

R-03-01

Grundvattnets regionala flödesmönster och sammansättning – betydelse för lokalisering av djupförvaret

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2003

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-03-01

Grundvattnets regionala flödesmönster och sammansättning – betydelse för lokalisering av djupförvaret

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2003

Förord

Vid myndighetsgranskningen av SKB:s samlade redovisning inför valet av platser för vidare undersökning /SKB, 2000/ framkom krav på att SKB ska ta fram ett bättre underlag för bedömning av in- och utströmningsområden och av djupet till förekomst av salt grundvatten som lokaliseringsfaktorer. Föreliggande dokument syftar till att direkt följa upp myndigheternas tidigare synpunkter.

Avsikten är att utförda analyser och genomgångar ska ge ett mer fullständigt underlag för att bedöma i vilken utsträckning dessa faktorer bör påverka djupförvarets lokalisering. Målsättningen med dokumentet är att:

- dokumentera och diskutera processer av betydelse för grundvattnets cirkulation och salthaltsfördelning i svensk berggrund,
- bedöma fördelningen av in- och utströmningsområden samt djupet till förekomst av höga salthalter som geovetenskapliga lämplighetsindikatorer.

Projektet har genomförts under ett knappt år av en grupp bestående av Johan Andersson, Lars O Ericsson, Marcus Laaksoharju, Jan-Olof Selroos, Kristina Skagius, Björn Söderbäck samt undertecknad.

Modelleringen av grundvattencirkulationen i Östra Götaland respektive Norduppland har genomförts av Sven Follin och Urban Svensson respektive Johan Holmén och Martin Stigsson. Björn Gylling och Niko Marsic har stått för kompletterande modelleringsinsatser för Norduppland.

Anders Ström
Projektledare
Platsundersökningar – Analysenheten SKB

Innehåll

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Inledning | 7 |
| 1.1 | Bakgrund | 7 |
| 1.2 | Syfte och mål | 7 |
| 1.3 | Denna rapport | 8 |
| 2 | Några grundläggande begrepp | 9 |
| 2.1 | Begrepp som används vid värdering av en plats lämplighet | 9 |
| 2.2 | Hydrogeologiska begrepp | 10 |
| 2.3 | Grundvattenkemiska begrepp | 12 |
| 3 | Det hydrologiska kretsloppet | 15 |
| 3.1 | Hydrologiska cykeln | 15 |
| 3.2 | Den hydrologiska budgeten | 16 |
| 3.3 | Grundvattenbildning | 17 |
| 3.4 | Grundvattenströmning | 18 |
| 3.5 | Geologins betydelse i kretsloppet | 21 |
| 3.6 | In- och utströmning – randvillkor | 22 |
| 3.7 | Grundvattenomsättning i geologiskt tidsperspektiv | 23 |
| 3.8 | Processer och egenskaper av betydelse för in- och utströmning | 27 |
| 3.8.1 | Egenskaper | 27 |
| 3.8.2 | Randvillkor | 28 |
| 3.8.3 | Flödesmönster idag och i framtid | 30 |
| 4 | Grundvattnets sammansättning | 31 |
| 4.1 | Vattnets ursprung och ålder | 31 |
| 4.2 | Varifrån kommer saltet? | 33 |
| 4.3 | Grundvattnets salthalt i olika delar av landet | 34 |
| 4.4 | Skillnader mellan kust och inland | 36 |
| 4.5 | Att spåra grundvattnets ursprung | 37 |
| 4.6 | Processer av betydelse för grundvattnets sammansättning | 40 |
| 4.7 | Framtida grundvattenkemiska förändringar | 42 |
| 4.8 | Exempel på grundvattenundersökningar i ett utströmningsområde | 44 |
| 4.9 | Slutsatser | 44 |
| 5 | Förvarsplaceringens betydelse för flödesvägar till markytan | 47 |
| 5.1 | Inledning | 47 |
| 5.2 | Norduppland | 48 |
| 5.2.1 | Modellbeskrivning | 48 |
| 5.2.2 | Analyserade varianter | 51 |
| 5.2.3 | Resultat | 52 |
| 5.3 | Östra Götaland | 61 |
| 5.4 | Slutsatser | 67 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6 | Hur grundvattnets rörelser och sammansättning påverkas av förvaret | 69 |
| 6.1 | Mekanismer och faktorer | 69 |
| 6.1.1 | Förändringar i grundvattenflödet | 70 |
| 6.1.2 | Förändringar i grundvattnets sammansättning | 70 |
| 6.1.3 | Infiltration av ytligt grundvatten | 70 |
| 6.1.4 | Faktorer som påverkar grundvattenströmningen | 71 |
| 6.2 | Modellberäkningar och erfarenheter | 72 |
| 6.2.1 | Principstudie | 72 |
| 6.2.2 | Grundvattenavsänkning vid Äspölaboratoriet | 72 |
| 6.2.3 | Uppmätta salthaltsförändringar vid Äspölaboratoriet | 73 |
| 6.3 | Slutsatser | 74 |
| 7 | Betydelse av grundvattnets rörelser och sammansättning för djupförvarets funktion | 75 |
| 7.1 | Studerade parametrar av betydelse för djupförvaret | 75 |
| 7.2 | Inverkan på de tekniska barriärernas isolerande funktion | 76 |
| 7.2.1 | Salthalt | 77 |
| 7.2.2 | Grundvattenströmning | 77 |
| 7.3 | Inverkan på fördröjningen i berget | 78 |
| 7.3.1 | Salthalt | 79 |
| 7.3.2 | Grundvattenströmning | 79 |
| 7.4 | Ytnära förhållanden | 81 |
| 7.4.1 | Utspädning | 81 |
| 7.4.2 | Miljö och naturresurser | 82 |
| 8 | Sammanvägd bedömning | 83 |
| 8.1 | Faktorer av betydelse för grundvattnets cirkulation | 83 |
| 8.2 | Modellering av grundvattenströmning i Norra Uppland och Östra Småland | 84 |
| 8.3 | Inverkan på förvarets lokalisering | 85 |
| | Referenser | 87 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Lokaliseringen av djupförvaret för högaktivt kärnavfall sker i en stegvis process med förstudier och platsundersökningar. I respektive skede görs bedömningar av om de studerade platserna har potential att uppfylla (förstudieskedet) eller uppfyller (platsundersökningsskedet) de krav och önskemål som ställs på berget och grundvattnet med hänsyn till byggbarhet och långsiktig säkerhet. För att lokaliseringen ska vara möjlig behöver platsen även uppfylla krav och önskemål med avseende på etableringsmöjligheter och samhälle.

I samband med övergången från förstudier till platsundersökningar preciserades vilka mätbara egenskaper i berget som kan ha betydelse för den långsiktiga säkerheten och vad som kan ha betydelse för möjligheterna att på ett rationellt sätt uppföra förvaret på den undersökta platsen /Andersson m fl, 2000/. Informationen behövdes för att ge vägledning till valet av platser, för att ge vägledning om vad som ska mätas vid platsundersökningen och för att på ett strukturerat sätt kunna utvärdera platsen under den pågående undersökningen.

Vid myndighetsgranskningen av SKB:s samlade redovisning inför valet av platser för vidare undersökning /SKB, 2000/ framkom krav på att SKB ska ta fram ett bättre underlag för bedömning av in- och utströmningsområden och av djupet till förekomst av salt grundvatten som lokaliseringsfaktorer. Det har sedermera diskuterats hur förvaret bör placeras i förhållande till in- och utströmningsområden och om det har betydelse om förvaret förläggs kustnära eller i inlandet.

SKB har genom åren hävdats att det i princip är fördelaktigt om förvarsområdet placeras under ett inströmningsområde. Det är dock viktigare att förlägga förvaret i berg med exempelvis låg vattengenomsläpplighet än att välja en plats med eventuellt långa transportvägar /Andersson m fl, 2000/. SKB är helt eniga med /SKI, 2002/ om att en lång rad faktorer spelar in i bedömningen av förvarets långsiktiga säkerhet, inte bara transportvägar och transporttider. En helhetsbedömning måste präglade såväl säkerhetsanalysen som platsvalet.

SKB noterar också stödet från /SKI, 2002/ i prioriteringen av det forskningsinriktade SKB-projektet om koppling mellan ytnära och djupliggande hydrogeologi, där den geovetenskapliga förståelsen av hydrologiska processer är i fokus.

1.2 Syfte och mål

Föreliggande dokument syftar till att direkt följa upp myndigheternas tidigare synpunkter på SKB:s arbeten beträffande fördelning av in- och utströmningsområden samt djupet till förekomst av salt grundvatten. Det ovan nämnda forskningsprojektet omfattar modellsimuleringar där grundvattencirkulationen i Norra Uppland och i Östra Götaland studerats. Forskningsprojektet rapporteras separat, men delar av slutsatserna, liksom resultat från andra arbeten, sammanvägs i denna rapport. Avsikten är att utföra analyser

och genomgångar ska ge ett mer fullständigt underlag för att bedöma i vilken utsträckning dessa faktorer bör påverka djupförvarets lokalisering. Av speciellt intresse är betydelsen av kustnära respektive inlandsförläggning av djupförvaret. Målet är att:

- dokumentera och diskutera processer av betydelse för grundvattnets cirkulation och salthaltsfördelning i svensk berggrund,
- bedöma fördelningen av in- och utströmningsområden samt djupet till förekomst av höga salthalter och därtill kopplade faktorer som geovetenskapliga lämplighetsindikatorer.

1.3 Denna rapport

Rapporten sätter problematiken kring in- och utströmningsområden i ett större sammanhang där alla faktorer rörande grundvattnets flödesmönster och sammansättning belyses.

I kapitel 2 definieras ett antal begrepp kopplade till grundvattenströmning och grundvattnets sammansättning. För att undvika missförstånd är det viktigt att ha tydliga och gemensamma definitioner av dessa begrepp.

I kapitel 3 och 4 tas en hydrogeologisk respektive grundvattenkemisk utgångspunkt och pekar på skillnader mellan kust och inland när det gäller naturliga processer och händelser i svensk kristallin berggrund.

I kapitel 5 redovisas förvarsplaceringens betydelse för grundvattnets strömningsvägar från förvaret till biosfären. I kapitlet knyts an till tidigare genomförda studier av flödesfördelningen i berggrunden.

Kapitel 6 tydliggör hur grundvattenströmning och grundvattnets sammansättning påverkas av själva förvaret.

I kapitel 7 görs en genomgång av vilka parametrar som kan påverkas av var djupförvaret placeras i förhållande till in- och utströmningsområden och om det förläggs i inlandet eller i kustlandet.

Kapitel 8 är sammanfattningen och ger en sammanvägd bedömning.

2 Några grundläggande begrepp

I diskussionen om olika lokaliseringsfaktorer används en del ord som inte används i vanligt språkbruk. Detsamma gäller olika begrepp kopplade till grundvattenströmning och grundvattnets sammansättning. För att undvika missförstånd är det viktigt att ha tydliga och gemensamma definitioner av dessa begrepp. Detta kapitel ger definitioner och kortfattade beskrivningar av några för rapporten centrala begrepp. Definitionerna bygger på SKB:s nomenklatur vid platsutvärdering, respektive vedertagna definitioner inom geovetenskapen.

2.1 Begrepp som används vid värdering av en plats lämplighet

I SKB:s rapport "Vilka krav ställer djupförvaret på berget?" /Andersson m fl, 2000/ införs ett antal begrepp som används för att värdera om en plats är lämplig för ett djupförvar. De väsentligaste definitionerna återges nedan:

Med *funktion* för ett djupförvar avses uppgifter som djupförvaret är ämnat att fullgöra, t ex ha isolerande och fördröjande funktion. Exempel på funktion: kapseln ska isolera avfallet från omgivningen, berget ska fördröja eventuellt utsläpp av radionuklider.

Med *parameter* avses en fysikalisk eller kemisk storhet (egenskap, förhållande, tillstånd, variabel) av relevans för djupförvarets funktion. En parameter kan anta olika värden. Exempel: orientering av sprickzoner, flödesporositet, pH-värde.

Krav avser villkor som måste uppfyllas. Krav kan avse såväl funktion som enskilda parametrar. Kraven avser absoluta gränser för vad som inte accepteras på en plats. Exempel: kravet att grundvattnet på förvarsdjup inte får innehålla löst syre kan fastläggas utifrån den grundläggande säkerhetsfunktionen att kapselns integritet (isolering) inte får hotas.

Önskemål avser förhållanden som bör uppfyllas. Önskemål kan avse såväl funktion som enskilda parametrar. Önskemålen anger vad som är bra, men inte är nödvändigt. Exempel: önskemålet att berget ska ha god värmeledningsförmåga kan fastläggas utifrån projekterings önskemål om att kunna få rum med många kapslar inom ett givet deponeringsområde.

Med *geovetenskapliga lämplighetsindikatorer* avses parametrar som beskriver bergets och grundvattnets egenskaper och tillstånd för vilka det finns platsspecifika värden/bedömningsgrunder, och som vid ett eller flera skeden av lokaliseringsarbetet kan användas för att bedöma i vilken utsträckning krav och önskemål är uppfyllda. Exempel: förekomst av Fe^{2+} som indikerar syrefria förhållanden.

Med *kriterier* för platsutvärdering avses kännetecknande värden för lämplighetsindikatorer vilka kan användas för att bedöma om en plats uppfyller ställda krav och önskemål. Kriterier är kopplade till nivån av kunskap och förändras därför under olika lokaliseringsskeden. Exempel: uppmätt förekomst av Fe^{2+} i kvalitetsgodkända vattenprov under platsundersökning skulle kunna användas som kriterium för kontroll av kravet att grundvattnet inte ska innehålla löst syre på förvarsdjup.

Kraven och önskemålen avser verkliga förhållanden och de förblir desamma under olika skeden av lokaliseringsarbetet. Det som kan förändra krav eller önskemål är ändrade förutsättningar, nytt förvarskoncept eller betydande ny kunskap. Samtliga krav behöver vara uppfyllda.

Uppfyllda önskemål leder i allmänhet till större säkerhetsmarginaler, lägre kostnader, enklare undersökningar eller enklare konstruktion av förvaret. Samtliga önskemål behöver inte vara uppfyllda för att en plats ska kunna godkännas för ett djupförvar. Det kan mycket väl vara så att "sämre" värden för vissa parametrar kompenseras av "bättre" värden för andra parametrar. För att bedöma säkerhet och funktion behövs därför alltid en integrerad säkerhetsanalys och byggnalys. Önskemålen, som de är formulerade i rapporten "Vilka krav ställer djupförvaret på berget?", ger bara vägledning, men kan inte ersätta säkerhetsanalysen.

2.2 Hydrogeologiska begrepp

Följande centrala hydrogeologiska begrepp används frekvent i rapporten. Begreppen sätts i sitt sammanhang i kapitel 3 "Det hydrologiska kretsloppet".

Adhesiva och kapillära krafter. Ett poröst medium som dräneras på vatten har en förmåga att kvarhålla en viss mängd vatten mot gravitationens dragningskraft. Krafterna som kvarhåller vattnet kallas ofta adhesiva och kapillära krafter. Vattnet kvarhålls i det porösa mediet genom adsorption och ytspänning. Adsorption är vidhäftning av vattenmolekyler till det fasta materialet på grund av elektrostatiska krafter. Ytspänning orsakas av att attraktionskrafterna mellan en vattenmolekyl och luftens molekyler är mindre än mellan olika vattenmolekyler. Vattenytan tenderar därför att hålla ihop, detta kallas ytspänning. I den dränerade zonen är vattnets tryck negativt i jämförelse med atmosfärens.

Advektiv transporttid. Tiden det tar för en vattenpartikel att transporteras med grundvattnets bulkflöde mellan två punkter i grundvattensystemet.

Med *avrinningsområde* menas det område inom vilken all nederbörd rör sig mot ett särskilt ytvattensystem, t ex en viss å med biflöden /Naturvårdsverket, 2001/.

Med *ekvipotentiallinje* menas en linje (yta) utmed vilken potentialen är konstant. Den hydrauliska potentialen består av summan av matrispotentialen (undertryck på grund av adhesiva och kapillära krafter) och gravitationspotentialen.

Ett *grundvattenmagasin* är en geologisk bildning som är så avgränsad att den kan betraktas som en hydraulisk enhet /Naturvårdsverket, 2001/.

Grundvattentryck [Pa], är trycket hos grundvattnet inne i de porer, sprickor eller andra hålrum där grundvattnet förekommer (kan också kallas grundvattnets portryck). Grundvattnets portryck uttrycks normalt i enheten Pascal. Om densiteten är konstant kan dock trycket även uttryckas i meter vattenpelare. Grundvattentrycket ökar normalt med djupet. Vid *hydrostatiska förhållanden* (ingen grundvattenströmning i vertikalled) blir trycket i en punkt under grundvattenytan lika med tyngden av ovanförliggande vattenpelare per ytenhet (pgh), alternativt lika med djupet om trycket uttrycks i meter vattenpelare.

Grundvattenyta [m], motsvarar den nivå där grundvattnets portryck är lika med atmosfärstrycket. Vid hydrostatiska förhållanden (men bara då) överensstämmer grundvattenytan i en punkt med grundvattnets trycknivå i alla punkter rakt under punkten.

Grundvattnets trycknivå [m] (eng. *hydraulic alt. piezometric head*) i en punkt, är summan av grundvattnets piezometriska tryckhöjd (uttryckt i meter vattenpelare) i punkten och punktens geometriska höjd relativt en vald referensnivå (kan t ex vara nivån för havsytan). Grundvattnets trycknivå är med andra ord konstant med djupet (densamma vid olika djup) vid hydrostatiska förhållanden. Trycknivån är bara definierad om grundvattnets densitet är konstant – i annat fall kan man bara tala om tryck, densitet och nivå. Vattnets densitet påverkas av salthalten. Om vattnets salthalt varierar mycket och överstiger ca 10 g/l varierar densiteten i regel för mycket för att det ska vara meningsfullt att ange en trycknivå.

Högsta kustlinjen, HK. Under det senaste isavsmältningsskedet täcktes stora delar av den nedpressade jordskorpan av havet. De högst belägna strandmärkena kallas högsta kustlinjen. Denna ligger olika högt i olika delar av landet bl a beroende på hur stor landhöjningen varit /SGU, 1994/.

Ett *inströmningsområde* för grundvatten är en yta i terrängen där vatten (direkt från nederbörd eller via t ex sjöar och vattendrag) strömmar ner i marken och bildar grundvatten. Ett *utströmningsområde* är en yta i terrängen där grundvatten tränger ut (som t ex källor eller mer diffust som en våtmark). Grundvattenströmning sker från inströmningsområden till utströmningsområden. In- och utströmningen kan betraktas i olika skalor, dvs inom ett regionalt in- eller utströmningsområde kan det finnas lokala in- och utströmningsområden (se vidare kapitel 3 och 5).

Piezometrisk tryckhöjd [m], är en nivå till vilken vattnet stiger i en observationspunkt.

Med *randvillkor* avses generellt förhållanden som gäller vid ett systems avgränsning (rand) mot omvärlden. I en grundvattenmodell beskriver randvillkoren hur grundvattnet står i kontakt med förhållandena utanför modellens gränser. Randvillkor kan vara av typen specificerat tryck, specificerat flöde eller en kombination av dessa. Specificerat tryck kan till exempel anges vid en rand där grundvattenytan står i direkt kontakt med en sjö med känd vattennivå. Specificerat flöde kan t ex anges som villkoret ”inget flöde” vid en modellrand som utgör en tät begränsning.

Med *relief* menas landskapets terrängformer och höjdförhållanden. En *reliefkarta* åskådliggör hur kuperat eller slätt landskapet är. Ett landområdes *strukturrelief* karaktäriseras av berggrundens strukturer.

Med *topografi* menas en detaljbeskrivning av större eller mindre delar av jordytan med avseende på terrängformer, bebyggelse, kommunikationer m m. *Topografiska kartor* beskriver summariskt ett brett register av terräng, marktyper, vegetation, bebyggelse m m.

Transient strömning. Ett grundvattenflöde (flödesmönster) som förändras i storlek eller riktning med tiden. Motsatsen, *stationär strömning*, innebär alltså ett grundvattenflöde som inte förändras över tiden vare sig det gäller storlek eller riktning.

Transporttid. Transport av radionuklider och andra i grundvattnet lösta ämnen genom berget sker främst genom strömning i de öppna sprickorna. Om ämnena som är lösta i vattnet inte samverkar med omgivningen bestäms den advektiva transporttiden av transportvägens längd delat med vattnets *porhastighet*, vilken kan uttryckas som kvoten mellan grundvattensflödet (q) och flödesporositet (ϵ_i). De flesta ämnen rör sig dock betydligt långsammare eftersom de kan diffundera in i bergets mikrosprickor och även sorbera (fastläggas) på mineralytorna. Den resulterande transporttiden bestäms då väsentligen av en funktion som beror på diffusions- och sorptionsegenskaper, samt grundvattenflödet längs transportvägen /Andersson m fl, 1998/. Flödesporositeten är i

detta fall av underordnad betydelse. Transporttiden är olika för olika ämnen, eftersom olika ämnen har skilda sorptions- och diffusionsegenskaper.

Vattengenomsläpplighet [m/s, m²/s], är ett mått på ledningsförmågan för grundvatten hos ett geologiskt material. Om grundvattnets densitet är konstant ges grundvattenflödet av produkten mellan gradienten av grundvattnets trycknivå och vattengenomsläppligheten ("Darcy's lag"). Vid densitetsberoende strömning gäller liknande, men mer komplicerade samband. Vattengenomsläppligheten bestäms väsentligen av storleken på sprickor och porer i det geologiska materialet och av hur väl dessa är förbundna med varandra.

2.3 Grundvattenkemiska begrepp

Följande begrepp avseende grundvattnets kemiska sammansättning och transport av lösta ämnen med grundvattnet används frekvent i rapporten. Begreppen sätts i sitt sammanhang i kapitel 4 "Grundvattnets sammansättning".

Extremvatten. Extrema vattensammansättningar ("end-members") för systemet som undersöks. Extremvatten kan t ex utgöras av meteoriskt vatten, havsvatten, glacialt smältvatten eller koncentrerad saltlösning.

Grundvattnets ålder, används här synonymt med vattnets kontaktid med berget. Denna kan inte fastställas exakt, eftersom vattnet ofta är ett resultat av vattenblandningar och olika lösta ämnen transporteras med olika hastigheter (se nedan). Ett prov kan därför innehålla mätbara halter tritium som indikerar att det är modernt, samtidigt som t ex ³⁶Cl-datering indikerar en ålder på 1,5 miljoner år. Man bör ange vilken datering åldersantagandet är baserat på, samtidigt som man bör ange att en del av vattenmassan kan ha denna ålder. Modellberäkningar kan användas för att i ett vattenprov beräkna hur vatten av olika åldrar har blandats och en genomsnittsålder kan indikeras.

Grundvattnets ursprung. Ibland går det att spåra grundvattnets ursprung, vilket betyder att vattnet har betydande likhet med ett ursprungsvatten. Ursprungsvatten kan t ex vara meteoriskt vatten, havsvatten, glacialt smältvatten eller koncentrerad saltlösning. Ursprungsvattens sammansättning (uppmätta eller modellerade) bör alltid anges i tabellform för huvudkomponenterna. Eftersom grundvattnet ofta är en blandning kan det bestå av flera olika ursprungsvatten, där andelarna kan uppskattas med hjälp av blandningsberäkningar.

Referensvatten. Typiska eller för modelleringen användbara vattensammansättningar som används i beräkningar i jämförelse med uppmätta vattenprov. Referensvatten kan t ex utgöras av meteoriskt vatten, havsvatten eller glacialt smältvatten, men det kan även handla om ett specifikt prov som behövs för att förstå grundvattensystemet. Ett referensvatten behöver alltså inte nödvändigtvis vara ett extremvatten, även om det oftast är så.

Salthalt [mg/l], avser i princip samma sak som TDS. Ofta används även kloridhalten i betydelse salthalt, men detta måste då anges.

TDS (Total dissolved solids) [mg/l], anger totala mängden lösta ämnen i grundvatten. Dessa ämnen blir kvar om vattenprovet förångas till torrhet. Ibland kan TDS även anges i promille.

Vattentyper. För att förenkla grundvatteninformationen talar man om olika vattentyper. Grundvatten kan vara sött (drickbart), bräckt (drickbart till salt) eller salt (lika salt som eller saltare än havsvatten). På stora djup i berget förekommer även vatten med betydligt högre salthalt än havsvatten. På engelska kallas sådana vatten för *brine*, men i denna rapport används ordet *koncentrerad saltlösning* för att beteckna sådana vatten. Vid klassificeringen bör man ange vilka salthaltsgränser som har använts för vattentyperna.

3 Det hydrologiska kretsloppet

Avsikten med detta kapitel är att ge en introduktion till grundvattnets flödesprocesser för att därmed ge en sammanfattande teoretisk bakgrund till grundvattnets in- och utströmning i svensk terräng. Kapitlet omfattar i korthet vattnets kretslopp, grundvattenbildning, strömningsteori, geologins betydelse och framtidsscenarioer. Kapitlet avrundas med att lyfta fram processer som är viktiga att beakta vid en analys av grundvattnets omsättning med hänsyn till ett djupförvar på omkring 400 till 700 meters djup.

3.1 Hydrologiska cykeln

Vattnet uppträder i sitt kretslopp (figur 3-1) i tre huvudfaser: som sötvatten på land (3 %), som saltvatten i haven (97 %) och som vattenånga i atmosfären (0,001 %). För att föra vattnet till den ”högsta” nivån i kretsloppet, atmosfären, går det åt stora mängder energi. Solen står för den energi som avdunstar vattnet från land- och havsytan. I atmosfären stöter vattenångan på kallare luftlager där den kondenseras till moln eller dis. Vattnet faller sedan till jordens yta i form av regn, hagel eller snö. Samtliga vattensamlingar och fuktiga ytor avdunstar vatten, men den största avdunstningen sker från de tropiska haven där det inte finns några moln som hejdar solstrålningen. Till en viss del avger de gröna växterna också vattenånga som transpireras genom bladen. I Sverige har vi ett humitt klimat vilket innebär att summan av nederbörden över ett år är större än summan av växternas transpiration och avdunstningen från marken, den s k evapotranspirationen.



Figur 3-1. Vattnets kretslopp. Sötvatten i form av nederbörd samlas i sjöar, floder, bäckar eller i grundvattenmagasin. Detta vatten förs mot haven. Vattenförrådet i atmosfären förnyas genom avdunstning (evaporation) från alla ytor och genom växternas transpiration. Människan hämtar sitt vatten från rinnande vattendrag, sjöar, uppdammda reservoarer eller från grundvattenmagasin (från SHR Bildarkiv).

På grund av sina kemiska egenskaper är vattnet ett utmärkt lösningsmedel och dessutom utgör det ett viktigt transportmedel för olika ämnen i naturen (se kapitel 4). Därmed knyts även andra kretslopp till den hydrologiska cykeln, t ex kemiska processsystem, biologiska processsystem och värmetransport. Vattnet står t ex för tillförseln av nödvändiga näringsämnen till växterna. Vidare balanserar vattnet jordklotets temperaturnivåer, vilket sker på så vis att haven absorberar och utjämnar solvärmen över dygnet i och med att de under nätterna fungerar som jättelika reglerande värmemagasin. Vattnet har således en enorm betydelse för livsmiljön.

Det finns mängder av litteratur som på ett populärt vis presenterar den hydrologiska cykeln och grundvattenströmning. Denna sammanställning är framförallt inspirerad av /McWhorter och Sunada, 1977; Angel och Wolseley, 1983; Grip och Rodhe, 1988, Carlsson och Gustafson, 1991, Knutsson och Morfeldt, 2002, Middleton och Wilcock, 1994, samt Espeby och Gustafsson, 2001/.

3.2 Den hydrologiska budgeten

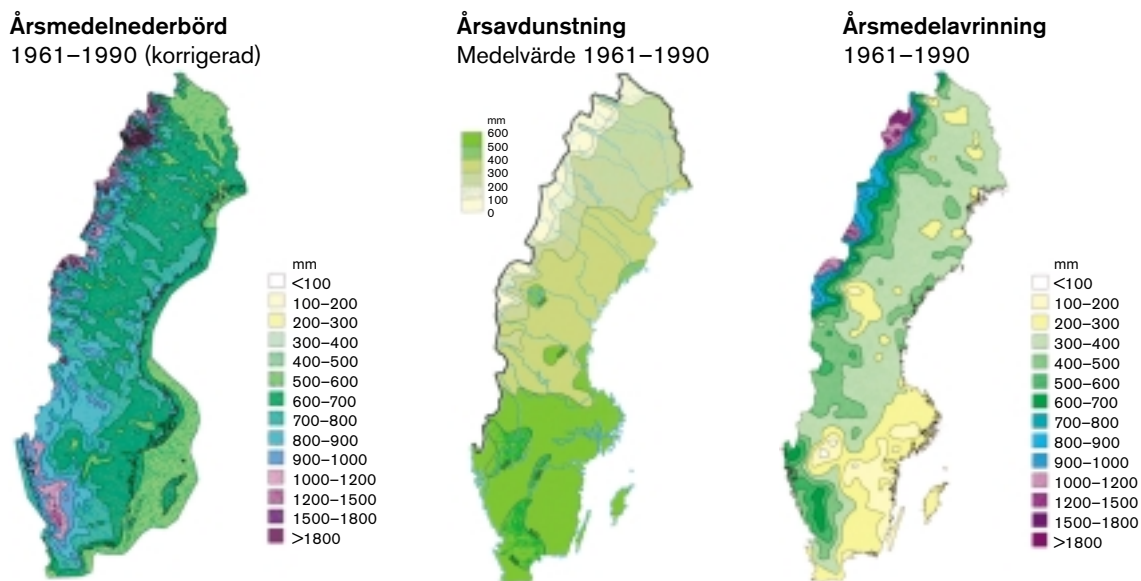
Den hydrologiska cykeln kan uttryckas som en vattenbudget där nederbörd minus evapotranspiration skall balanseras mot yt- och grundvattenavrinning samt olika magasinförändringar. Att bestämma de olika termerna i denna budget och att förutsäga deras variation utgör en av hydrologins huvuduppgifter.

En uppgift är att finna någon form av medelvärde i tid och rum för de ingående storheterna. För detta krävs mycket långa observationstider, men man kan då konstatera att magasinförändringarna utjämnas och kan försummas.

Varje avrinningsområde begränsas av en ytvattendelare. På samma vis avgränsas ett grundvattenområde av en grundvattendelare. Ett vanligt och ofta berättigat antagande när ytnära grundvattensystem studeras är att yt- och grundvattendelare sammanfaller. Då avrinner i princip inte något grundvatten från området, även om grundvattensomsättningen inom det betraktade terrängavsnittet kan vara betydande. Fördelningen av den naturliga grundvattensomsättningen i djupled är alltså sådan att merparten omsätts i jordlagren och i den överst belägna uppspruckna berggrunden (ca 98–99 %). Resten av grundvattnet (endast ca 1–2 %) omsätts i de djupare delarna av berggrunden /Holmén m fl, in prep; Lång m fl, 2002/. För att förstå vattensomsättningen mer detaljerat krävs kunskap om de topografiska och geologiska förutsättningarna (se vidare avsnitten 3.5 och 3.6).

Vi finner emellertid, med ovanstående förutsättningar, att medelnederbörden minus evapotranspirationen är lika med årsmedelavrinningen (den s k specifika avrinningen eller nettonederbörden). I figur 3-2 framgår årsmedelnederbörden, medelvärdet för s k aktuell evapotranspiration och den specifika avrinningen i Sverige.

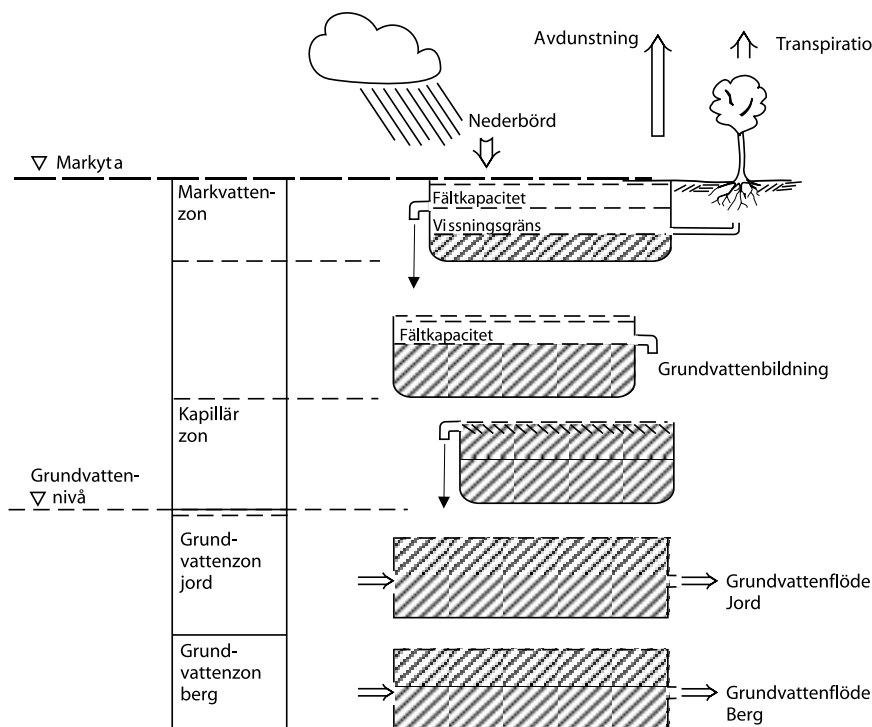
Varje grundvattenuttag inom ett avrinningsområde kommer att påverka vattenbudgeten. Detta medför att avrinningstermerna måste minska i motsvarande utsträckning och att varje grundvattenuttag således sker på bekostnad av yt- och grundvattenavrinning.



Figur 3-2. Årsmedelvärden för nederbörd, aktuell avdunstning och specifik avrinning och dess fördelning i Sverige. Sett i ett regionalt perspektiv motsvarar specifika avrinningen (i l/s och km²) grundvattenbildningens maximala storlek (från SHR Bildarkiv).

3.3 Grundvattenbildning

Markens infiltrationskapacitet närmast markytan överskrider i de flesta fall de nederbördsintensiteter vi har i Sverige. Den övervägande delen av nederbörden som faller på landytan, infiltrerar därför. Infiltrationen är dock inte detsamma som grundvattenbildningen eftersom vattnet på sin väg vidare ner mot grundvattenzonen, perkolationen, passerar ett relativt invecklat magasinssystem (se figur 3-3).



Figur 3-3. Förenklad bild av magasinssystemet under markytan /modifierad efter Carlsson och Gustafson, 1991/.

Magasinssystemet kan bildligt liknas vid en serie reservoarer med olika egenskaper. Reservoarernas volym motsvaras av porositeten. Man måste emellertid vara medveten om att inte allt vatten i porsystemet är rörligt utan delvis är bundet till markmaterialet med adhesiva och kapillära kvarhållande krafter. I grundvattenzonen är porerna eller sprickorna helt vattenfyllda och i den zonen kan mer eller mindre horisontella grundvattenrörelser ske. Merparten av grundvattenflödena sker enligt ovan i jordlagren och en mindre del omsätts i berggrundens sprickor.

I det ovanstående konstaterades att i grundvattensammanhang är den s k nettonederbörden, dvs den del av nederbörden som ej avdunstar, av intresse. Nettonederbörden ger förutsättningarna för den specifika avrinningen och för magasinförändringarna. Dessa varierar under ett enskilt år. Grundvattenbildning sker exempelvis sällan under sommarhalvåret utan endast under långa regnperioder eller i samband med snösmältningen och tjällossningen. Växterna förbrukar nämligen det för dem tillgängliga vattnet i marken genom kapillär transport till rötterna.

