methemoglobinemi), vilket i extremfall kan leda till kvävning. Barn under ett års ålder, och främst spädbarn yngre än tre månader, är känsligast. Det beror på att de har sämre syrabildning i magen (får lätt maginfektioner), har ett känsligare hemoglobin och lägre halter av skyddsenzym. De dricker också mer vatten än vuxna i förhållande till kroppsvikten. Pga. av risken för kvävning rekommenderas inte vatten med hög nitrathalt till spädbarn under 1 år (Naturvårdsverket, 2002).

### 2.3.1 Nitrat i grundvatten

Nitrat är den vanligaste förekomstformen av kväve i grundvatten. Molekylformen är  $\text{NO}_3^-$ . Andra vanliga former är nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) och ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). I våra vattendrag är deras andel dock väldigt liten i förhållande till nitrat och därför är nitrat den bästa källan att hänvisa till vid mätningar av kväveförekomst i grundvatten. Många mätningar redovisas dock i nitratkväve ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) (vilket anger vikten av kvävet i nitraten) och 10 mg  $\text{NO}_3\text{-N}$  motsvaras av ca 44 mg  $\text{NO}_3^-$  (Naturvårdsverket, 2002).

Nitrat i grundvattnet kan ha en rad olika ursprung. En är den bildning av nitrat som sker genom naturliga processer i marken där olika organiska föreningar bryts ner till nitrat genom nitrifikation. Nitraten i marken lakas ut av regnvattnet som löser upp det och tar det med sig på sin vandring mot havet. Vanligtvis är halten av nitrat i grundvatten låg, men antropogen påverkan kan förändra halten och göra den onaturligt hög. Dessutom påverkas halten i grundvattnet av atmosfäriskt nedfall. En högre koncentration kväve i atmosfären ger då ett högre nedfall av nitrat (Naturvårdsverket, 2002).

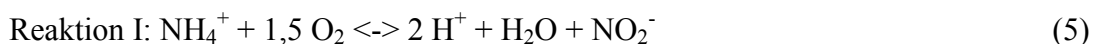
Under våren 2002 kom naturvårdsverket ut med en miljö kvalitetsnorm för nitrat i grundvatten. Normen är ett resultat av arbetet hos många instanser och en del av Sveriges anpassning till de av regeringen uppsatta miljö kvalitetsmålen ”Grundvatten av god kvalitet” och ”Ingen övergödning”. Antagandet av miljö kvalitetsnormen har försenats på grund av EU:s ramdirektiv för vatten, eftersom det även i det arbetet ingår att bestämma ett antal normer som skall begränsa mängden ämnen i vatten. En av dessa normer kan komma att gälla nitrat i grundvatten och regeringen avvaktar därför med beslutet att införa naturvårdsverkets förslag tills en gemensam europeisk ståndpunkt har nåtts. (Naturvårdsverket, 2002)

Enligt Naturvårdsverkets förslag (2002) sätts den rekommenderade gränsen för nitrat i grundvatten till 50 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$  och den anses uppfylld när det ytliga grundvattnet innehåller högst 50 mg nitrat/l som glidande sexårsmedelvärde (de senaste sex årens medelvärde). Den omfattar alla tillrinningsområden till grundvattenförekomster där det finns minst ett vattenuttag på mer än 10 m<sup>3</sup> per dygn i genomsnitt eller där minst ett vattenuttag försörjer mer än 50 personer. Från och med den 1 januari 2010 skall normen vara uppfylld.

## 2.4 Nitratkällor

### 2.4.1 Nitrifikation

Den grundläggande källan för den största delen av naturens nitrat är nitrifikationen, som drivs av kväveoxiderande bakterier. Dessa bakterier omsluter allt fast material som bygger upp marken och i ett gram jord finns ca 10 miljarder bakterier. Nitrifikationen kräver syre och innebär att ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oxideras till nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) som i sin tur blir nitrat. Bakterierna utnyttjar de reducerade kväveformerna ( $\text{NH}_4^+$  respektive  $\text{NO}_2^-$ ) som energikälla och luftens koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) som kolkälla för uppbyggnad av cellerna. Den totala reaktionen som innebär nitrifikation utförs av två olika sorters bakterier och sker i två reaktioner ((5) och (6)) med totalreaktionen (7) (Påledal, 1999):



Enligt Påledal (1999) påverkas nitrifikationens hastighet av faktorer som syrgashalt, temperatur, pH och koncentration av  $\text{NH}_4^+$ . Dessutom påverkas den av om det finnas giftiga ämnen som stör processen; många tungmetaller är giftiga för de nitrifierande bakterierna. De blockerar deras enzymsystem och förhindrar nedbrytningen av kvävemolekylerna.

Precis som de flesta andra mikrobiologiska processer ökar nitrifikationshastigheten med ökad temperatur. Bakterierna är aktiva vid temperaturer mellan 2 och 40 °C, vilket gör att den mesta nitrifikationen i Sverige sker på sommarhalvåret (Påledal, 1999).

Syre och ammonium är de molekyler som startar reaktionen i ekvation (5) och därför påverkar mängden av dessa ämnen hastigheten på reaktionerna. En hög halt av ammonium kan förbruka all löst syre i vattnet, men så länge halten syre i vattnet överstiger 0,3 mg/l pågår nitrifikation (Påledal, 1999).

Nitrifikationen sänker pH genom att bilda kolsyra i vattnet. Denna pH-sänkning hämmas dock genom att en del koldioxid diffunderar genom vattnet ut till atmosfären (Påledal, 1999).

Hur mycket kväve som transporteras bort efter nitrifikationen beror på klimatet. Regnar det mer än det avdunstar finns det mycket vatten i marken som kan lösa upp nitraten och transportera det till grundvattnet. Dock innebär det dessutom att det finns mer vatten som blandar ut kvävet. Kvävekoncentrationen påverkas därför inte lika mycket, även om mer kväve har transporterats bort. Även vintertemperaturen spelar stor roll för utlakningen. En temperatur under 0°C gör att nitrifikationen avstannar, eftersom vinterns nederbörd är snö. Snön täcker marken men skapar inte något flöde ner till grundvattnet. Processen kommer igång igen på våren när snösmältningen och nitrifikationen startar samtidigt, vilket innebär att vatten med höga halter av kväve kan nå ner till grundvattnet under våren. Samma fenomen kan inträffa vid höststormar. Så länge temperaturen håller sig över noll pågår en liten nitrifikation, därför sker läckage även under milda vintrar i södra Sverige (Naturvårdsverket, 2002).

Den aktuella jordartens fysikaliska egenskaper bestämmer förutsättningarna för nederbördens möjligheter att transportera nitrat. En högre halt av lera i jorden gör att den håller vatten bättre och då blir utlakningen mindre och långsammare. Flödet av regnvattnet genom lerjordar sker i sprickor och det ger mindre möjlighet för utbyte av nitrat med markvattnet. I lerjordar finns det även områden med syrefria förhållanden där bakterier genom denitrifikation kan omvandla nitraten till kvävgas (Naturvårdsverket, 2002).

#### 2.4.2 *Luftburen kvävebelastning*

Luftburen kvävebelastning kommer av de kvävemolekyler som finns i atmosfären. De vanligaste formerna är ren kvävgas ( $\text{N}_2$ ), ammoniakgas och kväveoxider (så kallade NOX-gaser). Kvävgasen skapas naturligt, ammoniakgasen kommer mest från stallgödsel och kväveoxiderna bildas vid förbränning av kväverik luft.

Enligt Gustafsson m. Fl. (2000) bildar kväveoxiderna i luften salpetersyra vilket skapar kväveförsurning av marken när det regnar. Anjonen till salpetersyra är nitrat och försurningen ger en direkt effekt på mängden nitrat i marken. Övriga kväveföreningar kan bindas direkt till markpartiklar för att sedan utlakas eller indirekt skapa en kedjereaktion vars slutprodukt är nitrat som kan utlakas.

### 2.4.3 *Jordbruket*

På grund av jordbrukets fundamentala nytta har utvecklingen pågått under flera årtusenden och kunskapen om vad som behövs för att en jord skall ge grödorna tillräckligt med näring är god. Efterhand som åkerjorden utnyttjas för skördar töms den på sina näringsämnen. De näringsämnen som då försvinner måste ersättas på något sätt; ett av dessa sätt är gödsling. Det har sedan länge varit känt att gödsling ger en förbättrad skörd. I början skedde gödslingen med naturgödsel och den mängd kväve som fanns till hands var den som utnyttjades.

När konstgödningen utvecklades blev det större möjlighet att gödsla mer och billigare eftersom konstgödslet är mer användarvänligt än naturgödsel samtidigt som det är billigt att tillverka. Detta ledde till en intensiv gödsling av den brukade åkerjorden och skördarna växte i storlek. Vissa växter kan inte tillgodogöra sig alla näringsämnen som tillförs. Därför behöver bönderna gödsla med mer gödsel än vad växterna kan ta till vara och då blir det ett överskott med näringsämnen som inte stannar i jorden. De näringsämnen som jorden inte tillgodogör och binder till sig följer med regnvattnet ner till grundvattnet (Joelsson, 1977; Rundqvist, 1985; Naturvårdsverket, 2002).

All handelsgödsel innehåller ammonium eller nitrat och är därför en viktig källa till övergödningen (Jezek, 2002). Som nitratkällor är de uppenbara eftersom ammonium kan omvandlas till nitrat genom nitrifikation och nitraten kan läcka till grundvattnet direkt.

Läckaget av nitrat från jordbruket styrs mycket av vilka grödor som används, när gödslingen sker och hur jorden bearbetas. Det finns grödor som behöver mer kväve än andra, men dessutom varierar behovet för en specifik gröda under året och med väderförändringar. För att läckaget skall bli så litet som möjligt är det viktigt att gödslingen sker med försiktighet och kontroll (Joelsson, 1977). Förr i tiden var det vanligt med övergödning, eftersom det ansågs vara en förutsättning för god skörd och eftersom det var möjligt på grund av det låga priset på konstgödsel. Idag är miljömedvetandet större i allmänhet och gödsling sker med större försiktighet (Naturvårdsverket, 2002).

### 2.4.4 *Skogsbruket*

Det finns inga tydliga samband mellan skogsbruk och nitratläckage. Skogsbruket vidtar, till skillnad från jordbruket, åtgärder som ger påverkan under längre tid och med långsiktiga resultat. Skogsjorden innehåller vanligtvis mycket organiskt material som kan ta hand om kvävet, binda det till sig och förhindra att det följer med vattnet. Dock tar skogsbruket upp väldiga arealer med stora tillrinningsområden. Därför rinner det väldigt mycket vatten genom dessa och tillskottet därifrån kan inte anses försumbart (Naturvårdsverket, 2002).