3.4 Grundvattenströmning

I grundvattenzonen påverkas vattnet av såväl drivande som mothållande krafter. De drivande krafterna beror på rådande tryckskillnader och gravitationens inverkan. Den mothållande kraften uppträder när vattnet är i rörelse och domineras av viskositeten (skjuvmotstånd). Ställer man upp en balansekvation för dessa krafter vid ett grundvattenflöde genom en viss betraktad volym och utmed en viss flödesbana, l , så kan man visa att flödet är:

$$v = -\left(\frac{k}{\mu}\right) \cdot \left(\frac{dp}{dl} + \rho g \frac{dz}{dl}\right) \quad \text{Ekvation 3-1}$$

där:

v = Darcyhastighet, som uttrycker ett flöde per enhetsarea (porer och fast material) och tidsenhet ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

k = Permeabilitet (m^2),

μ = Dynamisk viskositet ($\text{Pa} \cdot \text{s}$),

dp/dl = Tryckskillnad utmed flödesbanan l ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$), och

$\rho g dz/dl$ = Gravitationens påverkan per volymenhet i riktning utmed flödesbanan l där ρ utgör densiteten och g är accelerationen på grund av tyngdkraften.

Ovanstående ekvation är en generaliserad form av Darcys lag som gäller för vätskor med variabel densitet, viskositet och där permeabiliteten kan variera beroende på läge och riktning. Vid många tillämpningar kan ekvationen förenklas. Det är då lämpligt att skriva de drivande krafterna som en slags gradient av kraftpotentialen utmed flödesriktningen. Om densiteten är konstant erhålls:

$$v = -\left(\frac{k\rho g}{\mu}\right) \cdot \frac{d(p/\rho g + z)}{dl} \quad \text{Ekvation 3-2}$$

Utgår man från en viss bestämd nivå (referensnivån z) motsvarar $p/\rho g$ grundvattnets trycknivå, h . Uttrycket $k\rho g/\mu$ kallas hydraulisk konduktivitet eller vattengenomsläpplighet och när den behandlas som en konstant betecknas den ofta med enbart K .

Med dessa förenklingar skrivs då Darcys lag som:

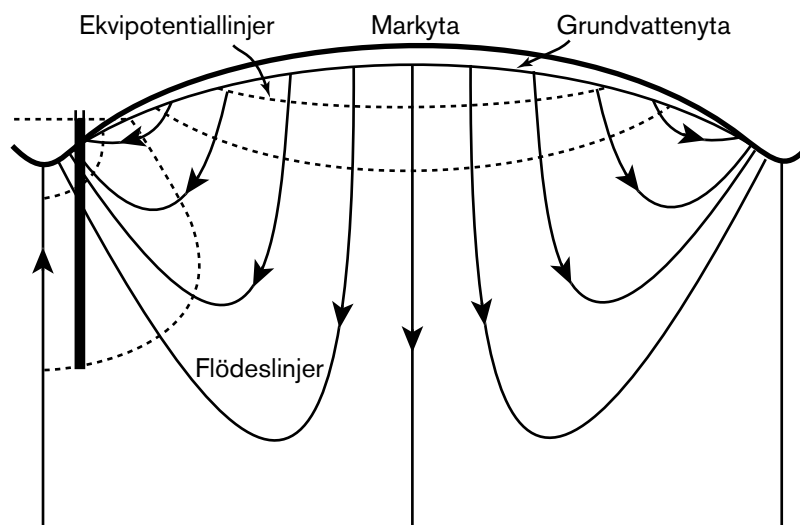
$$v = -K \cdot \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad \text{Ekvation 3-3}$$

Samtliga grundvattenströmningsproblem löses med hjälp av ovanstående mer eller mindre förenklade konstitutiva samband (Darcys lag) i kombination med ett kontinuitetsvillkor och förekommande randvillkor.

Grundvattnets flödesmönster åskådliggörs ofta i plan eller profil med så kallade ekvipotentiallinjer. En ekvipotentiallinje utgörs av lägen där grundvattnets trycknivå är konstant (jämför höjdkurvor) (se figur 3-4).

Grundvattenströmning där skillnader i innehåll av lösta ämnen påverkar vattnets densitet är ett exempel på inhomogent flöde. I strikt mening är allt grundvattenflöde inhomogent på grund av koncentrationsvariationen av lösta ämnen. För beräkningar och beskrivningar av yttnära grundvattenflöden bortses emellertid i allmänhet från denna effekt eftersom koncentrationsvariationerna är mycket små. Ett viktigt undantag är grundvattenmagasin nära kusten och på öar, där halterna av lösta ämnen kan variera från några tiotals milligram per liter till oceanernas höga salthalter (TDS ca 35 000 mg/l). Motsvarande densiteter varierar då från 1 till 1,025 kg/dm³. Som jämförelse har Östersjön en ungefärlig salthalt (TDS) på 6000 mg/l. Likaså kan mycket höga salthalter (80 000 mg/l) uppträda i djupa grundvattenförekomster (djupare än 1000 m) på grund av viss upplösning av berggrunden under mycket långa tidsrymder. I blandningszonen mellan sött och salt grundvatten kan olika former av hydrokemiska processer äga rum beroende på vattnets sammansättning (se vidare kapitel 4).

En detaljerad beskrivning av inhomogent grundvattenflöde kräver egentligen att man parallellt löser ekvationer som beskriver grundvattenflöde (med varierande r och m) och transport av lösta ämnen. För det kustnära fallet kan man ibland dock tillåta sig en



Figur 3-4. En idealiserad bild av grundvattenflöde under en topografisk yta där ekvipotentiallinjer framgår /efter Middleton och Wilcock, 1994/.

idealiserad bild med två separata homogena vätskor. Om vi förutsätter en lins av sött grundvatten som flyter ovanpå (och inte blandas med) salt grundvatten kan man visa på en approximativ jämviktsrelation mellan avståndet till söt/saltvattengränsen från havsnivån och grundvattennivån (se figur 3-5). Vid stationära flödesförhållanden kallas relationen för Ghyben–Herzbergs ekvation:

$$z = \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho_f)} \cdot h_f \quad \text{Ekvation 3-4}$$

där:

z = avståndet mellan havsyta och söt/saltvattengräns,

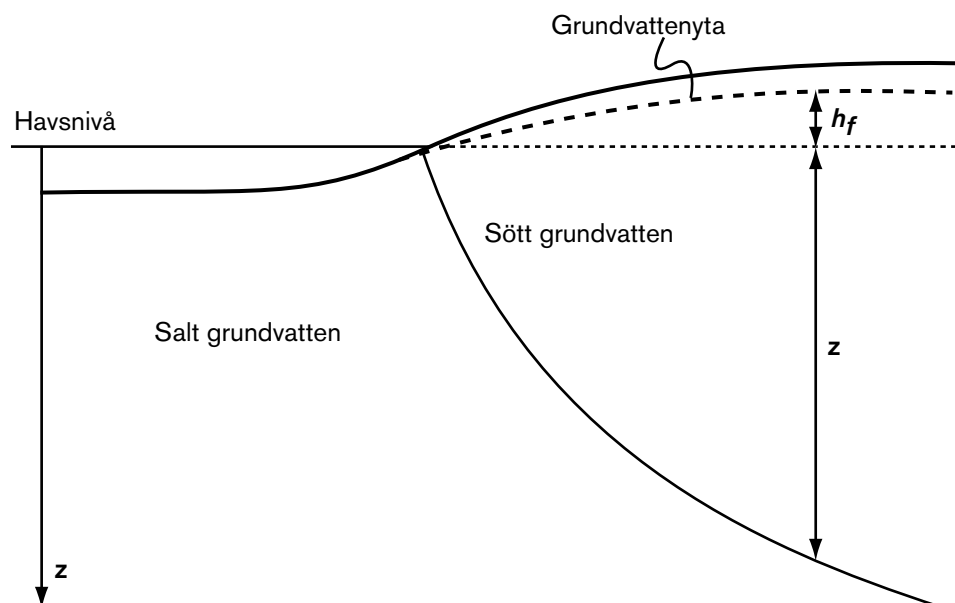
ρ_f = det söta grundvattnets densitet,

ρ_s = det salta grundvattnets/havsvattnets densitet, och

h_f = grundvattnets trycknivå över havsytan (referensnivån).

Ovanstående uttryck ger för $\rho_f = 1$ och $\rho_s = 1,025$ att söt/saltvattengränsen påträffas 40 ggr djupare under havsytan än grundvattnets trycknivå över havsytan.

Ghyben-Herzbergs ekvation innebär att det söta grundvattnet skulle flöda ut enbart i skärningen mellan grundvattennivån och havets strandlinje, samt att saltvatteninträngning skulle ge sig tillkänna på relativt stora djup. Ekvationen innebär en stark förenkling som dels beror på att Dupuit-Forchmeimers approximation tillämpas, vilken bortser från vertikala flödeskomponenter /se t ex Glover, 1959/, och dels på att havsnivån eller andra randvillkor ej förändras över tiden. Så är exempelvis ej fallet i vårt lands kustnära områden med en pågående landhöjning. Med rådande nettonederbörd och geologiska förhållanden (låg vattengenomsläpplighet mot djupet) tar det förhållandevis lång tid för det söta vattnet att tränga undan salta grundvattenrester i områden som tidigare legat under havet. Utmed Sveriges kuster påträffas man därför salt grundvatten på måttliga djup (20–100 m) i berggrunden, jämfört med vad en stationär betraktelse skulle ge /se t ex Voss och Andersson, 1993; Ericsson, 1981/.

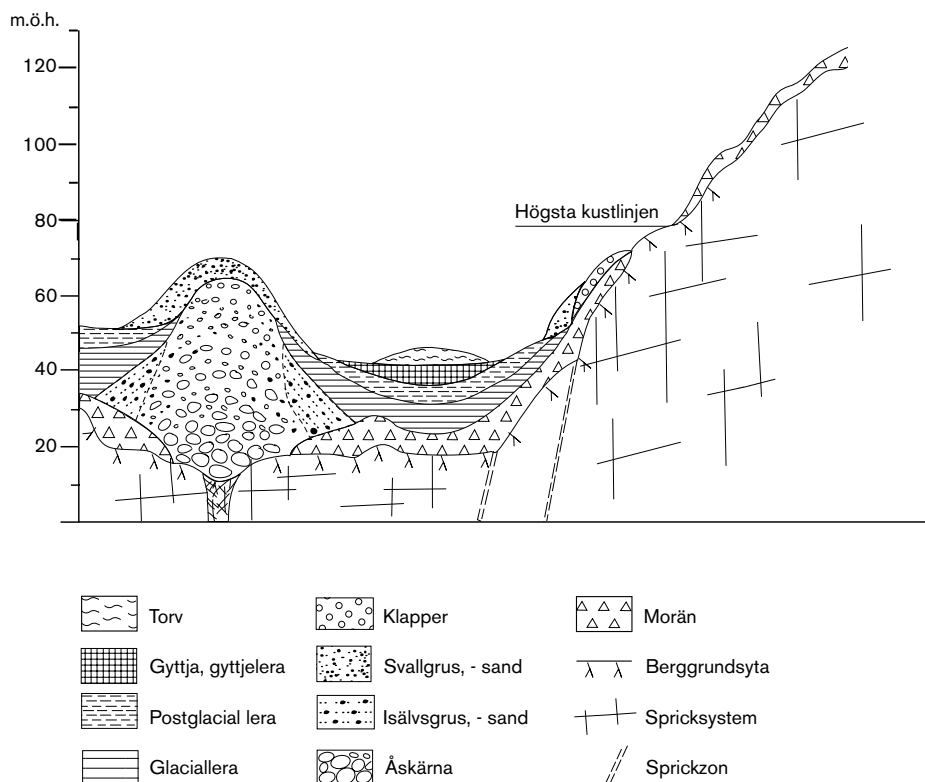


Figur 3-5. Sötvattenlins på salt grundvatten enligt Ghyben-Herzbergs tryckbalans ekvation /efter Middleton och Wilcock, 1994/.

Som en följd av synsättet med en söt-/saltvattengräns kan man diskutera och beskriva effekten på salthaltsfördelningen av en grundvattensänkning i en kustnära akvifer. En sänkning av trycket i en söt grundvattenlins måste innebära en motsvarande höjning av gränsskiktet mot det salta grundvattnet. Höjningen av skiktet är proportionell mot $\rho_f/(\rho_s - \rho_f)$ multiplicerat med avsänkningen i varje punkt på gränssytan. Detta fenomen kallas på engelska "upconing". "Upconing" kan bli fallet under själva anläggandet av ett kustnära förvar då relativt stora trycksänkningar sker i det saltfattiga grundvattnet med koncentrationshöjningar på grundare nivåer till följd.

3.5 Geologins betydelse i kretsloppet

Geologiskt sett domineras det svenska landskapet av mycket gamla kristallina bergarter med överlagrande jordarter som är ett resultat av de senaste nedisningarna. Sedimentära bergartsrester förekommer framförallt i Skåne, Östergötland, Västergötland och på Gotland, Öland. Fjällkedjan består huvudsakligen av olika skifferkomplex, marmorhorisonter och amfiboliter. Inlandsisens nedmalande effekt på underlaget gav upphov till den osorterade jordarten morän som täcker ca 70 % av landets yta. Ur jökellåvar skapades rullstensåsar och olika deltaformationer. Genom vågverkan vid landets höjning ur havet efter nedisningen har sedan viss svallning förekommit som inneburit en uppsortering av jordmaterialet. Om vattendjupet varit tillräckligt stort har det funnits förutsättningar att avsätta finkorniga sediment, t ex leror. Jordar av organiskt ursprung, kärr- och mosstorv, är alla bildade efter inlandsisens avsmältning, dvs under de senaste 14 000 åren. I figur 3-6 framgår en schematisk sektion av jordarternas förekomst i terrängen under tidigare högsta kustlinje (HK) i Sverige.



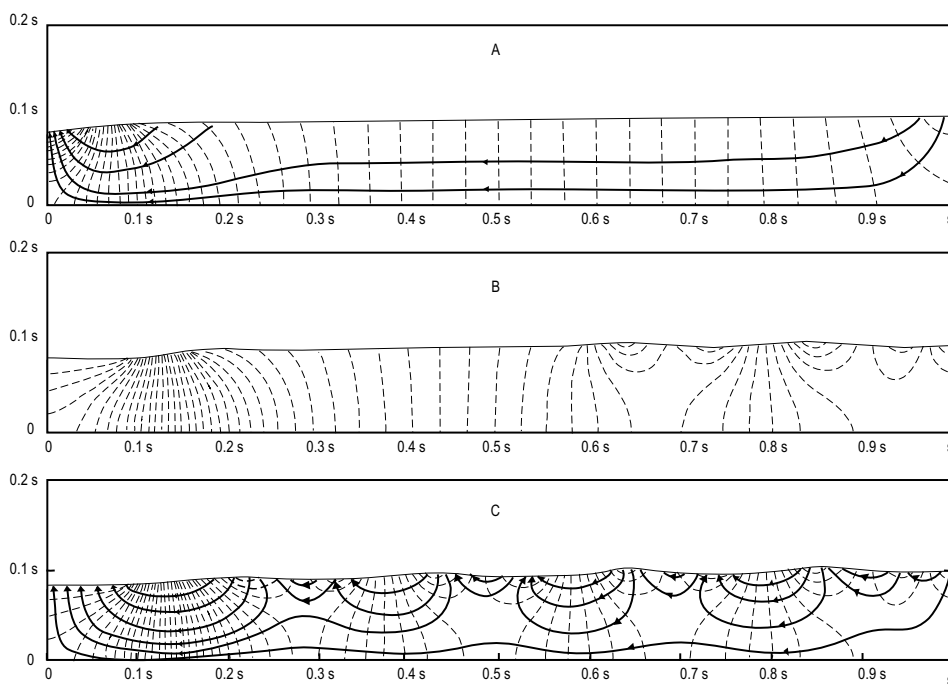
Figur 3-6. Schematisk sektion över jordarternas fördelning i höjdlid i svensk terräng med hänsyn till tidigare högsta kustlinje (HK). Över högsta kustlinjen utgör morän den dominerande jordarten (från SHR Bildarkiv).

Jordarternas läge i terrängen, i kombination med klimatets påverkan och förutsättningarna för ämne-transporten i den omättade delen av marken, har varit avgörande för vilken typ av jordmån som utbildats.

3.6 In- och utströmning – randvillkor

Skilda geologiska formationer har såväl olika genomsnittlig porositet som vattengenomsläpplighet. Vidare varierar de hydrauliska egenskaperna stort (med flera tiopotenser) inom en och samma geologiska formation. Generellt sett är berggrunden mindre genomsläpplig än överlagrande jordarter, med undantaget om leriga jordar förekommer. Detta innebär att bergets topografi ger förutsättningarna för magasineringen och flödet av ytvattnet i sjöar och vattendrag. Vidare styrs de regionala och lokala grundvattenströmningsförhållandena av dessa topografiska förutsättningar och terrängen kan därför delas in i in- och utströmningsområden /Tóth, 1963; Gustafsson, 1970; Rehbinder m fl, 1997/.

I figur 3-7 visas tre olika principiella bilder av grundvattenflöden med hänsyn till grundvattennivåns utseende. Bilderna bygger på modelleringar med förenklade geologiska förhållanden som antagits tvådimensionella, homogena och isotropa /Freeze och Witherspoon, 1967/. Bild B jämförd med bild A visar att en topografisk höjd, vare sig den är stor eller mindre framträdande, innebär att ett inströmningsområde skapas inom ett visst avstånd på ömse sidor om höjden. Runt en lågpunkt skapas, å andra sidan, en utströmningsituation. Om en "orolig" topografisk relief föreligger, som i bild C, skapas ett antal lokala (och/eller intermediära) flödessystem. Det är noterbart att de lokala topografiska förutsättningarna ofta styr läget av ytvattendelarna och att en del av det bildade grundvattnet, om än starkt begränsat, i regionalt perspektiv "tvärrar över avrinningsområdena". De regionala grundvattendelarna behöver med andra ord ej helt sammanfalla med ytvattendelarna.



Figur 3-7. Effekten av grundvattennivåns form på det regionala flödesmönstret /från Freeze och Witherspoon, 1967/.

I den svenska berg-moränterrängen följer grundvattenytan huvudsakligen markytan (några få meters djup i berg-moränterräng) och dess lutning, detta på grund av en hög grundvattenbildning i kombination med relativt låga genomsläpplighetsvärden. Om genomsläppligheten däremot är hög blir grundvattenytan flack och avståndet till markytan ökar, vilket är fallet i isälvsavlagringar. När det gäller tryck- och flödessituationen i djupled är emellertid bilden mer komplex. Frågeställningar om in- och utströmning i den varierande hydrogeologi som råder i Sverige måste då behandlas med hänsyn till den skala som problemen betraktas /Zijl, 1999/.

I det detaljerade perspektivet, tiotals till hundratals meter, sammanfaller vanligtvis inströmningsområdena för det ytära grundvattnet med de terränglägen där de grovkornigare jordarna, moränen och de sorterade jordarterna, finns. I ett lokalt inströmningsområde flödar vatten från markvattenzonen till grundvattenzonen med en flödeskomponent som är huvudsakligen vertikal. Utströmning sker i relativt låga terränglägen, ofta med överlagrande finkornigare jordarter på morän. Där strömmar grundvatten ut, antingen som ett mättat flöde till markytan alternativt till något vattendrag, eller som ett omättat flöde till växternas rötter för vidare avbördning i form av dunstning eller genom vegetationens transpiration. Om grundvattnets trycknivåer når högre än markytan ges förutsättningar för utströmning av grundvatten i form av källor.

I det regionala perspektivet, tusentals till tiotusentals meter, då vi betraktar flödesmönstret för den, enligt ovan, lilla del av grundvattenomsättningen som når 500–1000 m djup, spelar den topografiska reliefen och berggrundens genomsläpplighetsegenskaper i zoner och spricksystem stor roll. Inströmningen sker i relativt utbredda höjdområden och utströmningen kanaliseras via relativt sett genomsläppliga delar (zoner) i berggrunden till områden med låga hydrauliska trycknivåer där en uppblandning sker med det ytära grundvattnet. Utifrån numeriska modelleringar kan beräknas att typiska strömningsbanor, som når dessa djup mellan in- och utströmningsområden, har längder på motsvarande ca 2000–10 000 meter och uppträder som enhetliga flödesceller (se t ex /Holmén m fl, in prep/ och kapitel 5).

3.7 Grundvattenomsättning i geologiskt tidsperspektiv

De allra flesta radioaktiva ämnen i använt kärnbränsle sönderfaller inom loppet av några hundra år. Därefter dominerar den kvarvarande radioaktiviteten av ett fåtal ämnen som kommer att finnas kvar under mycket långa tider. Med tiden, efter ca 100 000 år, kommer det använda bränslet alltmer att likna det naturliga uranmineral som det framställs av. Farligheten hos sådana mineral, liksom på sikt det använda bränslet, domineras av dotterprodukter till uran (radium, radon, polonium, bly m fl). Dessa ämnen kommer alltid att finnas i naturen på grund av uranets mycket långa halveringstid, 4,5 miljarder år /Hedin, 1997/.

Inom ramen för en riskanalys (den så kallade säkerhetsanalysen) bedöms olika framtidsscenarier och deras konsekvenser för förvaret. Hundratusen år är en så lång tidsrymd att det är skäl att kommentera förvarets livslängd och bedöma dess farlighet i ett geologiskt tidsperspektiv. Olika geologiska och klimatologiska scenarier ingår därför i säkerhetsanalysen (se figur 3-8).

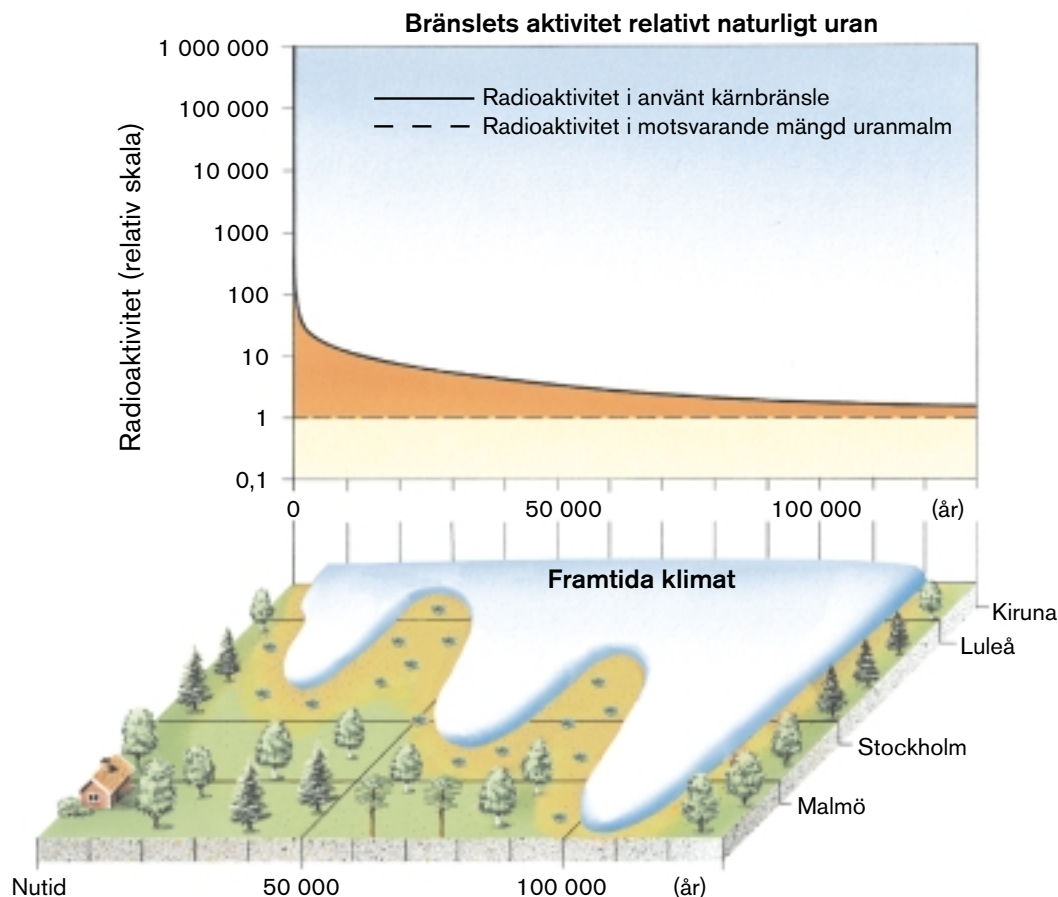
Det svenska urberget, vilket tillhör den baltiska urbergsskölden, bildades för mellan 3000 och 900 miljoner år sedan. Berggrunden har formats genom orogener (bergkedjebildning) då sedimentära och vulkaniska bergarter veckats och omvandlats på olika

djup i jordskorpan. Stora mängder magma från jordens inre har trängt upp i samband med dessa orogener. Det Baltiska sköldområdet har varit intakt under de senaste ca 1000 miljoner åren, även om det genom platttektoniska processer förflyttats vida över jordklotet. Den kristallina berggrunden, som vi kan se idag i Sverige, har under årmiljoners lopp genom erosion givit de styrande intermediära och regionala topografiska förutsättningarna för grundvattenflödet och magasineringen i våra sjöar och vattendrag.

Under de senaste 100 000 åren har inga platttektoniskt orsakade förändringar skett i vår berggrund. Under de kommande 100 000 åren kommer inte heller de platttektoniska förhållandena att nämnvärt ändras i förhållande till dagens situation. De största förändringarna av förhållandena i Sverige under en sådan tidsrymd, vilket enligt ovan alltså motsvarar avfallens farlighet, kommer att vara associerade med uppkomsten av inlandsisar. Liksom varmare perioder följs av kallare så avlöser olika vegetationsperioder varandra. Eftersom växtligheten påverkar det hydrologiska kretsloppet kan vi även förvänta oss en indirekt förändring av grundvattenbildningen på grund av ändrad skärmverkan genom vegetationen och transpiration /Wallroth, 1997/ (se figur 3-8).

För en glaciationscykel kan följande tre klimatstyrda processtillstånd särskiljas:

- Tempererat/Borealt tillstånd
- Permafrosttillstånd
- Glacialt tillstånd



Figur 3-8. Olika klimattillstånd kommer att avlösa varandra under en glaciationscykel /från Wallroth, 1997/.

De olika processtillstånden påverkar de termiska, mekaniska, hydrologiska, kemiska och biologiska förhållandena. I SKB:s säkerhetsanalys SR 97 /SKB, 1999a; Boulton, m fl, 1999/ har dessa processtillstånd legat till grund för bedömningar av djupförvarets funktion med hänsyn till olika klimatstyrda framtidsscenarier. I det nedanstående, som inspirerats från /Wallroth, 1997/, kommenteras enbart hydrogeologiska förhållanden som har bäring på in- och utströmning.

Tempererat/Borealt tillstånd

Detta processtillstånd motsvaras väsentligen av det som största delen av Sverige idag befinner sig i, dvs ett tillstånd som är karakteristiskt för interglaciala perioder. Såväl havsnivåförändringarnas isostatiska (orsakade av landhöjning) som dess eustatiska komponenter (orsakade av global förändring av havsnivån) är då långsamma pågående processer.

Relativa havsnivåförändringar (strandlinjeförskjutning) representerar likväl viktiga ändringar i randvillkoren för grundvattenflöde i kustnära områden. När havet stiger översvämmas låglänta områden. Saltvatten kommer då att tränga undan det lättare söta grundvattnet. På motsvarande sätt kommer en sjunkande havsnivå att föra med sig att salt grundvatten ersätts med sött. Som ett resultat kommer komplexa grundvatten-cirkulationsmönster att bildas och grundvattnet kommer att få en karakteristisk kemisk sammansättning.

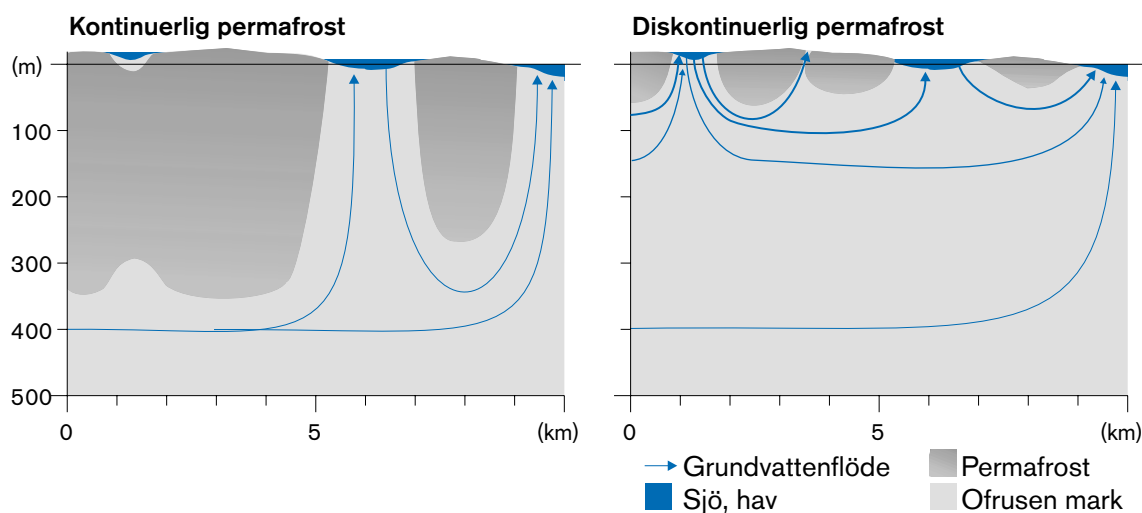
Sett över tidsrymder på flera tusentals år in i framtiden kommer de geografiska förutsättningarna för lokala in- och utströmningsområden alltså att ändras, speciellt i kustnära lägen. Rådande nederbördsförhållanden och topografiska effekter styr grundvattenbildning och grundvattenflöde. Strömningsbilden påverkas emellertid även av skillnader i salthalt hos grundvattnet, vilka delvis kan vara en kvarvarande effekt av tidigare glaciala perioder.

Relativt stora strandlinjeförändringar sker både vid inledningen av en istid, i och med att världshavens vatten binds i isar, och efter deglaciationen då isen smälter och den isostatiska landhöjningen är som snabbast.

Permafrosttillstånd

Permafrosten förväntas ha en varierande utbredning och djuppåverkan i det svenska landskapet beroende på jord- och bergarternas skilda termiska egenskaper (värmeledning, specifik värmekapacitet) samt beroende på sjöarnas och vattendragens isolerande verkan (vattnets isbildningsvärme). Inom ett icke-nedisat område utan isolerande vattenvolymer kan permafrosten nå relativt djupt, ca 350 m /Boulton och Payne, 1993; McEwen och de Marsily, 1991/. Permafrost i de övre delarna av det geologiska mediet kan innebära ett, hydrauliskt sett, mer eller mindre ogenomsläppligt lock. Under ett allmänt permafrosttillstånd, som uppträder inom ett område avlägset från glaciärers fronter, är inte grundvattenflödet påverkat av själva landisen. Samtidigt innebär de förändrade nederbördsförhållandena och den minskade infiltrationsmöjligheten att grundvattenbildningen generellt blir låg.

Genom att grundvattnets naturliga strömningsvägar störs kommer det täta locket att tvinga ner grundvattenflödet till betydligt större djup jämfört med dagens situation (se figur 3-9). Erfarenheterna från dagens permafrostområden i Ryssland och Kanada visar dock att vissa källutflöden (talik) kan ske i det tätande "locket".



Figur 3-9. Grundvattnets strömningsvägar påverkas av permafrost, bl a genom att flödet tvingas till större djup jämfört med dagens situation /från SKB, 1999a/.

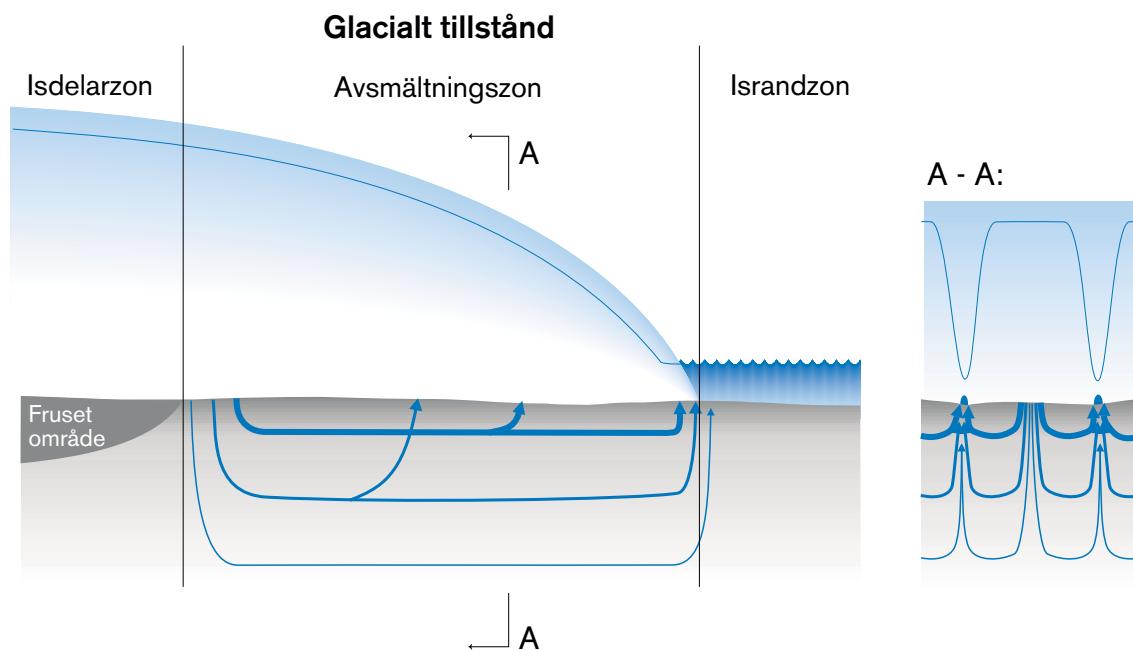
Frysningen av vatten i sprickor och de längre uppehållstiderna för grundvatten under den frusna berggrunden kan även påverka den kemiska sammansättningen hos grundvattnet i form av bl a högre salthalter. Den högre densiteten hos det salta vattnet kan medföra att vatten transporteras mot djupare nivåer, framförallt via större brantstående sprickzoner (se vidare kapitel 4).

Glacialt tillstånd

Den storskaliga effekten av inlandsisen är en nedtryckning av litosfären. Som ett resultat av jordskorpan återhämtning under och efter deglaciationen ökar den tidigare belastade berggrundens porositet generellt och sötvatten kan förväntas tränga ned till flera hundra meters djup /Muir-Wood, 1993/. Grundvattenflödet under en inlandsis kan drivas av två olika processer:

- Utdrivning av befintligt grundvatten från berget på grund av sammantryckning av berggrunden till följd av islasten. Detta sker oberoende av om smältning sker under glaciären eller ej.
- Infiltration av smältvatten i berggrunden. Det genererade flödet fortgår så länge som det sker smältning i kontakten mellan is och berg.

För det glaciala processtillståndet kommer grundvattenbildningen att vara beroende av en samverkan mellan smältvattenflöden från glaciären, hydrauliska trycknivåer som är starkt styrda av nivån på isens överyta, samt geometrin hos flödesvägarna vid ytan. Inom israndzonen (se figur 3-10) kan marken vara frusen, vilket tvingar smältvatten som härrör från en position under isen att ta sig till ytan i området framför isen under inverkan av en hög tryckgradient. Det finns goda skäl att anta att nivån på isens överyta ger en begränsning för tryckgradienten hos det subglaciala vattenflödet inom avsmältningszonen. De mycket stora flöden som genereras genom smältning kan inte infiltreras i den generellt ganska lågkonduktiva berggrunden i Sverige. Då tryckhöjden når en nivå lika med isens överyta kan man räkna med att överskottsvattnet dräneras genom tunnlar i isens underkant, vilka ger upphov till lokala sänkor i trycknivå /Boulton m fl, 1996/. Frånsett dessa lokala effekter, med höjning av effektivspänningen till följd, kan man inom avsmältningszonen förvänta sig att islasten ej reducerar berggrundens genomsläpplighet.



Figur 3-10. Grundvattenflödets randvillkor vid närvaro av en inlandsis /efter Boulton m fl, 1999/.

Inom isdelarzon, å andra sidan, sker ingen smältning vid isens botten som alltså här är frusen. Då det inte sker något grundvattenflöde här kommer tryckytan att vara horisontell och betydligt lägre än istrycket. Detta kan ge upphov till relativt höga effektiva spänningar från isen.

3.8 Processer och egenskaper av betydelse för in- och utströmning

Grundvattnets flödesregim blir starkt utjämnad av de infiltrations- och perkolationsstyrande egenskaper som råder i markens omättade zoner. Betraktas längre tidsrymder, i storleksordningen tiotal år, så kan grundvattnets flödesmönster anses som nära nog stationärt när det gäller in- och utströmning. Talar vi däremot om tusentals år eller längre så bör in- och utströmningsförhållandena betraktas i ett geologiskt tidsperspektiv. De processer som ger flödesmönstren är beroende av de geologiska egenskaperna och de hydrologiska randvillkoren. I sammanfattande form diskuteras dessa i detta delkapitel.

3.8.1 Egenskaper

Stationär topografisk relief

Det svenska landskapet är huvudsakligen utbildat i metamorfa och eruptiva bergarter av prekambrisk ålder. Stora delar av dagens landformer tillhör mycket gamla landskap som bevarats mer eller mindre intakta, bland annat beroende på att skyddande lager av täckberg legat kvar under långa tidsrymder. Det subkambriska peneplanet som dominerar södra Sveriges topografi är exempelvis mer än 600 miljoner år gammalt, medan Norrlandsterrängen utbildat sin relief under Mesozoikum (245–65 miljoner år) och Tertiär (65–2 miljoner år) (SGU, 1994). Glacialerosionen har varit beroende av isens

bottentemperaturer. Om isen smälter i botten så eroderar den, medan landformerna bevaras vid bottenfruset tillstånd. Glacialerosion vid plan relief är liten medan den i dalgångar kan vara betydande. Som ett medelvärde för Weichselistiden, den senaste nedisningen som började för ca 115 000 år sedan och slutade för ca 8500 år sedan, uppskattas erosionsbeloppet till mellan 0,65 m och 2,5 m /Påsse, in prep/. Även om viss glacialerosion förekommit så har huvuddragen i det svenska landskapet varit intakta under många miljoner år. I ett hundratusenårigt perspektiv innebär detta att den topografiska strukturreliefen kan antas sammanfalla med dagens. Denna strukturrelief antas alltså överlagra en eventuell nedböjning av jordklotets krusta i samband med en eventuell framtida nedisning.

Jordartsfördelningen ändras i liten utsträckning mellan nedisningsperioder

Huvuddelen av Sveriges jordarter är bildade under den senaste nedisningen och tiden därefter. Jordartsfördelningen kan i sina huvuddrag betraktas som oföränderlig fram till nästa istid. Undantaget är organogena jordarter (gyttja, dy, torv) som bildas genom förmultning av växtsamhällen i torvmarker. Successivt kan öppna sjöar med tiden fyllas av vegetation och växa igen till en torvmark. I de olika stadier som en myrmark genomgår från kärr till mosse påverkas vattenomsättningen i de övre marklagren i lokal skala.

Strukturgeologisk tolkning ger grundvattenomsättningens geometriska ramverk

Merparten av de svenska bergarterna tillhör alltså en prekambrisk urbergsprovins. Eftersom bergarterna i detta tidsperspektiv varit i ett sprödtekoniskt tillstånd och varit utsatta för stora påkänningar i såväl horisontella som vertikala riktningar har zoner och sprickor med varierande längd och bredd utbildats. Under Kvartärperioden har återkommande glaciationer inneburit reaktiveringar i redan tidigare bildade förkastningszoner /Stanfors och Ericsson, 1993/. Berggrundens spricksystem och zoner utgör det kristallina bergets vattengenomsläppliga delar och är helt avgörande för det geometriska ramverk som styr grundvattnets omsättning.

Vattengenomsläpplighetsdata är platsspecifika

Utifrån fördelningarna av jordarter och bergarters strukturer är det möjligt att skapa en konceptuell bild av hur grundvattenomsättningen sker i ett såväl lokalt som regionalt perspektiv. Erforderliga genomsläpplighetsdata (med stor spridning i värden) måste inhämtas i fält och ansättas den geologiskt baserade flödesmodellen.

3.8.2 Randvillkor

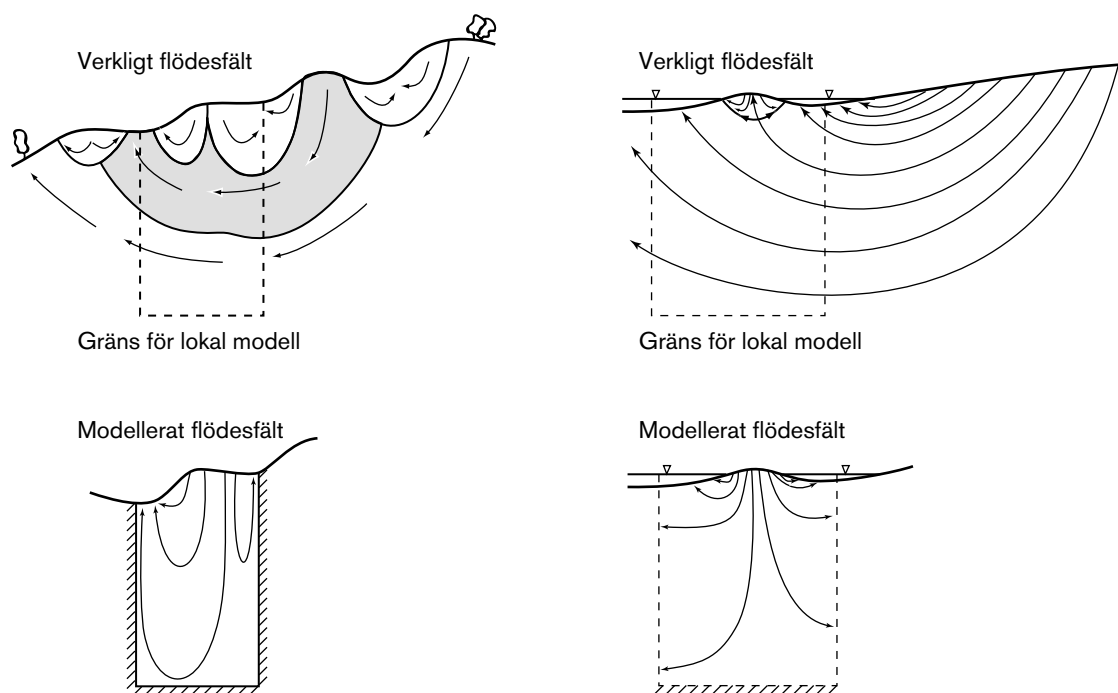
Modeller som beskriver grundvattnets omsättning och förhållandena vid in- och utströmningsområden baseras på flödessystemets massbalans och det konstitutiva sambandet, Darcys lag. Flödesmodelleringsarna görs sedan med hänsyn till rådande hydrologiska randvillkor, dvs nederbörden, modellgränsernas trycknivåer/flöden, samt nivåer för hav, sjöar och vattendrag inom modelldomänen.

Nettonederbörden varierar regionalt

Ett basscenario vid en säkerhetsanalys behandlar ett klimattillstånd som är tempererat/borealt. Vid ett sådant tillstånd förväntas ej några extrema nederbördsvariationer som skulle ändra förutsättningarna för grundvattenbildning /Holmgren och Karlén, 1998; Losjö m fl, 1999/. Det är emellertid uppenbart att den specifika avrinning som avspeglar regionala nettonederbörden för olika delar av vårt land varierar påtagligt. Sydöstra Sverige har en specifik avrinning (30-års medel) motsvarande ca $5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$, medan vid Bohuskusten och Norrlandskusten motsvarande avrinning är ca $20 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ respektive ca $15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ (se figur 3-2). När nederbördsprocessen behandlas i regional skala finns statistiskt behandlade regionala data att tillgå vid SMHI. För lokala analyser krävs klimatstationer med nederbördsräkning.

Modellgränserna ansätts som en förenkling av verkligheten

I det lokala perspektivet och när yttnära flödessystem (som utgör merparten av omsättningen) studeras inom ett litet avrinningsområde ansätts vanligen en grundvattendelare att approximativt sammanfalla med ytvattendelaren. Vid storregionala flödesmodelleringar med komplex fördelning av jord och bergarter bör emellertid den storskaliga topografin analyseras innan randvillkoren ansätts. Modellens känslighet när det gäller flödesmönstrets utseende bör även utvärderas. Såväl felriktade flödesmönster som överdrivet påtvingad uppstyrning av flöden kan förekomma /Nyberg och Voss, 1991/ (se figur 3-11). Olika angreppssätt tillämpas för att anta flödes- och trycksituationen vid modellgränser, t ex täta ränder eller konstant hydrostatisk tryckfördelning.



Figur 3-11. Välet av randvillkor leder till förenklingar av flödesmönstret och grundvattenomsättningen i förhållande till verkligheten. Täta ränder innebär en överdriven omsättning medan hydrostatiskt trycksatta ränder kan leda till felaktigt riktade flöden /från Nyberg och Voss, 1991/.

3.8.3 Flödesmönster idag och i framtid

Landhöjningen ändrar flödesmönstret och den nedströms reglerande havsnivån

Havsnivån kommer att förändras beroende på både isostasi (landhöjning) eller eustasi (global förändring av havsnivån), och båda processerna gör att den storregionala utströmningssituationen långsamt förändras. Framförallt kommer detta att ge sig tillkänna i kustnära lägen. På nivåer under den tidigare högsta kustlinjen sker även ett långsamt utbyte av ytnära bräckt/salt grundvatten mot sött grundvatten. I lägen över den tidigare högsta kustlinjen påverkas omsättningen, framförallt inströmningen, om de geologiska förhållandena huvudsakligen saknar finsediment (undantag issjösediment). Strandlinjeförskjutningen kan prognostiseras för olika framtidsscenarioer under tempererat/borealt klimat /Morén och Påsse, 2001/ och därmed kan flödesmodelleringar behandla de nedströms reglerande havsnivåerna.

Topografin ger lokala och intermediära flödesceller

Enbart en mycket begränsad del av grundvattenbildningen nära markytan, storleksordningen 1 %, når djupare nivåer än ca 500 meter i den kristallina berggrunden. Flödesmönstrets utseende är starkt beroende av genomsläpplighetsegenskapernas fördelning, liksom av den topografiska reliefen med dess randvillkor i landskapet (avgränsningar, hav, sjöar, vattendrag). I svensk undulerande terräng måste flödesmönstret utvärderas från region till region. Erfarenheterna från modelleringar visar att Baltiska sköldens hydrogeologiska och topografiska förutsättningar ger lokala och intermediära flödesceller ned till flera hundra meters djup, och att typiska flödeslängder i en flödescell från in- till utströmningssområde via 500 meters djup är 2–10 kilometer (se vidare kapitel 5).

Grundvattenströmning vid framtida klimatscenarier behandlas separat

I kapitel 3.7 presenterades i korthet klimatstyrda processtillstånd som kan ge andra omsättningsmönster jämfört med dagens flödesituationer. Glaciationsperioder, permafrost och marin påverkan ger framför allt andra randvillkor, men även egenskapsförändringar. Beräkningar av framtida grundvattenströmningar är en viktig del av säkerhetsanalysen, men har legat utanför ramen för detta projekt.

4 Grundvattnets sammansättning

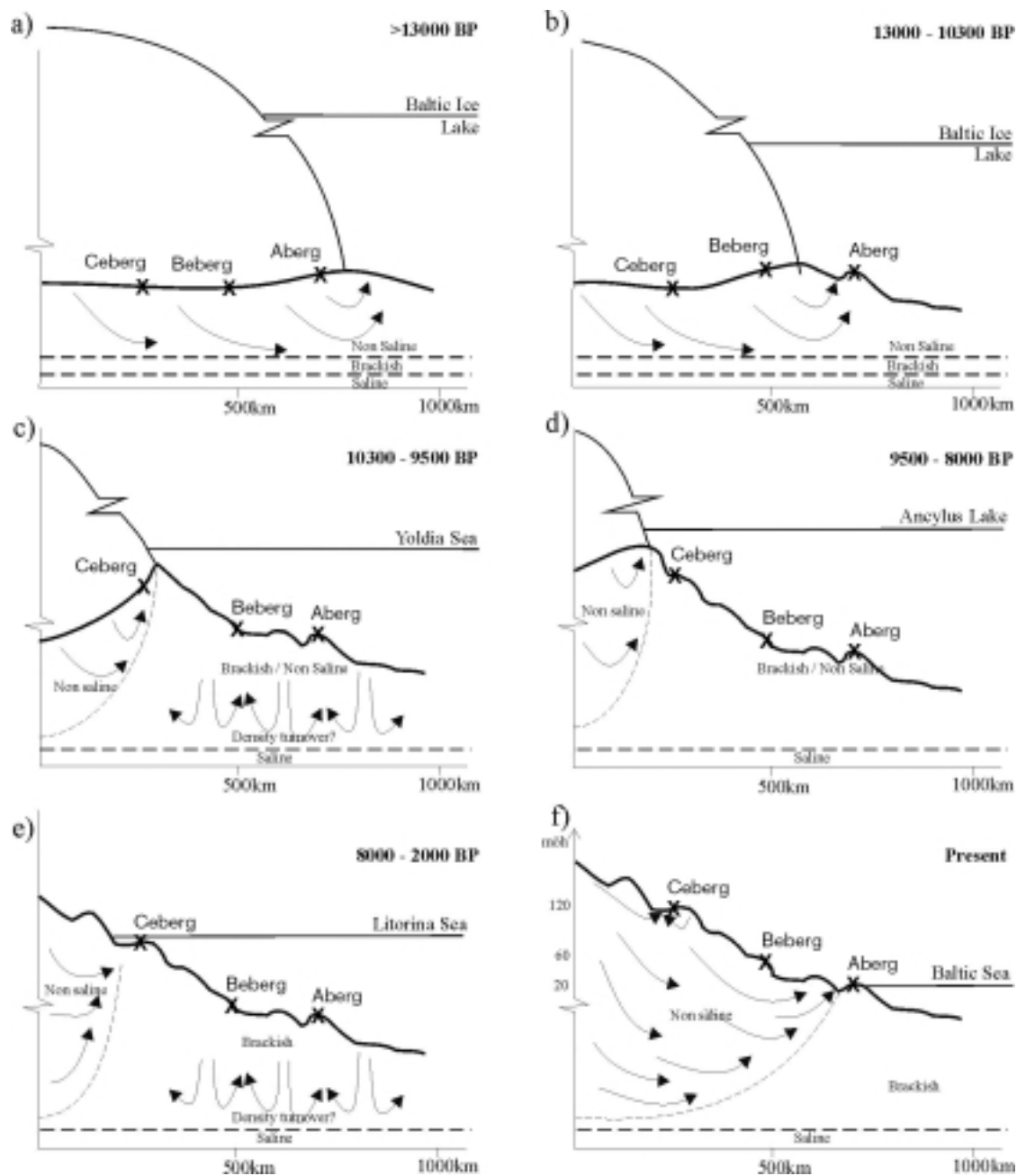
Avsikten med detta kapitel är att ge en introduktion till grundvattnets sammansättning i svensk berggrund och att ge en bakgrund till skillnader mellan in- och utströmningsområden ur en grundvattenkemisk synvinkel. Kapitlet beskriver vattnets ursprung och ålder, grundvattnets salthalt i olika delar av landet, saltets ursprung och skillnader mellan kust och inland. Dessutom beskrivs hur man kan spåra grundvattnets ursprung, vilka processer som har betydelse för grundvattnets sammansättning och vilka framtida förändringar man kan förvänta sig. Avsnittet avslutas med slutsatser om viktiga grundvattenkemiska processer som bör beaktas vid beskrivningen av djupförvarsplatsen.

4.1 Vattnets ursprung och ålder

Grundvattnet i berggrunden har varierande ursprung (ursprungskälla) och ålder (kontaktid med berget). Både ursprung och ålder är ofta svåra att fastställa entydigt eftersom grundvattnet i de flesta fall består av en blandning av olika vattentyper (se kapitel 3). Dessutom kan olika reaktioner förändra vattenkemin, vilket kan leda till att den ursprungliga sammansättningen förändras.

I samband med avsmältningen av den senaste inlandsisen kunde smältvatten tränga ner i berggrunden. På större djup blandades detta smältvatten med äldre saltvatten så att ett sött/salt blandvatten uppstod. I områden som täcktes av havsvatten kunde berggrunden infiltreras av detta om det befintliga vattnet i berggrunden hade en lägre densitet än havsvattnet. I samband med landhöjningen påbörjades sedan en gradvis ursköljning av äldre vattentyper som då ersattes av framför allt meteoriskt vatten, och denna process fortsätter än idag. Det innebär att regionala inströmningsområden i inlandet domineras av meteoriskt vatten, som genom rådande hydrogeologiska drivkrafter tränger ner i berget. I utströmningsområden, framför allt sådana som ligger nära kusten, kan den hydrauliska drivkraften vara mindre, vilket resulterar i att regionala, kustnära utströmningsområden kan bibehålla äldre vattentyper längre än inströmningsområden.

Genom att studera grundvattnets sammansättning på olika platser i landet har man kunnat karaktärisera fyra typer av grundvatten med sinsemellan olika ursprung/ålder: gammalt salt grundvatten eller koncentrerad saltlösning (>1,5 miljoner år); glacialvatten (>8000 år); meteoriskt vatten (0–8000 år); och marint vatten (0–8000 år) /Laaksoharju m fl, 1999b/. I figur 4-1 visas en principmodell för utvecklingen av grundvattensituationen, från isavsmältningen för ca 13 000 år sedan fram till dagens situation, för tre områden: Äspö, Forsmark och Gideå /Laaksoharju m fl, 1999b/. Dagens grundvattensammansättning bär ofta spår från flera av dessa tidsperioder.

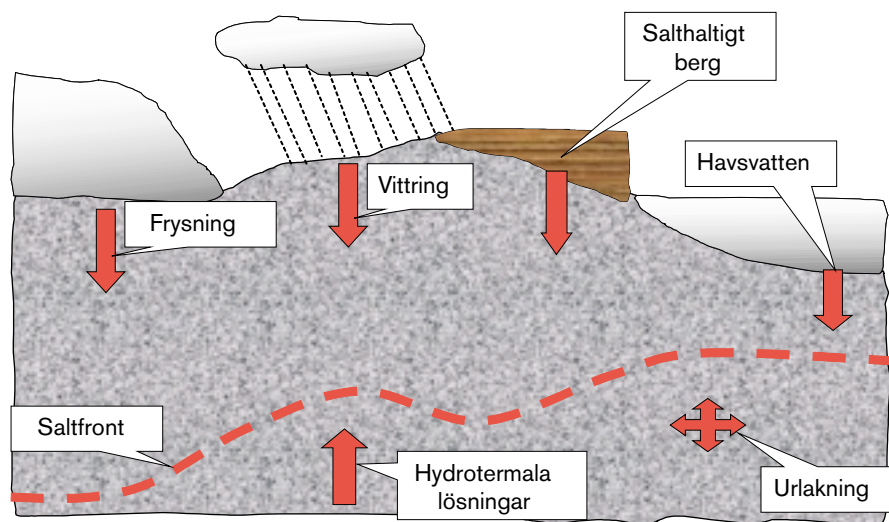


Figur 4-1. En principmodell för tiden efter den senaste istiden för områdena Äspö (Aberg), Finnsjön (Beberg) och Gideå (Ceberg). För orientering se figur 4-3. a) Injektering av glacialt smältvattnet, b) Baltiska isjön, c) Yoldiahavet, d) Ancylussjön, e) Litorina havet, f) Österjön /Laaksoharju m fl, 1999b/.

4.2 Varifrån kommer saltet?

På samma sätt som själva grundvattnet har även saltet flera ursprungskällor. Det kan vara frågan om att havsvatten tränger ner i berggrunden, att havsvatten eller grundvatten fryser och saltet koncentreras i samband glaciation eller permafrost, att mineral som innehåller saltinneslutningar vittrar sönder, salta lösningar från sedimentära bergarter (t ex Evaporiter) som har täckt det kristallina urberget eller från salta lösningar från flera kilometers djup som har transporterats upp i samband med hydrotermal aktivitet (se figur 4-2). Eftersom dessa processer kan ha verkat för tusentals till miljontals år sedan, kan det vara svårt att fastställa varifrån saltet kommer. Dateringar på djupt saltvatten har indikerat att åldern kan vara mer än 1,5 miljoner år, men ett sådant vatten har ofta även inblandning av yngre vatten. Hur stor inblandningen är styrs ofta av djupet, men även av om det är frågan om ett regionalt inströmnings- eller utströmningsområde.

Saltet i grundvattnet kan således ha sin ursprungskälla utanför berggrunden (exoterm) eller i berggrunden (endoterm), men oftast är det en kombination av dessa processer. De endoterma processerna är ofta så långsamma att det krävs att vattnet är orörligt och i kontakt med bergmatrisen i tusentals eller miljontals år. Detta kan vara fallet på stort djup (>1000 m) eller i lågkonduktiva delar av kristallin berggrund. Däremot har det salt som förekommer i grundvattnet i de övre delarna av berggrunden (<1000 m) oftast sitt ursprung i exoterma processer. I kapitel 5 hänvisas till en hydrodynamisk modellering /Voss och Provost, 2001/ där man använder ett matematiskt samband som beskriver en endoterm urlakning av salt ur bergmatrisen. Detta bör betraktas som en förenkling av det salina grundvattnets ursprung i kristallin berggrund.

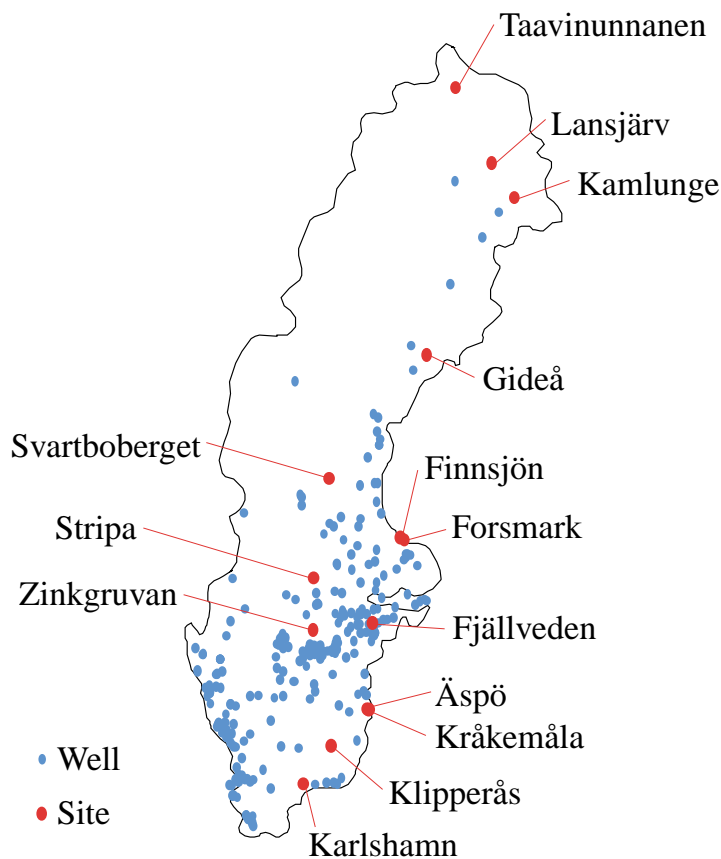


Figur 4-2. Möjliga ursprungskällor för salt i grundvatten.

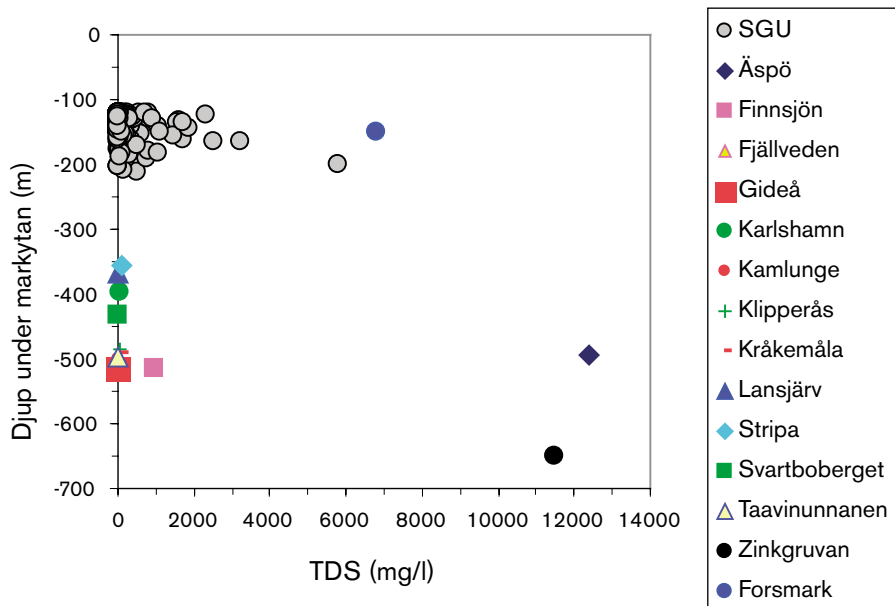
4.3 Grundvattnets salthalt i olika delar av landet

Undersökningar har visat att salt grundvatten förekommer på flera platser i Sverige. För att få fram en fördelning baserat på utförda mätningar analyserades data från totalt 13 områden (Äspö, Finnsjön, Fjällveden, Gideå, Kamlunge, Karlshamn, Klipperås, Kråkemåla, Lansjärv Stripa, Svartboberget, Taavinunnanen och Zinkgruvan) där man har prov från 500 m ±150 m djup. Samtliga dessa platser förutom Zinkgruvan är provtagna och undersökta av SKB. För att få ett större jämförelsematerial inkluderades även 253 vattenprov från >120 m djup tagna ur SGU:s brunnsarkiv, samt från SKB:s undersökningar i Forsmark. Provtagningsplatserna visas i figur 4-3.

För att lättare kunna jämföra proven användes endast kloridhalten (Cl i mg/l), som räknades om med hjälp av en förenklad formel (Cl-halten × 1,7) till TDS (total mängd lösta ämnen). Som jämförelse har dagens Östersjövatten en kloridhalt på ca 3500 mg/l, vilket motsvarar ca 6000 mg/l TDS. Meteoriskt vatten har 0 mg/l TDS, drickbart färskvatten har en gräns på 1000 mg/l TDS, bräckt vatten har en TDS-halt på 1000 till 2000 mg/l, medan saltvatten här har definierats som ett vatten med högre TDS än 2000 mg/l. Koncentrerad saltlösning har per definition en betydligt högre salthalt än havsvatten, här används en TDS-halt >68 000 mg/l. I figur 4-4 visas sambandet mellan TDS-halt och djup från markytan för de valda proven.

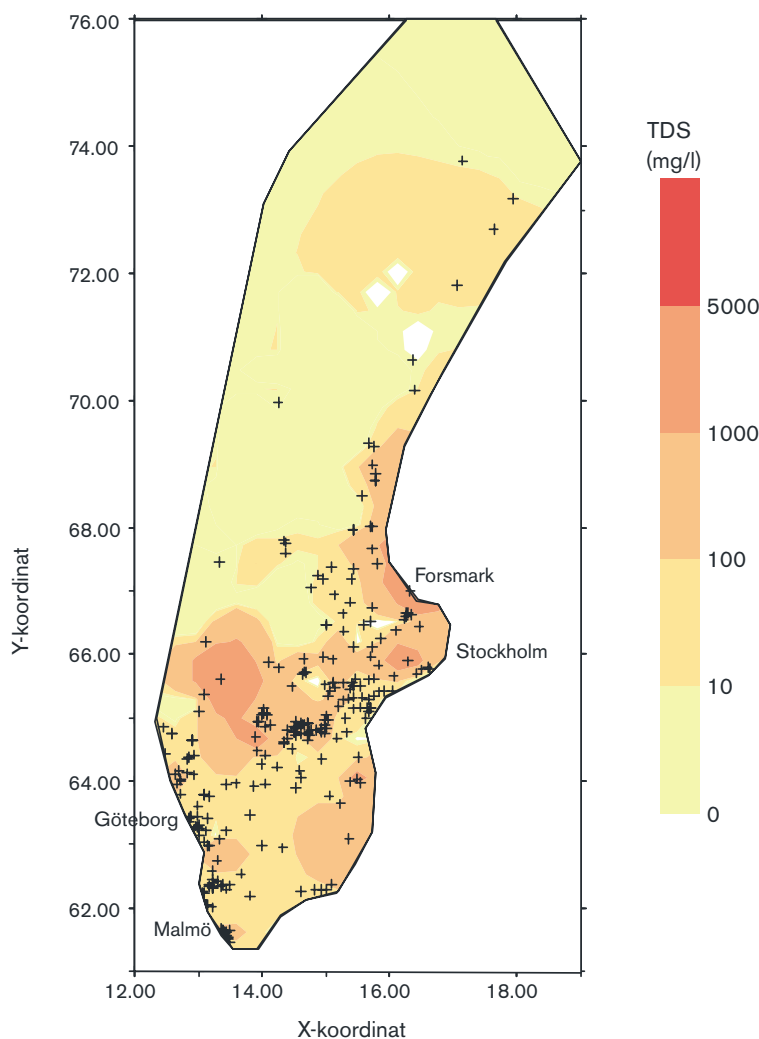


Figur 4-3. Karta över Sverige som visar vattenprovtagningssplatser vid olika platsundersökningar (röd markering), samt vattenprov från >120 m djup i SGU:s brunnsarkiv (blå markering).



Figur 4-4. Salthalten (TDS) som funktion av djupet från markytan visas för de valda proven. Man kan se att prov tagna från 100–250 meters djup har en TDS-halt på 0–7000 mg/l, medan prov tagna från 350–650 meters djup har 0–12 500 mg/l TDS. Som jämförelse har Östersjövatten en TDS-halt på ca 6000 mg/l.

Figur 4-5 visar uppskattad fördelning av lösta salter (TDS) inom djupintervallet 100–250 m. Uppskattningen har gjorts med interpoleringstekniken kriging, vilket innebär att uppskattningen är relativt säker nära provtagningspunkten medan osäkerheten är stor där antalet prov är få eller avståndet mellan provpunkterna är stort. Av figuren framgår att förhöjd salthalt förekommer på många platser nära kusten och i låglänt terräng. Proven är tagna från brunnar där vattenuttaget kan vara stort, vilket kan ha medfört att vissa provpunkter uppvisar en förhöjd salthalt på grund av att saltvatten från ett annat djup har trängt in i brunnen. Den ojämna fördelningen av provpunkter leder till att man inte kan dra några säkra slutsatser, annat än att salt grundvatten kan uppträda på förvarsdjupet 500 m i en stor del av landet och att sannolikheten för hög salthalt är större i områden nära kusten och i låglänta områden.

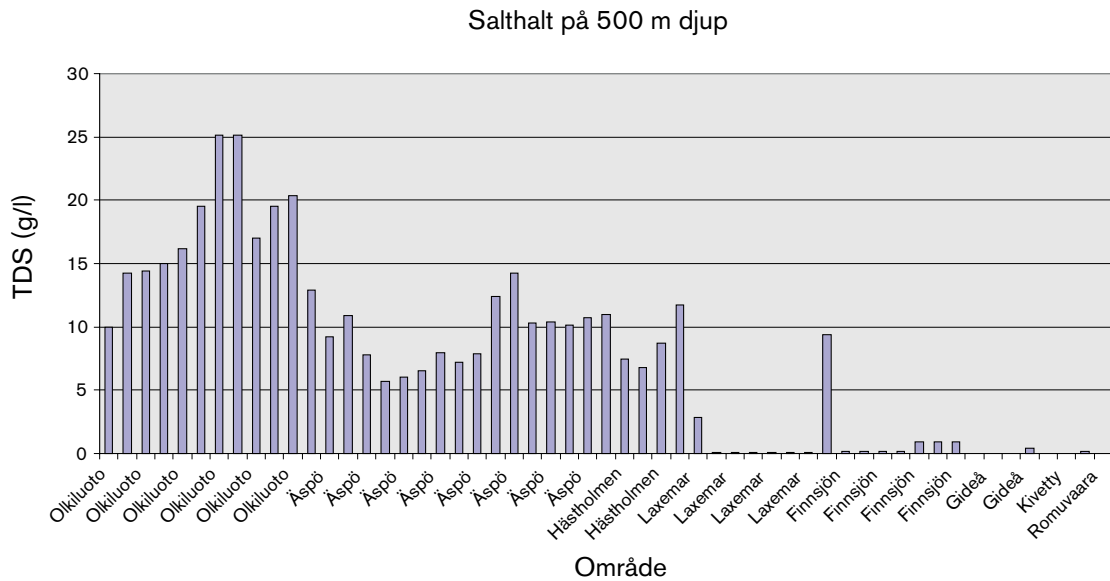


Figur 4-5. Salthalt på 100–250 m djup, uppskattad med interpolation (kriging) mellan olika provtagningspunkter.

4.4 Skillnader mellan kust och inland

Salt grundvatten förekommer på det djup dit sötvattnet med hjälp av sin tyngd förmår trycka ner det. I områden med höglänt topografi kan det bildas en större ”sötvattenkudde”, jämfört med områden med låglänt topografi. Detta gör att man kan räkna med att salt grundvatten befinner sig på ett större djup i högt belägna områden jämfört med lågt belägna områden. Detta betyder att salt grundvatten generellt förekommer på ett större djup i inlandet jämfört med kustnära områden.

För att på ett mer detaljerat sätt undersöka skillnaden i salthalten mellan kust- och inlandsområden kan man jämföra tre svenska (Äspö inklusive Laxemar, Finnsjön och Gideå) och fyra finska områden (Olkiluoto, Hästholmen, Kivetty och Romuvaara) (för orientering se figur 4-10). Av dessa områden ligger Kivetty och Romuvaara ovanför den högsta kustlinjen, medan de övriga områdena kan ha påverkats av havsvatten. I figur 4-6 visas salthalten (TDS) på 500 m djup under havsnivån för de valda områdena. Man kan se att prov tagna från detta djup uppvisar stor variabilitet. Prov från kustnära områden som Äspö, Hästholmen, Olkiluoto, men även vissa prov från Finnsjön, uppvisar en högre salthalt än prov från inlandsområden. Intressant att notera är att Laxemar, som ligger



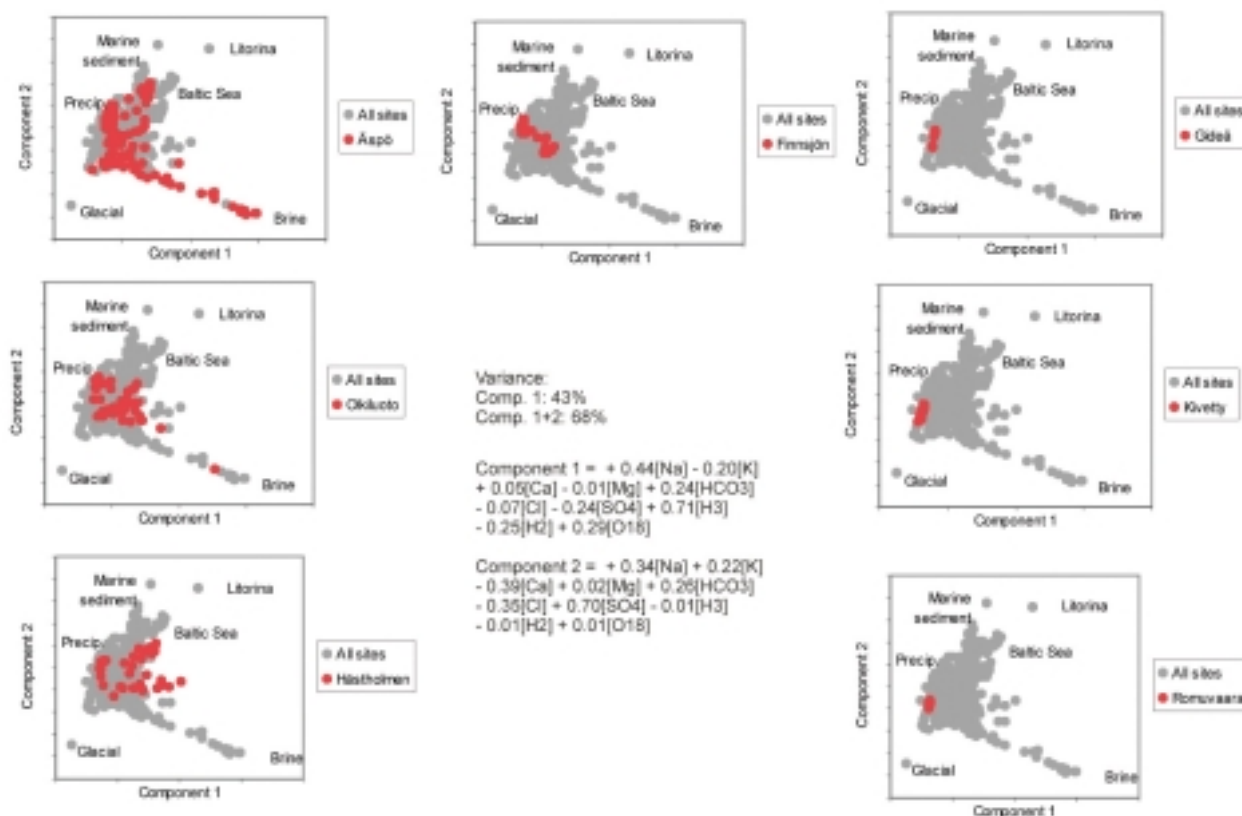
Figur 4-6. Salthalt (TDS) på 500 m djup under dagens havsnivå för prover från några utvalda svenska och finska områden (för orientering se figur 4-10). Man kan se att prover tagna från kustnära områden (t ex Olkiluoto, Åspö och Hästholmen) ofta har en högre salthalt än prover tagna från inlandsområden.

nära Åspö men på fastlandet, uppvisar en inlandskaraktär vilket indikerar att lokala topografiska/hydrogeologiska förhållanden kan ha en stor betydelse för grundvattnets salthalt (se vidare kapitel 5).