Kväveläckage från skogsbruk kommer vid övergödning och avverkning. De flesta skogsjordar i Sverige klarar att gödglas utan att det blir läckage. Pågående gödningen under en längre tid kan nitraten ackumuleras och med tiden kan marken inte binda det längre, varvid nitraten läcker ut. Vid avverkning tas mycket växtmaterial bort som utnyttjade de näringsämnen som fanns i marken. Före avverkningen var kväveomsättningen balanserad och mängden kväve i marken var anpassad efter utnyttjandet. När balansen rubbas och växtmaterial försvinner samtidigt som markens biologiska aktivitet fortsätter finns det inga växter kvar som kan utnyttja det nitrat som tillverkas i nitrifikationen. Överskottet läcker ut och påverkar vattnet. Enligt Grip & Rodhe (1994) kan det ta upp till 10 år efter en avverkning innan systemet har anpassat sig och åter kommit i balans (Rundqvist, 1985; Grip & Rodhe, 1994).

Enligt Naturvårdsverket (2002) överskrider kvävenedfallet från atmosfären de kvävemängder som bortförs via avverkning och naturlig utlakning av skogsmark. De skogsmarker där risken för utlakning av nitrat är störst är starkt försurade jordar med mycket sandinnehåll. Framförallt i sydvästra Sverige finns det skogar med sådana jordar. Risken för förhöjda halter i skogsmark ökar därför, även om skogsbruket i sig inte påverkar utvecklingen.

#### 2.4.5 *Djurhållning*

Storjordbruk med djur där gödseln inte tas om hand om på rätt sätt kan skapa ett läckage av nitrat till grundvattnet. Enligt Rundqvist (1985) skapar den urin som åstadkoms av en stor mängd djur på liten yta en kvävekoncentration som är svår att hantera utan att kväveläckage skapas. De senaste årens förändring av miljölagstiftningen ger nya förutsättningar för djurhållning och när en verksamhet idag ansöker om fortsatta rättigheter måste det finnas en plan för gödselhanteringen. Dock finns det verksamheter som än idag har gällande tillstånd och som därför inte har behövt ändra sina rutiner för gödselhantering.

När det inte blir direkt läckage till vattnet kan dagens hantering av stallgödsel ge indirekt grundvattenpåverkan genom att halten ammoniak i luften ökar. Den kan sedan ge försurning i känsliga marker med nitrattutlakning som följd (Rundqvist, 1985).

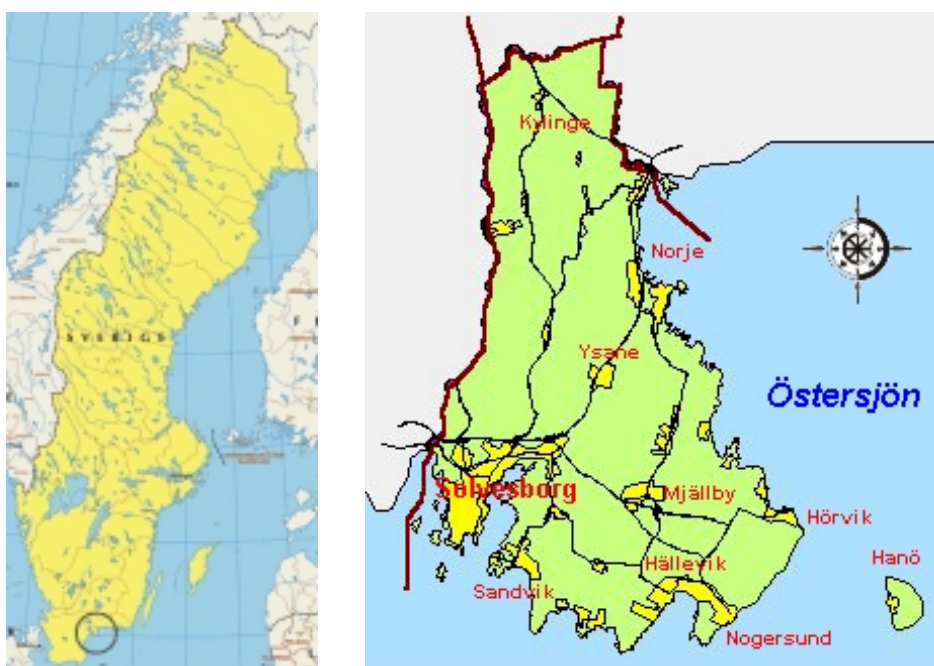
#### 2.4.6 *Övriga nitratkällor*

Övriga nitratkällor består till stor del av punktkällor. De vanligaste punktkällorna för nitrat är avloppsreningsverk och enskilda avlopp från bostadshus. Stora avloppsanläggningar eller ett samlat bestånd av små anläggningar i närheten av ett grundvattenuttag kan ge påverkan på grundvattnet (Naturvårdsverket, 2002).

Gräsmattor i villaträdgårdar och golfbanor gödglas i regel med ännu större mängder kväve än jordbruket och kan i vissa förhållanden påverka viktiga grundvattenförekomster (Naturvårdsverket, 2002).

### 3 Listerlandet och Hörvik

Listerlandet är en halvö som ligger i Sölvesborgs kommun (Figur 4) i västra Blekinge, gränsande mot Skåne. Kommunen består till största delen av jordbruksområden och på flera ställen har marken dränerats för att ge plats till ytterligare åkermark. Vissa centrala delar var förut en sjö, men är idag åkermark som ligger under havsytan. I övrigt finns knappt några andra sjöar på grund av det flacka landskapet. Landskapet skapar en grund kust med besvärliga hamnförhållanden. De skogar som finns ligger till största delen kring de få berg som finns. De mest kända är Listers huvud och Stiby backe som båda idag är naturreservat. Runt Listers huvud ligger klappervallar som utgör en speciell upplevelse i landskapet (Hällevik turistförening, 2003-03-20).



Figur 4. Sölvesborgs kommun och dess läge i Sverige.

Listerlandet har varit bebott sedan stenåldern och än idag ägnar sig den största delen av befolkningen åt jordbruk och fiske (Persson & Karlsson, 2003-03-20). Förutom traditionellt jordbruk är området idag det mest aktiva vad gäller den svenska pälsdjursindustrin med mer än 30 % av produktionen. Enligt Jezek (2001) finns det mer än 37 000 minkar i ett begränsat område runt Hörviks vattentäkt.

På Listerlandet bor ca 7 000 personer varav de flesta i det enda större samhället Mjällby som ligger centralt på halvön (Gustafsson, Mattias muntligen, 2002-08-20).

Hörvik ligger längst i öster på Listerlandet precis norr om Listers huvud och är ett fiskeläge med idag ca 800 invånare. Folk har bott på platsen i åtminstone 200 år och långt innan dess var Hörviken en viktig plats för insamlande av tång. I Hörvik byggdes Listerlandets första hamn och dessutom var kalkbrytning en viktig del av näringslivet (Nordgren & Nilsson, 2003-03-20). Flertalet av de boende är säsonsboende och samhällets invånarantal ökar markant under sommarmånaderna.

### 3.1 Listerlandets geologi

Listerlandet är en geologisk fortsättning på Kristianstadslätten med mjukare och sedimentära bergarter som dominerande bergarter. Området domineras av ett slättlandskap med ett fåtal så kallade restberg bestående av hårdare bergarter som har motstått erosion. Urberget består till största delen av Karlshamnsgranit, vilket är ett relativt ungt urberg på ca 1 400 miljoner år. Djupet ner till urberget är som mest 100 m. De sedimentära bergarternas grundmaterial avsattes förmodligen i ett grunt skärgårdslandskap för 65 - 75 miljoner år sedan. ”I denna skärgård stack troligen restbergen, såsom t ex Hanö, Listers huvud, Ryssberget och Stiby backe, upp som urbergsöar omgivna av en marin, artrik miljö. (Björck, 1984)”

Enligt Björck (1984) är urbergets yta på många ställen kaolin- eller lervittrad vilket innebär att kaolinit skapats. Detta var grunden till kalkstenen i en process som började för ca 75 miljoner år sedan. Sedimenten avsattes i vattnet som kvartssand och kaolinlera. Med tiden bildades ljusgrå till vit kalksten och lös kvartssand eller sandsten. Dessutom finns kalksten uppbyggd av kalkfragment från havslevande organismer. Kalkstenen finns i många varianter och kan även innehålla flinta. Det är främst inom de lägre områdena i Blekinge kritbergarterna finns kvar och då är de i allmänhet jordtäckta.

Efter den senaste istiden låg större delen av Listerlandet under högsta kustlinjen vilket har gett området dess postglaciala sediment. Dessutom bestod berggrunden mest av relativt lättvittrat material, vilket bidrog till jordtäckets relativt stora mäktighet. De dominerande jordarterna är morän, svallsediment och glaciärrer. Moränen täcker hela området och är enda jordarten på de höjder som finns i området. I de lägre områdena täcks moränlagret av svallsediment och glaciärrer. Mäktigheten varierar kraftigt från bara någon meter på höllarna till mer än 20 meter i vissa av dalarna. Moränen består till största delen av sandig-moig sammansättning, vilket innebär kornstorlekar mellan 0,02 och 2 mm (Persson, 1995).

Enligt Persson (1995) finns det två större isälvsavlagringar på Listerlandet, Sölveavlagringarna och Lörbyåsen. Troligtvis har de bildats på samma sätt som isälvsavlagringarna på Kristianstadslätten. Det grövsta materialet avlagrades under vatten framför en eller flera tunnelmyningar i inlandsisen. På grund av kraftig svallning rundades isälvsavlagringarna av och jämnades ut. Till största delen består de av relativt grovt material eftersom det finare materialet har eroderat bort. Den enda rullstensåsen är Gammalstorpsåsen.