4.5 Att spåra grundvattnets ursprung

För att underlätta kvantifiering och objektivitet vid utvärdering av grundvattensammansättning använder SKB ett beräkningsprogram som analyserar uppmätta värden med s k multivariatanalys. Beräkningsprogrammet, som kallas M3 (Multivariate Mixing and Massbalance Calculations /Laaksoharju m fl, 1999a/), kan användas för att spåra grundvattnets ursprung, beräkna blandningsproportioner samt för att utföra massbalansberäkningar (resultatet av reaktioner med berget), även i sådana fall där grundvattendata annars är svårtolkade. Metoden har använts inom flera av SKB:s projekt, både nationellt och internationellt /Laaksoharju m fl, 1999b/.

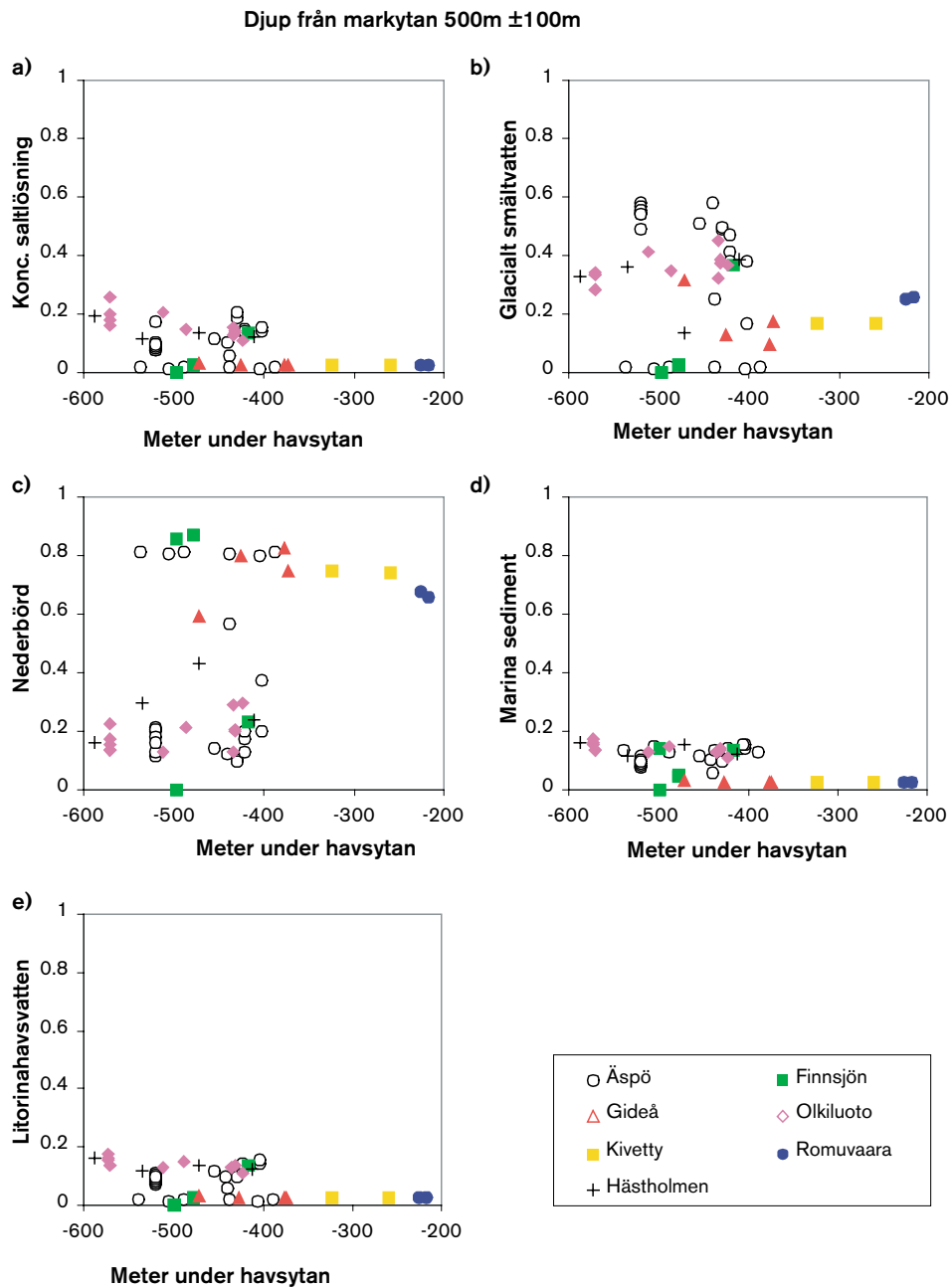
Exempel på resultat från den multivariata analysen med hjälp av M3-metoden visas som principalkomponentplottar i figur 4-7. Grundvatten från de svenska och finska områdena jämförs sinsemellan, men även i förhållande till extremvatten ("end-members"), såsom modellerad sammansättning för glacialt smältvatten, havsvatten från Litorina, uppmätta vattensammansättningar som nederbördsvatten, Östersjövatten eller koncentrerad saltlösning (brine) (för mer detaljerad information se /Laaksoharju m fl, 1999b/). Figur 4-7 indikerar att kustnära områden som Åspö, Olkiluoto och Hästholmen kan vara påverkade av flera olika extremvatten. Finnsjöområdet tycks vara ett område som håller på att förvandlas från en kustnära typ till en mera utpräglad inlandstyp och uppvisar därför endast påverkan från ett fåtal extremvatten. Inlandsområden som Gideå, Kivetty och Romuvaara tycks vara starkt påverkade av meteoriskt vatten (regn eller snö) och hamnar därför mellan referensvattnen för nederbörd och glacialt vatten i figur 4-7.



Figur 4-7. Principalkomponentplottar som visar vattensammansättningar från svenska och finska områden. Läget för olika extremvatten (referensvatten) är indikerade i plottarna. Ett vattenprov som till sin sammansättning liknar t ex ett regnvatten kommer att hamna nära referensvattnet för nederbörd, medan ett prov som innehåller inslag av havsvatten kommer att hamna nära Östersjövatten. Ju närmare ett prov hamnar ett referensvatten, desto större likheter i vattensammansättningen /figur från Puigdomenech, 2001/.

Resultatet av blandningsberäkningar med hjälp av M3 för prover från 500 ±100 m från de svenska och finska områdena som visas i figur 4-8. De kustnära områdena uppvisar ett tydligt inslag av äldre vattentyper, såsom koncentrerad saltlösning, glacialt vatten och Litorinahavsvatten, medan inlandsområden domineras av vatten av nederbördstyp. När det gäller kustnära områden talar mycket för att den urspolning som drivs av landhöjningen ännu inte har hunnit spola bort äldre vattentyper från berggrunden.

Det är viktigt att notera att även i ett område som har genomgått hydrodynamiska förändringar i samband med landhöjning kan ett grundvatten av nederbördstyp vara relativt gammalt och hydrokemiskt stabilt. Ett grundvatten av nederbördstyp kan därför mycket väl uppfylla de krav och önskemål som kan ställas när det gäller hydrokemiska förhållanden vid ett djupförvar (se vidare avsnitt 4.6).



Figur 4-8. Beräknade blandningsproportioner för olika vattentyper på förvarsdjupet 500 ±100 m för olika områden i Sverige och Finland. För att bättre kunna jämföra områdena anges djupet i förhållande till havsnivån. Blandningsproportioner <10 % är under M3-metodens detektionsgräns. Osäkerheterna för de angivna proportionerna är ±0,1 enhet /figur efter Puigdomenech, 2001/.

4.6 Processer av betydelse för grundvattnets sammansättning

De processer som påverkar grundvattenkemin mest i ett förvarsperspektiv på 100 000 år i granitisk berggrund är klimatet, flödet och vattnets reaktioner med berget. Framtida istider med inlandsis, landsänkning, isavsmältning, havsvattenstadier och landhöjning kommer att påverka grundvattnet på ett likartat sätt som visas i figur 4-1.

Det nederbördsvatten som bildar grundvatten kommer, beroende på rådande förhållanden, att infiltrera direkt i berget (berg i dagen) eller genom olika jordarter. Vattenkvaliteten hos det bildade grundvattnet kommer då att påverkas av flera olika faktorer, t ex mineralogin, mängden organiskt material och flödes hastigheten.

Mineralogin i jord och berg bestämmer vilka element som vattnet kan lösa upp. Mängden organiskt material bestämmer ofta i vilken omfattning och med vilken hastighet de biogena reaktionerna (mikrober fungerar som katalysatorer för flera reaktioner) sker /Pedersen och Ekendahl, 1990; Pedersen och Karlsson, 1995/. Dessa reaktioner förbrukar ofta syre. Vattnets surhet/alkalinitet (pH) och mängden löst syre (redoxförhållanden) bestämmer vilka element som löses upp, hålls i lösning eller faller ut. När flödes hastigheten och flödesriktningen förändras, som t ex vid ett tunnelbygge eller vid klimatförändringar, kan mängden och typen av reaktioner som sker påverkas av dessa yttre faktorer.

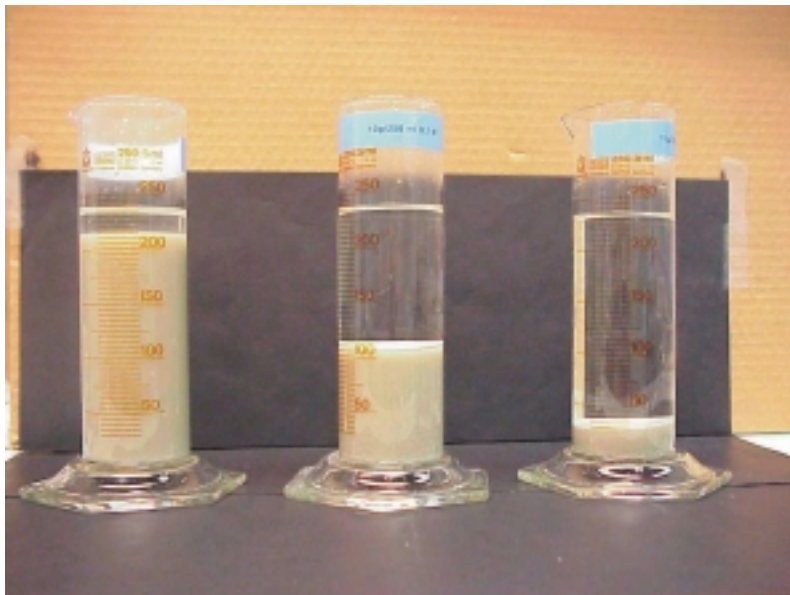
I samband med förvarsbyggnationen kommer tunneln att fungera som en hydraulisk sänka för området (se kapitel 6). Därmed kommer grundvattenflödet att förändras, vilket kan leda till att mera utspätt vatten från ytan och/eller mera salthaltigt vatten från djupet, kommer att dras in mot tunneln. Om detta sker kommer även grundvattnets kemiska sammansättning att förändras. När detta ”nya” vatten kommer i kontakt med mineralen i sprickzonerna kan det leda till att nya kemiska reaktioner initieras, t ex upplösnings- eller utfällningsreaktioner. Om vattenomsättningen ökar kan mer syrehaltigt och ytligt vatten komma ner i berggrunden där det kan oxidera järn, mangan eller sulfid som finns bundet i bergets sprickmineral. Ett mineral som reagerar relativt snabbt med syre är järnsulfid (pyrit, FeS_2). En oxidering av pyrit påverkar inte bara järnet utan medför också att sulfathalterna i vattnet ökar och pH sjunker. Vatten som kommer ner i berggrunden förlorar relativt snabbt sitt syre och blir därför reducerande även om vattenomsättningen är betydande.

Följande huvudreaktioner påverkar grundvattnets sammansättning:

- organiska/oorganiska redoxreaktioner,
- silikathydrolys,
- kalcitupplösning/-utfällning,
- jonbyte,
- metanogenes, och
- mikrobiell sulfatreduktion.

Dessa reaktioners omfattning i kombination med flödet styr om grundvattnen kommer att uppfylla SKB:s krav och önskemål när det gäller hydrokemiska förhållanden vid ett djupförvar. De krav som angetts är att grundvattnet ska vara fritt från löst syre och att TDS ska vara lägre än 100 g/l. Det är dessutom önskvärt att följande kriterier är uppfyllda: pH ligger inom intervallet 6–10, DOC < 20 mg/l, kolloider < 0,5 mg/l och (Ca+Mg) > 4 mg/l (se vidare kapitel 8 och /Andersson m fl, 2000/).

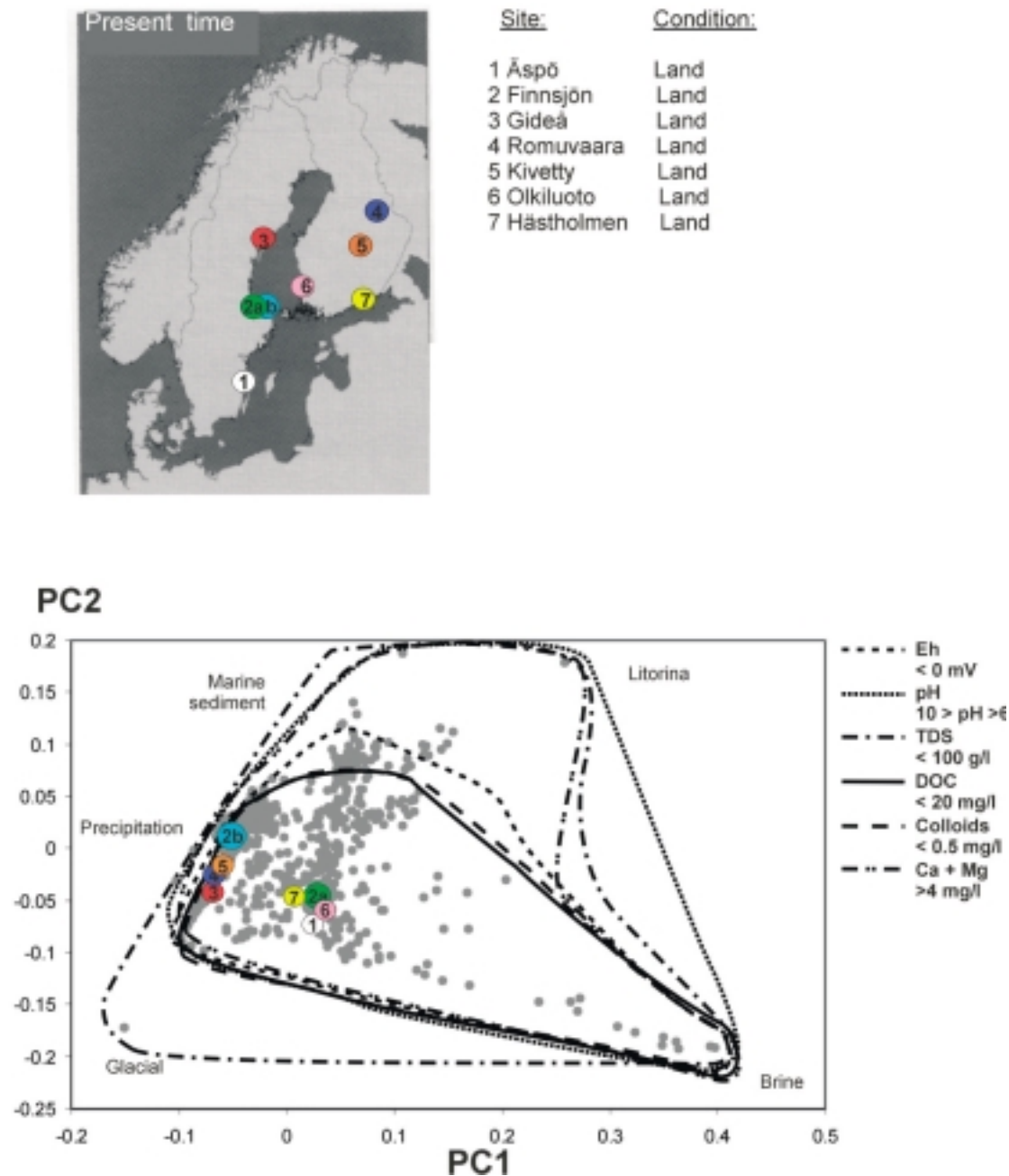
Grundvattnet kan innehålla små partiklar (10^{-3} till 10^{-6} mm) bestående av t ex lera, kisel och järn. Dessa kolloider har en potential att transportera radionuklider från förvarsdjupet upp till biosfären. Fältundersökningar har visat att kolloidhalten är salthaltsberoende på så sätt att en ökad salthalt minskar kolloidhalten i grundvatten /Laaksoharju m fl, 1995/. Laboratorieförsök utförda på lera i kontakt med olika koncentrerade saltlösningar visas i figur 4-9. Undersökningarna visar att salt grundvatten kan stabilisera och minska kolloidhalten och därför är risken för kolloidtransport mindre i salta grundvatten än i icke salta grundvatten.



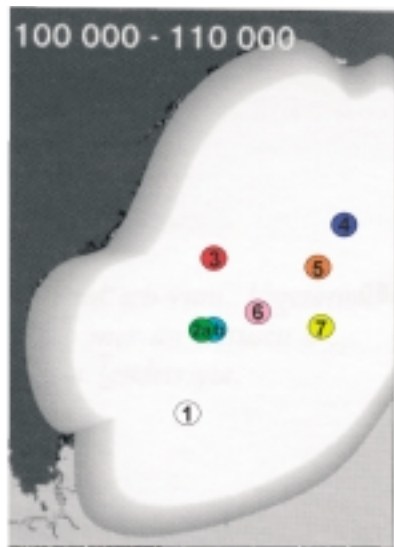
Figur 4-9. Vattnets salthalt påverkar kolloidbildningen vilket leder till sedimentering. Experimentet visar sedimenteringsgraden hos bentonitlera i lösningar med olika salthalt (från vänster till höger: 0,01, 0,1 och 1 M lösningar vid 20 °C och efter 1,5 vecka.

4.7 Framtida grundvattenkemiska förändringar

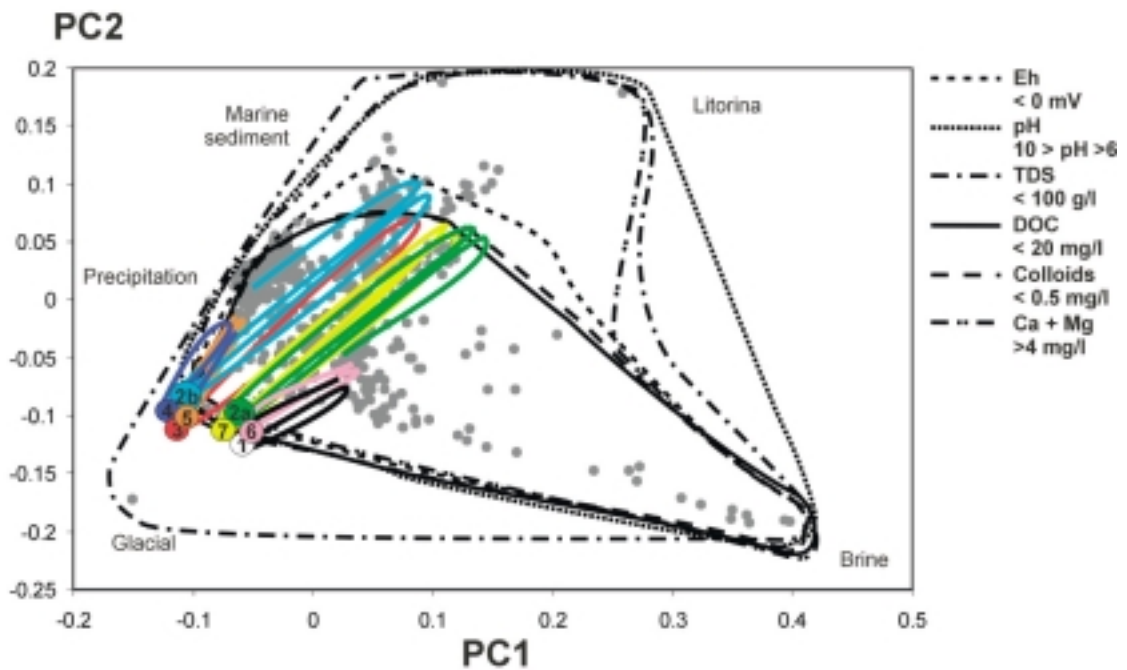
De flesta platser i Sverige kommer på lång sikt att genomgå förändringar av grundvattenkemin, oberoende om det i dagsläget är frågan om ett in- eller utströmningsområde. Grundvattensammansättningen kommer att påverkas av periodvis inblandning av meteorisk, glacialt och marint vatten. Platser belägna över den högsta kustlinjen kommer dock att vara starkast påverkade av meteoriskt och glacialt vatten. Möjliga stegvisa förändringar i vattensammansättningen på förvarsdjup i samband med förväntade klimatförändringar i ett 100 000 års perspektiv har simulerats /Puigdomenech, 2001/. Resultatet av simuleringarna visas i figur 4-10 och figur 4-11.



Figur 4-10. Sju platser i Sverige och Finland har modellerats med hjälp av Principalkomponentanalys. Proven från förvarsdjupet (ca 500 m) visar sammansättningen i dagsläget. När vattensammansättningen hamnar innanför linjerna i figuren uppfylls SKB:s kriterier för de grundvattenegenskaper som anges i figuren /från Puigdomenech, 2001/.



| Site: | Condition: |
|--------------|------------|
| 1 Äspö | Ice |
| 2 Finnsjön | Ice |
| 3 Gideå | Ice |
| 4 Romuvaara | Ice |
| 5 Kivetty | Ice |
| 6 Olkiluoto | Ice |
| 7 Hästholmen | Ice |



Figur 4-11. Sju platser i Sverige och Finland har modellerats med hjälp av Principalkomponentanalys. Proven från förvarsdjupet (ca 500 m) visar den modellerade sammansättningen 100 000–110 000 år framåt i tiden när inlandsisen håller på att smälta. De färgade linjerna visar fluktuationer i grundvattensammansättningen på grund av klimatförändringar under förvarets livstid. När vattensammansättningen hamnar innanför de svarta linjerna i plotten uppfylls SKB-kriterierna från Puigdomenech, 2001/.

4.8 Exempel på grundvattenundersökningar i ett utströmningsområde

Kunskap om flödesvägar och ytnära processer är väsentliga för förståelsen av in- och utströmningsområden, samt för förståelsen av transport av eventuella radionuklider från det djupa grundvattnet upp till biosfären. Vid en hydrogeokemisk modellering undersöktes om, och i så fall i vilken utsträckning, det förekommer något utbyte mellan djupt liggande, salt grundvatten och ytliga grundvattensystem i det kustnära området Laxemar. Modelleringsresultaten visade att undersökningsområdet vid Laxemar åtminstone delvis ligger i ett lokalt utströmningsområde, och det är därför möjligt att ha en transport av djupt grundvatten upp mot ytliga grundvattensystem. Totalt provtogs ett hundratal vattenprov från ytvatten eller ytligt grundvatten från sjöar, diken, källor, grävda/borrade brunnar och havsvatten. Dessutom användes prover från djupt grundvatten som provtagits inom andra SKB-projekt på Laxemar.

Resultatet från studien indikerar att reaktioner längs med flödesvägarna ofta förhindrar direkt transport av ämnen, vilket även gör att spåren av eventuellt uppåtflödande djupt grundvatten är svåra att detektera. Element som Cl, Ca, SO₄, Rb och Cs kan vara användbara spårämnen, även om endast en liten del har sitt ursprung från förvarsdjup. Provtagnings-, analys- och modelleringssvårigheter, tillsammans med möjliga störningar i flödesbilden från tunnelbygget vid Äspö, gör det svårt att dra några långtgående slutsatser. Någon entydig indikation på att djupt grundvatten transporteras upp till ytan från förvarsdjupet i ett utströmningsområde som Laxemar framkom inte i studien.

4.9 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från detta kapitel:

- Baserat på uppmätta grundvattendata kan man, trots att tillgången till data är bristfällig, konstatera att det finns indikationer på att salt grundvatten kan förekomma på förvarsdjupet 500 meter på många platser i Sverige, men sannolikheten för en hög salthalt är högre i områden nära kusten och i lågt belägna områden. Lokala topografiska/hydrogeologiska förhållanden har en stor betydelse för saltvattnets förekomst.
- Kustnära områden har tydliga inslag av äldre vattentyper, såsom koncentrerad saltlösning, glacialt vatten och Litorinahavsvatten, medan inlandsområden domineras av vatten av nederbördstyp. Detta beror på att urspolningen som drivs av landhöjningen har verkat längre i inlandet än vid kusten.
- Saltet i grundvattnet kan härröra från flera olika källor. Det kan vara frågan om att havsvatten har trängt ner i berggrunden, att havsvatten eller grundvatten i samband med glaciation eller permafrost har fryst och saltet koncentrerats, eller att mineral som innehåller saltinneslutningar vittrat sönder. Andra möjliga källor är salta lösningar från sedimentära bergarter (t ex Evaporiter) som har täckt berggrunden, eller salta lösningar som har transporteras upp från flera kilometers djup i samband med hydrotermal aktivitet.
- De processer som påverkar grundvattenkemin mest i ett förvarsperspektiv på 100 000 år i granitisk berggrund är klimatet och flödet samt reaktionerna i samverkan med berget.

- Reaktionernas omfattning i kombination med flödet styr om grundvattnen kan uppfylla SKB:s hydrokemiska kriterier, där kraven är att grundvattnet ska vara fritt från löst syre och att TDS < 100 g/l. Det är också önskvärt att följande kriterier är uppfyllda: pH ligger inom intervallet 6–10, DOC < 20 mg/l, kolloider < 0,5 mg/l och (Ca+Mg) > 4 mg/l.
- Kolloidhalten i grundvatten är salthaltsberoende på så sätt att en ökad salthalt minskar kolloidhalten, vilket kan leda till en minskad risk för kolloidtransport av radionuklider från förvarsdjupet till biosfären.
- Utförd klimatmodellering för de kommande 100 000 åren indikerar att de flesta platser kommer att genomgå förändringar av vattenkemin, oberoende om det är frågan om ett in- eller utströmningsområde i dagsläget. Vattensammansättningen på förvarsdjupet kommer att influeras av periodvis inblandning av saltvatten i samband med landsänkning och bildning av inlandsis, glacialt vatten i samband med isavsmältningen, marint vatten om området täcks av havsvatten och meteoriskt vatten i samband med landhöjningen. Platser belägna över den högsta kustlinjen kommer dock mest att påverkas av meteoriskt och glacialt vatten.
- Utförda provtagningar och simuleringar i kustnära utströmningsområden har inte gett någon entydig indikation på att djupvatten eller enskilda element transporteras från förvarsdjupet upp till biosfären.

Det går inte att från kemisk synpunkt säga om det finns några direkta fördelar eller nackdelar med placering av djupförvaret i ett inströmningsområde jämfört med ett utströmningsområde. Om stora och plötsliga flödesförändringar skulle inträffa i samband med klimatförändringar kan man tänka sig att ett inströmningsområde är mera känsligt för dessa förändringar, och detta kan resultera i att några av SKB:s hydrokemiska kriterier inte uppfylls under en del av förvarstiden. Under förvarets livslängd kommer de flesta platser att utsättas för sådana klimatförändringar och topografiförändringar, vilket gör att de flesta platser kommer att fungera både som in- och utströmningsområden under olika tidsperioder av förvarets livslängd.

5 Förvarsplaceringens betydelse för flödesvägar till markytan

I detta kapitel beskrivs förvarsplaceringens betydelse för flödesvägarna från ett djupförvar. Detta görs utifrån flödesvägarnas egenskaper i termer av längd och transporttid från ett djupförvar på omkring 500 m djup upp till ytan.

Kapitlet är upplagt som följer: I avsnitt 5.1 ges en problemformulering och allmän bakgrund till frågeställningar rörande förvarsplaceringens betydelse. Avsnitt 5.2 och 5.3 behandlar nyligen genomförda modellberäkningar rörande norra Uppland respektive Östra Götaland. Slutsatser presenteras i avsnitt 5.4.

5.1 Inledning

Förvarsplatsens geografiska läge och dess geologiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska egenskaper har betydelse för ett djupförvar på flera olika sätt. I detta kapitel diskuteras betydelsen av förvarsplatsens placering enbart utifrån två enskilda hydrogeologiska faktorer, nämligen flödesvägarnas längd och advektiv transporttid längs med flödesvägarna (i fortsättningen av detta avsnitt används enbart termen transporttid då advektiv transporttid åsyftas). Flödesvägar från ett hypotetiskt djupförvar på omkring 500 m djup till ytan betraktas i analysen. Det är viktigt att påpeka att även andra hydrogeologiska faktorer är av intresse för att bedöma en förvarsplats lämplighet. Två sådana faktorer, klart viktigare än transporttid och längd, är grundvattnets sammansättning (med avseende på löst syre) och det s k transportmotståndet (F-faktor) längs med en flödesväg. Det är i huvudsak transportmotståndet som bestämmer en radionuklids verkliga uppehållstid i geosfären; transporttiden (gångtiden) är en mer hypotetisk storhet som uttrycker uppehållstiden för en enskild vattenmolekyl som inte samverkar med sin omgivning (dvs inte utsätts för fysikalisk/kemiska mekanismer såsom diffusion och olika retentionsprocesser). Anledningen till att vi här enbart analyserar flödesvägarnas längd och transporttid är att dessa storheter diskuterats i tidigare studier som inspirerat föreliggande rapport /bl a Tóth och Sheng, 1996; Voss och Provost, 2001/.

Flödesvägarnas längd (och delvis transporttid) beror på om ett djupförvar befinner sig i ett inströmnings- eller utströmningsområde. Förläggs djupförvaret i ett inströmningsområde kan vi förvänta oss längre flödesvägar, medan en placering i ett utströmningsområde per definition ger kortare flödesvägar (se vidare kapitel 3).

Tidigare studier som behandlat in- och utströmningsfrågor är främst /Tóth, 1963/ vars insatser beträffande topografins betydelse för grundvattnets cirkulationsmönster numera tillhör en av de klassiska referenserna inom hydrogeologin. /Tóth, 1963/ visar att det är förhållandet mellan den regionala och de lokala gradienterna som bestämmer flödescellernas utbredning och djup. /Zijl, 1999/ vidareutvecklar denna analys och visar hur man kvantitativt kan bestämma djupet för flödesceller som en funktion av den hydrauliska konduktivitetens anisotropi och den rumsliga variationen i grundvattenytans läge (dvs gradientens variation). /Tóth och Sheng, 1996/ utnyttjar teorin för cirkulationsmönster för att argumentera för att djupförvar bör placeras i inströmningsområden snarare än i utströmningsområden. Denna argumentering förs vidare för en specifik

plats, Östra Götaland, i /Voss och Provost, 2001/. Här tas även hänsyn till densitetsdriven strömning. Effekterna av kombinerad topografisk och densitetsdriven strömning för relevanta svenska förhållanden har studerats av /Voss och Andersson, 1993/. De visar att grundvattenströmningen under pågående landhöjning inte påverkas nämnvärt av saltet i de översta skikten (några få kilometer), samt att förekomsten av lokala gradienter och sprickzoner resulterar i ett komplext strömningsmönster.

Baserat på slutsatserna i /Voss och Provost, 2001/ kan ett kustnära förvar framstå som mindre lämpligt jämfört med ett förvar med inlandsäge. Resultaten i /Voss och Provost, 2001/ är dock inte entydiga och kan ifrågasättas på flera punkter (se avsnitt 5.2 och främst 5.3 nedan). För att ytterligare utreda frågan kring in- och utströmningsområden har SKB genomfört två separata modelleringsstudier; en över norra Uppland /Holmén m fl, in prep/ och en över Östra Götaland /Follin och Svensson, in prep/.

Syftet med dessa numeriska studier har varit att undersöka förutsättningarna för uppkomsten av lokala flödesceller. Lokala flödesceller påverkar in- och utströmningsmönstret och har därmed även relevans för ett djupförvars placering. Studierna är plats-specifika till sin natur såtillvida att tillgänglig data tagits från de två regioner som är av intresse för SKB:s platsundersökningar. Detta innebär bl a att topografi, kustlinje samt kända geologiska förhållanden från norra Uppland respektive Östra Götaland använts i studierna. I Nordupplandsstudien har emellertid stor frihet tillåtits för att studera inverkan av generella förhållanden. Exempelvis studeras inverkan av ytterligare sprickzoner, annan topografi, och/eller ytvattendrags utbredning på mönstret för in- och utströmningsområden. Även effekten av såväl modellspecifika som generella numeriska frågeställningar, t ex upplösning, har analyserats. I Östra Götalandsstudien har de generella resultaten från Nordupplandsstudien omsatts platsspecifikt för Östra Götaland. Här har också en detaljerad jämförelse gjorts med den modellering som presenterades i /Voss och Provost, 2001/.

I föreliggande studie har olika beräkningsverktyg använts inom platserna (GEOAN och NAMMU för Norduppland), samt mellan platserna (GEOAN och NAMMU för Norduppland respektive DarcyTools för Östra Götaland). För att undanröja farhågor för att observerade skillnader beror på skillnader i verktyg snarare än på faktiska fysikaliska skillnader, har jämförande simuleringar genomförts med de olika verktygen. Dessa beskrivs kort i avsnitt 5.2 och 5.3 nedan.