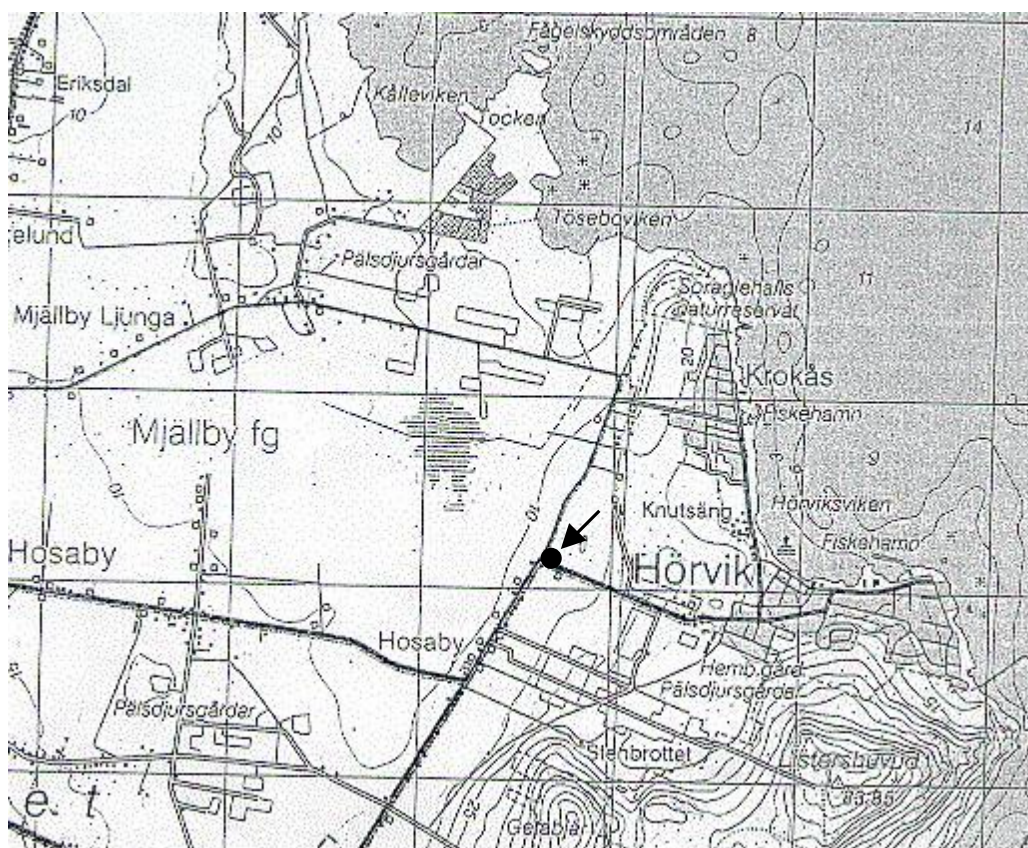
Det finare materialet som eroderades bort från berggrunden och isälvsavlagringarna samlade sig i de lägsta områdena och bildade glaciala sediment och svallsediment. De finkorniga sedimenten utgörs i huvudsak av lera. Glacial lera bildar ett heltäckande lager i de flesta lågområdena på Listerlandet. I allmänhet är den glaciala leran en finlera med lerhalt över 25 %. Eftersom nästan hela Listerlandet befinner sig under högsta kustlinjen är lerlagret i sin tur täckt av ytterligare ett jordlager som härstammar från den postglaciala tiden och består av sand, grovmo och gyttja.

Klapprens storlek minskar med ökande avstånd från restbergen. Därför består svallsedimenten i närheten av högsta kustlinjen vanligtvis av klapper och grus medan det på lägre och planare slättlandet är vanligare med sand och grovmo. Kring restbergen finns framspolade moränblock och strandvallar är vanliga (Persson, 1995).



### 3.2 Området kring Hörviks vattentäkt

Modellområdet (Figur 5) omger Hörviks vattentäkt och har valts med tanke på naturliga vattendelare för grundvattnet. Brunnen ligger vid koordinaterna X: 1433650 och Y: 6213160 i Sveriges rikets nät. Runt brunnen ligger åkermark. Norrut och västerut sträcker sig dessa åkrar långt upp på Listerlandet och höjdvariationen är liten. I norr går åkrarna ända fram till Pukaviksbukten. Längst österut ligger Hörvik inklämt mellan höjderna Stiby backe i norr och naturreservatet Listers huvud i söder.



Figur 5. Området kring Hörviks vattentäkt. Hörviks vattentäkt ligger i vägkorsningen centralt på bilden (Lantmäteriet, 2002).

Det finns två större skogsområden och i övrigt är det mest bebyggelse. Skogsområdena domineras av barrskog och är till största delen belägna inom naturvårdsområden och därför bedrivs det inget aktivt skogsbruk i området.

Drygt hälften av åkermarken är täckdikad med kulvertar på totalt nio km som täcker större delen av modellområdets centrala och västra delar. Dessa diken leder sitt vatten till Hörviksbäcken som är ett öppet dike med utlopp i Töseboviken norr om modellområdet (Jezek, 2001).

Enligt Carlsson (2001) odlas det främst vårsådd spannmål och potatis. Det finns dessutom höstsådd då delar av marken är vintergrön. På hösten odlas mest spannmål. Stallgödsel sprids på ungefär hälften av marken och oftast på våren. Spannmål och potatis är vattenintensiva växter och därför är bevattning en nödvändighet under de torrare perioderna av året.



De större brunnar som finns i området är antingen privata bevattningsbrunnar eller kommunala dricksvattenbrunnar. Bevattningsbrunnarna finns i hela jordbruksområdet, men majoriteten ligger inom det större odlade område centralt och till väster i modellområdet. De två kommunala dricksvattenbrunnarna ligger i närheten av vägförsvningen med avfartsvägen till Hörvik.

I området har nästan varje jordbruk sin egen bevattningsbrunn, som används sommartid under torra förhållanden. Dessa brunnar varierar kraftigt i storlek och kapacitet, helt beroende på vilka arealer som skall användas. På grund av jordarternas relativt stora kornstorlek och den extensiva dräneringen har åkermarken relativt svårt att hålla vatten och därför är bevattningen omfattande under torrare perioder vilket ibland har lett till problem med vattenförsörjningen i området. Det finns även några mindre brunnar som förser ett hushåll med vatten och som har en försumbar påverkan på grundvattnet (Gustafsson, muntligen 2002-08-20).

Djurhållningen i området består till största delen av mink- och broilerfarmar, men det finns även nöt- och svinuppfödning. Totalt har minkfarmarna en beläggning på ca 37 000 avelshonor. Den totala djurtätheten i området är mycket hög, med ett antal av 8,8 djurenheter/hektar betes- och åkermark, vilket gör att områdets åkermark bara kan ta hand om hälften av det stallgödsel som produceras (Carlsson, 2001).

Stallgödsel från gårdar, förutom minkfarm, lagras på gödselplatta och i urinbrunn eller i flytgödselbrunn. Intensiva regn eller snösmältning kan ge upphov till tillfälliga utsläpp. Minkfarmarna samlar in gödseln med ett lager av strömedel under burarna och gödslar sedan ut ett par gånger per år (Carlsson, 2001). Mängden är så omfattande att områdets jordbruk inte är tillräckligt för att ta hand om all gödsel.

På Listers huvuds södra sida ligger en gammal kommunal soptipp som inte används längre. Den täcktes över på 80-talet och har därefter stått orörd (Göransson, Wigert, muntligen 2003-02-27).

Berggrunden består av urberg i botten med kalkberg ovanför. Kalkberget består av flera olika varianter av sedimentära bergarter, men de flesta har liknande egenskaper. Lagrets mäktighet varierar inom området med en hög mäktighet i väster som avtar, först långsamt och sedan snabbare, upp mot restbergen vid Listers huvud, Getabjär och Spraglehall där urberget kommer i dagen.

Jordarternas mäktighet förändras på samma sätt som berggrunden [L-C L1] med tillägget att sammansättningen förändras mer och tydligare än hos bergarterna. På den västra plattan är jordarterna mest sand och grus medan det närmare bergen finns ett område med svallsediment och morän. Centralt finns ett område med gyttja som omger Hörviksbäcken.

Grundvattenbildningen i området är omkring 80 - 100 mm/år (Gustafsson, muntligen 2002-08-20).

## 4 Utförande

### 4.1 Modellverktyg

GMS Modflow (Boss International, 1999) är ett dataverktyg för beräkning av grundvattenyta och grundvattenflöde i jord- och berggrund. I verktyget skapas ett tredimensionellt rutnät av celler (grid) där varje cell tilldelas parametervärden motsvarande den verklighet modellen skall simulera, t.ex. geologiska och hydrologiska förutsättningar. Därefter simuleras grundvattnets egenskaper med Darcys lag (ekvation (1)) och numeriska beräkningar.

Ett kapitel i KASAMs offentliga utredning av kunskapsläget på kärnfallsområdet (KASAM, 2001) analyserar kunskapsläget för grundvatten i hårt berg och där anges Modflow som ett av de mest använda dataverktygen i världen för beskrivning av strömning och transport av vatten i sprickigt berg i två eller tre dimensioner. Den anses vara så populär på grund av sin relativt enkla uppbyggnad med tydlig anpassning till kända hydrologiska begrepp.

Ursprungsverktyget utvecklades för ca 20 år sedan av USA:s Geologiska undersökning och har med tiden förfinats med fler parametrar och noggrannare beräkningar (Miljödepartementet, 1998).

Några platser där Modflow använts för att undersöka flöden i kalkberg är tunneln genom Hallandsåsen och en undersökning av grundvattenpåverkan från en gruva i södra Australien.

Hallandsåsen har en geologisk struktur som påminner om Listerlandet. Under 90-talet påbörjades ett tunnelbygge genom åsen för att förenkla tågtrafiken längs svenska västkusten. Vattenläckaget var mer omfattande än förutsett och det skapade en miljökatastrof när ett giftigt tätningsmedel användes. SGU gjorde efteråt en undersökning av grundvattensituationen med hjälp av Modflow. Modellen fungerar utmärkt och visar tydligt effekten av en tunnel i området (Miljödepartementet, 1998).

Golder har på uppdrag av Olympic Dam Operation gjort en undersökning av grundvattenpåverkan från en gruva i södra Australien. I närheten av gruvan ligger ett större kalkbergsområde med grundvatten. Med hjälp av Modflow gjordes en modell som simulerar grundvattenytan i marken. Modellen användes för att simulera den påverkan gruvan har haft och kommer att ha på området på lång sikt (Waterhouse, m. fl. 2004-05-09).

Med Modflow kan floder, brunnar, sjöar, flödesbarriärer och avrinning simuleras på ett enkelt och trovärdigt sätt. Berggrundens egenskaper anges genom t.ex. konduktiviteten i horisontell och vertikal led.

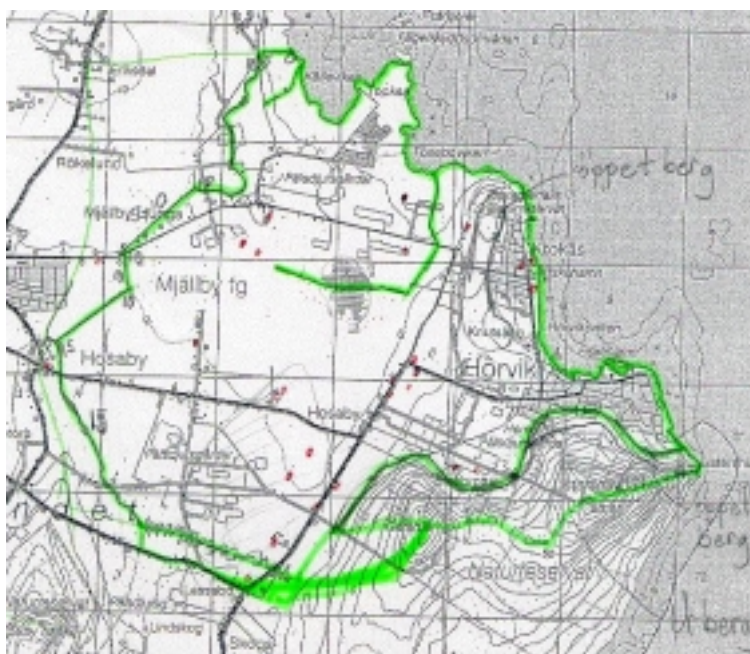
GMS Modpath (Department of defense, 1999) utnyttjar de beräkningar som gjorts av GMS Modflow för att simulera transport av olika partiklar i marken. Simuleringen är en förenkling och fungerar bäst för ämnen som transporteras av vattnet men inte interagerar med omgivningen.