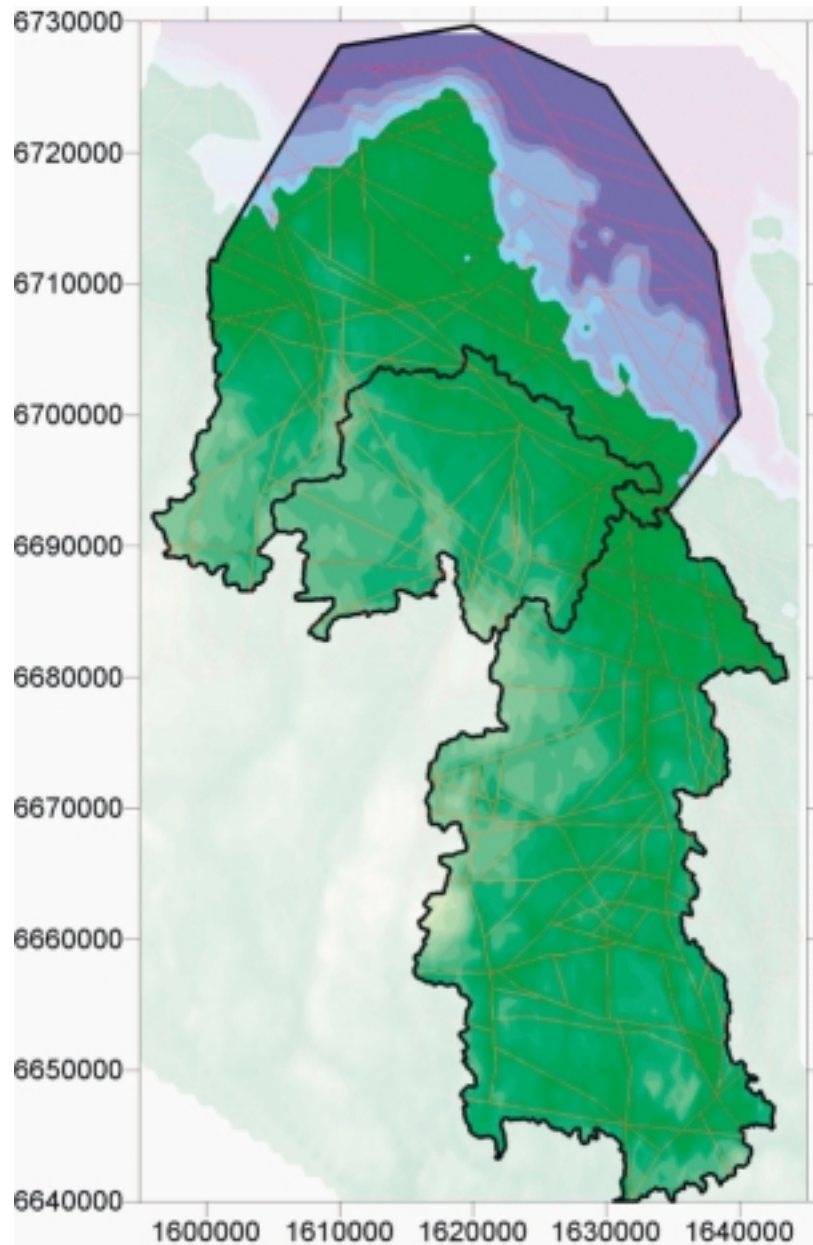
5.2 Norduppland

5.2.1 Modellbeskrivning

Områdesbeskrivning

Ett område i Norduppland, ca 90 km × 50 km, har modellerats och rapporterats i /Holmén m fl, in prep/. Jämfört med tidigare modelleringar på regional skala som SKB utfört, t ex regionalmodelleringar inom SR 97 /SKB, 1999a/, så kan den aktuella modelleringen benämnas superregional. Syftet har varit att modellera ett område som är så stort att ett eller flera fullständiga avrinningsområden inkluderas i modellen.

Det aktuella området sträcker sig från Östersjö-kusten vid Forsmark mot Dalälven i väster och Fyrisån i söder (se figur 5-1). Finnsjöområdet, en av tre platser som analyserades i SR 97, ingår i det modellerade området. Områdets topografi samt ytvattendelare inom området framgår av figur 5-1. Det modellerade området är flackt med en högsta

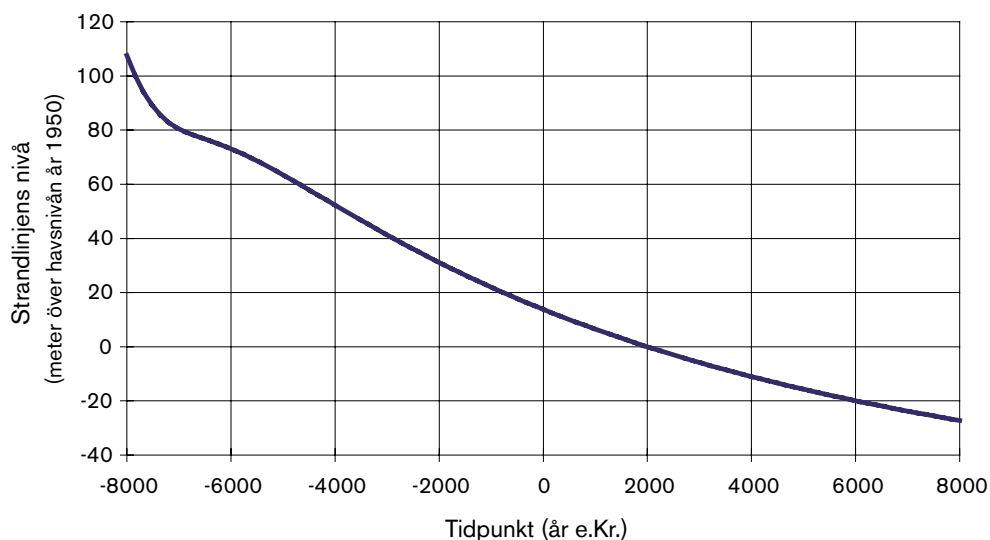


Figur 5-1. Topografi, ytvattendelare och regionala sprickzoner i modelleringsområdet i Norduppland. Linjer i orange färg visar zonernas horisontella utbredning.

höjd över havet på ca 70 m, och ett största havsdjup på ca 20 m. Den resulterande regionala gradienten mot havet bedöms vara 0,17 %. De yttre ränderna av ytvattendelarna skapar det område som ingår i den numeriska modellen.

Regionala sprickzoner har uppskattats från lineamentdata från SGU /SKB, 2002/. Zonerna, som framgår av figur 5-1, har modellerats som rent vertikala. Det kan noteras att de flesta sprickzoner ligger i lågområden inom modelleringsområdet.

Den potentiella grundvattenbildningen har uppskattats från ytvattenavrinningen och är 250 mm/år /Lindell m fl, 1999/. På grund av strandlinjeförskjutning är grundvattenströmningen i det modellerade området inte i jämvikt. Strandlinjeförskjutningen, som är den sammanslagna effekten av landhöjning och ändring av havsnivån, har beräknats med hjälp av metodik beskriven i /Pässe, 1996/ och visas i figur 5-2.



Figur 5-2. Strandlinjeförskjutning för Forsmarksområdet, framtagen med hjälp av metodik beskriven i /Påsse, 1996/.

Den hydrauliska konduktiviteten inom området har uppskattats till 5×10^{-9} m/s för bergmassan mellan regionala sprickzoner, och till 8×10^{-7} m/s för de regionala sprickzonerna (med en antagen bredd om 30 m). Dessa värden har använts i den numeriska modellen (se nedan) tillsammans med ett antaget uniformt värde för flödesporositeten på 0,001. För transienta förhållanden har storativiteten ansatts till 5×10^{-6} m⁻¹.

Numeriska modeller

Det ovan beskrivna modellområdet har modellerats numeriskt med en kontinuumansats. Två olika koder har använts, GEOAN /Holmén, 1997/ och NAMMU /Cliffe m fl, 1998/. NAMMU har använts för de fall som inkluderar densitetsdriven strömning, medan GEOAN använts för övriga fall. Jämförande studier mellan koderna presenteras nedan. I /Holmén m fl, in prep/ finns koderna beskrivna mer detaljerat.

För GEOAN-simuleringarna har i basfallet en upplösning om 330 m × 330 m i planet använts. Även grövre upplösning har analyserats. I vertikalled varierar elementstorleken mellan 50 m och 240 m med sammanlagt 11 lager. Det totala djupet på modellen är 1100 m. Även modeller med större djup och fler lager har analyserats.

Nollflödesrandvillkor har ansatts på modellens botten och längs dess vertikala ränder. Motivet för detta randvillkor på modellens sidor är att dessa sammanfaller med identifierade ytvattendelare. På modellens överyta har givet tryck ansatts för att representera havsytan, medan ett transient randvillkor har ansatts över land. Detta randvillkor resulterar i att infiltrationen beräknas av modellen för varje tidssteg, samt att även in- och utströmningsområden beräknas fram av modellen. För ytterligare detaljer hänvisas till /Holmén m fl, in prep/. För det transienta sötvattenfallet har det antagits att hela modellen är under havsvattennivån vid simuleringens början år 4000 f Kr (figur 5-2), så att det initiala tryckrandvillkoret ges av havsvattennivån.

Då densitetsdriven strömning analyserats med koden NAMMU /Cliffe m fl, 1998/ har samma domän och upplösning använts som för sötvattenfallen analyserade med GEOAN. Dock har ett modelldjup på 2000 m ansatts för att kunna analysera inverkan av salt på djupare nivåer. De översta nio lagren överensstämmer exakt med GEOAN-modellen, men sedan har 11 ytterligare lager lagts till. Randvillkoren är de samma som för sötvattenfallet; för saltet specificeras en saltkoncentration initialt vid 4000 år f Kr då hela modellen är vattenfylld (hela området är under vatten). Denna salthalt är satt till Litorinahavets koncentration som ger en densitet av 1009,4 kg/m³. Den enda saltkällan i modellen är den marina kontakten. Tryckrandvillkoret på den övre ytan skiljer sig också något åt mellan modellerna; i NAMMU har konstant tryck använts på hela ytan (topografiskt tryck över land, vattentryck för områden under strandlinjen). I praktiken torde denna skillnad inte ha några större konsekvenser för resultaten; för en ytterligare diskussion, se /Holmén m fl, in prep/. Simuleringarna i NAMMU har genomförts för en period på 11 000 år, från 4000 f Kr till 7000 e Kr.

5.2.2 Analyserade varianter

/Holmén m fl, in prep/ visar att ökande modellkomplexitet kan leda till dramatiska skillnader i resultat. Detta illustreras genom att först simulera en mycket enkel modell där topografin enbart ges av ett lutande plan, och modellens hydrauliska konduktivitet är homogen och isotrop. Utifrån denna enkla beskrivning ökas komplexiteten genom att först beskriva topografin med sin verkliga undulering (dvs lokala toppar och dalar beskrivs som en krusning på det lutande planet). Därefter införs en heterogen hydraulisk konduktivitet genom att lägga till deterministiska sprickzoner. Slutligen läggs sjöar och täta lerlager till på modellens yta. Dessa beräkningar görs som sötvattenssimuleringar i jämvikt. Till sist görs transienta beräkningar både för söt- och saltvattenfall. Viktigt i samtliga dessa simuleringar är att ha en så god numerisk upplösning (diskretisering) så att modellen kan återskapa de fenomen som man vill studera. Effekten av en för dålig upplösning exemplifieras i studien.

Nedan ges en kort lista av samtliga fall som analyserats:

- Fall 1: Homogen bergmassa, topografi given av lutande plan.
- Fall 2: Homogen bergmassa, undulerande topografi.
- Fall 2B: Homogen bergmassa, undulerande topografi, samt modeller med olika cellstorlek i horisontalplanet.
- Fall 2C: Homogen bergmassa, undulerande topografi, samt modeller med olika djup.
- Fall 3: Homogen bergmassa med regionala vertikala sprickzoner, samt undulerande topografi.
- Fall 4: Homogen bergmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi, samt sjöar.
- Fall 5: Homogen bergmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi, sjöar, samt en kontinuerlig horisontell zon vid ett djup av 250 m.
- Fall 6: Homogen bergmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi, sjöar, samt ett diskontinuerligt lerlager.

- Fall 7: Homogen bergsmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi. Topografin är förstärkt genom att öka de lokala topografiska gradienterna.
- Fall 8: Homogen bergsmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi. Topografin är förstärkt genom att öka den regionala topografiska gradienten.
- Fall 9: Homogen bergsmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi. Transient strömning.
- Fall 10: Homogen bergsmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi. Transient densitetsdriven strömning.
- Fall 11: Homogen bergsmassa med regionala vertikala sprickzoner, undulerande topografi, samt en kontinuerlig horisontell zon vid ett djup av 250 m. Transient densitetsdriven strömning.

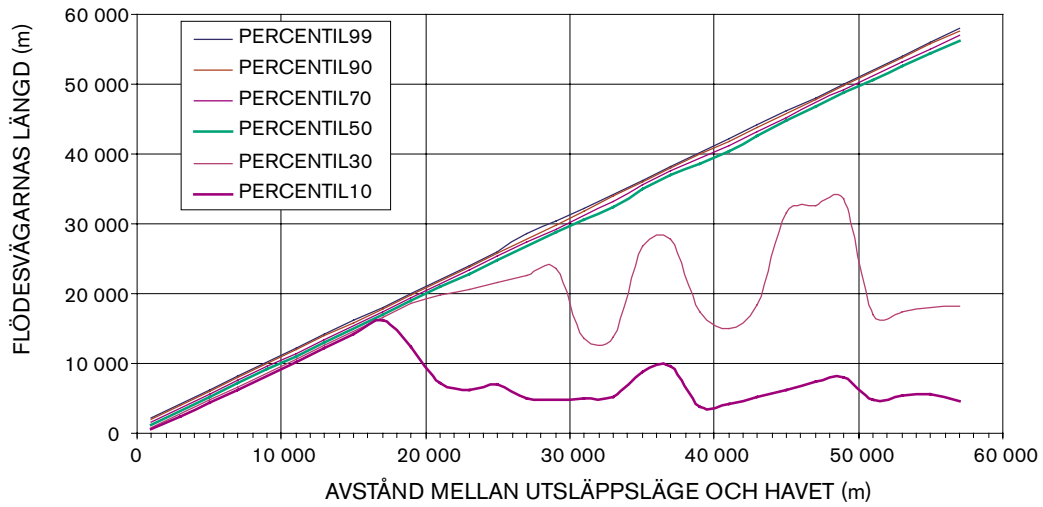
För varje fall beräknas det resulterande flödesfältet. Vidare beräknas flödesvägarna genom s k partikelspårning, dvs genom att numeriskt följa hur en tänkt partikel strömmar i det beräknade hastighetsfältet. Partiklarna släpps vid förvarsdjup, i de aktuella simuleringarna mellan 490 och 540 m under markytan, över hela domänen. Dock släpps partiklar inte under havet, om inte annat anges i fortsättningen. För samtliga partiklar beräknas resulterande flödesvägars längd och transporttid till modellens ränder. Givet de ansatta randvillkoren sker utströmning på modellens övre yta.

5.2.3 Resultat

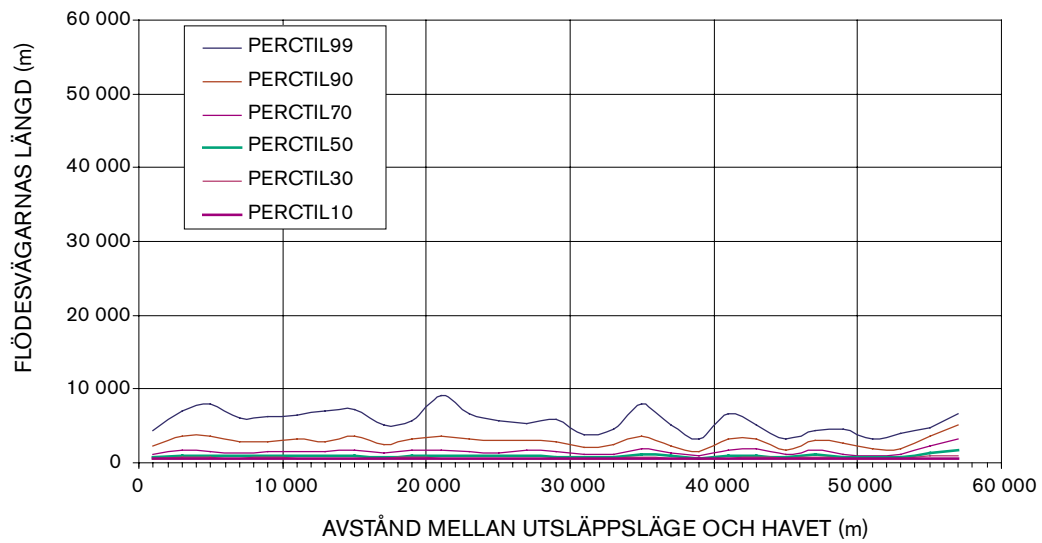
När områdets topografi beskrivs som ett lutande plan sker utströmning från typiska förvarspositioner främst vid kusten. Detta innebär att ju längre in i landet ett förvar ligger, desto längre blir både flödeslängder och gångtider från förvar till biosfär. I figur 5-3 visas resulterande flödeslängd som funktion av avståndet mellan strandlinjen och en partikels startposition. När topografin beskrivs som ett lutande plan är flödeslängden i princip lika lång som avståndet mellan kust och startposition (figur 5-3a); om en partikel släpps t ex 40 km från kusten, så är den resulterande flödeslängden 40 km. Detta innebär att partikeln strömmar ut vid kustlinjen. Som framgår av figuren gäller detta för ca 70 % av partiklarna; för resterande 30 % sker utströmning på ett avstånd som är kortare än avståndet till havet. Detta innebär i praktiken att dessa 30 % strömmar upp till ytan innan de nått kusten.

När den lokala topografin inkluderas i modellen fås ett helt annat resultat (figur 5-3b). Samtliga partiklar (99 %) har en flödeslängd kortare än 10 km, oberoende av startposition. Detta innebär att partiklarna tenderar att nå ytan nära sin startposition, dvs in- och utströmningsområden ligger nära varandra. Denna bild bekräftas även då strömningsmönstret studeras i mer detalj (se figur 5-4). Här syns ett tydligt uppåtriktat strömningsmönster som resulterar i att de flesta partiklarna når biosfären i närheten av sin startposition. Utströmning (då startpositioner på förvarsdjup betraktas) sker med andra ord över hela domänen, och inte längre enbart i strandzonen som var fallet då den lokala topografin inte beaktades. Strömningsfältet domineras av lokala flödesceller.

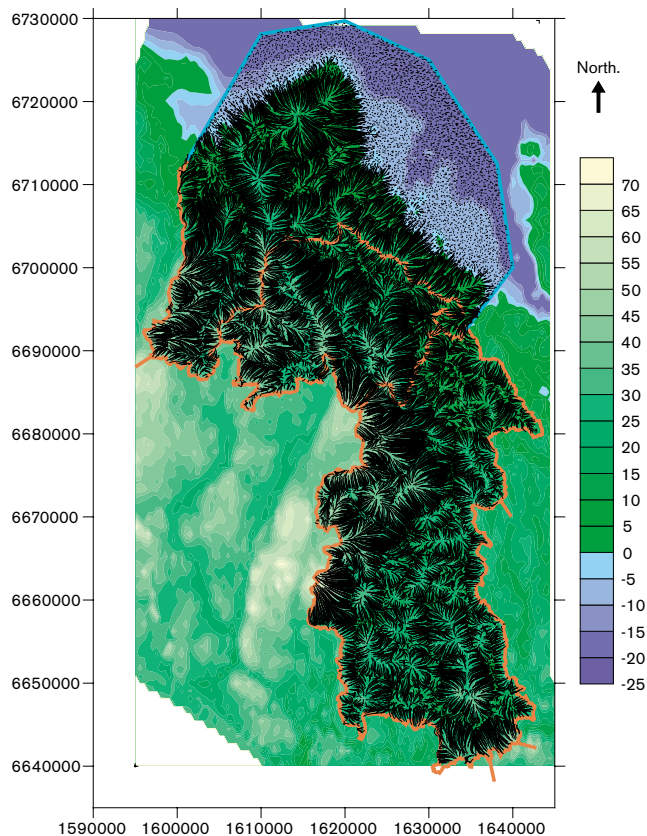
a) FLÖDESVÄGARNAS LÄNGD SOM FUNKTION AV AVSTÅND MELLAN UTSLÄPPSLÄGE OCH HAVET
 Topografin definierad som ett lutande plan. Cell storlek= 330m. Modelldjup= 1100m
 Flödesvägar från djup mellan 490m och 540m, inga startpunkter under havet



b) FLÖDESVÄGARNAS LÄNGD SOM FUNKTION AV AVSTÅND MELLAN UTSLÄPPSLÄGE OCH HAVET
 Verklig topografi inkluderad. Cell storlek= 330m. Modelldjup= 1100m
 Flödesvägar från djup mellan 490m och 540m, inga startpunkter under havet



Figur 5-3. Flödesvägarnas längd som funktion av avstånd mellan utsläppsläge och havet vid simuleringar där a) topografin är beskriven som ett lutande plan, och b) verklig topografi är inkluderad.

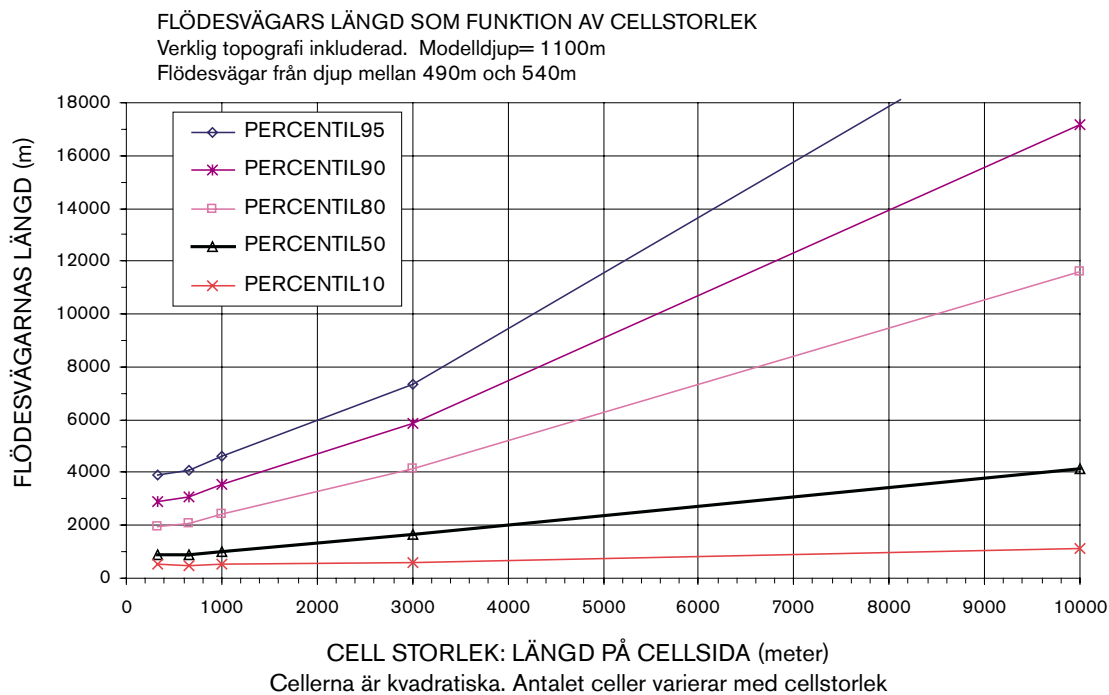


Figur 5-4. Flödesvägar från förvarsdjup (en flödesväg per element i lagret vid förvarsdjup, resulterande i ca 21 000 flödesvägar).

För att erhålla resultaten ovan för fallet med lokal topografi är det viktigt att ha en upplösning som kan lösa upp lokala toppar och sänkor i terrängen. Detta tydliggörs i figur 5-5 där effekten av olika upplösning visas. Figuren visar flödeslängd som funktion av horisontell elementstorlek; som tydligt framgår så ökar speciellt de längsta flödesbanorna (80, 90 och 95 percentilerna) dramatiskt då cellstorleken överstiger 3000 m. En hög upplösning är sålunda av yttersta vikt för att korrekt kunna återskapa de lokala strömningsmönster som framgår i figur 5-4. Bristande rumslig upplösning kan därför vara en bidragande orsak till att vissa tidigare studier uppvisat långa strömningsvägar från inlandslokaliseringar av ett djupförvar, dvs att de inte har haft tillräcklig upplösning för att reproducera de lokala in- och utströmningsmönster som förmodligen dominerar typiska grundvattenflödessituationer i svensk kristallin berggrund.

Genom utförda känslighetsstudier får man en än tydligare bild av topografins betydelse för utvecklingen av lokala strömningsmönster. Om den regionala gradienten ökas, dvs de lokala fluktuationerna blir relativt sett mindre, så konvergerar resultaten för flödeslängder mot fallet med ett lutande plan. På motsvarande sätt förstärks bildandet av lokala strömningsmönster om de lokala gradienterna förstärks (dvs lokala höjder och sänkor förstärks medan den regionala gradienten är oförändrad). För båda dessa fall minskar dock transporttiderna eftersom gradienterna, och därmed hastigheterna, ökar.

Övriga analyserade icke-transienta sötvattenfall ger inga större förändringar i resultat. För fallet med vertikala sprickzoner förklaras detta av att dessa typiskt ligger längs med lågpunkter i terrängen. Utströmningsmönstret påverkas helt enkelt inte speciellt mycket av denna ökade modellkomplexitet. Motsvarande argumentation kan föras för fallet där sjöar inkluderas i modellen. Då en kontinuerlig horisontell zon inkluderas i modellen

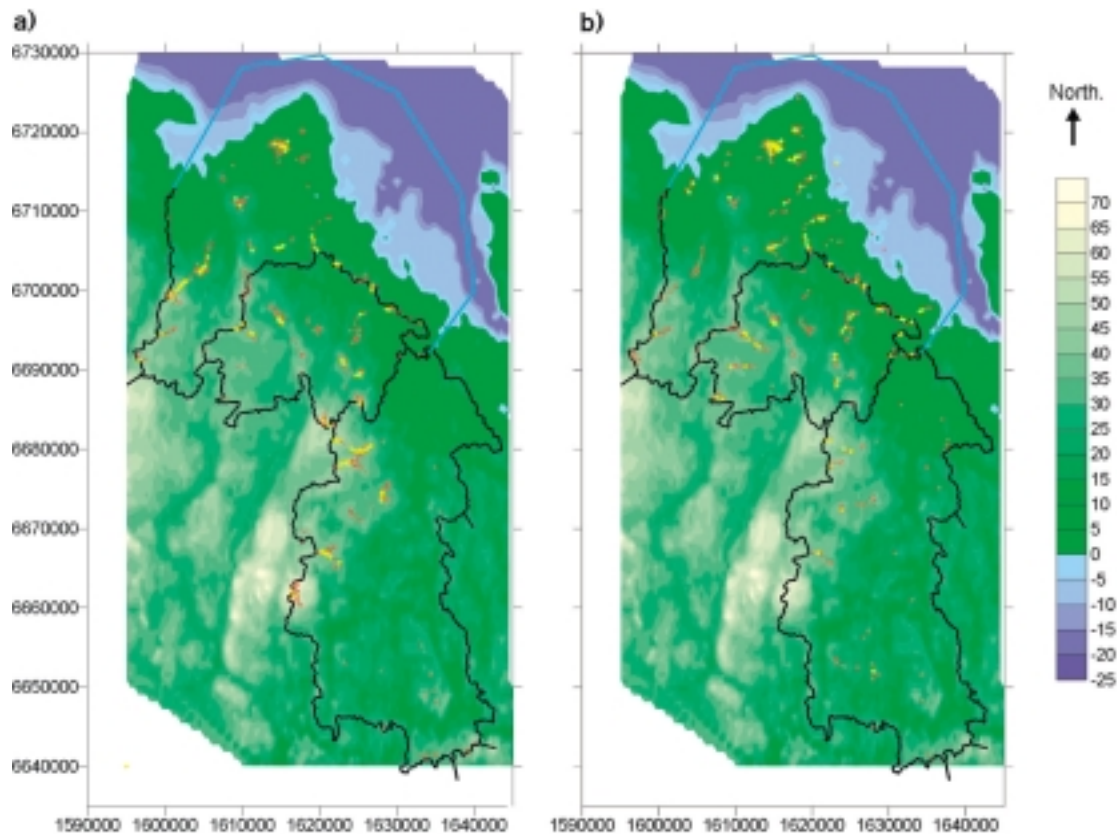


Figur 5-5. Flödesvägarnas längd som funktion av cellstorlek (endast upplösning i horisontalld skiljer sig åt mellan modellerna).

tenderar både flödeslängderna och transporttiderna att bli längre. Detta förklaras med att den horisontella zonen fungerar som ett permeabelt lager i flödesriktningen så att flödesbanorna går längs med zonen och därmed förlängs. Även för fallet med ett diskontinuerligt lerlager förlängs både flödesvägarnas längd och transporttid. Detta beror på att områden med lera effektivt stoppar utströmning vilket resulterar i omvägar för partikelbanorna.

Känslighetsanalyser har även utförts med modeller med större djup än 1100 m. Då flödesbanornas längd och gångtider betraktas framkommer att enbart de längsta flödesbanorna (ca 10 %) påverkas av att modellens vertikala dimension ökas. Detta beror på att dessa flödesbanor tenderar att gå än djupare. Skillnaderna är dock små även i detta fall. Vidare är det inte heller klart att en sötvattenmodell med större djup utgör en bättre representation av verkligheten än den relativt grunda modellen med ett djup på 1100 m. Anledningen till att ett djup på 1100 m valts beror på att salinitetseffekter blir viktiga på större djup. I den aktuella modellen antas saltsprångskiktet fungera mer eller mindre som ett "golv" och det kan därför modelleras med nollflödesrandvillkor. Detta antagande har undersökts mer i detalj med saltvattensimuleringar (se nedan).

För samtliga analyserade fall, förutom fallet med topografin representerad som ett lutande plan, kan flera olika positioner med partiklar som har lång gångväg och/eller lång gångtid (relativt sett övriga partiklar) hittas i modellen. Förklaringen till detta är förekomsten av lokala flödesceller med få partiklar som transporteras längre sträckor. Märkbare skillnader mellan de olika fallen förekommer inte. I figur 5-6 visas vilka förvarspositioner som har längst transporttid och längd på flödesvägar för fallet med homogen bergmassa och undulerande topografi. Intressant att notera är att de flesta positionerna med de längsta tiderna är belägna vid kusten. Detta beror på de låga strömningshastigheterna under havet. Positionerna med de längsta flödesbanorna ligger längre uppströms. För båda fallen gäller dock att goda positioner kan hittas praktiskt taget över hela domänen.

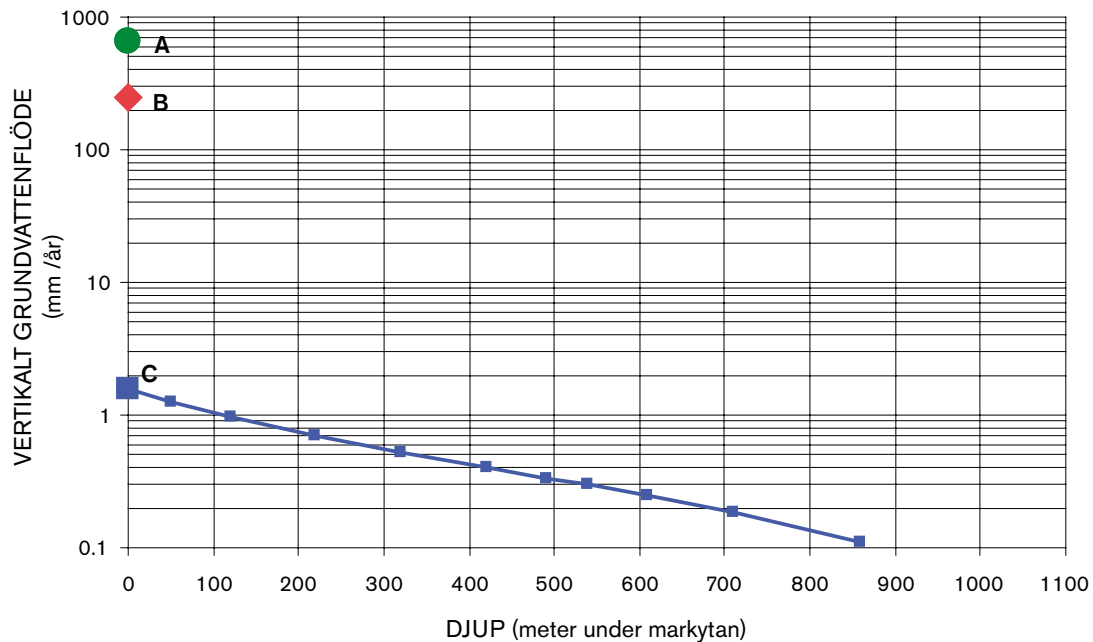


Figur 5-6. De 500 (röda punkter) samt 100 (gula punkter) förvarspositioner som har a) längst transporttider, och b) längst transportvägar för fallet med homogen bergmassa och undulerande topografi.

Då man betraktar betydelsen av in- och utströmningsområden för ett djupförvar är det också av intresse att belysa hur mycket av det totala grundvattenflödet som når ett visst djup av berggrunden. Av den nederbörd som faller över ett område är det bara en del som infiltrerar och bildar grundvatten. Av denna del är det bara en mindre del som når det intakta berget; den övriga andelen av vattnet strömmar i de ytliga avlagringarna. Vidare avtar flödet med djupet i det intakta berget, dvs ett successivt mindre flöde observeras ju längre ned i berget betraktelsen görs. I figur 5-7 exemplifieras detta med resultat från den numeriska modellen där den vertikala komponenten av grundvattenflödet visas som funktion av djupet. Figuren representerar fallet med sjöar och diskontinuerliga lerlager på ytan, alltså det fall som har de mest realistiska ytegenskaperna. Som framgår av figuren är det bara en liten andel av den potentiella infiltrationen (B) som *de facto* infiltrerar i berggrunden (C). På ca 500 m djup är grundvattenflödet mindre än 20 % av flödet in i berggrunden. Om man ser på det vertikala flödet på förvarsdjup som andel av nederbörden, är det bara 0,05 % av vattnet som når detta djup. Detta ger en tydlig bild av hur litet flödet på förvarsdjup i genomsnitt är. Bergets heterogenitet resulterar dock naturligtvis i lokala variationer i flödesmagnitud.