## 4.2 Modelluppbyggnad

### 4.2.1 Bakgrundsbilden

Implementering av en bakgrundsbild i Modflow gör det enklare att skapa gränser för modellområdet och att källor och sänkor hamnar på rätt plats. Bilden visar höjdkurvor som gör det enklare att skapa en modell. Dessutom syns t.ex. vägar, gårdar och bäckar på kartan, vilket är en fördel när placering av t.ex. brunnar görs.

I modellen användes en förstoring av delar av gröna kartan 3E SO (Figur 6). För att kartan skulle fungera som bakgrundsbild fick en datakopia först skapas genom att bilden skannades. Bilden förs in i GMS Modflow med angivelser om koordinater i tre kända punkter. Programmet skapar automatiskt en bild med rätt koordinater i varje punkt. Koordinaterna som används är Sveriges rikets nät avrundat till närmaste 10 m.



Figur 6. Exakt den bakgrundsbilden som användes i Modflow. Strecken markerar olika randförslag och Hörviksbäcken. Prickarna är brunnar (Lantmäteriet, 2002).

### 4.2.2 Randen

Randen beskriver den yttre gränsen och den tilldelas ett antal villkor beroende på dess egenskaper. Arbetet blir att bedöma hur randen ser ut i verkligheten och vad som bäst simulerar den i modellen.

Randen följer till största delen naturliga vattendelare till jordmånslagret eller det understa urbergslagret. Vid simuleringen av en sluten akvifer är det enklare om de speciella villkor som skall förändras kan begränsas så mycket som möjligt och det är relativt lätt att bilda sig en uppfattning av var grundvattendelaren för en öppen akvifer går genom att titta på kartan, medan det är mycket svårare att göra det för en sluten akvifer. Därför är det enklare att bygga området med utgångspunkt i avrinningsområdet från den öppna akviferen.

Det har gjorts flera mätningar i Hörviksbäckens avrinningsområde och därför var randen för den översta akviferen redan känd och relativt lätt att implementera. Akviferen i kalkberggrunden är större än akviferen i jordmånen och därför är det viktigt att gå utanför Hörviksbäckens avrinningsområdes naturliga gräns på vissa sträckor. Framförallt i söder och väster finns stora områden som påverkar berggrundsakviferen. Orsaken till att ändå inte använda hela berggrundsakviferen är att det skulle ge ett för stort område med tanke på brunnens begränsade grundvattenpåverkan och att vattentrycket är bättre känt i berget än i jorden, vilket gör det enklare att ange dessa vattentryck som randvillkor.

I väster följer eller går randen vinkelrätt mot höjdkurvorna enligt bakgrundsbilden. Eftersom vattendelaren har valts efter jordlagret görs antagandet att det inte finns något flöde in därifrån och därigenom ansätts inte heller något vattentryck där. Det behövs inte heller i urbergslagret eftersom där inte sker något större vattenuttag och det därför inte är någon större flödesförändring, vilket i sin tur gör att det inte sker något större utbyte av vatten mellan kalkberggrunden och granitberggrunden.

I norr följer gränsen kusten och där har ett villkor utan flöde ställts upp. Det är ett rekommenderat villkor enligt GMS Modflows instruktionsbok (Department of defense, 1999).

I söder och öster går randen längs vattendelare med randvillkoret satt som inget flöde.

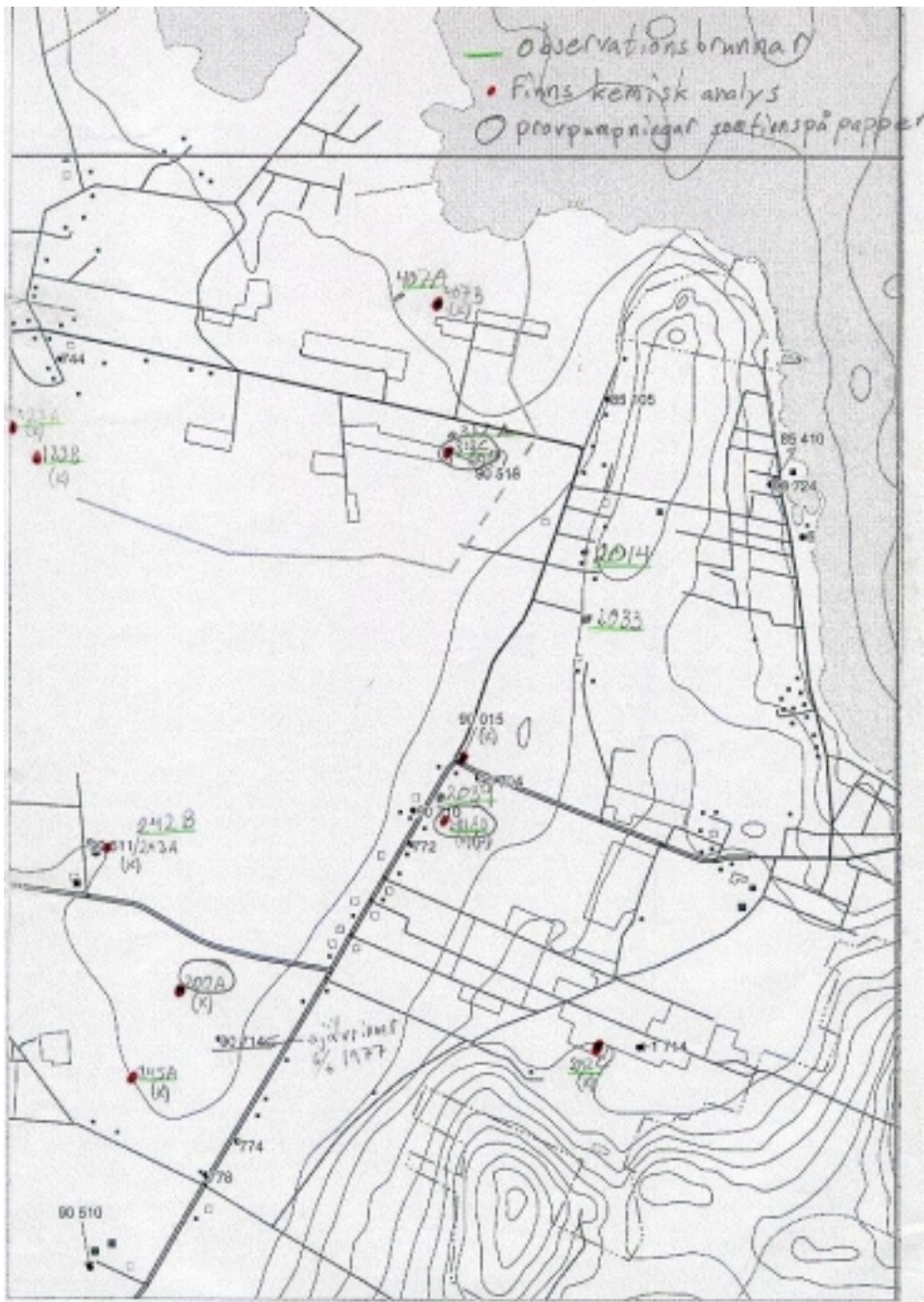
Randen följer gränsen för kalkberget längs kanterna mot Spraglehall och Listers huvud. Randvillkoret som används där är vattentrycket i kritberggrunden.

#### 4.2.3 Lagerindelningen

Lagerindelningen av modellen görs för att kunna simulera tydliga skillnader i fysikaliska och kemiska egenskaper mellan olika geologiska formationer. Marken är uppbyggd av lager med olika egenskaper och genom att i Modflows rutnät tilldela lagren olika parametrar byggs modellen upp. I modellen används 12 lager för att bäst efterlikna olika jord- och bergstrukturer (Figur 8).

Det översta lagrets yta är markytan. Den interpolerades från kända höjder av topografin i ett nät av punkter med 50 m mellanrum. Höjddata användes vid skapandet av modellen för hela Sölvesborgs kommun (Gustafsson, muntligen 2002-08-20).

Brunnsfakta från ett flertal brunnar i området användes för att skapa de olika jord- och berggrundslager som finns i modellområdets mark. Brunnsfaktan består av beskrivningar och djup av de olika lager som påträffades vid borrhningen. I faktan finns dessutom koordinater till varje brunn. Med hjälp av dessa koordinater avgjordes vilka brunnar som var viktiga för undersökningen. Placeringen av brunnarna visas av Figur 8, som är en skannad bild från arbetsmaterialet. (Sveriges Geologiska Undersökning, 1977a; b; 1978a; b; 1979a; b; c; 1980; 1981; 1983; 1990a; b; c; 1996, 1997a; b; 2001a; b). Referenshöjden i modellen är havsytan och alla höjder anges i m över havet. En databas med brunnarnas koordinater och djupen till de olika bergartslagren implementeras i modellen. Genom interpolering skapade Modflow övre och undre gränser för varje lager.

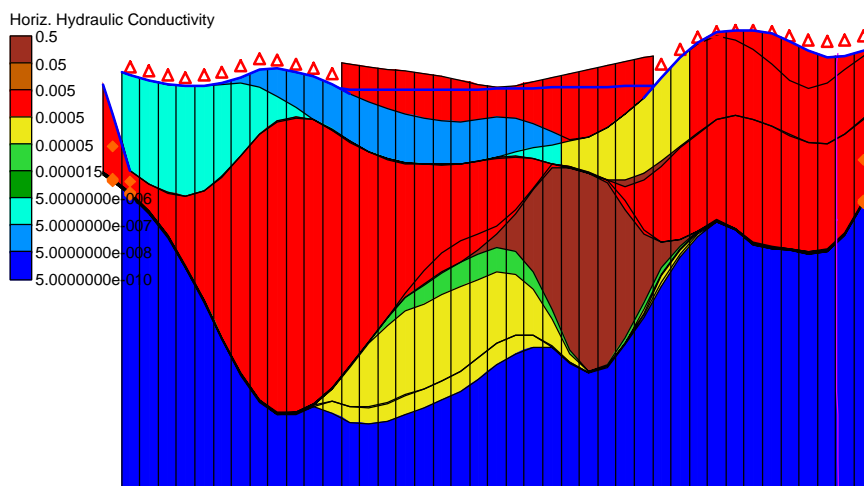


Figur 8. Samlad bild, från arbetsmaterialet, som visar de brunnar som använts i arbetet med modellen. Hörviks vattentäkt är brunn 90 015 i vägkorsningen centralt på bilden.

Överst finns fyra jordlager och därefter används sju lager för att beskriva kalkskiktet innan det understa lagret används till att beskriva urberget. Av dessa lager är det morän, allmän kalk, kalksandsten och sandkalksten som är dominerar. Den ursprungliga lagerindelningen beskrivs i Tabell 2. Figur 9 är en genomskärningsbild utplockad från Modflow. Bilden visar ett exempel modellagens topografi och hydrauliska konduktivitet.