Alla resultat ovan gäller för en flödessituation i jämvikt med strandlinjeförskjutningen. Mätningar vid SFR /Hagconsult, 1982/ indikerar att flödet eventuellt fortfarande är transient. För att studera effekten av detta har en simuleringsperiod med längden 9000 år använts, från 4000 f Kr (då hela området var under vatten) till 5000 e Kr. Två tidpunkter har studerats i detalj: 2000 e Kr, dvs dagens situation, och 5000 e Kr. Det går inte att hitta några dramatiska skillnader mellan dessa två fall och jämviktsfallen. Om

VERTIKALT GRUNDVATTENFLÖDE I BERGMASSAN SOM FUNKTION AV DJUPET
 Massbalans över en yta. Nedåtriktat och uppåtriktat flöde är lika stort
 Model C2N1TF

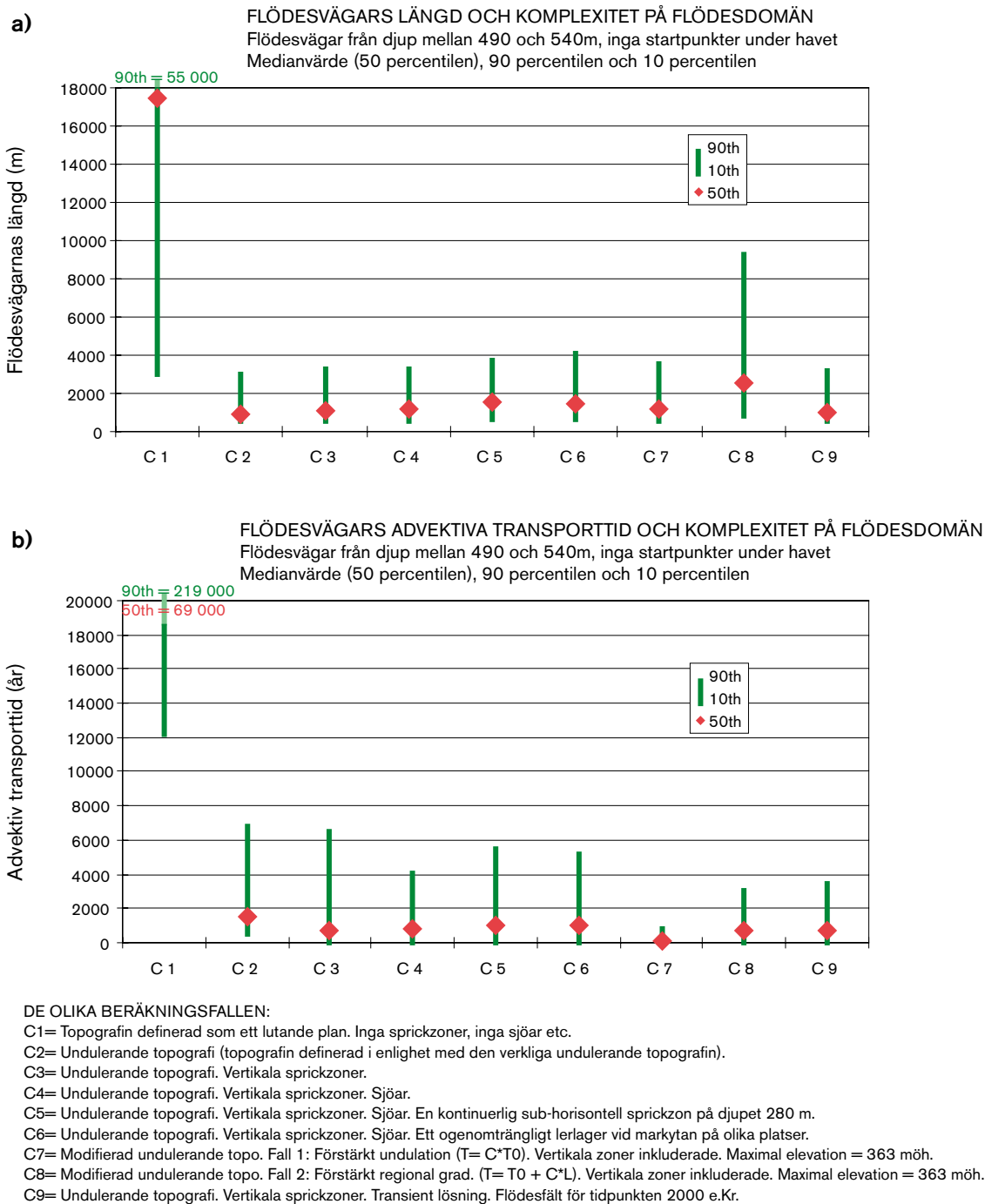


Figur 5-7. Vertikalt grundvattenflöde som funktion av djupet. "A" representerar nederbörden (650 mm/år). "B" representerar ytavrinningen, vilken är lika med den potentiella grundvattenbildningen (250 mm/år), medan "C" representerar den faktiska mängd som infiltrerar in i berggrunden i modellen (1,6 mm/år). Den blå linjen representerar den vertikala komponenten av grundvattenflödet.

man jämför fallet 2000 e Kr med motsvarande jämviktsfall noteras att både flödesvägarnas längd och transporttider är något kortare för fallet 2000 e Kr. Vidare konstateras att de kustnära positioner som i jämviktsfallen identifierades som goda förvarspositioner tenderar att försvinna. Detta beror på att de hydrauliska gradienterna är större för den transienta situationen, och detta märks särskilt vid kustlinjen. De större gradienterna resulterar i högre flödes hastigheter och därmed kortare transporttider. Dock bör det påpekas att den transienta situationen i verkligheten är starkt kopplad till förekomsten av salint vatten. Simuleringar utan salt kan alltså inte förväntas ge en fullständig bild av den aktuella situationen.

Då en situation tretusen år framåt i tiden, dvs 5000 e Kr, betraktas, konstateras att flödesbanornas längd och transporttider åter ökar. Detta beror på att partiklar enbart släpps under det område som inte var vattentäckt vid dagens situation, dvs ett sådant område som är tänkt för ett förvar. Om tretusen år har havet dragit sig tillbaka så mycket att dessa positioner beter sig som inlandspositioner. Slutsatsen av detta är att då det transienta fallet betraktas, så blir på sikt transporttiderna långa även för förvarspositioner som idag ligger nära kusten.

I figur 5-8 presenteras median och percentiler för flödesvägarnas längd och transporttid för samtliga sötvattenfall.

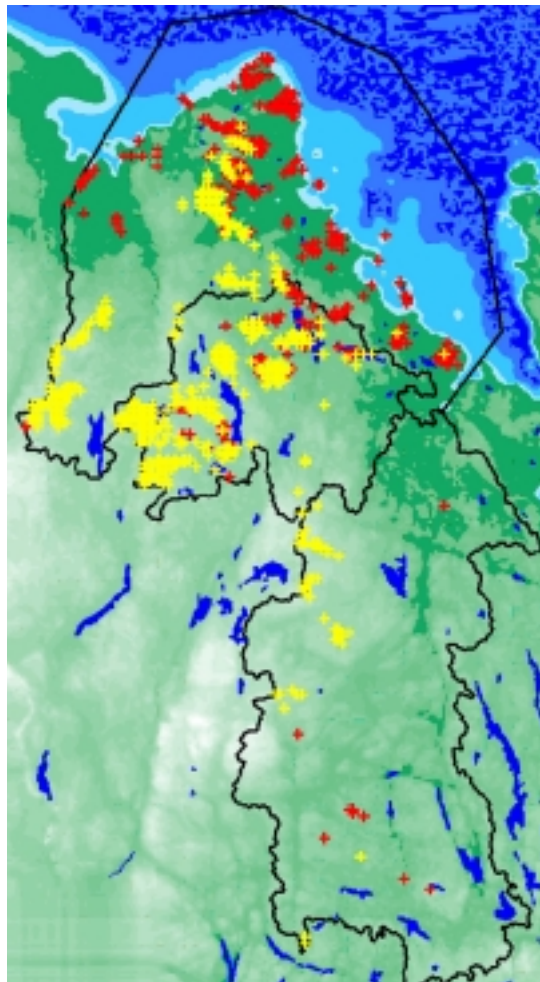


Figur 5-8. Flödesvägarnas a) längd och b) transporttid för de olika fallen med ökande komplexitet.

Då densitetsdriven strömning inkorporeras i analysen sker enbart mindre förändringar med avseende på de studerade storheterna. Generellt indikerar resultaten att saltvattenfallen resulterar i något längre flödesbanor och transporttider än motsvarande transienta sötvattenfall. Vid jämförelse av medianvärdet för flödesbanornas längd konstateras att denna ökat med en faktor 1,5 (från 1188 till 1826 meter) och att medianvärdet för transporttiden ökat med en faktor 1,2 (från 1738 till 2148 år). Även om flödesbanorna är något längre för det salina fallet så är fortfarande flödesmönstret kontrollerat av lokala flödesceller med begränsad utsträckning i rummet. De längsta flödesbanorna är ca 10 km långa.

För det salina fallet sker vidare en viss omfördelning av förvarslägena med de längsta flödesvägarna och transporttiderna jämfört med sötvattenfallen (se figur 5-9). I det salina fallet blir det en något högre koncentration av sådana förvarspositioner i domänens nordvästra del. Dock stämmer det generella mönstret överens med sötvattenfallen, dvs att förvarspositioner med långa flödesvägar och transporttider i princip kan hittas i hela området.

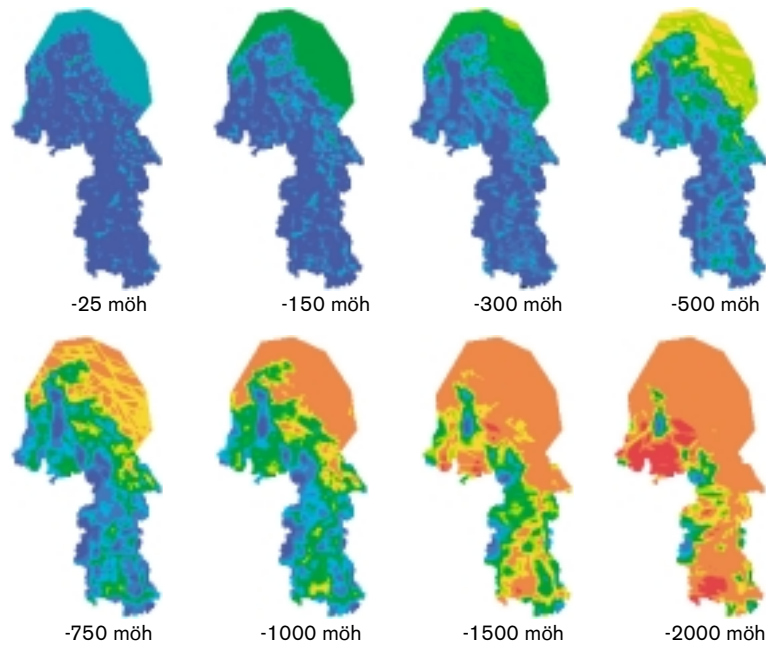
För fallet med en kontinuerlig horisontell zon på 250 med samma egenskaper som de vertikala zonerna blir både gångtider och flödesbanor något längre. Detta är i överensstämmelse med motsvarande sötvattenfall.



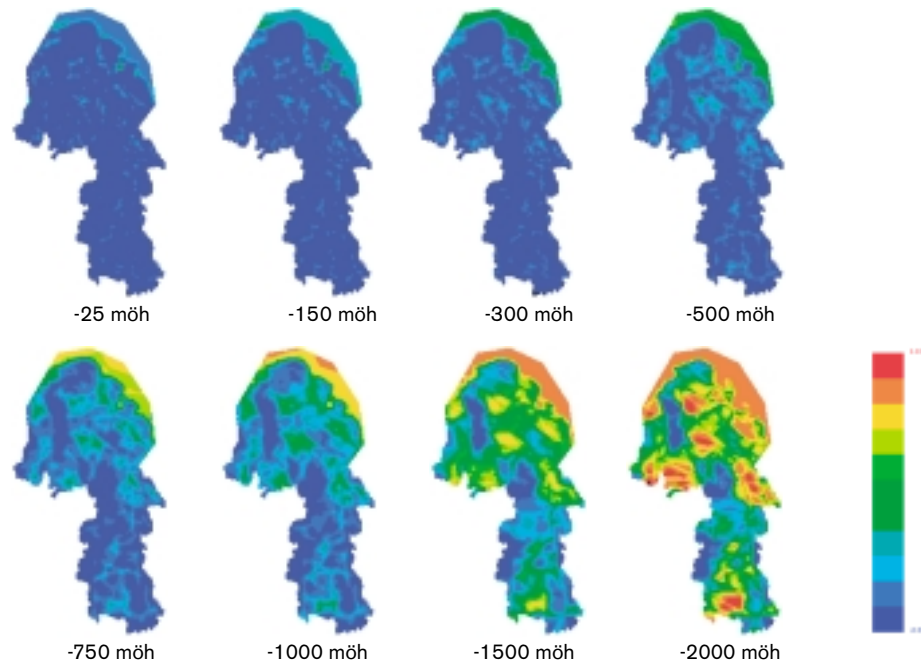
Figur 5-9. De förvarsplatser i modelleringsområdet som ger de 500 längsta flödesvägarna (gula punkter) samt 500 längsta transporttiderna (röda punkter) för tidpunkten 2000 år e Kr.

De intressantaste resultaten från simuleringarna med densitetsdriven strömning är relaterade till saltets utbredning i domänen vid olika tidpunkter. I figur 5-10 visas den modellerade salthalten vid olika djup idag och om 5000 år. Som framgår av figurerna ökar salthalten generellt i vertikalled mot djupet och i horisontalled mot kusten. Vidare kan man se att salthalten minskar med tiden, dvs att saltet sköljs ut från domänen. Vid år 7000 e Kr är det mesta av saltet beläget mer än 1000 meter under havet. Smärre lokala variationer i saltutbredning kan dock ses i figurerna beroende på inverkan av de mer högerpermeabla sprickzonerna.

a) År 2000 e.Kr.



a) År 7000 e.Kr.



Figur 5-10. Saltkoncentration som funktion av djupet för tidpunkterna a) 2000 e Kr och b) 7000 e Kr. Koncentrationen varierar från 0 (blått) till 1 (rött).

Höga salthalter vid ett djupförvar kan vara problematiskt på flera sätt (se kap 7). Figur 5-10 visar att salthalterna generellt är högre nära kusten. Med tiden kommer dock salthalten att sjunka även vid ett idag kustnära förvar, allteftersom strandlinjeförskjutningen fortgår och saltet sköljs ut ur berggrunden.

För att säkerställa att resultaten ovan inte är kods specifika genomfördes en jämförande studie mellan GEOAN och NAMMU för ett sötvattenfall med homogent flödesmedium och undulerande topografi. Detta fall valdes för att det är förhållandevis enkelt, samtidigt som det inkorporerar den fysikaliska mekanism som funnits vara av störst betydelse för utvecklandet av lokala flödesceller, dvs en korrekt beskriven topografi.

De flödesmönster som modellerna producerar är mycket snarlika. Dock skiljer sig resultaten åt när det gäller flödesbanornas längd och transporttid. NAMMU predikterar både längre flödesbanor (faktor 1,15 för medianvärdet) och transporttider (faktor 1,30 för medianvärdet). Skillnaden för övriga percentiler (5, 25, 75, 95) är av samma storleksordning. Dessa skillnader är små jämfört med övriga osäkerheter i modellerna, men bör hållas i åtanke då resultat mellan NAMMU och GEOAN jämförs. Det finns dock inte någon anledning att ifrågasätta de övergripande resultat som presenterats ovan givet de små skillnader som observerats i den jämförande studien.

5.3 Östra Götaland

Syftet med Östra Götalandsstudien har delvis varit ett annat än för Nordupplandsstudien. Medan Nordupplandsstudien på ett systematiskt sätt analyserar effekten av successivt ökande komplexitet, så exemplifierar Östra Götalandsstudien snarare denna vunna kunskap på ett specifikt fall. Specifikt har man i Östra Götalandsstudien /Follin och Svensson, in prep/ försökt visa hur resultaten i SKI-rapporten av /Voss och Provost, 2001/ är beroende av den valda upplösningen.

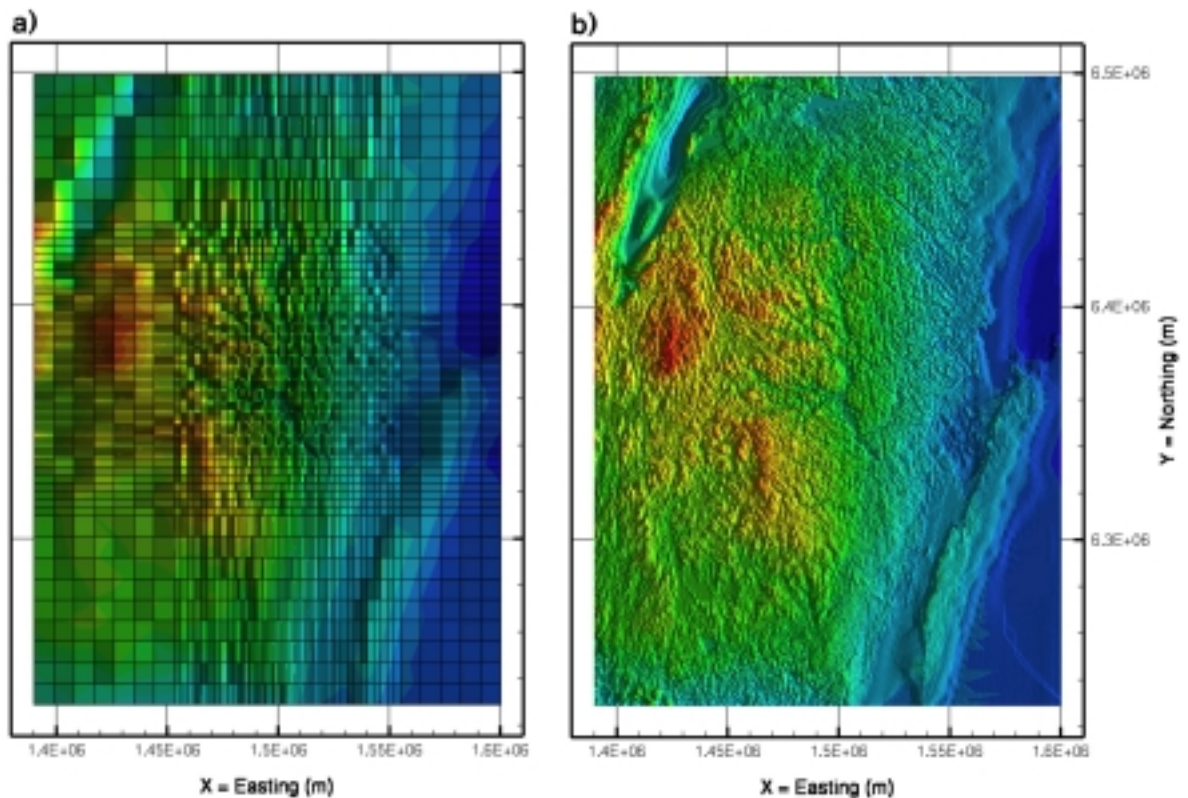
SKI:s kritik av SKB:s val av områden för platsundersökningar grundar sig bl a på den grundvattenflödesmodellering som genomfördes av /Voss och Provost, 2001/. /Voss och Provost, 2001/ menar att långa flödesvägar mellan ett djupförvar och biosfären är eftersträvansvärt och endast kan uppnås om förvaret förläggs långt från kusten. Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun är i detta sammanhang att betrakta som mycket kustnära, ett faktum som i hög grad även gäller Forsmarksområdet i Östhammars kommun. Enligt Voss och Provost är ett område i Hultsfreds kommun, Hultsfred östra, mycket lämpligare för ett djupförvar ur denna aspekt än Simpevarps-området. Ett ännu lämpligare område än Hultsfred östra är enligt Voss och Provost den högsta punkten på småländska höglandet. Området ifråga kallas i Voss och Provosts modellstudie "the Comparison Site".

Voss och Provost modellerar grundvattnets strömning över ett område som täcker hela Östra Götaland ned till 10 km djup. Voss och Provost studerar inte specifikt topografins betydelse för flödesvägarnas längd i Östra Götaland i sin analys, utan fokuserar på inverkan av en riktningsberoende genomsläpplighet hos berggrunden (hydraulisk anisotropi). I analysen utgår de från att den valda modellens numeriska upplösning av topografien är tillräcklig för de slutsatser som dras.

Som beskrivits ovan för Norduppland visar /Holmén m fl, in prep/ att den lokala topografin är den enskilt viktigaste faktorn för strömningsmönstret på förvarsnivå bland de faktorer som studeras. De känslighetsstudier som utförts visar att man måste återge den lokala topografin med tillräcklig noggrannhet vid numerisk flödesmodellering för att flödesvägarna ska bli riktiga. Vidare konstateras att om den regionala topografiska gradienten ökar relativt de lokala gradienterna, minskar betydelsen av de senare, ett förhållande som också konstaterades av /Tóth, 1963/.

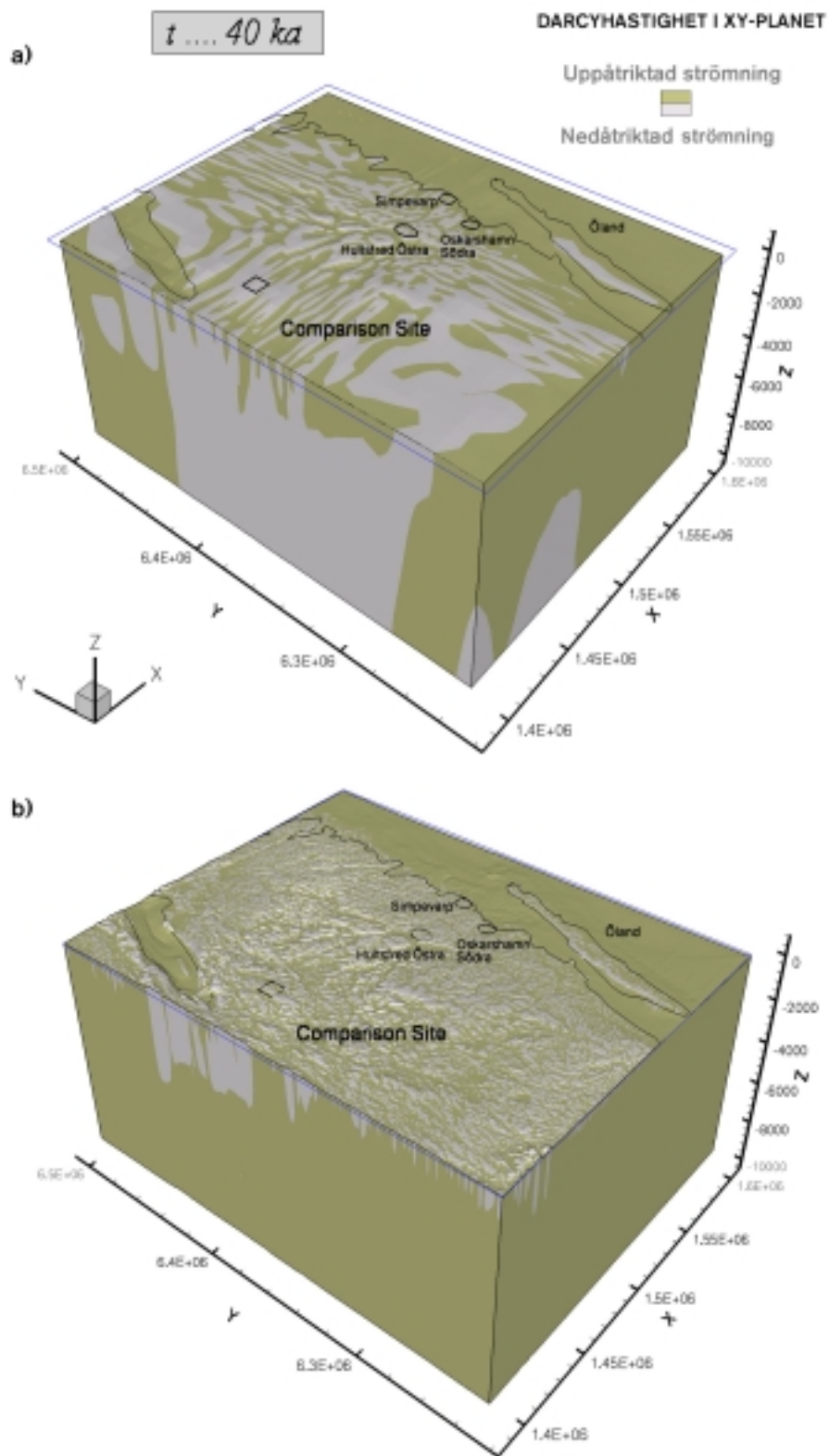
Den maximala regionala topografiska gradienten är mer än dubbelt så stor i Östra Götaland som i Norduppland, ca 0,35 % att jämföra med ca 0,17 %. I syfte att pröva om slutsatserna från studien över Norduppland även gäller för förhållandena i Östra Götaland har man i Östra Götalandsstudien /Follin och Svensson, in prep/ gjort en rekonstruktion av Voss och Provosts modell för fallet där de horisontella och vertikala hydrauliska konduktiviteterna är lika ($K_h:K_v = 1$). Målet för Östra Götalandsstudien har således inte varit att kontrollera Voss och Provosts slutsatser beträffande hydraulisk anisotropi, utan endast att undersöka om den lokala topografin i Östra Götaland påverkar de slutsatser som dras av Voss och Provost. I Östra Götalandsstudien konstateras att de lokala gradienterna i Östra Götaland är i medeltal ca 10–20 gånger större än den regionala gradienten /Follin och Svensson, in prep/. I analysen används två olika upplösningar; dels samma upplösning som i /Voss och Provost, 2001/, dels en som är ca 70 gånger högre. Vidare används konventionell partikelspårning istället för ”return flow time”-metoden som använts i /Voss och Provost, 2001/.

Strömningsberäkningarna i /Voss och Provost, 2001/ omfattar ett mycket stort modellområde, 210 km × 270 km × 10 km. Vidare ingår densitetsdriven strömning. För att klara det uppställda syftet har man i /Follin och Svensson, in prep/ använt sig av modellverktyget DarcyTools /Svensson, 2002/, som löser tryck- och saltfälten fullt kopplat. Upplösningen i Voss och Provosts modell varierar mellan 1500–9000 m i horisontalplanet och mellan 250–1000 m i djupled, vilket ger ca 70 000 celler i 3D (se figur 5-11). Med 500 m i horisontalplanet och 30–1000 m i djupled, som är den högre upplösning som tillämpats i Östra Götalandsstudien, ökar modelldomänens upplösning ca 70 gånger till ca 5 miljoner celler (se figur 5-11). LMV:s höjddatabas med upplösningen 500 m för modellområdet visas också i figuren.



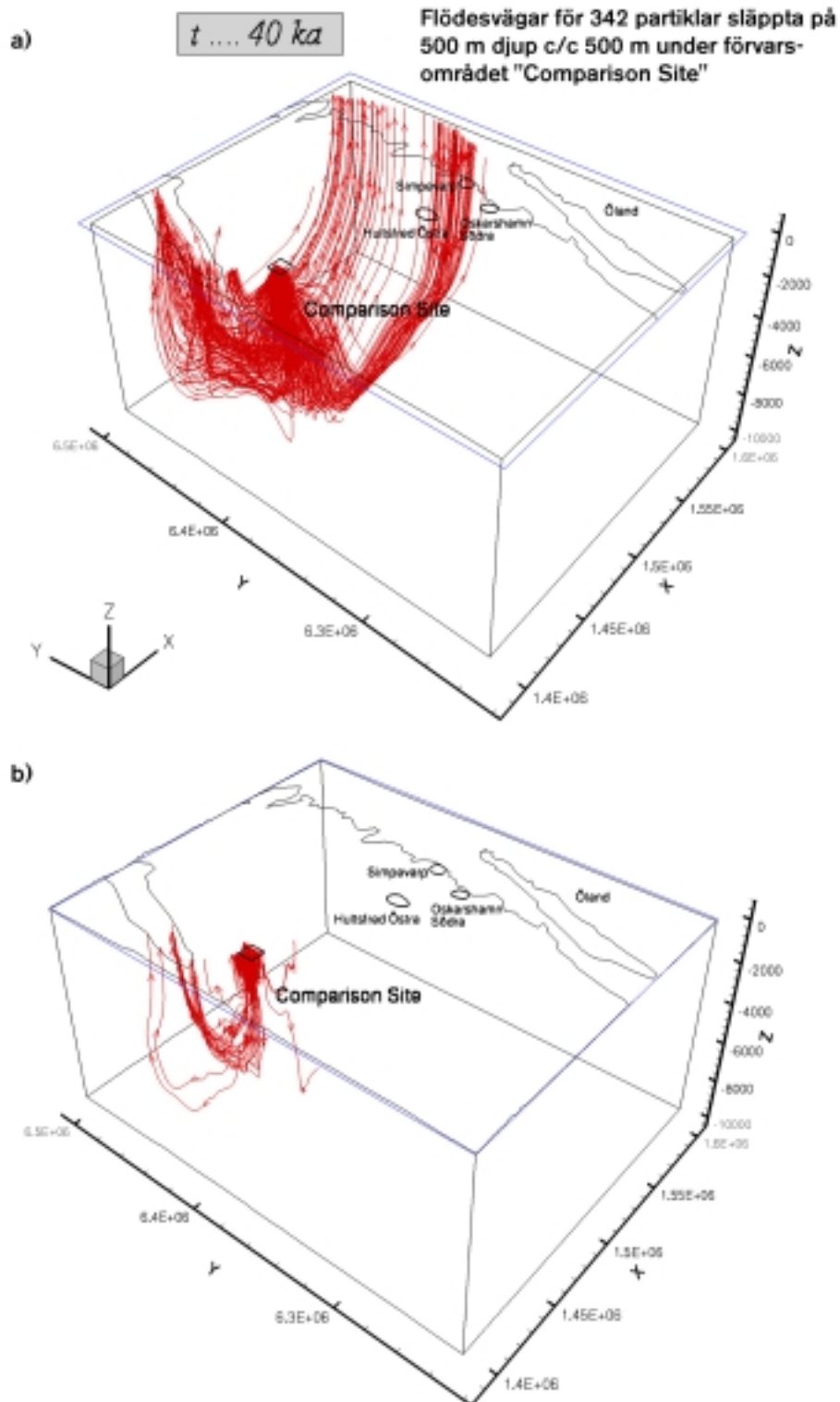
Figur 5-11. Östra Götalandsmodellen med a) den upplösning som användes i /Voss och Provost, 2001), och b) den finare (bättre) upplösning som användes i /Follin och Svensson, in prep/. Även topografien är indikerad med låg respektive bättre upplösning i figurerna.

Betydelsen av en hög upplösning för möjligheten att återge den lokala topografins betydelse för förekomsten av in- och utströmningsområden analyseras utförligt i /Follin och Svensson, in prep/. I figur 5-12 till figur 5-14 illustreras några av de viktigaste resultaten. I figur 5-12 visas hastighetsfältets vertikalkomponent med en binär färgskala – grönt för utströmning och vitt för inströmning. Som framgår kan inte den lägre upplösningen återge den mosaikliknande bild av in- och utströmning som erhålls med den högre upplösningen. Det är viktigt att notera att den högre upplösningen inte bara inverkar på antalet nya flödesceller utan även på flödesvägarnas djupgående.



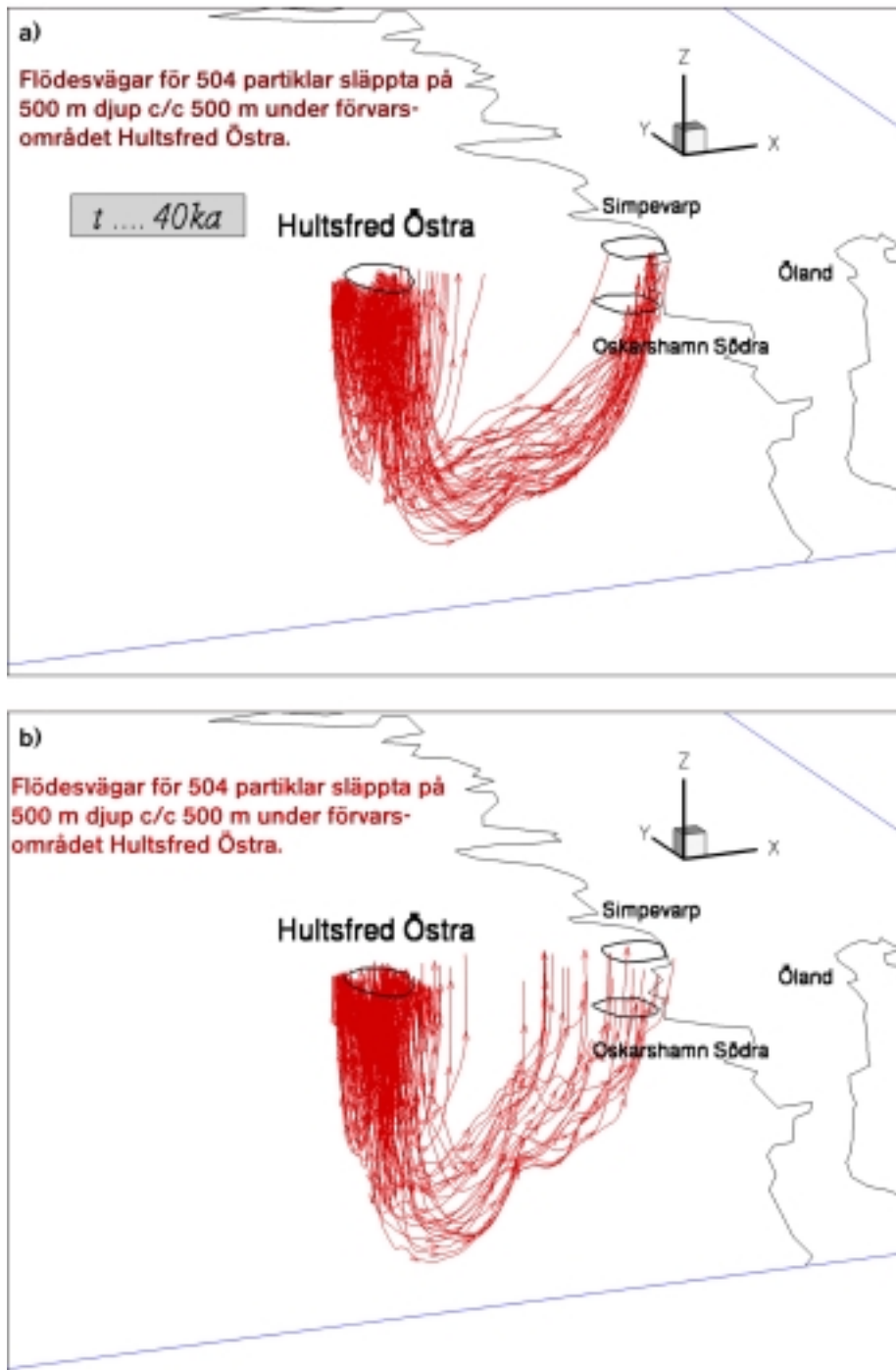
Figur 5-12. Hastighetsfältets vertikalkomponent för modellen med a) låg upplösning, och b) hög upplösning (grönt för utströmning, vitt för inströmning).

I figur 5-13 visas resultat från partikelspårning då partiklarna släpps på 500 meters djup i det område som i /Voss och Provost, 2001/ kallas "the Comparison Site", dvs högsta punkten på småländska höglandet. Skillnaden mellan låg och hög upplösning är påtaglig. Resultatet för den lägre upplösningen stämmer väl överens med de resultat som redovisas i /Voss och Provost, 2001/.



Figur 5-13. Resultande flödesvägar från förvarsområde "Comparison Site" för modellen med a) låg upplösning, och b) hög upplösning.

I figur 5-14 visas resultat från partikelspårning då partiklarna släpps på 500 meters djup i det område som i Voss och Provosts studie kallas Hultsfred östra. I båda dessa figurer kommer ca 90 % av partiklarna fram i närheten av utsläppsområdet, med en något högre andel för den högre upplösningen. I detta fall föreligger vissa skillnader gentemot de resultat som redovisas i /Voss och Provost, 2001/.



Figur 5-14. Resultande flödesvägar från förvarsområde "Hultsfreds östra" för modellen med a) låg upplösning, och b) hög upplösning.

Man kan konstatera att den lägre upplösningen i figur 5-12a, figur 5-13a och figur 5-14a inte förmår återge den lokala topografins betydelse för strömningsmönstret. Skillnaderna mellan hög och låg upplösning är inte desamma för Hultsfred östra (figur 5-14) som för "the Comparison site" (figur 5-13); detta beror på att Hultsfred östra ligger närmare kusten. Djupgåendet på de lokala flödescellerna närmast kusten påverkas av det högre läget på gränsskiktet mellan sött och salint grundvatten.

Jämförelsen mellan de två modellerna med olika upplösning visar tydligt att en tillräckligt fin upplösning av topografen är av yttersta vikt för att kunna återskapa de lokala gradienter som resulterar i lokala flödesceller. Resultaten i /Follin och Svensson, in prep/ indikerar entydigt att simuleringarna i /Voss och Provost, 2001/ inte har haft en tillräckligt fin upplösning för att kunna beskriva topografen i tillräcklig detalj.