Tabell 2. Lagerindelningen med konduktiviteter i m/s

Lager i modellen	Jord/Berg	Kxy (m/s)	Kz (m/s)
1	Sand	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
2	Morän – lerig	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
3	Morän – sandig	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
4	Grövre sand/grus	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
5	Kalk – allmän	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
6	Sandkalksten	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
7	Kalksandsten	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
8	Okonsoliderad kalk	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
9	Kalksand	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
10	Kalk allmän	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
11	Kaolinberg	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
12	Granit	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$



Figur 9. Genomskärning som visar exempel på modellagens topografi och hydrauliska konduktivitet.

## 4.3 Parametrar

### 4.3.1 Konduktiviteterna

Konduktivitet är i GMS Modflow uppdelad i horisontell och vertikal konduktivitet eftersom det ofta finns en viss skillnad i genomsläpplighet i endera riktningen. Enheten på konduktivitet är i modellen m/s.

Till konduktiviteterna användes värden som beräknades från två provpumpningar i området för att få ett startvärde som gick att utnyttja i modellen. Dessa provpumpningar gjordes i en brunn norr och en brunn väster om den förorenade kommunala brunnen. Till konduktiviteterna användes värden för respektive jord- och bergart enligt en rapport från Vägverket (Blomqvist & Tistad, 1998).

I början är konduktiviteterna i kalkberget relativt lika i alla lager, men under kalibreringen blev det ganska stora förändringar på konduktiviteterna. Dessa värden kontrollerades sedan mot de fakta som fås från brunnarna i området för att de fortfarande skulle ge en rättvis bild av verkligheten.

### 4.3.2 Porositet

För att en beräkning av nitrattransporten skulle kunna göras behövde värden på porositet införas (Tabell 3). Värdena som används hämtades från en rapport publicerad av vägverket (Blomqvist & Tistad, 1998).

Tabell 3. Modellagens porositet

Lager i modellen	Porositet (n)
1	0,25
2	0,1
3	0,1
4	0,25
5	0,03
6	0,03
7	0,03
8	0,03
9	0,03
10	0,03
11	0,03
12	0,01

### 4.3.3 Grundvattenbildning

Infiltrationsparametern sattes till  $3 \cdot 10^{-9}$  m/s, beräknad från de värden på grundvattenbildning som erhållits muntligen från Gustafsson (2002-08-20).

## 4.4 Källor och sänkor

### 4.4.1 Brunnar

Beräkningar gjordes på uttaget från varje större brunn med data från Brunnarsarkivet (Sveriges Geologiska Undersökning, 2002-08-20) och därefter anpassades värdena beroende på vad brunnen användes till (Tabell 4). De brunnar som användes till bevattning fick lägre värden än de kommunala brunnar som användes till dricksvatten.

Tabell 4. Större brunnar i området (Sveriges Geologiska Undersökning, 2002-08-20)

Brunn	Vattenmängd (m <sup>3</sup> /s)	Totaldjup (m)	Tätad till djup (m)	X	Y	Användning
774	0,0011	41,5	14	1432957	6211985	Bevattning
90015	0,0027	57,2	22,5	1433650	6213160	Kommunal
90507	0,0033	107	25	1432300	6211340	Bevattning
90510	0,0030	78	18	1432500	6211600	Bevattning
90517	0,0100	44	15	1431800	6213300	Bevattning
90518	0,0100	48	18	1433600	6214100	Bevattning
90522	0,0133	92	20	1432000	6211400	Bevattning
90704	0,0117	60	22	1433700	6213100	Kommunal
90709	0,0100	52	14	1431200	6214800	Bevattning
90710	0,0133	69	18,9	1433590	6212970	Bevattning

### 4.4.2 Dräneringen

Dräneringen simuleras med ett öppet dike som följer Hörviksbäcken. I verkligheten består dräneringen av ett stort nät med täckta dräneringsrör. På grund av lagrens varierande tjocklek i modellen blev det svårt att implementera alla rör i marken på ett enkelt och rättvisande sätt. För att få med så mycket som möjligt av flödet sattes infiltrationen till diket lite högre än normalt.

## 4.5 Simulering

### 4.5.1 Kalibrering

Modellen gjorde beräkningar tills en tillräckligt liten skillnad mellan två beräkningsomgångar, dvs. tills konvergens, var uppnådd. Beroende på hur realistiska startvärden som användes varierade beräkningstiden kraftigt. Med en effektiv dator var dock den maximala tiden för att uppnå den konvergens som behövdes aldrig högre än 10 minuter.

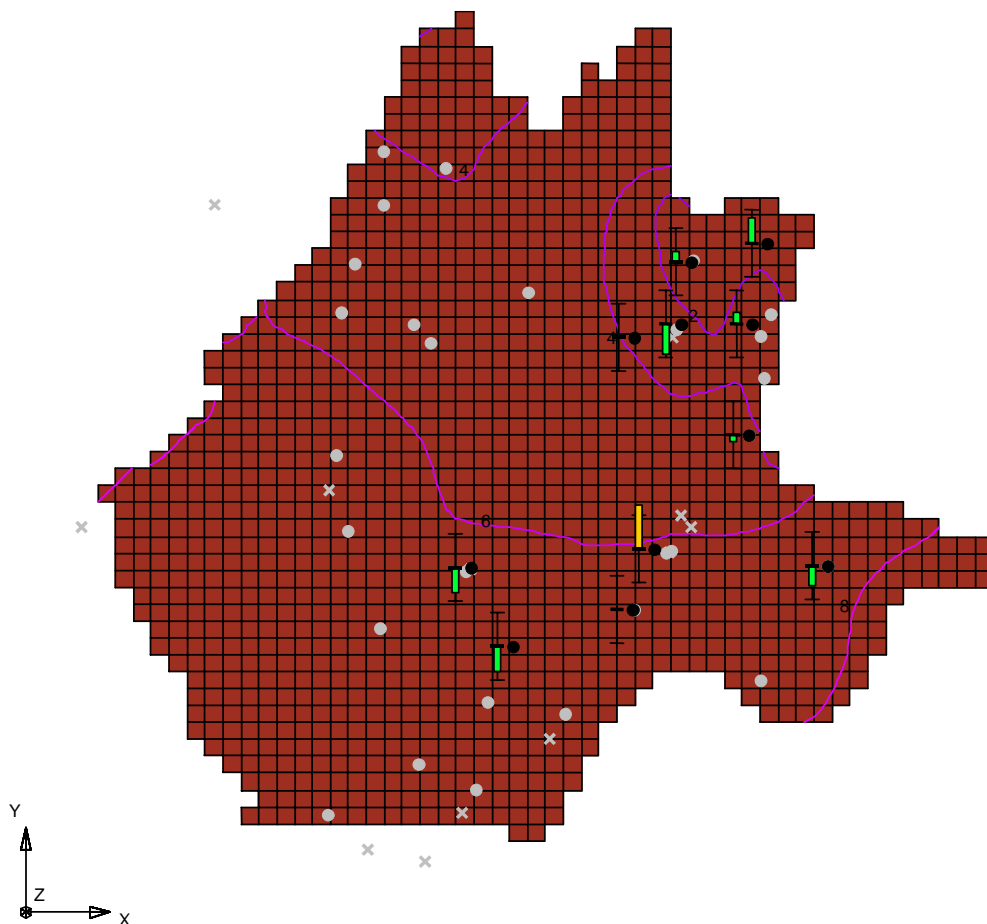
Med hjälp av några observationsbrunnar gjordes en kalibrering av modellen genom justeringar av randen, de olika lagrens konduktivitet och brunnarnas aktivitet. Målet var att få alla brunnar inom en halvmeter från den riktiga grundvattenytan.

Modellen ger en grundvattenyta med vattentryck som jämförs med motsvarande kända grundvattenyta i brunnarna. Brunnensdata är från två olika perioder; en i maj 2001 och en i oktober – november 2001 (Tabell 5). Båda perioderna har samma vattenstånd och därför jämförbara mätvärden. Brunnarna är utspridda i hela området (Figur 10).



Tabell 5. Brunnar som användes vid kalibrering (Sveriges Geologiska Undersökning 2001a;b)

Brunn	X	Y	Total potential (m vattenpelare)	År	Månad
2029	1434420	6212896	8	2001	okt
2033	1434004	6213586	4,5	2001	okt
2014	1434078	6213885	8	2001	okt
2031	1433510	6212990	5	2001	okt
2030	1433390	6212670	6,5	2001	okt
242Bnov	1432540	6212890	7	2001	nov
312Cnov	1433650	6214170	7	2001	nov
312C	1433650	6214170	7	2001	maj
2009	1433400	6214100	5,6	2001	maj
2010	1433700	6214500	1	2001	maj
2011	1434020	6214170	2,5	2001	maj
2013	1434100	6214600	1	2001	maj
2014	1434100	6213880	7,8	2001	maj



Figur 10. Placeringen av modellens kalibreringsbrunnar (svarta prickar) och valideringsbrunnar (ljusa prickar).

#### 4.5.2 Validering

När kalibreringen är färdig kontrolleras modellen mot andra serier av grundvattennivåer, detta för att validera noggrannheten och säkerheten hos modellen.

Valideringen gjordes mycket senare än kalibreringen och därför fanns det tillgång till mer mätningar med fler brunnar (Figur 10) och mätvärden. De mätvärden som användes var utspridda inom hela området och från flera olika tider på året.

#### 4.5.3 Nitratimplementering

Tabell 6 redovisar de brunnar i området som har känd och uppmätt nitrathalt. Dessa halter användes sedan som kontrollvärden vid implementeringen av nitrat i modellen. Nitratet implementeras med hjälp av programmet Modpath. Modpath skapade en partikel i den förorenade brunnen som sedan spårades till sitt ursprung.

Tabell 6. Brunnar med känd nitrathalt (Gustafsson, 2002-08-20)

Brunn	X	Y	Nitratkoncentration (mg/l)
123A-B	1432250	6214100	0,05
200A	1432760	6212470	0,05
242A(=B)	1432540	6212890	0,05
242C	1434061	6212296	10
245A	1432680	6212250	0,2
281B	1433550	6212990	7,1
312Cnov	1433650	6214170	0,05
407Anov	1433600	6214550	9,8

Implementeringen gjordes i brunn 90 015 och 407 A. Brunn 90 015 finns inte med i Tabell 6, men ligger precis intill (se Figur 8) brunn 281 B vars halt är 7,1 mg/l. Brunn 90 015 är Hörviks vattentäkt och den brunn som är viktig att undersöka. Enligt Gustafsson (muntligen, 2002-08-20) är värdet ca 9 mg/l i brunn 90 015. Brunn 407 A ligger i norra delen av modellområdet. Brunn 242 C, som inte implementeras i modellen, ligger på Listers huvuds nordsluttning.

#### 4.5.4 Tidsberäkningar

Beräkningar gjordes för att kontrollera den tid det i genomsnitt tar för en partikel att forslas från modellens gräns till den påverkade brunnen. Beräkningen gjordes i den riktning som flödet visade sig komma ifrån. Vid beräkningen användes formeln för partikelhastighet och porositeten för kalkberggrund, se ekvation (4). Ett genomsnittsvärde på konduktiviteter användes vid beräkningarna. Tiden beräknades för att skapa en uppfattning om var nitratet, som påverkar brunnen idag, kommer ifrån.

Partikelhastigheten användes i formeln sträcka = hastighet · tid ( $s = v \cdot t$ ) för att göra en beräkning av den tid det tar för partiklarna att nå brunnen.

## 5 Resultat

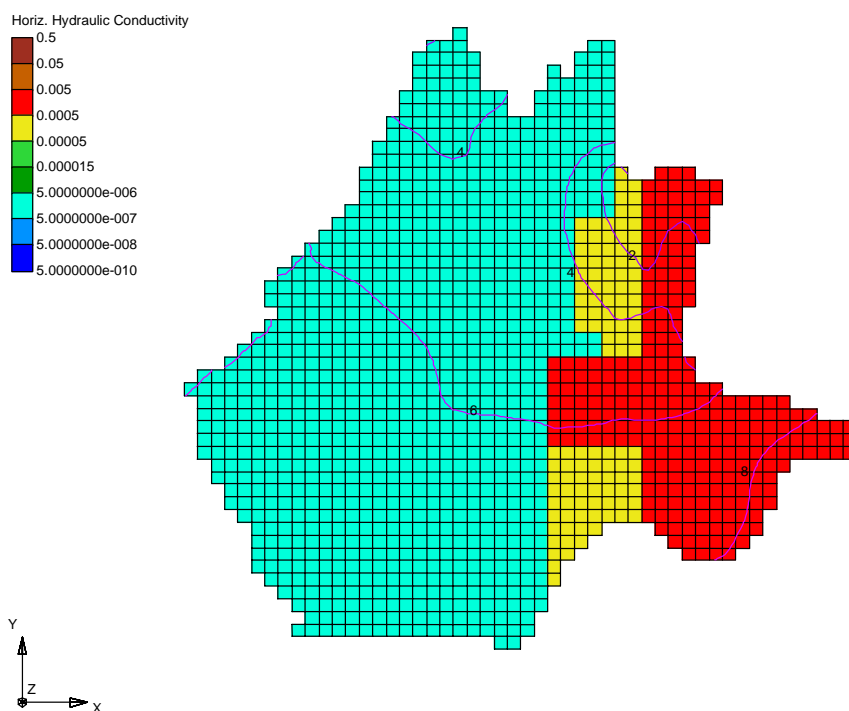
### 5.1 Den slutliga modellen

När arbetet med kalibreringen i Modflow var avslutad blev slutresultat för konduktiviteterna enligt Tabell 7. Det är de som sedan används i Modpath. Då med införandet av porositeten, vilket ändrar resultatet något.

Tabell 7. Sammanfattning av modellens parametrar

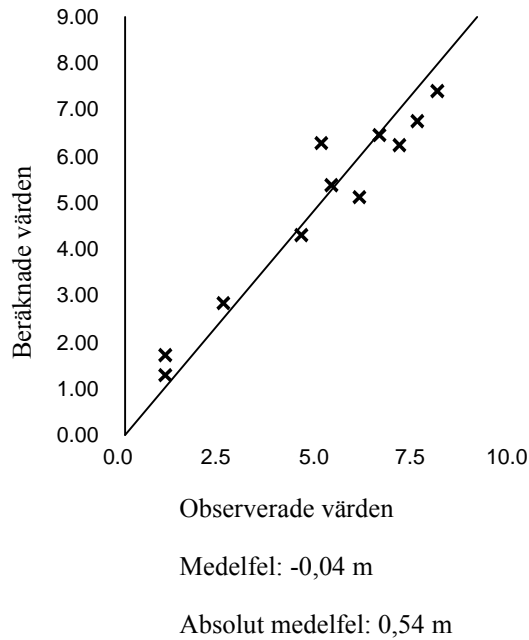
Lager i modellen	Jord/Berg	Kxy (m/s)	Kz (m/s)	Porositet (n)
1	Sand	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,25
2	Morän – lerig	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,1
3	Morän – sandig	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,1
4	grövre sand/grus	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	0,25
5	Kalk – allmän	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,03
6	Sandkalksten	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,03
7	Kalksandsten	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,03
8	Okonsoliderad kalk	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,03
9	Kalksand	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03
10	Kalk allmän	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03
11	Kaolinberg	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03
12	Granit	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	0,01

Lagret med sandig morän har områden med olika konduktiviteter för att bättre simulera flödet. Övriga marklager har en konduktivitet i hela området. Hur kartbilden över lagret med sandig morän ser ut i modellen framgår av Figur 11.



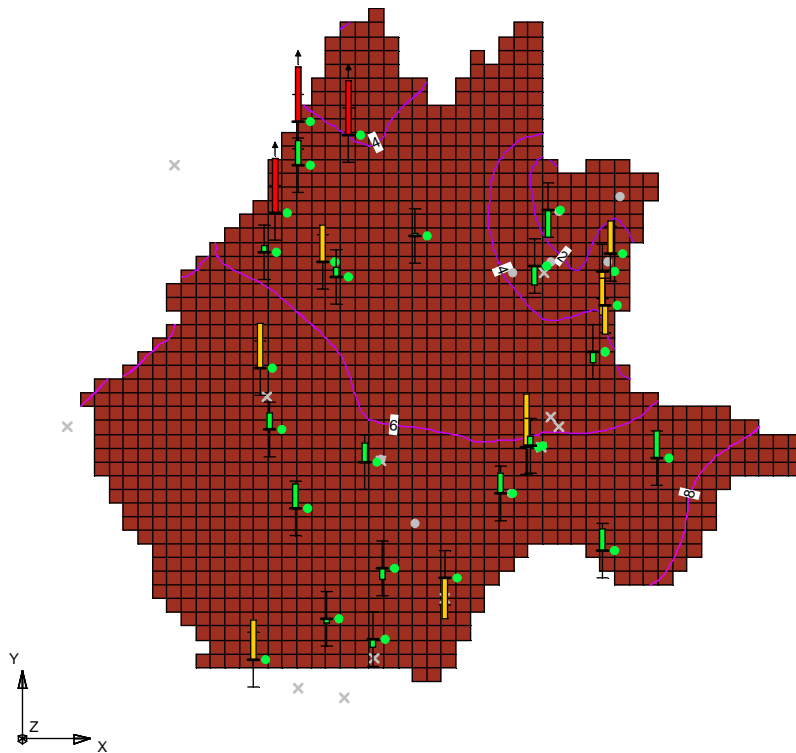
Figur 11. Modellens lager med sandig morän

Kalibrering av modellen med användning av konduktiviteter från Tabell 7 ger en differens mellan beräknade och uppmätta potentialerna med ett absolut medelfel på 0,54 m vattenpelare (Figur 12). Det är framförallt en brunn i centrala delen av modellområdet som modellen beräknar sämre än övriga.



Figur 12. Differensen av kalibreringsbrunnarnas potential, i m vattenpelare, efter avslutad kalibrering.

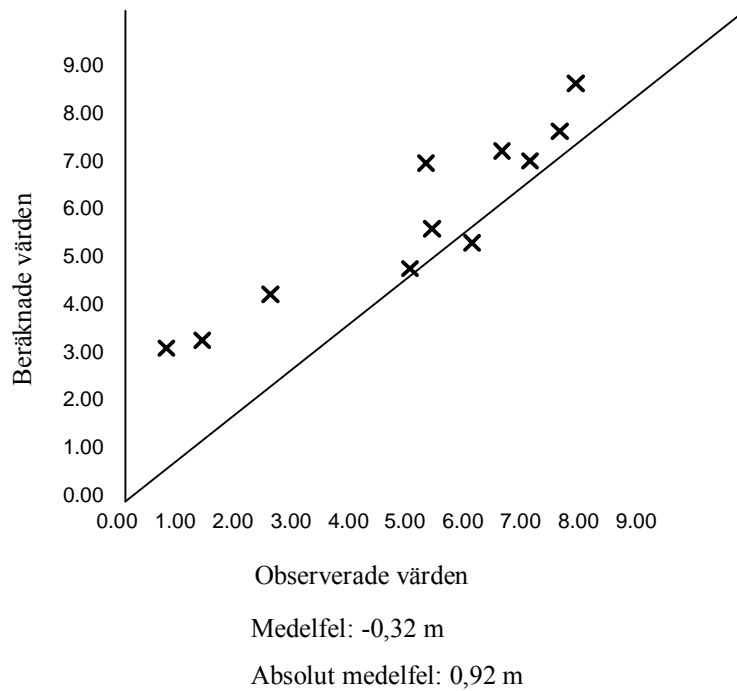
Resultatet för varje valideringsbrunn visas i figur 13. Grön färg visar ett fel mindre än 0,5 meter vattenpelare, gul mer än 0,5 meter men mindre än 1 meter och röd mer än 1 meter. En beräkning av genomsnittet av differenserna mellan beräknat värde och uppmätt värde på potential visar på ett absolut medelfel på 1,1 m vattenpelare. Resultatet varierar mycket mellan brunnarna. Tre brunnar i modellens nordvästra del är de som bidrar mest till felet. I Figur 13 visar de röda staplarna för dessa brunnar att det beräknade värdet avviker mycket, det vill sig mer än 1 m, från det riktiga mätvärdet.



Figur 13. Valideringsbrunnarna. Staplarna anger hur stor differensen är mellan modellens beräknade värde och det uppmätta värdet på potential. Grön är liten, gul medelstor och röd stor differens.