För att ytterligare säkerställa att resultaten från studien i Norduppland, som är framtagna med beräkningsverktyget GEOAN /Holmén, 1997/, är applicerbara på förhållandena i Östra Götaland gjordes en jämförelse mellan GEOAN och DarcyTools för ett och samma modellområde /Follin och Svensson, in prep/. Det modellerade området utgör huvudavrinningsområdet till de tre förvarsplatser som analyseras i /Voss och Provost, 2001/, dvs Hultsfred östra, Oskarshamn södra och Simpevarp. Modellens djupgående är detsamma som i modellen för Norduppland, dvs 1100 m. Upplösningen i beräkningarna är också densamma, 330 m i horisontalplanet och mellan 30–240 m i djupled. Jämförelsen gjordes för ett sötvattenfall.

Resultaten visar att med ovannämnda förutsättningar återskapas exakt samma strömningsmönster med de två modellverktygen. Då resultaten från denna studie jämförs med resultaten från DarcyTools för densitetsdriven strömning presenterade ovan, konstateras vidare att en modelldomän som är djup kan ge en mer avvikande bild av flödesvägarna än en grundare modelldomän om man vid flödesmodelleringen bortser från förekomsten av salint grundvatten. Anledningen till detta är att det salina grundvattnet genom sin högre densitet fungerar som ett gränsskikt som begränsar flödesvägarnas djupgående. Utan hänsyn till salint grundvatten blir således flödesvägarna alldeles för djupa om modelldomänen är djup. Ett gränsskikt med salint grundvatten mot djupet förstärker även effekten av den lokala topografins betydelse i förhållande till den regionala i och med att "golvet" flyttas upp /jämför Tóth, 1963/. Frågan om flödesvägarnas horisontella utbredning är också kopplad till förekomsten av salint grundvatten och dess högre densitet. Längs med gränsskiktet mellan sött och salint grundvatten finns nämligen en horisontalkomponent i strömningsfältet som för grundvattnet i gränsskiktet lateralt mot kusten.

5.4 Slutsatser

Baserat på resultaten från de två numeriska studier som genomförts kan följande konstateras:

- För hydrogeologiska förhållanden som är representativa för svensk kristallin berggrund är det mycket troligt att lokala flödesceller styr grundvattenströmningen ner till aktuella djup för ett djupförvar. Detta innebär att flödesbanornas längd tenderar att bli korta.
- Förekomsten av lokala flödesceller innebär att förvarslägen med korta flödesvägar i princip kan hittas överallt inom de studerade områdena, både vid kusten och längre in i landet. De lokala förhållandena är bestämmande. Förvarspositioner belägna i utströmningsområden har generellt kortare flödesvägar och transporttider.

- Uppkomsten av lokala flödesceller är ett samspel mellan den regionala gradienten och lokala fluktuationer. För att den regionala gradienten ska vara betydelsefull erfordras dessutom att flödesdomänen är tillräckligt djup. I detta avseende har förekomsten av salint grundvatten en särskild betydelse.
- Havets position, och därmed strandlinjeförskjutningen i förekommande fall, är en viktig faktor som påverkar var utströmning av djupt grundvatten kommer att ske.
- Övriga studerade förhållanden/egenskaper som sprickzoner (vertikala och horisontella) samt förekomst av sjöar och täta lerlager, är av mindre betydelse för det resulterande flödesmönstret på den studerade skalan.
- Eftersom lokala flödesceller kan förekomma överallt i de studerade områdena blir bergets lokala egenskaper styrande för transporttiderna. Detta innebär att långa transporttider kan förekomma både vid kusten och inne i landet.
- För att korrekt kunna modellera uppkomsten av lokala flödesceller är det av yttersta vikt att ha en rumslig upplösning i numeriska modeller som är så fin att de lokala fluktuationerna i topografin korrekt återskapas. Resultaten indikerar att för de studerade förhållandena behövs en horisontell upplösning på några hundratals meter snarare än på tusentals meter.
- Resultaten för densitetsdriven strömning indikerar att förhållandevis höga salthalter kan förekomma vid förvarsdjup vid kustnära lägen. Dessa salthalter minskar dock med tiden.
- Hanteringen av salint grundvatten är av underordnad betydelse jämfört med hanteringen av den lokala topografin för att korrekt beskriva uppkomsten av lokala flödesceller. Salint grundvatten kan dock medverka till att skapa en mer ytlig strömning där lokala flödesceller dominerar.
- Man kan inte bortse från det salina grundvattnets betydelse vid modellering av andra frågeställningar. Generella jämförelser mellan betydelsen av salint grundvatten i Norduppland respektive Östra Götaland låter sig t ex inte göras då olika randvillkor tillämpats och delvis olika konceptuella synsätt använts för att beskriva saltets ursprung och uppkomst i de olika modellerna.

Dessutom bör följande påpekas:

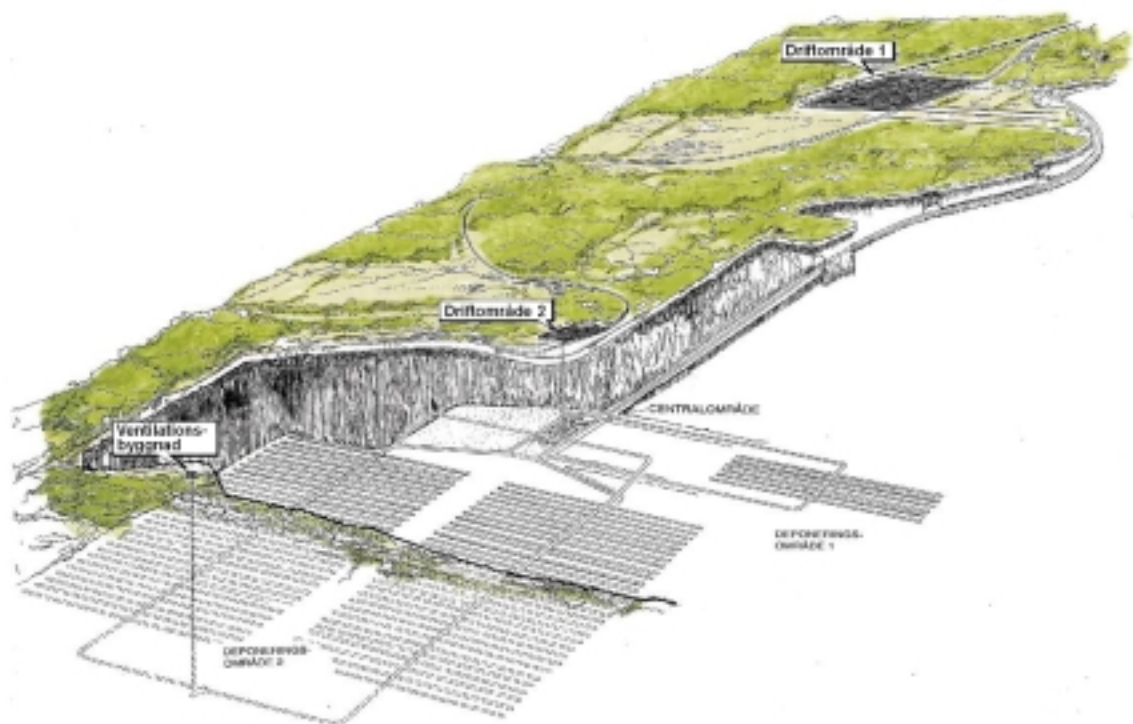
- Samtliga modelltillämpningar som refererats ovan är kontinuumbetraktelser. Detta innebär att det mycket diskontinuerliga och diskret anisotropa beteende som kännetecknar grundvattenströmning i kristallin berggrund på mindre skalor inte har modellerats. Slutsatserna som dras avser därför i första hand principiella fysikaliska beteenden och samband. På den superregionala skala som är aktuell här är dock kontinuumansatsen rimlig.
- Två ytterlighetsfall har använts för att modellera saltets utveckling i berggrunden. I Norra Uppland har ingen saltproduktion modellerats, dvs det salina grundvattnet sköljs ut med tiden. I Östra Götaland har saltproduktion simulerats, vilket resulterar i jämviktliknande förhållanden. Med båda dessa angreppssätt har uppkomsten av lokala flödesceller återskapats. Lokala flödesceller är sålunda inte primärt beroende av saltbeskrivningen. Om densitetsdriven strömning inte inkluderas i modellen och modellen har ett mycket stort djup blir dock flödesvägarnas djupgående felaktigt.

6 Hur grundvattnets rörelser och sammansättning påverkas av förvaret

Djupförvaret innebär en omfattande, men tillfällig, störning av grundvattenströmningen. Detta innebär i sin tur att den rumsliga fördelningen av grundvattnets sammansättning kan förändras en tid. Storleken av dessa förändringar beror på hur mycket vatten som läcker in i tunnlar och bergrum och på den ursprungliga rumsliga fördelningen av grundvattnets sammansättning.

6.1 Mekanismer och faktorer

Djupförvaret omfattar tillfarts- och transporttunnlar, schakt och andra bergrum ner till ca 500 m djup (se figur 6-1). Under bygge och drift kommer dessa tunnlar och bergrum att stå öppna, även om deponeringstunnlar efter hand återfylls och pluggas igen.



Figur 6-1. Exempel på möjlig utformning av djupförvaret enligt alternativ med rak ramp och två driftområden /från SKB, 2001/. Andra lösningar för tillfart kan bli aktuella.

6.1.1 Förändringar i grundvattenflödet

De öppna tunnelsystemen innebär en avsevärd skillnad i portryck (ca 500 m) som kommer att vara väsentligt större än de tryckskillnader som ges av topografin. Därmed ger de öppna tunnelsystemen en betydande drivkraft för grundvattenströmningen.

Den stora tryckskillnaden gör att grundvatten kommer att rinna in i anläggningen. Hur mycket vatten som kommer att rinna in och sedan pumpas upp, beror på det omgivande bergets vattengenomsläpplighet och på eventuella tätningåtgärder som t ex injektering. Inflödet till bergrummen påverkar i sin tur grundvattenflödet i det omgivande berget, dels genom strömningen i sig och dels genom en sänkning av grundvattenytan ovanför anläggningen. Ett grundvattenflöde riktat mot tunnelsystemen ifrån djupet, sidorna och ytan uppstår.

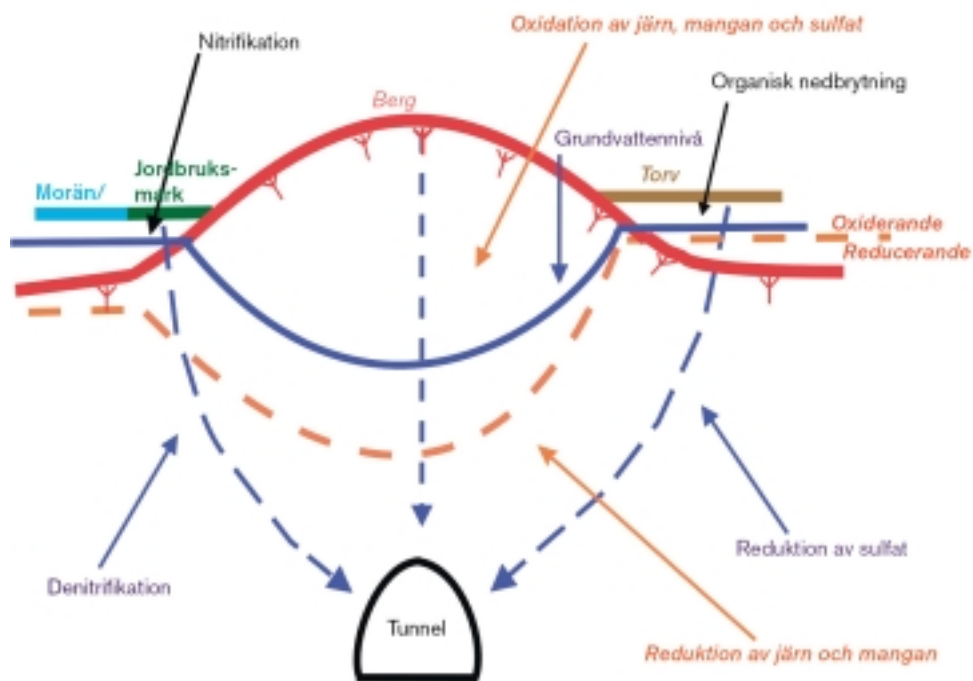
6.1.2 Förändringar i grundvattnets sammansättning

Förändringarna i grundvattenflödet kan även förändra den rumsliga fördelningen av grundvattnets sammansättning. Saltare grundvatten från djupet kan tränga upp – s k saltvattenuppsträngning (eng. *upconing*), och ytligt grundvatten med högre humushalter kan sjunka ner i berget. Detta kan leda till förändringar i kemin på grund av att nytt vatten kommer i kontakt med mineralen i sprickzonerna, vilket i sin tur kan leda till t ex upplösnings- eller utfällningsreaktioner. Vattentyper som blandas kan få en ny kemisk sammansättning, som även den kan leda till att nya kemiska reaktioner initieras. Lokalt kan upplösnings- och fällningsreaktionerna med tiden även påverka bergets vattengenomsläpplighet, eftersom vissa sprickor kommer att "läkas" och andra att öppnas upp.

6.1.3 Infiltration av ytligt grundvatten

Om grundvattenavsänkningen i samband med tunnelbygge resulterar i att ytvatten eller ytligt grundvatten infiltrerar ner till förvarsnivån, kommer vattnet att infiltrera antingen direkt i berget (berg i dagen) eller genom olika jordarter som t ex morän, torv eller silt/lera (jordbruksmark). Beroende på mineralogin, mängden organiskt material och flödes hastigheten, kommer vattensammansättningen att påverkas på olika sätt. Exempel på olika kemiska reaktioner som vid ett tunnelbygge kan påverka t ex de organiska halterna eller järn-, mangan-, sulfat- och nitrathalterna, och därmed grundvattensammansättningen, visas i figur 6-2.

Mineralogin i jord och berg bestämmer vilka element som vattnet kan lösa upp. Mängden organiskt material bestämmer ofta i vilken omfattning och hastighet de biogena reaktionerna sker (mikrober fungerar som katalysatorer för flera reaktioner; /Pedersen och Ekendahl, 1990; Pedersen och Karlsson, 1995/). Dessa reaktioner förbrukar ofta syre. Vattnets surhet/alkalinitet (pH) och mängden löst syre (redoxförhållanden) bestämmer vilka element som löses upp, hålls i lösning eller faller ut.



Figur 6-2. Principskiss för möjliga vattenflödesvägar och reaktioner som kan påverka vattensammansättningen i samband med tunnelbygge /Laaksoharju m fl, 2000/. Vattnets infiltration genom olika berg- och jordarter kan påverka vilken typ av reaktioner (oxidation eller reduktion) som sker. Dessa reaktioner kan resultera i att t ex de organiska halterna eller järn-, mangan-, sulfat- eller nitrathalterna ökar eller minskar på förvarsdjup.

När grundvattnets flödes hastighet och flödesriktning förändras, som t ex vid ett tunnelbygge, kommer den kemiska miljön att påverkas, vilket i sin tur kan leda till att både mängden och typen av reaktioner som sker förändras. Om vattenomsättningen ökar kan mer syrehaltigt och (eventuellt surt) ytligt vatten komma ner i berggrunden där det kan oxidera det järn, mangan eller sulfid som finns bundet i bergets sprickmineral /Jacks, 1990; Jacks m fl, 1990/. Erfarenheter från Äspölaboratoriet indikerar dock att reducerande (syrefattiga) förhållanden kan bibehållas i tunneln, även om tunneln står öppen i årtionden. Detta styrs av faktorer som vattensammansättningen i det omgivande berget, vattenflödets hastighet och väg till tunneln, bergets reducerande förmåga, mängden mikrober och mängden organiskt material /Laaksoharju m fl, 1999b; Banwart m fl, 1996; Puigdomenech m fl, 2000/.

6.1.4 Faktorer som påverkar grundvattenströmningen

Förutsättningarna att exakt förutse vilka förändringar som kommer att ske kompliceras av bergets heterogenitet, av förhållandena på ytan och av vattnets densitetsfördelning.

- Om de öppna tunnelsystemen har direkt kontakt med salt grundvatten via olika sprickzoner, förstärks effekten av saltvattenuppträngningen. Om berggrunden istället har god hydraulisk kontakt med ytligt vatten förstärks påverkan av dessa.
- Resultatet av olika tätningsåtgärder, som injektering och betonginklädnad, påverkar vattengenomsläppligheten närmast berggrunden. Genomsläppligheten kan där även påverkas lokalt (minskas) på grund av samverkande mekaniska effekter och frigörelse av löst gas (dvs ett s k "skin" kan uppstå).

- Den lokala vattengenomsläppligheten påverkas även av kemiska reaktioner. Grundvattenströmningen till tunnarna medför att vatten av olika sammansättning blandas och rådande jämvikt mellan vattensammansättning och sprickmineral (främst kalcit) kan därmed rubbas. Vissa sprickor kan med tiden tätas på grund av utfällning av kalcit, medan andra kan bli mer vattengenomsläppliga på grund av att sprickmineraler löses upp.
- De ytliga lagrens vattengenomsläpplighet och kontakt med sjöar och vattendrag påverkar i hög grad om ytterligare grundvattenbildning kan initieras av trycksänkningen som de öppna tunnelsystemen medför. Detta påverkar framförallt nivån för grundvattenytan i jordlagren, men kan också leda till en ökad halt av organiskt material i djupare grundvatten.
- Om det förekommer vatten med hög salthalt är det dessutom nödvändigt att ta hänsyn till den högre densiteten hos det mycket salta vattnet. Densitetsskillnaderna innebär en viss uppbromsning av saltvattenuppträngningen.

Flödesförändringarna i berget inträffar relativt snabbt eftersom de väsentligen bestäms av förändringar i tryckfältet. Avsänkningen av grundvattenytan ovanför bergrummen, liksom förändringar av densitetsfördelningen, tar dock en viss tid. Tryckförändringar sker relativt snabbt – dagar, månader. Densitetsförändringen och andra kemiska förändringarna tar längre tid än tryckförändringarna, tiotals år eller mer beroende på grundvattenflödet, eftersom de innebär att vatten måste transporterats genom berget.

6.2 Modellberäkningar och erfarenheter

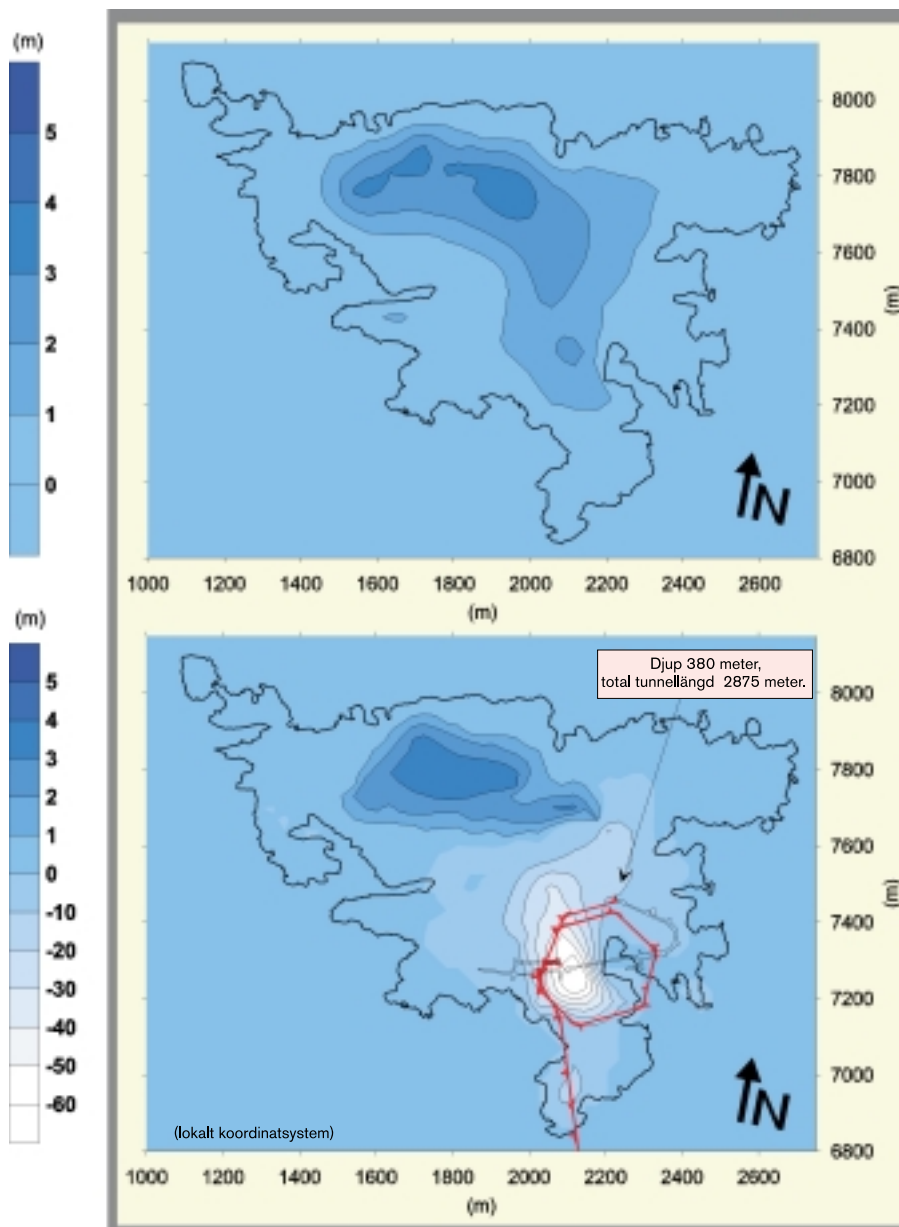
SKB och andra organisationer har genomfört olika beräkningar med grundvattenmodeller för att få klarhet i vilka faktorer som styr grundvattenförändringar vid ett förvar. Dessutom har det gjorts omfattande mätningar inne i och i borrhål kring Äspölaboratoriet.

6.2.1 Principstudie

/Follin, 1995/ har gjort en principstudie av grundvattenflödet kring öppna bergrum i ett kustnära område. Analysen visar att om berggrunden har hög vattengenomsläpplighet och bergrummen är relativt otäta kan grundvattenytan sänkas avsevärt och saltvatten kan tränga upp. För att hindra förloppet måste bergrummen göras betydligt tätare. Det tar också relativt lång tid, åtminstone flera decennier, efter det att förvaret förslutits innan grundvattenyta och grundvattensammansättning återgår till det tillstånd som rådde innan bergrummen började byggas.

6.2.2 Grundvattenavsänkning vid Äspölaboratoriet

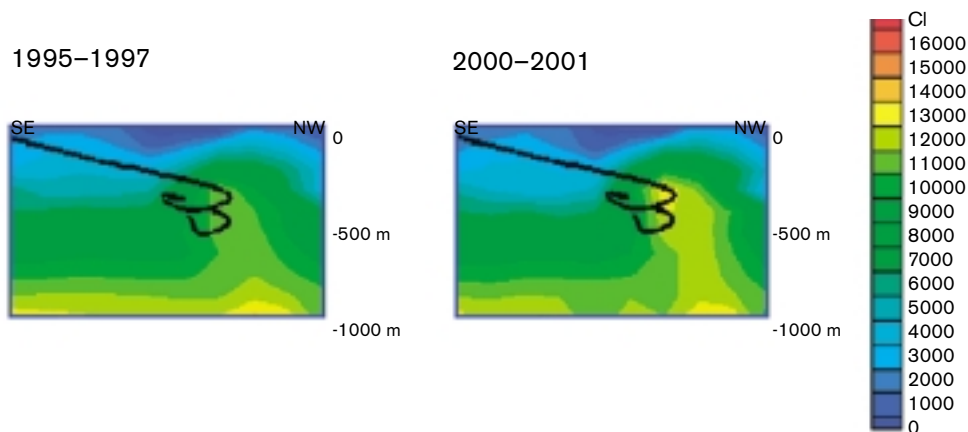
SKB har även analyserat förändringarna kring Äspölaboratoriet (se figur 6-3). Olika modellgrupper gavs i uppdrag att beräkna förändringar i grundvattnets trycknivå under pågående bygge /Gustafson m fl, 1997/. Beräkningarna har sedan jämförts med observerad avsänkning. Alla modellgrupper predikterade en avsänkning, även om ingen grupp helt lyckades prediktera den faktiskt uppmätta avsänkningen. Till stor del beror detta på svårigheten att i förväg kunna uppskatta effekten av tätningsåtgärder och att kunna förutsäga storleken av eventuellt "skin".



Figur 6-3. Grundvattensänkning kring Äspölaboratoriet under pågående bygge /figur 1-5 i Gustafson m fl, 1997/.

6.2.3 Uppmätta salthaltsförändringar vid Äspölaboratoriet

Att salt vatten verkligen kan tränga upp och dras in mot öppna tunnlar visas också av observationer från Äspö. Figur 6-4 visar de uppmätta förändringarna i salthalt (kloridhalten) i samband med tunnelbygget. I detta fall ökade salthalten i vissa delar av tunneln med ca 20 % under en period av 3–5 år.



Figur 6-4. Saltbalten (kloridbalten i mg/l, $TDS = 1,7 \times Cl$) längs med Åspötunneln (i svart) under perioden 1995–1997, samt under perioden 2000–2001. Uppträngningen av saltvatten till tunnelspiralen ökade salthalten med 20 % under en tidsperiod av 3–5 år. Detta är ett exempel på hur flödesförändringar påverkar grundvattnets kemiska sammansättning.

6.3 Slutsatser

Grundvattenytans läge, grundvattenflödet och grundvattnets sammansättning kring förvarets olika berggrum kommer att bestämmas av flera faktorer, varav den yt nära hydrogeologin, bergets egenskaper, grundvattnets sammansättning och förvarets utformning är de viktigaste. Det är uppenbart att förvarets inverkan på omgivningen, både nära ytan (eventuell avsänkning av grundvattenytan) och kring berggrummen (förändringar av grundvattnets sammansättning) är väsentliga frågor för utformning och säkerhetsanalys av förvaret. Prediktioner av förändringarna och deras utveckling med tiden behöver göras och förvarets utformning behöver anpassas till detta.

Av de olika faktorer som har betydelse för förvarets påverkan på omgivningen är det dock bara den rumsliga fördelningen av grundvattnets sammansättning som kan sägas bero på annat än lokala förhållanden. Förutsättningarna för saltvattenuppträngning ökar om berggrummen ligger nära vattenmassor med hög salthalt. Genomgången i kapitel 4 visar att sådana förhållanden är vanligare i områden som idag ligger nära havet, men det finns kustnära områden med relativt stora djup ner till riktigt salt grundvatten, samtidigt som det förekommer salt grundvatten även långt inåt landet.

I viss utsträckning kan en uppträngning av salt grundvatten förhindras genom lämpliga tätningsåtgärder. Möjligheten att förvaret under en tid kommer att omges av saltare grundvatten än vad som uppmätts på förvarsnivå före bygge måste dock beaktas, t ex vid val av återfyllnadsmaterial (se vidare kapitel 7).

7 Betydelse av grundvattnets rörelser och sammansättning för djupförvarets funktion

Detta kapitel diskuterar i vilken utsträckning fördelningen av in- och utströmningsområden, samt djupet till grundvatten med höga salthalter och därtill kopplade faktorer, påverkar djupförvarets funktion. Vidare bedöms om detta har betydelse för djupförvarets lokalisering. Diskussionen bygger på redovisningar i tidigare kapitel och på slutsatserna i SKB:s rapport "Vilka krav ställer djupförvaret på berget?" /Andersson m fl, 2000/.

7.1 Studerade parametrar av betydelse för djupförvaret

Enligt /Andersson m fl, 2000/ borde det principiellt vara en fördel att förlägga förvaret under ett inströmningsområde eftersom detta bör maximera längden på strömvägarna från förvaret. Det konstateras dock att tillhörande utströmningsområden oftast inte ligger långt ifrån inströmningsområdet och därför ges inte detta önskemål speciellt stor vikt. Fullgod säkerhet och retentionsförmåga måste under alla förhållanden visas i den platsspecifika säkerhetsanalysen.

Om förvaret ligger under ett in- eller utströmningsområde är inte intressant i sig, utan bara om denna förläggning i sin tur har betydelse för parametrar som har mer direkt inverkan på djupförvarets funktion. Av tidigare kapitel framgår att det i första hand är följande parametrar, av betydelse för djupförvaret, som är kopplade till frågan om grundvattnets cirkulationsmönster och salthaltsfördelning:

- grundvattnets sammansättning,
- grundvattenströmningens storlek,
- grundvattnets flödesvägar från förvaret,
- utspädning och omsättning i yt nära grundvatten och i ytvatten.

Av speciellt intresse är därvid frågan om en förvarsplacering i ett inlandsläge respektive ett kustläge medför några avgörande skillnader i dessa parametrar.

Av kapitel 4 framgår att salt grundvatten förekommer mot djupet inom en stor del av landet. Djupet till salt grundvattnet är dock oftast mindre närmare kusten. Vidare är djupet till salt grundvatten större under ett lokalt inströmningsområde än det är under ett utströmningsområde.

Rent principiellt blir strömvägarna längre om ett förvar placeras under ett lokalt inströmningsområde, än om det placeras under ett utströmningsområde med grundvattencirkulation som passerar förvaret. De noggranna analyser som SKB låtit genomföra av grundvattenströmningen i Norra Uppland och i Östra Götaland (se kapitel 5) visar dock att flödesvägarnas lägen i huvudsak bestäms av den lokala topografin, och att grundvattenströmningens storlek bestäms av bergets egenskaper tillsammans med

topografien. Läget i förhållande till kusten har mindre betydelse. Förekomst av salt grundvatten resulterar i ett mer komplext flödesmönster, men ändrar inte i sak denna slutsats.

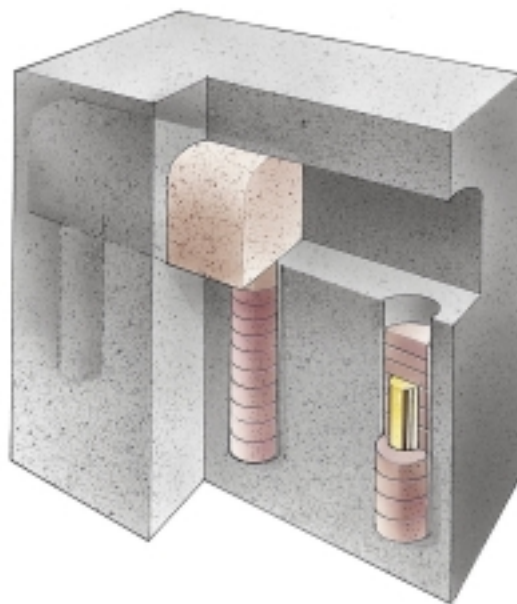
Utströmningsområdena har likartad karaktär, dvs lokala dalgångar och sjöar, oavsett var förvaret placeras. För ett kustnära förvar ligger, per definition, det tillhörande avrinningsområdet närmare havet, varför ett betydligt mindre avrinningsområde blir potentiellt berört än om förvaret placeras i inlandet.

7.2 Inverkan på de tekniska barriärernas isolerande funktion

I första hand ska djupförvaret isolera avfallet från människa och miljö (se figur 7-1). Detta åstadkoms direkt av kopparkapseln. Bufferten ska bidra till isoleringsfunktionen genom att hålla kapseln på plats och hindra korroderande ämnen i grundvattnet att komma i kontakt med kapseln.

Även berget ska bidra till isoleringen genom att erbjuda en stabil kemisk och mekanisk omgivning för kapslarna och bufferten. De kemiska förhållandena bestäms framför allt av grundvattnets sammansättning. Det är gynnsamt om vattnet innehåller låga halter av ämnen som skulle kunna vara skadliga för främst kopparkapseln och bentonitleran. Det är också gynnsamt om vattenflödet förbi förvaret är lågt så att tillförseln av oönskade ämnen därigenom begränsas. Mekaniskt ska urberget erbjuda en långsiktigt stabil miljö för ett djupförvar.

Den isolerande funktionen hos de tekniska barriärerna, dvs bränsle, kapsel, buffert och återfyllnad, påverkas framförallt av grundvattnets sammansättning (där salthalten är viktigast) och i viss mån av grundvattenströmningens storlek.



Figur 7-1. Kopparkapseln isolerar avfallet från omgivningen. Lerbufferten och omgivande berg skyddar kopparkapseln.

7.2.1 Salthalt

Inverkan

Salthalten har begränsad inverkan på kapselns funktion, vilket betyder att den viktigaste tekniska barriären – kapseln – knappast kommer att påverkas av förhöjda salthalter. Salthalten kan dock påverka bufferten och återfyllnaden. En hög salthalt påverkar bentonitens stabilitet, vilket i sin tur påverkar buffertens isolerande och fördröjande förmåga. /Andersson m fl, 2000/ konstaterar att det är ett krav att buffertens svälltryck bevaras och formulerar därvid kravet att den totala salthalten (TDS) ska vara lägre än 100 g/l i deponeringsområdet.

Salthalten kommer också att påverka valet av återfyllnad. Om återfyllnaden består av en bentonit med låg densitet, t ex om den utgörs av en blandning av sand/bentonit, påverkas svälltrycket även vid relativt måttliga salthalter /Karnland, 1997/. I sådana fall behöver annan utformning av återfyllnaden väljas. Det innebär att höga salthalter kan vara en teknisk komplikation vid utformningen av djupförvaret, men det innebär inte en säkerhetsmässig risk så länge kraven är uppfylla.

Betydelse för förvarets lokalisering

Som konstaterats tidigare är djupet till salt vatten i regel mindre i kustnära områden än i inlandsområden. Mycket talar också för att djupet är större under inströmningsområden än under utströmningsområden. På platser med begränsat djup till salt vatten finns en möjlighet att salthalten vid förvarsdjup stiger i samband med att förvaret dräneras under byggtiden. Den förhöjda nivån kommer dock att sjunka igen när dräneringen upphör efter förslutning (se kapitel 6). Ett kustnära förvar kan därmed innebära en teknisk komplikation, t ex vid utformningen av återfyllnaden i tunnlar, men det utgör knappast någon säkerhetsrisk i detta avseende.

7.2.2 Grundvattenströmning

Inverkan

/Andersson m fl, 2000/ konstaterar att det i princip finns ett önskemål om låg grundvattenströmning i deponeringshållsskala för att därigenom begränsa tillförseln av ämnen som skulle kunna korrodera kopparkapseln. Beräkningar visar dock /t ex SR 97 basscenariot, SKB, 1999a/ att flödet inte spelar någon avgörande roll för kapselns livslängd.

Extremt stora grundvattenflöden eller spricköppningar skulle kunna skada bufferten genom att de ger förutsättningar för mekanisk erosion av denna /SR 97 Processrapporten, SKB, 1999b/. Om sådana höga flöden eller spricköppningar förekommer kan de dock alltid undvikas genom lämpligt val vid placering av deponeringshåll.

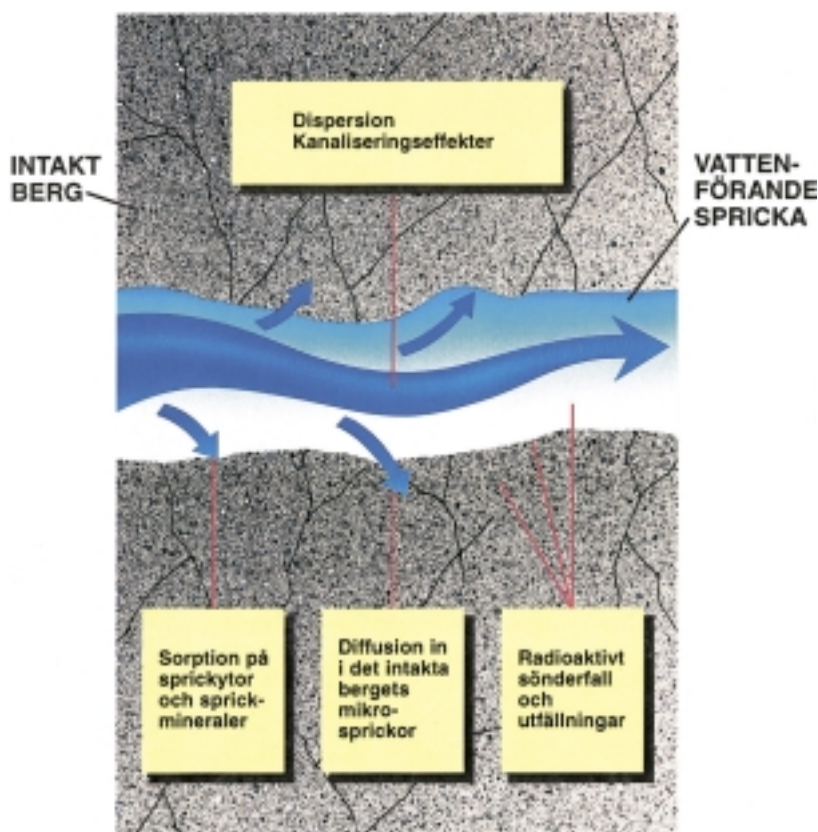
Betydelse för förvarets lokalisering

Grundvattenströmningens storlek har enbart begränsad inverkan på de tekniska barriärernas isolerande funktion. Dessutom visar genomförda modelleringar (se kapitel 5) att det knappast finns någon systematisk skillnad i grundvattenströmningens storlek på förvarsdjup under in- och utströmningsområden eller mellan kustland och inland. I inlands lägen är den topografiska gradienten oftast större än i kustlägen, varför grundvattenströmningen i princip borde vara större i inlandet. Det är dock bergets vattengenomsläpplighet som främst bestämmer grundvattenströmningens storlek.