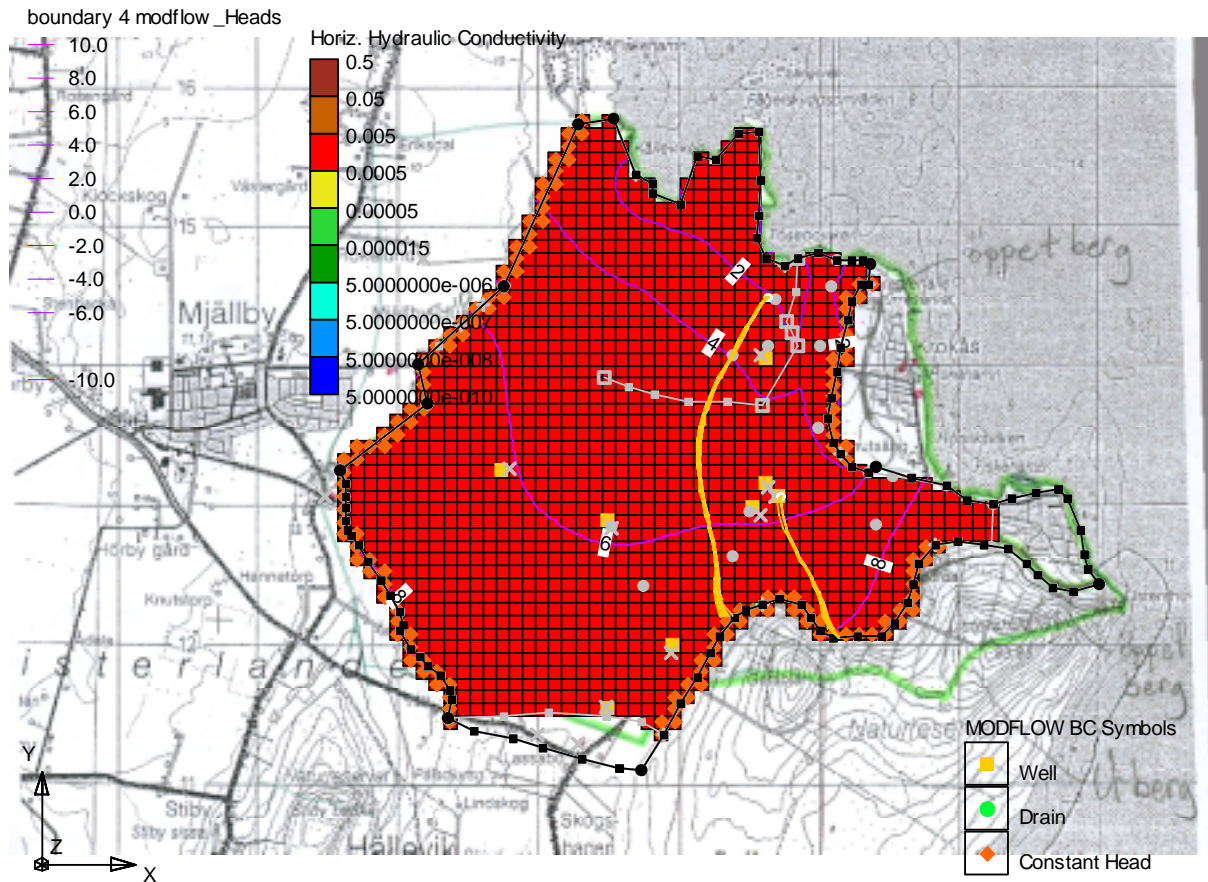
## 5.2 Modpathresultatet

Modpath kräver att porositeten anges i modellen. Detta gjordes efter avslutad kalibrering, vilket försämrade resultatet något. Differens mellan beräknade och uppmätta potentialerna gav istället ett absolut medelfel på 0,92 m vattenpelare (Figur 14).



Figur 14. Medelfelet av kalibreringsbrunnarnas potential, i m vattenpelare, efter införandet av porositet.

Resultatet av körningen med porositeten ändrar grundvattenytan något. Resultatet visas i Figur 15 där de gula strecken visar Modpaths redovisning av partiklarnas rörelsemönster till brunn 232 B och 407 C. Resultatet visar att det mesta vattnet som strömmar till Hörviks vattentäkt kommer från Listers huvud söder om vattentäkten.



Figur 15. Resultatet av simuleringen med Modpath. Blåa sträck visar förändringen av grundvattenytan i potential och gula streck är flödesriktningen för partiklarna.

Sträckan från brunnen till randen söderut är 1,5 km. Partikelhastigheten i kalkberget är  $2,22 \cdot 10^{-6}$  m/s, med konduktiviteten  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s, porositeten 0,3 och potentialförändringen 2 m vattenpelare.

Resultatet av tidsberäkningen är 22 år.

## 6 Diskussion

### 6.1 Modellen

En modell är alltid en förenkling av verkligheten och det bidrar till vissa fel i resultatet.

Den stora skillnaden på den här modellen och de flesta andra modeller som görs med Modflow är att denna akvifer är sluten. Vanligtvis görs simuleringarna med fokus på resultatet i det översta lagret som har ett tydligt vattentryck. Problemet som skulle lösas med den här modellen rör istället grundvattenflöde i berggrunden, vilket ger lite annorlunda implementeringar och frågeställningar än vad som brukar användas. Den största skillnaden finns i randens utseende och värden. I området är kalklagret en sluten akvifer med ett vattentryck som, i meter vattenpelare mätt, överstiger akviferens höjd. Den enda möjligheten att skapa en modell som simulerade det var att ange randvärden med det kända vattentrycket istället för att använda vattendelarna för grundvattnet.

De enda brunnar som används i modellen är de brunnar som förser Hörvik samhälle med dricksvatten. Modellen kalibreras med hjälp av data från maj och oktober-november och de brunnarna är de enda som är helt aktiva vid denna tid på året. De övriga brunnar som finns med i modellen och som enkelt kan fås att pumpa vatten är bevattningsbrunnar och används under torrare perioder på sommaren. Då används de desto mer och ger stor påverkan på grundvattenytan. Genom att göra några simuleringar med pumpande brunnar har jag kommit fram till att även modellen påverkas kraftigt om dessa brunnar är igång. Dock är det svårt att visa på hur stor påverkan är utan att veta exakta siffror på hur mycket som pumpas och hur mycket regn det har varit innan. Eftersom modellen ändå är relativt korrekt borde det gå att använda den till att bedöma ungefär hur mycket vatten som kan tas ut från varje brunn samtidigt utan att grundvattenytan sjunker för mycket.

Modellen över området skulle kunna göras mindre. Randen borde kunna begränsas av Hörviksbäckens avrinningsområde västerut, söderut och norrut. (I öster behöver randen flyttas längre österut för att inte missa det område som är intressant i undersökningen.) Att placera randen på detta sätt istället för att ha den som den är nu skulle förenkla modellen och göra antagandet av randvillkoret som anger att det inte finns något inflöde i modellens översta jordlager mer korrekt. Dessutom är Hörviksbäckens avrinningsområde känd och implementeringen av den skulle underlätta arbetet med en framtida modell.

De olika lagrens konduktiviteter är troliga för de material de representerar. Det enda lagret som simuleras med ett inte helt sannolikt värde är lagret med kalksand. Det lagret har ett alldeles för högt värde på konduktiviteten i horisontellt led och det gör att modellen kan ifrågasättas. En undersökning av brunnarnas genomskärning av marken visar att det finns stora magasin med vatten just i det här lagret. Det kan tyda på stora sprickor vilket visar på att det höga värdet på konduktiviteten kan vara riktigt och motsvarar den verkliga situationen.

Vattentäkten ligger i ett berggrundslager vars avrinningsområde sträcker sig långt in på Listerlandet och upp mot Listers huvud. Terrängen gör att berggrundsakviferens inströmningsområde finns längs Listers huvuds nordsluttning. Resultatet från modellen visar på just detta faktum. I det här fallet betyder det att flödet alltid är från Listers huvud ner mot plåtån<sup>[L-C L3]</sup>. Just att brunnen används under hela året, medan andra brunnar används under en kortare tid under året, gör att mycket vatten söker sig dit och



den sänkning av grundvattenytan som finns under årets höst och vinter är koncentrerad runt de två kommunala brunnarna.

Nitratströmningen i modellen är förenklad. Ingen hänsyn tas till kemiska reaktioner eller spridningsmönster som finns i marken. Istället används en ren kontroll av hur en partikel som inte interagerar med omgivningen i marken rör sig. Det skulle i princip kunna röra sig om vilket kemiskt och fysiskt ämne som helst, helst vattenlösligt och stabilt. Resultatet från modellen visar hur vattnet rör sig och därigenom vilka partiklar som följer med. Eftersom brunnen är tydligt påverkad av nitrat visar därför resultatet på att det kommer med det vattenflöde som rör sig från Listers huvud och ner mot plåtån. Därifrån kommer övriga ämnen som finns i brunnen också.

[L-C L4]Resultatet av valideringen är ett medelfel på 1,1 meter. I och med att beräkningar med allmänna värden ger ett sådant resultat är modellen allmängiltig och går att använda för vidare beräkningar. Det betyder att syftet med modellen är uppfyllt.

Valideringen gjordes med fler mätvärden än vad som användes för kalibreringen. Helst skulle antalet mätvärden vara jämnt fördelade mellan kalibrering och validering. Men valideringen gjordes långt efter att modellen var färdig och då fanns det fler mätvärden att tillgå. Det goda resultatet och mängden mätvärden visar att modellen är välkalibrerad. En närmare undersökning av de mätningar som användes till valideringen visar att det inte finns några undersökningar från juni, juli och augusti. Det är en begränsning som troligtvis bidragit till resultatet. Grundvattensituationen är speciell under sommarmånaderna och den modell som redovisas är inte tillräckligt komplicerad för att kunna göra beräkningar under den tiden på året. Vid övriga grundvattensituationer på året går modellen att använda för att simulera grundvattenytan och grundvattenflöden i marken.

Resultatet av valideringen hade varit närmare de riktiga värdena om modellområdet hade varit begränsat i nordväst. I nordvästra hörnet ligger tre brunnar som modellen inte beräknar rätt. Sannolikt är modellen för stor. I närheten av de tre brunnarna finns havet, Hörviksbäcken och modellens rand som påverkar resultatet av beräkningen. Den stora skillnaden mellan beräkning och mätning i tre brunnar som ligger så nära varandra tyder på att modellen inte fungerar just där. Förmodligen finns det en vattendelare någonstans innanför de brunnarna som inte känns till. Genom att flytta modellens rand innanför brunnarna kan vattendelaren istället utnyttjas som rand och modellen förbättras.

Genom att inte kalibrera om modellen efter att porositeten införts blir resultatet sämre och de beräknade värdena stämmer inte lika bra överens med brunnsdata. Det visade sig vara mer jobb än planerat att kalibrera om modellen efter införande av porositeter. I princip handlade det om att bygga upp hela modellen från början igen.

En jämförelse mellan de båda resultaten visar att förändringen av grundvattenytan är liten och att den är liknande för varje brunn. Alla beräknade värden visar en grundvattenyta som är något högre än de förut beräknade och de uppmätta värdena. Eftersom grundvattenytans utseende inte har förändrats så mycket och flödena fortfarande rör sig i liknande mönster kan modellen fortfarande användas för att skapa en bild av akviferens grundvattensituation. På grund av den mindre förändringen och bristen på tid bestämdes att undersökningen med de modellen som den var skulle vara tillräcklig. För att få en mer exakt beskrivning av grundvattenytan bör en ny kalibrering göras innan ytterligare undersökningar görs.

Implementeringen av brunn 407 C gjordes av ren nyfikenhet. Resultatet diskuteras inte eftersom den inte är med i examensarbetets syfte. Nitrathalten i Hörviks vattentäkt är

högre än normalt, men lyckligtvis inte så hög att det borde vara någon fara för allmänheten. Resultatet visar att det tar 22 år för vattnet att komma från randen till brunnen. Därför är det inte lätt att säga hur påverkan kommer att bli i framtiden. Även om åtgärder görs för att kontrollera de källor av nitrat som finns kan inget direkt resultat synas förrän om några decennier och först då kan åtgärderna utvärderas ordentligt. En trend borde dock vara möjlig att avläsa tidigare.

Modpaths resultat visar var den största mängden vatten som fyller på brunnen kommer ifrån. De eventuella källor som har störst påverkan ligger i det område som fyller på brunnen. [L-C L5] Modpaths resultat visar på att det största flödet mot brunnen kommer norrifrån. Genom att kontrollera markanvändningen norr om brunnen kan slutsatser om vilka källor som har störst inverkan på vattenkemin. Eftersom enbart de två kommunala brunnarna används under vinterhalvåret söker sig mycket vatten dit från hela avrinningsområdet. Därför kan det finnas andra källor som bidrar just under dessa månader.