7.3 Inverkan på fördröjningen i berget

Om isoleringen av någon anledning skulle skadas, eller om någon kapsel initialt skulle ha en defekt som inte upptäcks vid tillverkningskontrollen, har förvaret i andra hand en fördröjande funktion (se figur 7-2). Med det menas att tiden det tar för radionuklider att transporteras från förvaret till biosfären görs så lång att farligheten hinner avta väsentligt innan radionukliderna når människan eller hennes omgivning.

Samtliga barriärer bidrar till förvarets fördröjande funktion. Även en delvis skadad kopparkapsel kan effektivt bidra till fördröjningen genom att försvåra inflöde av vatten till kapselns inre och uttransport av frigiorda radionuklider. Bränslet, där huvuddelen av radionukliderna ligger inbäddade, består av ett beständigt material som ger ett viktigt bidrag till fördröjningen. Om bränslet kommer i kontakt med grundvatten startar en mycket långsam upplösningsprocess som leder till att radionuklider frigörs. Frigörelsen begränsas av att många av de långsiktigt farligaste radionukliderna är svårslösliga i vatten, och vatten är det medium i vilket radionuklider kan tänkas transporteras genom såväl buffertens porer som bergets spricksystem. Vidare har lerbufferten en förmåga att hålla kvar många av de långsiktigt farligaste radionukliderna genom att dessa fastnar på lerpartiklarnas ytor. Berget bidrar till fördröjningen genom att radionuklider fastnar på sprickornas ytor och/eller tränger in i mikrosprickor med stillastående vatten så att de får en betydligt längre transporttid än själva grundvattnet.



Figur 7-2. Om radionuklider lämnar kapseln fördröjs de effektivt i lerbuffert och berg eftersom grundvattenströmningen är långsam, och framförallt eftersom radionuklider diffunderar in och fastnar i bergets mikrosprickor.

Förutom själva utformningen av djupförvaret är det i första hand grundvattnets sammansättning (kemi), grundvattenströmningen i berget (hydrogeologi) och bergets transportegenskaper som påverkar förvarets fördröjande funktion.

7.3.1 Salthalt

Inverkan

Höga salthalter innebär att sorptionsförmågan i berget minskar för flera radionuklider /Carbol och Engkvist, 1997/. Känslighetsanalyser inom SR 97 /SKB, 1999a/ visar dock att denna minskning har liten total inverkan på transporten av radionuklider. De nuklider för vilka fördröjningen är väsentlig kommer ändå att hinna sönderfalla.

Betydelse för förvarets lokalisering

Som konstaterats tidigare är djupet till salt vatten i regel mindre i kustnära områden än i inlandsområden. På platser med begränsat djup till salt vatten finns dessutom en möjlighet att salthalten på förvarsnivå tillfälligt stiger ytterligare under byggtiden i samband med dränering av förvaret (se kapitel 6). För ett kustnära förvar finns därmed möjligheten att sorptionsförmågan för ett antal radionuklider blir något sämre än för ett inlandsförvar. Skillnaden är dock liten (se ovan) och sannolikt försumbar i jämförelse med t ex grundvattenströmningens lokala variationer.

7.3.2 Grundvattenströmning

Inverkan

/Andersson m fl, 2000/ konstaterar att det är önskvärt att transporten av radionuklider fördröjs i övergången buffert/berg och tunnel/berg. Beräkningar inom SR 97 /Huvudrapporten, kapseldefekts scenariot, SKB, 1999a/ visar att om grundvattenflödet (darcyhastigheten) i de sprickor som korsar deponeringshålet är större än $q_{\max}=0,01$ m/år blir fördröjningen i övergången buffert/berg i det närmaste försumbar. Det är givetvis önskvärt med lägre flöden, men det finns ingen grund för ett sådant krav eftersom beräkningarna också visar att utsläppet till biosfären kan hållas under nivåer satta i SSI:s föreskrifter /SSI, 1998/ även om fördröjningen i övergången buffert/berg försummas.

Grundvattenströmningen mellan en skadad kapsel och biosfären är en viktig faktor för i vilken utsträckning radionuklider fördröjs i själva berget. Radionukliderna kan transporteras med grundvattenströmningen i bergets öppna sprickor, men de kan också diffundera in i bergets mikrosprickor (bergmatrisen) och därvid fastläggas (sorberas) på det fasta materialet. Om ämnena som är lösta i vattnet inte samverkar med omgivningen bestäms transporttiden av vattnets ”gångtid” (t_w) vilken kan uttryckas som transportvägens längd (L) dividerad med kvoten mellan darcyhastighet (q) och flödesporositet (ϵ_f). Om ämnena dessutom kan diffundera in i bergmatrisen och även sorbera där kommer detta att ge upphov till en betydande fördröjning och den resulterande ”transporthastigheten” bestäms då väsentligen av darcyhastigheten och sprickornas geometri samt av matrisens diffusions- och sorptionsegenskaper. Flödesporositeten är i detta fall av underordnad betydelse.

Vid antagande om en förenklad flödesgeometri, t ex flöde genom rektangulära kanaler, kan de styrande grupperna av parametrar för matrisdiffusionen uttryckas som produkten mellan det s k ”transportmotståndet” eller ”F-parametern” och en grupp av parametrar innehållande sorptionskoefficient (K_d -värde), diffusionskoefficient samt matrisporositet. F-parametern kan uttryckas på olika sätt, t ex

$$F = a_r L / q = \left(a_w / \epsilon_f \right) L / q = a_w t_w$$

där a_r är den flödesvätta ytan per volym berg och a_w den flödesvätta ytan per volym strömmande vatten /se t ex Andersson m fl, 1998/. Den senare formuleringen används i modellen FARF31 som används i SR 97. Ju större transportmotstånd, desto större blir fördröjningen. Det bör noteras att a_w och t_w är starkt och omvänt korrelerade via det linjära beroendet av flödesporositeten, men att produkten F inte direkt beror på flödesporositeten.

Sorptionskoefficienter (K_d -värden) och matrisdiffusivitet är ämnesspecifika. Betydelsen av en viss fördröjning är dessutom nuklidspecifik på så sätt att om fördröjningen är stor i förhållande till ämnets halveringstid kommer ämnet att hinna sönderfalla innan det passerat genom geosfären. Om fördröjningen å andra sidan är liten i förhållande till halveringstiden har den försumbar inverkan. Dessa olika förhållanden gör att det egentligen inte går att ange något speciellt önskvärt lägsta värde på transportmotståndet (F-parametern). Från beräkningarna i SR 97, där flera olika värden på F-parametern studerades i olika beräkningsfall /Huvudrapporten, avsnitt 9.11, SKB, 1999a/, kan man ändå göra den översiktliga bedömningen att geosfären har en betydande kapacitet till fördröjning av viktiga radionuklider om $F > 10^4$ år/m. För lägre värden avtar betydelsen av geosfärens fördröjning snabbt. Det är givetvis önskvärt med stora transportmotstånd i geosfären, men det är inte möjligt att ange ett mer preciserat krav än att den samlade barriärfunktionen ska räcka för att ge fullgod säkerhet.

Betydelse för förvarets lokalisering

Grundvattenströmningens storlek skiljer sig knappast om förvaret placeras under ett inströmningsområde eller under ett utströmningsområde. Den bestäms i stället av bergets lokala vattengenomsläpplighet och lokala drivande krafter. Skillnad mellan kustland och inland bedöms också som liten. Om det förekommer en systematisk skillnad bör grundvattenströmningen vara större i inlandet, eftersom det där kan finnas större topografiska gradienter.

Principiellt blir flödesvägarna längre om förvaret placeras under ett inströmningsområde. I förenklade analyser, med dålig upplösning av den lokala topografin, ger dessutom en inlandsförläggning möjlighet till längre flödesvägar än vid kustnära förläggningar. De noggranna analyser som SKB låtit genomföra av grundvattenströmningen i Norra Uppland och i Östra Götaland (se kapitel 5) visar dock att i huvudsak bestämmer den lokala topografin flödesvägarnas lägen och att topografin, tillsammans med bergets egenskaper, bestämmer grundvattenströmningens storlek. Läget i förhållande till kusten har mindre betydelse. Vid pågående landhöjning kommer dock lägen som ligger mycket nära strandlinjen att få något förkortade (vertikala) flödesvägar men effekten avtar snabbt, inom tusen år, när denna transienta effekt har upphört eller när strandlinjen flyttats längre bort.

En realistisk beskrivning av grundvattenströmningen visar att systematiska skillnader mellan kustland och inland blir små. Transportmotståndet bestäms i huvudsak av lokala faktorer.

7.4 Ytnära förhållanden

Genom att förlägga förvaret så att eventuella utsläpp får en hög grad av utspädning i biosfären lindras konsekvenserna. I säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/ betraktas, av flera skäl, detta inte som någon säkerhetsfunktion eftersom:

- Biosfären och därmed utspädningen förändras betydligt snabbare än själva förvarssystemet och dessutom på ett sätt som är svårt att förutsäga. Det blir därmed inte rimligt att basera en långsiktig säkerhetsfunktion på förhållanden i biosfären.
- Visserligen lindras konsekvenserna för de som drabbas mest av ett utsläpp, men å andra sidan kan en större population beröras.

Utspädningen är dock en viktig faktor som påverkar radionuklidspridningen i biosfären och därmed konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från förvaret. En värdering av utspädningsförhållandena vid en förvarsplats måste därför ingå i en säkerhetsanalys men utspädningen betraktas alltså inte som en säkerhetsfunktion i sig.

Det finns inga krav på de ytnära förhållandena. Ur naturresurssynpunkt finns det önskemål om att undvika områden som är, eller kan bli, en betydande vattentäkt, jordtäkt eller odlingsmark. Stora och vattenförande mäktigheter hos jordlagren komplicerar undersökningar och är sannolikt också negativt ur bygg- och driftsynpunkt. Ur naturskyddssynpunkt undviks områden där biologisk mångfald och skyddsvärda organismer kan hotas direkt eller indirekt genom byggnation av tillfartsvägar och dylikt i obrutna områden.

Vidare måste påverkan på det ytliga grundvattnet (grundvattenavsänkningar och kemisk påverkan) minimeras. Detta innebär önskemål om begränsat inläckage av grundvatten i förvaret under bygge och drift, men skulle också kunna innebära önskemål om begränsad injektering. Önskemålet kan tillgodoses genom lämplig utformning av förvaret och genom val av lämpliga metoder för att bygga förvaret.

7.4.1 Utspädning

Inverkan

Gjorda analyser av grundvattenströmningen visar att grundvattnet som passerar ett djupförvar i regel strömmar ut i sjöar eller vattendrag /Holmén m fl, in prep/. Utseendet hos dessa utströmningsområden är relativt lika, oavsett var det tänkta förvaret placeras. Vid kustnära förvar kommer utströmning huvudsakligen att ske i punkter belägna under havsytan. I säkerhetsanalysen SR 97 /SKB, 1999a/ konstateras, med den där använda biosfärsmodellen, att på grund av utspädning kommer den ekologiska dosomvandlingsfaktorn att vara ca 10–1000 gånger lägre vid utströmning i en kustrecipient jämfört med i landrecipienter. När det gäller Norra Uppland, där strandförskjutningen är relativt snabb, kommer dock utströmningen inom några få tusen år att övergå till ett mer lokalt område /Holmén m fl, in prep/. I Östra Götaland pågår utströmningen till havet under betydligt längre tid /Follin och Svensson, in prep/.

Betydelse för förvarets lokalisering

Eventuella utsläpp från förvaret når biosfären i utströmningsområden, oavsett hur förvaret placeras. Karaktären på dessa utströmningsområden gör att det ur utspädningsynpunkt inte finns någon större anledning att särskilja kust eller inland. Det är mer de lokala förutsättningarna på en given plats som avgör utspädningens storlek. Generellt sett kommer dock utströmningsområdet från ett kustnära läge att befinna sig under

havsytan under längre tid än från ett inlandsläge. Om landhöjningen är stor blir den tid då ett kustnära förvar skulle kunna tänkas ge utströmning till havet relativt kort, och utströmning till havet kommer i så fall att ske innan några radionuklider kan ha lämnat kopparkapslarna.

7.4.2 Miljö och naturresurser

Inverkan

I april 1999 antog Sveriges riksdag ett regeringsförslag om att införa 15 miljö kvalitetsmål som ska vara vägledande i arbetet med att åstadkomma en ekologisk hållbar samhällsutveckling. Ett av dessa 15 miljö kvalitetsmål är "Grundvatten av god kvalitet" och frågan är om detta miljö mål (och även andra som kopplar till vatten) på något sätt kan påverka valet av plats för ett djupförvar med avseende på kust eller inland och potentiella framtida utsläpp av radionuklider från förvaret.

Miljö kvalitetsmålen är allmänt formulerade. Därför har olika myndigheter fått i uppdrag att definiera delmål och att ta fram åtgärdsprogram för hur målen skall uppnås. SGU har ansvar för målet "Grundvatten av god kvalitet". Detta formuleras som: "*Grundvattnet skall ge en säker och hållbar dricksvattenförsörjning samt bidra till en god livsmiljö för växter och djur i sjöar och vattendrag*".

Ett viktigt styrmedel för att nå miljö kvalitetsmålet är EG:s ramdirektiv för vatten. Det övergripande syftet med EG:s ramdirektiv för vatten är att se till att en "god ekologisk vattenstatus" uppnås inom EU. Detta skall åstadkommas genom ett långsiktigt skydd av tillgängliga vattenresurser avseende både kvalitet och kvantitet. Direktivet innebär också att framtidens vattenplanering baseras på avrinningsområden och avrinningsdistrikt, där ett avrinningsdistrikt utgörs av ett eller flera avrinningsområden samt kustområden. För varje distrikt utses en avrinningsmyndighet som ansvarar för att målen för miljö kvalitet uppfylls inom distriktet.

Betydelse för förvarets lokalisering

Det nya systemet för svensk vattenplanering baserat på avrinningsområden innebär att man ställer krav på vattnets kvalitet och dess omgivningspåverkan hela vägen från vattendelaren, genom avrinningsområdet och ut till kusten /SOU, 2002/. Frågan är om detta synsätt påverkar var förvaret bör placeras.

Om förvaret placeras under ett lokalt inströmningsområde eller utströmningsområde har knappast någon större betydelse. De grundvattenresurser som passerar ett förvar är mycket små i förhållande till den totala vattenomsättningen i ett avrinningsområde.

Beträffande skillnader mellan ett inlandsbeläget och ett kustbeläget djupförvar kan konstateras att grundvattnet som passerat ett inlandsförvar kan ha en längre väg och därmed ett större potentiellt påverkansområde i avrinningsområdet än ett förvar beläget nära kusten. Eftersom eventuella framtida utsläpp av radionuklider från förvaret till yt nära vatten är små, och den yt nära vattenföringen är avsevärt större än vattenomsättningen på stora djup, bör denna skillnad i påverkansområde vara av underordnad betydelse.

8 Sammanvägd bedömning

Denna rapport dokumenterar och diskuterar processer av betydelse för grundvattnets cirkulation och salthaltsfördelning i svensk berggrund. I rapporten redovisas slutsatser från omfattande modellsimuleringar av grundvattencirkulationen i Norra Uppland och i Östra Småland. Dessutom bedöms fördelningen av in- och utströmningsområden, samt djupet till förekomst av höga salthalter och därtill kopplade faktorer, som geovetenskapliga lämplighetsindikatorer. I det följande sammanfattas och sammanvägs dessa olika redovisningar och analyser.

8.1 Faktorer av betydelse för grundvattnets cirkulation

Genomgången av olika faktorer i kapitel 3 och 4 visar allmänt att grundvattnets cirkulation i huvudsak styrs av grundvattenbildning, topografi, bergets permeabilitetsfördelning (vattengenomsläpplighet), salthaltsfördelningen och förändringar i randvillkor.

Fördelningen av den naturliga grundvattenomsättningen i djupled är sådan att merparten omsätts i jordlagren och i den överst belägna uppspruckna berggrunden (ca 98–99 %). Resten av grundvattnet (alltså ca 1–2 %) omsätts i de djupare delarna av berggrunden. Med den låga vattengenomsläpplighet som är karaktäristisk för den kristallina berggrund som dominerar i Sverige kommer grundvattenytan att i huvudsak följa den topografiska reliefen.

Grundvattenytans relief, dvs i praktiken den topografiska reliefen, har stor betydelse för grundvattenströmningen i djupled. Principiellt strömmar grundvattnet från höjdpunkter (inströmningsområden) till lågpunkter (utströmningsområden), men djupet och längden av dessa flödesvägar bestäms av den lokala topografins variation i förhållande till den regionala. Om topografin i huvudsak har en regional komponent kan mycket långa flödesceller uppstå, men vid starkt varierande lokal topografi blir flödescellerna mindre och lokala. Vidare gäller att även om viss glacialerosion förekommit så har huvuddragen i det svenska landskapets relief varit intakta under många miljoner år. Detta innebär att den framtida topografiska reliefen kan antas sammanfalla med dagens i ett hundra-tusenårigt perspektiv.

Berggrundens spricksystem i bergmassa och i deformationszoner utgör det kristallina bergets vattengenomsläppliga delar och är avgörande för det geometriska ramverk som styr grundvattnets regionala omsättning. Oftast sammanfaller regionala deformationszoner med lågpunkter (dalgångar) i topografin. Åtminstone i regional skala har bergets deformationszoner varit desamma under hundratals miljoner år.

Landhöjningen ändrar flödesmönstret och den nedströms reglerande havsnivån. Havsnivåförändringarnas isostasi (landhöjning) och eustasi (global förändring av havsnivån) gör att den storregionala utströmningssituationen långsamt förändras. Framförallt kommer detta att ge sig tillkänna i kustnära lägen. På nivåer under den tidigare högsta kustlinjen sker även ett långsamt utbyte av ytnära bräckt/salt grundvatten mot sött grundvatten.

Från strömningssynpunkt påverkar salthalten främst grundvattnets densitet. Det mycket salta grundvattnet tenderar därför att strömma nedåt till dess ett jämviktstillstånd har uppstått. Vid stationära förhållanden sker endast en obetydlig strömning av grundvatten med mycket hög salthalt, men vid förändringar av randvillkor som landhöjning, eller vid tidsberoende processer (t ex saltutlösning som funktion av vattnets uppehållstid), kan även det mycket salta vattnet strömma. Grundvattnet i berggrunden har olika ursprung och ålder. I samband med avsmältningen av inlandsisen kunde smältvatten tränga in i berggrunden. På större djup blandades smältvatten med äldre saltvatten så att ett sött/salt blandvatten uppstod. I samband med landhöjningen påbörjades en gradvis ursköljning av äldre saltvatten. Områden som var täckta av havsvatten kunde infiltreras av detta ifall vattnet som fanns i berggrunden hade en lägre densitet än havsvatten. I samband med fortsatt landhöjning fortsatte ursköljningen av äldre vattentyper.

Av kapitel 4 framgår att salt grundvatten förekommer mot djupet inom en stor del av landet. Djupet till det salta grundvattnet är dock mindre närmare kusten och djupet till salt grundvatten är större under ett lokalt inströmningsområde än under ett utströmningsområde. Saltet i grundvattnet kan härröra från flera olika källor. Det kan vara fråga om att havsvatten har trängt ner i berggrunden, att havsvatten eller grundvatten i samband med glaciation eller permafrost har fryst och saltet koncentrerats, eller att mineral som innehåller saltinneslutningar vittrat sönder. Andra möjliga källor är salta lösningar från sedimentära bergarter (t ex Evaporiter) som har täckt berggrunden, eller salta lösningar som har transporterats upp från flera kilometers djup i samband med hydrotermal aktivitet. Eftersom dessa processer kan ha verkat för tusentals till miljontals år sedan, kan det vara svårt att fastställa varifrån saltet kommer.

8.2 Modellering av grundvattenströmning i Norra Uppland och Östra Småland

Genomgången av de olika processer och förhållanden som styr grundvattnets cirkulationsmönster visar att detta måste analyseras platsspecifikt. SKB har därför genomfört noggranna grundvattensimuleringar av Norra Uppland och av Östra Götaland. Slutsatserna redovisas i kapitel 5.

Rent principiellt blir flödesvägarna längre om ett förvar placeras under ett lokalt inströmningsområde än om det placeras under ett utströmningsområde med grundvattencirkulation som passerar förvaret. I förenklade analyser ger en inlandsförläggning möjlighet till längre flödesvägar. De noggranna analyser som SKB låtit genomföra av grundvattenströmningen i Norra Uppland och i Östra Götaland visar dock att flödesvägarnas lägen i huvudsak bestäms av den lokala topografin, och att topografin tillsammans med bergets egenskaper bestämmer grundvattenströmningens storlek. Både i Norra Uppland och i Östra Götaland är den regionala topografiska gradienten liten jämfört med den lokala variationen. Läget i förhållande till kusten har mindre betydelse. Vid pågående landhöjning kommer dock lägen som ligger nära strandlinjen att få något förkortade (vertikala) flödesvägar men effekten avtar snabbt, inom 1000 år, när strandlinjen flyttats längre bort.

Simuleringar visar vidare att sprickzoner inte nämnvärt påverkar fördelningen av flödesvägarna, men väl strömningens storlek och det resulterande transportmotståndet. Anledningen till att sprickzonerna inte påverkar flödesvägarnas läge är att de regionala sprickzonerna i regel sammanfaller med topografiska lågpunkter (dalgångar).

Utströmningsområdena har samma karaktär, dvs lokala dalgångar och sjöar, oavsett var förvaret placeras, men för ett kustnära förvar ligger det tillhörande avrinningsområdet självklart närmare havet, varför ett betydligt mindre avrinningsområde blir potentiellt berört än om förvaret placeras i inlandet.

Förekomst av salt grundvatten resulterar i ett mer komplext flödesmönster. Flödet beror härvid på begynnelsevillkor, randvillkor och om det finns processer som kan generera salt (via utlösning) till grundvattnet. Speciellt i det senare fallet visar modellsimuleringar att det kan ta mycket lång tid för systemen att komma i jämvikt. Beräkningsresultat som visar situationer innan jämviktslägen uppstår blir därför i hög grad beroende på vilka initialvillkor som ansätts. Orealistiska cirkulationsceller kan bli resultatet. Förekomst av salt grundvatten resulterar i ett mer komplext flödesmönster, men ändrar inte i sak slutsatsen att det är den lokala topografin och lokala vattengenomsläppligheten som i huvudsak bestämmer grundvattnets cirkulationsmönster och grundvattenströmningens storlek.

8.3 Inverkan på förvarets lokalisering

I kapitel 7 görs en genomgång av vilka parametrar som kan påverkas av djupförvarets placering i förhållande till in- och utströmningsområden och om det förläggs i inlandet eller i kustlandet. Genomgången ger ingen anledning att i grunden förändra de bedömningar som gjorts i SKB:s arbete med krav och kriterier för djupförvaret. Gjorda analyser och genomgångar ger dock ett mer fullständigt underlag för att bedöma i vilken utsträckning fördelningen av in- och utströmningsområden samt djupet till höga salthalter och därtill kopplade faktorer påverkar djupförvarets lokalisering.

Djupet till salt grundvatten är i regel mindre i kustnära områden. På platser med begränsat djup till salt vatten finns dessutom en möjlighet att salthalten stiger ytterligare i samband med dränering av förvaret under byggtiden, även om nivån sedan sjunker efter förslutning när dräneringen upphör. Ett kustnära förvar kan därmed innebära en teknisk komplikation vid utformningen av återfyllnaden i tunnlar.

Rent generellt är det en fördel om djupförvaret placeras under ett lokalt inströmningsområde eftersom detta ger längre flödesvägar från förvaret. Betydelsen av detta är dock ofta begränsad. I förenklade analyser blir transportmotståndet större för platser i inlandet som placeras under regionala inströmningsområden, långt inne i landet. Mer noggranna analyser visar att platser med mycket stora transportmotstånd kan finnas nära kusten och att det inte längre är lika tydligt att inlandsplatserna verkligen är kopplade till stora cirkulationsceller. Det är de lokala förhållandena, mer än de regionala förhållandena, som avgör platsens lämplighet.

Förvarets påverkan på omgivningen blir under alla förhållanden mycket begränsad och det finns därför ingen anledning att ur denna synpunkt göra skillnad mellan inlands- och kustförläggning av ett djupförvar. Den primära skillnaden mellan ett inlandsbeläget och ett kustbeläget djupförvar är att grundvattnet som passerat ett inlandsförvar kan ha en längre väg och därmed ett större potentiellt påverkansområde i avrinningsområdet än ett förvar beläget nära kusten. I denna mening blir en kustnära förläggning mer fördelaktig än en inlandsförläggning. Eftersom eventuella framtida utsläpp av radionuklider från förvaret till yttnära vatten kommer att bli små, och den yttnära vattenföringen är avsevärt större än vattenomsättningen på stora djup, bör dock denna skillnad i påverkansområde vara av underordnad betydelse.

Referenser

- Andersson J, Elert M, Hermanson J, Moreno L, Gylling B, Selroos J-O, 1998.** Derivation and treatment of the flow wetted surface and other geosphere parameters in the transport models FARF31 and COMP23 for use in safety assessment. SKB R-98-60. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-E, Ericsson L O, 2000.** Vilka krav ställer djupförvaret på berget? Geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för lokalisering och platsutvärdering. SKB R-00-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Angel H, Wolseley P, 1983.** Levande vatten. P A Norstedt & Söners Förlag, Stockholm.
- Banwart S, Tullborg E-L, Pedersen K, Gustafsson E, Laaksoharju M, Nilsson A-C, Wallin B, Wikberg P, 1996.** Organic carbon oxidation induced by large-scale shallow water intrusion into a vertical fracture zone at the Äspö Hard Rock Laboratory (Sweden). *J. Contaminant Hydrology* 21 (1996), Elsevier Science B V, pp 115–125.
- Boulton G S, Payne A, 1993.** Simulation of the European ice sheet through the last glacial cycle and prediction of future glaciation. SKB TR-93-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Boulton G S, Hudson N, Wallroth T, 1996.** Impacts of long-term climate change on subsurface conditions: Time sequence, scenarios and boundary conditions for safety assessments. SKB Utveckling Progress Report U-96-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 1999.** Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. SKB TR-99-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carbol P, Engkvist I, 1997.** Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment, SKB R-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson L, Gustafson G, 1991.** Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. BFR Rapport R66:1991. Stockholm.
- Cliffe K A, Morris S T, Porter J D, 1998.** Assessment Model Validity Document; NAMMU: A program for calculating groundwater flow and transport through porous media, SKB R-99-51. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ericsson L O, 1981.** Grundvattenprospektering i skärgårdslandskapet från praktisk synvinkel. VATTEN nr 1981. Stockholm.
- Espeby B, Gustafsson J P, 2001.** Vatten och ämnestransport i den omättade zonen. Rapport från Avd. för mark och vattenresurser, Inst. för anläggning och miljö vid Kungliga tekniska högskolan på uppdrag av Naturvårdsverket. Stockholm
- Follin S, 1995.** Geohydrological simulation of a deep coastal repository, SKB TR-95-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Follin S, Svensson U, in prep.** On the role of the discretisation and groundwater salinity for the occurrence of local flow cells. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Freeze R A, Witherspoon P A, 1967.** Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow. 2. Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation. Water Resources Research Vol 3, No 2. pp 623–634.
- Glover R E, 1959.** The pattern of Fresh-Water Flow in a Coastal Aquifer. Journal of Geophysical Research, Vol 64, No 4, pp 457–459.
- Grip H, Rodhe A, 1988.** Vattnets väg från regn till bäck. Hallgren & Fallgren, Uppsala.
- Gustafson G, Ström A, Vira J, 1997.** The Äspö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Evaluation report on Task No 3, the Äspö tunnel drawdown experiment, SKB ICR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafsson Y, 1970.** Topografins inverkan på grundvattenbildningen. Grundvatten, P A Norstedt & Söners förlag. Stockholm.
- Hagconsult, 1982.** Geologiska undersökningar och utvärderingar för lokalisering av SFR till Forsmark. SFR 81-13 Del 1. Hagconsult AB.
- Hedin A, 1997.** Använt kärnbränsle – Hur farligt är det? – En delrapport från projektet ”Beskrivning av risk”. SKB R-97-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmén J G, 1997.** On the flow of groundwater in closed tunnels. Generic hydrogeological modelling of nuclear waste repository, SFL 3-5. SKB TR-97-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmén J, Stigsson M, Gylling B, Marsic N, in prep.** Modelling of groundwater flow and flow paths for a large regional domain in Northeast Uppland. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmgren K, Karlén W, 1998.** Late Quaternary changes in climate. SKB TR-98-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jacks G, 1990.** Mineral weathering studies in Scandinavia. In The Surface Water Acidification Programme, ed B J Mason, pp 215–22. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jacks G, Knutsson G, Maxe L, Fylkner A, 1990.** Effect of acid rain on soil and groundwater in Sweden. In: Pollutants in Porous Media. Ecological Studies 47 (eds B Yaron, G Dagan, and J Goldshmid), pp 94–114. Berlin. Springer-Verlag.
- Karnland O, 1997.** Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation between model calculation and experimentally determined data. SKB TR-97-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Knutsson G, Morfeldt C-O, 2002.** Grundvatten – teori & tillämpning. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Laaksoharju M, Degueldre C, Skårman C, 1995.** Studies of colloids and their importance for repository performance assessment. SKB TR-95-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Laaksoharju M, Skårman C, Skårman E, 1999a. Multivariate Mixing and Massbalance (M3) calculations, a new tool for decoding the hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry*, Volume 14, Number 7, pages 861–871.

Laaksoharju M, Tullborg E-L, Wikberg P, Wallin B, Smellie J, 1999b. Hydrogeochemical conditions and evaluation at the Äspö HRL, Sweden. *Applied Geochemistry*, Volume 14, Number 7, pages 835–859.

Laaksoharju M, Andersson C, Lindén B, 2000. Påverkan på grundvattenkvalitet. Projekt Utredning Hallandsås – PUH. Banverket 2000.

Lindell S, Ambjörn C, Juhlin B, Larsson-McCann S, Lindquist K, 1999. Available climatological and oceanographical data for site investigations of surface ecosystems. SKB R-99-70. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Losjö K, Johansson B, Bringfelt B, Oleskog I, Bergström S, 1999. Groundwater recharge – climatic and vegetation induced variations. Simulations in the Emån and Äspö areas in southern Sweden. SKB TR-99-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Lång L-O, Stejmar-Eklund H, Graffner O, 2002. Utveckling av utgångspunkter för avgränsning av tillrinningsområden till grundvattenförekomster. Utredningsrapport på uppdrag av Naturvårdsverket. Rapport vid Geologiska inst. Chalmers tekniska högskola, Göteborg, (in press).

McEwen T, de Marsily G, 1991. The Potential Significance of Permafrost to the Behaviour of a Deep Radioactive Waste Repository. SKI report 91:08, Stockholm.

McWhorther D B, Sunada D K, 1977. Groundwater Hydrology and Hydraulics. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.

Middleton G V, Wilcock P, 1994. Mechanics in the Earth and Environmental Sciences. Cambridge University Press.

Morén L, Påsse T, 2001. Climate and shoreline in Sweden during Weichsel and the next 150,000 years. SKB TR-01-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Muir-Wood R, 1993. A review of the seismotectonics of Sweden. SKB TR-93-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Naturvårdsverket, 2001. Miljökvalitetsnorm för nitrat i grundvattnet. NV Rapport 5180.

Nyberg G, Voss C, 1991. Problems in modelling ground water systems in limited scale. SKB Arbetsrapport AR-91-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pedersen K, Ekendahl S, 1990. Distribution and activity of bacteria in deep granitic groundwaters of south-eastern Sweden. *Microbe Ecol* (20) 37–52.

Pedersen K, Karlsson F, 1995. Investigation of subterranean bacteria – Their influence on performance assessment of radioactive waste disposal. SKB TR-95-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Puigdomenech I, Trotignon L, Kotelnikova S, Pedersen K, Griffault L, Michaud V, Lartigue J-E, Hama K, Yoshida H, West J M, Bateman K, Milodowski A E, Banwart S A, Rivas Perez J, Tullborg E-L, 2000. O₂ consumption in a granitic environment. In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII, Vol 608 (ed R W Smith and D W Shoosmith), pp 179–184. Pittsburgh, PA.

Puigdomenech I (ed), 2001. Hydrochemical Stability of Groundwater Surrounding a Spent Nuclear Fuel Repository in a 100,000 year perspective. SKB TR-01-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Påsse T, 1996. A mathematical model of the shore level displacement in Fennoscandia. SKB TR-96-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Påsse T, in prep. The amount of glacial erosion of the bedrock. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rehbinder G, Follin S, Isaksson A, 1997. On regional flow in Baltic Shield rock. An application of an analytical solution using hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg of SR 97. SKB R-97-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SGU, 1994. Berg och jord. Sveriges Nationalatlas. SNA.

SKB, 1999a. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Djupförvar för använt kärnbränsle. Huvudrapport (två volymer). Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 1999b. SR 97 Processer i förvarets utveckling, Underlagsrapport till SR 97. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2000. Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2001. Djupförvar för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning – Layout E. Rak ramp med två driftområden. SKB R-01-57. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2002. Övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet. SKB R-02-44. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKI, 1996. The SKI Deep Repository Performance Assessment Research Project SITE-94. SKI Report 96:36. Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.

SKI, 2002. SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2001. SKI Rapport 02:9. Statens kärnkraftinspektion, Stockholm

SOU, 2002. Utredningen svensk vattenadministrations betänkande angående införandet av EG:s ramdirektiv för vatten i Sverige. SOU 2002:105. Regeringskansliet, Stockholm.

SSI, 1998. Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSI FS 1998:1. Statens strålskyddsinstitut, Stockholm.

Stanfors R, Ericsson L O, 1993. Post-glacial faulting in the Lansjärv area, northern Sweden. Comments from the expert group on a field visit at the Molberget post-glacial fault area, 1991. SKB TR-93-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Svensson U, 2002.** DarcyTools, Concepts, methods, equations and tests. SKB Arbetsrapport TS-02-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tóth J, 1963.** A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68, pp 4795–4812.
- Tóth J, Sheng G, 1996.** Enhancing safety of nuclear waste disposal by exploiting regional groundwater flow: The recharge area concept. *Hydrogeology J.* Vol 4, No 4.
- Voss C I, Andersson J, 1993.** Regional Flow in the Baltic Shield During Holocene Coastal Regression. *Ground Water*, Vol 31, No 6.
- Voss C I, Provost A M, 2001.** Recharge-area nuclear waste repository in Southeastern Sweden, Demonstration of hydrogeologic siting concepts and techniques. Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI Report 01:44. Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.
- Wallroth T, 1997.** Vad betyder en istid för djupförvaret? SKB R-97-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Zijl W, 1999.** Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal* 7:139–150, Springer-Verlag.