Det finns skog i området upp mot Listers huvud, men eftersom området är ett naturreservat får där inte pågå något skogsbruk. Därför finns det ingen anledning att försöka utöka näringsinnehållet i skogsmarken och ingen gödsling har gjorts för att förbättra skogstillväxten i området. Det är inte troligt att skogsbruk är en källa för nitratet. Det finns en möjlighet att kväveförsurningen bidrar med nitrat till brunnen, men eftersom skogsmarken inte utnyttjas för skogsbruk är den inte mättad och försurningen får inte lika stort genomslag.

Det jordbruk som ligger intill brunnarna och som är utsatt för intensiv gödsling ger säkerligen ett litet bidrag till nitrathalten. Det stora jordbruksområdet som finns i närheten ligger norr om brunnarna. Det området är ligger lågt i terrängen och är mer ett utströmnings- än inströmningsområde. Dräneringen av jordbruket väldigt effektiv och det finns ett omfattande nät av dräneringsrör som tar hand om den större delen av det vattenflöde som skulle kunna komma ner till berggrunden. Det gör att även det nitrat som skulle följa med vattnet hamnar i dräneringsrören och leds bort. En viss mängd nitrat från jordbruket läcker ändå ner till berggrunden, men om det var i en större omfattning skulle fler brunnar vara påverkade. Dock är det enbart de båda kommunala brunnarna som används på vinterhalvåret och då söker sig vatten från hela området dit. Men på den tiden av året sker det ingen gödsling och kvävetillförseln är inte speciellt stor.

Det finns inga större punktkällor i området. Några mindre punktkällor finns genom ett antal privatbostäders egna avlopp. I området bor det inte så mycket människor att det bidraget borde ha så stor inverkan på brunnen att halten ökade nämnvärt. Det mesta av det nitrat som följde med ett sådant avlopp reduceras i marken innan det når brunnarna.

Den tydligaste källan som finns är de minkfarmar som finns i området. Den extensiva mängden av djur på en liten yta skapar stora mängder nitrat som påverkar vattnet. Längst upp mot Listers huvud ligger ett antal minkfarmar. Enligt definitionen av ett inströmningsområde är strömningsriktningen i marken här ner mot grundvattnet. Jordlagret i området där minken farmas är ett tunt lager av grusig morän som inte håller speciellt mycket vatten eller har möjlighet att ta hand om nitrat. Utbytet av vatten mellan jord- och berglagret är väldigt högt och det är troligt att mycket av det som släpps ut i översta lagret snabbt söker sig ner till det större vattenmagasinet i kalkberget. Modellens resultat visar på att det mesta av vattnet som kommer till brunnen kommer från ett område med stora minkfarmar.

## 7 Slutsats

Syftet med examensarbetet är att skapa en modell som är tillräckligt bra för att skapa en trolig simulering av grundvattenytan. Genom att resultatet av kalibreringen uppfyller de uppställda kraven är syftet uppfyllt och modellen går att använda för att göra en beräkning av troliga nitratkällor. Min slutsats är att modellen kan användas för att göra kompletterande undersökningar av vattenföringen i området. Dock bör den kalibreras om med lagrens porositeter införda innan den används för undersökningar av nya partikeltransporter.

Min slutsats är att den källa till nitrat som har haft störst påverkan på brunnens vatten kemi är minkfarmarna som ligger på Listers huvuds nordsluttning. Slutsatsen baseras på det resultat som modellen uppvisar. Jag tycker det är sannolikt att en stor mängd minkar på en begränsad yta väl kan skapa ett markförhållande med förhöjd nitrathalt. När det dessutom är ett väldigt tunt täcke med jordmån ovanpå berggrunden anser jag att marken inte nämnvärt hjälper till att förhindra flödet ner till berggrunden och brunnen.

Det kommer att ta tid för nitrathalten i brunnen att minska, men den kommer att göra det vartefter minkfarmarna får hårdare miljökrav på sig. Min slutsats är att en vidare utredning bör göras för att undersöka om hanteringen av gödslet hos minkfarmarna har förändrats och vilka krav som kan ställas för att nitrathalten skall kunna minska i framtiden.

Det är viktigt att kontrollen av vattnet i brunnen fortsätter eftersom undersökningen visar att det tar 22 år för nitraten att komma till brunnen. Det bör dessutom göras en kontroll av trenden för att se om det har blivit någon förändring. För att hålla nitrathalten på en ofarlig nivå bör viss rening av vattnet göras innan det används som dricksvatten.

En kontroll av förändringar av nitrathalten i samband med förändringar i minkfarmarnas verksamhet för 22 år sedan skulle vara underlag för slutsatser om vad som bör göras med brunnen i framtiden.

## Referenser

- Aylward, G. & Findlay, T., (1994), *SI Chemical data*, tredje upplagan, Jacaranda Wiley Ltd, Milton, Australien
- Björck, S., (1984). *Blekinges geologi*, Särtryck ur naturvårdsplan Blekinge, Länsstyrelsen Blekinge
- Blomqvist, T. & Tistad, L., (1998). *Förorening av vattentäkt vid vägtrafikolycka*, Vägverket publikation 1998:064
- Boss International, (1999). *GMS Overview Guide*, Boss International Inc and Brigham Young University, USA
- Carlsson, C., 2001. *Växtnäringsförluster till vatten i Hörviksbäckens avrinningsområde*. Sveriges Lantbruksuniversitet, Avdelningen för vattenvårdslära, Teknisk rapport 60, Uppsala
- Department of Defense, (1999). *GMS 3.0 Tutorials*. Brigham Young University, USA
- Grip, H. & Rodhe, A., (1994). *Vattnets väg från regn till bäck*, tredje upplagan, Hallgren & Fallgren Studieförlag AB, Karlshamn
- Gustafsson, J., Jacks, G. & Simonsson, M., (2000). *Mark- och vattenkemi Teori*, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, Uppsala
- Gustafsson, M., muntligen (2002-08-20)
- Göransson, W., muntligen (2003-02-27)
- Hällevik Turistförening, (2003). Listers huvud, [user.tninet.se/~isu535r/listershuvud.htm](http://user.tninet.se/~isu535r/listershuvud.htm) (2003-03-20)
- Jezek, A., (2002). *Utredning av orsakerna till de stora näringsämnestransporterna i Hörviksbäcken*, Sölvesborgs kommun
- Joelsson, A., (1977). *Nitrat i brunnsvatten i jordbruksområden*, Naturvårdsverket Rapport 927
- KASAM, (2001). *Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001*, Statens offentliga utredningar 2001:35
- Lantmäteriet, (2002). *Gröna kartan 3E*.
- Lindh, G. & Falkenmark, M., (1972). *Hydrologi – En inledning till vattenresursläran*, Studentlitteratur, Lund
- Lundin, L. (red.), (2000). *Water use and management*, andra upplagan, Baltic University Programme, Uppsala
- Miljödepartementet, (1998). *Kring Hallandsåsen – Delrapport av Tunnelkommisionen*, Statens offentliga utredningar 1998:60
- Naturvårdsverket, (2002). *Miljö kvalitetsnorm för nitrat i grundvatten*, Naturvårdsverket Rapport 5180
- Nordgren, M. & Nilsson, H., (2003). Hörvik, [www.bromolla-solvesborg.se/ekopiloterna/lhistoria/Listerlandet/Horvik/horvik.html](http://www.bromolla-solvesborg.se/ekopiloterna/lhistoria/Listerlandet/Horvik/horvik.html) (2003-03-20)

- Persson, M. & Karlsson, S., (2003). Listers huvud, [www.bromolla-solvesborg.se/ekopiloterna/lhistoria/Listers\\_Huvud/listers\\_huvud.html](http://www.bromolla-solvesborg.se/ekopiloterna/lhistoria/Listers_Huvud/listers_huvud.html) (2003-03-20)
- Persson, M., (1995). *Beskrivning till jordartskartan Karlshamn SO*, Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala
- Påledal, A., (1999). *Nitrifikation i en grund och en djup damm för rening av avloppsvatten*, SLU, Avdelningen för vattenvårdslära
- Rundqvist, B., (1985). *Växtnäringsläckage till yt- och grundvatten från jord- och skogsbruk – Orsaker och åtgärder*. Naturvårdsverket Rapport 1972
- Svensson, C., (1996a). Bildningsprocesser, [connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/sed.bergarter-allmombildning.html](http://connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/sed.bergarter-allmombildning.html) (2003-01-20)
- Svensson, C., (1996b). Bildningsprocesser, [connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/sedimentamiljer.html](http://connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/sedimentamiljer.html) (2003-01-20)
- Svensson, C., (1996c). Bildningsprocesser, [connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/diagenes.html](http://connywww.tg.lth.se/BildningsprocesserDokument/BergarterDokument/SedimentabergarterDokument/diagenes.html) (2003-01-20)
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1977a). *Borrprotokoll Brunn 0342:90510*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1977b). *Borrprotokoll Brunn 0342:90511*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1978a). *Borrprotokoll Brunn 0342:90015*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1978b). *Borrprotokoll Brunn 0342:90518*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1979a). *Borrprotokoll Brunn 0342:90704*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1979b). *Borrprotokoll Brunn 0342:90710*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1979c). *Borrprotokoll Brunn 0342:90714*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1979d). *Borrprotokoll Brunn 0342:90710*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1980). *Borrprotokoll Brunn 0342:6*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1981). *Borrprotokoll Brunn 0342:90724*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1983). *Borrprotokoll Brunn 0342:744*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1990a). *Borrprotokoll Brunn 0342:772*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1990b). *Borrprotokoll Brunn 0342:774*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1990c). *Borrprotokoll Brunn 0342:778*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1996). *Borrprotokoll Brunn 0342:1714*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1997a). *Borrprotokoll Brunn 0342:85105*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (1997b). *Borrprotokoll Brunn 0342:85410*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (2001a). *Provpumpningsprotokoll brunn 312 C*
- Sveriges Geologiska Undersökning, (2001b). *Provpumpningsprotokoll brunn 281B*

Sveriges Geologiska Undersökning (2002a). Brunnsarkivet,  
[maps.sgu.se/website/sguextern/internetmaps/displayAttributeData.htm](http://maps.sgu.se/website/sguextern/internetmaps/displayAttributeData.htm) (2002-08-20)

Sveriges Geologiska Undersökning (2002b). Brunnsarkivet,  
[maps.sgu.se/website/sguextern/internetmaps/toc.htm](http://maps.sgu.se/website/sguextern/internetmaps/toc.htm) (2002-08-20)

Waterhouse, J.D., Puhlovic, A. & Garnham, R., (2002). *Hydrogeology of the Stuart shelf in south Australia and impacts of the Olympic dam mine*,  
[www.golder.com/archive/Waterhouse\\_IAH2002.pdf](http://www.golder.com/archive/Waterhouse_IAH2002.pdf) (2004-05-09)